

Allegato 6 bis

Studio della Dispersione
Termica dell'Acqua di Scarico
per l'Identificazione e la
Quantificazione degli Effetti
delle Emissioni in Acqua e
Confronto con SQA

Preparato per:
Edison
Centrale di Marghera Levante

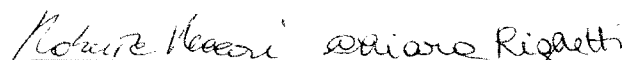



Studio della dispersione termica dell'acqua di scarico della Centrale di Marghera Levante (VE) per l'identificazione e la quantificazione degli effetti delle emissioni in acqua e confronto con SQA

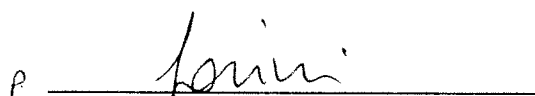
ENSR Italia Srl
Società del Gruppo AECOM
Luglio 2008
Document N°: C08.0470.0.000


Preparato per:
Edison
Centrale di Marghera Levante

Studio della dispersione termica dell'acqua di scarico della Centrale di Marghera Levante (VE) per l'identificazione e la quantificazione degli effetti delle emissioni in acqua e confronto con SQA


Preparato da Roberta Vaccari
Chiara Righetti


Verificato da Andrea Gigliuto
Paolo Pucillo


Peer Review da Luca Sanese


Approvato da Rudi Ruggeri

ENSR Italia Srl
Società del Gruppo AECOM
Luglio 2008
Document N°: R1/C08.0470.0.000

Contenuti

1.0	Introduzione	4
2.0	Definizione delle tipologie di emissioni in acqua.....	4
3.0	Valutazione degli effetti sulla matrice ambientale	6
3.1	Obiettivo dello studio	6
3.2	Impostazione metodologica	7
3.3	Dati di input e scenari di simulazione	8
3.3.1	Livelli di marea.....	9
3.3.2	Vento	9
3.3.3	Temperatura dell'aria e umidità.....	10
3.3.4	Temperatura dell'acqua ed i gradienti di densità presenti	11
3.3.5	Salinità.....	12
3.4	Scenari di simulazione	12
3.4.1	Costruzione del modello numerico tridimensionale	13
3.4.2	Costruzione della batimetria e della mesh di calcolo	13
3.4.3	Configurazione del modello tridimensionale.....	17
3.5	Risultati delle simulazioni.....	18
3.5.1	Scenario 1	19
3.5.2	Scenario 2	21
4.0	Conclusione e valutazione della rilevanza delle emissioni in acqua	23

Appendici

Appendice A: Brochure e referenze su MIKE 3 del DHI Water Environment Health

Appendice B: Direzione e velocità del vento per il sito di Marghera – distribuzione delle frequenze

1.0 INTRODUZIONE

In accordo a quanto indicato dalle “Linee Guida alla compilazione della Domanda di Autorizzazione Integrata Ambientale”, scopo del presente documento è quello di identificare e quantificare gli effetti delle emissioni in corpi idrici superficiali e di confrontarli con gli standard di qualità ambientale (SQA), al fine di pervenire ad un giudizio di rilevanza.

In particolare è richiesto che, per ciascun inquinante significativo del processo in analisi, la valutazione sia basata, generalmente, sul confronto tra il contributo aggiuntivo che il processo in esame determina al livello di inquinamento nell’area geografica interessata (CA), il livello finale d’inquinamento nell’area (LF) ed il corrispondente requisito di qualità ambientale (SQA).

La società Edison S.p.A. è titolare dell’autorizzazione allo scarico di acque di raffreddamento della Centrale Edison di Levante di Porto Marghera (VE) nella Laguna di Venezia; a tale società è stato concesso il rinnovo all’autorizzazione allo scarico N°275 dal MAV nel 4/02/2008

La centrale preleva l’acqua per il raffreddamento dei due condensatori (TV1 e TV2) dal Canale Industriale Ovest e la scarica nel Canale Malamocco. Tale scarico è denominato convenzionalmente SM3.

Al fine di identificare e quantificare gli effetti dello scarico idrico delle acque di raffreddamento della Centrale Edison di Levante di Porto Marghera (VE), è stato effettuato uno studio di dispersione termica per verificare la differenza di temperatura che comporta lo scarico idrico della centrale nel recettore finale (Laguna di Venezia) rispetto alla condizione non influenzata dallo scarico stesso.

In tale studio è stato assunto che la stessa Centrale contribuisca da sola ad immettere nel recettore finale (Laguna di Venezia) gli scarichi delle proprie acque di raffreddamento senza considerare il contributo degli scarichi delle altre unità produttive presenti a monte della Centrale.

Nel seguito si descrive la tipologia di emissione in acqua relazionabile all’esercizio della Centrale Edison di Levante di Porto Marghera (VE), valutandone l’effetto sulla matrice ambientale, anche al fine di esprimere il giudizio di rilevanza dell’effetto stesso. Il documento sarà pertanto articolato nei seguenti paragrafi:

- Definizione della tipologia di emissione in acqua;
- Valutazione degli effetti sulla matrice ambientale.
- Valutazione della rilevanza delle emissioni in acqua.

2.0 DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE DI EMISSIONI IN ACQUA

La centrale preleva acqua della laguna per il raffreddamento dei due condensatori (TV1 e TV2) dal Canale Industriale Ovest e la scarica nel Canale Malamocco, entrambi facenti parte dello stabilimento di Porto Marghera.

La Centrale è localizzata sulla sponda ovest del Canale Malamocco Marghera, immediatamente a sud del Canale Industriale Ovest. L’acqua di raffreddamento è prelevata dal Canale Industriale Ovest e scaricata nel Canale Malamocco Marghera. La localizzazione della centrale, unitamente alle opere di presa e scarico è presentata nelle seguenti Figura 1 e Figura 2.

La centrale impiega per il raffreddamento, nel funzionamento normale, la portata di esercizio a pieno regime pari

a circa 47.000 m³/h (13.05 m³/s). Lo scarico si trova orientato obliquamente rispetto al canale con una direzione di flusso verso sud. L'acqua viene scaricata con un incremento di temperatura variabile a seconda del carico elettrico e della fornitura vapore ai clienti e può raggiungere il valore di circa 8°C nel caso di massimo carico elettrico e piena condensazione di vapore, considerando lo scenario futuro che prevede la trasformazione dei turbogas TG3 e TG4 da Steam Injection a DLN e quindi con un incremento di vapore in condensazione ai condensatori TV1 e TV2 di circa 70 tonn/ora.



Figura 1 - Localizzazione planimetrica dell'area della centrale Edison Levante nel Porto di Marghera.



Figura 2 – Localizzazione dei punti di presa e scarico della centrale Edison Levante.

3.0 VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI SULLA MATRICE AMBIENTALE

Al fine di valutare il Contributo Aggiuntivo (CA) che le emissioni precedentemente identificate possono esercitare sulla matrice ambientale, si è proceduto all'effettuazione di uno studio di dispersione termica per verificare la differenza di temperatura che comporta lo scarico idrico della centrale di Marghera Levante (Ve) nella Laguna di Venezia rispetto alla condizione non influenzata dallo scarico stesso.

La normativa di riferimento è il D.M. 23 aprile 1998 recante requisiti di qualità delle acque e caratteristiche degli impianti di depurazione per la tutela della laguna di Venezia. Il decreto stabilisce che la temperatura del corpo ricettore a 100 metri dallo scarico non deve superare di più di 3 °C quella delle acque in assenza di scarico.

3.1 Obiettivo dello studio

Obiettivo dello studio è la valutazione dell'incremento termico dovuto allo scarico ad una distanza di 100 metri dallo stesso, al fine di verificarne la rispondenza agli obiettivi di qualità.

L'oggetto dello studio è l'analisi delle dinamiche di propagazione e dispersione nella Laguna di Venezia dei volumi di acqua di raffreddamento rilasciati dalla centrale termoelettrica Edison Levante di Porto Marghera, in

riferimento a diversi scenari climatici.

3.2 Impostazione metodologica

Lo studio delle dinamiche di propagazione e dispersione delle acque di raffreddamento dalla Centrale presenta un elevato grado di complessità date le molteplici forzanti in grado di esercitare un'influenza significativa sulla propagazione termica; in particolare, la conformazione del pennacchio termico è in larga parte dominata dai flussi di corrente presenti nel canale ricettore per effetto di avvezione, a cui si sommano una componente di pura dispersione e gli effetti dovuti agli scambi termici con l'atmosfera.

I flussi di corrente nel Canale Malamocco presentano un carattere fortemente irregolare, sia in termini spaziali che temporali.

In termini spaziali, le correnti nell'area di rilascio sono influenzate in modo significativo dallo scarico stesso, le cui componenti di deflusso si sommano alle correnti dell'intero canale, a loro volta fortemente dipendenti dalle oscillazioni di marea e dal vento, oltre a risentire, a livello locale, anche dei gradienti di densità dovuti alle diverse temperature nel sistema.

Oltre alle correnti, che dominano la conformazione del pennacchio termico, anche la temperatura stessa del corpo ricettore risulta fortemente variabile nel tempo, in funzione sia degli scambi di calore con l'aria sia dell'irraggiamento solare.

Al fine di definire un approccio metodologico deterministico, è stato inizialmente necessario isolare ed analizzare tutte le forzanti in grado di esercitare un'influenza significativa sul sistema e definire, sulla base di queste, opportuni scenari di riferimento per le successive analisi.

In particolare, le forzanti individuate come significative per la dispersione termica risultano essere:

- la corrente generata dallo scarico;
- le oscillazioni di marea;
- il vento;
- la temperatura dell'acqua ed i gradienti di densità presenti;
- la temperatura ed umidità dell'aria;
- l'irraggiamento solare.

Per ognuna delle componenti sopra elencate è stata inizialmente condotta una fase di acquisizione ed analisi dei dati disponibili volta alla definizione degli scenari di studio, in riferimento ai quali sono stati implementati un modello idrodinamico, per la simulazione di flussi e correnti, ed un contestuale modello di avvezione-dispersione, per la simulazione della componente termica.

A fronte dell'elevato numero di componenti in gioco e della complessità delle correnti presenti, è risultato necessario affrontare lo studio utilizzando un modello numerico tridimensionale, in grado di simulare le correnti e la dispersione del pennacchio termico in tutte le sue componenti direzionali, tenendo anche conto dei gradienti di densità dovuti alla variabile temperatura nei diversi punti di calcolo.

In particolare, lo studio è stato condotto utilizzando i moduli HD (hydrodynamics) ed AD (advection-dispersion) del codice di calcolo MIKE 3 del DHI Water Environment Health (cfr. Appendice A)

Il modulo HD è stato utilizzato per riprodurre le correnti caratteristiche del sito in esame nei diversi scenari di riferimento, nonché conseguenti alle diverse modalità di scarico ipotizzate nell'ambito dello studio; contestualmente, il modulo AD ha invece consentito di simulare, passo dopo passo, tutte le componenti termiche del sistema analizzato e la relativa influenza, in qualità di gradienti di densità, sulle stesse correnti, fornendo le informazioni richieste in termini di temperatura raggiunta nei diversi punti di calcolo ed istanti temporali di simulazione.

Con il modello così costruito è stato necessario analizzare molteplici scenari "climatici" facendo in particolare riferimento ad una condizione invernale e ad una estiva.

A fronte del carattere tempo-variante di tutte le grandezze del sistema, ed in particolare della temperatura dell'acqua, anche in assenza di scarico, il modello così impostato è stato inizialmente utilizzato per ricostruire, sulla base dei dati a disposizione, uno scenario adeguatamente rappresentativo della realtà fisica in termini di distribuzione nelle 3 dimensioni della temperatura e delle relative variazioni temporali.

Tale stato del sistema, risultante dall'azione degli scambi termici con l'aria e dell'irraggiamento solare per un lungo periodo, è stato poi utilizzato come condizione iniziale per le simulazioni nei diversi scenari in presenza ed assenza di scarico, dalla cui differenza è stato possibile definire i valori dell'incremento di temperatura indotto dallo scarico della Centrale nei diversi punti di calcolo ed istanti temporali.

3.3 Dati di input e scenari di simulazione

Come anticipato nel capitolo precedente, il sistema oggetto dello studio risulta governato da molteplici forzanti in grado di esercitare un'influenza significativa sulla dispersione del pennacchio termico; in particolare, in fase di impostazione dello studio sono stati individuati i seguenti fattori:

- la corrente generata dallo scarico;
- le oscillazioni di marea;
- il vento;
- la temperatura dell'acqua ed i gradienti di densità presenti;
- la temperatura ed umidità dell'aria;
- l'irraggiamento solare;
- la temperatura dello scarico.

Ai fini del presente studio è risultato quindi necessario individuare una serie limitata di scenari caratteristici, che potessero sintetizzare il comportamento generale del sistema, sia in termini di idrodinamica, sia di dispersione dell'incremento di temperatura.

Per definire gli opportuni scenari di simulazione, è stato quindi inizialmente necessario acquisire ed analizzare tutta la documentazione esistente atta a caratterizzare da un punto di vista numerico le componenti sopra elencate.

3.3.1 Livelli di marea

Dato il carattere costante delle modalità di scarico della Centrale, la componente dominante il sistema risulta essere la marea, le cui oscillazioni e livelli risultano essere somma di molteplici componenti con frequenza variabile da semidiurna ad annuale.

Il ciclo di marea simulato, considerato rappresentativo dell'andamento tipico delle oscillazioni di livello a Marghera dovute a cause astronomiche (Sigizie e Quadratura), è quello compreso tra le ore 12.00.00 del 24/10/2004 e le ore 12.00.00 del 07/11/2004, per un totale di 14 giorni. In Figura 3 è illustrata la serie temporale di 14 giorni utilizzata come forzante di livello nel primo degli scenari simulati.

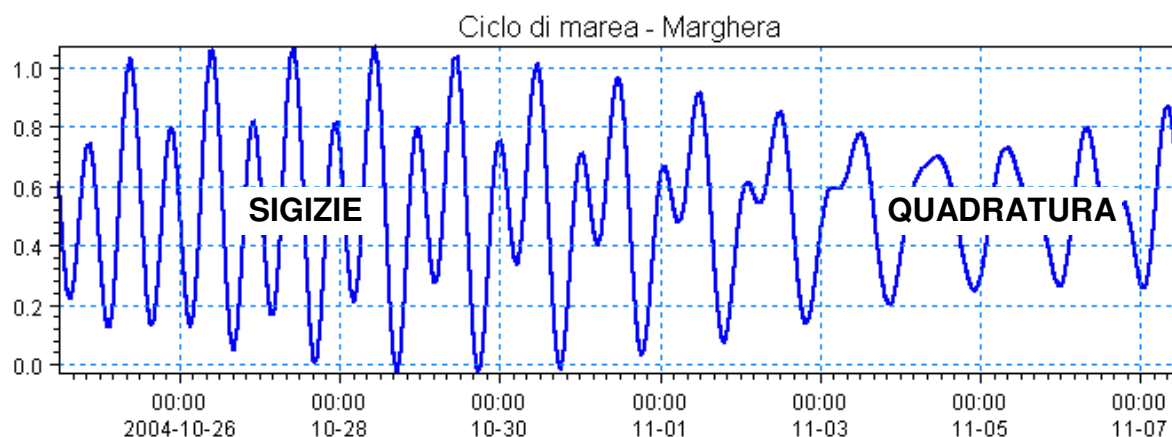


Figura 3 - Oscillazione di marea tipica per il sito di Marghera per un periodo di 14 giorni.

L'intero ciclo di marea di 14 giorni ha costituito lo scenario di simulazione di base, in riferimento al quale sono state condotte le simulazioni relative alla stagione estiva ed invernale, sia in assenza che in presenza di vento.

3.3.2 Vento

Il clima anemometrico del sito di Marghera è stato caratterizzato sulla base dei dati raccolti dall'Ente della Zona Industriale di Porto Marghera presso la stazione Torre Pompieri, per il periodo 01.01.1976 – 31.12.2004.

La rosa di distribuzione dei venti è riportata nella seguente Figura 4. Il periodo di osservazione risulta sufficientemente esteso per caratterizzare in modo significativo il sito in esame (cfr. Appendice B).

L'analisi dei dati, inerenti una centralina posta a 40 m di quota, evidenzia una componente principale di vento di Bora, con direzione di provenienza 45°N, caratterizzata dalle maggiori frequenze ed intensità. In particolare si osserva che nel periodo di monitoraggio si riscontrano velocità di vento superiori a 12 m/s solamente nello 0.08% dei casi, che si verificano nel periodo invernale. Inoltre è da tenere presente che tale valore risulta comunque sovrastimato se si considera la velocità del vento in prossimità del piano campagna e del pelo libero dell'acqua.

