



## COMUNE DI GENOVA

# REALIZZAZIONE DELLA NUOVA CALATA AD USO CANTIERISTICA NAVALE ALL'INTERNO DEL PORTO PETROLI DI GENOVA SESTRI PONENTE E SISTEMAZIONE IDRAULICA DEL RIO MOLINASSI

PROGETTO DEFINITIVO PER APPALTO INTEGRATO

LOTTO 1 - LOTTO 2 II STRALCIO FASE 2 - LOTTO 3

### STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSA

PROGETTISTA INCARICATO DAL COMUNE DI GENOVA



Stantec S.p.A. Centro Direzionale Milano 2 - Palazzo Canova 20090 Segrate (Milano)  
Tel. +39 02 94757240 Fax. +39 02 26924275  
www.stantec.com

SCALA:

-

COMMESSA	APPALTO	FASE	TIPO DOC.	DISCIP.	GRUPPO	CONS.	REV
4 5 5 0 3 3 0 7	B	P D	R	I D R	D	0 0 1	F0

PROGETTAZIONE :

Rev.	Descrizione Emissione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data
F0	Prima Emissione	DHI	04/06/2021	G.Lonardini	04/06/2021	G. Sembenelli	04/06/2021

IL PROGETTISTA



Dott. Ing. G. Sembenelli

VERIFICATO :

VALIDATO : COMUNE DI GENOVA

IL RUP

Dott. Arch. R. Valcalda

ASSISTENTI AL RUP



# REALIZZAZIONE DELLA NUOVA CALATA AD USO CANTIERISTICA NAVALE ALL'INTERNO DEL PORTO PETROLI DI GENOVA SESTRI PONENTE E SISTEMAZIONE IDRAULICA DEL RIO MOLINASSI

Ricollocazione cooperative pescatori presenti a Multedo in località Prà

Studio di agitazione ondosa – Rev Giugno 2021



This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001  
Management System Certification

BUREAU VERITAS  
Certification Denmark A/S



# REALIZZAZIONE DELLA NUOVA CALATA AD USO CANTIERISTICA NAVALE ALL'INTERNO DEL PORTO PETROLI DI GENOVA SESTRI PONENTE E SISTEMAZIONE IDRAULICA DEL RIO MOLINASSI

Ricollocazione cooperative pescatori presenti a  
Multedo in località Prà

Studio di agitazione ondosa – Rev Giugno 2021

Committente                      STANTEC  
Referenti                          ing. Giuseppe Lonardini



*Batimetria dell'area di studio*

Project manager	Silvia Torretta
Quality supervisor	Paola Letizia
Autori	Silvia Torretta
Codice progetto - elaborato	22802991-01-00101
Data di approvazione	16 giugno 2021
Revisione	1.1
Classificazione	Ristretta



## INDICE

<b>1</b>	<b>Premessa.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Area di studio.....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Sintesi delle attività e approccio metodologico .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Descrizione dei dati disponibili .....</b>	<b>4</b>
4.1	Dati di onda e vento al largo.....	4
4.2	Dati batimetrici .....	6
<b>5</b>	<b>Caratterizzazione del clima meteomarinò al largo .....</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Analisi degli eventi estremi al largo.....</b>	<b>13</b>
6.1	Analisi statistica dei parametri d'onda .....	13
6.2	Analisi statistica dell'intensità del vento .....	17
6.3	Analisi statistica dei livelli marini .....	19
<b>7</b>	<b>Propagazione del moto ondoso dal largo verso costa.....</b>	<b>20</b>
7.1	Estensione del modello, batimetria di calcolo e condizioni al contorno .....	20
7.2	Risultati del modello di propagazione per le onde estreme .....	21
<b>8</b>	<b>Calcolo dell'agitazione ondosa residua nel canale di calma di Prà.....</b>	<b>24</b>
8.1	Estensione del modello e batimetria .....	25
8.2	Definizione dello strato assorbente ( <i>sponge layer</i> ) .....	26
8.3	Definizione delle linee di generazione .....	27
8.4	Definizione dei parametri di riflessione.....	27
8.5	Selezione delle onde di riferimento per lo studio.....	27
8.6	Risultati del modello .....	28
<b>9</b>	<b>Agitazione ondosa generata dal vento locale sul bacino di Prà-Voltri.....</b>	<b>30</b>
9.1	Estensione del modello, batimetria di calcolo e condizioni al contorno .....	31
9.2	Risultati del modello di generazione di onda da vento locale .....	33
<b>10</b>	<b>Valutazione dell'idrodinamica locale in concomitanza di eventi di piena del rio San Michele .....</b>	<b>35</b>
10.1	Caratteristiche idrologico-idrauliche del rio San Michele .....	35
10.2	Estensione del modello, batimetria di calcolo e condizioni al contorno .....	36
10.3	Risultati del modello idrodinamico.....	39
<b>11</b>	<b>Sintesi dello studio e conclusioni .....</b>	<b>44</b>
<b>12</b>	<b>Riferimenti.....</b>	<b>45</b>

## ALLEGATI

### **Allegato A**

Descrizione del database Mediterranean Wind Wave Model (MWM)

### **Allegato B**

MIKE 21 - Descrizione tecnica del modulo d'onda SW

### **Allegato C**

MIKE 21 - Descrizione tecnica del modulo di agitazione portuale BW

### **Allegato D**

MIKE 21 - Descrizione tecnica del modulo idrodinamico HD

## 1 Premessa

Il presente documento illustra le attività modellistiche predisposte a supporto della valutazione dell'agitazione ondosa residua nel canale di calma di Prà (Genova) nella nuova configurazione di progetto, comprensiva delle modifiche proposte per la ricollocazione di alcune cooperative di pescatori. Tale spostamento si rende necessario a seguito della realizzazione della nuova colmata ad uso cantieristico navale all'interno del Porto Petroli di Multedo, che occuperà l'area ad oggi utilizzata per carenaggio e rimessaggio delle barche.

DHI ha già predisposto, nei primi mesi del 2020, uno studio modellistico del moto ondoso interno al bacino di Prà-Voltri, finalizzato alla quantificazione delle condizioni di agitazione ondosa residua nel bacino, nella configurazione di stato attuale e di ipotesi progettuale. La presente analisi riprende ed aggiorna le attività svolte, comprendendo una modifica del layout progettuale originale della colmata prevista, con una parte delle banchine allargate di circa 10 m verso il mare.

Obiettivo dell'analisi è verificare il livello di agitazione ondosa interna al canale, sia per effetto dell'onda residua in condizioni di mareggiata (per differenti tempi di ritorno), sia per effetto delle onde (corte) generate all'interno del bacino di Prà-Voltri da intensi venti dai quadranti meridionali.

L'analisi ha infine previsto la simulazione del deflusso in piena del rio San Michele nella configurazione di stato attuale ed in quella di progetto, al fine di verificare l'insorgenza di eventuali criticità locali indotte dalla nuova distribuzione della corrente allo sbocco del rio, situato proprio in corrispondenza dell'area oggetto degli interventi. Rispetto allo studio del 2020 sono state riviste le stime delle portate di piena con tempo di ritorno pari a 50 e 200 anni.

Lo studio è stato affrontato utilizzando i codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati dal DHI, che rappresenta senza dubbio il gruppo di modelli numerici più completo ed affidabile oggi disponibile nel campo delle risorse idriche.

## 2 Area di studio

L'area oggetto di studio è situata all'interno del canale di calma di Prà, specchio acqueo che separa il piazzale del Terminal Contenitori PSA Genova Prà con il quartiere cittadino. All'interno del canale è stato realizzato un piccolo porticciolo destinato a barche di piccole e medie dimensioni. L'intera area, compresa la parte a terra lato città, ha subito negli ultimi anni una intensa attività di riqualificazione urbanistica, con creazione di varie infrastrutture di pubblica utilità (nuova stazione ferroviaria, passeggiata a mare, piscina, campi sportivi, etc).

All'interno di questo contesto ancora in evoluzione si colloca l'intervento in progetto, che prevede la realizzazione di aree attrezzate per il rimessaggio delle barche, tre scivoli per la messa in mare delle imbarcazioni, box e servizi vari destinati alle cooperative di pescatori attualmente operative nel bacino di Multedo.

Oltre all'ottimizzazione della zona a fruizione dei pescatori, il progetto comprende anche una serie di interventi di adeguamento idraulico del rio San Michele (la cui foce è adiacente all'area di studio) e un approfondimento locale dei fondali.



Figura 2-1 Delimitazione dell'intera area del bacino di Prà-Voltri, con evidenziata in rosso la zona oggetto di intervento all'imbocco del canale di calma di Prà

Nell'immagine a seguire è riportato uno stralcio degli interventi in progetto, con la piccola colmata destinata alle tre cooperative "San Leonardo" (in colore verde)," Il Sole" (in colore giallo) e "Varazze Pesca" (in colore azzurro), un approfondimento locale dei fondali e allargamento delle sezioni idrauliche nel tratto focivo del rio San Michele (nuovi argini in tratto nero spesso).

Per la descrizione dettagliata degli interventi si rimanda al documento progettuale dedicato.

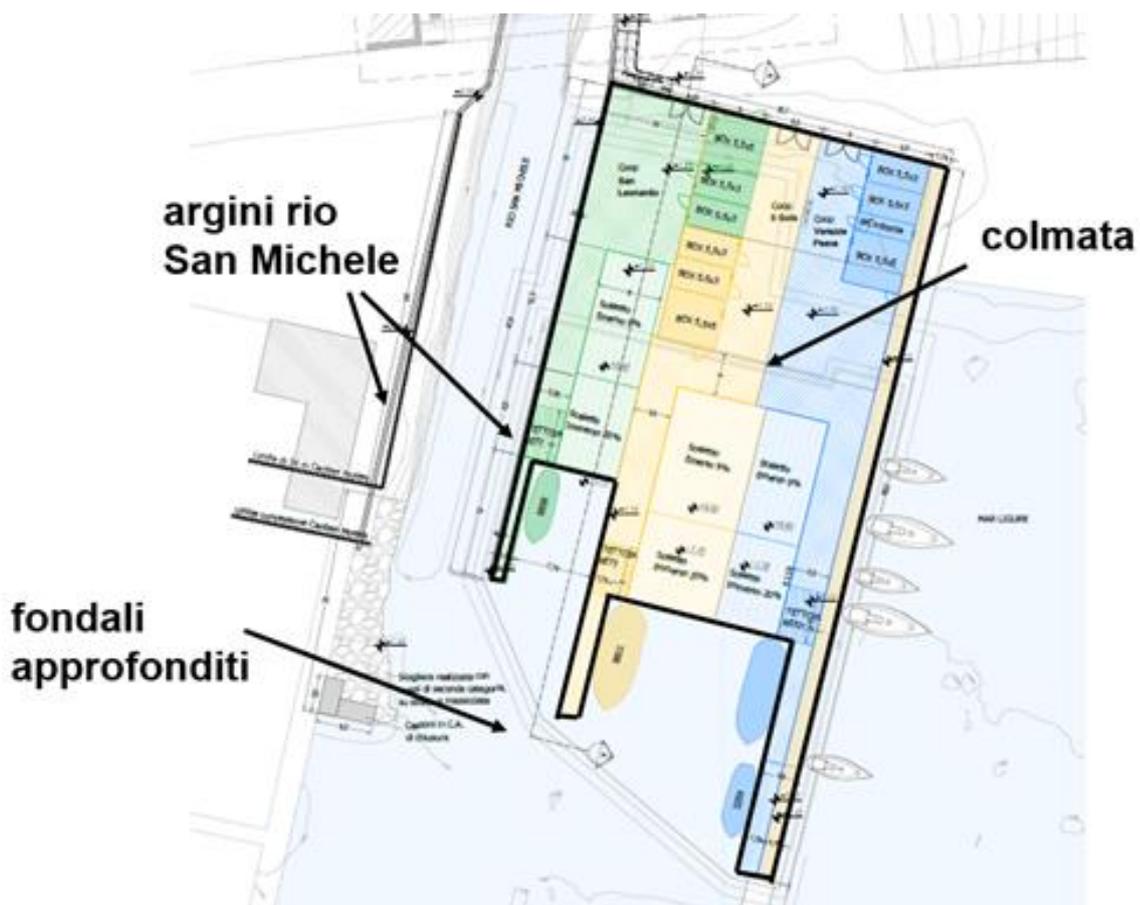


Figura 2-2 Stralcio degli interventi in progetto, comprensivi di una piccola colmata con realizzazione di box, aree di rimessaggio barche e scivoli per le tre cooperative di pescatori, approfondimento locale dei fondali e allargamento delle sezioni idrauliche nel tratto focivo del rio San Michele

### 3 Sintesi delle attività e approccio metodologico

La prima fase di studio (capitolo 4) ha previsto la raccolta e l'analisi dei dati batimetrici (provenienti sia da carte nautiche digitali, sia da un rilievo di dettaglio realizzato nel Febbraio 2020 dalla società "Tracciatori"), dei dati meteomarini al largo, nella forma di serie temporale dei principali parametri d'onda (altezza significativa, periodo medio e di picco, direzione di provenienza) e di vento (intensità e direzione).

In assenza di serie storiche di lungo periodo di dati osservati sulle quali basare un'affidabile analisi statistica, si è fatto riferimento ad un dataset di ricostruzione modellistica (wind-wave hindcast), utilizzando a tale scopo il Mediterranean Wind Wave Model (MWM), dataset di vento e onda ad alta risoluzione, robusto e validato, prodotto da DHI e HyMOLab (Università di Trieste) che mette a disposizione dati orari per 40 anni (1979-2018) ad una risoluzione spaziale di 3 km. Tale dataset è stato utilizzato per la caratterizzazione meteo-marina al largo (capitolo 5).

Gli eventi di mareggiata estrema per assegnato tempo di ritorno derivanti dall'analisi statistica direzionale della citata serie (capitolo 6) sono state quindi propagate verso costa attraverso la predisposizione del modello bidimensionale di DHI MIKE 21 SW (*Spectral Waves*, capitolo 7), modello spettrale di terza generazione in grado di simulare le principali trasformazioni che il moto ondoso subisce per effetto principalmente dell'interazione con il fondo (attrito, rifrazione, *shoaling*, frangimento) e delle dissipazioni dovute al frangimento da eccessiva ripidità (*white capping*).

I risultati del modello di propagazione largo-sottocosta sono stati utilizzati per definire le condizioni al contorno dell'analisi di agitazione ondosa residua interna al bacino, principale oggetto del presente studio.

Attraverso l'utilizzo del modulo BW (*Boussinesq Waves*) del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21 di DHI, si è quindi proceduto con l'implementazione di un modello di agitazione interna al bacino di Prà-Voltri (capitolo 8) in riferimento a due differenti mareggiate estreme (rispettivamente con tempo di ritorno pari a 5 e 50 anni) caratterizzate da direzione di provenienza, altezza significativa e periodo derivati dall'analisi statistica dei dati.

Ad integrazione delle simulazioni modellistiche di agitazione residua è stata svolta anche una ulteriore indagine con l'utilizzo del già citato modulo d'onda MIKE 21 SW per la stima degli effetti generati dal vento locale agente sullo specchio acqueo del bacino di Prà-Voltri (capitolo 9).

In ultimo, attraverso l'utilizzo del modello MIKE 21 HD, è stato simulato il deflusso in piena del rio San Michele nella configurazione di stato attuale ed in quella di progetto per due tempi di ritorno (50 e 200 anni), al fine di verificare l'insorgenza di eventuali criticità locali indotte dalla nuova distribuzione della corrente allo sbocco del rio, situato proprio in corrispondenza dell'area oggetto degli interventi.

## 4 Descrizione dei dati disponibili

### 4.1 Dati di onda e vento al largo

Per quanto riguarda la disponibilità di registrazioni di moto ondoso, la principale fonte di riferimento nel nostro paese è la Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I dati di boa possono essere utilizzati anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l'esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondametrica. Frequentemente, tuttavia, per la caratterizzazione meteomarina di un sito non è possibile fare affidamento alle misure. Questo avviene o perché i dati sono troppo frammentati a causa di malfunzionamenti dello strumento o periodi di manutenzione dello stesso, o perché le serie temporali disponibili coprono solo pochi anni (5÷10) oppure ancora perché per il paraggio in esame la boa o l'anemometro non sono disponibili o non sono sufficientemente rappresentativi.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come "*wind/wave hindcast*" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di intensità e direzione del vento, altezza d'onda, periodo e direzione, nel punto desiderato.

Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell'ingegneria costiera ed offshore, dall'altro va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI).

In Figura 4-1 è riportata la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso; la risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta.

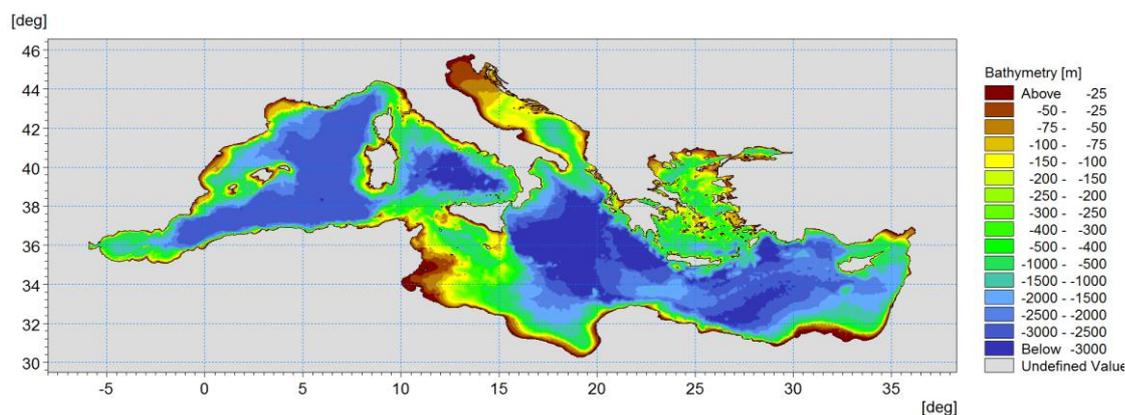


Figura 4-1 Batimetria di riferimento per la componente “onda” del database MWM

I dati sono stati estensivamente validati mediante confronti con anemometri, boe ondametriche, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d’onda da sette missioni satellitari.

Per la caratterizzazione meteomarina del sito di studio si è fatto riferimento al sopra citato database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto diffusamente in Allegato A al presente documento.

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarino al largo del bacino di Prà-Voltri è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

- il punto di analisi deve essere ben rappresentativo dell’esposizione del sito a vento e onda;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 3 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta limitata l’interazione dell’onda con il fondale, che verrà pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito;
- la localizzazione del punto non deve essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo troppo onerosi.

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM, è stato selezionato un punto per l’estrazione delle serie temporali orarie di vento e onda per 40 anni di riferimento (1.1.1979 – 31.12.2018). A seguire si riportano l’ubicazione e le coordinate del punto selezionato.

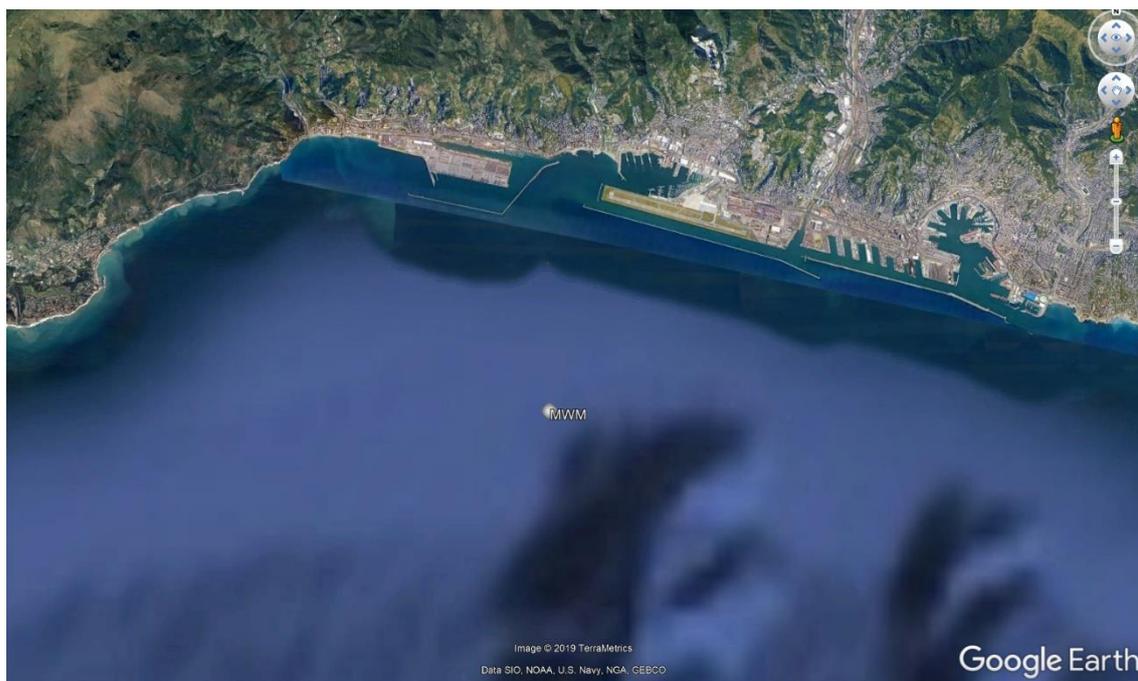


Figura 4-2 Ubicazione del punto di estrazione dal database MWM (1.1.1979 – 31.12.2018)

Tabella 4-1 Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]
MWM	8.808	44.374

## 4.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione batimetrica del sito sono state integrate due fonti di dati:

- per l'area oggetto degli interventi si è fatto riferimento al rilievo di dettaglio effettuato da TRACCIATORI di Bersini Andrea & C. Sas a Febbraio 2020 (Figura 4-3). Questo rilievo copre un'area che si estende per circa 180 m parallelamente a costa e per circa 240 m trasversalmente alla stessa, fino al piazzale del Terminal PSA. Il rilievo è stato fornito come isobate ogni 0.25 m

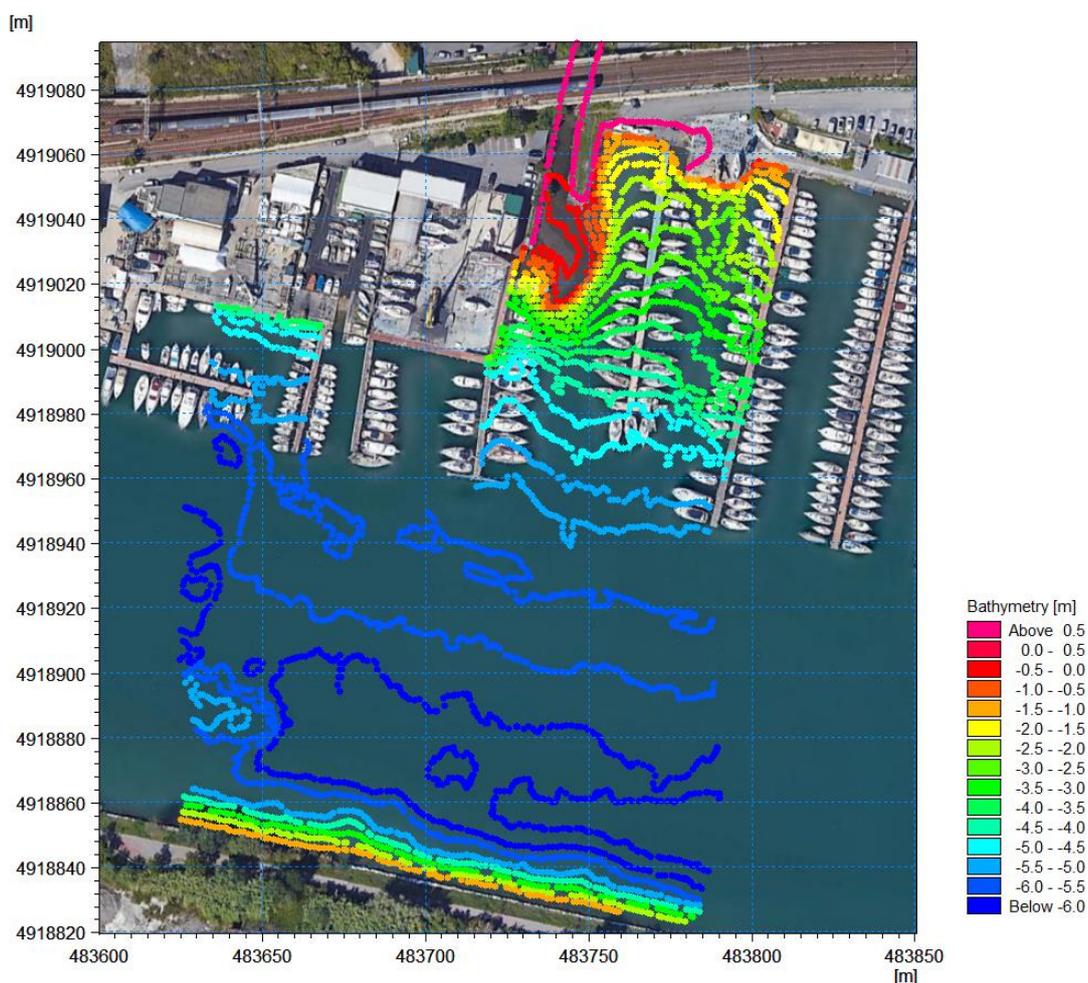


Figura 4-3 Isobate risultanti dal rilievo di dettaglio effettuato da TRACCIATORI del Febbraio 2020

- per le aree esterne al bacino a più alte profondità e comunque per le zone non ricomprese nel rilievo di dettaglio sono state utilizzate carte nautiche digitali appartenenti al database CM-93 di C-MAP, un database globale di cartografia nautica in formato digitale, creato e continuamente aggiornato da Jeppesen. I dati forniti da questo database sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHI, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area (Figura 4-4).

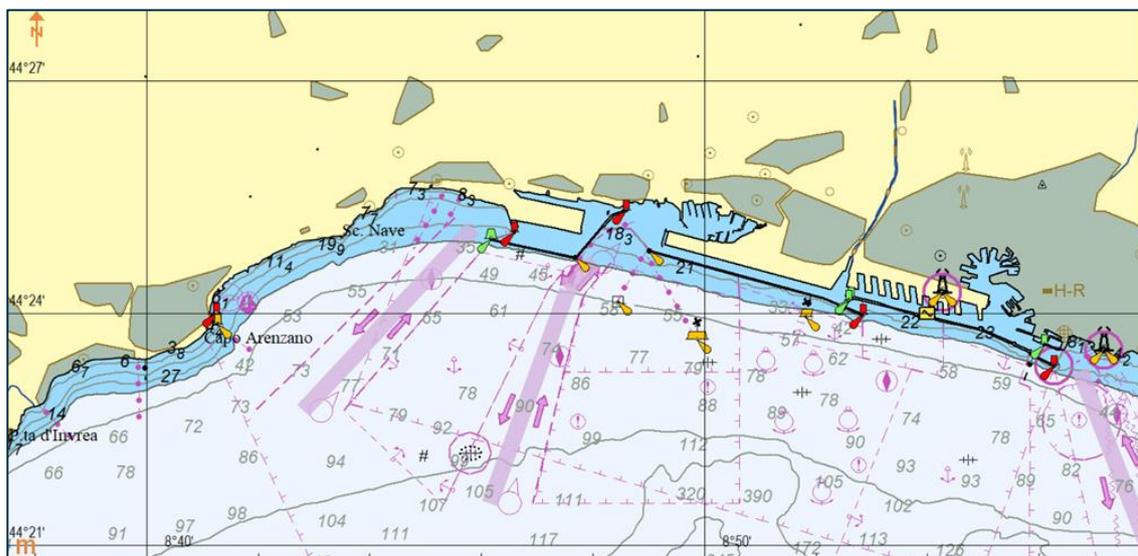


Figura 4-4 Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 di C-MAP per il paraggio in esame

## 5 Caratterizzazione del clima meteomarinico al largo

Come anticipato nella sezione 3, l'analisi del moto ondoso e del vento al largo del bacino di Prà-Voltri si basa su un punto estratto dal dataset Mediterranean Wind Wave Model (MWM). In particolare, si fa qui riferimento ai principali parametri descrittivi per l'onda (altezza significativa  $H_s$ , periodo di picco  $T_p$ , direzione media di propagazione MWD) e per il vento (intensità  $WS$  e direzione di provenienza  $WD$ ).

Il processamento della serie di dati ha permesso inoltre di predisporre la rosa del clima ondoso (Figura 5-1) e la tabella delle frequenze di occorrenza, per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (Tabella 5-1).

L'analisi combinata della rosa del clima ondoso e della tabella di frequenza evidenzia che le onde più alte e più frequenti provengono dal terzo quadrante, con particolare riferimento alle direzioni comprese indicativamente tra  $200^\circ$  N e  $210^\circ$  N (Libeccio), da cui provengono mediamente il 14% delle onde.

Sommando le frequenze delle onde su tutte le direzioni di provenienza appartenenti al terzo quadrante otteniamo una frequenza di occorrenza complessiva del 42%, (pari a circa 5 mesi/anno), superiore alla frequenza del 35% delle onde provenienti dal secondo quadrante (pari a circa 4 mesi/anno).

La condizione di calma, qui associata a valori di altezza d'onda significativa inferiori a 0.25 m/s, si verifica con una percentuale di occorrenza pari a circa 20% del totale (circa 2 mesi/anno).

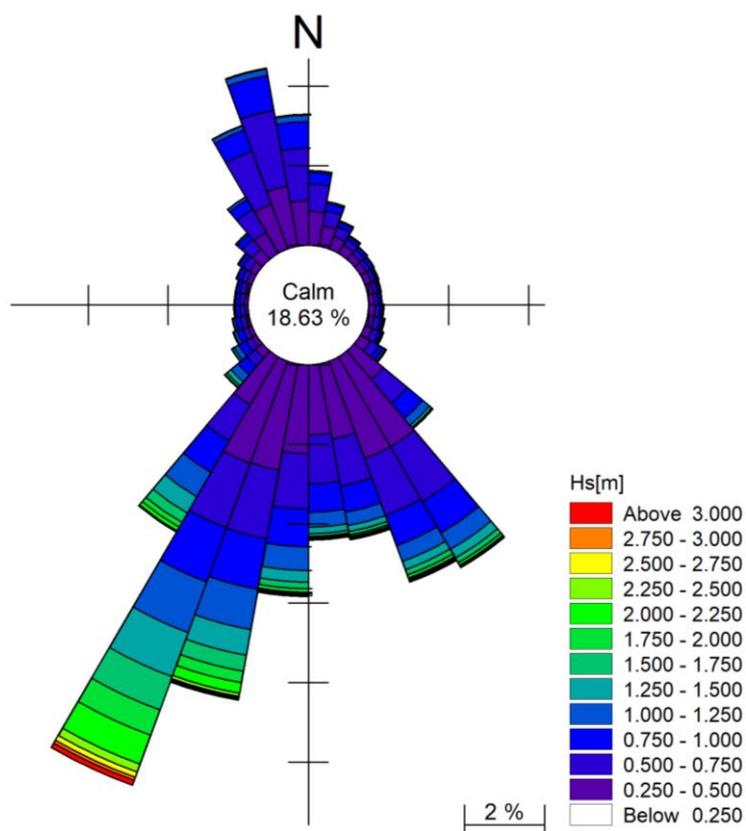


Figura 5-1 Rosa del clima ondoso per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per i 40 anni di dati a disposizione

Tabella 5-1 Frequenza di occorrenza per classi di altezza d'onda significativa e direzione media di provenienza per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979-2018

MWD[°]	Hs[m]																													
	<0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	2.25-2.5	2.5-2.75	2.75-3	3-3.25	3.25-3.5	3.5-3.75	3.75-4	4-4.25	4.25-4.5	4.5-4.75	4.75-5	5-5.25	5.25-5.5	5.5-5.75	5.75-6	6-6.25	6.25-6.5	6.5-6.75	6.75-7		
0-10	492	3019	2422	1023	159	10																								
10-20	349	1852	1357	653	167	10																								
20-30	212	1202	898	443	118	13																								
30-40	146	878	549	325	90	13																								
40-50	108	698	447	288	90	2																								
50-60	86	579	428	313	68	6																								
60-70	89	614	371	227	87	22																								
70-80	80	542	368	201	115	23																								
80-90	92	501	367	228	86	19	3																							
90-100	111	566	409	225	133	19	3																							
100-110	139	595	503	266	134	49	10	3																						
110-120	269	712	589	265	131	50	24	8																						
120-130	714	1014	849	449	208	69	22	6	3																					
130-140	5119	3312	2743	1767	747	285	88	41	7	7	2																			
140-150	9305	9145	5594	3216	1672	872	474	268	93	69	44	16	7	2	2	1	1													
150-160	7629	9161	5333	2816	1507	759	483	291	100	112	95	45	22	7	13	5	2													
160-170	5950	6731	4223	2372	1150	573	287	142	87	72	70	24	15	1	10	7	1	2	3	1										
170-180	5185	6226	4277	2533	1311	556	233	133	65	57	30	23	8	4	5	9	6	4	1											
180-190	5442	7832	4889	3323	2097	1047	571	309	134	93	55	32	19	11	14	6	11	2	13	6	1									
190-200	6468	9541	6148	4510	3607	2313	1425	1035	914	293	154	83	0	6	31	29	21	8	5	2	4	1	6	2	1					
200-210	7903	9610	6023	5118	4749	4117	3150	2346	2715	738	495	298	0	0	35	125	117	70	39	23	16	6	4	1	3	2				
210-220	5737	4881	3720	3183	2489	1648	960	490	379	75	19	8	0	0	0	1	3	3												
220-230	739	795	984	1045	754	449	205	74	15	0	2	1																		
230-240	233	448	635	705	476	203	55	8																						
240-250	140	385	504	536	276	80	11	3																						
250-260	141	337	451	464	211	42	10																							
260-270	110	309	392	408	150	18	8																							
270-280	110	333	440	357	118	12	3																							
280-290	110	364	454	353	79	8	7																							
290-300	142	492	524	376	85	18	8	1																						
300-310	167	664	714	388	109	11	9	1																						
310-320	223	1182	1131	582	139	31	2	0																						
320-330	319	2152	2322	1003	257	23	1	1																						
330-340	443	4185	5035	1940	411	36	12																							
340-350	489	5393	6796	3140	556	75	7																							
350-360	335	3954	4647	2340	548	81	5																							

L'analisi combinata della rosa del vento (Figura 5-2) e della tabella di frequenza (Tabella 5-2) evidenzia che i venti più frequenti ed intensi provengono da Nord e Nord Est (venti di Tramontana / Grecale), con valori che superano talvolta i 20 m/s.

