



# COMUNE DI SCILLA (RC)



## AMMODERNAMENTO DEL PORTO DI SCILLA E DELLE INFRASTRUTTURE DI COLLEGAMENTO

### Progetto Definitivo

#### D. STUDI SPECIALISTICI E MODELLAZIONI

**D.01**

#### STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

Data:

**12-04-2022**

Scala:

-



#### PROJECT MANAGER

ing. Giuseppe Bernardo

#### PROGETTISTI

ing. Giuseppe Bernardo  
ing. Domenico Condelli  
ing. Vincenzo Secreti  
ing. Roberta Chiara De Clario  
arch. Pasquale Billari

#### GRUPPO DI LAVORO

ing. Giuseppe Cutrupi  
arch. Francesca Gangemi

#### GEOLOGIA:

Geol. Giuseppe Cerchiaro



ing. Domenico Condelli

arch. Pasquale Billari



REVISIONI	Rev. n°	Data	Motivazione

R.U.P.	Visti/Approvazioni
--------	--------------------

Codice elaborato:

DNC144\_PD\_D.01\_2022-04-12\_R0\_Studio idraulico marittimo\_DHI.docx



## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO DEL SITO DI STUDIO</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>DATI DISPONIBILI</b>	<b>4</b>
	3.1 DATI METEOMARINI <span style="float: right;">2 di 64</span>	4
	3.2 DATI DI LIVELLO DELLA SUPERFICIE MARINA	10
	3.3 DATI TOPO-BATIMETRICI	11
<b>4</b>	<b>PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO</b>	<b>13</b>
	4.1 BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO	13
	4.2 RISULTATI DEL MODELLO D'ONDA	14
<b>5</b>	<b>ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI</b>	<b>19</b>
	5.1 ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA	19
	5.2 LIVELLO MARINO	5
<b>6</b>	<b>MODELLAZIONE DI DETTAGLIO ONDE ESTREME</b>	<b>7</b>
	6.1 DOMINIO DI CALCOLO E BATIMETRIA	7
	6.2 SELEZIONE DELLE CONDIZIONI D'ONDA	8
	6.3 RISULTATI DEL MODELLO DI DETTAGLIO	10
<b>7</b>	<b>CALCOLO DELL'AGITAZIONE ONDOSA RESIDUA</b>	<b>25</b>
	7.1 ESTENSIONE DEL MODELLO E BATIMETRIA	25
	7.2 CONDIZIONI ONDOSE SIMULATE IN RIFERIMENTO ALLE RACCOMANDAZIONI PIANC	26
	7.3 CONFIGURAZIONI SIMULATE E PARAMETRI DI RIFLESSIONE	27
	7.4 DEFINIZIONE DELLO STRATO ASSORBENTE	29
	7.5 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI: VERIFICA DELLA "CONDIZIONE DI COMFORT"	29
	7.6 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI: VERIFICA DELLA "CONDIZIONE DI SICUREZZA"	33
	7.7 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI: VERIFICA DELLA "CONDIZIONE LIMITE"	35
	7.8 INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI	37
<b>8</b>	<b>SINTESI E CONCLUSIONI</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>RIFERIMENTI</b>	<b>40</b>

## 1 PREMESSA

Il presente elaborato illustra le attività di analisi e di modellazione numerica svolte a supporto della progettazione del prolungamento del molo di sopraflutto del porto di Scilla (RC), previsto nell'ambito degli interventi per l'ammodernamento del porto.

Per la caratterizzazione del clima ondoso al largo di Scilla si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), che fornisce la ricostruzione modellistica di oltre 40 anni di dati orari al largo. Tali dati sono stati opportunamente trasferiti sottocosta attraverso la predisposizione di un modello d'onda a maggior risoluzione, che ha permesso sia di simulare la trasformazione delle caratteristiche dell'onda nella sua propagazione verso l'area di studio, sia di procedere con l'estrazione e l'analisi statistica degli eventi estremi in corrispondenza del porto. Un ulteriore modello di dettaglio bidimensionale integrato onda-corrente ha consentito la ricostruzione del moto ondoso e della circolazione locale in corrispondenza del porto, supportando il dimensionamento del molo in progetto e la sua ottimizzazione nelle singole componenti e nel suo sviluppo longitudinale, in funzione delle sollecitazioni meteomarine attese.