ROSA DEI VENTI - 01/01/1976÷131/12/2004
campi di velocità del vento
 - stazione n. 22 - quota 40 m -

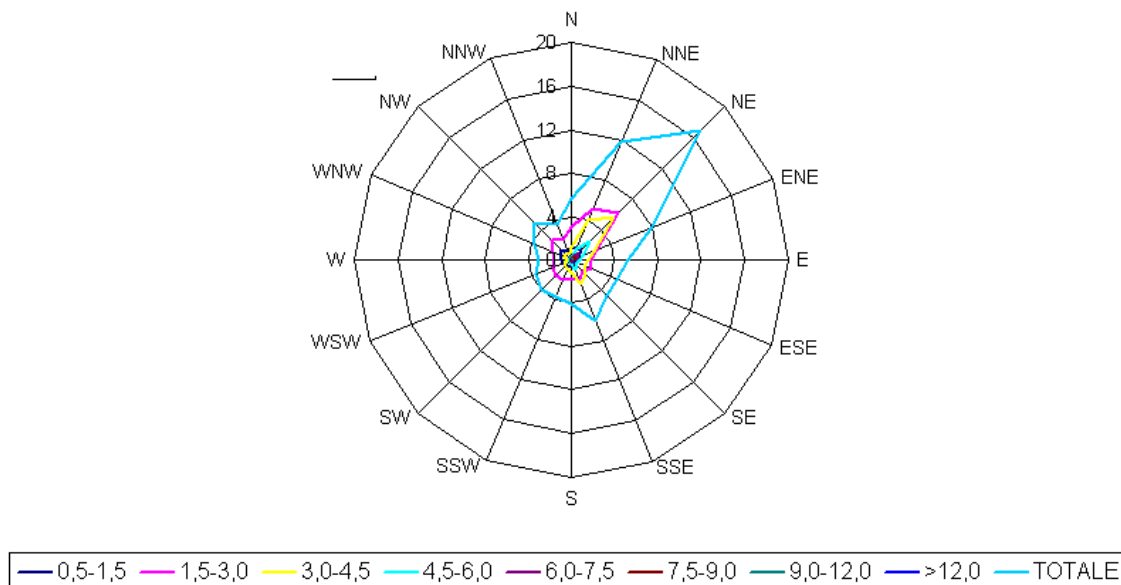


Figura 4 - Rosa dei venti per il sito di Marghera

Al fine di simulare una situazione di vento estrema, è stato ritenuto significativo considerare nelle simulazioni dello scenario invernale anche la presenza di un vento di Bora intenso, di velocità pari a 15 m/s. Tale scenario deve essere quindi considerato una situazione estrema raramente riscontrabile in sito. Le simulazioni comprensive della forzante “vento” sono state limitate ad una durata di 48 ore, considerata sufficiente per valutare gli effetti anemometrici sul pennacchio termico. Sia la durata del vento che l’intensità sono comunque sovrastimate rispetto ai casi reali; venti di tale intensità, oltre ad essere rari in termini di frequenza, hanno una durata di poche ore.

3.3.3 Temperatura dell’aria e umidità

Nell’ambito delle simulazioni numeriche, al fine di poter analizzare con maggiore accuratezza l’influenza delle diverse oscillazioni di marea, si è scelto di assumere una serie temporale di temperatura ed umidità dell’aria ciclica giornaliera. In particolare, le serie adottate nelle simulazioni sono state così definite:

- temperatura dell’aria variabile in estate tra 20 e 28 °C;
- umidità dell’aria variabile in estate tra 60 ed 80%;
- temperatura dell’aria variabile in inverno tra 2 e 12 °C;
- umidità dell’aria variabile in inverno tra 75 e 95%.

3.3.4 Temperatura dell'acqua ed i gradienti di densità presenti

Per la caratterizzazione del sistema dal punto di vista termico, oltre a dati di temperatura ed umidità dell'aria, che in un bacino chiuso sarebbero sufficienti a determinare con una simulazione di lungo periodo l'andamento ciclico delle temperature nel sistema, sono utilizzati sia i dati relativi alle acque in ingresso ai condensatori della Centrale, sia i dati derivanti dall'attività di monitoraggio svolta dal Magistrato alle Acque di Venezia, resi disponibili per lo studio.

Tali dati sono stati utilizzati per individuare le temperature medie di riferimento da assumere come condizioni iniziali per il sistema, le cui variazioni termiche, in assenza dello scarico della Centrale od altri elementi antropici, sono regolate, durante il periodo di simulazione, dagli scambi termici con l'atmosfera.

La seguente Figura 5 presenta, relativamente al periodo Settembre 2004 – Settembre 2007, l'andamento temporale della temperatura dell'acqua in ingresso ai condensatori, registrato dalla Centrale.

Il grafico evidenzia un andamento ciclico stagionale della temperatura, con valori compresi tra 4 e 30°C

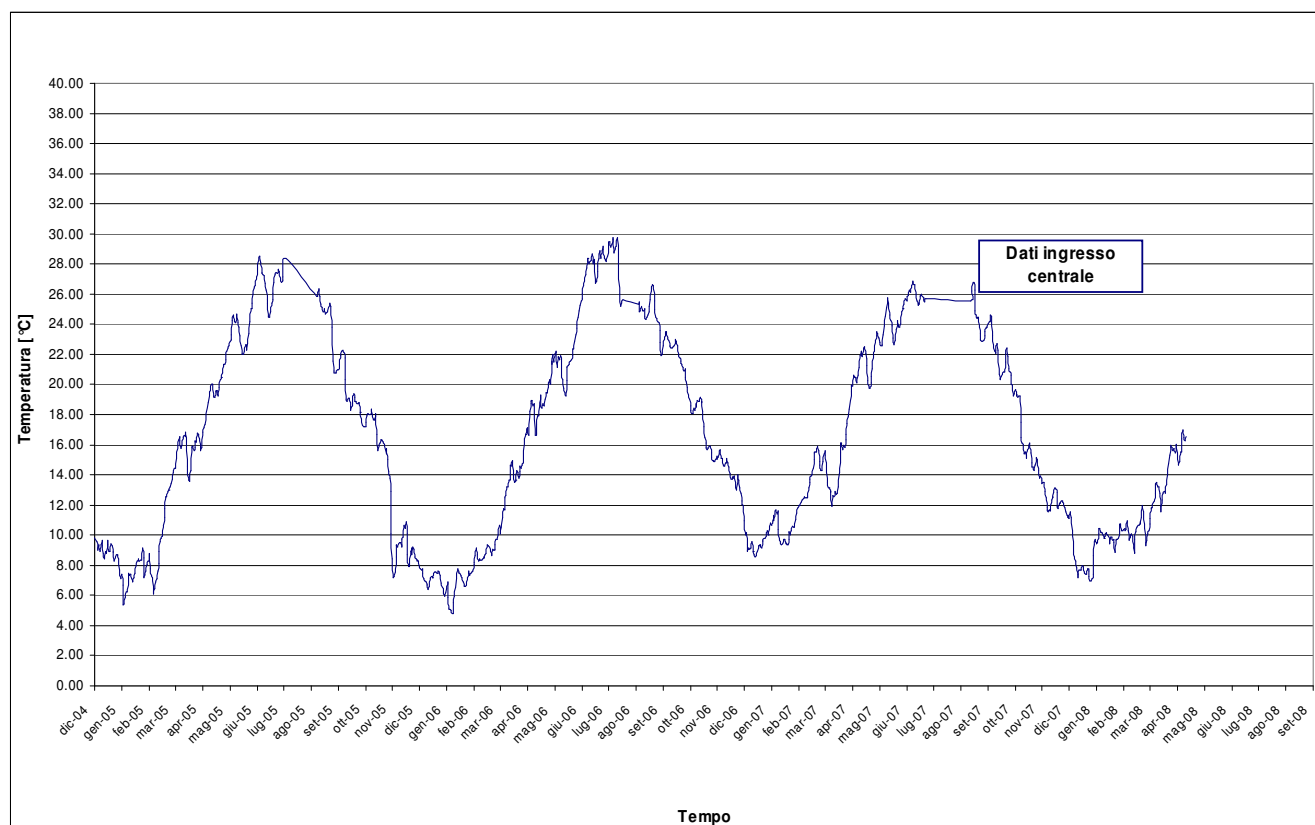


Figura 5 – Temperatura in ingresso ai condensatori registrata dalla Centrale.

A seguire invece, nella Figura 6, sono presentati i valori risultanti dall'attività di monitoraggio svolta dal Magistrato alle Acque di Venezia (M.A.V. – Sezione Antinquinamento), relativamente all'opera di presa della Centrale Marghera Levante. Tali dati sono riportati nel grafico relativo alle misurazioni effettuate in ingresso alla centrale di Levante, al fine di valutare la corrispondenza tra gli stessi.

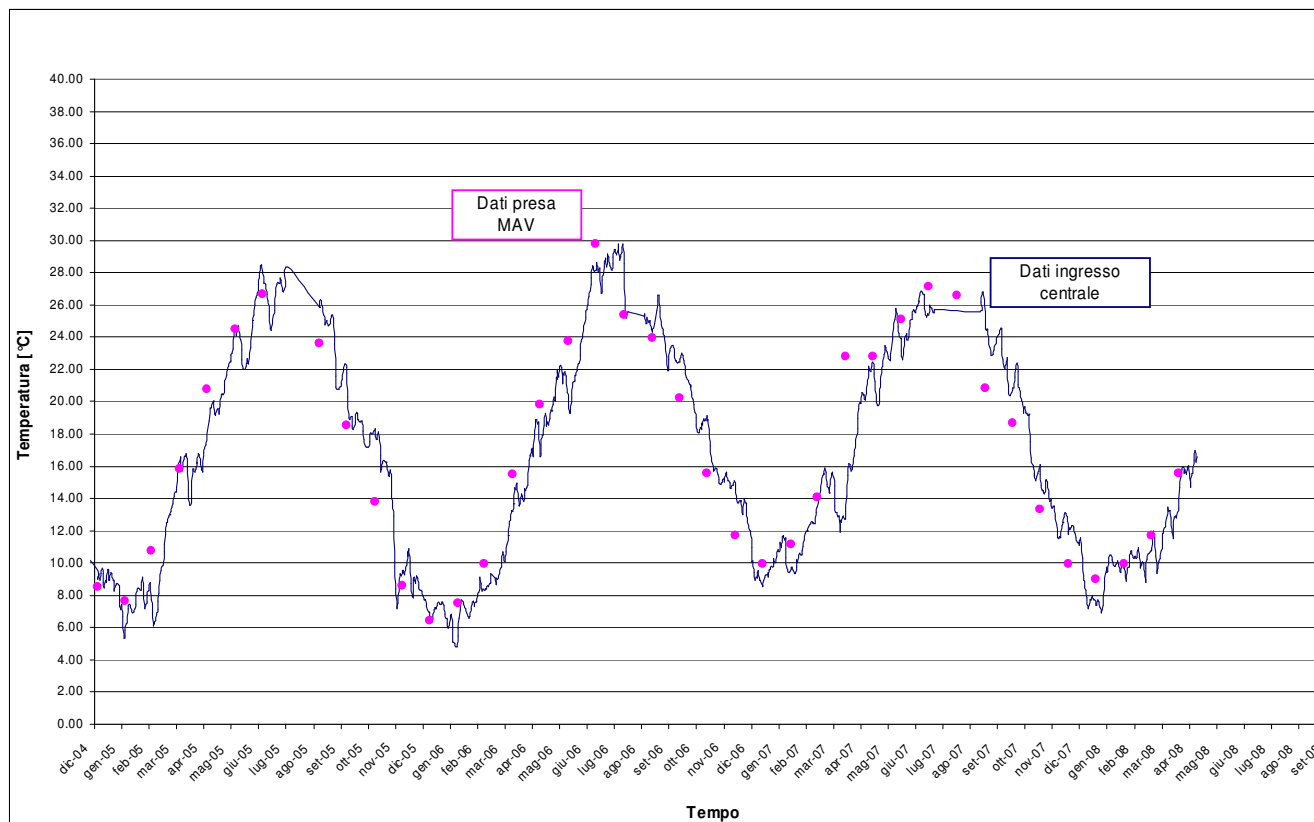


Figura 6 - Temperatura in ingresso ai condensatori registrata dalla Centrale (in marrone) confrontata con i dati di temperatura derivanti dai monitoraggi del Magistrato alle Acque di Venezia (in viola).

Al fine di considerare nelle simulazioni numeriche le condizioni più estreme, sono stati selezionati come riferimento i mesi di Gennaio e Luglio. Tali mesi presentano temperature medie dell'acqua della laguna all'opera di presa pari a 5°C per gennaio e 29°C per Luglio.

3.3.5 Salinità

Dal momento che i dati di osservazione evidenziano infatti valori pressoché costanti sulla colonna d'acqua per tutto il periodo di osservazione, non è risultato significativo considerare nel modello numerico una variabilità spaziale di tale parametro.

La salinità è stata assunta con valore costante a livello sia planimetrico che temporale. Sulla base dell'analisi dei dati storici della laguna si è assunta una salinità pari a 32 PSU.

3.4 Scenari di simulazione

Sulla base dell'impostazione metodologica sopradescritta e dei dati presentati sopra, nell'ambito del presente studio sono stati analizzati i seguenti scenari di simulazione:

1. condizione invernale, ciclo di marea di 14 gg in assenza e presenza di vento di Bora;
2. condizione estiva, ciclo di marea di 14 gg in assenza di vento;

3.4.1 Costruzione del modello numerico tridimensionale

Come già anticipato sopra, a fronte dell'elevato numero di componenti in gioco e della complessità delle correnti presenti, è risultato necessario affrontare lo studio utilizzando un modello numerico tridimensionale, in grado di simulare i flussi e la dispersione dell'incremento di temperatura in tutte le sue componenti direzionali, tenendo anche conto dei gradienti di densità nei diversi punti di calcolo.

In particolare, lo studio è stato condotto utilizzando i moduli HD (hydrodynamics) ed AD (advection-dispersion) del codice di calcolo MIKE 3 del DHI Water Environment Health.

Il modello è tridimensionale, non idrostatico, e risolve le equazioni del moto e di continuità nelle tre direzioni cartesiane.

3.4.2 Costruzione della batimetria e della mesh di calcolo

Il dominio di calcolo è stato rappresentato mediante una batimetria estesa a tutta l'area del porto di Marghera, chiusa in corrispondenza dei 3 accessi, nei quali sono state imposte le condizioni al contorno del modello. Si precisa che i dati delle batimetrie riferite all'area di Porto Marghera sono stati estrapolati dalla Carta Tecnica Regionale (CTR) della Regione Veneto e da stralci progettuali inerenti i canali del sito.

Nella seguente Figura 7 si riporta uno stralcio semplificato della configurazione dello scarico (vista in pianta).

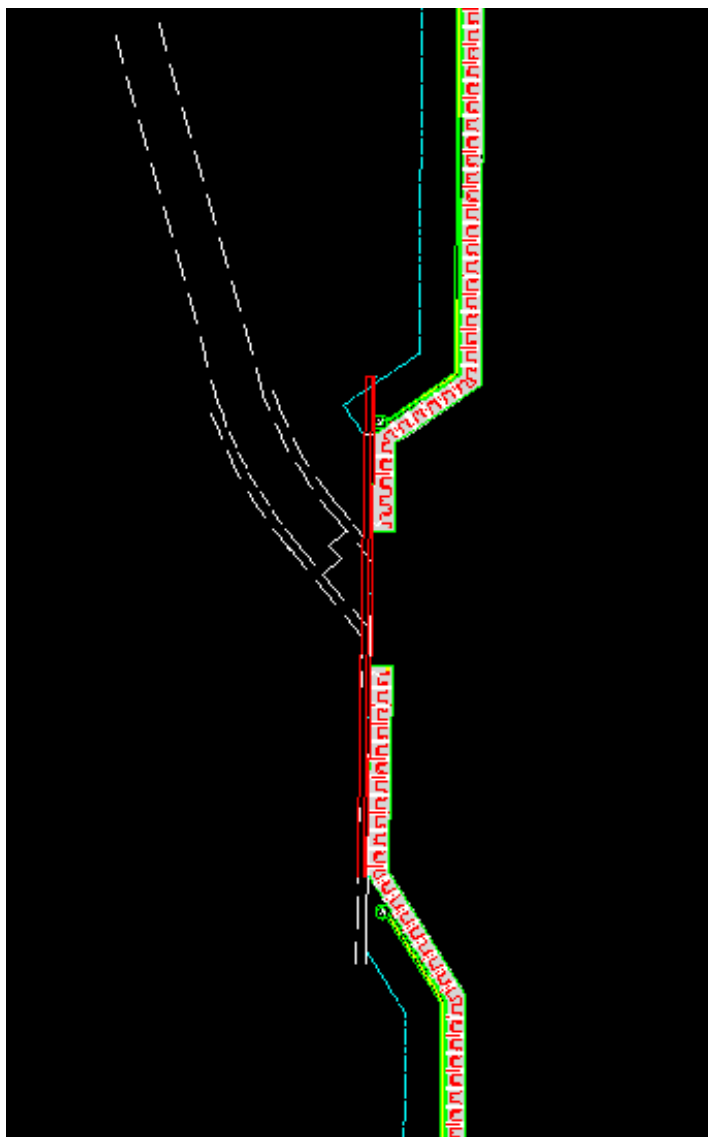


Figura 7 - Conformazione geometrica dell'opera di scarico assunta per le simulazioni.

I diversi moduli del codice di calcolo MIKE 3 sono stati utilizzati nella versione ai volumi finiti, in cui il dominio di calcolo è discretizzato planimetricamente sulla base di triangoli a dimensione variabile, utilizzando quindi una risoluzione differente in funzione del dettaglio richiesto dalla descrizione dei processi in ogni singola area. In particolare, anche al fine di simulare adeguatamente la dispersione del pennacchio termico nell'intorno dello scarico, è stato necessario utilizzare una maglia di calcolo molto fitta nella zona di rilascio, con triangoli di area anche inferiore a 5 m^2 , aumentando progressivamente la dimensione degli stessi al crescere della distanza dallo scarico

Le aree più lontane dallo scarico sono schematizzate con triangoli di superficie maggiore.