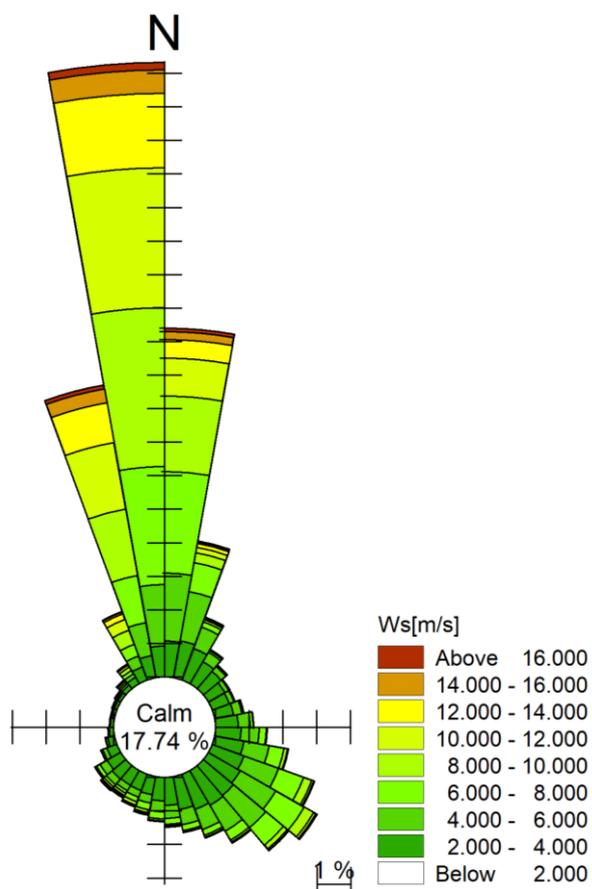


Figura 5-2 Rosa dell'intensità del vento per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per i 40 anni di dati a disposizione

Tabella 5-2 Frequenza di occorrenza per classi di intensità del vento e direzione media di provenienza per il punto MWM (Lon 8.808°E, Lat 44.374°N) per il periodo 1979-2018

		Ws[m/s]													
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	>26
MWD[°]	0-10	1892	3752	7122	10601	7899	3965	1927	846	288	71	17	0	1	
	10-20	1972	3926	5217	3076	1054	594	397	180	68	7	1	2		
	20-30	2129	3495	2386	602	242	124	86	50	10	3				
	30-40	2014	2676	1118	210	93	31	29	7	3					
	40-50	2030	2388	636	108	51	31	18	3						
	50-60	2048	2003	444	66	24	19	15	10	0	1				
	60-70	1997	1902	525	69	7	4	13	9	1	2				
	70-80	1972	2016	874	160	11	7	6	2	1					
	80-90	1986	2345	1263	318	28	6	7	3	1					
	90-100	2018	2696	1891	706	96	24	8	2	2					
	100-110	2045	3098	2650	1606	348	78	27	4	1					
	110-120	2064	3514	3833	2732	924	206	91	15	7	1				
	120-130	2093	3824	4257	3381	1134	270	116	31	2	2				
	130-140	2120	4083	4389	2367	535	150	68	13	4	1				
	140-150	2164	4182	3136	1082	216	93	25	11	5					
	150-160	2129	3898	2230	662	175	57	27	16	5					
	160-170	2152	3511	1583	622	131	40	22	14	5	1				
	170-180	2035	2915	1366	611	178	66	35	23	6					
	180-190	2050	2446	1161	695	226	71	37	17	3	1				
	190-200	1906	1945	885	695	347	150	57	13	3					
	200-210	1904	1821	707	543	376	158	44	16	2	2				
	210-220	1868	1785	637	320	266	160	97	46	9	3				
	220-230	1831	1853	782	334	179	116	68	57	18	3	1			
	230-240	1730	1659	826	425	109	64	30	8	2					
	240-250	1636	1132	464	167	33	4	4							
	250-260	1320	755	224	42	10	4								
	260-270	1129	466	105	38	11	1								
	270-280	1005	384	82	26	17	1								
	280-290	909	324	74	33	27	13								
	290-300	875	336	104	69	37	20	10	1	1					
	300-310	887	347	108	82	89	83	33	17	3	1				
	310-320	999	497	213	174	186	121	58	20	2					
	320-330	1100	798	418	396	398	239	98	41	9	3				
330-340	1215	1474	1199	1278	1588	1191	628	205	63	9	7				
340-350	1384	2325	3510	5009	7056	7095	4189	1494	350	42	19	1			
350-360	1604	3212	6462	12312	16653	14595	7778	2500	599	115	22	7	1		

## 6 Analisi degli eventi estremi al largo

Per la selezione degli eventi estremi da simulare per l'analisi dell'agitazione ondosa residua interna al bacino di Prà-Voltri nelle due configurazioni previste, si è proceduto con l'analisi statistica sia dei parametri di moto ondoso al largo, sia delle condizioni di vento e di livello marino per assegnato periodo di ritorno, da utilizzarsi come ulteriori forzanti locali per la propagazione delle mareggiate critiche con tempo di ritorno di 5 e 50 anni.

### 6.1 Analisi statistica dei parametri d'onda

Sulla base dei circa 40 anni di dati a disposizione è stata predisposta l'analisi statistica finalizzata alla definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno.

Al fine di garantire una caratterizzazione più completa ed accurata, è stata svolta un'analisi direzionale del moto ondoso, per i settori di provenienza significativi per il sito oggetto di studio. A tale proposito, con riferimento all'intero clima ondoso al largo, dopo una propedeutica analisi di sensitività, sono stati preventivamente identificati 3 settori, denominati con le lettere A-B-C, caratterizzati ciascuno da un'ampiezza di 20° (Figura 6-1).

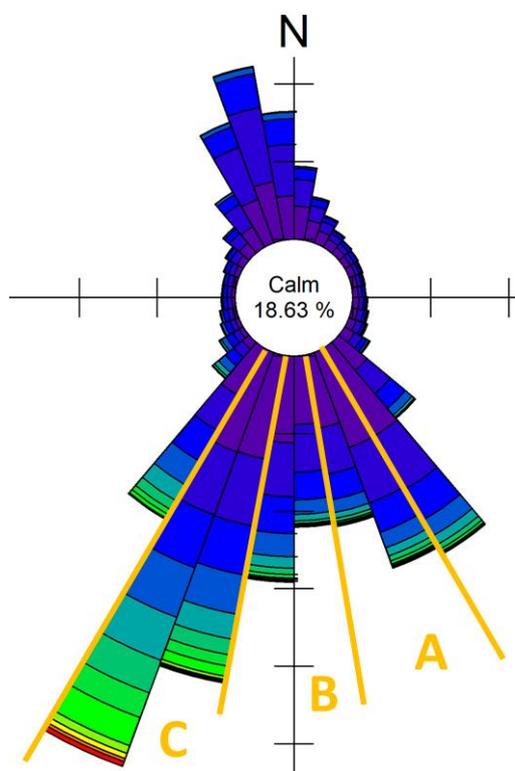


Figura 6-1 Suddivisione della rosa del clima ondoso del punto MWM al largo in settori direzionali di 20°, propedeutica all'analisi statistica degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno

I valori estremi associati a tempi di ritorno elevati sono in genere stimati applicando una distribuzione di probabilità alla serie di dati. In letteratura sono disponibili molte distribuzioni di probabilità, tecniche di selezione dei dati e di fitting ed ovviamente i risultati statistici risultano inevitabilmente dipendenti dalla metodologia selezionata. Nel presente studio si è proceduto facendo riferimento ad una serie di diversi approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

Prendendo ad esempio l'analisi statistica della variabile "altezza d'onda significativa", la procedura adottata è stata la seguente:

- estrazione, dalla serie temporale di dati orari nel punto di analisi, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 24-36 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (qui impostata pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);
- fit della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati. I parametri della distribuzione di probabilità possono essere stimati sia con metodi di massima verosimiglianza, sia con metodi ai minimi quadrati. Sono stati utilizzati i seguenti approcci di analisi:
  - fit dei dati con la distribuzione dei massimi annuali di Gumbel;
  - fit dei dati con la distribuzione di tutti gli eventi indipendenti sopra una determinata soglia (metodo "Peak Over Threshold"). Tra i tipi di distribuzione sono stati testati: l'esponenziale, la Weibull troncata e la Weibull a 2 parametri;
- stima degli intervalli di confidenza mediante tecniche di *bootstrap*.

Nel caso in esame, sempre in riferimento all'altezza d'onda, per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri (da Figura 6-2 a Figura 6-4), risultando questa la legge in grado di meglio rappresentare i dati disponibili.

Per ogni settore il numero complessivo di eventi presi in considerazione è stato pari a 60 (1.5 eventi all'anno in media). Il criterio di indipendenza adottato per le mareggiate (in termini di intervallo minimo tra due eventi) è stato impostato pari a 36 ore.

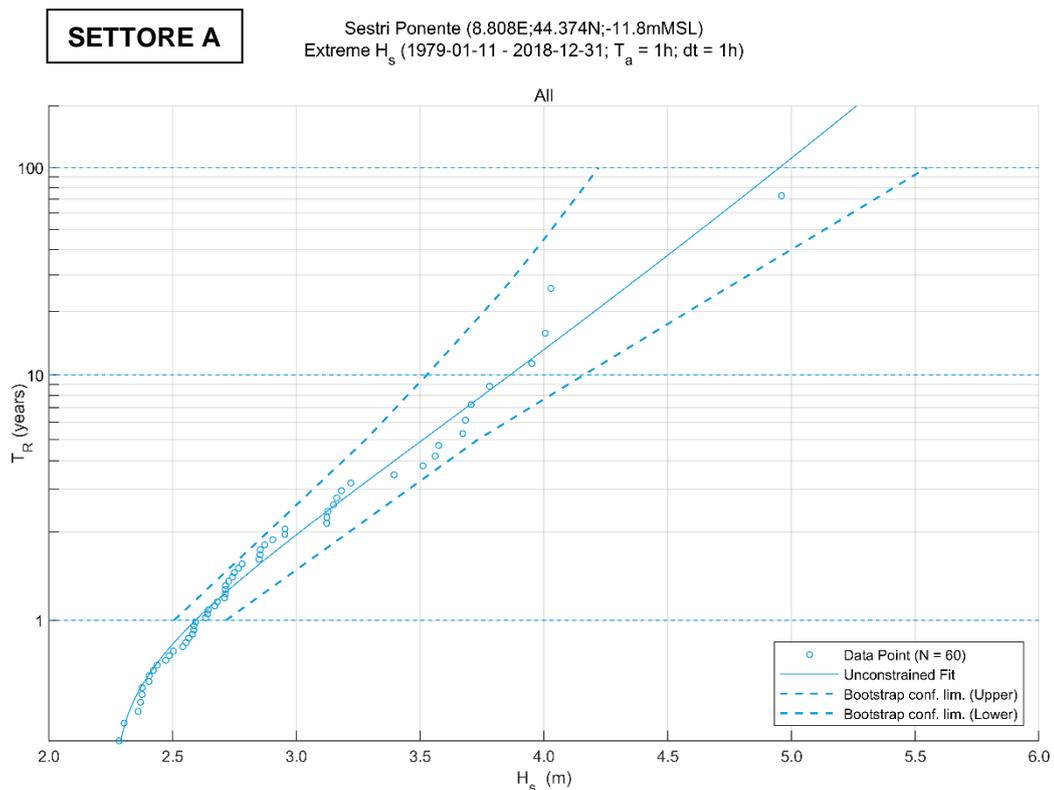


Figura 6-2 Settore A (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 150°N e 170°N) - Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

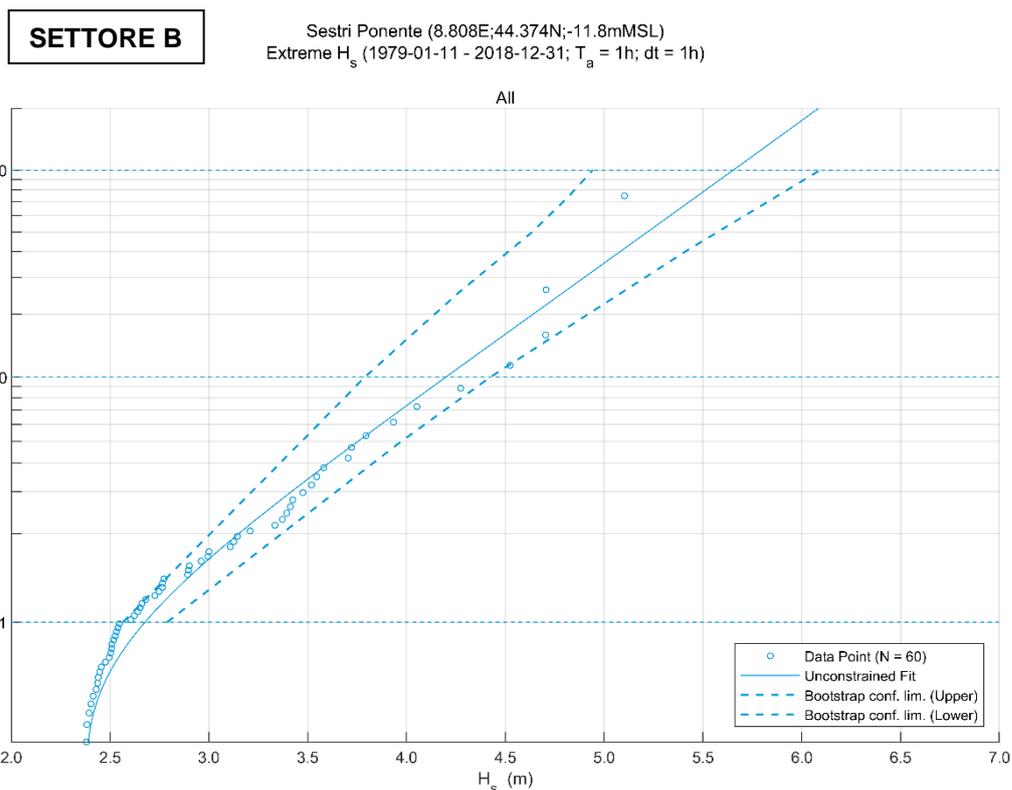


Figura 6-3 Settore B (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 170°N e 190°N) - Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

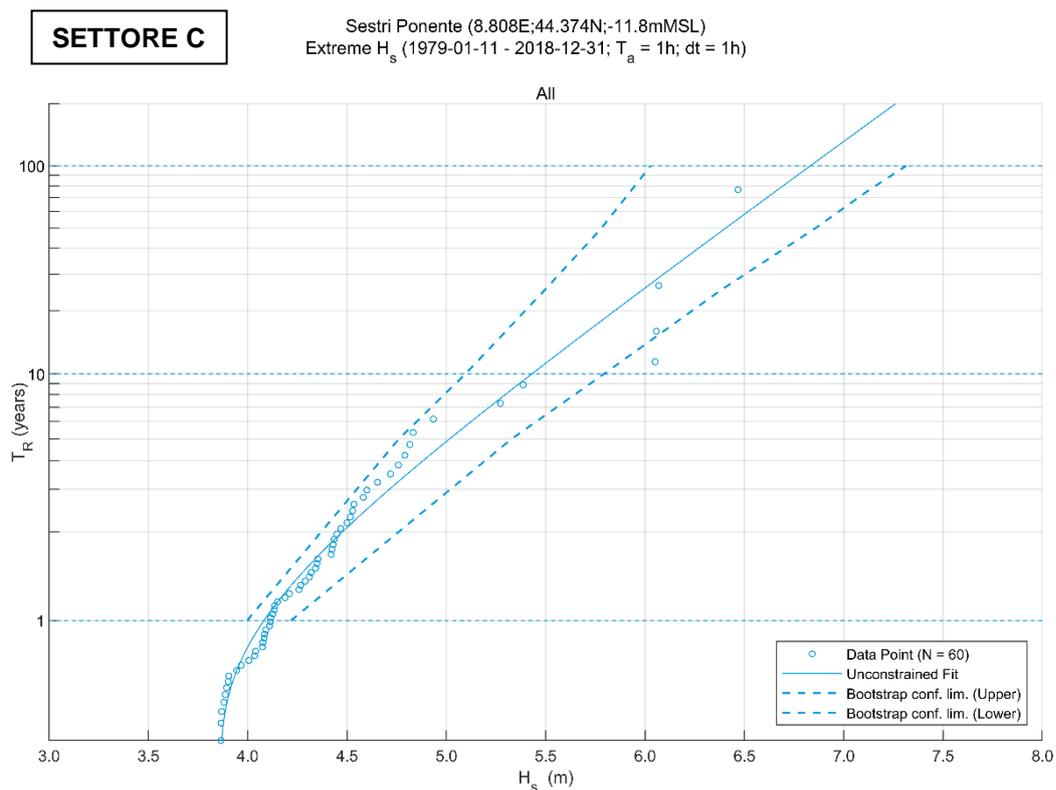


Figura 6-4 Settore C (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 190°N e 210°N) - Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

La tabella a seguire riporta i valori di altezza d'onda significativa, nel punto MWM al largo, risultanti dalla statistica direzionale per gli eventi estremi per il tempo di ritorno di 5 anni (Tabella 6-1) e di 50 anni (Tabella 6-2), di interesse per le verifiche sull'agitazione ondosa interna al bacino.

Tabella 6-1 Valori risultanti dall'analisi statistica delle altezze d'onda significativa direzionale nel punto MWM al largo per tempo di ritorno pari a 5 anni

Altezza d'onda significativa – TR = 5 anni	
Settore direzionale	Hs [m]
A (150°N<MWD<170°N)	3.51
B (170°N<MWD<190°N)	3.75
C (190°N<MWD<210°N)	5.02

Tabella 6-2 Valori risultanti dall'analisi statistica delle altezze d'onda significativa direzionale nel punto MWM al largo per tempo di ritorno pari a 50 anni

Altezza d'onda significativa – TR = 50 anni	
Settore direzionale	Hs [m]
A (150°N<MWD<170°N)	4.63
B (170°N<MWD<190°N)	5.22
C (190°N<MWD<210°N)	6.41

Una volta selezionate le altezze d'onda per assegnato tempo di ritorno per ciascun settore direzionale, al fine di disporre di condizioni univoche da simulare con il modello di propagazione largo-costa (capitolo 7), è stato necessario associare ad ogni evento un periodo di picco ed una direzione di provenienza. A tal fine sono stati graficizzati, per ogni settore direzionale in esame, per le sole onde più alte, i valori del periodo di picco (Tp) in funzione dell'altezza d'onda significativa appartenenti alla serie estratta dal punto di estrazione MWM al largo.

L'analisi dei tre grafici ottenuti ha permesso, attraverso l'adozione di un approccio cautelativo, di associare opportuni valori di Tp alle onde caratterizzate da tempo di ritorno pari a 5 anni e pari a 50 anni, al variare del settore direzionale. Il criterio adottato per l'associazione del periodo all'altezza d'onda, cautelativo, prevede tra l'altro di associare all'onda più alta considerata (TR=50 anni) un valore di periodo di picco selezionato tra i più alti verificatisi, indipendentemente dall'altezza d'onda.

Per quanto concerne la direzione da associare alle onde estreme, si è proceduto con l'assegnazione del valore medio di ogni singolo settore di competenza.

Gli eventi estremi così definiti (Tabella 6-3) sono stati quindi propagati verso il canale di calma di Prà mediante la predisposizione di un modello d'onda, i cui dettagli vengono riportati nel capitolo a seguire.

Tabella 6-3 Caratteristiche degli eventi estremi al largo per tempo di ritorno pari a 5 anni e a 50 anni

Settore direzionale	TR 5 anni			TR 50 anni		
	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
A (150°N<MWD<170°N)	3.51	9.5	160°	4.63	10.5	160°
B (170°N<MWD<190°N)	3.75	10.5	180°	5.22	11.5	180°
C (190°N<MWD<210°N)	5.02	11.0	200°	6.41	12.5	200°

## 6.2 Analisi statistica dell'intensità del vento

L'analisi statistica dei valori di intensità del vento si basa sull'intera serie temporale quarantennale dei dati estratti nel punto al largo (database MWM). In particolare, è stata implementata un'analisi statistica direzionale relativamente a due settori:

- l'intero settore meridionale, comprensivo di tutte le direzioni appartenenti al secondo e al terzo quadrante, ovvero da quelle direzioni che possono incrementare il moto ondoso verso il sito di studio: i venti estremi risultanti sono stati successivamente utilizzati quale ulteriore forzante locale nel modello di propagazione dell'onda dal largo a costa (capitolo 7);
- il settore di 30° compreso tra le direzioni 110°N e 140°N, di particolare rilievo per la generazione delle onde interne al bacino di Prà-Voltri, in quanto per tali direzioni risulta massimo il fetch interno al bacino.

Per entrambe le serie direzionali è stato estratto un numero sufficientemente significativo di eventi statisticamente indipendenti (60, come per l'analisi statistica relativa all'altezza d'onda), caratterizzati dai valori più elevati di intensità del vento.

In Tabella 6-4 e nelle Figura 6-5 e Figura 6-6 sono stati riportati i risultati tabellari e grafici dell'analisi statistica della velocità di vento.

Tabella 6-4 Valori di intensità del vento WS [m/s] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica condotta per i due settori direzionali.

Settore direzionale	TR	TR	TR
	5anni	10anni	50anni
	WS	WS	WS
	[m/s]	[m/s]	[m/s]
90-270°N	17.7	18.4	19.9
110-140°N	16.0	17.0	19.2

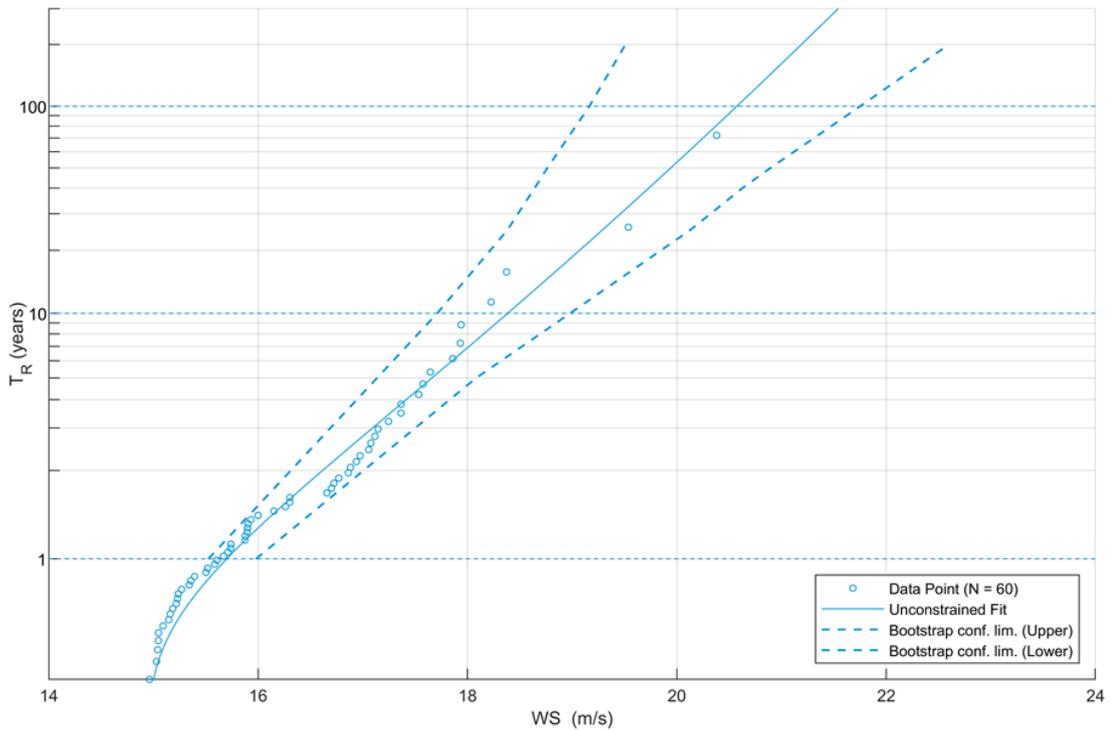


Figura 6-5 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 60 maggiori valori di intensità del vento, con direzione appartenente al secondo e terzo quadrante, degli ultimi 40 anni estratte nel punto MWM al largo di Prà

(8.808E;44.374N;-100.0mMSL)  
 Extreme WS (1979-01-11 - 2018-12-31;  $T_a = 1h$ ;  $dt = 1h$ )

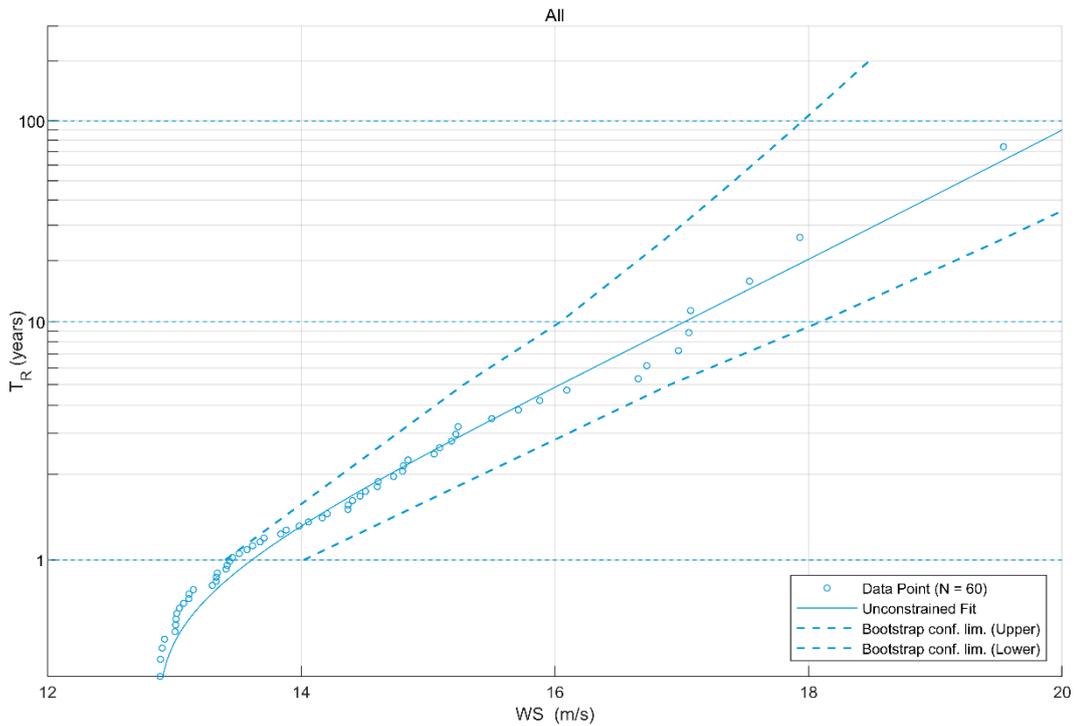


Figura 6-6 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 60 maggiori valori di intensità del vento, con direzione appartenente al settore 110-140°N, degli ultimi 40 anni estratte nel punto MWM al largo di Prà

### 6.3 Analisi statistica dei livelli marini

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Genova. Il mareografo è posto all'interno del bacino portuale, pertanto è in grado di tenere in considerazione i seguenti contributi alla composizione del livello superficiale totale:

- contributo della marea astronomica;
- contributo della pressione atmosferica (effetto di "barometro inverso");
- contributo del vento (effetto "*wind setup*", ovvero schiacciamento della massa d'acqua verso terra in concomitanza con intensi venti provenienti dal mare).

Per la sua posizione, il mareografo non misura l'effetto dell'onda ("*wave setup*") che, su costa aperta e in bassi fondali, laddove si verifica il frangimento, può ulteriormente contribuire ad innalzare (localmente) la superficie marina. Tale contributo non è di interesse ai fini del presente lavoro.

La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno è stata impostata sui 40 valori più elevati registrati dal mareografo ed ha fornito i valori riportati in Tabella 6-5.

Tabella 6-5 Valori di livello del mare per assegnato tempo di ritorno (dati mareografo di Genova)

TR [anni]	Livello [m s.l.m.]
5	0.68
10	0.72
50	0.82

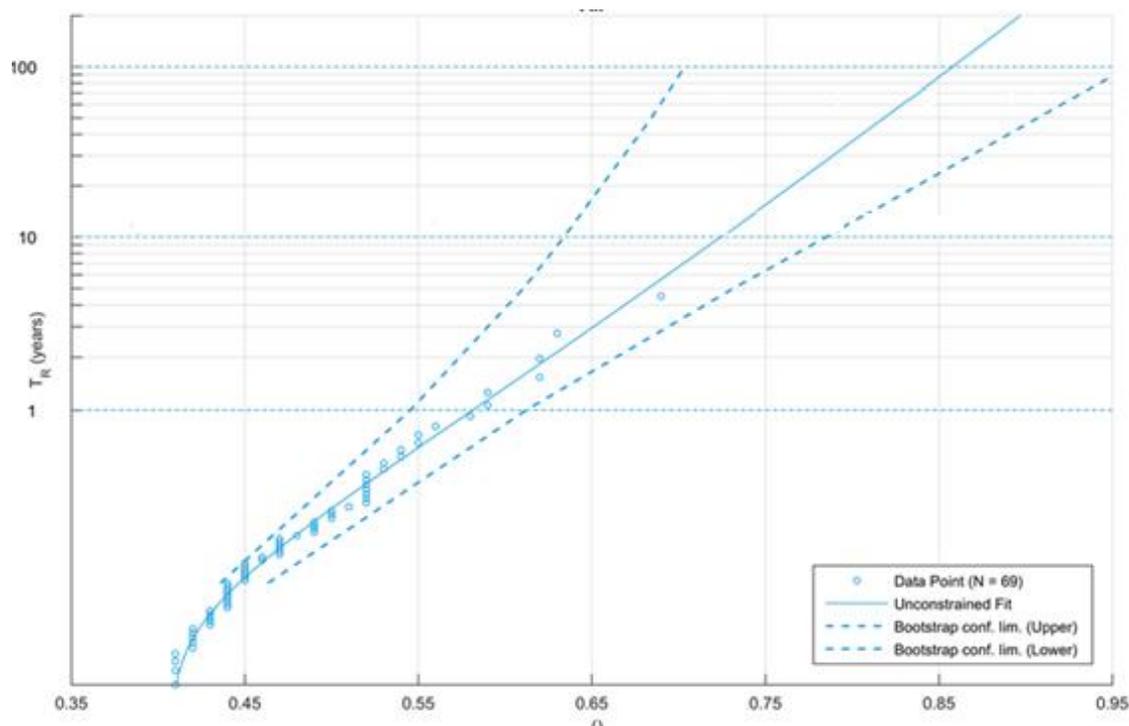


Figura 6-7 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai maggiori valori di livello del mare della serie osservata al Mareografo di Genova

## 7 Propagazione del moto ondoso dal largo verso costa

Come anticipato ed illustrato nella sezione dedicata all'approccio metodologico dello studio (capitolo 3), il clima ondoso sottocosta in corrispondenza dell'ingresso al canale di calma di Prà è stato definito attraverso l'implementazione di un modello d'onda, il MIKE 21 SW (Spectral Waves) di DHI, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di *swell* sia al largo, sia in aree costiere.

Tale modello, a maglia triangolare "flessibile", permette di utilizzare una risoluzione spaziale variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo ed eventualmente frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- generazione dell'onda ad opera del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al cosiddetto "*white capping*";
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento;
- rifrazione e *shoaling* dovuti alle variazioni del fondale;
- interazione onde-correnti;
- diffrazione;
- riflessione.

Un'accurata descrizione del modulo MIKE 21 SW è riportata nell'Allegato B al presente elaborato.

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. *mesh* di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, *white-capping*, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della griglia di calcolo (*mesh*) e per ciascun istante temporale di calcolo (*time step*), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco, direzione media di propagazione.

### 7.1 Estensione del modello, batimetria di calcolo e condizioni al contorno

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 4.2, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre una porzione di mare antistante l'imboccatura del canale di calma di Prà, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 15 km. L'estensione spaziale e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio, come detto, si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP e al rilievo batimetrico di dettaglio effettuato da Tracciatori nel Febbraio 2020.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione è mostrato nella figura a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

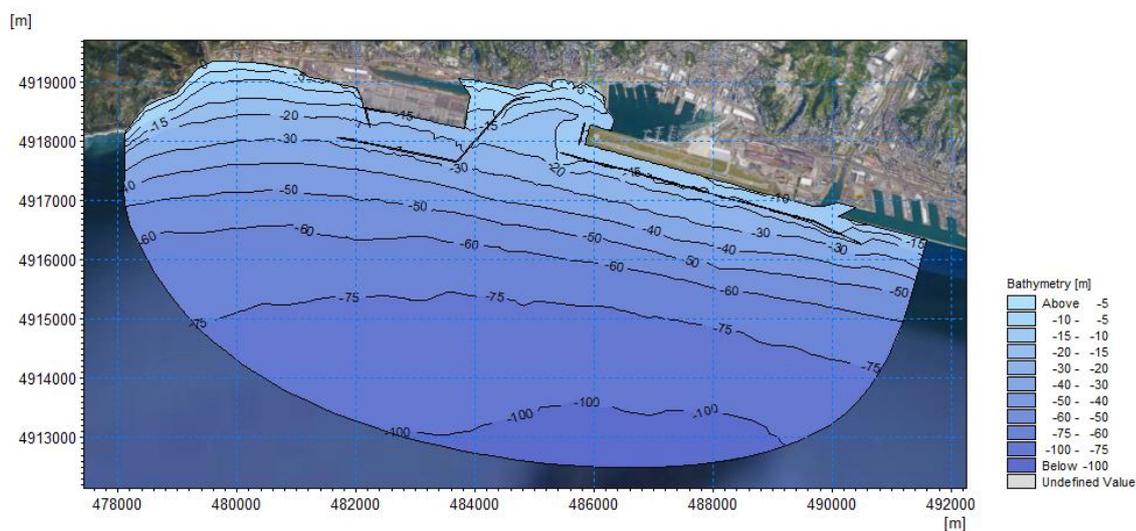


Figura 7-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 300 m, per arrivare a circa 50 m nella zona più prossima al bacino. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 11'600 elementi.