Infine, attraverso l'implementazione di un modello di agitazione ondosa, è stato possibile simulare la distribuzione dell'onda residua a tergo del molo di sopraflutto nella sua configurazione progettuale, ed in riferimento alle raccomandazioni AIPCN-PIANC in termini di valori di altezza d'onda significativa ammissibile all'interno dei porti per le tre condizioni: limite, sicurezza e comfort.

Per la finalità dello studio sono stati utilizzati differenti codici di calcolo appartenenti alla famiglia MIKE Powered by DHI, in particolare:

- MIKE 21 SW (Spectral Waves), modello d'onda bidimensionale;
- MIKE 21 BW (Boussinesq Wave), modulo di agitazione ondosa interna ai porti.

## 2 INQUADRAMENTO DEL SITO DI STUDIO

L'area in cui ricade il sito di intervento è situata sulla costa calabrese che si affaccia sul Mar Tirreno, all'imbocco dello Stretto di Messina e a circa 25 km di distanza dalla città di Reggio Calabria.

Il porto di Scilla è delimitato da un molo ad "L" che si estende in direzione nord ovest-sud est che lo protegge dalle ondate di Maestrale e munito di banchine nella parte interna. Le banchine sono principalmente adibite al diporto nautico e all'uso di piccoli pescherecci. Il fondale è prevalentemente roccioso.

A Ovest del porto si sviluppa la spiaggia di Marina Grande che si estende per circa 800 m delimitata dal promontorio di Punta Paci. A Est del porto la costa è rocciosa e ospita l'abitato del Borgo di Chianalea.



Figura 2-1 Area di studio: approdo di Scilla

## 3 DATI DISPONIBILI

### 3.1 Dati meteomarini

Tra le prime attività necessarie negli studi di dinamica costiera, vi è la caratterizzazione delle condizioni meteomarine di riferimento al largo del tratto di costa interessato, con particolare riferimento al vento e al moto ondoso.

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 come riferimento 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 paragone 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 3-1 e Figura 3-2 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso e un dettaglio della "mesh" di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