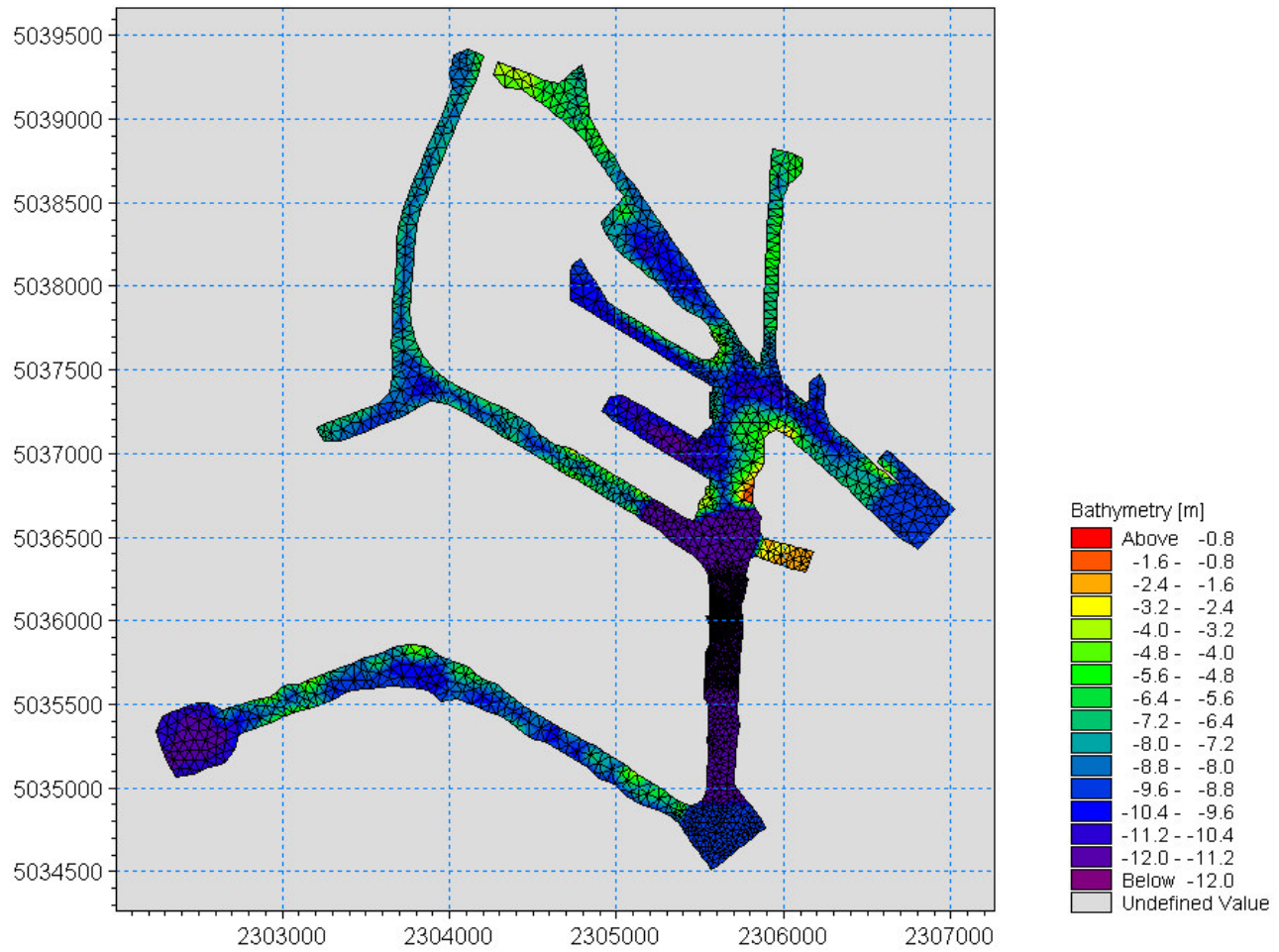


Figura 8 - Maglia di calcolo utilizzata nel modello numerico.

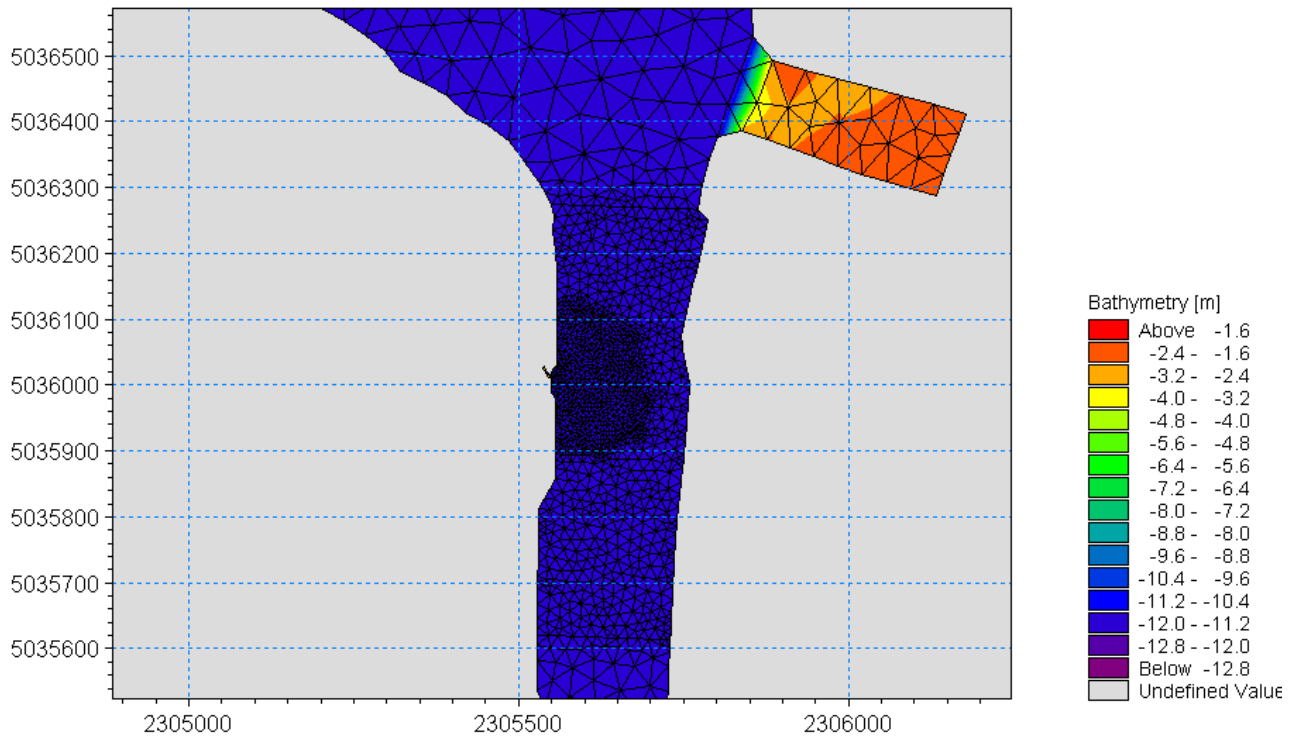


Figura 9 - Maglia di calcolo utilizzata nel modello numerico, dettaglio del canale Malamocco.

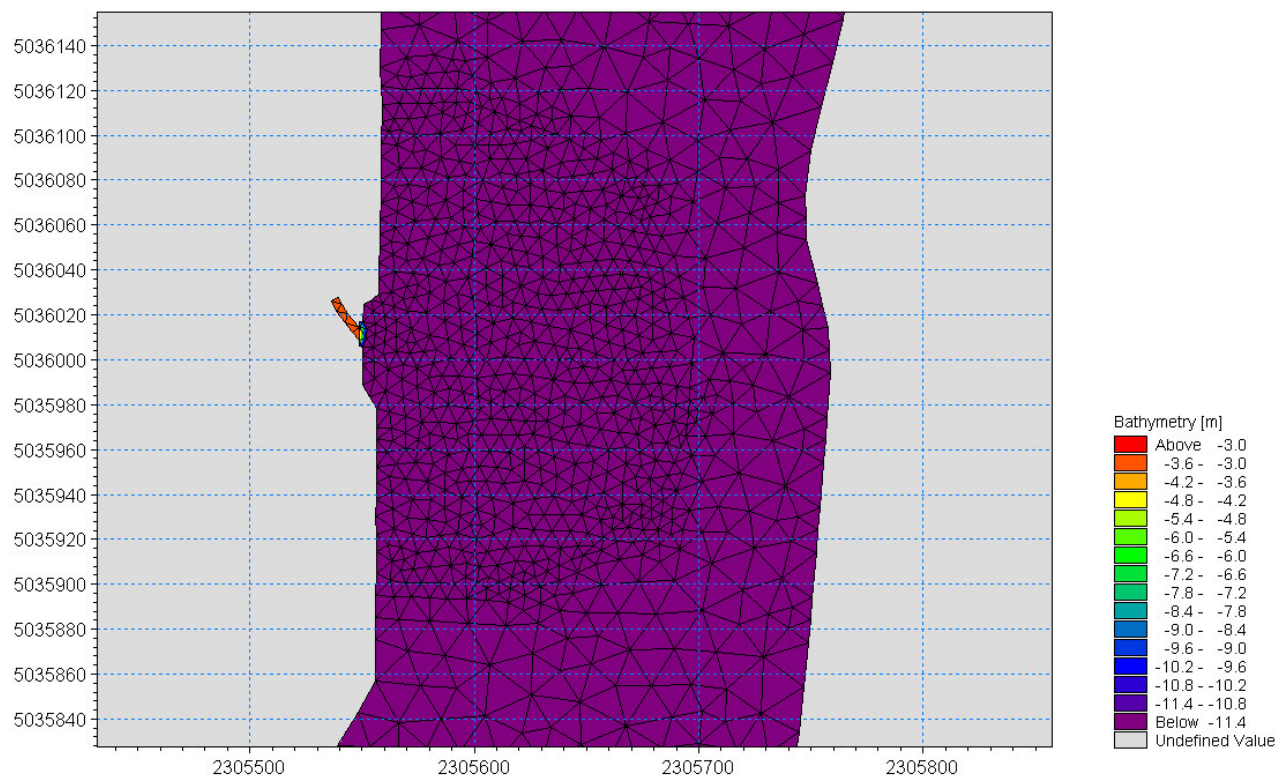


Figura 10 - Maglia di calcolo utilizzata nel modello numerico, dettaglio dell'area di scarico.

La dimensione verticale è stata discretizzata nel modello mediante layer a spessore variabile, definiti *sigma-layers*. Il numero dei layer verticali, costante in tutto il dominio di calcolo come evidenziato nella successiva Figura 11 è stato assunto pari a 5, definendo quindi strati di spessore variabile tra 0.5 metri e 2.5 metri in funzione della profondità locale.

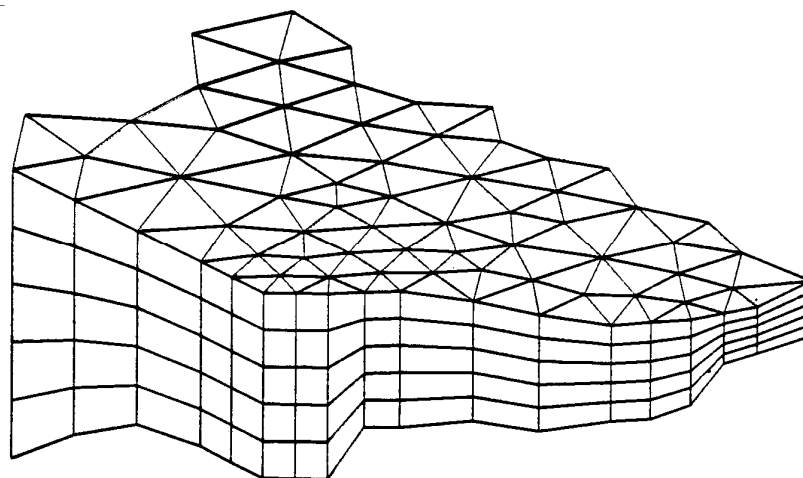


Figura 11 - Discretizzazione in layer dell'asse verticale.

Complessivamente, la mesh di calcolo è costituita da 23020 elementi di area variabile, strutturati su 5 layers verticali.

3.4.3 Configurazione del modello tridimensionale

Per la simulazione di flussi e correnti generate dalle forzanti caratteristiche di ogni scenario è stato utilizzato il modulo HD di MIKE 3.

Il modello è tridimensionale, non idrostatico, e risolve le equazioni del moto e di continuità nelle tre direzioni, con schema di calcolo ai volumi finiti.

MIKE 3 è in grado di simulare flussi non stazionari tenendo in considerazione le variazioni di densità, forzanti esterne quali quelle meteorologiche, le variazioni di marea, le correnti ed altri fattori influenti sul sistema.

Nel modulo idrodinamico le variabili incognite sono le componenti della velocità nelle tre direzioni e la pressione del fluido.

Al modello sono state imposte condizioni al contorno in corrispondenza dei punti aperti del dominio di calcolo ed in particolare presso le tre imboccature dell'area portuale e lo scarico della centrale, come evidenziato nella successiva Figura 12.

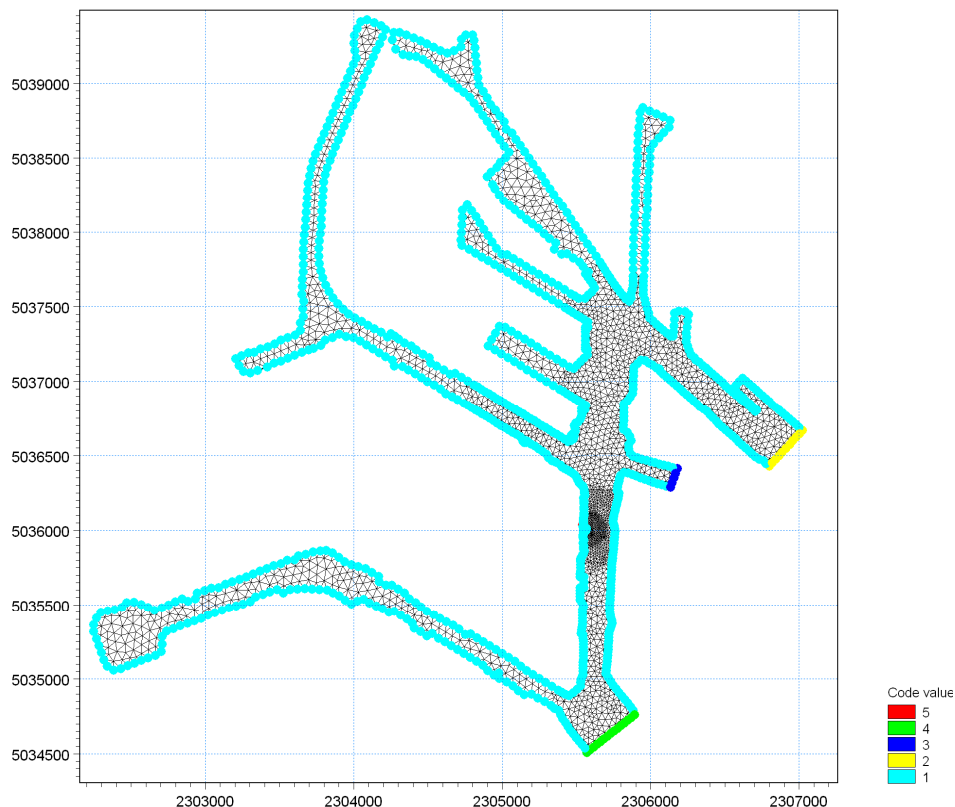


Figura 12 - Condizioni al contorno impostate nel modello numerico. Con il codice 1 sono identificati i tratti chiusi.

In corrispondenza delle 3 imboccature del porto (codici 2, 3 e 4) è stata sempre impostata una condizione al contorno di livello, atta a rappresentare le oscillazioni di marea presentate in sede di definizione degli scenari.

La condizione al contorno relativa allo scarico è invece caratterizzata, nel modello idrodinamico, dalla portata di efflusso, pari a 47.000 m³/h

3.5 Risultati delle simulazioni

Tutti i risultati sono presentati sempre in termini di incremento di temperatura. Per ogni scenario, infatti, a partire dalle condizioni iniziali determinate secondo le modalità presentate nei paragrafi precedenti, sono state condotte sempre 2 diverse simulazioni considerando sia l'assenza, sia la presenza dello scarico della Centrale.

Come già anticipato, la simulazione in assenza di scarico è stata sempre condotta preventivamente, poiché i relativi risultati presso l'opera di presa sono serviti a costruire la serie di temperatura allo scarico aggiungendo a questa l'incremento di temperatura di 8°C. Per questo, nel presentare i risultati relativi ad ogni singolo scenario, vengono anche indicati i valori della temperatura considerata alla presa.

Viene qui presentata una sintesi dei risultati con particolare riferimento all'incremento di temperatura risultante dalle simulazioni nell'intorno dell'area di rilascio e ad una distanza di 100 metri dal punto di scarico..

I risultati sono presentati, relativamente a 8 punti posti su un arco di circonferenza avente raggio 100 m e centro nel punto di scarico la cui localizzazione è riportata in Figura 13. Tali risultati vengono esposti come incrementi

medi giornalieri della temperatura conseguentemente allo scarico delle acque di raffreddamento nei differenti scenari.