I principali parametri d'onda estratti dal database MWM (sezione 4.1) sono stati utilizzati come condizione al contorno di largo del modello (i dati sono stati assunti uniformi lungo il contorno aperto).

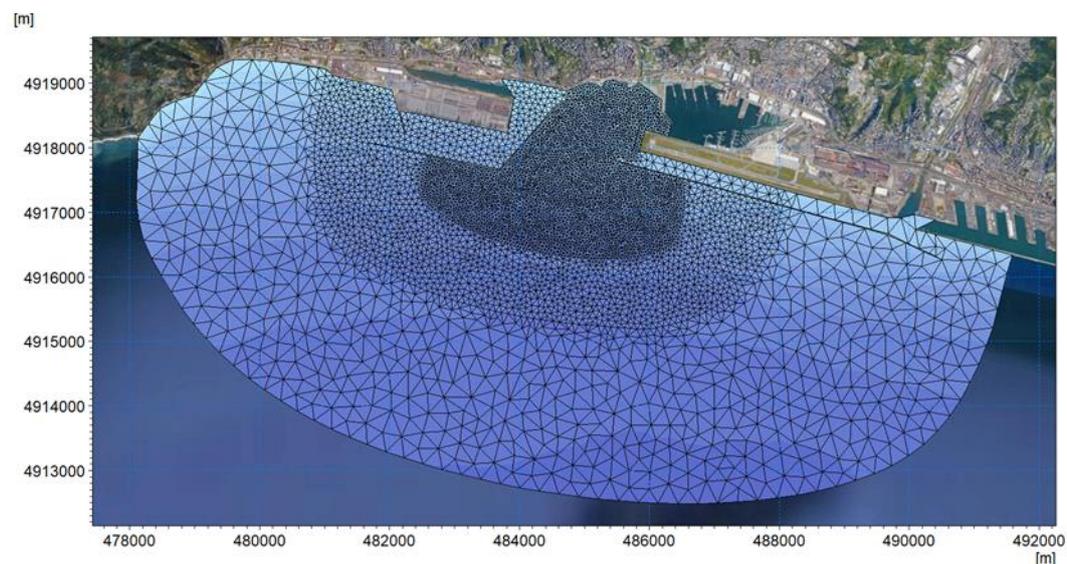


Figura 7-2 Risoluzione spaziale della mesh di calcolo del modello d'onda utilizzato per la propagazione del moto ondoso

## 7.2 Risultati del modello di propagazione per le onde estreme

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione)

in tutti i punti del dominio di calcolo, rendendo pertanto possibile estrarre la serie di moto ondoso in qualsiasi punto sottocosta.

In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che subisce l'onda nella sua propagazione da largo verso costa.

In particolare, la scala cromatica mette bene in evidenza la protezione offerta dalle dighe incluse nel dominio di calcolo, quella a ponente, a protezione del porto di Prà-Voltri, e quella a levante, a protezione dell'area aeroportuale. La maggior riduzione dell'altezza d'onda, ben evidenziata nelle mappe dalla rapida variazione cromatica, si osserva in prossimità della linea di riva e, ad esempio, nella zona antistante l'imboccatura del canale di calma di Prà.

I risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze elevate determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa.

Il modello d'onda è stato utilizzato per la trasposizione delle mareggiate caratterizzate dalle condizioni di onda con assegnato tempo di ritorno pari a 5 anni e 50 anni, derivanti dall'analisi statistica riportata al capitolo 6.

Nella tabella a seguire si riportano le caratteristiche degli scenari di onda selezionati e la relativa distribuzione dell'altezza d'onda significativa all'interno del dominio di calcolo.

Si precisa che per tali scenari sono state cautelativamente inserite come ulteriori forzanti e condizioni locali anche i valori di vento proveniente dai settori meridionali (sezione 6.2) e livello del mare (6.3) associati al medesimo tempo di ritorno dell'altezza d'onda riprodotta.

Tabella 7-1 Caratteristiche (al largo) degli 8 scenari di onda significativa per assegnato periodo di ritorno, TR=5 anni e TR=50 anni

ONDA	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	TR [anni]
1	3.51	9.5	160°	5
2	3.75	10.5	180°	5
3	5.02	11.0	200°	5
4	4.63	10.5	160°	50
5	5.22	11.5	180°	50
6	6.41	12.5	200°	50

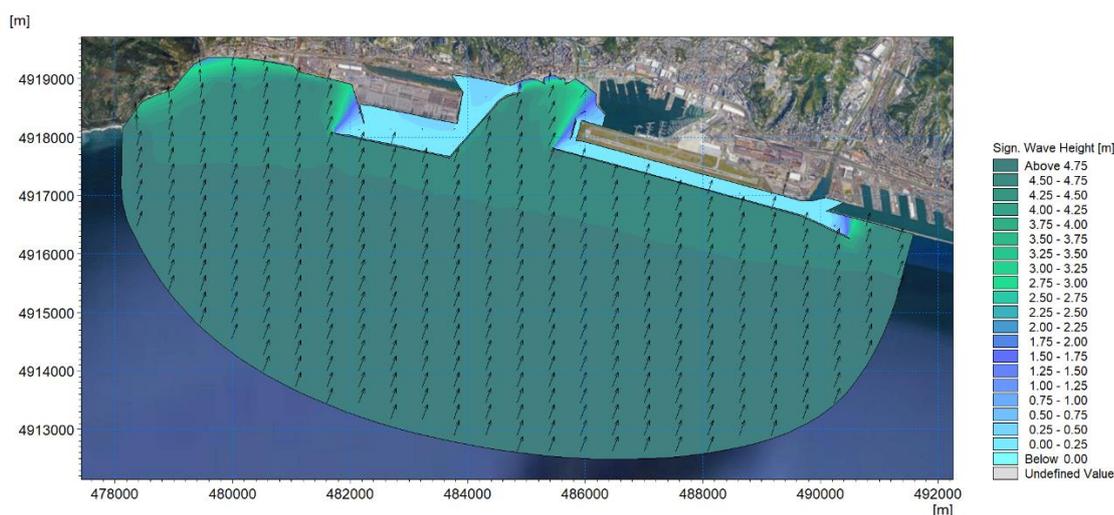


Figura 7-3 Distribuzione dell'altezza d'onda dell'onda 3 (Hs al largo pari a 5.02 m, direzione di provenienza MWD pari a 200°N, periodo di picco Tp pari a 11 s)

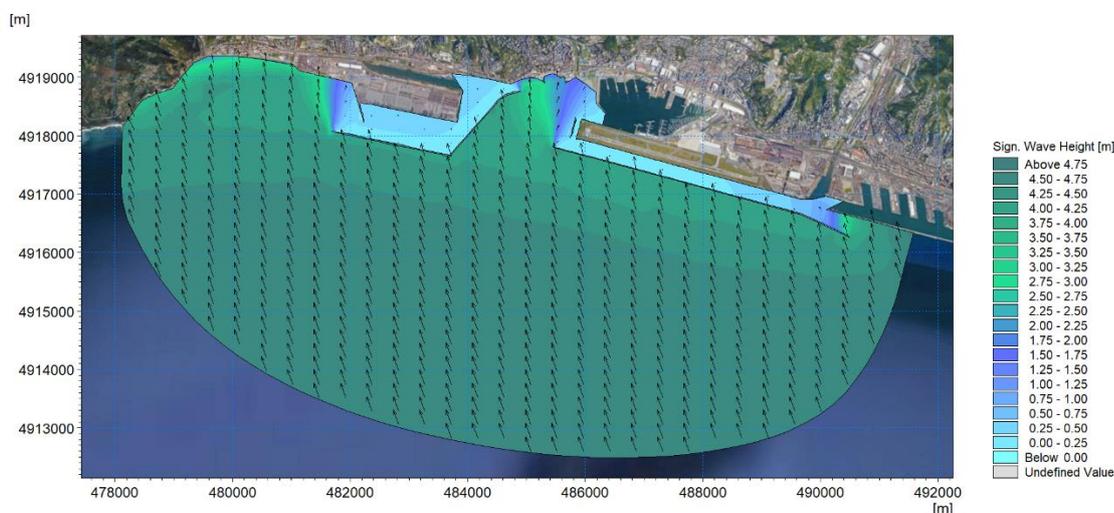


Figura 7-4 Distribuzione dell'altezza d'onda dell'onda 4 (Hs al largo pari a 4.63 m, direzione di provenienza MWD pari a 160°N, periodo di picco Tp pari a 10.5 s)

L'analisi dei risultati del modello, con particolare riferimento ai valori di altezza d'onda estratti in prossimità dell'imboccatura del canale di calma di Prà per tutti gli scenari simulati, ha permesso di individuare i due eventi più critici per il sito di studio (uno per il tempo di ritorno 5 anni e uno per lo scenario dei 50 anni) da simulare con il modello di agitazione ondosa (MIKE 21 BW, capitolo 8).

In particolare, gli scenari 2 e 5, caratterizzati da una direzione di provenienza dell'onda da Sud, sono risultati quelli più conservativi e sono stati utilizzati per la definizione delle condizioni al contorno del modello di agitazione interna descritto in dettaglio nel capitolo a seguire. Tali scenari, oltre ad avere in prossimità dell'imboccatura di levante del bacino di Prà un valore di altezza d'onda maggiore, sono caratterizzati anche da una direzione di provenienza del moto ondoso meno schermata e protetta dalla presenza delle opere di difesa.

## 8 Calcolo dell'agitazione ondosa residua nel canale di calma di Prà

Lo studio dell'agitazione ondosa interna ad un bacino portuale richiede un'analisi complessa e dettagliata di tutte le fenomenologie che caratterizzano la propagazione e la trasformazione del moto ondoso nell'area di studio. E' quindi necessario tenere conto di tutti i fenomeni principali quali rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo, frangimento, diffrazione e riflessione. A tal fine, l'approccio mediante modello numerico risulta la scelta più idonea, dato l'elevato livello di affidabilità e robustezza raggiunto ad oggi dai codici di calcolo.

Per l'analisi dell'agitazione ondosa interna al porto è stato utilizzato il modulo BW (Boussinesq Waves) del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21 di DHI, tra i codici di calcolo più avanzati e completi per la simulazione di onde corte e lunghe in bacini portuali, darsene ed aree costiere in generale.

Oltre alla possibilità di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti, MIKE 21 BW include la possibilità di considerare la porosità delle strutture per la simulazione della riflessione parziale dell'onda e la sua trasmissione attraverso pali o frangiflutti. Inoltre, è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia dell'onda (ad esempio una spiaggia). L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può avvenire attraverso i contorni aperti o (nella maggior parte dei casi) da linee di generazione interne.

MIKE 21 BW include sia la modalità bidimensionale sia quella monodimensionale, ed è basato sulla soluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza che è viene introdotta considerando gli effetti delle accelerazioni verticali sulla distribuzione di pressione. Le equazioni di Boussinesq sono risolte in riferimento ad una formulazione basata sul flusso con un miglioramento nella descrizione della dispersione lineare. Queste equazioni, dette di "Boussinesq estese", rendono il modello adatto alla simulazione di onde direzionali che viaggiano da acque profonde a basse. La profondità massima rappresentabile con le equazioni di Boussinesq estese è pari a circa metà della lunghezza d'onda, mentre con le equazioni classiche il rapporto fra profondità e lunghezza d'onda si riduce a 0.22.

Il principale campo di applicazione di MIKE 21 BW è l'analisi delle dinamiche del moto ondoso nei porti e nelle aree costiere in genere. Il risultato principale fornito da MIKE 21 BW è il campo di agitazione ondosa residua (*wave disturbance*), di interesse sia per la progettazione di un porto (al fine di minimizzare le ore/anno di inoperatività di una banchina per effetto di moto ondoso eccessivo - *downtime*) sia per la gestione di un terminal (previsione di inoperatività). Un'accurata descrizione del modulo utilizzato è riportata nell'Allegato C al presente elaborato.

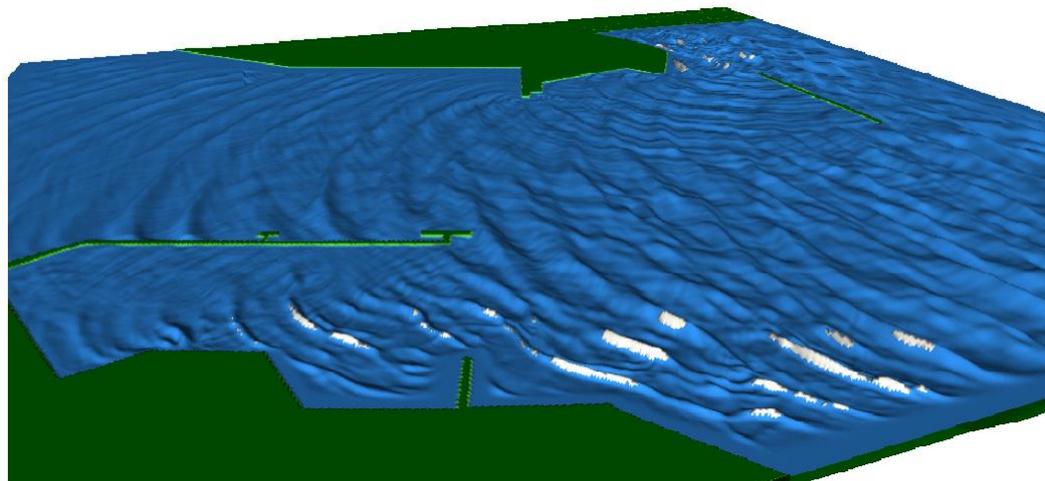


Figura 8-1 Esempio di elevazione superficiale calcolata con il modulo MIKE21 BW

## 8.1 Estensione del modello e batimetria

Il modello di agitazione ondosa è stato implementato su un dominio di calcolo sufficientemente ampio da comprendere sia l'intero bacino di Prà, sia una porzione di mare antistante, comprensiva di tutte le opere foranee che influiscono sulla propagazione delle onde in avvicinamento al bacino di interesse.

Vista la posizione del sito di studio all'imbocco del canale di calma e l'elevata protezione dal moto ondoso esercitata dalla diga e dal molo all'ingresso del porto di Prà-Voltri, ai fini del calcolo dell'agitazione residua non sono state prese in considerazione le onde entranti da Ponente nel porto di Prà-Voltri.

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, si è fatto riferimento al rilievo di dettaglio a disposizione, integrato con il database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di C-MAP.

La risoluzione spaziale della griglia di calcolo è vincolata dal dettaglio nella descrizione degli elementi strutturali che costituiscono il layout del porto e, in funzione delle caratteristiche del sito, è stato necessario adottare celle di lato pari a 3 m.

La griglia di calcolo, con orientazione pari a 0°N, è composta complessivamente da 1'450 x 750 (1'087'500) celle per una superficie totale pari a poco meno di 10 Km<sup>2</sup>.

Le quote di rilievo sono state successivamente interpolate sulla griglia di calcolo al fine di ricostruire la geometria del fondale nell'area di interesse. In tale fase sono stati adottati opportuni accorgimenti finalizzati a rendere la batimetria più regolare ma pur sempre aderente e rappresentativa della realtà fisica.

Relativamente alle aree emerse ed alle strutture, è stato imposto un valore di quota costante, pari a 10 metri, ipotizzando l'impossibilità di sormonto da parte delle acque (assunzione comunemente adottata in questo tipo di analisi). La batimetria così costruita è riportata nell'immagine a seguire.

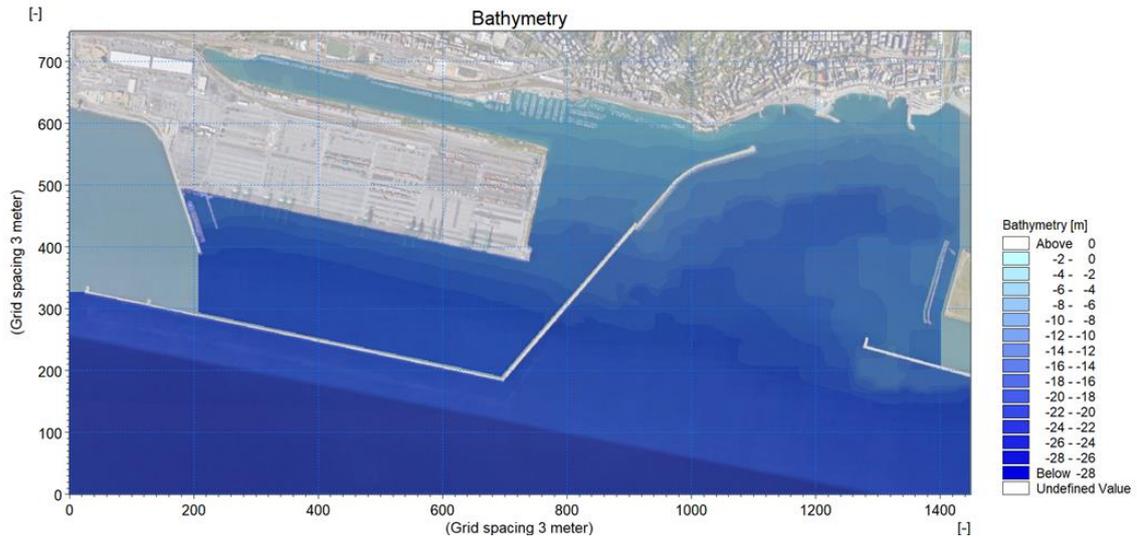


Figura 8-2 Batimetria di calcolo

## 8.2 Definizione dello strato assorbente (*sponge layer*)

Il modulo MIKE 21 BW funziona concettualmente come un modello fisico in vasca. I contorni del modello sono chiusi e la generazione delle onde avviene internamente al dominio mediante apposite linee di generazione.

Essendo il dominio costituito da 4 contorni chiusi, in corrispondenza di essi vengono introdotti appositi strati assorbenti, definiti *sponge layers*, al fine di inibire il fenomeno di riflessione fittizia che verrebbe a crearsi in corrispondenza dei bordi del dominio.

Nell'immagine a seguire è illustrato lo *sponge layer* relativo alla griglia di calcolo; le tonalità variabili da rosso a giallo indicano il variare progressivo del grado di assorbimento dell'energia dell'onda.

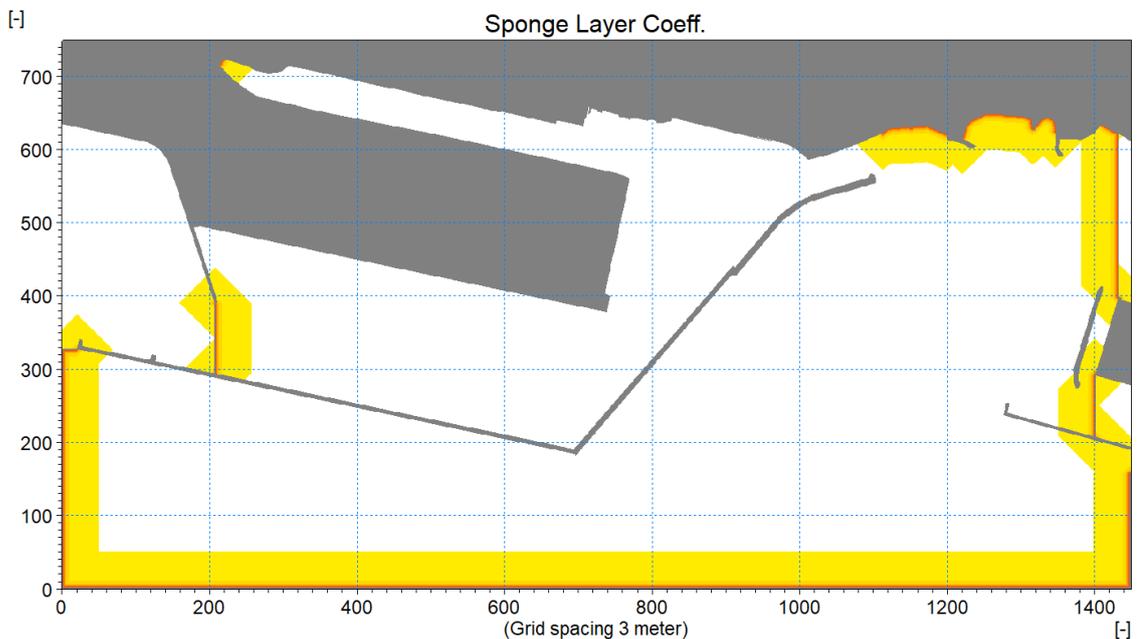


Figura 8-3 Localizzazione dello strato assorbente (tonalità di giallo e rosso) in riferimento alla griglia di calcolo

### 8.3 Definizione delle linee di generazione

Le onde incidenti, in termini di variazione di superficie libera e flusso in ingresso, sono state introdotte nel dominio di calcolo mediante linee di generazione d'onda. Una linea di generazione ha una funzione analoga a quella di un generatore d'onda in un modello fisico in vasca.

La linea di generazione è stata posizionata in modo da favorire la propagazione delle onde all'interno del dominio e del bacino portuale (Figura 8-4).

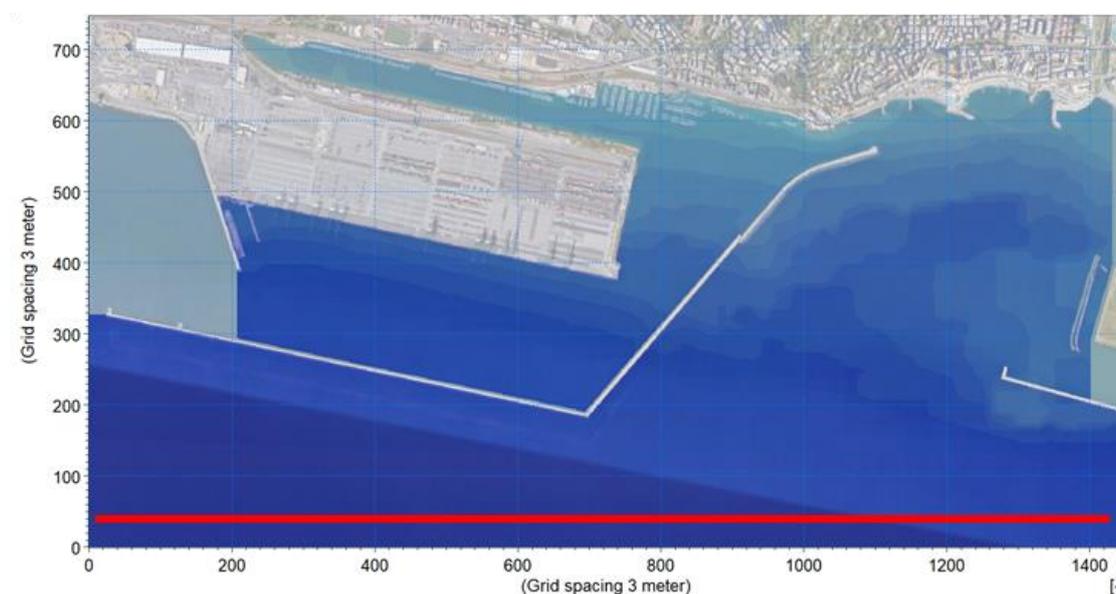


Figura 8-4 Localizzazione della linea di generazione (in rosso) relativa alla griglia di calcolo

### 8.4 Definizione dei parametri di riflessione

Il modulo MIKE21 BW include la possibilità di simulare la riflessione parziale delle strutture, ed eventualmente anche la trasmissione a valle di essa. Tale fenomeno è gestito nel modello attraverso uno strato parzialmente assorbente (*porosity layer*) che determina, laddove utilizzato, una riduzione dell'onda riflessa che incide su una struttura.

Il coefficiente di riflessione è definito come il rapporto tra onda incidente ed onda riflessa. Un coefficiente di riflessione pari ad uno implica una riflessione totale. Il coefficiente di riflessione è strettamente dipendente dalle caratteristiche dell'onda incidente (altezza e periodo) e per tale motivo non è possibile assegnare un coefficiente univoco per ogni struttura. Generalmente si definisce, per ogni tipo di struttura, un range di variabilità del coefficiente di riflessione.

Nel presente studio tali coefficienti sono stati definiti in funzione delle caratteristiche ad oggi note delle banchine e degli accosti.

### 8.5 Selezione delle onde di riferimento per lo studio

In virtù dell'elevata protezione offerta al sito dalla diga del porto di Prà-Voltri e dal piazzale del Terminal PSA, si è ritenuto opportuno effettuare le verifiche per le sole onde estreme, ovvero per i valori di altezza d'onda per assegnato tempo di ritorno (TR 5 anni e TR 50 anni).

Per le caratteristiche d'onda da introdurre quali input delle simulazioni di agitazione interna si sono prese a riferimento le condizioni risultate maggiormente conservative nella trasposizione del moto ondoso descritta nel capitolo precedente (scenario d'onda 2 e 5):

- onda TR 5 anni: scenario 2:  $H_s=3.75\text{m}$ ,  $T_p=10.5\text{s}$ ;
- onda TR 50 anni: scenario 5:  $H_s=5.22\text{m}$ ,  $T_p=11.5\text{s}$ .

In considerazione della posizione del canale di calma e della protezione offerta dalla diga, si è assunto cautelativamente di associare alle onde simulate la direzione limite tra quelle ricomprese nel settore considerato ( $MWD=170^\circ\text{N}$ ).

## 8.6 Risultati del modello

Nelle immagini a seguire vengono presentati, per la configurazione di progetto, i campi di altezza d'onda significativa interna al dominio di calcolo in relazione agli scenari d'onda simulati.

Al fine di illustrare correttamente la distribuzione dell'onda residua nell'intero dominio di calcolo, sono stati riportati i risultati delle simulazioni svolte sia in riferimento all'intera area di studio, sia con il dettaglio sulla zona di interesse (Figura 8-5 e Figura 8-6).

L'onda, caratterizzata al largo da un'altezza significativa  $H_s$  pari a 3.75 m, nella propagazione verso riva incontra la diga sopraflutto del bacino di Prà-Voltri generando una riflessione con valori che in prossimità della struttura stessa risultano superiori ai 4 m. Verso Levante, la testata del molo a protezione del canale di calma aeroportuale di Genova e del bacino di Multedo, provoca, per effetto della diffrazione, la rotazione del fronte d'onda, ben evidente dalle isolinee di altezza d'onda riportate in Figura 8-5.

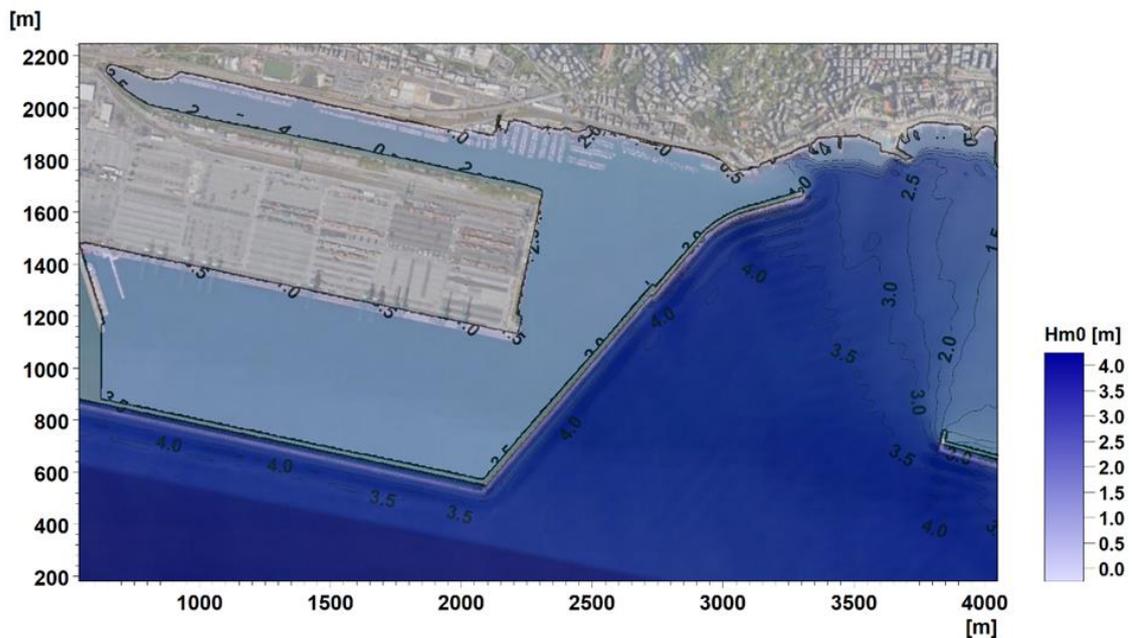


Figura 8-5 Onda TR 5 anni ( $H_s=3.75\text{m}$ ;  $T_p=10.5\text{s}$ ;  $MWD=170^\circ\text{N}$ ) distribuzione dell'onda sull'intero dominio di calcolo

La diga sopraflutto di Prà nell'ultimo tratto verso la costa presenta, per una lunghezza di circa 700 m, una protezione in tetrapodi che limita gli effetti di riflessione e contribuisce significativamente, insieme alla riduzione dei fondali, ad un progressivo abbattimento del valore di altezza d'onda procedendo verso l'imbocco del canale di calma di Prà. Inoltre, in corrispondenza di tale

imboccatura, vi è un tratto di 280 m circa caratterizzato da profondità molto basse, il che favorisce un ulteriore significativo abbattimento dell'onda incidente.

La sovrapposizione dei vari effetti di assorbimento e riduzione dell'energia comportano valori di altezza d'onda residua in corrispondenza della zona del canale di calma di Prà destinata all'ormeggio delle piccole imbarcazioni inferiori ai 10 cm, ed in particolare pari a 7-8cm nella zona oggetto dell'intervento in progetto (Figura 8-6).



Figura 8-6 Onda TR 5 anni ( $H_s=3.75\text{m}$ ;  $T_p=10.5\text{s}$ ;  $MWD=170^\circ\text{N}$ ): dettaglio della distribuzione dell'onda residua sulla zona oggetto dell'intervento in progetto

In Figura 8-7 e Figura 8-8 è invece riportata la distribuzione dell'onda per l'evento con tempo di ritorno 50 anni.

Anche in questo caso si osserva la significativa riduzione dell'onda, caratterizzata al largo da  $H_s=5.22\text{m}$ , sino a valori pari a 1.5m in prossimità dell'imboccatura. Nel tratto dei 280 m compreso tra la testata del molo sopraflutto presso l'imboccatura di levante e l'apertura del bacino portuale, l'onda subisce un ulteriore abbattimento sino a circa 20 cm.

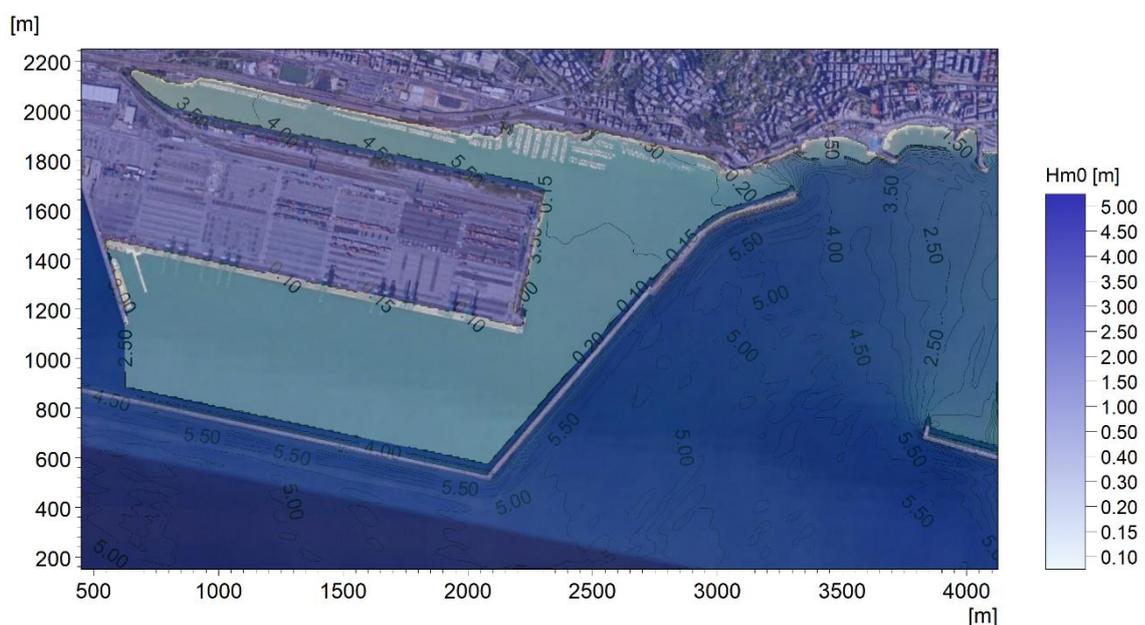


Figura 8-7 Onda TR 50 anni ( $H_s=5.22\text{m}$ ;  $T_p=11.5\text{s}$ ;  $MWD=170^\circ\text{N}$ ): distribuzione dell'onda sull'intero dominio di calcolo

Nella zona oggetto degli interventi in progetto si osservano valori locali di onda residua pari a 13-15 cm (Figura 8-8).