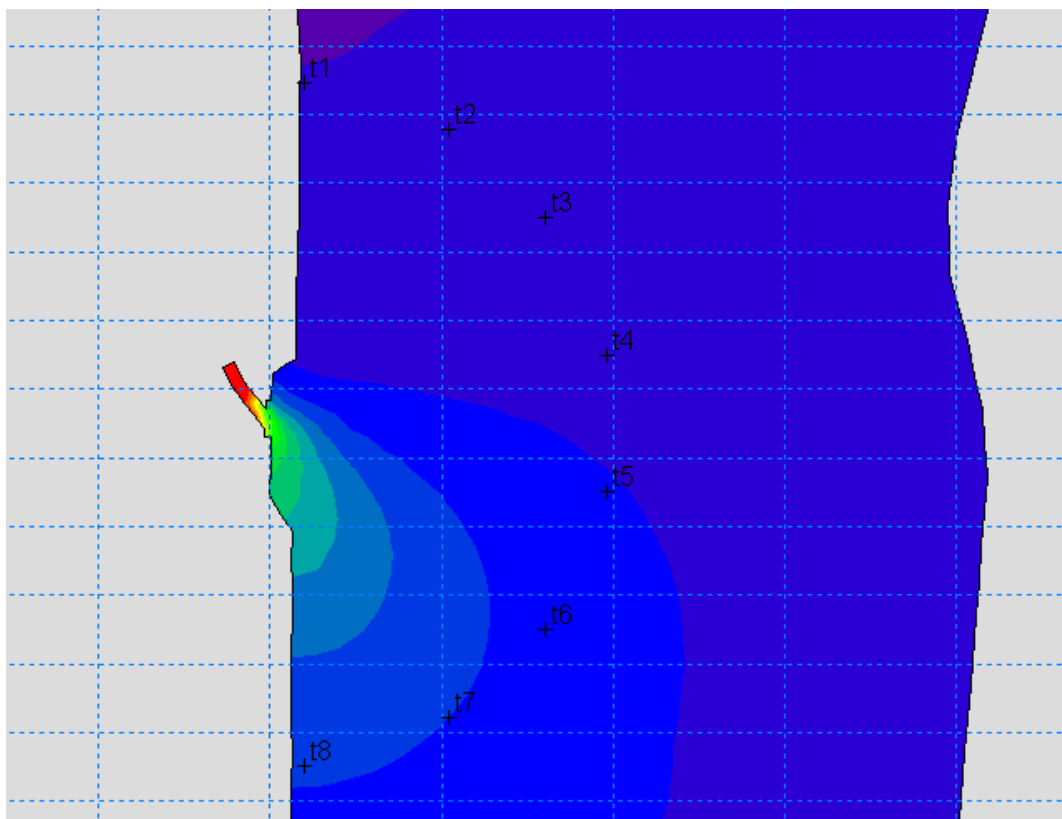


Figura 13 - Localizzazione planimetrica dei punti di estrazione della temperatura.

Al fine di fornire il quadro complessivo della dinamica di dispersione del pennacchio termico, nei successivi paragrafi, vengono presentati i risultati relativi agli scenari considerati.

3.5.1 Scenario 1

Lo scenario 1 è relativo alle condizioni invernali in presenza e assenza di vento di Bora. Il periodo di simulazione copre interamente i 14 giorni del ciclo di marea, comprensivo di una condizione di Szigie ed una di Quadratura.

La simulazione è collocata cronologicamente nella seconda metà di Gennaio 2008, con temperatura dell'aria variabile tra il giorno e la notte tra 2 e 12°C ed umidità relativa tra 75 e 95%. La componente di irraggiamento solare è calcolata dal modello numerico sulla base della stagione di riferimento e della longitudine e latitudine della batimetria di simulazione.

La temperatura dell'acqua in condizioni indisturbate all'opera di presa risulta essere compresa tra 3.8 e 4.8°C con conseguenti valori della temperatura allo scarico compresi tra 11.8 e 12.8°C, in funzione delle oscillazioni tra il giorno e la notte e lo scambio termico con l'aria. Lo scenario simulato fa quindi riferimento ad una condizione di temperatura particolarmente rigida rispetto alle medie stagionali evidenziate dai dati della Centrale e del Magistrato alle Acque.

Mediamente il pennacchio presenta un'orientazione principale verso sud, conseguente alla geometria del canale di scarico ed alla corrente nel Canale Malamocco.

Al fine di verificare la rispondenza delle modalità di scarico con gli obiettivi di qualità per la Laguna di Venezia, come già anticipato in apertura di capitolo, i risultati relativi all'incremento di temperatura sono stati ulteriormente sintetizzati in riferimento ad 8 punti specifici, posti ad una distanza pari a 100 metri dallo scarico, e presentati come medie giornaliere.

Le simulazioni dello scenario in assenza di vento hanno evidenziato come tutti i punti risultino influenzati dallo scarico, con valori dell'incremento medio giornaliero di temperatura che risultano sempre inferiori al limite di 3 °C, oscillando mediamente tra 0 e 2 °C.

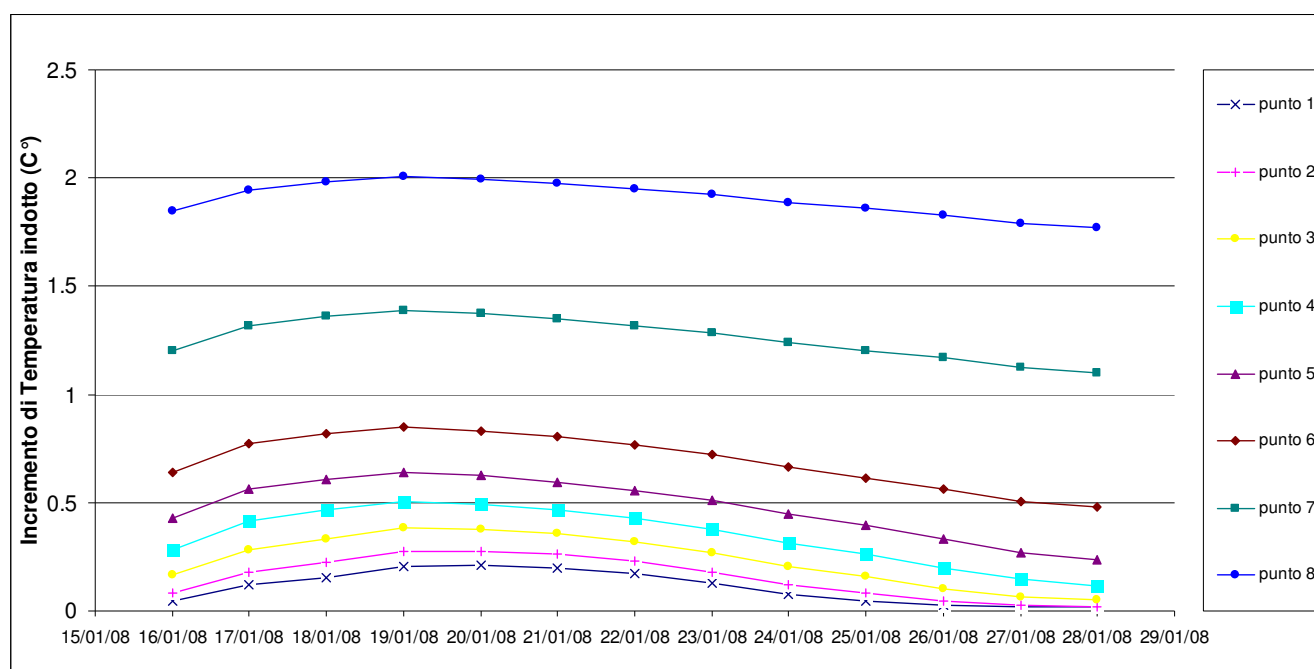


Figura 14 – Scenario 1 in assenza di vento: Grafico degli andamenti degli incrementi di temperatura allo scarico espressi come medie giornaliere, in corrispondenza degli 8 punti di riferimento.

Le simulazioni dello scenario in presenza di vento di Bora, mostrano un effetto del vento sia sulle correnti nell'area portuale che, direttamente, sul pennacchio termico. Le correnti sono caratterizzate da un aumento della velocità in direzione Sud-Est. Data l'orientazione del Canale Malamocco, il vento determina, nell'area dello scarico, un incremento delle correnti in direzione Sud che facilita la dispersione del pennacchio termico. Lo stesso vento contrasta anche la dispersione del pennacchio verso il centro del Canale.

Il vento esercita anche un'azione diretta sulla temperatura del sistema, incrementando gli scambi termici con l'aria. Le simulazioni evidenziano quindi una riduzione dell'incremento di temperatura, che oscilla tra 0 e 1,3 °C.

Complessivamente la Bora determina quindi un effetto positivo aumentando la dispersione del pennacchio e riducendo di conseguenza i valori dell'incremento di temperatura nell'intorno dello scarico.

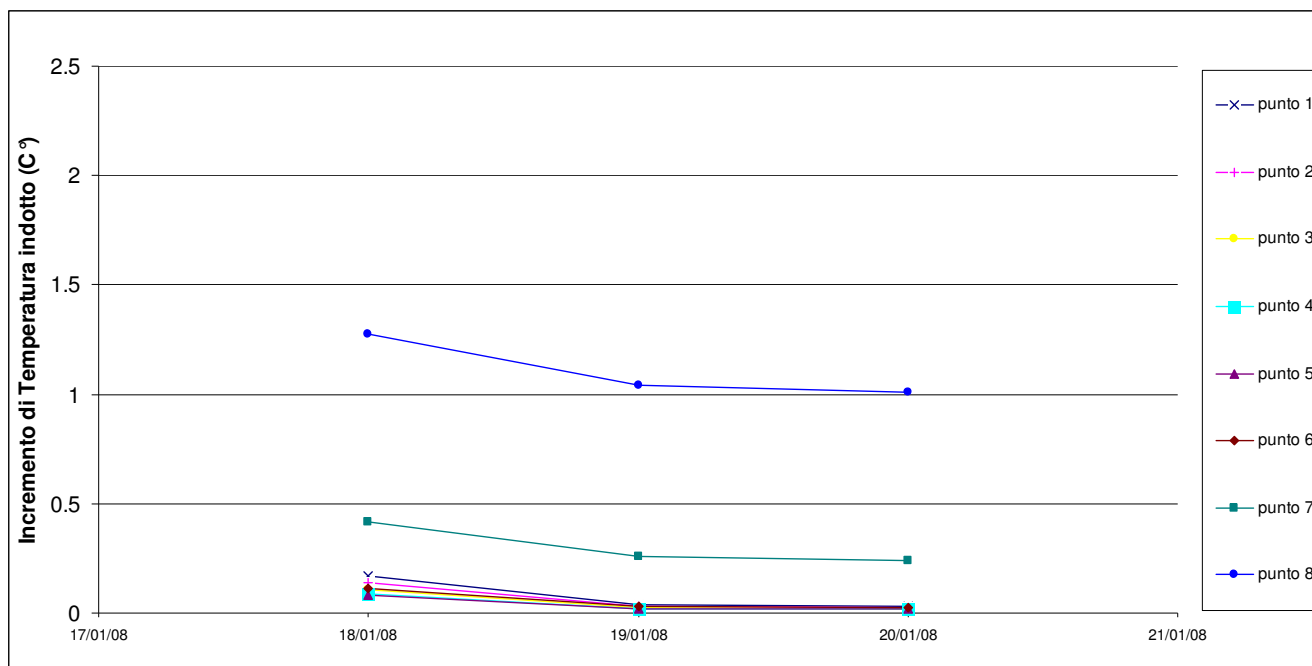


Figura 15 – Scenario 1 in presenza di vento di Bora: Grafico degli andamenti degli incrementi di temperatura allo scarico espressi come medie giornaliere, in corrispondenza degli 8 punti di riferimento.

3.5.2 Scenario 2

Lo scenario 2 è relativo alle condizioni estive in assenza di vento. Il periodo di simulazione copre interamente i 14 giorni del ciclo di marea, comprensivo di una condizione di Szigie ed una di Quadratura.

La simulazione è collocata cronologicamente nella seconda metà di Luglio 2008, con temperatura dell'aria variabile tra il giorno e la notte tra 20 e 28° ed umidità relativa tra 60 e 80%. La componente di irraggiamento solare è calcolata dal modello numerico sulla base della stagione di riferimento ed alla longitudine e latitudine della batimetria di simulazione.

La temperatura dell'acqua in condizioni indisturbate all'opera di presa risulta essere mediamente pari a 29°C con conseguenti valori della temperatura allo scarico pari a 37°C circa, variabili in funzione delle oscillazioni tra il giorno e la notte e dello scambio termico con l'aria. Lo scenario simulato fa quindi riferimento ad una condizione operativa estrema, particolarmente gravosa in termini di temperature e raramente riscontrabile.

Le simulazioni relative allo scenario estivo evidenziano risultati in linea con quanto già presentato in relazione alle condizioni invernali; vengono di seguito presentati i risultati (cfr. Figura 16) relativi agli 8 punti di riferimento introdotti in precedenza, con riferimento alle medie giornaliere degli incrementi di temperatura..

L'incremento di temperatura risulta sempre inferiore ai 3°C, obiettivo di qualità per la laguna di Venezia, con valori mediamente compresi tra 0.5 e 2.4°C.

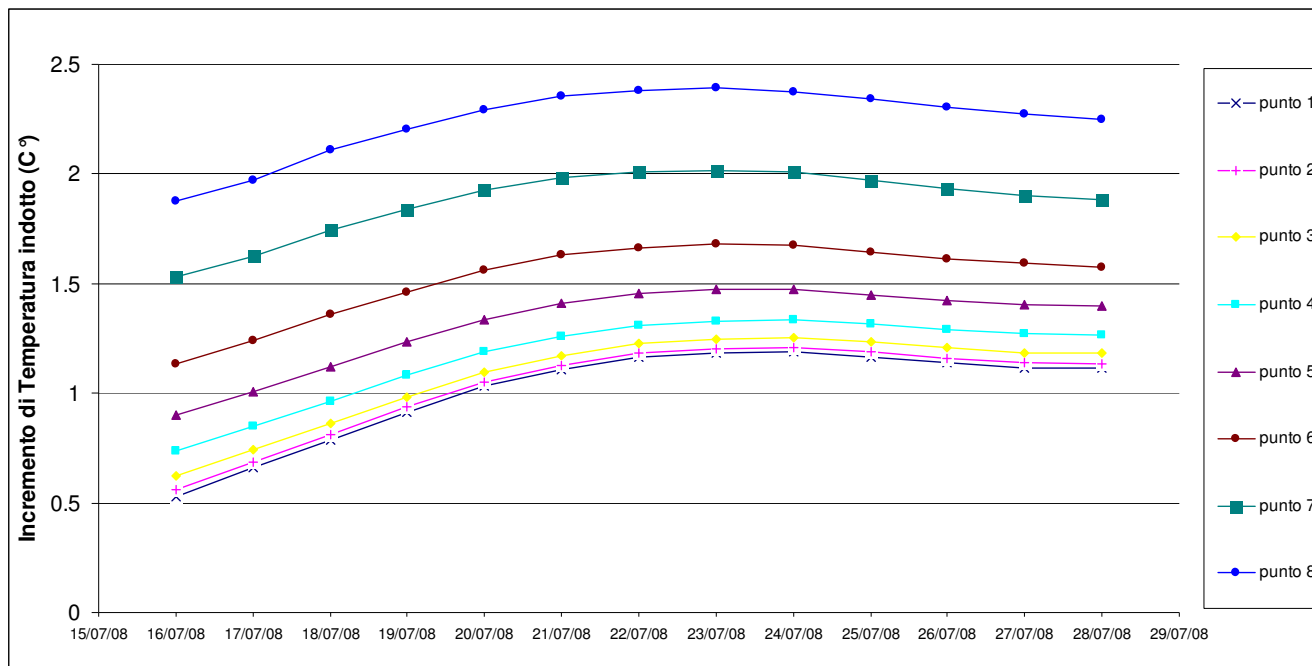


Figura 16 – Scenario 2: Grafico degli andamenti degli incrementi di temperatura allo scarico espressi come medie giornaliere, in corrispondenza degli 8 punti di riferimento.

4.0 CONCLUSIONE E VALUTAZIONE DELLA RILEVANZA DELLE EMISSIONI IN ACQUA

I risultati delle simulazioni nei 2 diversi scenari previsionali stagionali, hanno evidenziato come il pennacchio termico tenda a variare in modo significativo la propria disposizione nel tempo, nei diversi scenari considerati.

L'analisi condotta ha evidenziato come, per tutti gli scenari considerati, l'incremento di temperatura risulti contenuto entro i 3°C indicati dagli obiettivi di qualità.

Come riportato nel capitolo 2 lo studio è stato condotto considerando la condizione di funzionamento che genera il maggiore scambio termico ai condensatori, ovvero assetto futuro con TG3 e TG4 modificati da steam injection a DLN, senza considerare il funzionamento della torre di raffreddamento nel periodo estivo. Ne deriva che la condizione di funzionamento attuale avrà valori medi di temperatura a 100 m dallo scarico inferiori a quelli calcolati e quindi influenza termica dello scarico ancora inferiore.

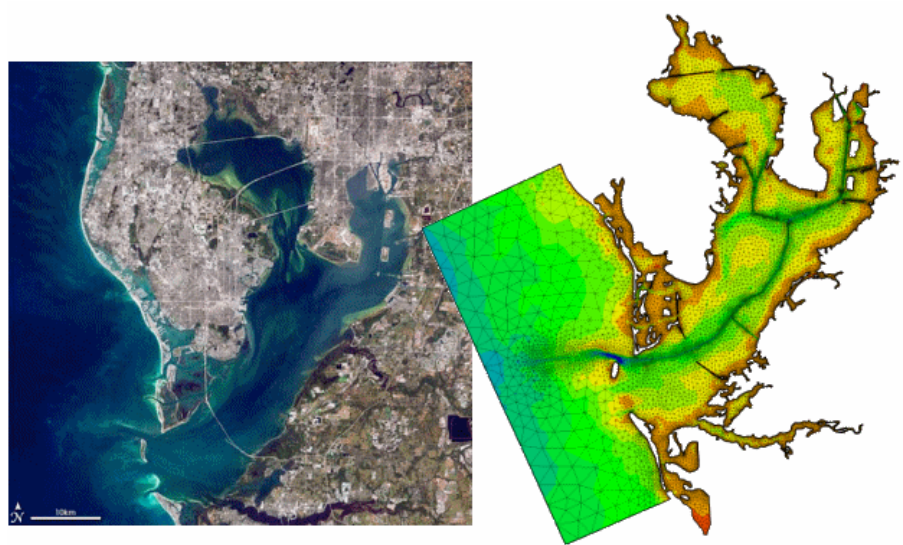
Appendici

Appendice A

Brochure e referenze su MIKE 3 del DHI Water Environment Health

Appendice B

Direzione e velocità del vento per il sito di Marghera – distribuzione delle frequenze



MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM

Hydrodynamic Module

Short Description



DHI Water & Environment
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

Tel: +45 4516 9200

Fax: +45 4516 9292

E-mail: dhi@dhi.dk

Web: www.dhi.dk



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM

The Flow Model FM is a new comprehensive modelling system for two- and three-dimensional water modelling developed by DHI Water & Environment. The new 2D and 3D models carry the same names as the classic DHI model versions MIKE 21 & MIKE 3 with an 'FM' added that refers to the type of model grid - Flexible Mesh.

The modelling system has been developed for complex applications within oceanographic, coastal and estuarine environments. However, being a general modelling system for 2D and 3D free-surface flows it may also be applied for studies of inland surface waters, e.g. overland flooding and lakes or reservoirs.



MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM is a new general hydrodynamic flow modelling system based on a finite volume method on an unstructured mesh

DHI's new Flexible Mesh (FM) series includes the following:

Flow Model FM modules:

- Hydrodynamic Module, HD
- Transport Module, TR
- Ecology and water quality Module, ECO Lab
- Sand Transport Module, ST
- Mud Transport Module, MT

Wave module:

- Spectral Wave Module, SW

The FM Series meets the increasing demand for realistic representations of nature, both with regard to 'look alike' and to its capability to model coupled processes, e.g. coupling between currents,

waves and sediments. Coupling of modules is managed in the Coupled Model FM.

All modules are supported by new advanced user interfaces including efficient and sophisticated tools for mesh generation, data management, 2D/3D visualization, etc. In combination with comprehensive documentation and support, the new FM series forms a unique professional software tool for consultancy services related to design, operation and maintenance tasks within the marine environment.

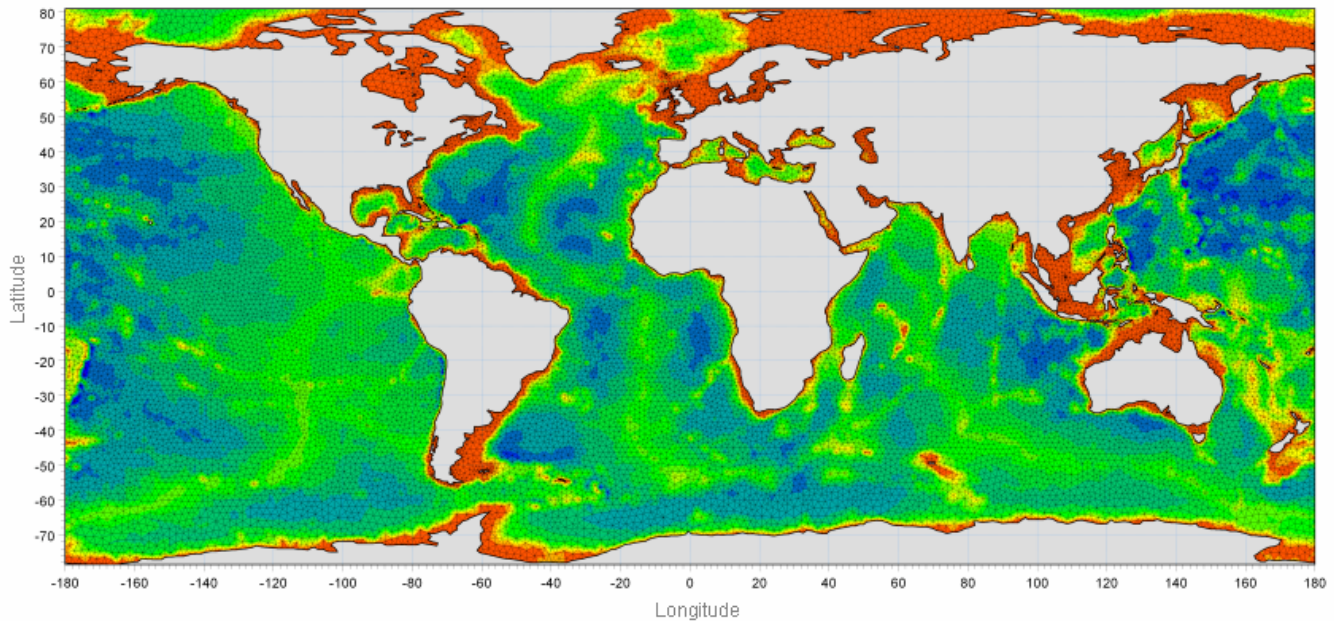
An unstructured grid provides an optimal degree of flexibility in the representation of complex geometries and enables smooth representations of boundaries. Small elements may be used in areas where more detail is desired, and larger elements used where less detail is needed, optimising information for a given amount of computational time.

The spatial discretisation of the governing equations is performed using a cell-centred finite volume method. In the horizontal plane an unstructured grid is used while a structured mesh is used in the vertical domain (3D).

This document provides a short description of the Hydrodynamic Module included in MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM.



Example of computational mesh for Tamar Estuary, UK



MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM supports both Cartesian and spherical coordinates. Spherical coordinates are usually applied for regional and global sea circulation applications. The chart shows the computational mesh and bathymetry for the planet Earth generated by the MIKE Zero Mesh Generator

MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module

The Hydrodynamic Module provides the basis for computations performed in many other modules, but can also be used alone. It simulates the water level variations and flows in response to a variety of forcing functions on flood plains, in lakes, estuaries and coastal areas.

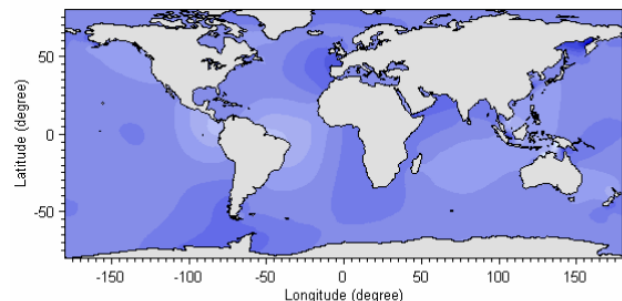
Application Areas

The Hydrodynamic Module included in MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM simulates unsteady flow taking into account density variations, bathymetry and external forcings.

The choice between 2D and 3D model depends on a number of factors. For example, in shallow waters, wind and tidal current are often sufficient to keep the water column well-mixed, i.e. homogeneous in salinity and temperature. In such cases a 2D model can be used. In water bodies with stratification, either by density or by species (ecology), a 3D model should be used. This is also the case for enclosed or semi-enclosed waters where wind-driven circulation occurs.

Typical application areas are

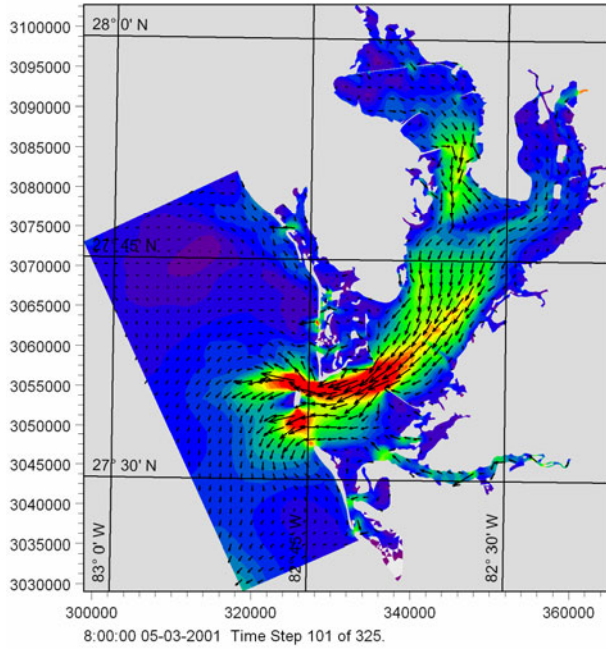
- Assessment of hydrographic conditions for design, construction and operation of structures and plants in stratified and non-stratified waters
- Environmental impact assessment studies
- Coastal and oceanographic circulation studies
- Optimization of port and coastal protection infrastructures
- Lake and reservoir hydrodynamics
- Cooling water, recirculation and desalination
- Coastal flooding and storm surge
- Inland flooding and overland flow modelling
- Forecast and warning systems



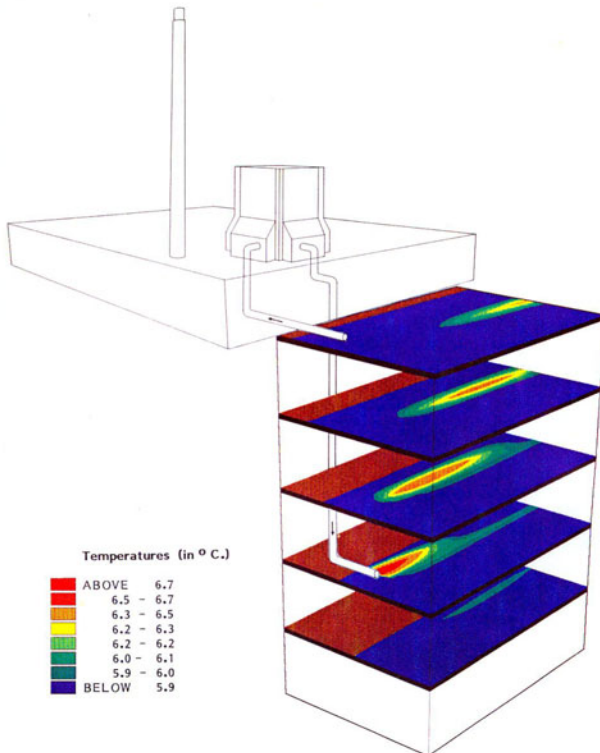
Example of a global tide application of MIKE 21 Flow Model FM. Results from such a model can be used as boundary conditions for regional scale forecast or hindcast models



The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM also support spherical coordinates, which makes both models particularly applicable for global and regional sea scale applications.



Example of a flow field in Tampa Bay, FL, simulated by MIKE 21 Flow Model FM

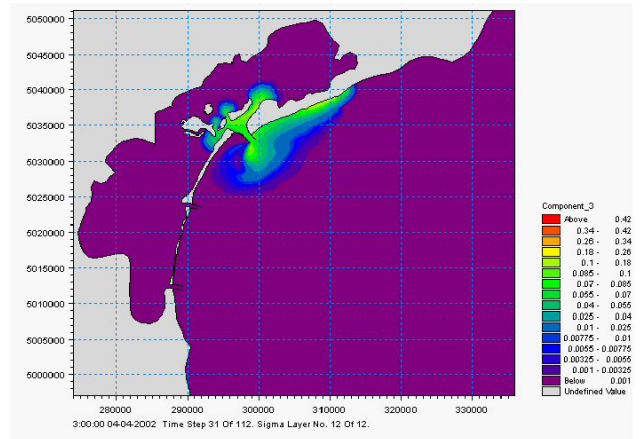


Study of thermal recirculation



Typical applications with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM include cooling water recirculation and ecological impact assessment (eutrophication)

The Hydrodynamic Module is together with the Transport Module (TR) used to simulate the spreading and fate of dissolved and suspended substances. This module combination is applied in tracer simulations, flushing and simple water quality studies.



Tracer simulation of single component from outlet in the Adriatic, simulated by MIKE 21 Flow Model FM HD+TR



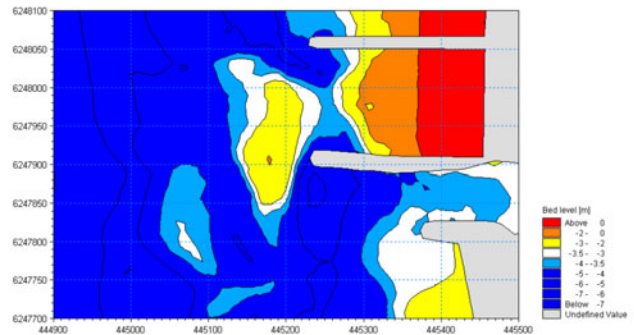
Prediction of ecosystem behaviour using the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM together with ECO Lab



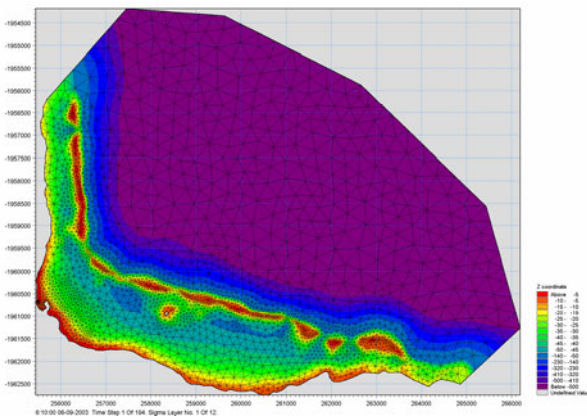
The Hydrodynamic Module can be coupled to the Ecological Module (ECO Lab) to form the basis for environmental water quality studies comprising multiple components.

Furthermore, the Hydrodynamic Module can be coupled to sediment models for the calculation of sediment transport. The Sand Transport Module and Mud Transport Module can be applied to simulate transport of non-cohesive and cohesive sediments, respectively.

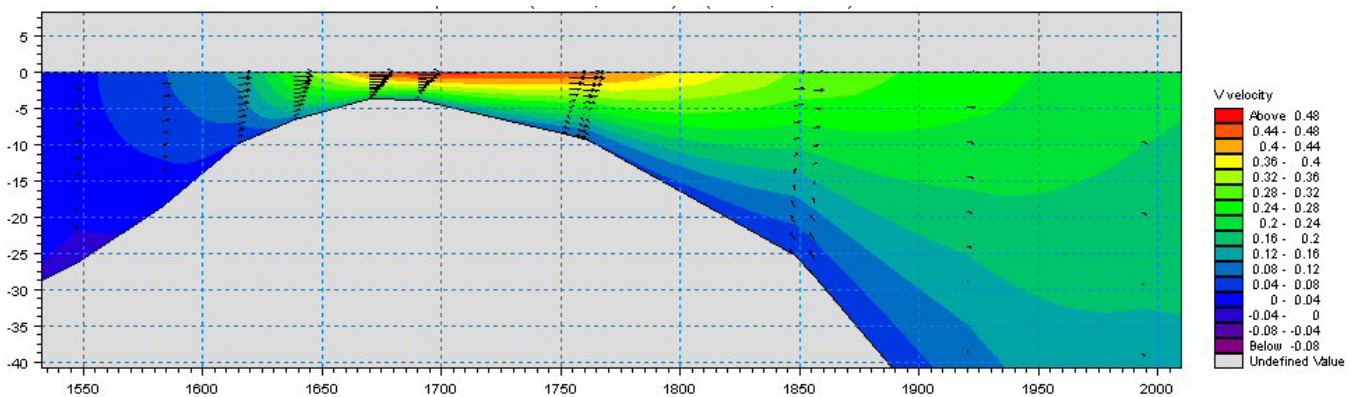
In the coastal zone the transport is mainly determined by wave conditions and associated wave-induced currents. The wave-induced currents are generated by the gradients in radiation stresses that occur in the surf zone. The Spectral Wave Module can be used to calculate the wave conditions and associated radiation stresses.



Coastal application (morphology) with coupled MIKE 21 HD, SW and ST, Torsminde harbour Denmark



Model bathymetry of Taravao Bay, Tahiti



Example of Cross reef currents in Taravao Bay, Tahiti simulated with MIKE 3 Flow Model FM. The circulation and renewal of water inside the reef is dependent on the tides, the meteorological conditions and the cross reef currents, thus the circulation model includes the effects of wave induced cross reef currents



Computational Features

The main features and effects included in simulations with the MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Hydrodynamic Module are the following:

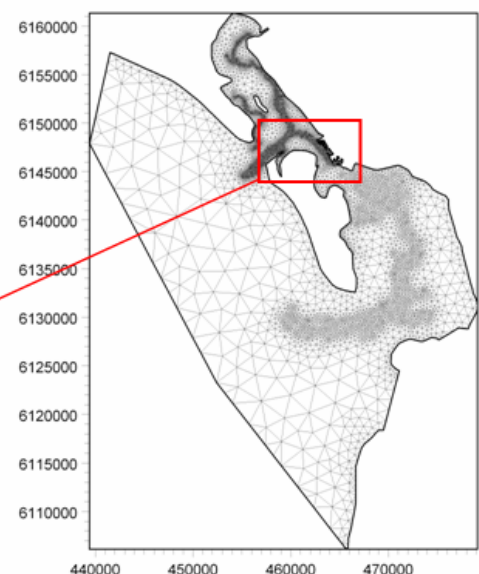
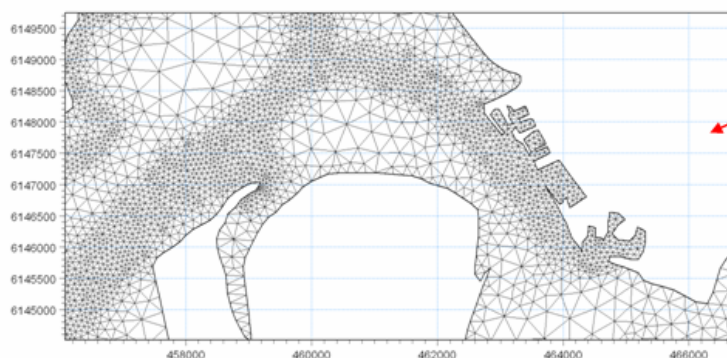
- Flooding and drying
- Momentum dispersion
- Bottom shear stress
- Coriolis force
- Wind shear stress
- Barometric pressure gradients
- Ice coverage
- Tidal potential
- Precipitation/evaporation
- Wave radiation stresses
- Sources and sinks

Model Equations

The modelling system is based on the numerical solution of the two/three-dimensional incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations subject to the the assumptions of Boussinesq and of hydrostatic pressure. Thus, the model consists of continuity, momentum, temperature, salinity and density equations and it is closed by a turbulent closure scheme. The density does not depend on the pressure, but only on the temperature and the salinity.