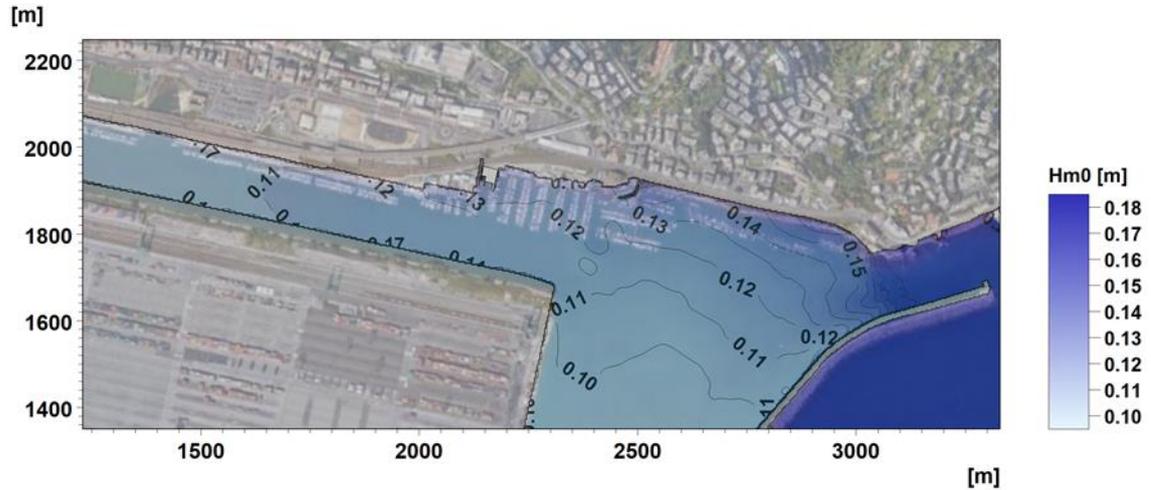


Figura 8-8 Onda TR 50 anni ( $H_s=5.22\text{m}$ ;  $T_p=11.5\text{s}$ ;  $MWD=170^\circ\text{N}$ ): dettaglio della distribuzione dell'onda residua sulla zona oggetto dell'intervento in progetto

Per entrambi gli scenari considerati (TR 5 anni e TR 50 anni), i valori di onda residua nella zona oggetto degli interventi in progetto risultano significativamente inferiori alle soglie definite nelle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana)", (Febbraio 2002), documento di riferimento per gli studi di agitazione ondosa. Infatti in tale pubblicazione il valore soglia per mareggiate con tempo di ritorno pari a 50 anni è di 0.50cm, mentre per eventi con TR 5 anni è di 0.30cm.

## 9 Agitazione ondosa generata dal vento locale sul bacino di Prà-Voltri

Ad integrazione delle simulazioni di agitazione ondosa per effetto dell'onda residua in condizioni di mareggiata (capitolo 8), sono stati investigati anche gli effetti dell'onda generata localmente da un vento estremo agente sullo specchio acqueo del bacino portuale di Prà-Voltri.

Per la valutazione dei campi d'onda generati dal vento è stato applicato il modulo MIKE 21 SW – Spectral Waves, già descritto al capitolo 7, applicando come unica forzante il vento uniformemente distribuito su tutto il dominio di calcolo.

In virtù della conformazione del bacino portuale e della distribuzione dei fetch interni, la zona oggetto del presente studio è soggetta principalmente alle onde generate dal vento proveniente da Sud-Est. Le simulazioni sono pertanto state eseguite facendo riferimento ad un vento proveniente dal settore 110-140°N; in particolare, per completezza di analisi, le simulazioni sono state effettuate considerando 3 distinte direzioni del vento: 110°N, 125°N e 140°N.

Coerentemente con l'analisi illustrata in precedenza (capitolo 8) il valore di intensità del vento estremo considerato è associato ad un periodo di ritorno di 50 anni ed è pari a 19.2 m/s, come ricavato dall'analisi statistica per il settore specifico 110-140°N esposta alla sezione 6.2.

L'analisi è stata condotta per la configurazione di progetto.

## 9.1 Estensione del modello, batimetria di calcolo e condizioni al contorno

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 4.2, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre l'intero bacino di Prà-Voltri. L'estensione spaziale e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio l'andamento del fondale ed i fenomeni che intervengono nella generazione e propagazione dell'onda, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione (sezione 4.2) è mostrato in Figura 9-1, in cui sono rappresentate l'estensione del modello e la batimetria di calcolo.

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile con una risoluzione spaziale (lunghezza media dei lati dei triangoli) di circa 9 m ad eccezione dell'area oggetto di studio, per la quale è stata utilizzata una risoluzione di circa 3 m. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 65'000 elementi (Figura 9-3).

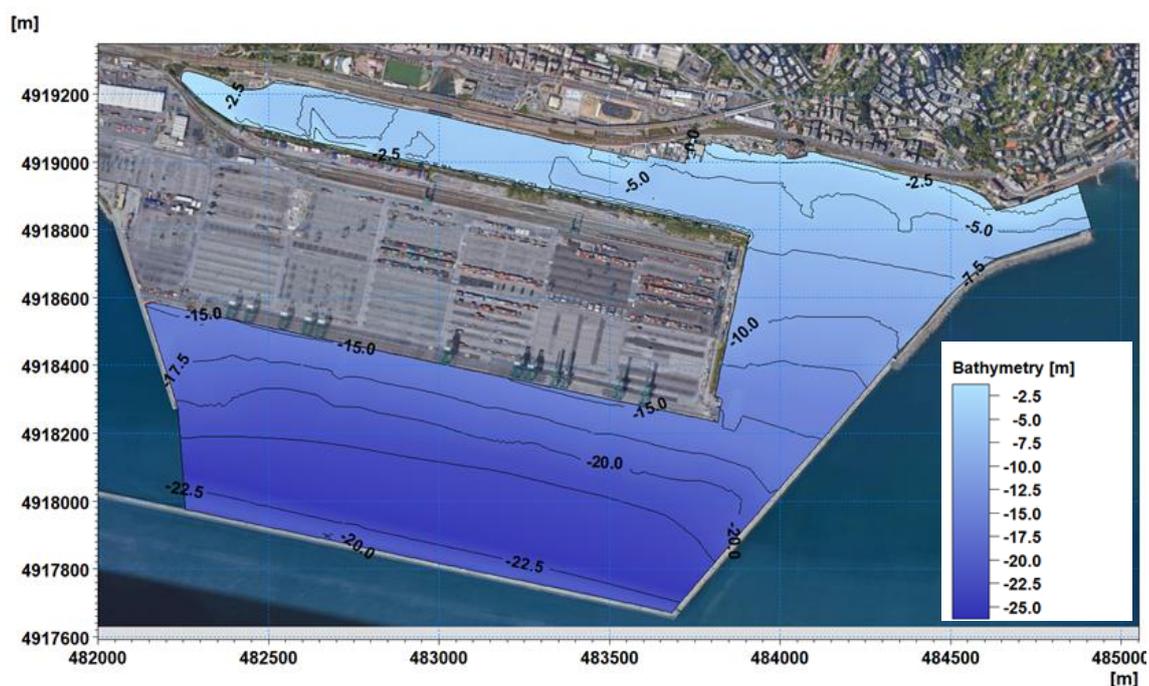


Figura 9-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

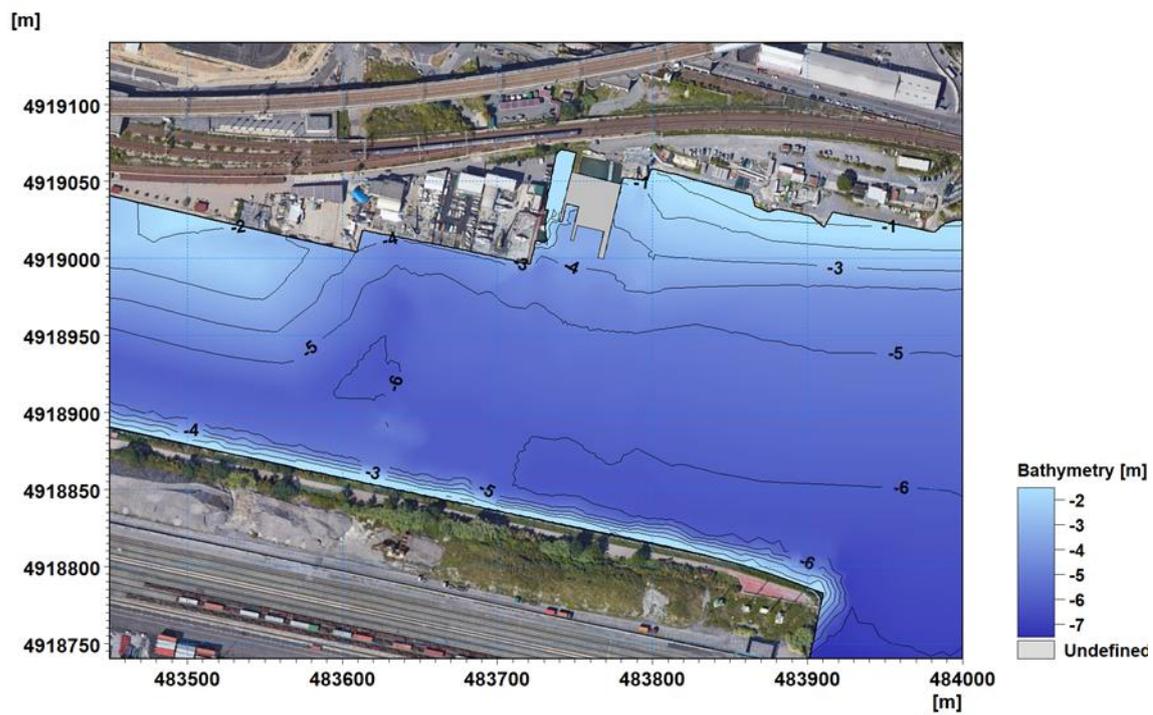


Figura 9-2 Dettaglio della batimetria nella zona oggetto degli interventi

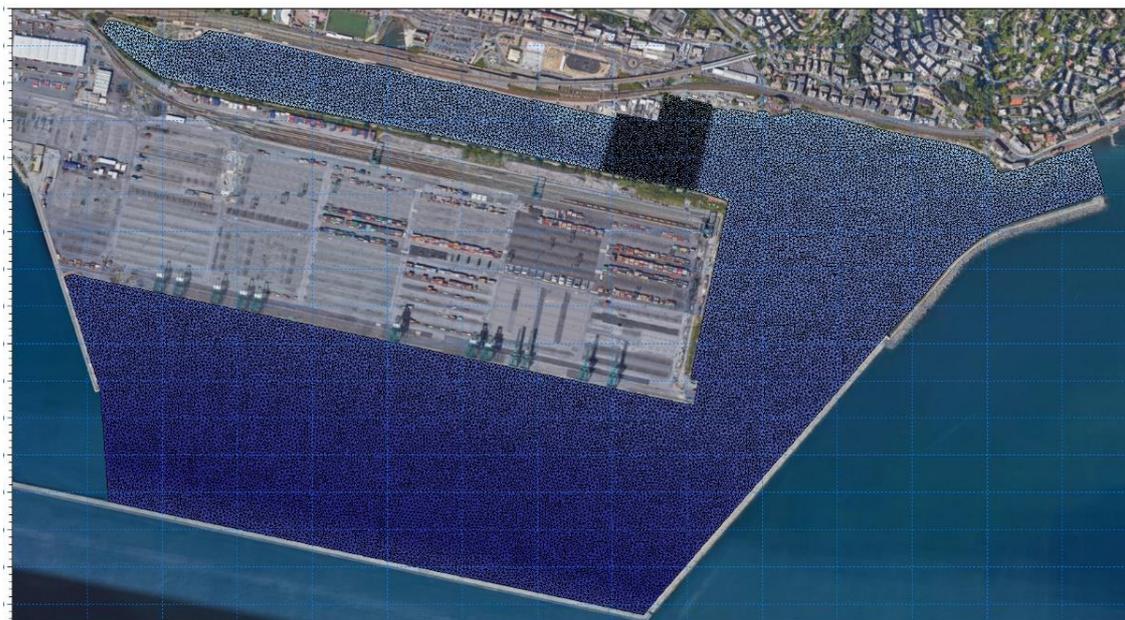


Figura 9-3 Risoluzione spaziale della mesh di calcolo del modello d'onda

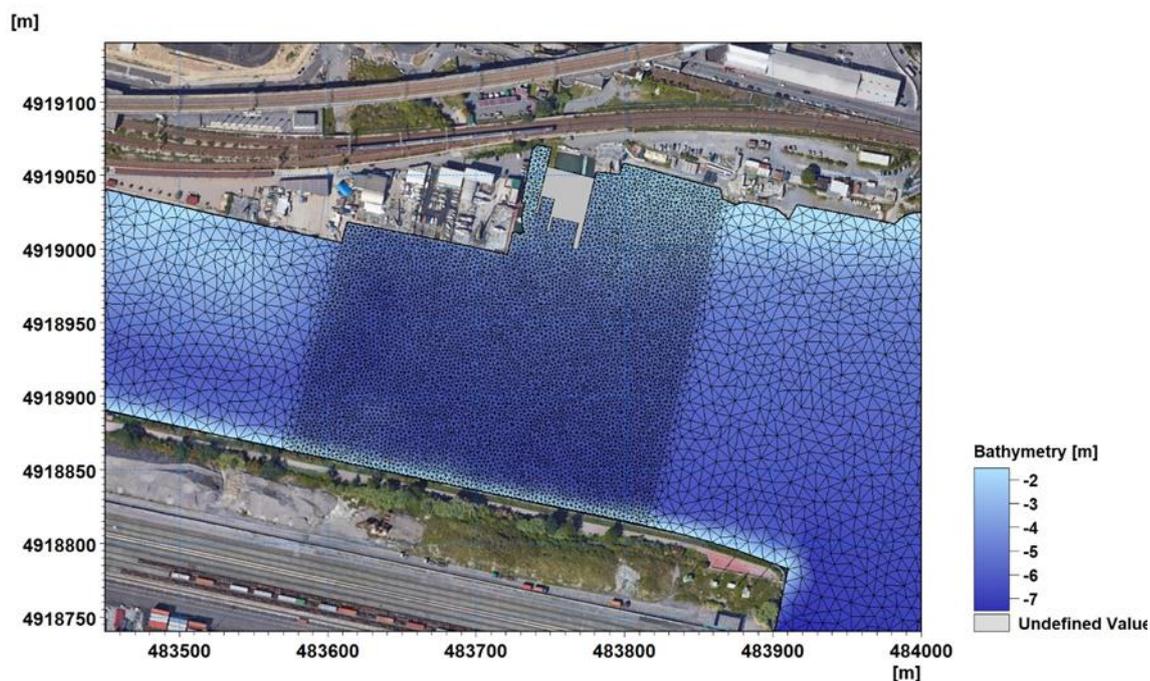


Figura 9-4 Risoluzione spaziale della mesh di calcolo del modello d'onda. Dettaglio della zona oggetto degli interventi nella configurazione progettuale

## 9.2 Risultati del modello di generazione di onda da vento locale

Nelle immagini a seguire sono riportati i campi di altezza d'onda generati dal vento all'interno del bacino di Prà-Voltri, con particolare attenzione alla zona oggetto degli interventi in progetto in corrispondenza della foce del Rio San Michele. Le variazioni di altezza d'onda sono mostrate dalla scala cromatica, nonché dalla lunghezza dei vettori, ovunque proporzionale alla altezza d'onda locale. I vettori indicano inoltre, in ogni punto, la direzione prevalente di propagazione dell'onda.

I risultati mostrano che tra le tre direzioni di provenienza del vento WD simulate, quella che genera le condizioni ondose caratterizzate da altezze maggiori nelle aree di ormeggio delle barche è quella proveniente da 125°N: la direzione da 110°N risulta infatti pressoché parallela a costa, mentre quella da 145°N riceve una maggiore protezione dal piazzale del Terminal PSA. Di seguito vengono pertanto rappresentati solo i risultati ottenuti per il vento proveniente da 125°N.

Nella configurazione progettuale, l'altezza d'onda residua maggiore si osserva in corrispondenza del primo pontile previsto a levante, con valori pari a circa 0.27 m. In corrispondenza dei pontili più interni si hanno altezze d'onda trascurabili, tranne in prossimità delle testate dove si verificano comunque valori mediamente inferiori a 0.10 m. Nell'area dove è previsto l'approfondimento dei fondali rispetto alle attuali quote, e dove ormeggeranno imbarcazioni presso pontili galleggianti, si prevedono altezze d'onda massime pari a circa 0.25 m.

Per i venti provenienti dalle altre due direzioni considerate, i campi d'onda sono analoghi a quelli descritti per la direzione di 125°N, ma le onde che si generano nell'area di interesse sono in generale più attenuate: in corrispondenza del pontile di levante si verificano altezze d'onda massime di circa 0.26 m, mentre all'interno del bacino le onde non superano i 0.24 m di altezza.

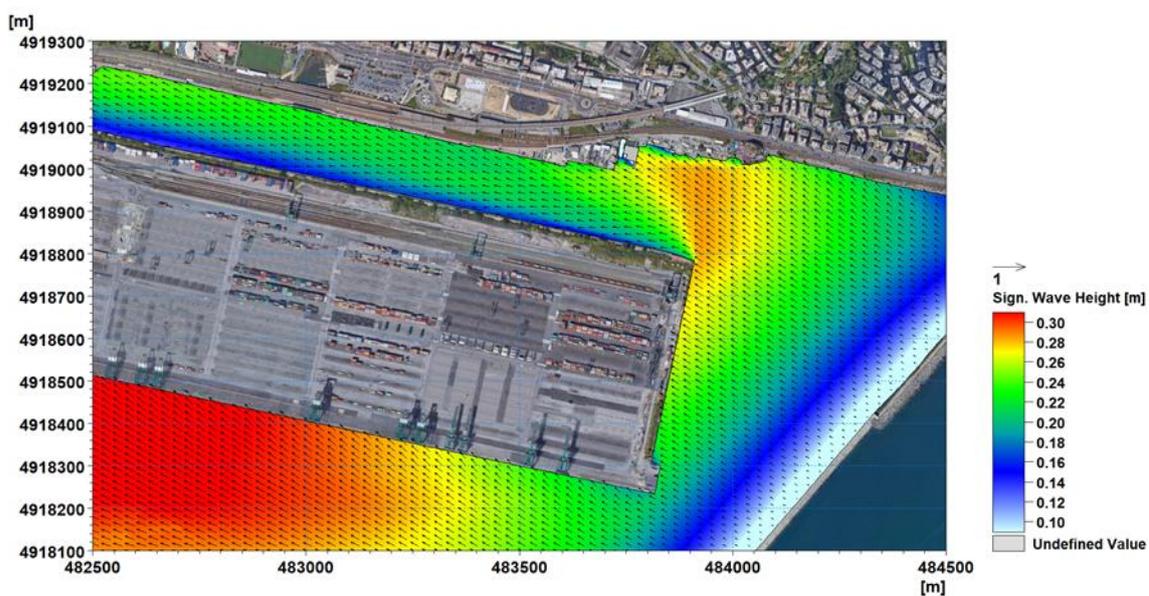


Figura 9-5 Distribuzione dell'onda generata dal vento caratterizzato da  $WS=19.2\text{m/s}$  e  $WD=125^\circ\text{N}$  nel bacino portuale di Prà-Voltri

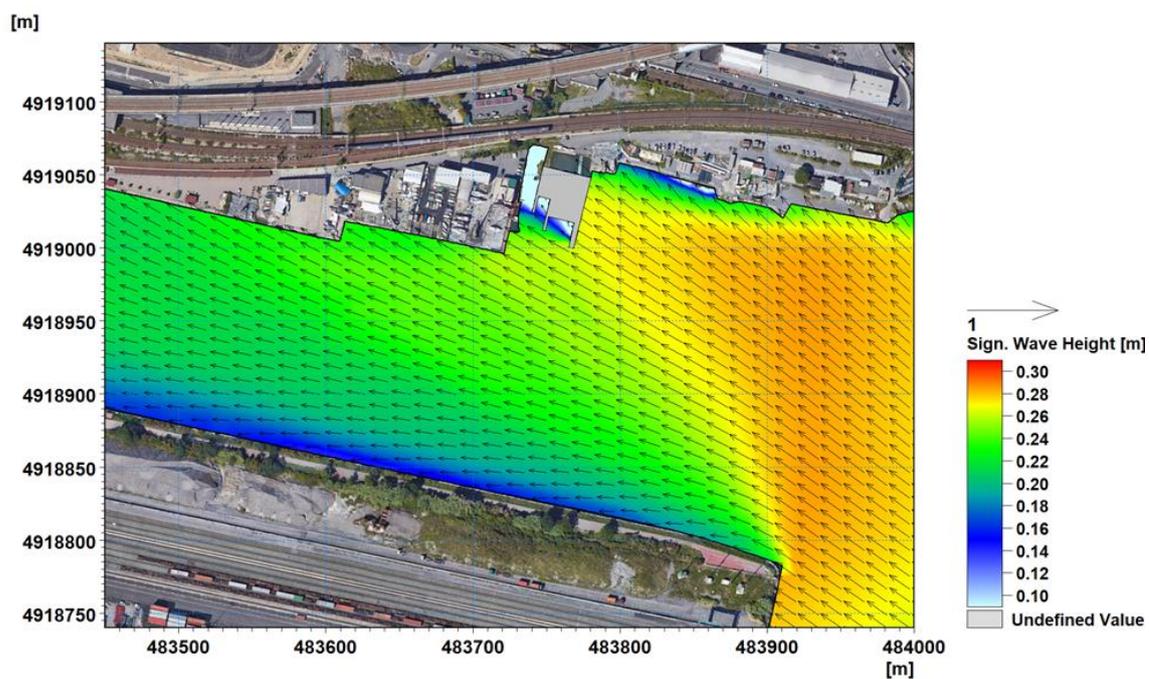


Figura 9-6 Dettaglio del campo d'onda generato dal vento di intensità pari a  $19.2\text{m/s}$ , proveniente da  $125^\circ\text{N}$  (TR 50 anni)

## 10 Valutazione dell'idrodinamica locale in concomitanza di eventi di piena del rio San Michele

L'analisi ha infine previsto la simulazione del deflusso in piena del rio San Michele nella configurazione di stato attuale ed in quella di progetto, al fine di verificare l'insorgenza di eventuali criticità locali indotte dalla nuova distribuzione della corrente allo sbocco del rio, situato proprio in corrispondenza dell'area oggetto degli interventi.

Per questa attività è stato impiegato il modello bidimensionale MIKE 21 HD FM della suite dei codici di calcolo MIKE Powered by DHI. Una descrizione dettagliata del modulo è presente nell'Allegato D del presente elaborato.

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. MIKE 21 HD FM può essere utilizzato da solo o insieme ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni (es. trasporto di sedimenti) richiedono la risoluzione contestuale degli aspetti idrodinamici.

Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica.

La versione FM utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il modulo necessita di una serie di dati di input, che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, radiation stress, apporti puntuali di portata).

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno, ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice.

### 10.1 Caratteristiche idrologico-idrauliche del rio San Michele

Il modello idrodinamico è stato predisposto facendo riferimento alle condizioni di piena cinquantennale e duecentennale del rio San Michele.

Come riportato nella relazione generale del Piano di Bacino Stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico, (Regione Liguria, Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale. Ambiti Regionali di Bacino 12 e 13), il rio San Michele drena una superficie complessiva pari a 0.6 km<sup>2</sup> alla foce e, dopo un percorso di circa 1.4 km in direzione Nord-Sud, defluisce in mare, perpendicolarmente alla linea di costa, a Genova Prà.

Il bacino del rio San Michele è caratterizzato da una forte urbanizzazione e, ad esclusione dei primi 400 m dove il rio scorre in un'incisione naturale, il corso d'acqua si presenta generalmente tombinato. In particolare, nell'ultimo tratto verso mare la tombinatura interessa via G. Ratto, S.S. Aurelia, la linea ferroviaria Genova-Ventimiglia e l'area portuale. Le attuali dimensioni della tombinatura all'imbocco sono di circa 3 m di larghezza e di 2 m di altezza. La pendenza media dell'asta è pari a circa il 9%.

Rimandando alla relazione idraulica per i dettagli del calcolo, mediante l'applicazione del Metodo Razionale, per il rio San Michele sono state definite una portata defluente pari a 22.5 m<sup>3</sup>/s relativamente a un periodo di ritorno di 50 anni e pari a 31.5 m<sup>3</sup>/s per periodo di ritorno di 200 anni.

Per quanto riguarda la caratterizzazione geometrica dell'alveo all'interno del modello idrodinamico bidimensionale, è stato incluso e rappresentato l'ultimo tratto di lunghezza pari a circa 150 m, ossia dalla sezione immediatamente a monte della tombinatura della S.S. Aurelia alla foce (sezioni dalla 1 alla 5 mostrate all'interno del Piano di Bacino).

## 10.2 Estensione del modello, batimetria di calcolo e condizioni al contorno

In considerazione del fenomeno da riprodurre, ovvero la circolazione nel canale di calma di Prà conseguente ad una portata di piena del rio San Michele, il dominio di calcolo è stato ridotto ad una porzione del bacino portuale di Prà-Voltri, per una superficie di circa 0.7 km<sup>2</sup>, nell'intorno della foce del corso d'acqua, come mostrato in Figura 10-1. Per la batimetria sono stati utilizzati i dati del rilievo di dettaglio messo a disposizione e le carte nautiche.



Figura 10-1 Estensione del dominio utilizzato nel modello idrodinamico

Come anticipato, è stato incluso nel dominio anche il tratto terminale del rio, per una lunghezza di circa 150 m, oggetto di significativi interventi nella configurazione di progetto. Tali interventi si possono così riassumere:

- costruzione di arginature (lettera "A" in Figura 10-2);
- allargamento dell'alveo dagli attuali 6 m a quasi 12 m (lettera "B" in Figura 10-2);
- approfondimento delle quote topo-batimetriche sia del rio che della zona delle nuove banchine fino a -3.4 m sul livello medio mare (lettera "C" in Figura 10-2);
- costruzione di una massicciata in corrispondenza dello sbocco del rio nel bacino portuale a protezione delle barche ormeggiate a sud dello stesso (lettera D in Figura 10-2).

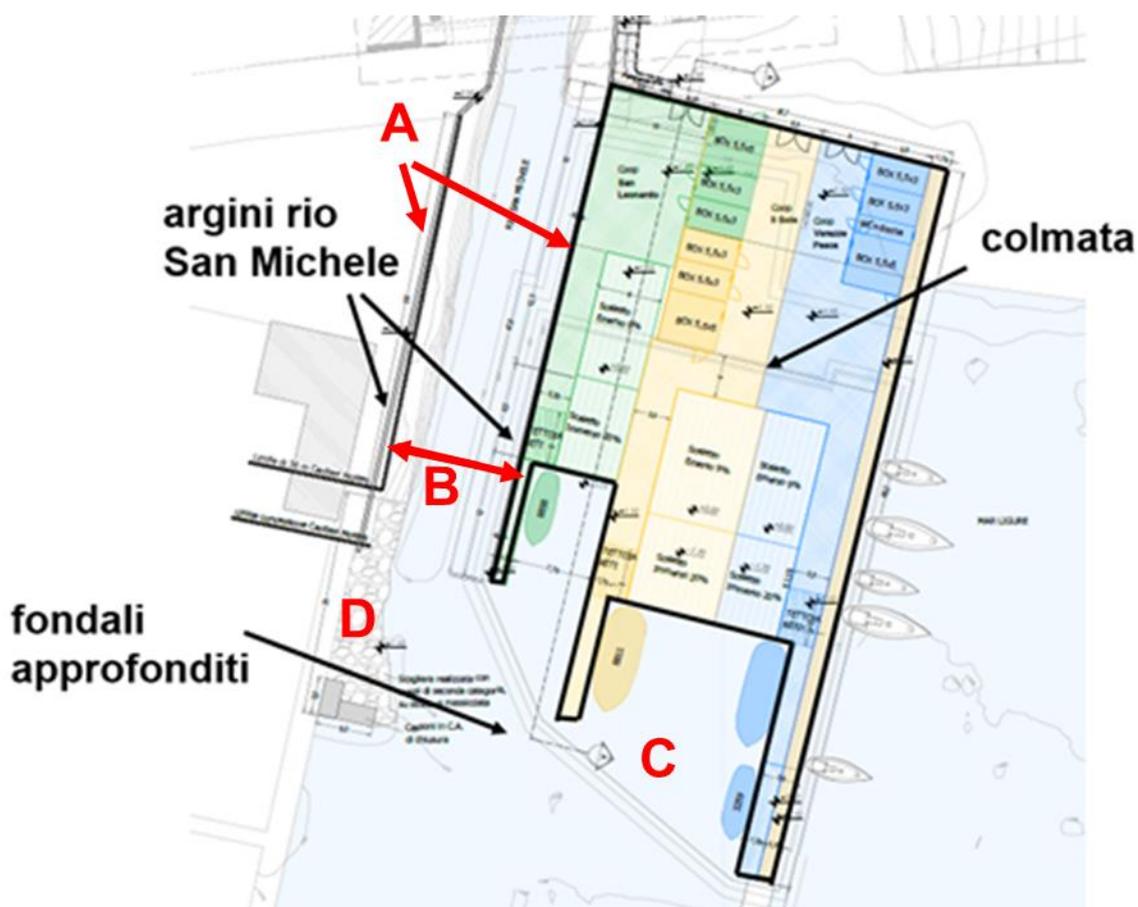


Figura 10-2 Dettaglio della zona oggetto degli interventi in progetto: è indicata con la lettera “A” la costruzione di nuove arginature, con la lettera “B” l’allargamento di un tratto di alveo, con la lettera “C” la zona con approfondimento dei fondali e con la lettera “D” la costruzione di una nuova massicciata per proteggere l’ormeggio delle barche

Rimandando ai documenti progettuali per i dettagli sugli interventi previsti, a seguire si riportano a confronto le due mesh di calcolo utilizzate per rappresentare l’attuale configurazione della foce del rio San Michele e quella in progetto.

La modellazione idrodinamica ha previsto quale unica forzante il deflusso di portata di piena del rio San Michele, pari a 22.5 m<sup>3</sup>/s per il tempo di ritorno 50 anni e pari a 31.5 m<sup>3</sup>/s per 200 anni.

Nelle simulazioni numeriche, cautelativamente, è stato assunto un livello del medio mare pari a 0 m s.l.m.m. in quanto tale livello massimizza le velocità del deflusso del corso d’acqua nel canale di Calma, rispetto a considerare un innalzamento del bacino in condizioni di tempesta (storm surge).

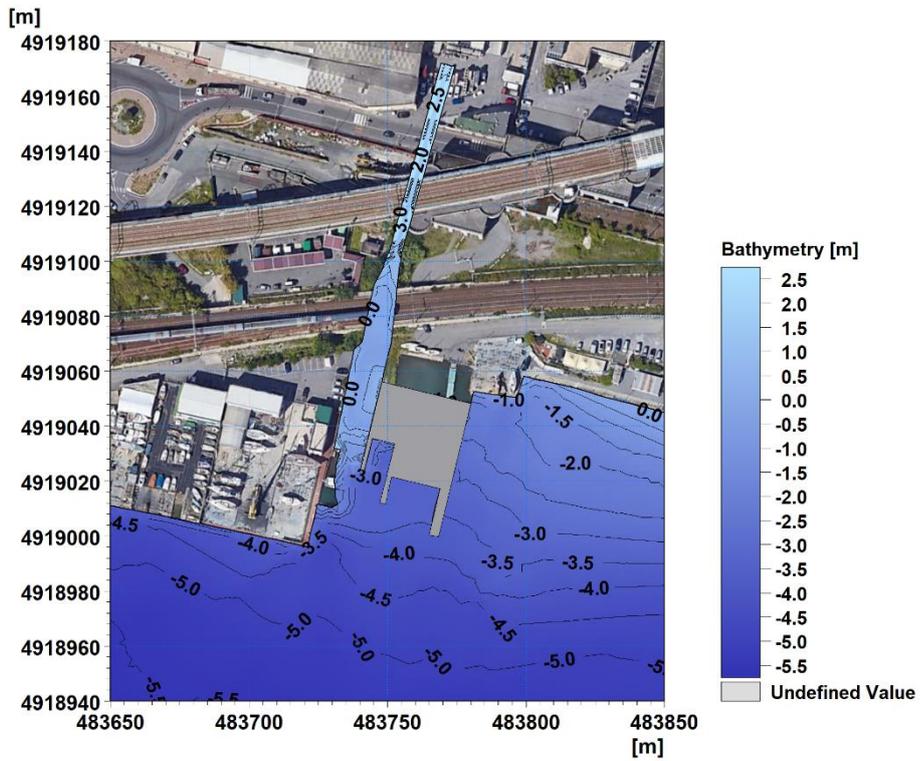
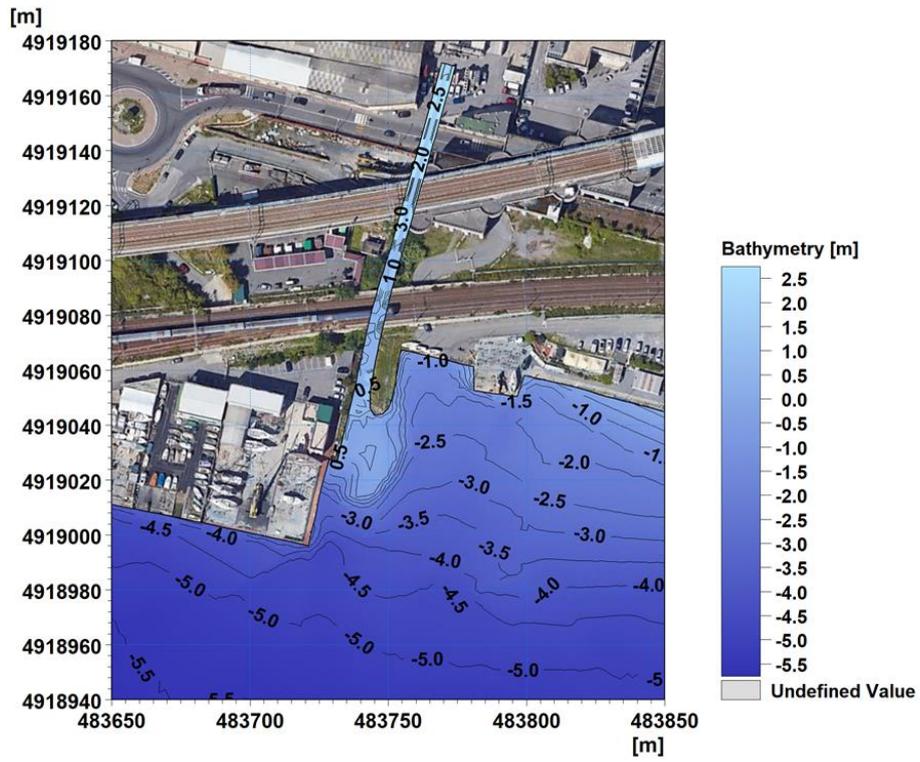


Figura 10-3 Dettaglio della zona oggetto degli interventi relativi al rio San Michele – configurazione attuale (in alto) e progettuale (in basso)

## 10.3 Risultati del modello idrodinamico

Il modello idrodinamico fornisce la distribuzione delle intensità di corrente nel dominio di studio. Nelle immagini a seguire sono riportati i campi idrodinamici generati all'interno del canale di calma di Prà dal solo apporto del rio San Michele: l'intensità di corrente è illustrata attraverso la scala cromatica nonché dalla lunghezza dei vettori, ovunque proporzionale alle velocità locali. I vettori indicano inoltre, in ogni punto, la direzione prevalente del flusso.