For the 3D model, the free surface is taken into account using a sigma-coordinate transformation approach.

Unstructured mesh technique gives the maximum degree of flexibility, for example: 1) Control of node distribution allows for optimal usage of nodes 2) Adoption of mesh resolution to the relevant physical scales 3) Depth-adaptive and boundary-fitted mesh. Below is shown an example from Ho Bay Denmark with the approach channel to the Port of Esbjerg



Below the governing equations are presented using Cartesian coordinates.

The local continuity equation is written as

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

and the two horizontal momentum equations for the x- and y-component, respectively

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} -$$

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Temperature and salinity

In the Hydrodynamic Module, calculations of the transports of temperature, T , and salinity, s follow the general transport-diffusion equations as

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S$$



The horizontal diffusion terms are defined by

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

The equations for two-dimensional flow are obtained by integration of the equations over depth.

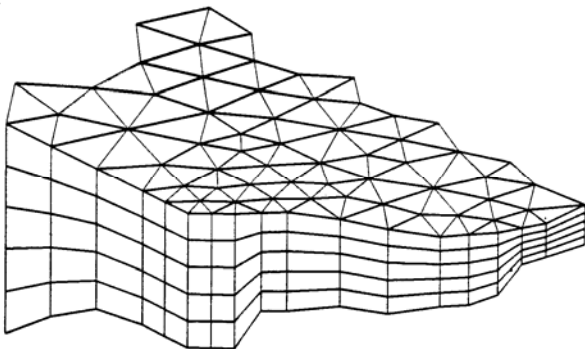
Heat exchange with the atmosphere is also included.

Symbol list

t	time
x, y, z :	Cartesian coordinates
u, v, w :	flow velocity components
T, s :	temperature and salinity
D_v :	vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient
\hat{H} :	source term due to heat exchange with atmosphere
S :	magnitude of discharge due to point sources
T_s, s_s :	temperature and salinity of source
F_T, F_s, F_c :	horizontal diffusion terms
D_h :	horizontal diffusion coefficient
h :	depth

Solution Technique

The spatial discretisation of the primitive equations is performed using a cell-centred finite volume method. The spatial domain is discretised by subdivision of the continuum into non-overlapping elements/cells.



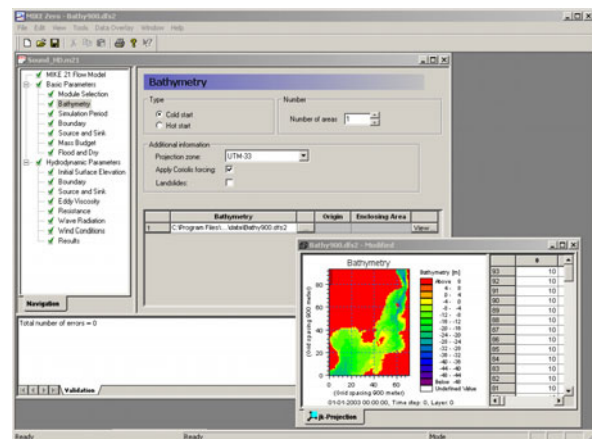
Principle of 3D mesh

In the horizontal plane an unstructured mesh is used while a structured mesh is used in the vertical domain of the 3D model. In the 2D model the elements can be triangles or quadrilateral elements. In the 3D model the elements can be prisms or bricks whose horizontal faces are triangles and quadrilateral elements, respectively.

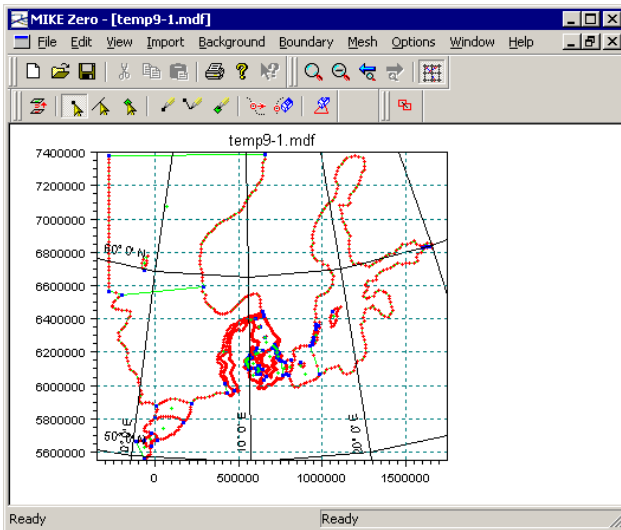
Model Input

Input data can be divided into the following groups:

- Domain and time parameters:
 - computational mesh (the coordinate type is defined in the computational mesh file) and bathymetry
 - simulation length and overall time step
- Calibration factors
 - bed resistance
 - momentum dispersion coefficients
 - wind friction factors
- Initial conditions
 - water surface level
 - velocity components
- Boundary conditions
 - closed
 - water level
 - discharge
- Other driving forces
 - wind speed and direction
 - tide
 - source/sink discharge
 - wave radiation stresses



View button on all the GUIs in MIKE 21 & MIKE 3 FM HD for graphical view of input and output files



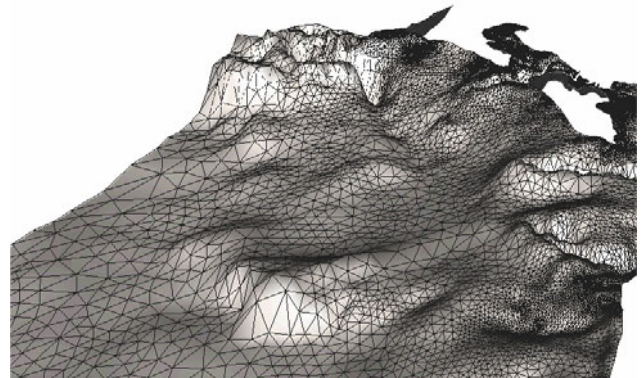
The Mesh Generator is an efficient MIKE Zero tool for the generation and handling of unstructured meshes, including the definition and editing of boundaries

Providing MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM with a suitable mesh is essential for obtaining reliable results from the models. Setting up the mesh includes the appropriate selection of the area to be modelled, adequate resolution of the bathymetry, flow, wind and wave fields under consideration and definition of codes for defining boundaries.



2D visualization of a computational mesh (Odense Estuary)

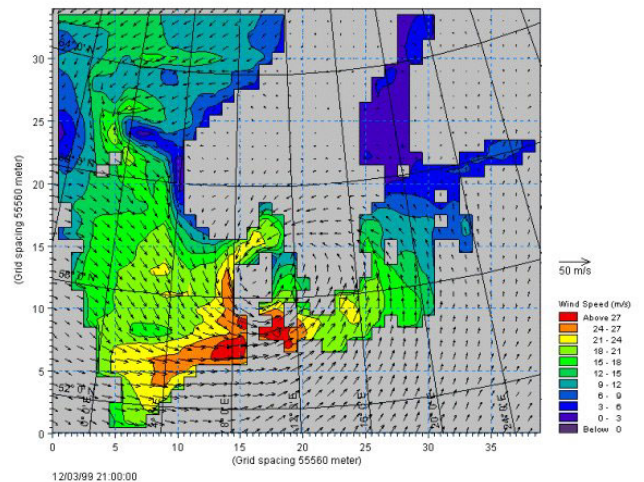
Bathymetric values for the mesh generation can e.g. be obtained from the DHI Software product MIKE C-Map. MIKE C-Map is an efficient tool for extracting depth data and predicted tidal elevation from the world-wide Electronic Chart Database CM-93 Edition 3.0 from C-Map Norway.



3D visualization of a computational mesh

If wind data is not available from an atmospheric meteorological model, the wind fields (e.g. cyclones) can be determined by using the wind-generating programs available in MIKE 21 Toolbox.

Global winds (pressure & wind data) can be downloaded for immediate use in your simulation. The sources of data are from GFS courtesy of NCEP, NOAA. By specifying the location, orientation and grid dimensions, the data is returned to you in the correct format as a spatial varying grid series or a time series. The link is: www.dhisoftware.com/mikemarine/online_data



The chart shows a hindcast wind field in the North Sea and Baltic Sea as wind speed and wind direction



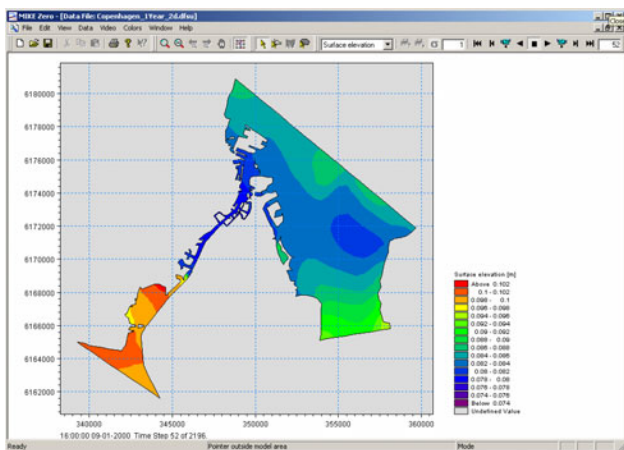
Model Output

Computed output results at each mesh element and for each time step consist of:

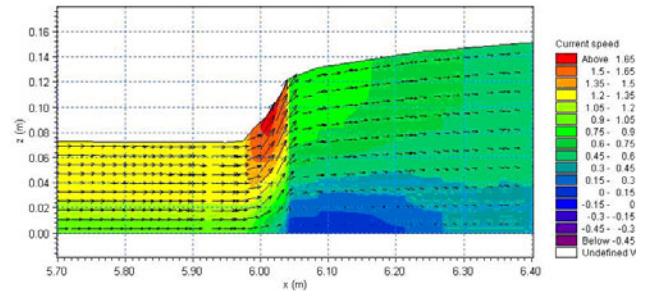
- Basic variables
 - water depth and surface elevation
 - flux densities in main directions
 - velocities in main directions
 - densities, temperatures and salinities
- Additional variables
 - Current speed and direction
 - Wind velocities
 - Air pressure
 - Drag coefficient
 - Precipitation/evaporation
 - Courant/CFL number
 - Eddy viscosity

The output results can be saved in defined points, lines and areas. In the case of 3D calculations the results are saved in a selection of layers.

Output from MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM is typically post-processed using the Data Viewer available in the common MIKE Zero shell. The Data Viewer is a tool for analysis and visualization of unstructured data, e.g. to view meshes, spectra, bathymetries, results files of different format with graphical extraction of time series and line series from plan view and import of graphical overlays.



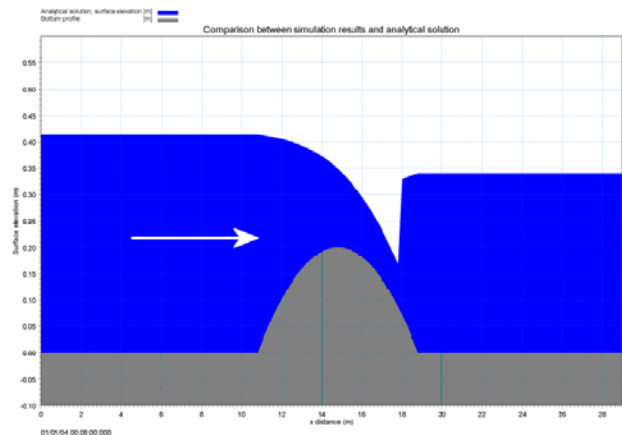
The Data Viewer in MIKE Zero – an efficient tool for analysis and visualization of unstructured data including processing of animations. Above screen dump shows surface elevations from a model setup covering Port of Copenhagen



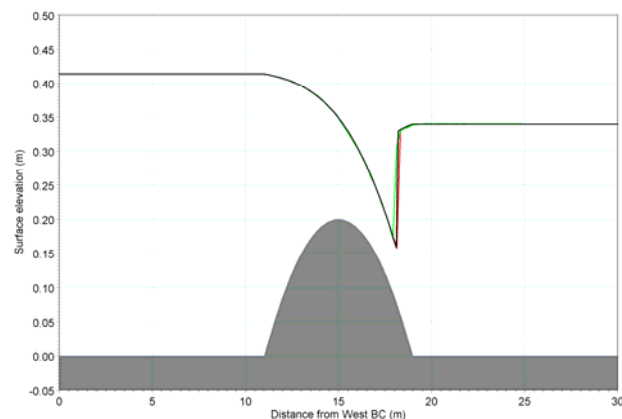
Vector and contour plot of current speed at a vertical profile defined along a line in Data Viewer in MIKE Zero

Validation

Before the first release of MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM the model was successfully applied to a number of rather basic idealized situations for which the results can be compared with analytical solutions or information from the literature.

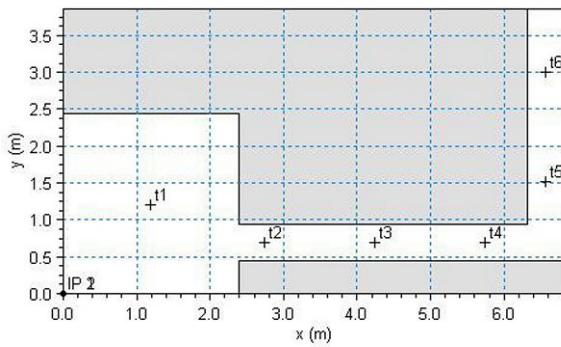


The domain is a channel with a parabola-shaped bump in the middle. The upstream (western) boundary is a constant flux and the downstream (eastern) boundary is a constant elevation. Below: the total depths for the stationary hydraulic jump at convergence. Red line: 2D setup, green line: 3D setup, black line: analytical solution

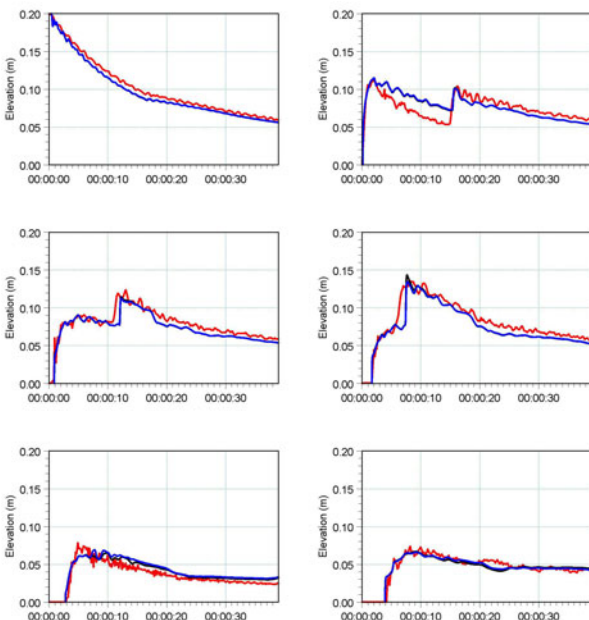




A dam-break flow in an L-shaped channel (a, b, c):

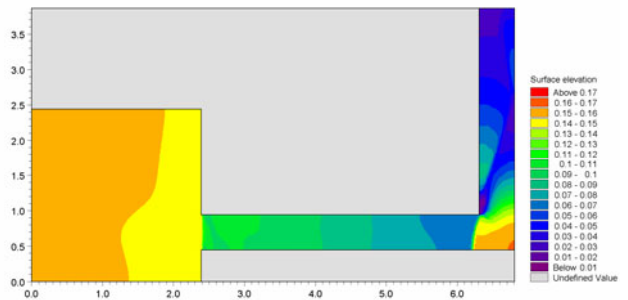
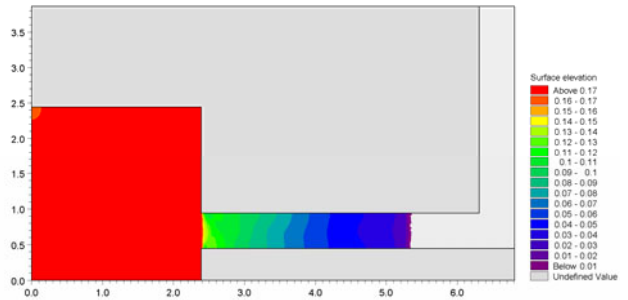


a) Outline of model setup showing the location of gauging points



b) Comparison between simulated and measured water levels at the six gauge locations. (Blue) coarse mesh (black) fine mesh and (red) measurements

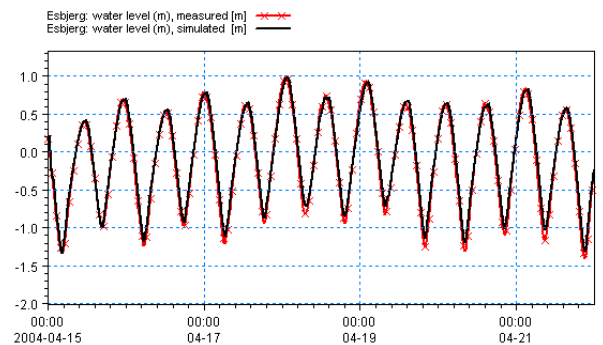
The model has also been applied and tested in more natural geophysical conditions; ocean scale, inner shelves, estuaries, lakes and overland, which are more realistic and complicated than academic and laboratory tests.

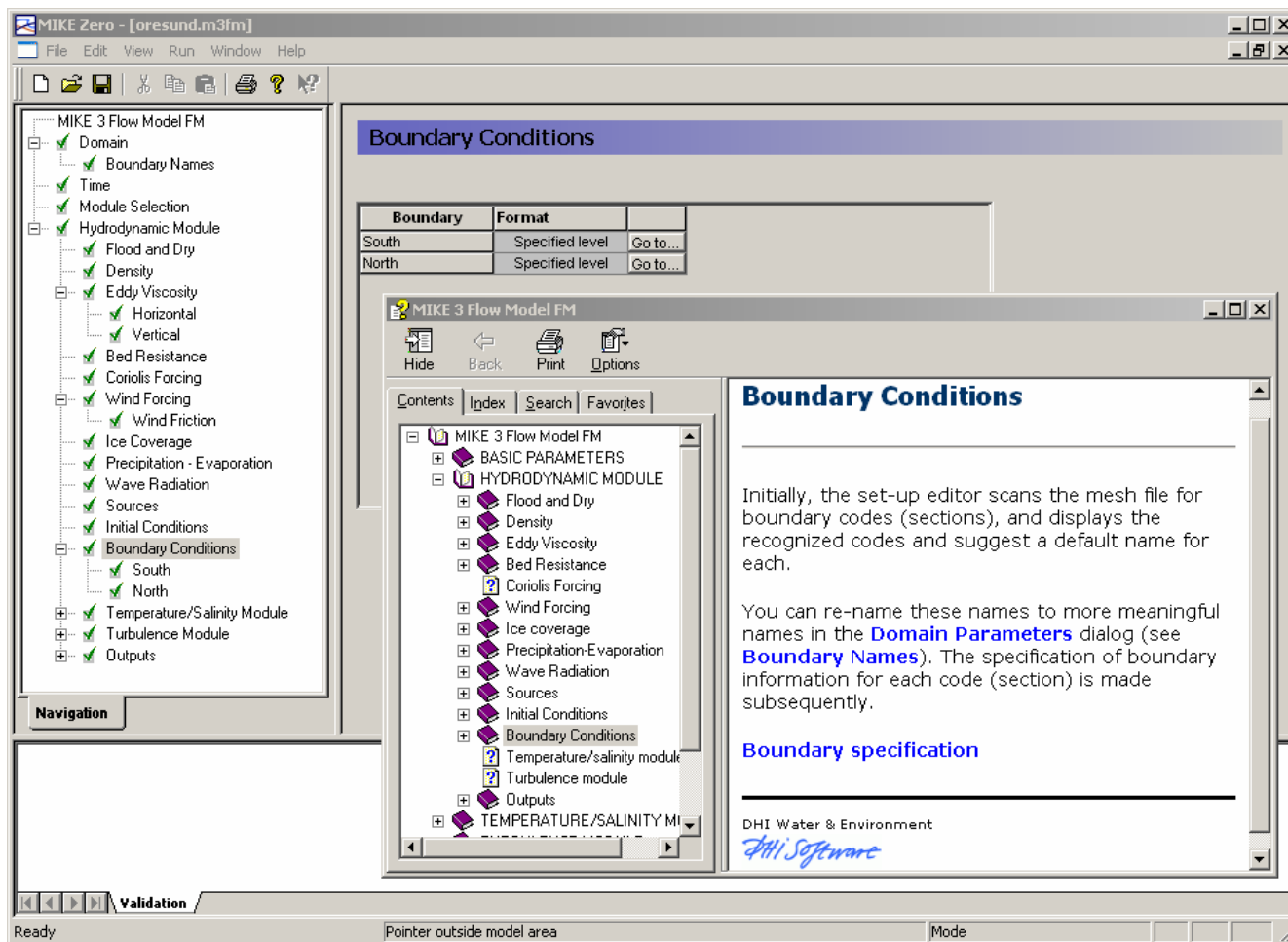


c) Contour plots of the surface elevation at $T = 1.6$ s (top) and $T = 4.8$ s (bottom)



Example from Ho Bay, a tidal estuary (barrier island coast) in South-West Denmark with access channel to the Port of Esbjerg. Below: Comparison between measured and simulated water levels



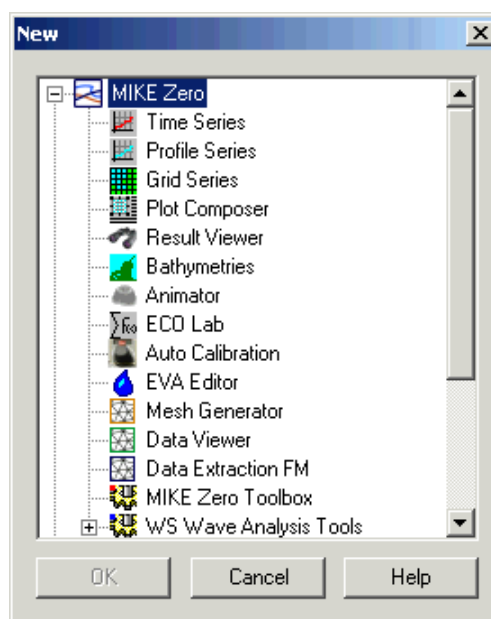


The user interface of the MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM (Hydrodynamic Module), including an example of the extensive Online Help system

Graphical User Interface

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM are operated through a fully Windows integrated graphical user interface (GUI). Support is provided at each stage by an Online Help system.

The common MIKE Zero shell provides entries for common data file editors, plotting facilities and a toolbox for/utilities as the Mesh Generator and Data Viewer.



Overview of the common MIKE Zero utilities



Hardware and Operating System Requirements

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM are available for PCs with Microsoft Windows XP Professional Edition, Microsoft Windows 2000 and Microsoft Windows XP Professional x64 Edition. Microsoft Internet Explorer (IE) is required for network license management as well as for accessing the Online Help.

The recommended minimum hardware requirements for executing MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM are:

Processor:	Pentium, AMD or compatible processor; 2 GHz (or higher)
Memory (RAM):	512 MB (or higher)
Hard disk:	20 GB (or higher)
Monitor:	SVGA, resolution 1024x768
Graphic card:	32 MB RAM (or higher), 24 bit true colour
CD-ROM/DVD drive:	for installation of software

Support

News about new features, applications, papers, updates, patches, etc. are available at the MIKE 21 Website located at:

<http://www.dhisoftware.com/mike21>

For further information please contact your local DHI Software agent or the Software Support Centre at DHI:

DHI Software Support Centre
DHI Water & Environment
Agern Allé 5
DK-2970 Hørsholm
Denmark

Tel: +4545169333
Fax: +4545169292
Web: www.dhisoftware.com
E-mail: software@dhi.dk

References

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM are provided with comprehensive user guides, online help, scientific documentation, application examples and step-by-step training examples.

The MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM have been, and are, extensively used in DHI consultancy services (some 50 studies in 20 different countries) and in several research projects.



Petersen, N.H., Rasch, P. "Modelling of the Asian Tsunami off the Coast of Northern Sumatra", presented at the 3rd Asia-Pacific DHI Software Conference in Kuala Lumpur, Malaysia, 21-22 February, 2005

French, B. and Kerper, D. Salinity Control as a Mitigation Strategy for Habitat Improvement of Impacted Estuaries. 7th Annual EPA Wetlands Workshop, NJ, USA 2004.



DHI Note, "Flood Plain Modelling using unstructured Finite Volume Technique" January 2004 – download from http://www.dhisoftware.com/mike21/Download/Papers_Docs/M21FM_Floodplain.pdf

MIKE 3/21 FM

**Estuarine and Coastal Hydraulics and
Oceanography**

Hydrodynamic Module

Flexible Mesh Version



DHI Water & Environment
Agern Allé 11
DK-2970 Hørsholm
Denmark

Tel: +45 4516 9200
Fax: +45 4516 9292
E-mail: dhi@dhi.dk
Web: www.dhi.dk

2002-07-09/MIKE_321_FM_Scientific_Doc.doc/OSP

DHI Software 2002



PLEASE NOTE

COPYRIGHT

This document refers to proprietary computer software which is protected by copyright. All rights are reserved. Copying or other reproduction of this manual or the related programs is prohibited without prior written consent of DHI Water & Environment (DHI). For details please refer to your 'DHI Software Licence Agreement'.

LIMITED LIABILITY

The liability of DHI is limited as specified in Section III of your 'DHI Software Licence Agreement':

'IN NO EVENT SHALL DHI OR ITS REPRESENTATIVES (AGENTS AND SUPPLIERS) BE LIABLE FOR ANY DAMAGES WHATSOEVER INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, SPECIAL, INDIRECT, INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES OR DAMAGES FOR LOSS OF BUSINESS PROFITS OR SAVINGS, BUSINESS INTERRUPTION, LOSS OF BUSINESS INFORMATION OR OTHER PECUNIARY LOSS ARISING OUT OF THE USE OF OR THE INABILITY TO USE THIS DHI SOFTWARE PRODUCT, EVEN IF DHI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES. THIS LIMITATION SHALL APPLY TO CLAIMS OF PERSONAL INJURY TO THE EXTENT PERMITTED BY LAW. SOME COUNTRIES OR STATES DO NOT ALLOW THE EXCLUSION OR LIMITATION OF LIABILITY FOR CONSEQUENTIAL, SPECIAL, INDIRECT, INCIDENTAL DAMAGES AND, ACCORDINGLY, SOME PORTIONS OF THESE LIMITATIONS MAY NOT APPLY TO YOU. BY YOUR OPENING OF THIS SEALED PACKAGE OR INSTALLING OR USING THE SOFTWARE, YOU HAVE ACCEPTED THAT THE ABOVE LIMITATIONS OR THE MAXIMUM LEGALLY APPLICABLE SUBSET OF THESE LIMITATIONS APPLY TO YOUR PURCHASE OF THIS SOFTWARE.'

PRINTING HISTORY

July 2002 Edition 2002





CONTENTS

1	INTRODUCTION	1
2	MATHEMATICAL FORMULATION	2
3	NUMERICAL SOLUTION	7
4	REFERENCES	9



1 INTRODUCTION

The MIKE 21/3 FM modelling system is a general hydrodynamic model, aimed at applications within oceanographic, coastal and estuarine environments. The system comprises both 2 dimensional vertically averaged equations (MIKE 21FM) and 3-dimensional hydrostatic equations (MIKE 3FM).

This note provides the mathematical and numerical background for MIKE 21/3 FM models. In general, the physical processes and features are similar to the implementation in the MIKE 21 nested. Therefore is this note focused on differences from the nested, finite difference model.



2 MATHEMATICAL FORMULATION

The model is based on the solution of the 3-dimensional incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations, subject to the assumptions of Boussinesq and of a hydrostatic pressure.

The general approach is to use a generalised wave equation, derived from the depth averaged continuity and momentum equations, to describe the free surface while the local momentum equations for the two horizontal components describe the vertical profiles, given the pressure gradients. The solution approach basically follows (Lynch and Werner, 1993).

The local continuity equation is written as

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

and the two horizontal momentum equations for x- and y-component respectively,

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ - \frac{\partial}{\partial x} (g\eta + p_A / \rho) + fV - \frac{\partial}{\partial z} (v_T \frac{\partial u}{\partial z}) + A_x - \frac{g}{\rho} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ - \frac{\partial}{\partial y} (g\eta + p_A / \rho) - fU - \frac{\partial}{\partial z} (v_T \frac{\partial v}{\partial z}) + A_y - \frac{g}{\rho} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} \end{aligned} \quad (2.3)$$

where

- ρ : density
- u, v, w : velocities in x,y,z directions
- f : Coriolis parameter
- ϕ, λ : latitude, longitude
- v_t : turbulent eddy viscosity
- S : source/sink terms with
- η : ELEVATION
- p_A : atmospheric pressure
- A_X : horizontal stress terms



The horizontal stress terms are described using a gradient-stress relation as

$$A_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

where K_{xy} is an eddy viscosity.

Depth averaging of the local equations reads for the continuity equation

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

and for the two horizontal momentum equations

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial}{\partial x} [\eta + \eta_A] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho H} + A_x + B_x \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial}{\partial y} [\eta + \eta_A] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho H} + A_y + B_y \quad (2.4)$$

where τ_s is surface stress and τ_b the bed stress, A_x and A_y are horizontal stress terms and B_x , B_y are depth averaged baroclinic pressure gradients. For reasons of numerical stability a generalised wave equation is derived for the free surface (Lynch and Werner, 1987). This can be derived by once differentiating the continuity equation eq. 2.3, adding τ_o times the continuity and combining with the momentum equations (2.4 and 2.5). This yields

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \tau_o \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial UH}{\partial t} + \tau_o UH \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial VH}{\partial t} + \tau_o VH \right) + G = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{where } G = UH \frac{\partial \tau_o}{\partial x} + VH \frac{\partial \tau_o}{\partial y}$$

The wind induced surface stress originates from the vertical shear term assuming a balance between the wind shear and the water shear at the surface

$$\tau_{sx} = \rho_{AIR} C_W W W_x$$

where ρ_{AIR} is the density of air, W the wind speed, W_x the x-component of the windspeed, C_W the wind drag coefficient. The wind friction factor is calculated in accordance with Smith and Banke (1975), see Figure 7.2.

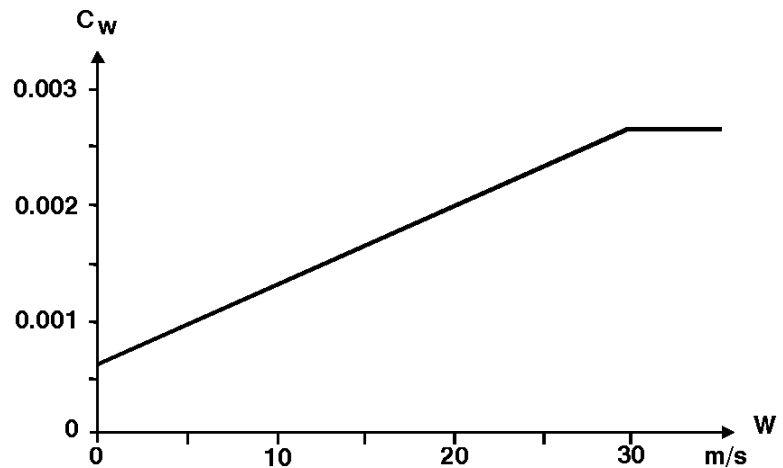


Fig. 7.2 Wind friction factor (Smith and Banke, 1975)

$$C_w = \begin{cases} C_{w0} & \text{for } W < W_0 \\ C_{w0} + \frac{W - W_0}{W_1 - W_0} \cdot (C_{w1} - C_{w0}) & \text{for } W_0 \leq W \leq W_1 \\ C_{w1} & \text{for } W > W_1 \end{cases} \quad (7.1)$$

where

$$\begin{aligned} C_{w0} &= 0.0013, & W_0 &= 0 \text{ m/s} \\ C_{w1} &= 0.0026, & W_1 &= 24 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (7.2)$$

2.1.1 Bed Resistance

Similar to the wind friction the bed resistance originates from the vertical shear term as a boundary condition.

The vertical discretization in MIKE 3 FM, place the uppermost nodes at the free surface and the lowermost at the seabed. In the calculation of the bed resistance a partial slip boundary is used, where it is assumed that the lowermost node rests on top of the (thin) boundary layer. The thickness of this layer can be given either as *i*) a constant thickness over the whole domain *ii*) a fraction of the still water depth or *iii*) a fraction of the thickness of the lowermost element.

In MIKE 3 FM the bed shear can be calculated using

- constant linear drag where $\tau_b = \rho C_L |u(z_b)|$



- constant quadratic drag where $\tau_b = \rho C_D |Q(z_b)u(z_b)|$
- Chezy number where $C_D = \frac{g}{C_z^2}$
- Manning number where $C_D = \frac{g}{M^2 h^{2/3}}$
- Equivalent roughness and the log-law where $C_D = \left[\frac{1}{\kappa} \log\left(\frac{30z_b}{k_s}\right) \right]^{-2}$

where κ is von Kármán's constant, k_s the bed roughness, Q the current speed, u is the current velocity (in 2D these are depth averaged values), z_b the distance above the seabed, C_L is a linear drag coefficient, C_D is a quadratic drag coefficient and h the water depth.

If in a 3D setup, resistance is specified as Chezy or Manning numbers, these are converted into an equivalent roughness using for Chezy's law $k_s = H(25.4/C_z)^6$ and for Mannings law $k_s = (25.4/M)^6$ and vice-versa if the roughness is specified in a 2D setup.



The transports of salt or temperature follow the general transport-diffusion equations as

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_{XY} \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma_{XY} \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_Z \frac{\partial c}{\partial z}) + S \quad (2.6)$$

where c can be salinity or temperature, Γ_{XY} and Γ_Z are the diffusivity in horizontal and vertical directions and S are additional source terms, e.g. point sources, heat exchange with the atmosphere or contributions from precipitation.

The temperature and salinity variations are linked to the hydrodynamics using an equation of state, here the UNESCO equation is used.

The turbulence is modelled assuming isotropic turbulence following a gradient-stress or gradient-flux relation. Several options exist, the most complete being a standard k - ε model (Rodi, 1984), where the eddy-viscosity is derived from turbulence parameters k and ε as

$$\nu_T = C_\nu k^2 / \varepsilon \quad (2.6)$$

The turbulent kinetic energy k is estimated from a transport equation as

$$\begin{aligned} \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_{XY}^k \frac{\partial k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma_{XY}^k \frac{\partial k}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_Z^k \frac{\partial k}{\partial z}) \\ + \nu_T (S^2 + N^2 / \sigma_T) - \varepsilon \end{aligned} \quad (2.7)$$

and the dissipation of TKE from

$$\begin{aligned} \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_{XY}^\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma_{XY}^\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\Gamma_Z^\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}) \\ + \frac{\varepsilon}{k} (\nu_T (C_{1\varepsilon} S^2 + C_{3\varepsilon} N^2 / \sigma_T) - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \end{aligned} \quad (2.8)$$

where σ_T is a turbulent Prandtl number and S is the shear, which can be written in tensor notation as

$$S^2 = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.9)$$

and N^2 the Brunt-Vaisala frequency



$$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (2.10)$$

For the horizontal stress terms, can be used a Smagorinsky sub-grid scale eddy coefficient, which is calculated as

$$K_{xy} = c_s l^2 |S| \quad (2.11)$$

where c_s is a constant and l is the linear extent of the element, estimated as

$$l = \sqrt{A_{element}}$$

3 NUMERICAL SOLUTION

Meshes

The numerical solution is based on linear prismatic finite elements and a standard Galerkin weak formulation of the integral equations. The spatial discretization is based on an unstructured mesh of linear triangular elements in the horizontal and a layered vertical mesh using a generalised sigma transformation .