Nella configurazione attuale si evidenzia una locale accelerazione della corrente in corrispondenza del restringimento della sezione idraulica determinato dal significativo accumulo di sedimenti in prossimità della foce: per un tratto lungo circa 40 m le velocità superano i 3 m/s nel caso di portata cinquantennale (Figura 10-4, Figura 10-5) e i 5 m/s per la portata duecentennale (Figura 10-8, Figura 10-9). Il deflusso, contenuto nell'alveo del corso d'acqua, raggiunta la foce si apre a semicerchio nel bacino portuale, ma, a causa delle basse profondità, mantiene comunque nei primi metri ancora valori significativi di velocità, fino a 2.0-2.5 m/s per portata con TR 50 anni e 3.0-3.5 m/s per portata con TR 200 anni.

Nell'avanzare verso il centro del canale di calma, la corrente presenta una direzione prevalente verso Sud, con velocità dell'ordine di 0.4 m/s (per TR 50 anni) - 0.5 m/s (per TR 200 anni), fino al raggiungimento della banchina del Terminal PSA, dove il flusso si separa in due rami che lambiscono la banchina, uno verso levante e l'altro verso ponente, caratterizzati da velocità trascurabili.

I vari interventi in progetto, in particolare la nuova geometria prevista per l'alveo del rio San Michele, nonché l'approfondimento dei fondali in corrispondenza della foce a mare, inducono una significativa riduzione dell'intensità di corrente nelle ultime sezioni di valle del rio. In particolare, l'allargamento delle sezioni comporta un abbattimento delle velocità, che raggiungono valori massimi pari a circa 2.5 m/s (per portata con TR 50 anni - Figura 10-6 e Figura 10-7) e di circa 3.0 m/s (per portata con TR 200 anni - Figura 10-10 e Figura 10-11) per la zona compresa tra l'inizio della nuova massicciata in destra idraulica e l'ultimo tratto di argine in sinistra idraulica. L'approfondimento dei fondali permette l'allargamento della sezione utile al deflusso e una conseguente rapida diminuzione delle intensità di corrente.

Si osserva inoltre come l'arginatura, prevista a progetto, permette di incanalare opportunamente il flusso uscente dal rio e pertanto quest'ultimo si propaga con andamento rettilineo verso Sud senza interferire con la zona destinata all'ormeggio delle barche. Tra i nuovi pontili in progetto i valori di corrente rimangono infatti limitati nell'ordine di qualche decina di cm/s.

Anche nella configurazione di progetto, il flusso si dirige verso Sud e presenta velocità dell'ordine di 0.4 m/s (per TR 50 anni) - 0.5 m/s (per TR 200 anni) fino alla banchina del Terminal PSA, dove si divide in due rami che lambiscono la banchina, uno verso levante e l'altro verso ponente, caratterizzati da velocità trascurabili.

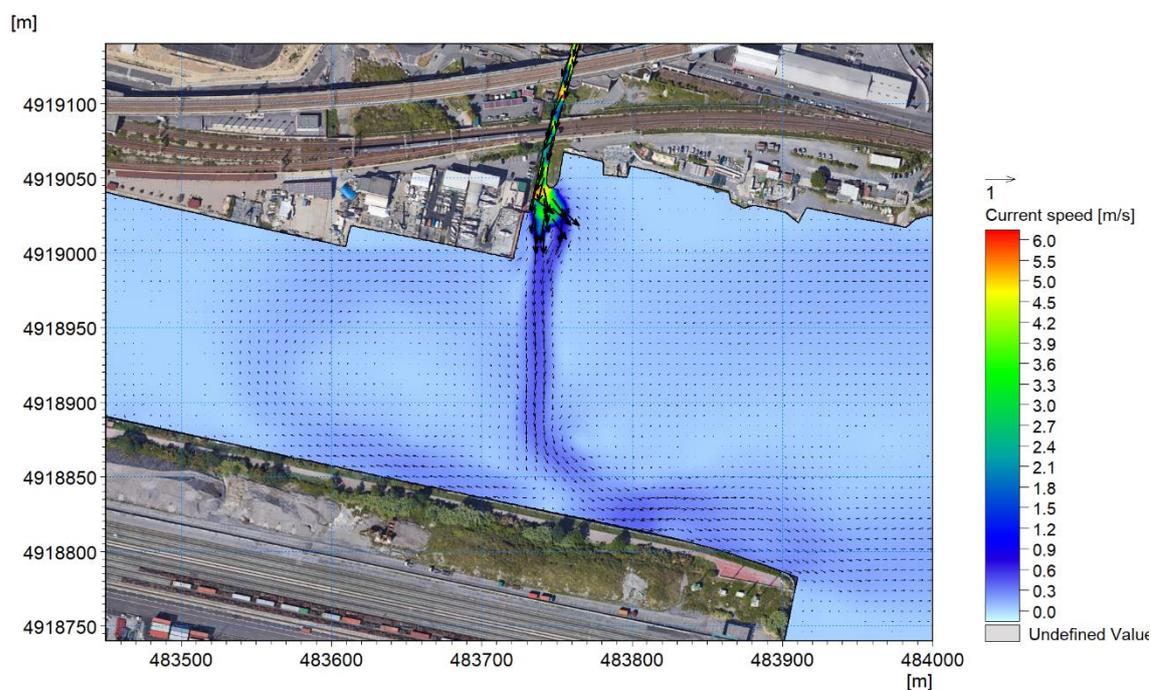


Figura 10-4 Configurazione attuale: velocità di corrente determinate dal deflusso della portata del rio San Michele con periodo di ritorno 50 anni – dettaglio 1

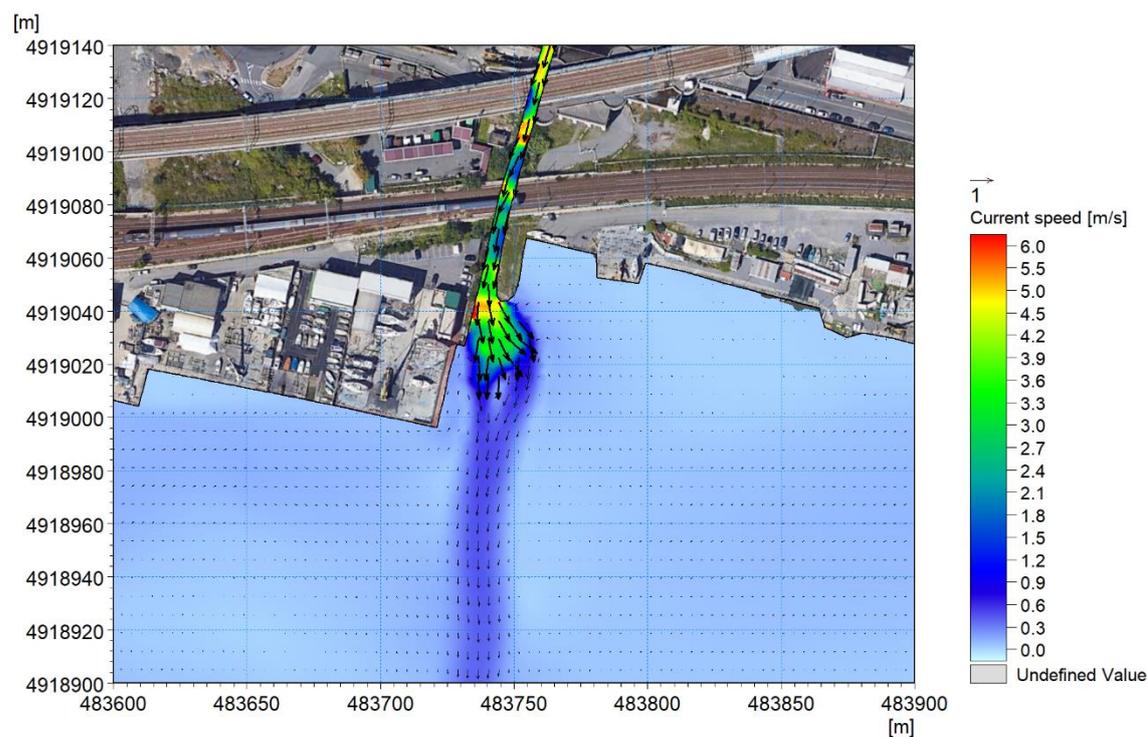


Figura 10-5 Configurazione attuale: velocità di corrente determinate dal deflusso della portata del rio San Michele con periodo di ritorno 50 anni – dettaglio 2

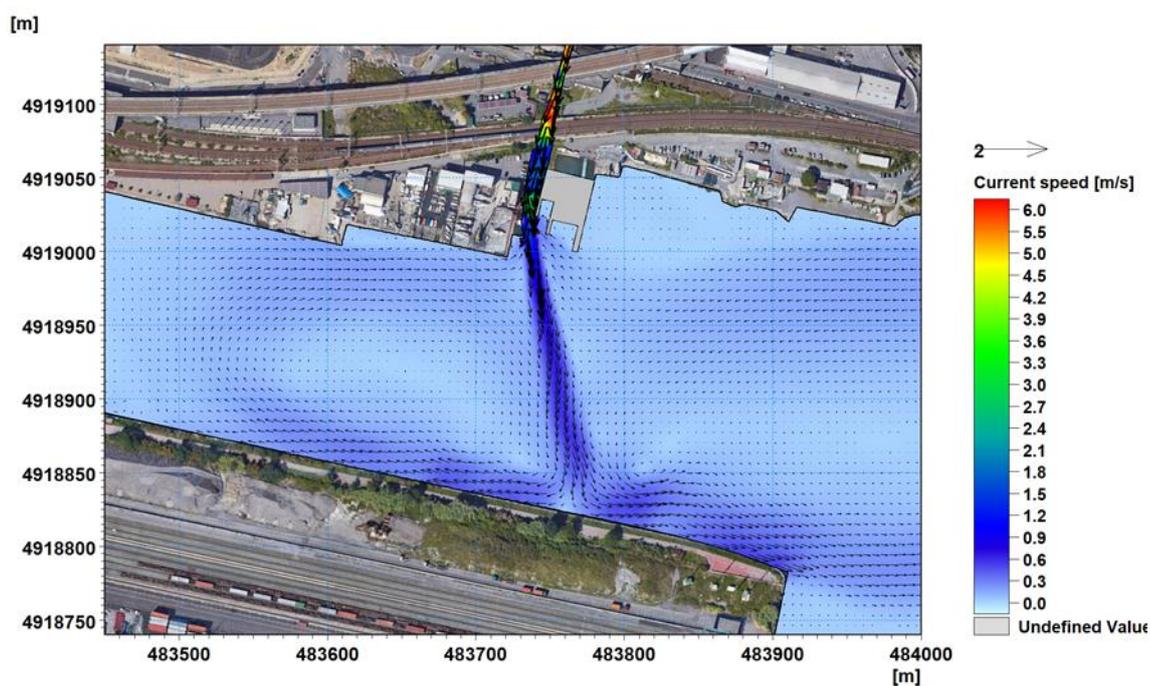


Figura 10-6 Configurazione progettuale: velocità di corrente determinate dal deflusso della portata del rio San Michele con periodo di ritorno 50 anni – dettaglio 1

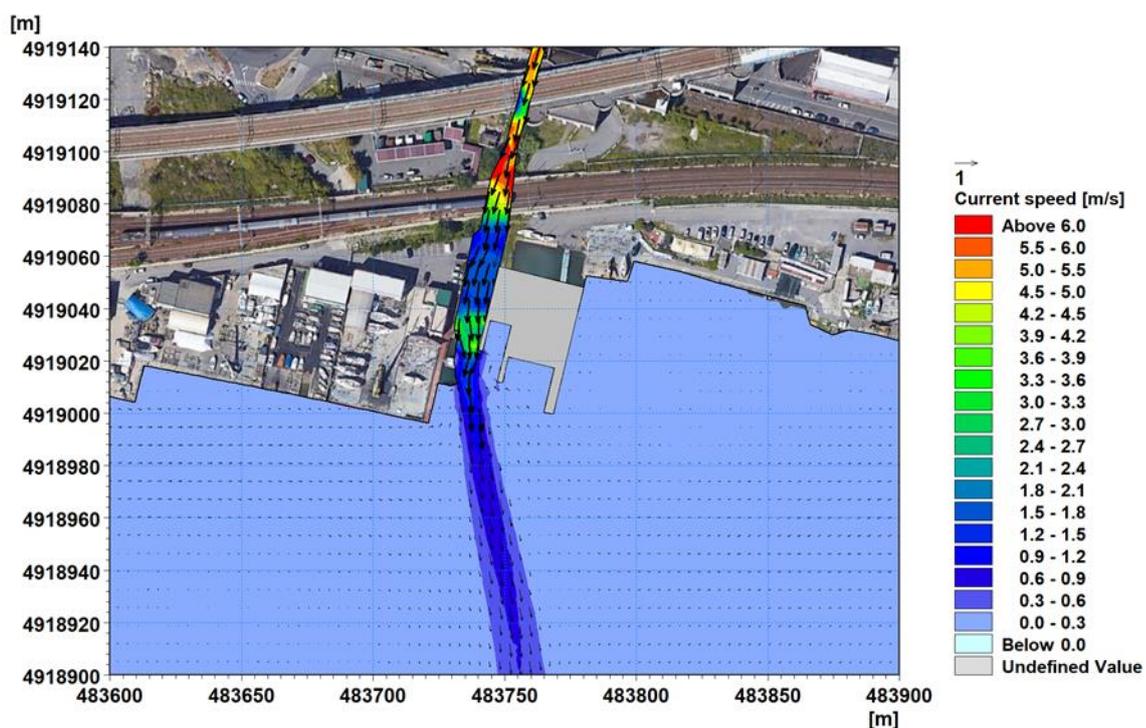


Figura 10-7 Configurazione progetto: velocità di corrente determinate dal deflusso della portata del rio San Michele con periodo di ritorno 50 anni – dettaglio 2

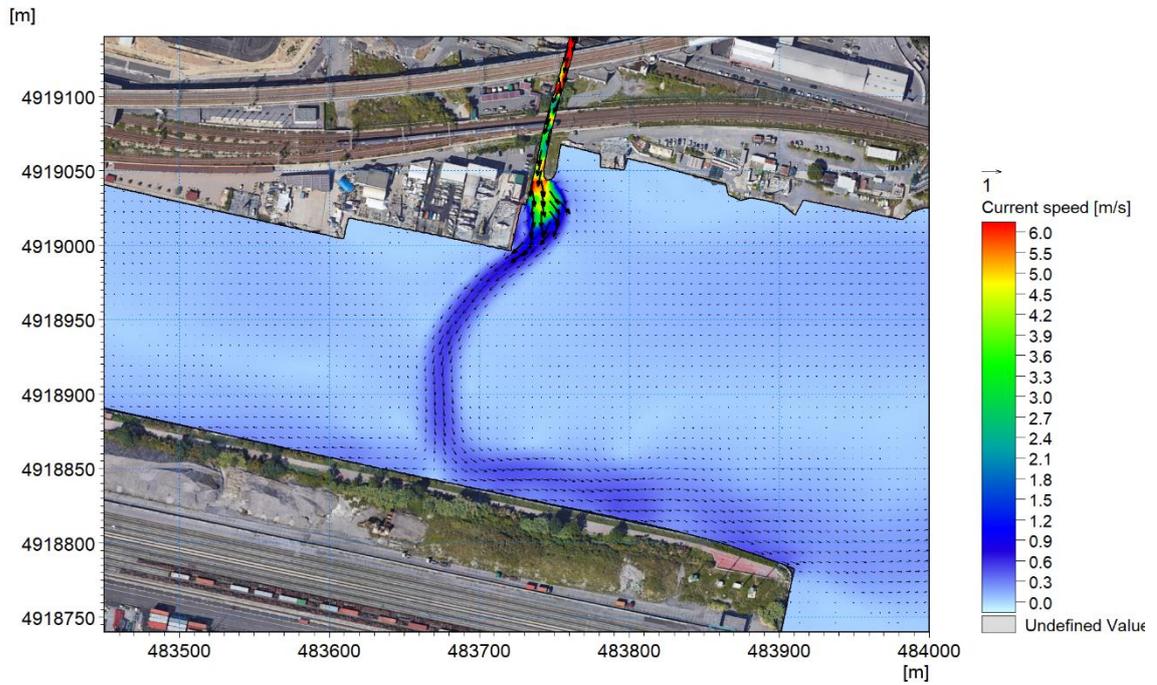


Figura 10-8 Configurazione attuale: velocità di corrente determinate dal deflusso della portata del rio San Michele con periodo di ritorno 200 anni – dettaglio 1

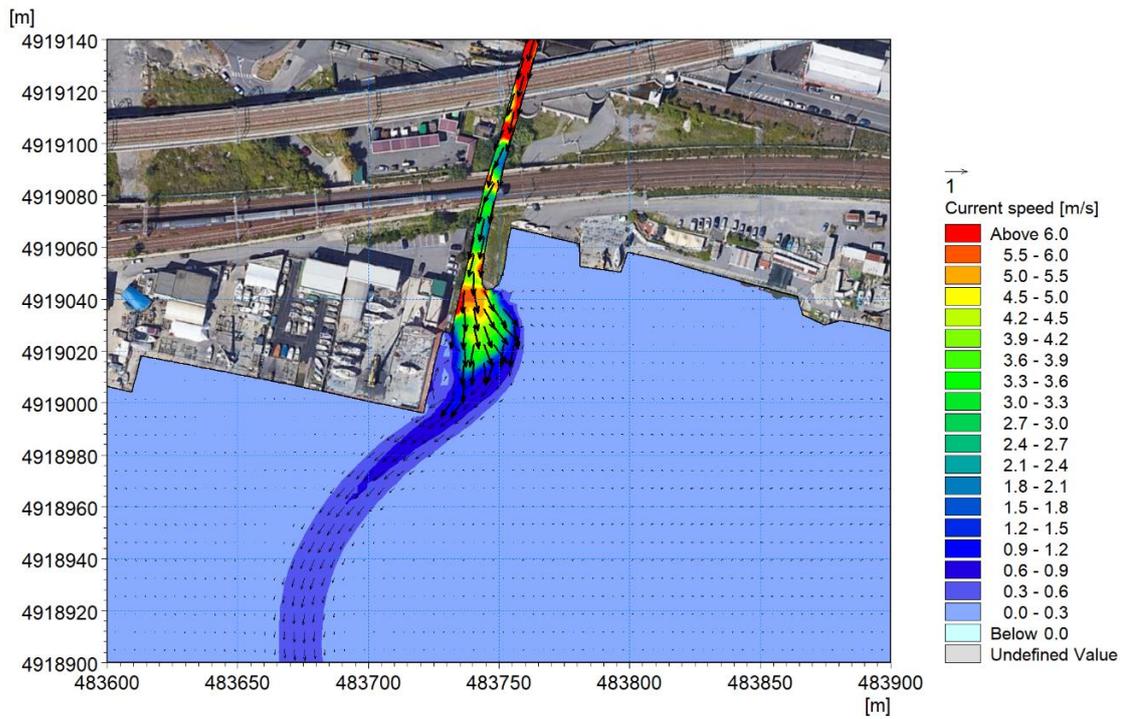


Figura 10-9 Configurazione attuale: velocità di corrente determinate dal deflusso della portata del rio San Michele con periodo di ritorno 200 anni – dettaglio 2

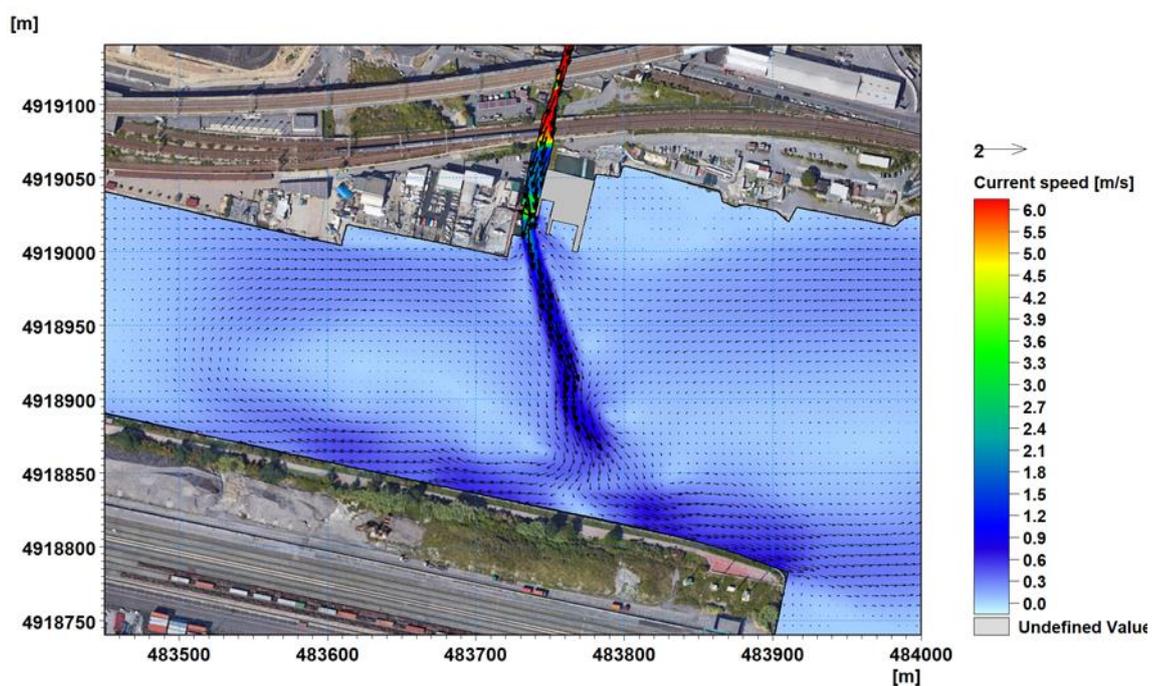


Figura 10-10 Configurazione progettuale: velocità di corrente determinate dal deflusso della portata del rio San Michele con periodo di ritorno 200 anni – dettaglio 1

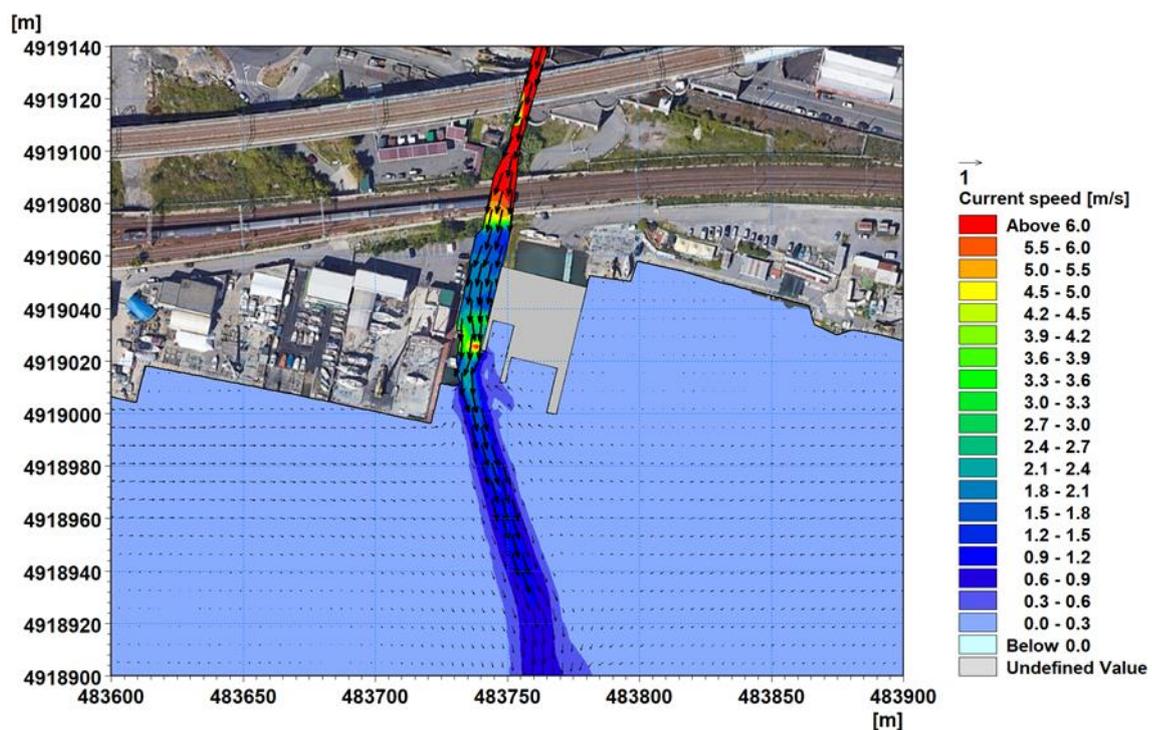


Figura 10-11 Configurazione progettuale: velocità di corrente determinate dal deflusso della portata del rio San Michele con periodo di ritorno 200 anni – dettaglio 2

## 11 Sintesi dello studio e conclusioni

Il presente studio illustra le attività modellistiche predisposte a supporto della valutazione dell'agitazione ondosa residua nell'area del canale di calma di Prà (Genova) destinata a ospitare tre cooperative di pescatori che verranno ivi collocati a seguito dei lavori di realizzazione della nuova colmata ad uso cantieristico navale all'interno del Porto Petroli di Multedo. Tale colmata occuperà infatti l'area ad oggi utilizzata per carenaggio e rimessaggio delle barche.

DHI aveva già predisposto, nei primi mesi del 2020, uno studio modellistico del moto ondoso interno al bacino di Prà-Voltri, finalizzato alla quantificazione delle condizioni di agitazione ondosa residua nel bacino, nella configurazione di stato attuale e di ipotesi progettuale. La presente analisi ha ripreso ed aggiornato le attività svolte allora, includendo l'evoluzione del layout progettuale originale, con l'allargamento di circa 10m verso il mare della colmata prevista.

Lo studio ha inoltre previsto la simulazione degli effetti, nell'area di interesse, sia delle onde generate localmente nel bacino di Prà-Voltri per effetto di un vento estremo, sia del deflusso in piena del rio San Michele, la cui foce è situata proprio in corrispondenza dell'area oggetto di interventi.

Lo studio è stato affrontato utilizzando i codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati dal DHI, che rappresenta senza dubbio il gruppo di modelli numerici più completo ed affidabile oggi disponibile nel campo delle risorse idriche.

La prima fase di studio ha previsto la raccolta e l'analisi dei dati batimetrici e dei dati meteomarini al largo. Per questi ultimi, in particolare, si è fatto riferimento al database MWM (Mediterranean Wind Wave Model) prodotto da DHI e HyMOLab (Università di Trieste). In virtù dell'elevata protezione offerta al sito dalla diga del porto di Prà-Voltri e dal piazzale del Terminal PSA, si è ritenuto opportuno effettuare le verifiche per le sole onde estreme: i valori di altezza d'onda estrema per assegnato tempo di ritorno (TR 5 anni e TR 50 anni) derivanti dall'analisi direzionale dei dati al largo sono stati quindi propagati verso costa attraverso la predisposizione di un modello bidimensionale d'onda (MIKE 21 SW). I risultati del modello di propagazione largo-sottocosta sono stati quindi estratti per la definizione degli eventi da simulare in dettaglio con il modello di agitazione ondosa residua (MIKE 21 BW).

A fronte di valori di altezze d'onda in corrispondenza del contorno di largo del modello di dettaglio (posto immediatamente al largo della diga dell'aeroporto e della diga di Prà-Voltri) pari rispettivamente a 3.75 m e 5.22 m, (TR 5 e 50 anni), i valori di altezza d'onda residua nella zona oggetto degli interventi nel canale di calma di Prà risultano dell'ordine di 10 cm per lo scenario con tempo di ritorno 5 anni e dell'ordine di 15 cm per lo scenario con tempo di ritorno 50 anni. Tali valori risultano ampiamente inferiori a quelli indicati dal PIANC come valori di riferimento per i tempi di ritorno considerati (rispettivamente 30 e 50 cm).

I valori di altezza d'onda nella porzione di interesse del canale di calma di Prà sono stati anche valutati in relazione ad uno scenario di onda generata dal vento estremo all'interno del bacino (onde corte). Si è quindi utilizzato un modello d'onda forzato da un vento proveniente da Sud-Est, la cui intensità è stata definita attraverso analisi statistica per un tempo di ritorno pari a 50 anni. La distribuzione delle altezze d'onda all'interno del bacino di Prà evidenzia valori massimi nella zona di studio pari a circa 0.26 m.

Infine, è stato predisposto un modello bidimensionale idrodinamico per il calcolo della distribuzione dei livelli del mare e delle velocità di corrente nella zona di studio in concomitanza con significativi eventi di portata di piena del rio San Michele, la cui foce si trova in corrispondenza dei nuovi pontili in progetto. A tale scopo è stato utilizzato il modello MIKE 21 HD FM di DHI. Il confronto tra i risultati di intensità di corrente nell'attuale scenario e in quello previsto nel progetto evidenzia in particolare che l'allargamento delle sezioni idrauliche e l'approfondimento dei fondali favoriscono una riduzione delle intensità della corrente nel canale di calma. Si osserva inoltre come l'arginatura, prevista a progetto, permette di incanalare adeguatamente il flusso uscente dal

rio e pertanto quest'ultimo si propaga con andamento rettilineo verso Sud senza interferire con la zona destinata all'ormeggio delle barche. Tra i nuovi pontili in progetto i valori di corrente rimangono infatti limitati nell'ordine di qualche decina di cm/s.

## 12 Riferimenti

Contento, G., Donatini, L., Lupieri, G., Pedroncini, A. and Cusati, L. *MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea*. Proceedings of 18th International Conference on Ships and Shipping Research NAV'2015, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9.

MIKE by DHI 2019. *MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark.

MIKE by DHI 2019. *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Sand Transport Module. Scientific documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark.

MIKE by DHI 2019. *MIKE 21 Boussinesq Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - [www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/](http://www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/)

Regione Liguria, Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Settentrionale. *Ambiti Regionali di Bacino 12 e 13, Piani di Bacino stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico, Caratteristiche idrauliche e geologiche del territorio e Valutazione del rischio idraulico e geomorfologico*. 2019



ALLEGATI



## ALLEGATO A

Descrizione del database

Mediterranean Wind Wave Model (MWM)



## General description of the models' chain

The models and datasets used for the development of the MWM database are:

- the *CFSR (Climate Forecast System Reanalysis)* global re-analysis dataset, produced and freely published by NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) (Saha et al, 2010; <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>), hourly (re-forecast) data with a space resolution of 0.5°; these data are used as initial (IC) and boundary conditions (BC) of the *WRF-ARW model* (below);
- the atmospheric model *WRF-ARW – version 3.4.1 (Weather Research and Forecast - Advanced Research WRF)*, model developed by NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) (Skamarock and Klemp, 2007; Michalakes et al, 2001; Michalakes et al, 2005); *WRF-ARW* is presently considered among the best state-of-the-art non-hydrostatic meteorological models; it is supported by a massive worldwide community that contributes to its local use and development (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>; <http://www.wrf-model.org/index.php>);
- the wave model *MIKE 21 Spectral Waves (SW)* developed by DHI (former Danish Hydraulic Institute) (Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004). *MIKE 21 SW* is among the state of the art wave models, widely used in thousands of offshore and coastal applications worldwide.

In the following a description of the CFSR dataset, the WRF-ARW and the MIKE 21 SW model is given, with specific interest to the implementation adopted in MWM.

### CFSR Dataset

The CFSR dataset (Fig. A.1) is the result of a long and complex process performed by NCEP, an ensemble of nine weather prediction centers in the United States belonging to the NWS (*National Weather Service*) of the NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). The simulation, completed in 2011, is based on a global atmospheric numerical model including atmosphere-ocean and sea-ice couplings, with a systematic ingestion of both conventional (point) and satellite observations with data assimilation procedures.

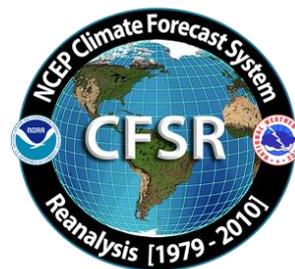


Figure A.1

The CFSR now covers a 35-year period from 1979 to 2013 (included) and is continuously updated with new recent data. The simulations were performed as 9 hours forecast simulations, initialized 4 times a day (at 00:00, 06:00, 12:00 and 18:00) between the 6-hourly re-analysis frames. The

results of these simulations, gathered in the CFSR dataset, consist in complete atmospheric data over ocean and lands with a one hour time resolution and a 0.5° horizontal resolution, while the vertical resolution changes greatly amongst the atmospheric variables, spanning from the single surface value up to values at 64 different isobaric levels.

MWM dataset ingest the 6-hourly CFSR data, specifically the *ds093.0* dataset.

Chawla et al (2013) presented a thorough analysis of the *CFSR* dataset against satellite and oceanic buoys data. The final goal of that study is the use of the  $U_{10}$  wind data from the *CFSR* dataset as the forcing term of *WWIII* to generate wave fields at global scale, without any assimilation of wave data. The analysis of the *CFSR* dataset shown in that paper includes the intrinsic performance of the model in terms of the seasonal and annual variability of the percentiles. A moving average is applied to smooth the altimeter data from the satellites and from the buoys. The normalized percentiles ("...normalized with the wind speeds at corresponding percentiles from the altimeters") computed over the satellite tracks exhibit an oscillatory behavior, never below 0.93 or 0.90 in the Northern and Southern hemisphere respectively. From that analysis, the wind and wave *CFSR* and *WWIII* data compare very well with satellite data in terms of normalized percentiles. The Q-Q plots at selected offshore buoys are generally good or very good, with some unexpected variations from case to case for some buoys close to the coast, with even a contradictory behavior between  $U_{10}$  and  $H_s$  in some locations.

The analysis of the wind field of the *CFSR* dataset is far beyond the scope of the present work but still some checks have been done in specific cases, like the event of November 1999 in Trieste (Italy). The performance of a local area model is directly related to the information contained in the global model used as boundary and initial conditions; Fig. A.2 after Contento et al (2014) shows the wind speed for the case of November 1999 in Trieste (Northern Adriatic Sea - Italy); the red dots are experimental data by NOAA (<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>); the yellow line corresponds to the re-analysis data *CFSR d093.0* (Saha et al, 2010; <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>) interpolated at the same position of the station; the blue dots are related to a fully certified and verified measurement station of the Regional Agency for the Environment Protection (ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>) located few meters far from the station used by NOAA (<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>); the cyan line corresponds to the present hindcast dataset (model *WRF-ARW*). It is rather evident that the *CFSR* dataset ingests the experimental data from NOAA but there are some non-negligible discrepancies between the two experimental datasets (private communication with ARPA FVG-OSMER - Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia Region, Italy). In this case the local model *WRF-ARW* is able to develop the local wind field and matches correctly the measurement by ARPA, irrespective of the wrong assimilated data as BC and IC; this, however, cannot be always guaranteed.

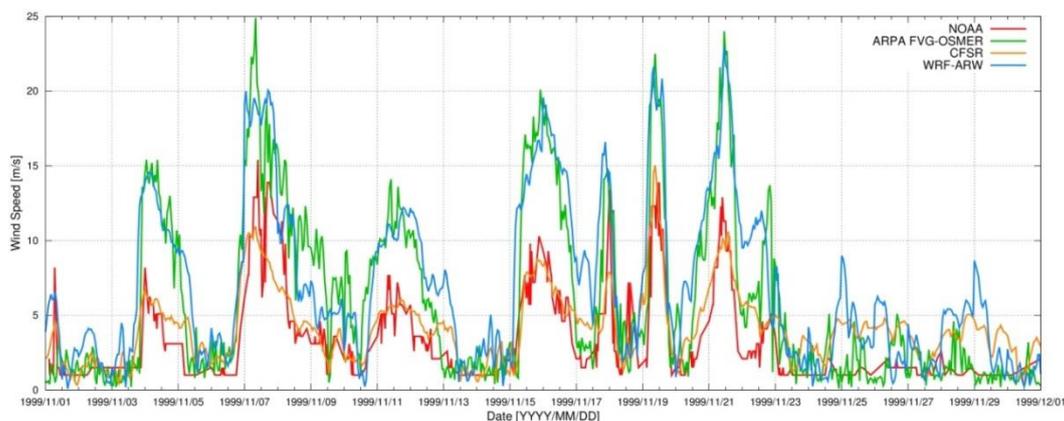


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(<http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>) (red line) and from ARPA-FVG OSMER (<http://www.osmer.fvg.it/home.php>) (blue line). Model data from CFSR (Saha et al, 2010) (yellow line) and the present simulations with WRF-ARW (cyan line) are overlapped.

The scope of these checks was solely to verify the sensitivity of the CFSR wind pattern to a complex steep geographic area facing the sea. The eastern coast of the Adriatic Sea is just an example among many others. The availability of certified wind data from the local Regional Agency for the Environment Protection – Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>) related to ground stations and to a fixed station in the middle of the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea <http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>), helped a lot in defining the set-up of the local area meteorological model. The aim of the set-up process was to let the model WRF-ARW develop mesoscale and local weather structures, thus using a domain large enough to develop these structures, but at the same time avoiding the use of too large a domain that may lead to a model drift from the experimental data. These undesired effects were observed along the entire Adriatic Sea, specifically on the eastern side (Contento et al, 2011; Contento et al, 2014).

## WRF-ARW meteorological model

The WRF model is an open source mesoscale to microscale atmospheric model developed by the American atmospheric research center NCAR in cooperation with many other meteorological institutions. It is largely used worldwide for both atmospheric research and forecast or hindcast purposes due to its ability to perform atmospheric simulations over a wide range of length scales spanning from less than 1 kilometer to thousands of kilometers. This flexibility is further increased by its capability of performing two way coupled nested runs.

The WRF modelling system includes a pre-processor system (WPS), a data assimilation system (WRF-DA) and the dynamic solver. During this work the ARW dynamic solver, developed and maintained by the Mesoscale and Microscale Meteorology Division of NCAR, has been used. The ARW dynamic core is a fully compressible and non-hydrostatic model, based on a terrain-following hydrostatic pressure vertical coordinate system and on an Arakawa C-grid staggered evaluation of the vector quantities. The solver uses high order time integration and 3-D advection schemes.

The WRF model works internally with NetCDF files, a self-describing and machine-independent data format particularly suitable for the manipulation of long arrays of scientific data.

A WRF-ARW model run is a quite complex process, since it involves several different steps to be run in a precise order. First of all, WRF requires boundary and initial conditions; these conditions can be supplied by the GRIB files obtained from the CFSR dataset files described in CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010.” [Online] Available at <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>

GRIB files needed to cover completely the whole simulated period must be fed to the model to complete the simulation process successfully.

Moreover, since the atmosphere behaviour is strongly dependent on the soil characteristics, detailed data about these characteristics must be fed to the model too in order to let it develop the local weather phenomena correctly. However, there is no need to produce this type of data since suitable 30" resolved geographic data are included in the default WRF pre-processing (WPS). Since these data are time-independent they need to be downloaded only once, and they remain valid for every simulation unlike the GRIB files. Actually, some of the parameters contained in the geographic data cannot be considered as completely time-independent; in fact, some of the parameters show a time dependence which, however, is limited to seasonal changes, e.g. the

reduced vegetation cover in winter. The possible seasonal variability of the geographical parameters is included in the geographical data archive of WPS.

A complete WRF-ARW simulation needs the WPS (*WRF Pre-processor System*) to be run before the numerical solver (*wrf.exe*). The WPS pre-processor system deals with both the domain set-up and the preliminary input manipulations; it is composed by three main executables carrying out different tasks:

- *geogrid.exe* is responsible for the definition of the horizontal grid as well as for the interpolation of the geographic data on the user-defined grid. When performing nested runs, the *geogrid.exe* run produces a NetCDF file *geo\_em.dxx.nc* containing the grid and geographic data for each domain, where *xx* stands for the code of the domain (01, 02, ...).
- *ungrib.exe* is responsible for the decoding of the input GRIB files used as initial and boundary conditions. The GRIB files, which need to be linked to the work directory of WPS by means of the script *link\_grib.csh*, are “ungribbed” and rewritten in an intermediate format suitable for further manipulations, excluding all the fields not needed for the following model run.
- *metgrid.exe* is responsible for the horizontal interpolation of the intermediate input files produced by *ungrib.exe* on the grid defined by *geogrid.exe*. Moreover, the geographic data contained in the *geo\_em* files are ingested by *metgrid* and written on its output files. The output of *metgrid.exe* is in fact composed by the NetCDF files *met\_em.dxx.YYYY-MM-DD\_HH:00:00.nc*, each containing the interpolated boundary conditions and geographic data for the *xx* domain and for every timestep of the supplied GRIB files. In the case considered, as the CFSR dataset is composed of hourly data, the produced *met\_em* files are hourly spaced too.

The whole WPS process is controlled by a single external configuration file: *namelist.wps*, which contains the user specified parameters defining the time length and the domain of the simulation as well as the time and space resolutions.

An additional manipulation is needed before launching the actual solver: the NetCDF data produced by *metgrid.exe* must be vertically interpolated onto the user-defined vertical levels of the WRF simulation. This task is performed by the *real.exe* executable, which, despite actually being a pre-processing routine, is not included in the WPS system. The *real.exe* run finally produces the NetCDF files needed by the bare solver: *wrfinput\_dxx* and *wrfbdy\_dxx*, containing respectively, for each of the nested domains under simulation, the initial condition inclusive of the domain geographic data and the boundary conditions forcing the domain over time.

The last step of a WRF-ARW model simulation is the *wrf.exe* solver run which performs the numerical integration and produces the final output files *wrfout\_dxx\_YYYY-MM-DD\_HH:MN:SS*, one for each simulated domain and for every temporal frame in the total simulated period. Each *wrfout* file contains therefore the complete atmospheric variables set calculated by the ARW solver for every point of the user defined simulation 3-D grid at a single temporal frame.

Both *real.exe* and *wrf.exe* are controlled by *namelist.input*, an external configuration file gathering the user defined parameters regarding the vertical resolution of the simulation, the atmosphere microphysical parameters and, again, the time / length scales and resolutions of the simulation.

A script that makes all steps involved automatic in a WRF-ARW simulation procedure, from the set-up of the configuration files to the archiving of output files, was developed and tested extensively.

The above depicted working scheme is summarized in Figure A.3:

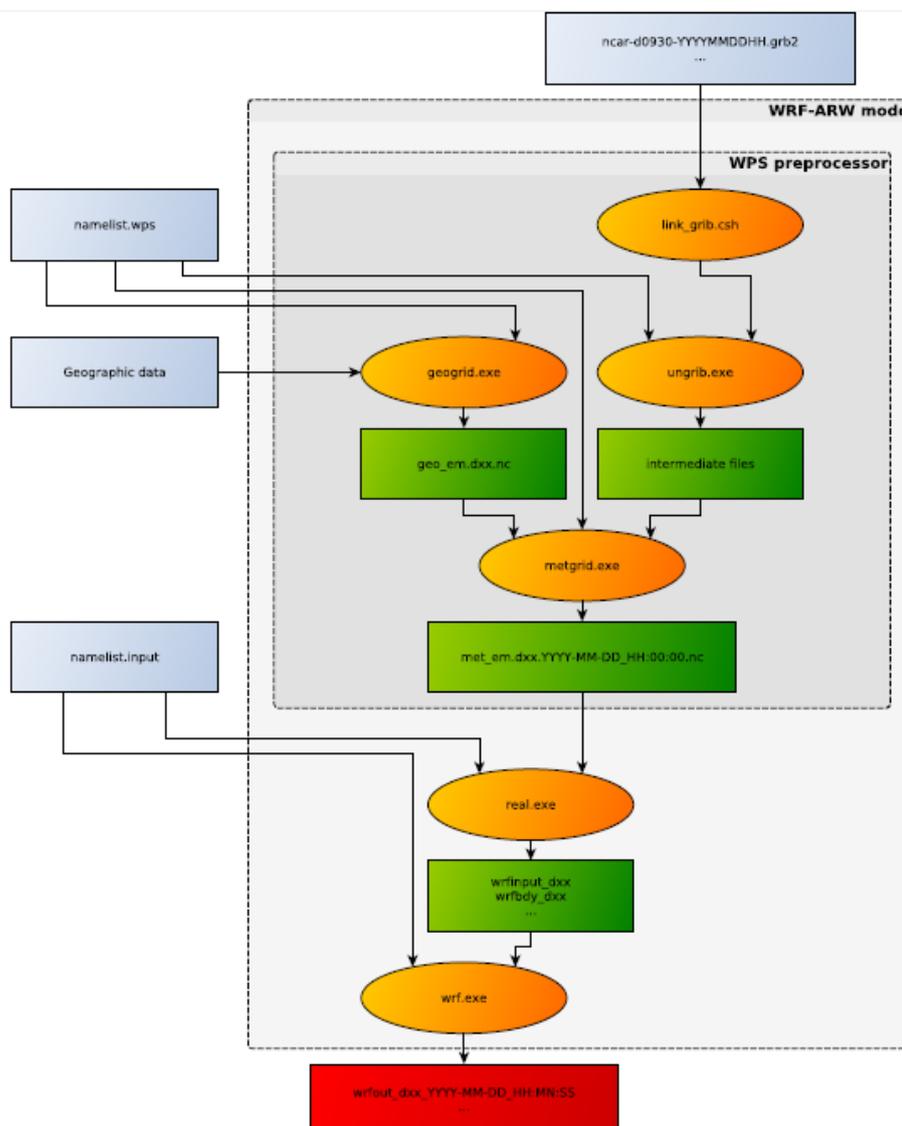


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

### WRF-ARW domains, resolution, set-up in MWM

The preliminary set-up and tuning of the met-ocean models chain was performed simulating the month of November 1999, chosen for the remarkable number of very intense storms occurred over the Mediterranean Sea. The second step, before running the entire period 1979-2013, was done simulating one complete year, from November 1999 to October 2000, relying on 41 ground stations along the Mediterranean coast and 25 wave buoys for comparison. The results obtained in these steps are summarized in Contento et al. (2014), Contento et al. (2012-2014) and Donatini (2013).

The two-steps set-up started with the meteorological model *WRF-ARW*, adopting different configurations (domain size, resolution, run length, spin-up time) and comparing the wind speed and direction with observational data from ground stations. Since the *CFSR* (Saha et al, 2010) re-analysis dataset reproduces large scale events correctly, after several tests the final decision was to adopt three relatively small, overlapping domains, which cover respectively the Western, Eastern and Central Mediterranean Sea (Fig. A.4). Hereafter these domains will be referred as MEW, MEE and MEC respectively. The wind field obtained from the 3 domains was merged in a

single dataset by a bi-linear interpolation on a Lat-Lon grid and by a linear blending of the results inside the two overlapping zones (Fig. A.4).

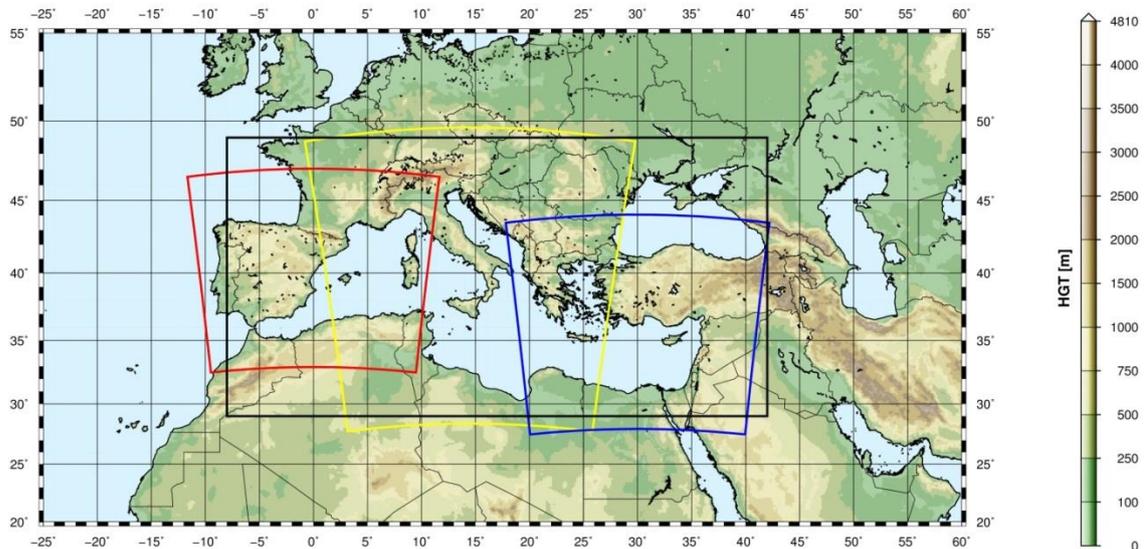


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

The horizontal resolution of *WRF-ARW* was set to 10.53 km, with a grid ratio to the *CFSR* re-analysis data of 1:5 approximately. An additional domain (ITN) with a resolution of 3.51 km was run over Northern Italy as a nested domain of MEC.

The time length of the model run, in terms of hours simulated continuously between two consecutive model initializations with *CFSR* frames, proved to be among the most important parameters that influence the quality of the results. Keeping a small run length reduces the risk of model drift. On the other hand, shortening it excessively may lead to a too constrained behavior of the model, which prevents the correct development of the mesoscale weather structures. The problem of the model drift proved to be particularly tough over the Adriatic Sea where the orography is rather complex and the North-Eastern wind (Bora) can occasionally reach the speed of 150 km/h or more in very narrow zones.

A spin-up time window was used in order to let the model *WRF-ARW* ingest and process the coarser initial conditions from *CFSR*, thus letting it evolve and develop local weather structures. This spin-up window was overlapped with the tail of the previous run so that the data of the simulation during the spin-up window were discarded. The time length of this overlapping window is typically of few hours.

The Mediterranean Sea is a very complex basin from the meteorological point of view, with violent storms usually characterized by a short duration. The two examples given below show the importance of resolving the large space and time gradients of the variables.

Fig. A.5 shows a typical winter wind pattern (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The reference distance of these large variations is of 1° at most.

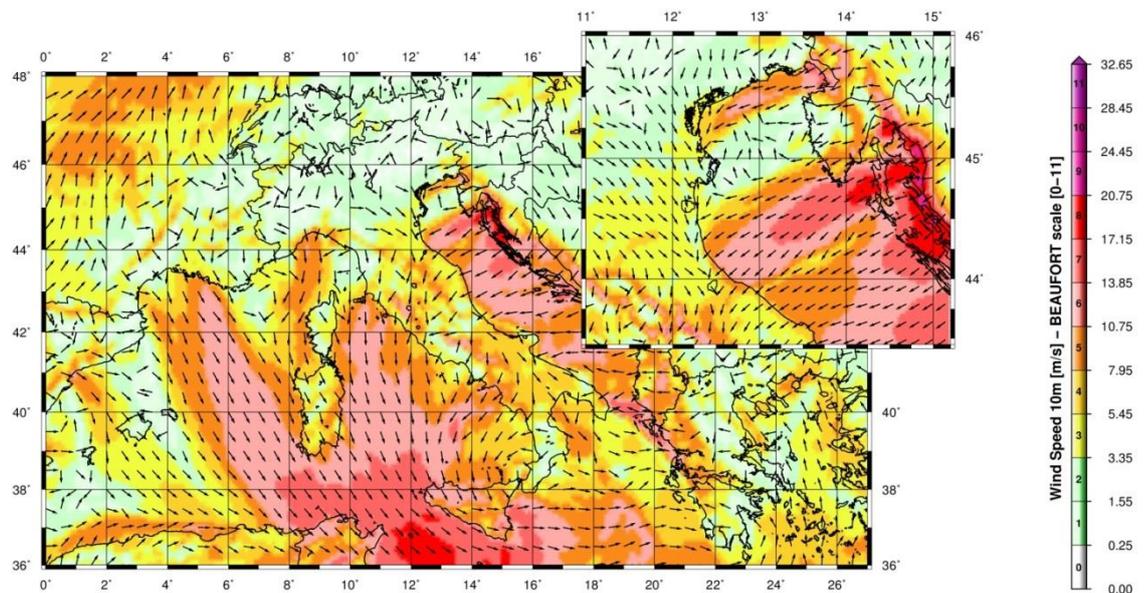


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure shows a zoom over the Northern part of the Adriatic Sea (Istria peninsula).

Fig. A.6 (Contento et al., 2011) shows the time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste that caused the loss of two human lives and damages in the main harbor. The squall lasted about 10 min reaching more than 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW* run at that time by some of the authors of this work for ARPA FVG-OSMER, <http://www.osmer.fvg.it/home.php>. The black line corresponds to the measurement at the station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [<http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>]. The station is a fixed pole in the middle of the Gulf of Trieste. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s. This situation is not uncommon in the Adriatic zone, mostly during the summer, with violent fronts from North and North-West then rotating to North-East.

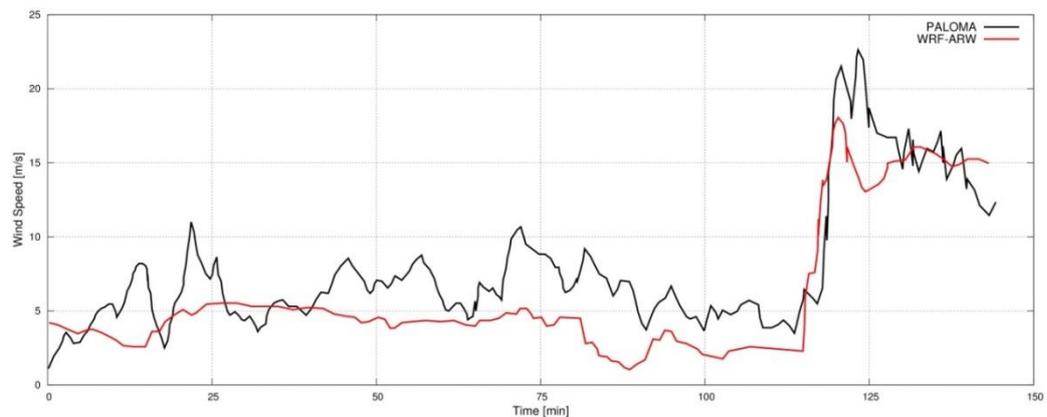


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black line corresponds to the measurements at the measurements station PALOMA (45° 37' 06" N, 13° 33' 55" E) [<http://www.ts.ismar.cnr.it/node/84>]. The measured wind speed is 5 min averaged with 5 min samples. The time step of the model is approximately 13 s.

## MIKE 21 SW wave model

The wave modeling system includes the state of the art third generation spectral wind-wave model MIKE 21 SW, developed by DHI. MIKE 21 SW simulates the growth, decay and transformation of wind-generated waves and swell in offshore and coastal areas.

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

- Wave growth by action of wind
- Non-linear wave-wave interaction
- Dissipation due to white-capping
- Dissipation due to bottom friction
- Dissipation due to depth-induced wave breaking
- Refraction and shoaling due to depth variations
- Wave-current interaction
- Effect of time-varying water depth

The discretization of the governing equation in geographical and spectral space is performed using cell-centered finite volume method. In the geographical domain, an unstructured mesh technique is used. The time integration is performed using a fractional step approach where a multisequence explicit method is applied for the propagation of wave action.

For the production of the MWM database, the fully spectral formulation has been adopted, based on the wave action conservation equation, as described in e.g. Komen et al. and Young where the directional-frequency wave action spectrum is the dependent variable.

The time integration of the governing equations is done by using a dynamically determined time step. The time step is determined in order to verify the stability criteria (CFL number).

The only driving force is represented by the two components of wind fields U10 and V10, (x and y component of wind at the elevation of 10m). The process by which the wind transfers energy into the water body for generating waves is controlled by a uncoupled air-sea interaction.

The spectral discretization adopted in the wave model has been deeply investigated and the final configuration is able to guarantee at the same time a high level of accuracy of the results and a reasonable computational effort.

The model domain covers the whole Mediterranean Sea but the spatial resolution is not the same everywhere: while in the offshore areas the spatial resolution is around  $0.1^\circ$ , when approaching the coast the spatial resolution increases up to around  $0.03^\circ$ .

The wave model is forced by the wind fields coming from the WRF Atmospheric models, illustrated above. The wave model generated results in terms of wave parameters (Significant Wave Height, Wave Periods, Wave Directions, etc.) over the whole domain and, in addition, spectral parameters in predefined output locations have been stored, too.

## MIKE 21 SW domain, resolution, set-up in MWM

The model domain, covering the entire Mediterranean Sea, is illustrated in Figure A.7.

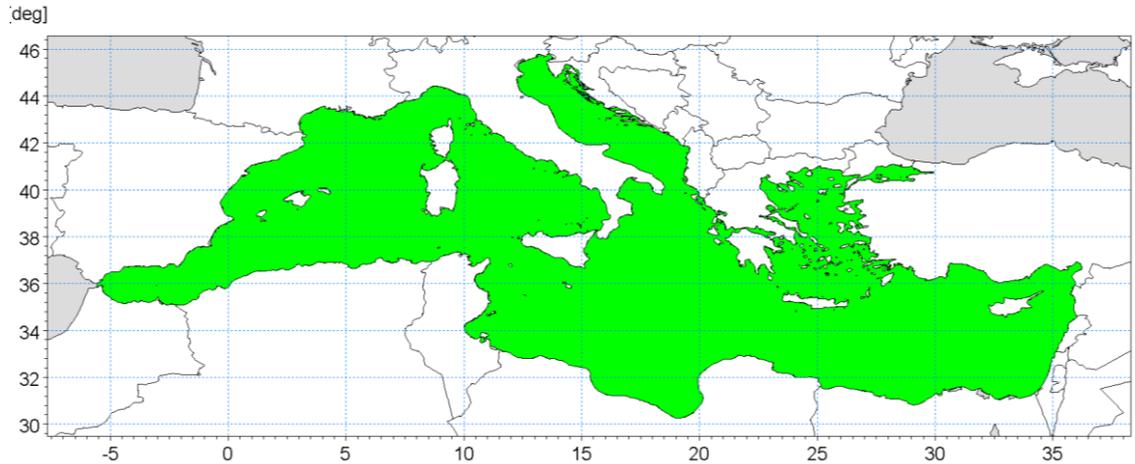


Figure A.7 Wave model domain filled in green

The unstructured mesh, generated over the entire domain by means of a specific tool included in MIKE 21 package, is characterized by different resolutions (in terms of mean length of triangle sides) over the domain. In particular the following criteria have been adopted:

- a coarser resolution of  $0.1^\circ$  (about 10 Km) is used for offshore areas;
- a finer resolution of  $0.03^\circ$  (about 3 Km) has been adopted in shallow water areas, where bathymetry is less than 100m depth or, in coastal areas characterized by very steep profiles, where the distance from the coastline is less than 5÷10 Km.

Figure A.8 illustrates the computational mesh of the Mediterranean wave model.

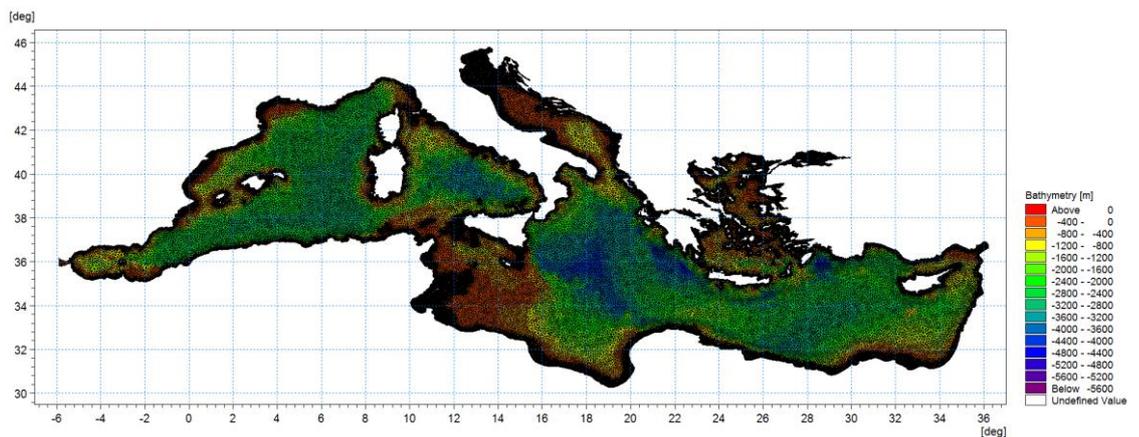


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

Figure A.9 illustrates a detail of the above computational mesh, with special focus on the Adriatic Sea.

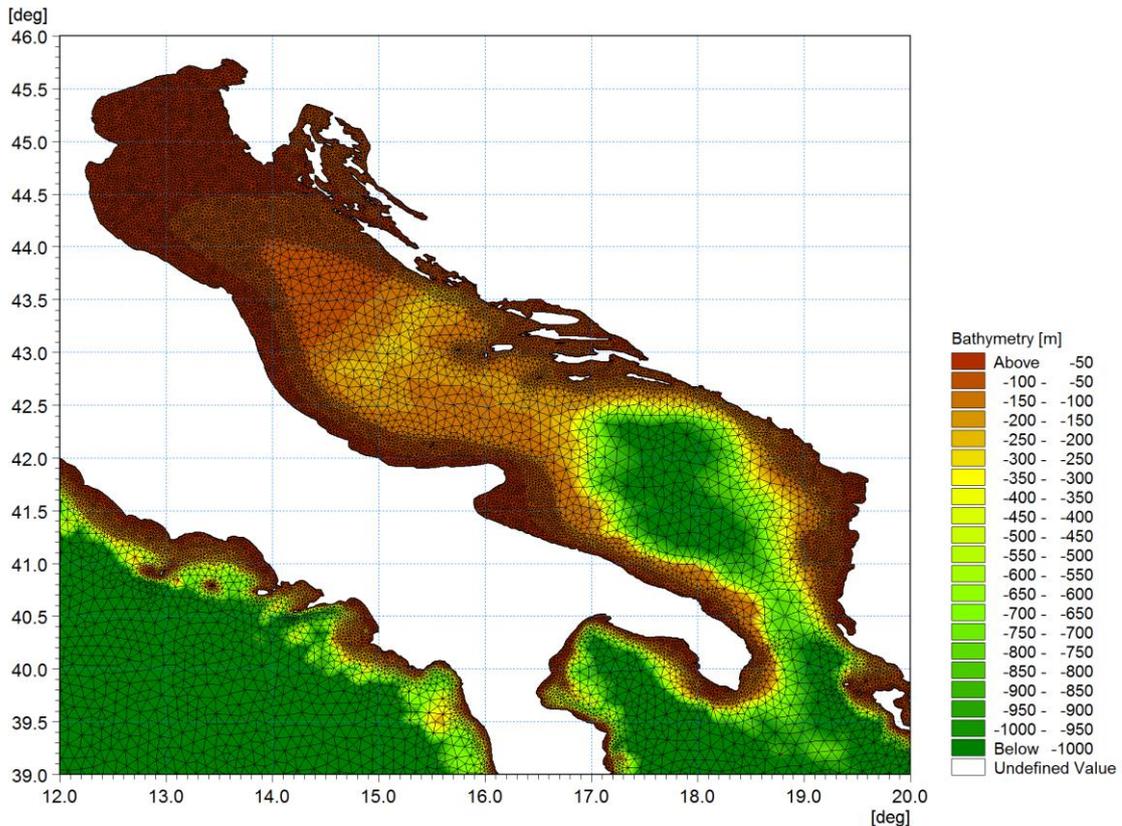


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

Scatter bathymetry data have been derived from GEBCO\_08 database. The GEBCO\_08 Grid is a 30 arc-second grid of global elevations and it is a continuous terrain model for ocean and land. The grid was generated by combining quality-controlled ship depth soundings with interpolation between sounding points guided by satellite-derived gravity data.

The gridded data are stored in a netCDF data file. Grids are stored as one dimensional arrays of 2-byte signed integer values. The complete data sets provide global coverage. Each data set consists of 21,600 rows x 43,200 columns, resulting in a total of 933,120,000 data points. The data start at the Northwest corner of the file, i.e. for the global file, position 89°59'45"N, 179°59'45"W, and are arranged in latitudinal bands of 360 degrees x 120 points/degree = 43,200 values. The data range eastward from 179°59'45"W to 179°59'45"E. Thus, the first band contains 43,200 values for 89°59'45"N, then followed by a band of 43,200 values at 89°59'15"N and so on at 30 arc-second latitude intervals down to 89°59'45"S. Data values are pixel centred registered, they refer to elevations at the centre of grid cells.

Figure A.10 illustrates GEBCO\_08 scatter data for the entire area of the Mediterranean Sea.

GEBCO scatter data have not been used in the whole domain of the Mediterranean Sea. Following a detailed check of agreement and discrepancies between GEBCO database and nautical charts, it has been assumed to limit the use of GEBCO database for offshore areas (up to 500 m water depth) and to use nautical charts for shallower water areas (mainly coastal areas).

The nautical charts database which has been used is the CM93/3 database from CMAP.