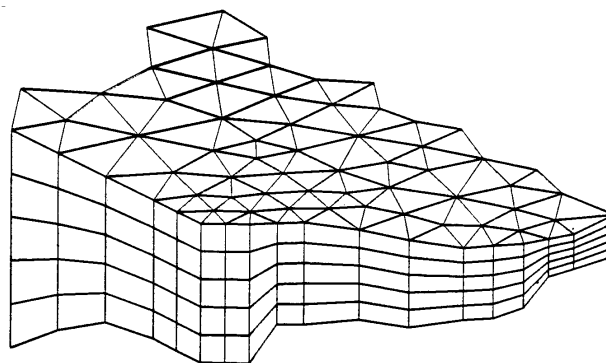


Figure 1. Principles of meshing

Generally, the field variable u is approximated by



$$u(x, y, z) = \sum_{i=1}^N u_i \Pi_i(x, y, z) \quad (2.11)$$

where Π_i is the so-called shape function, describing the spatial variation of u within element i .

With the present choice of spatial discretization the three-dimensional shape function can be written as a horizontal and a vertical part, thus

$$\Pi_i = W_i(x, y)E_i(z)$$

where W is a linear triangular shape function and E is a one dimensional chapeau function.

Numerical solution

The solution of the generalized wave equation is based on a Standard Galerkin weak formulation with nodal quadrature. The time marching is semi implicit, with the gravity terms being time centred and the remaining terms explicit. The momentum equations are solved afterwards, using a procedure where horizontal terms are explicit and vertical terms are time centred.

The vertical velocity is finally derived from the z-derivative of the local continuity equation. Auxiliary parameters as e.g. viscosity and density, are updated at the beginning of each timestep.

The transport equations for salt, temperature and turbulence are solved after the free surface and the velocity field in a way similar to the momentum equations.



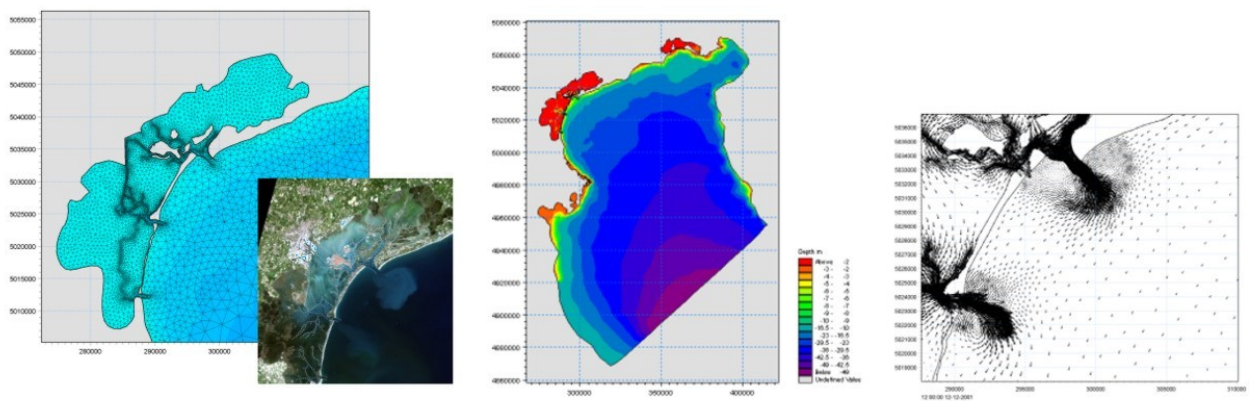
4 REFERENCES

Lynch, D. R. and Werner, F. E. (1987). Three-dimensional hydrodynamics on finite elements, Part II. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **12**, 507-533.

Lynch, D. R. and Namie, C. E. (1993). The M2 tide and its residual on the outerbanks of Gulf of Maine. *Continental Shelf Research*, **12**, 37-64.

Rodi, W. (1984). *Turbulence models and their applications in hydraulics*. IAHR, Delft, the Netherlands.

Location	Upper Adriatic Sea
Type of Project	Estuarine Circulation Study
Client	Consorzio Venezia Nuova (CVN)



Description

The purpose of the project is to establish a thermal and salinity model for near coastal waters of the Upper Adriatic Sea, capable of estimating temperature and salinity in front of the three inlets to Venice Lagoon.

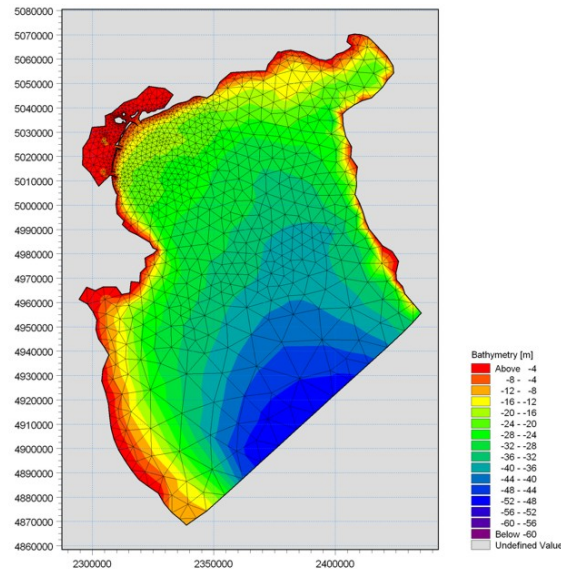
The specific objective is to determine the distribution and origin of water masses off Venice Lagoon. The origin and pathways of the water masses are important for understanding the land-ocean interaction and the source of nutrients and sediments entering or being exchanged with Venice Lagoon. This information is needed in order to be able to establish nutrient and sediment budgets for the lagoon and to support the monitoring activities for measuring the exchange of water between Venice Lagoon and the Adriatic Sea.

The model has been developed using MIKE 3 FM unstructured mesh model, describing the general circulation in the upper Adriatic Sea and inside the Venice Lagoon. The model describes hydrodynamics, salinity and temperature, and for the purpose of water mass identification transports of 10 conservative tracers are described. Travel times and pathways are further described using a Lagrangian particle tracking module. The model is forced with LAMBO hindcasted local area wind fields and uses meteorological and oceanographic data from the ADRICOSM project.

Location Venezia

Type of Project Hydraulic design

Client Thetis S.p.a.



Description As part of the assessment of possible impacts on the environment from a planned long sea outfall into the Golfo di Venezia, DHI has developed a three-dimensional model of the Northern Adriatic Sea including the Laguna di Venezia. The model describes the short-term effects of for example dilution, E. Coli, dispersion or sediment deposition, and long-term effects on eutrophication and on heavy metal concentrations in the sea and the lagoon.

The model is based on the unstructured mesh model MIKE 3 FM and combines hydrodynamics, sediment transport and various ECO Lab templates. The model has been calibrated using a 1-year period of observations of hydrodynamics and water quality parameters. The model is used to describe the possible effects of the sea outfall during various 1-year scenarios.

HYDRODYNAMIC AND WATER QUALITY CHARACTERISTIC MATRIX

Item	SMS 8.1	RMA-10/11	EFDC	CE-QUAL-ICM	WASP4	QUAL 2E-UNCAS	MIKE 3	DELFT 3D	FLOW-3D
CURRENT STATUS	Have software and documentation readily available	Have software and documentation not readily available "testing stage"	Have software and documentation not readily available "testing stage"	Have software and documentation readily available	Have software and documentation readily available	Have software and documentation readily available	Have software and documentation readily available	Have software and documentation readily available	Have software and documentation readily available
DEVELOPER	Birmingham Young University Provo, Utah and RMA	US Waterways Experimental Station and RMA (Dr. Ian King)	Virginia Institute of Marine Science (Dr. John M. Hamrick)	US Waterways Experimental Station	US Environmental Protection Agency	US Environmental Protection Agency	DHI Water and Environment	WL/Delf Hydraulic	Flow Science Inc. (Dr. C. W. Hirt)
VENDOR OR CONTACT PERSON	Boss international Corporation 6612 Mineral Rd, Madison, WI 1-800-488-4775	Dr. Carl F. Cerco US Waterways Experimental Station, Corps of Engineers, 3909 Halls Ferry Road Vicksburg, Mississippi 601-634-3129	Applied Marine Science and Ocean Engineering The College Of William and Mary Gloucester Point, VA 23062	Dr. Carl F. Cerco US Waterways Experimental Station, Corps of Engineers, 3909 Halls Ferry Road Vicksburg, Mississippi 601-634-3129	Robert Ambrose Center for exposure Modelling 404-546-3593	Robert Ambrose Center for exposure Modelling 404-546-3593	Charles Kirsty DHI Water & Environment 301 S.State St. Newtown PA 18940 (215) 504 8497	Rotterdamseweg 185 P.O.Box 177 2600 MH Delf The Netherlands Telephone 31-15-285-8585	Flow Science Inc. P. O. Box 933 1257 40th Street Los Alamos, New Mexico 87544 505-662-2636
COMMERCIAL/PUBLIC DOMAIN	Commercial	Commercial	Public domain	Public domain	Public domain	Public domain	Commercial	Commercial	Commercial
MODEL DIMENSION	Two Dimensional Depth averaged	Three Dimensional	Three Dimensional	Three Dimensional	Three Dimensional	One-Dimensional	Three Dimensional	Three Dimensional	Three Dimensional
MODEL TYPE									
Hydrodynamic	X (RMA-2)	X	X	-	-	X	X	X	X
Water Quality	X (RMA-4)	X	X	X	X	X	X	X	X (Some modification)
Sediment Transport	X	-	-	-	-	-	X	X	-
ELEMENT CONFIGURATION									
Finite element	X	X	-	-	-	-	-	-	-
Finite Difference	-	-	X	-	X	X	-	X	X
Finite Volume	-	-	-	X	-	-	X	-	-
TRANSPORT TRANSFORMATION SCHEME									
Implicit	-	X	-	-	-	X	X	X	-
Explicit	X	-	-	X	X	-	-	-	-
Implicit/Explicit	X	X	X	X	-	-	-	-	X
COMPUTATIONAL SCHEME									
Lagrangian	X	X	-	-	-	-	-	-	-
Eluerian	-	-	-	-	X	X	X	X	X
Eluerian/Lagrangian	X	X	X	X	-	-	-	-	X
MODEL PROCESSING									
Pre-Processor	X	X	X	-	-	-	X	X	X
Solver	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Post-Processor (GUI)	X	-	X (with limitation)	-	X	-	X	X	X
WATER QUALITY (Variables or Process)									
Dissolved Oxygen (DO)	X	-	-	X	X	X	X	X	-

HYDRODYNAMIC AND WATER QUALITY CHARACTERISTIC MATRIX

Item	SMS 8.1	RMA-10/11	EFDC	CE-QUAL-ICM	WASP4	QUAL 2E-UNCAS	MIKE 3	DELFT 3D	FLOW-3D
Organic Matter (BOD)	-	-	-	-	-	-	X	X	
Temperature	-	X	X	X	X	X	X	X	X
Salinity	-	X	X	X	X	-	X	X	X
Sediment	X	X	X	X	X	-	X	X	X (Some modification)
Ammonia		-	-	-	-	-	X	X	-
Nitrate	X	-	-	-	-	-	X	X	-
Phosphorus	X	-	-	-	-	-	X	X	-
Bacteria	-	-	-	-	-	-	X	X	-
Chlorophyll-a	-	-	-	-	-	-	X	X	-
Other Water Quality parametrs	X	-	-	X	X	X	X	X	X
EUTROPHICATION MODULE									
Carbon and Nutrient cycling	-	-	-	-	-	-	X	X	-
Growth of phytoplankton and zooplankton	-	-	-	-	-	-	X	X	-
Oxygen Balance	-	-	-	-	-	-	X	X	-
Benthic Vegetation	-	-	-	-	-	-	X	X	-
RIVER CONFIGURATION									
Reach	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Branch	-	X	X	X	X	X	X	X	X
Network	-	X	X	X	X	X	X	X	X
IMPOUNDMENT CONFIGURATION									
Mixed	-	X	X	X	X	X	X	X	X
Stratified	-	X	X	X	X	-	X	X	X
BOUNDARY CONDITIONS									
Steady state	X	X	X	X	-	X	X	X	X
Transient (Dynamic)	X	X	X	X	X	-	X	X	X
Quasi-dynamic	-	X	X	-	-	-	-	-	X
TRANSPORT TYPE									
Advection	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Diffusion	X	X	X	X	X	X	Dispersion	X	X
Source /Sink	X	-	-	X	X	X	X	-	-
VARIABILITY									
Deterministic	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Stochastic	-	-	X	-	-	-	-	-	X
HYDRODYNAMIC MODELLING HYDRAULIC APPLICATION									
River, harbor, estuary	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Irregular floodplains	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Appendice B

Direzione e velocità del vento per il sito di Marghera – distribuzione delle frequenze

Direzione e velocità del vento - Distribuzione delle frequenze

ENTE DELLA
ZONA
INDUSTRIALE
DI
PORTO
MARGHERA

Rete Ente Zona Industriale P. Marghera
Stazione Torre Pompieri - N. 22 - quota 40 m.
Data inizio 01/01/1976
Data fine 31/12/2004
Nr. Contribuenti validi 212281 su 254232 ÷ 83.5%

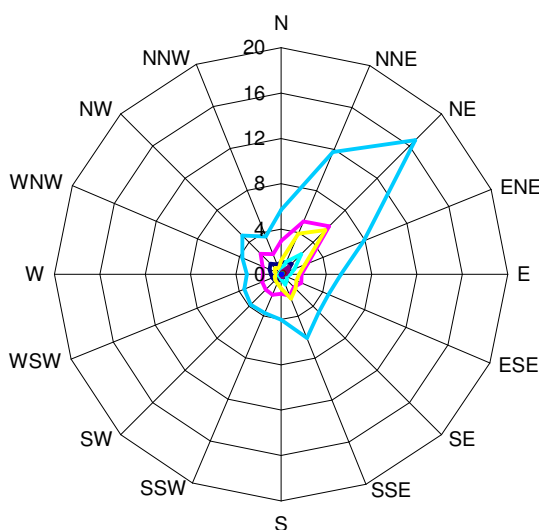
Monitor DV - VV

	Settore	Fino a 0,5 m/s	0,5-1,5 m/s	1,5-3,0 m/s	3,0-4,5 m/s	4,5-6,0 m/s	6,0-7,5 m/s	7,5-9,0 m/s	9,0-12,0 m/s	>12,0 m/s	TOTALE %
348,75÷11,25	N	0.00	1.05	2.95	1.22	0.32	0.09	0.03	0.01	0.00	5.67
11,25÷33,75	NNE	0.00	1.16	5.05	3.89	1.20	0.27	0.09	0.05	0.01	11.71
33,75÷56,25	NE	0.00	1.31	5.98	5.50	2.51	0.92	0.34	0.14	0.01	16.72
56,25÷78,75	ENE	0.00	0.62	2.50	2.26	1.27	0.67	0.33	0.19	0.02	7.85
78,75÷101,25	E	0.00	0.36	1.82	1.58	0.81	0.41	0.19	0.11	0.02	5.29
101,25÷123,75	ESE	0.00	0.36	1.91	1.46	0.53	0.17	0.07	0.04	0.01	4.55
123,75÷146,25	SE	0.00	0.36	1.58	1.78	0.70	0.20	0.06	0.04	0.00	4.73
146,25÷168,75	SSE	0.00	0.37	2.02	2.31	0.99	0.27	0.07	0.03	0.00	6.06
168,75÷191,25	S	0.00	0.46	1.73	1.23	0.43	0.11	0.03	0.01	0.00	4.01
191,25÷213,75	SSW	0.00	0.61	1.97	0.86	0.19	0.04	0.02	0.01	0.00	3.69
213,75÷236,25	SW	0.00	0.79	1.93	0.74	0.23	0.06	0.01	0.01	0.00	3.78
236,25÷258,75	WSW	0.00	0.83	1.80	0.61	0.18	0.07	0.02	0.01	0.00	3.51
258,75÷281,25	W	0.00	0.89	1.60	0.42	0.09	0.02	0.01	0.00	0.00	3.03
281,25÷303,75	WNW	0.00	1.11	1.78	0.62	0.14	0.02	0.01	0.00	0.00	3.69
303,75÷326,25	NW	0.00	1.31	2.56	0.77	0.14	0.03	0.01	0.00	0.00	4.83
326,25÷348,75	NNW	0.00	0.94	1.93	0.57	0.11	0.03	0.01	0.00	0.00	3.59
Calma		2.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.97
Variabile		0.00	2.89	1.08	0.24	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	4.33
Totali		2.97	15.43	40.20	26.05	9.92	3.41	1.29	0.66	0.08	100.0

ROSA DEI VENTI - 01/01/1976÷131/12/2004

campi di velocità del vento

- stazione n. 22 - quota 40 m -



— 0,5-1,5 — 1,5-3,0 — 3,0-4,5 — 4,5-6,0 — 6,0-7,5 — 7,5-9,0 — 9,0-12,0 — >12,0 — TOTALE