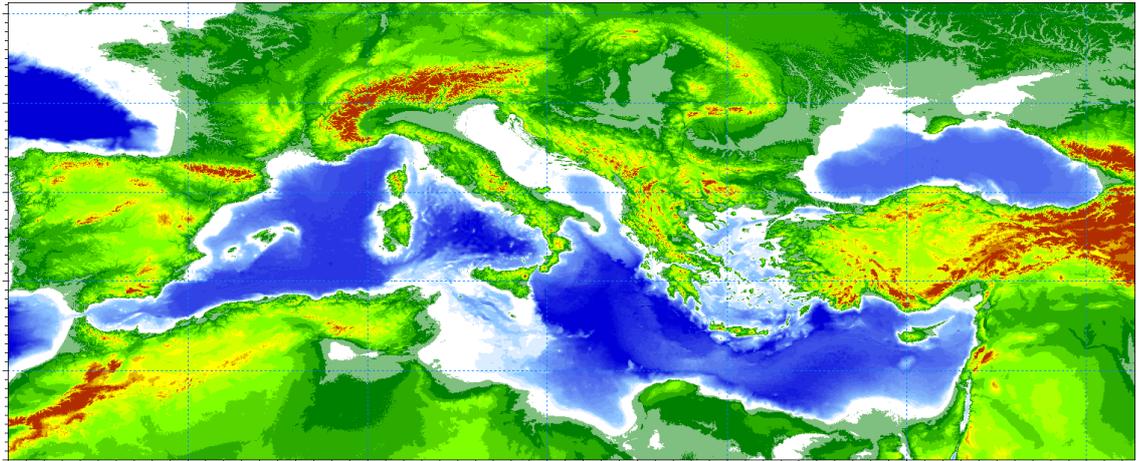


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO\_08 database

The number of discrete frequencies and directions form the so called “spectral resolution”, which is a key parameter for wave models in general. The number of discrete frequencies and directions should in fact be high enough to properly represent the “real shape” of the wave spectrum and, on the other hand, it can’t be too high, since it would lead to unacceptable computational times and memory consumption.

In terms of frequency range, the minimum frequency  $f_{min}$  (which corresponds to the maximum wave period  $T_{max}$ , according to the common relation  $f = \frac{1}{T}$ ) should be able to capture the longest wave periods that can occur in the Mediterranean Sea.

The analysis of ordinary and extreme waves in the Mediterranean Sea (from available data of wave buoys) has highlighted that almost all the wave energy associated to waves in the Mediterranean Sea are associated to wave periods between 1.5 seconds and 20 seconds.

In addition, a logarithmic distribution for the discrete frequencies acts better than a simple linear distribution, since most of the wave periods are concentrated below 8-10 seconds. A number of frequencies around 30 is widely considered as adequate for a proper discretization of wave energy spectra in the Mediterranean Sea. The following formulation has therefore been adopted:

$$f_n = 0.04 \cdot 1.1^n,$$

where n goes from 0 to 29 (30 frequencies in total). The discrete frequencies range from 0.04 Hz to 0.63 Hz (from 1.6s to 25.0s of Mean Wave Period  $T_m$ ).

Also the choice of the number of discrete directions (directional discretization) is the result of detailed investigations and tests. In particular, a high number of wave model tests, each one characterized by a different spectral resolution (directional), i.e. by a different number of discrete directions have been setup and run.

Few examples of the results of the above model tests are illustrated from Figure A.11 to Figure A.13 in terms of short time series of wave heights extracted at 3 different locations where also measurements were available (La Spezia wave buoy, Ponza wave buoy, Cetraro wave buoy).

In all the below test cases, it appears that the two time series of wave height characterized by 24 and 36 discrete directions are almost coincident. Higher discrepancies can be found for a much limited number of discrete directions (12). After a high number of tests, the 24 directions solution has been assumed as a very good compromise between accuracy of results and computational time (the computational time of the wave model is linearly dependent on the number of discrete directions).

Provided that wave directions can vary within the 360° rose, the directional resolution of the wave model is  $360^\circ/24 = 15^\circ$

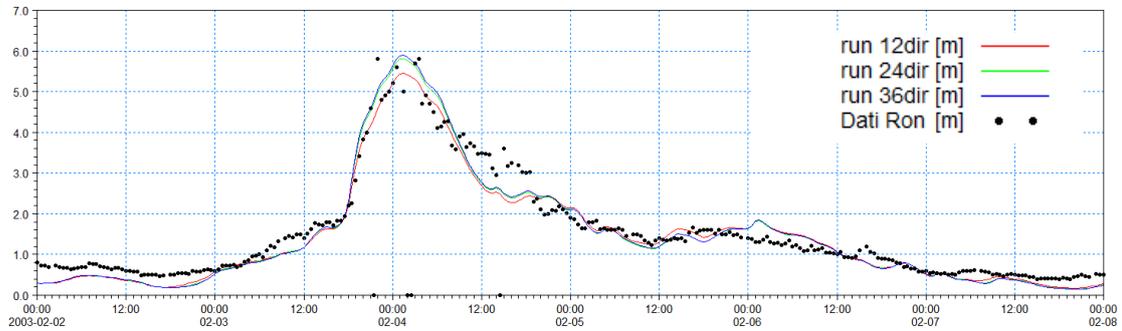


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

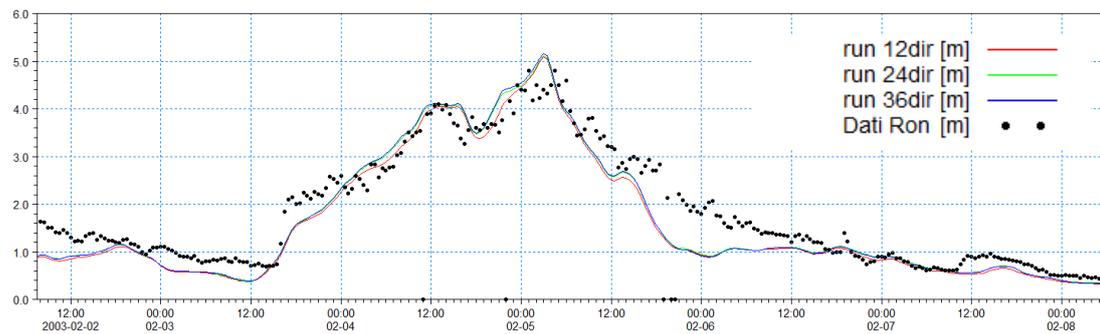


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

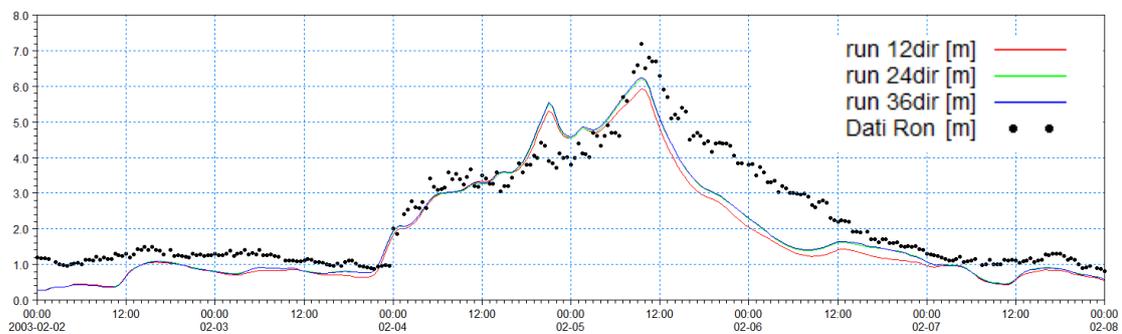


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

## Available products of the MWM database

The results of the wind and wave model are stored, in the whole domain, in terms of wind parameters and wave parameters averaged over the wave period (“phase averaged results”). In particular, the following hourly time series are available:

- Wind speed, WS [m/s]
- Wind direction, WD [deg]
- Significant Wave height, Hs [m]
- Mean wave period, Tm [s]
- Peak wave period, Tp [s]
- Zero crossing period, Tz [s]
- Mean wave direction, MWD [deg]
- Peak wave direction, PWD [deg]
- Directional standard deviation, DSD [deg]

In addition, hourly spectral results (in terms of wave energy associated to the frequency-direction bins) are saved on a regular grid with an equidistant spatial resolution of  $0.1^\circ$ .

Figure A.14 and Figure A-15 illustrate respectively an example of phase averaged results over a portion of Mediterranean Sea (Hs) and an local example of spectral results.

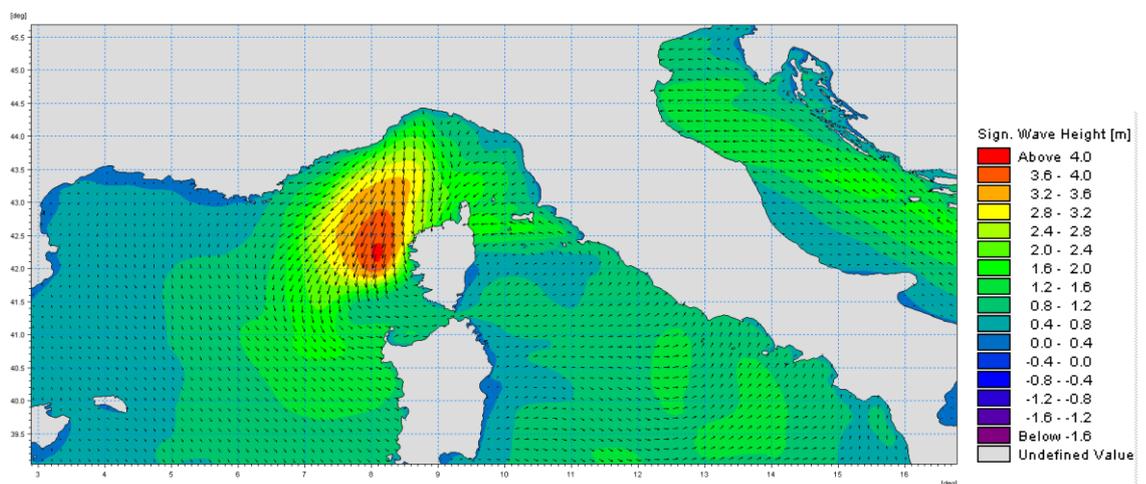


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

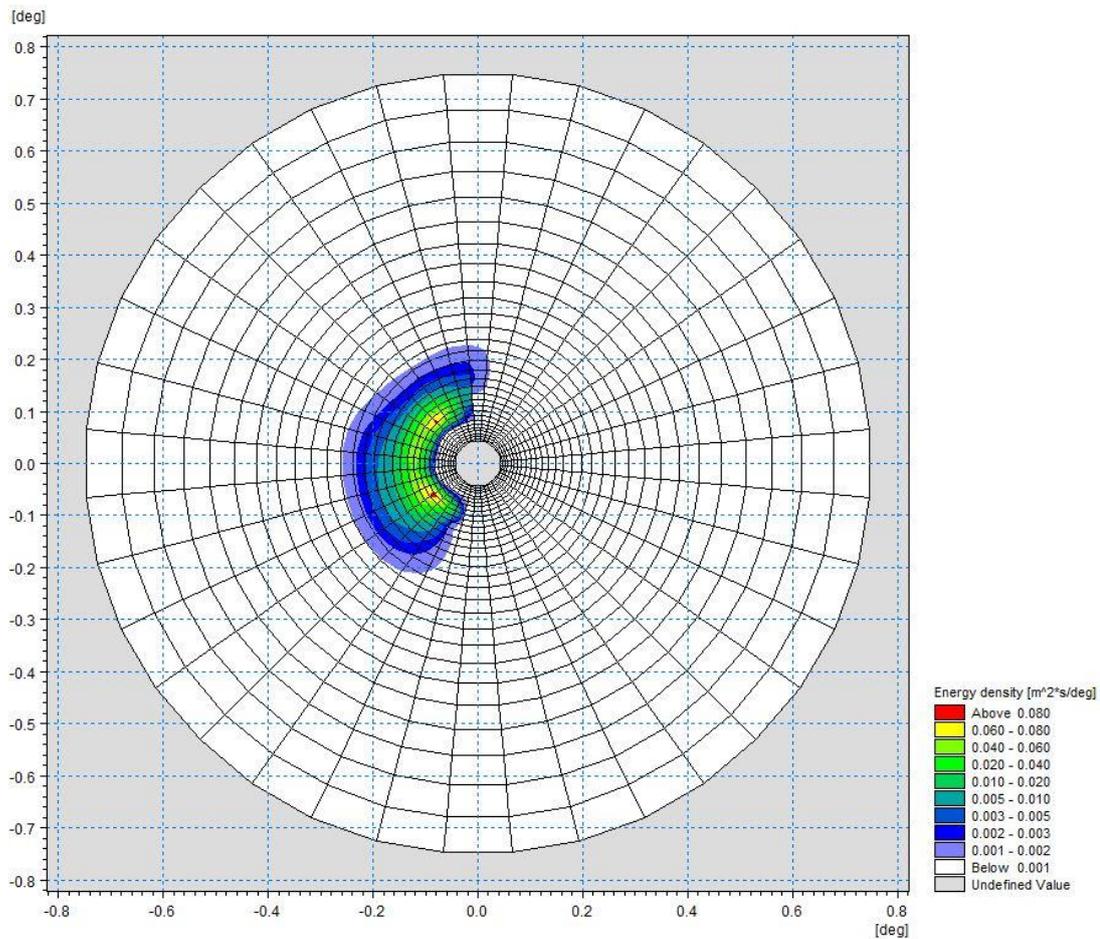


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

## References

Arduin, F., Bertotti, L., Bidlot, J.R., Cavaleri, L., Filipetto, V., Lefevre, J.M., Wittmann, P., 2007, Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 526-541.

Athanassoulis, G., Stefanakos, Ch., Cavaleri, L., Ramieri, E., NoEL, C., Lefevre, J.M., Gaillard, P., 2004, RTP 10.10 / WW\_MEDATLAS Scientific Report.

Battjes, J.A., Janssen, J.P.F.M., 1978, Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings, 16<sup>th</sup> Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, pp.569-587.

Bolaños-Sanchez, R., Sanchez-Arcilla, A., Cateura, J., 2007, Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modeling in the NW Mediterranean. *Journal of Marine Systems* 65:336-353.

Cavaleri, L., Bertotti, L., 2004, Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. *Tellus*, Vol. 56, pp. 167-175.

Cavaleri, L., 2005, The wind and wave atlas of the Mediterranean Sea – the calibration phase. *Advances in Geosciences*, Vol. 2, pp. 255-257.

Cavaleri, L., Sclavo, M., 2006, The calibration of wind and wave model data in the Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, Vol.53, pp. 613-627.

Chawla, A., Spindler, D.M., Tolman, H.L., 2013, Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds, *Ocean Modelling*, Vol. 70, pp. 189-206.

Contento, G., Lupieri, G., Venturi, M. Ciuffardi, T., 2011, A medium-resolution wave hindcast study over the Central and Western Mediterranean Sea, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16(2), pp. 181–201.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, Feudale, L, Pedroncini, A., Cusati, L.A., 2014, A state-of-the-art met-ocean model chain for wind&wave hindcast over the Mediterranean and Black Seas: implementation, tuning and validation against field data, accepted for presentation at the 21<sup>th</sup> Symposium Theory and Practice of Shipbuilding SORTA 2014, Oct. 2-4, 2014, Baška, Island of Krk, Croatia.

Contento, G., Lupieri, G., Donatini, L, 2012-2014, Project SEAPOL - Sistema modellistico ad Elevata risoluzione per l'Analisi storica e la Previsione del moto Ondoso nel mar Ligure, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Technical Reports codes SEAPOL\_UT\_1.1.0 to SEAPOL\_UT\_5.1.0.

Donatini, L., 2013, Implementation of a state-of-art met-ocean model chain for hindcast wave simulations over the Mediterranean Sea and comparison of results with field data, Master Degree Thesis, Department of Engineering and Architecture, University of Trieste, Italy.

Donatini, L., Lupieri, G., Contento, G., 2014, A medium resolution wind&wave hindcast study for the Mediterranean Sea, Journal Paper, under review.

Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Krusemann, P., Meerburg, A., Mueller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973, Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergaenzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe, A(8)*, 12, 95 pp.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J.H., Barnett, T.P., 1985. Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part II: Parametrizations of the nonlinear energy transfer for applications in wave models. *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 15, pp. 1378–1391.

ISPRA (formerly APAT), 2004, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Dipartimento Tutela Acque Marine ed Interne, Servizio difesa delle coste, Analisi preliminare dei dati marini lungo le coste italiane – Atlante delle coste – Il moto ondoso al largo delle coste italiane, Technical Report (in Italian). [http://www.apat.gov.it/site/\\_files/Atlante\\_coste/Introduzione.pdf](http://www.apat.gov.it/site/_files/Atlante_coste/Introduzione.pdf).

Janssen, P.A.E.M., Abdalla, S., Hersbach, H., Bidlot, J.R., 2007: Error Estimation of Buoy, Satellite, and Model Wave Height Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. **24**, pp. 1665–1677. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH2069.1>

Michalakes, J., Chen, S., Dudhia, J., Hart, L., Klemp, J., Middlecoff, J., Skamarock, W., 2001, Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. *Developments in Teracomputing. In Proceedings of the 9<sup>th</sup> ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, 269-276.

Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W., Wang, W., 2005, The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. In *Proceedings of the 11<sup>th</sup> ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and George Mozdzyński. World Scientific, 56 - 168.

Ponce del León, S., Guedes Soares, C., 2008, Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean Sea. *Coastal Engineering*, Vol. 55, pp. 920-929.

Puertos del Estado, Spain, 2009, – ([http://www.puertos.es/oceanografia\\_y\\_meteorologia/](http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/)), private communication.

Queffeuou, P., 2004, Long term validation of wave height measurements from altimeters. *Marine Geodesy*, Vol. 27, 495-510.

Queffeuou, P., Croizé-Fillon, D., 2010, Global altimeter SWH data set, version 7, Technical Report, Ifremer, [ftp://ftp.ifremer.fr/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter\\_wave\\_merge\\_\\_7.0.pdf](ftp://ftp.ifremer.fr/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter_wave_merge__7.0.pdf)

Queffeuou, P., 2009, Altimeter Wave Height Measurements - Validation of Long Time Series. Poster: Ocean Surface Topography Science Team meeting, Seattle, Washington, USA. (<http://www.avisioceanobs.com/en/courses/ostst/ostst-2009-seattle/posters/>).

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Wollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y., Chuang, H., Juang, H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., VanDelst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R., Rutledge, G., Goldberg, M., 2010, *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 91, 1015–1057.

Skamarock WC, Klemp JB, 2007, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *J. Comp. Phys.* Special issue on environmental modeling.

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Tolman, H.L., 2002a. Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models. *Ocean Modelling*, Vol. 4, pp. 269–289.

Tolman, H.L., 2002f, Validation of WAVEWATCH III, version 1.15 for a global domain. Tech. Note 213, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 33p.

Tolman, H.L., 2008, [http://cioss.coas.oregonstate.edu/CIOSS/workshops/Altimeter\\_workshop\\_08/Coastal\\_Alt\\_Presentations/18\\_Tolman\\_Sig\\_Wave\\_Ht.pdf](http://cioss.coas.oregonstate.edu/CIOSS/workshops/Altimeter_workshop_08/Coastal_Alt_Presentations/18_Tolman_Sig_Wave_Ht.pdf)

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Conference of Coastal Engineering, 19-24 September 2004, Lisbon, Portugal.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S. and Janssen, P.A.E.M., (1984). Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560 pp.

Young, I.R., (1999). Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.

WAMDI-group: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.J. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.C. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, (1988) "The WAM model – a third generation ocean wave prediction model", *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1775-1810

General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) – [www.gebco.net](http://www.gebco.net)

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - [www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/](http://www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/)

Ole Baltazar Andersen (1995), Global ocean tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry, J. of Geophys. Res., 100, C12, p. 25249-25260

Doodson, A. T., Warburg, H. D., 1941 "Admiralty manual of tides"

## Web references

ARPA-FVG OSMER, [Online] <http://www.osmer.fvg.it/home.php>

ARW Online Tutorial." [Online] Available at <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/index.htm>

CISL RDA: NCEP Climate Forecast System Re-analysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010." [Online] Available at <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/index.html#description>

NOAA, Hourly/Sub-Hourly Observational Data." [Online] Available at <http://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo&cfg=cdo&theme=hourly&layers=1&node=gis>

The Weather Research&Forecasting Model Website." [Online] Available at <http://www.wrf-model.org/index.php>



## ALLEGATO B

Il codice di calcolo MIKE 21  
Descrizione tecnica del modulo SW



## MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,  
aree costiere ed offshore

Modulo d'onda SW



## MODULO D'ONDA (SW)

MIKE 21 SW rappresenta lo stato dell'arte tra i modelli numerici spettrali di nuova generazione per vento ed onde sviluppato da DHI. Il codice di calcolo simula la crescita, la trasformazione e la dissipazione di onde corte e onde lunghe in aree costiere e offshore.

MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

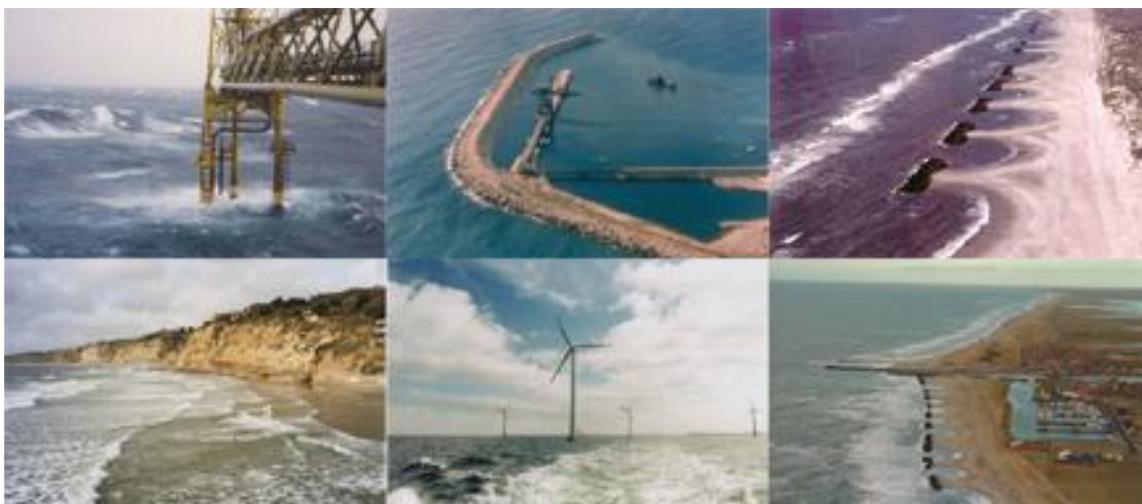
- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

La prima è basata sulla "wave action conservation equation" sviluppata da Komen et al. (1994) e Young (1999). La seconda, è basata su una parametrizzazione della "wave action conservation equation" introdotta nel dominio delle frequenze. Le equazioni di base sono formulate sia nelle coordinate cartesiane, per domini di calcolo a scala limitata, sia nelle coordinate polari per applicazioni a larga scala. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base è effettuata utilizzando l'approccio ai volumi finiti, attraverso l'utilizzo di una mesh di calcolo non strutturata.

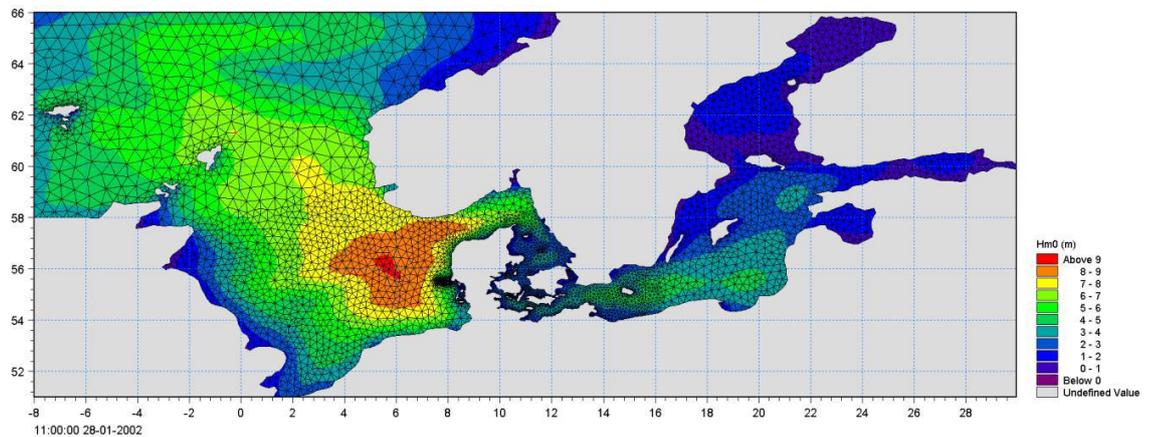
Il modello, nella formulazione "fully spectral", include i seguenti fenomeni fisici:

- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni del fondale;
- diffrazione;
- riflessione semplice;

MIKE 21 SW è utilizzato per la valutazione del clima ondoso off-shore ed in aree costiere, per scopi previsionali e analisi storiche. Una tipica applicazione di SW è il supporto alla progettazione di un'opera costiera o portuale, partendo dalla disponibilità di dati meteo marini off-shore (boe ondometriche o modelli a larga scala) individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.



MIKE 21 SW è inoltre utilizzato, sempre a supporto della progettazione di un'opera costiera, come strumento di base del calcolo sia delle correnti sia del trasporto solido litoraneo indotti dall'azione del moto ondoso. I campi di corrente e di trasporto sono infatti determinati, a partire dai campi di radiation stress forniti in output da MIKE 21 SW, mediante l'utilizzo di altri moduli del pacchetto MIKE21.



## EQUAZIONI DEL MODELLO

### Fully spectral formulation

L'equazione alla base di MIKE 21 SW è la "wave action balance equation", sviluppata in coordinate cartesiane e sferiche. Tale equazione, in coordinate cartesiane, è indicata di seguito:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

dove  $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$  è la "density action",  $t$  è il tempo,  $\bar{x} = (x, y)$  rappresenta le coordinate cartesiane,  $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$  è la velocità di propagazione di gruppo delle onde in quattro dimensioni  $(x, y, \theta, \sigma)$ .  $S$  è il termine di generazione di energia. Le celerità dell'onda sono date dalle equazioni della cinematica lineare:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} + \bar{U}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla_x d \right) - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right)$$

dove  $s$  ed  $m$  sono le coordinate spaziali rispettivamente parallele e perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda  $\theta$ ,  $d$  è la profondità,  $\bar{k}$  è il vettore del numero di onde di magnitudo  $k$ ,  $\bar{U}$  è il vettore di velocità di corrente.

Il termine di generazione,  $S$ , a secondo membro della “ wave action balance equation” è dato da:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Dove  $S_{in}$  rappresenta il trasferimento di quantità di moto dovuta al vento,  $S_{nl}$  il contributo dovuto all'interazione non lineare tra onde,  $S_{ds}$  la dissipazione dovuta al white capping,  $S_{bot}$  la dissipazione dovuta all'attrito col fondo e  $S_{surf}$  la dissipazione dovuta al frangimento.

Il contributo del vento è basato sulla quasi-linear theory of wind-wave generation (Janssen's 1989, 1991), dove la quantità di moto trasferita dal vento alla superficie libera non dipende solo dalle tensioni del vento ma anche dallo stato di mare stesso. Il contributo legato all'interazione non lineare tra onde è approssimato mediante l'approccio DIA (Hasselmann et al. 1985). Il termine di generazione relativo alla dissipazione da white capping è basato sulla teoria di Hasselmann (1974) e Janssen (1989). La dissipazione dovuta all'attrito col fondo è modellata usando l'approccio di Johnson e Kofoed-Hansen (2000), che dipende dal moto ondoso e dalle caratteristiche dei sedimenti. Il frangimento è basato sull'approccio di Battjes e Janssen (1978) e Eldeberky e Battjes (1996).

#### Directional decupled parametric formulation

Questa formulazione del modello è basata su una parametrizzazione della “ wave action balance equation” (Holthuisen 1989) nel dominio delle frequenze introducendo come variabile dipendente il momento di ordine zero e di ordine uno. Le equazioni quindi diventano le seguenti:

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1$$

dove  $m_0(x, y, \theta)$  e  $m_1(x, y, \theta)$  sono rispettivamente i momenti di ordine zero e ordine uno della “action spectrum”  $N(x, y, \sigma, \theta)$ .  $T_0(x, y, \theta)$  e  $T_1(x, y, \theta)$  sono i termini di generazione basati sulla action spectrum. I momenti  $m_n(x, y, \theta)$  sono definiti dall'equazione:

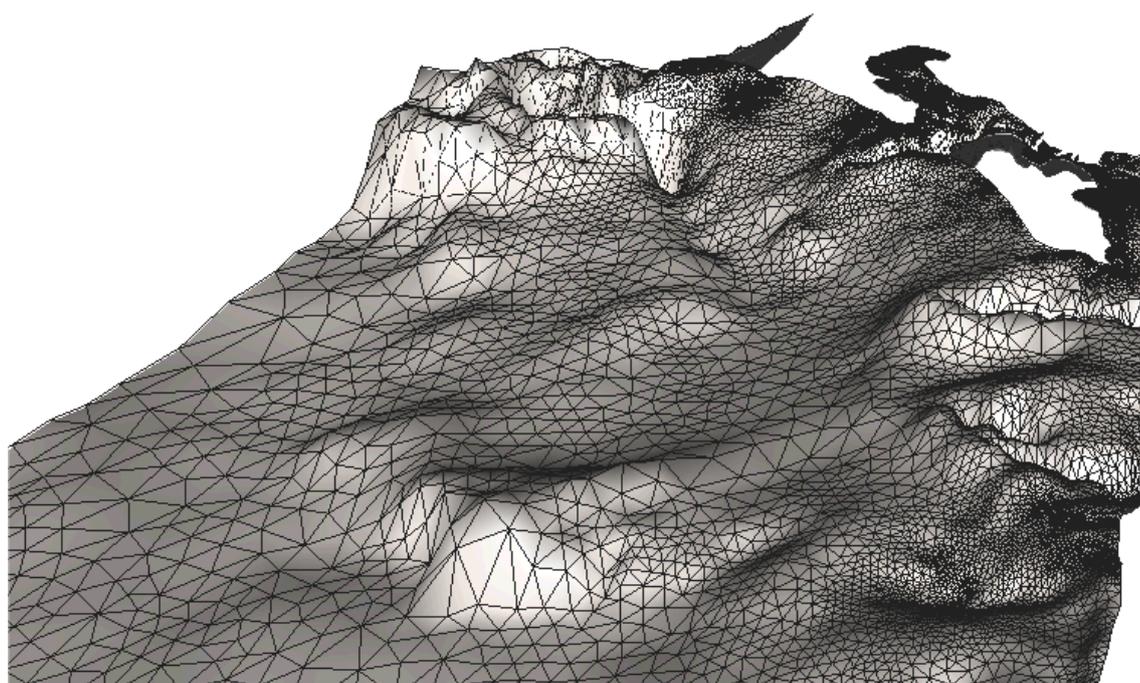
$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

I termini di generazione  $T_0$  e  $T_1$  tengono conto dell'effetto del vento (solo per la modalità stazionaria) attraverso una relazione empirica (Johnson 1998) della dissipazione di energia dovuta all'attrito col fondo e al frangimento, e dell'effetto di interazione onde-correnti.

## TECNICHE DI SOLUZIONE

La discretizzazione spaziale e spettrale è effettuata utilizzando un metodo ai volumi finiti con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il dominio delle frequenze può essere discretizzato sia in maniera lineare che logaritmica.

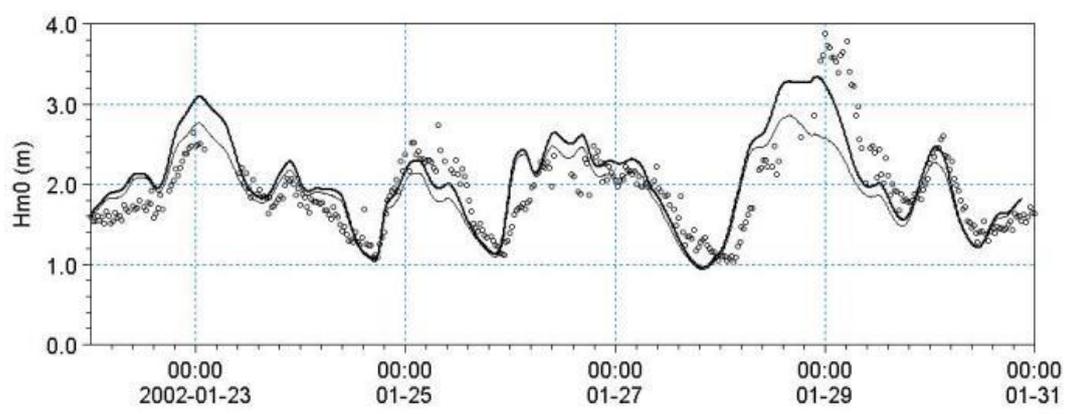
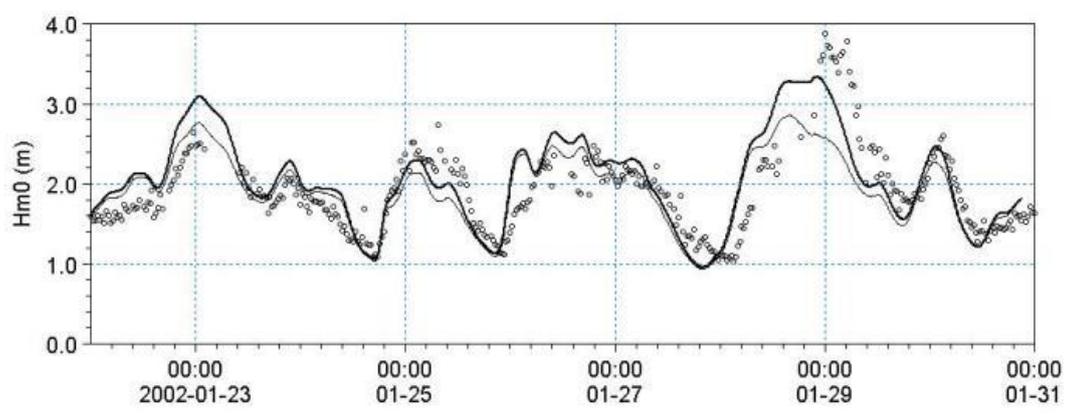
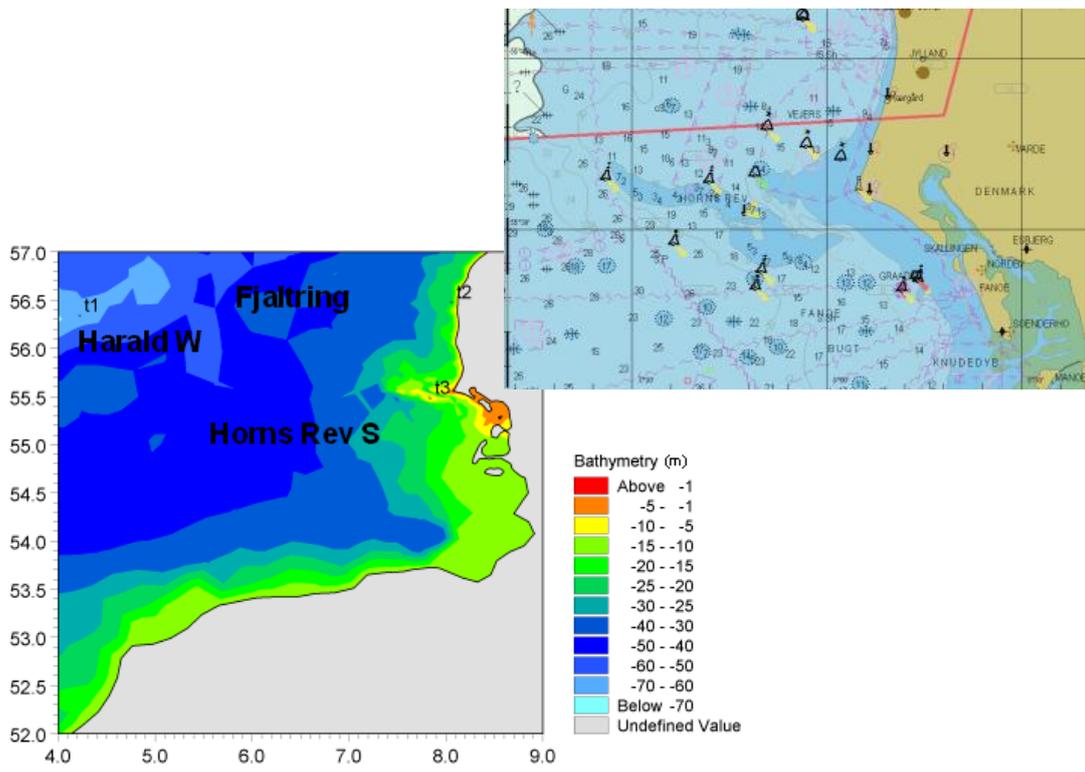
La discretizzazione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.



## INPUT AL MODELLO

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

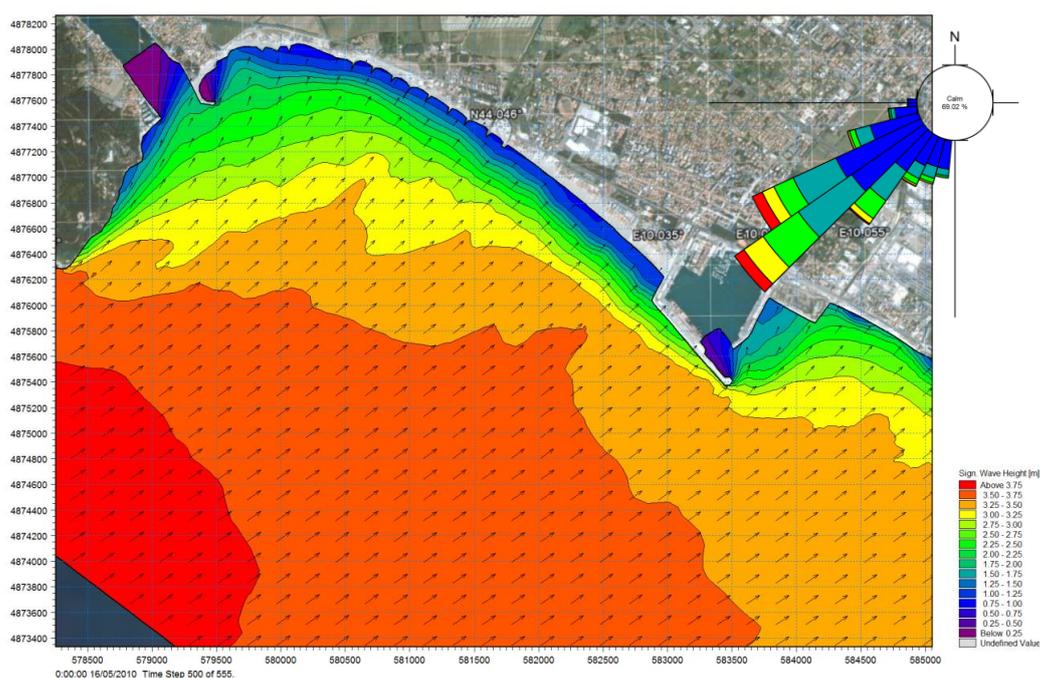
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).



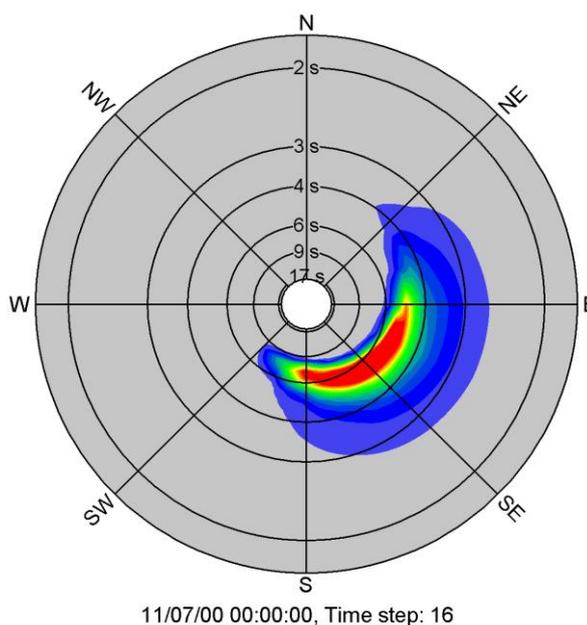
## OUTPUT DEL MODELLO

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun time step, si dividono essenzialmente nelle seguenti categorie.

- parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa  $H_m0$ , periodo di picco  $T_p$ , Periodo medio  $T_{01}$ , periodo di zero up crossing  $T_{02}$ , Periodo dell'energia  $T_{-10}$ , Direzione di picco  $PWD$ , Direzione media  $MWD$ , Deviazione standard direzionale  $\sigma$ , Tensore dei radiation stress  $S_{xx}$   $S_{xy}$   $S_{yy}$ . Se il modello è utilizzato in modalità fully spectral, ciascuna delle variabili sopra riportate possono essere suddivise in componente swell e wind sea. La divisione può essere effettuata mediante l'introduzione di una soglia fissa o dinamica;



- output spettrali: spettro combinato frequenza-direzione, spettro direzionale, spettro di frequenza.





## ALLEGATO C

Il codice di calcolo MIKE 21  
Descrizione tecnica del modulo BW



## MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,  
aree costiere ed offshore



## MODULO DI BOUSSINESQ (BW)

Il modulo Boussinesq Wave (BW) del codice di calcolo MIKE 21 è attualmente uno dei più completi strumenti per la modellazione matematica di onde corte e lunghe in ambito costiero ed in aree portuali. Il modello è in grado di riprodurre l'effetto combinato della maggior parte dei fenomeni che intervengono nella propagazione del moto ondoso in aree costiere e nei porti. Questi includono: shoaling, rifrazione, diffrazione, attrito del fondo, frangimento, riflessione parziale e trasmissione di spettri d'onda (direzione e frequenza) che si propagano in batimetrie complesse.

MIKE 21 BW include la possibilità di considerare la porosità delle strutture per la simulazione della riflessione parziale e la trasmissione attraverso pali o frangiflutti. Inoltre è possibile applicare dei contorni assorbenti laddove sia necessario simulare l'assorbimento dell'energia dell'onda (ad esempio una spiaggia). L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può avvenire attraverso i contorni aperti o direttamente da linee di generazione interne.

MIKE 21 BW include sia la modalità bidimensionale sia quella monodimensionale, ed è basato sulla soluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza che è introdotta nelle equazioni del moto considerando gli effetti delle accelerazioni verticali sulla distribuzione di pressione. Le equazioni di Boussinesq sono risolte in riferimento ad una formulazione basata sul flusso con un miglioramento nella descrizione della dispersione lineare. Queste equazioni di Boussinesq "estese" rendono il modello adatto alla simulazione di onde direzionali che viaggiano da acque profonde a basse. La profondità massima rappresentabile con le equazioni di Boussinesq estese è pari a circa mezza lunghezza d'onda, mentre con le equazioni classiche tale rapporto si riduce a 0.22.

Il principale campo di applicazione di MIKE 21 BW è l'analisi delle dinamiche del moto ondoso nei porti e nelle aree costiere in genere. L'output principale fornito da MIKE 21 BW è il campo di agitazione residua (wave disturbance), che è la variabile di riferimento più importante per la progettazione di un porto in fase di definizione del layout ottimale.



Tipiche applicazioni sono:

- determinazione del campo di agitazione residua all'interno del porto causata da onde corte e/o swell;

- studi di risonanza (seiching) per l'effetto di onde a bassa frequenza;
- trasformazione del clima ondoso in aree costiere laddove i fenomeni di riflessione e diffrazione sono dominanti;
- modellazione della surf-zone per il calcolo del run-up e della circolazione indotta;
- modellazione della propagazione e trasformazione di transitori, quali onde generate da imbarcazioni e tsunamis.

### EQUAZIONI DEL MODELLO

Il modulo BW risolve le equazioni di Boussinesq estese in una o due dimensioni in termini di superficie libera  $\xi$  e le velocità di corrente mediate lungo la verticale, P e Q.

$$n \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

$$n \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial x} + n^2 P \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gP\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_1 = 0$$

$$n \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{h} \right) + \frac{\partial R_{xx}}{\partial y} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + n^2 gh \frac{\partial \xi}{\partial y} + n^2 Q \left[ \alpha + \beta \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{h} \right] + \frac{gQ\sqrt{P^2 + Q^2}}{h^2 C^2} + n\psi_2 = 0$$

dove i termini di dispersione  $\psi_1$  e  $\psi_2$  sono definiti in questo modo:

$$\psi_1 = - \left( B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - nBgd^3 (\xi_{xxx} + \xi_{xyy}) - dd_x \left( \frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + nBgd(2\xi_{xx} + \xi_{yy}) \right) - dd_y \left( \frac{1}{6} Q_{xt} + nBgd\xi_{xy} \right)$$

$$\psi_2 = - \left( B + \frac{1}{3} \right) d^2 (Q_{yyt} + P_{xyt}) - nBgd^3 (\xi_{yyy} + \xi_{xxy}) - dd_y \left( \frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + nBgd(2\xi_{yy} + \xi_{xx}) \right) - dd_x \left( \frac{1}{6} P_{yt} + nBgd\xi_{xy} \right)$$

Gli indici x,y e t denotano rispettivamente i differenziali spaziali rispetto allo spazio e al tempo.

### Symbol list

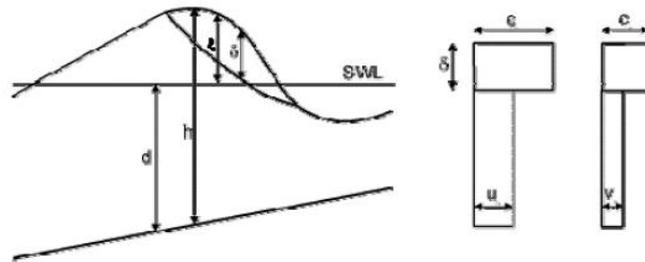
$P$	flux density in the $x$ -direction ( $m^3/m/s$ )
$Q$	flux density in the $y$ -direction ( $m^3/m/s$ )
$B$	Boussinesq dispersion coefficient (-)
$x, y$	Cartesian co-ordinates (m)
$t$	time (s)
$h$	total water depth ( $=d+\xi$ )
$d$	still water depth (m)
$g$	gravitational acceleration ( $= 9.81 m/s^2$ )
$n$	porosity (-)
$C$	Chezy resistance number ( $m^{0.5}/s$ )
$\alpha$	resistance coefficient for laminar flow in porous media (-)
$\beta$	resistance coefficient for turbulent flow in porous media (-)
$\xi$	water surface elevation above datum (m)

L'inclusione del frangimento è basata sul concetto di "surface rollers", dove i termini  $R_{xx}$ ,  $R_{xy}$  e  $R_{yy}$  sono definiti nel modo seguente:

$$R_{xx} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left( c_x - \frac{P}{h} \right)^2$$

$$R_{xy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left( c_x - \frac{P}{h} \right) \left( c_y - \frac{Q}{h} \right)$$

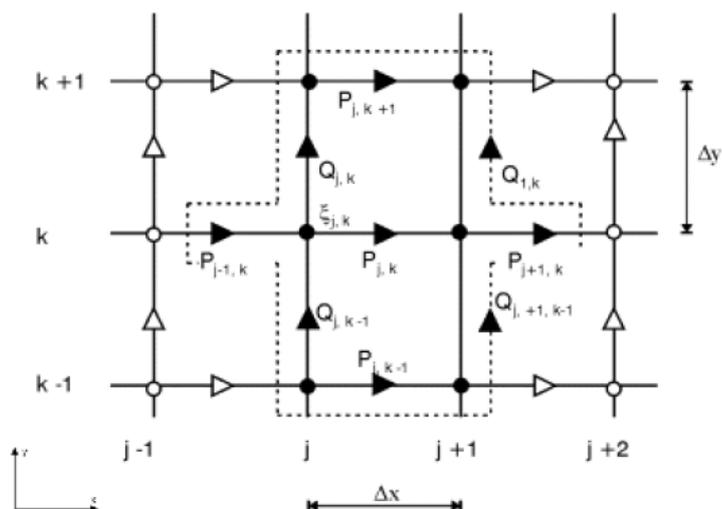
$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left( c_y - \frac{Q}{h} \right)^2$$



Dove  $\delta = \delta(t, x, y)$  è lo spessore del "surface roller" e  $c_x$  e  $c_y$  sono le componenti della celerità del roller.

### TECNICHE DI SOLUZIONE

Le equazioni differenziali sono discretizzate su una griglia rettangolare sfalsata illustrata nell'immagine seguente. Le grandezze scalari (ad es. la superficie libera) sono definite ai nodi, mentre le componenti del flusso sono definiti a metà strada tra nodi adiacenti nelle rispettive direzioni.



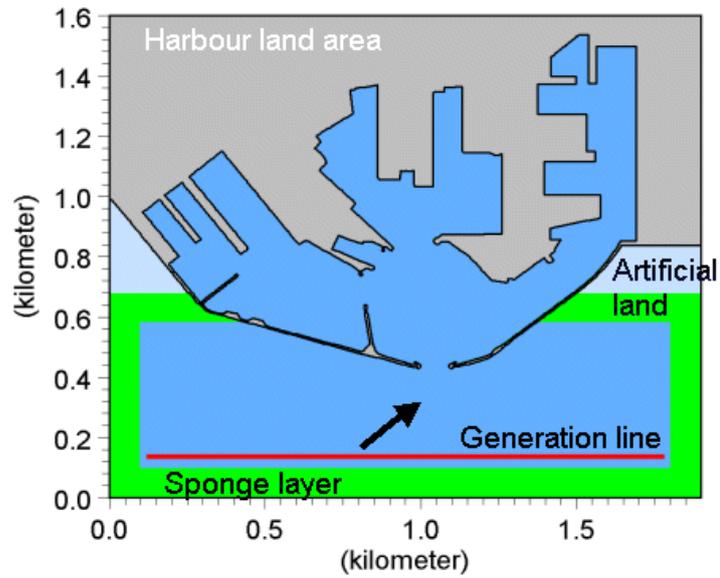
L'approssimazione alle differenze finite è effettuata direttamente a centro-cella, eccetto per i termini convettivi (Madsen and Sørensen 1992 e Madsen et al. 1997a). L'integrazione temporale è fatta utilizzando uno schema implicito non iterativo.

## INPUT AL MODELLO

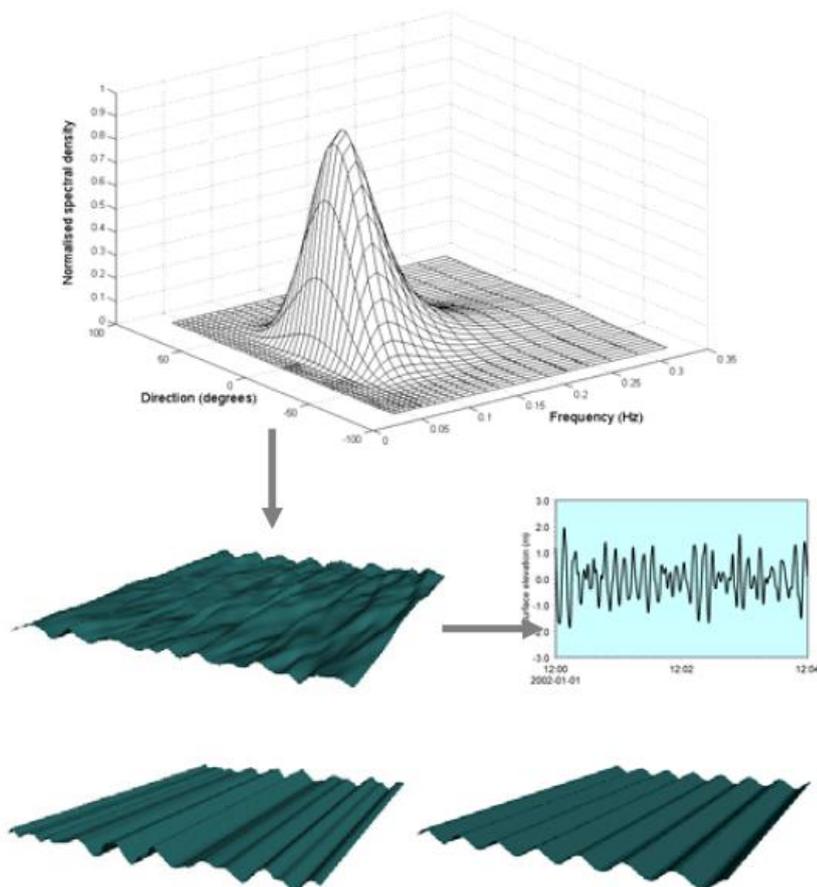
I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri base (Batimetria, tipo di modello e scelta della formulazione, parametri numerici, tipo di boundaries, time step e durata della simulazione);
- altri dati (condizioni iniziali, condizioni al contorno, linee di generazione interne, frangimento, moving shoreline, attrito al fondo, riflessione e trasmissione, strati assorbenti).

Le attività più onerose in fase di set-up del modello consistono nella generazione della batimetria, delle mappe di porosità e sponge. Tali operazioni vengono effettuate rispettivamente attraverso l'impiego del "Bathymetry Editor", incluso nel modulo PP (pre-post processing) e uno specifico tool di MIKE 21 toolbox.

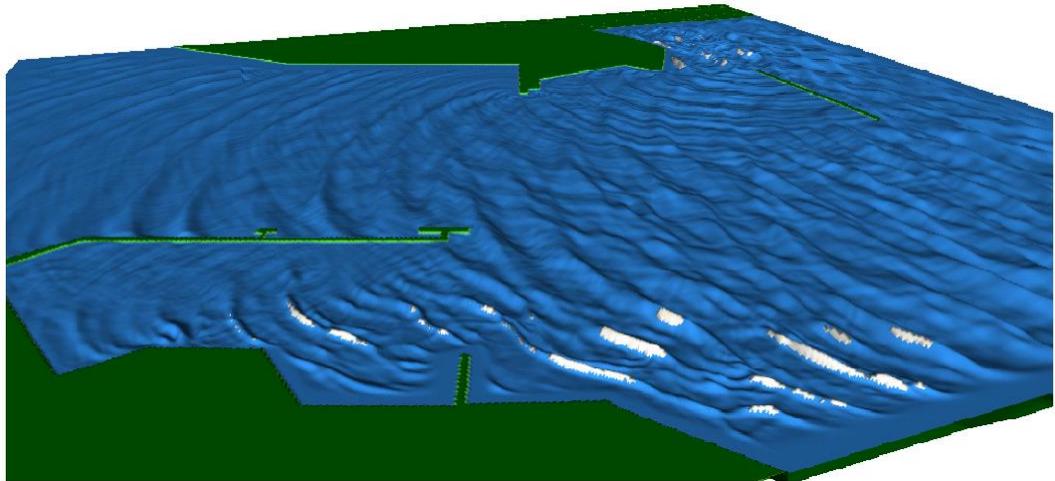


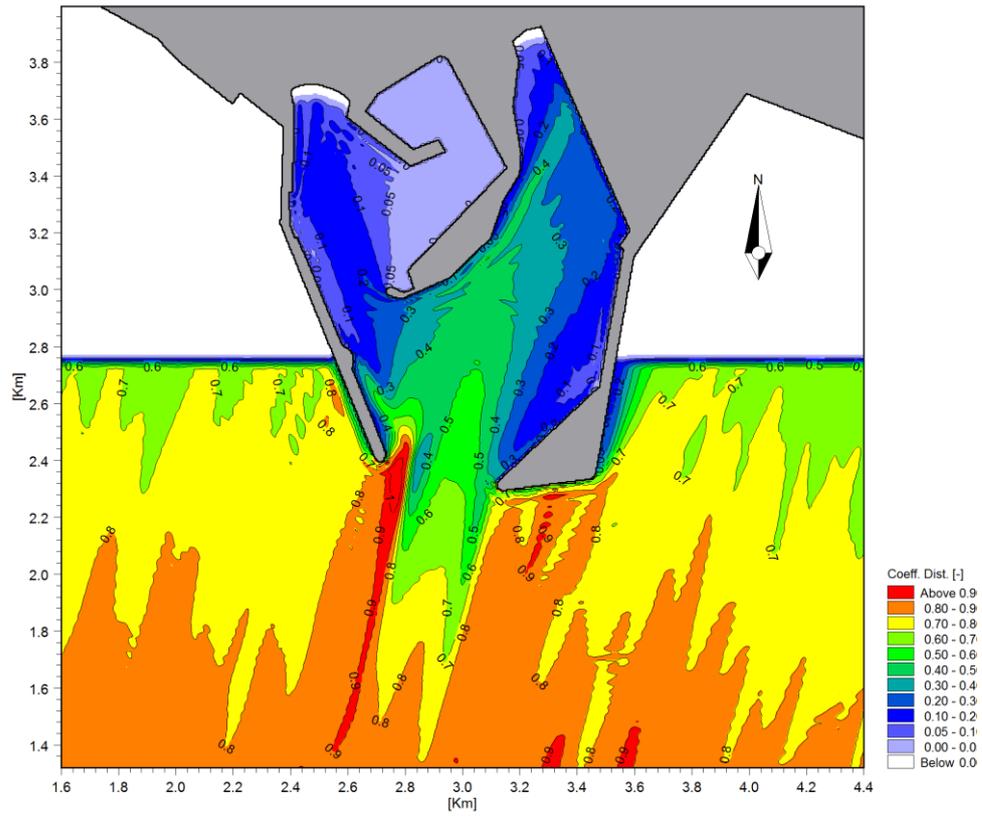
Le onde incidenti, in termini di variazione di superficie libera e flusso in ingresso, possono essere introdotte in due modi: attraverso i contorni aperti oppure mediante l'introduzione di linee di generazione interne. Le onde, monodirezionali regolari e irregolari, possono essere generate mediante uno specifico tool incluso in MIKE21 toolbox.



## OUTPUT DEL MODELLO

Diversi tipi output possono essere ottenuti dal modello. Possono essere ricavati parametri deterministici (superficie libera, livelli, flussi e parametri relativi al frangimento); parametri mediati sulla fase (altezza d'onda significativa e massima, livello di superficie libera minima massima e media, velocità mediate sulla verticale, etc.); parametri relativi all'agitazione ondosa (altezza d'onda significativa, coefficiente di disturbo, tempo di arrivo della prima onda).





## ALLEGATO D

Il codice di calcolo MIKE 21  
Descrizione tecnica del modulo HD



## MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,  
aree costiere ed offshore





## INDICE

1	PREMESSA .....	1
2	MODULO IDRODINAMICO (HD FM) .....	4

## 1 PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

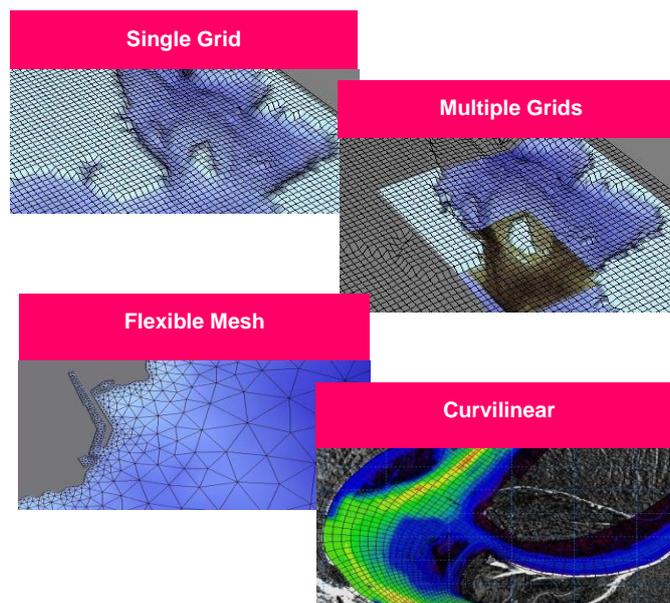
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

<b>Breve descrizione dei moduli MIKE 21</b>	
<b>Modulo</b>	<b>Descrizione</b>
<b>PP (Pre and Post Processing)</b>	Il modulo PP è l'ambiente di lavoro di base e fornisce un insieme di tool per l'importazione e processamento dei dati di input nonché l'elaborazione degli output e la preparazione di immagini ed animazioni. PP è necessario per tutti i moduli di MIKE 21.
<b>HD (Hydrodynamics)</b>	Il modulo idrodinamico simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. HD consente la simulazione di un'ampia gamma di fenomeni idraulici anche in presenza di strutture complesse.
<b>AD (Advection – Dispersion)</b>	Il modulo simula trasporto, dispersione e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. Può essere utilizzato per studi di dispersione di soluti non reagenti o caratterizzati da decadimento lineare o eccesso di temperatura o salinità.
<b>ST (Sand Transport)</b>	E' il modulo avanzato per il trasporto solido di materiale non coesivo generato da correnti o dall'azione combinata di onde e correnti. ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale.
<b>MT (Mud Transport)</b>	Modulo multifrazione e multistrato in grado di descrivere l'erosione, il trasporto e la rideposizione di materiale coesivo e di sedimenti misti coesivi e non. Particolarmente adatto per studi di dispersione di sedimento conseguenti a dragaggi dei fondali.
<b>SM (Shoreline Morphology)</b>	Questo modulo combina la modellistica di dettaglio 2D per onde e correnti in un modello morfologico, consentendo di simulare in modo stabile e robusto l'evoluzione della linea di riva in ambiente 2D.
<b>OS (Oil Spill)</b>	Simula la dispersione ed il trasporto di sostanze oleose in corpi idrici, considerandone i processi di trasformazione e decadimento.
<b>PA/PT (Particle Tracking)</b>	Simula il trasporto e decadimento di sostanze disciolte o sospese in acqua. E' utilizzato in particolare per analisi di rischio, versamenti accidentali e monitoraggio delle attività di dragaggio. Utilizza un approccio Lagrangiano.
<b>SW (Spectral Waves)</b>	Modulo di propagazione spettrale di onde <i>sea</i> ed onde <i>swell</i> in aree offshore e costiere. Permette di simulare rifrazione, diffrazione, shoaling, attrito con il fondo, frangimento, riflessione semplice utilizzando un approccio con maglia FM. E' il modulo d'onda oggi più utilizzato per applicazioni costiere e offshore.
<b>BW (Boussinesq Wave)</b>	E' il modulo d'onda più completo, in grado di simulare anche gli effetti di riflessione in ogni direzione e di diverso ordine; per questo viene utilizzato per le analisi di agitazione ondosa all'interno di bacini portuali. Include i fenomeni idrodinamici ed utilizza una maglia quadrata.
<b>MA (Mooring Analysis)</b>	Questo modulo consente di calcolare le tensioni delle linee di ormeggio insieme con i movimenti che la nave ormeggiata può avere nei suoi 6 gradi di libertà (surge, sway, heave, roll, pitch e yaw), in relazione a diverse tipologie di forzanti: onda, vento e corrente.
<b>ECOLab (Ecological Modelling)</b>	Modulo avanzato per lo studio della qualità delle acque ed idro - ecologia in presenza di reazioni, decadimenti complessi, eutrofizzazione e trasporto di metalli pesanti.
<b>ABMLab</b>	Modulo avanzato per modellizzazione "agent based".

## 2 MODULO IDRODINAMICO (HD FM)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. MIKE 21 HD FM può essere utilizzato da solo o insieme ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni (es. trasporto di sedimenti) richiedono la risoluzione contestuale degli aspetti idrodinamici.

In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- flooding and drying;
- gradienti di densità;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/evaporazione;
- moto ondoso (attraverso i radiation stress);
- apporti puntuali (pozzi e sorgenti).

Il modulo idrodinamico, utilizzato assieme al modulo di trasporto TR, è utilizzato per simulare la dispersione di sostanze disciolte o in sospensione. Analogamente, il modulo idrodinamico può essere accoppiato al modulo di qualità delle acque ed idro-ecologia (ECO Lab) per gli studi ed applicazioni nel settore ecologico.

Inoltre, il modulo HD può essere utilizzato insieme ai moduli Sand Transport e Mud Transport per simulare il trasporto rispettivamente di materiale non coesivo e coesivo.

Nelle aree costiere, laddove il trasporto è in gran parte dominato dalle correnti indotte dal moto ondoso, il modulo idrodinamico può essere forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'utilizzo del modulo SW (Spectral Wave).

### EQUAZIONI DEL MODELLO

Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica.

Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità. La densità non dipende dalla pressione ma dai soli gradienti di temperatura e salinità. Per il modello 3D, la superficie libera è modellata utilizzando l'approccio di trasformazione delle coordinate sigma o combinato sigma-z. A seguire si presentano in coordinate cartesiane, le equazioni utilizzate.

Equazione di continuità:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

Equazione della quantità di moto lungo la componente y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Il calcolo degli scambi di temperatura (T) e di salinità (s) è modellato secondo le equazioni generali del trasporto:

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

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

I termini di diffusività orizzontale sono definiti da:

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

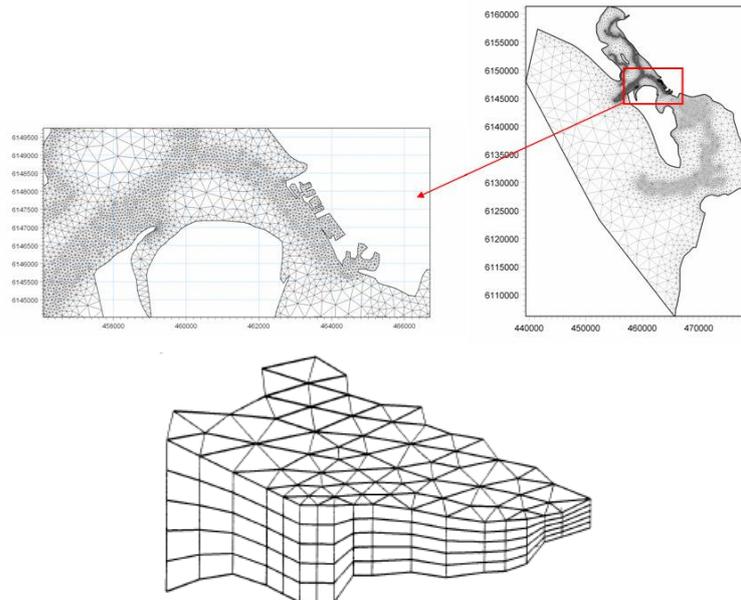
Le equazioni per l'idrodinamica bidimensionale sono ottenute integrando le equazioni lungo la verticale. Possono essere considerati anche gli scambi termici con l'atmosfera.

### Symbol list

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

## TECNICHE DI SOLUZIONE

La versione FM utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

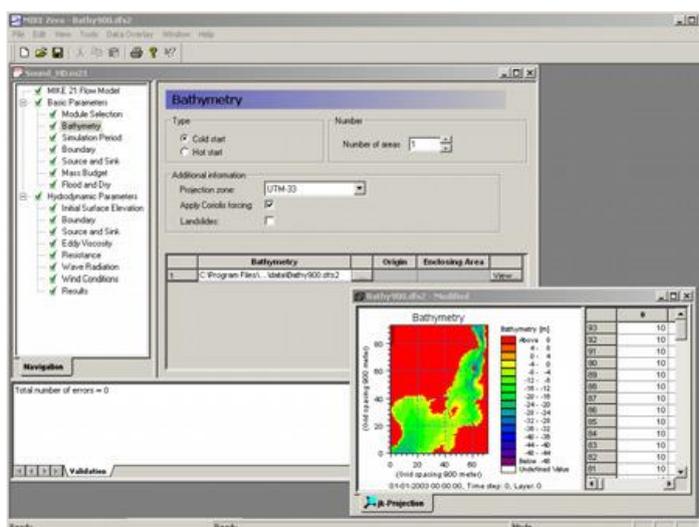


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

## INPUT AL MODELLO

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, radiation stress, apporti puntuali di portata).



## OUTPUT DEL MODELLO

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazioni da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascuna cella/elemento di calcolo (griglia classica o flessibile), è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- densità, temperatura e salinità;
- velocità di corrente e direzione;
- velocità del vento;
- pressione atmosferica.