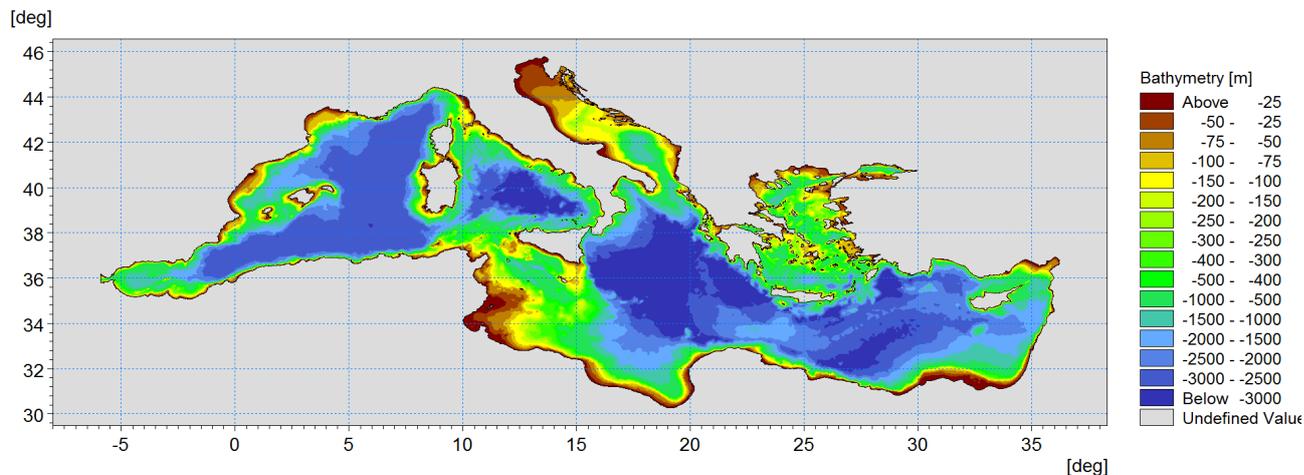


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

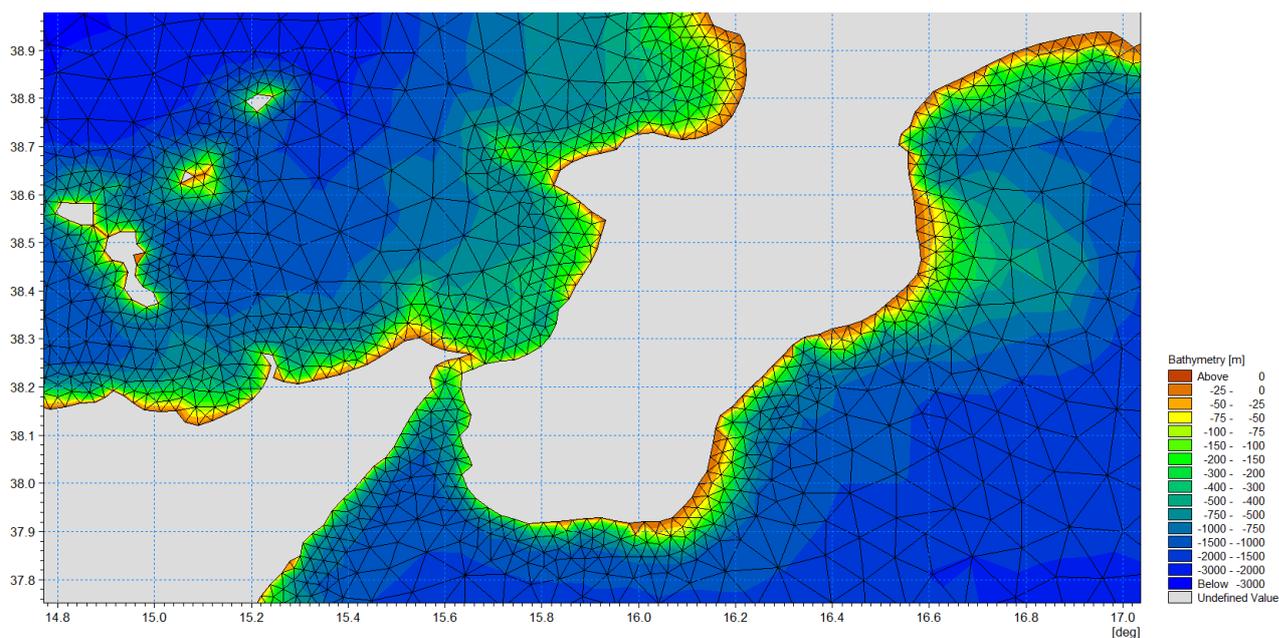


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sulla zona di studio

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

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarina nella zona di studio, è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

- il punto di estrazione deve essere ben rappresentativo dell'esposizione del sito a vento e onda;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 4 km), il punto deve essere collocato ad

una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l'interazione dell'onda con il fondale, che viene 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, a circa 3 km al largo rispetto al sito in esame, per l'estrazione delle serie temporali orarie di vento e onda per i 42 anni di riferimento (1979-2020).

A seguire si riportano l'ubicazione grafica e le coordinate del punto selezionato (Figura 3-3).



Figura 3-3 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (15.709° E, 38.281° N) i cui dati dal 1979 al 2020 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

Tabella 3.1 Coordinate del punto selezionato dal dataset di MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

PUNTO	Lon [°E]	Lat [°N]
MWM Offshore	15.709	38.281

### 3.1.1 Dati di vento

A seguire (Figura 3-4 e Figura 3-5) si riportano rispettivamente la serie temporale delle velocità del

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

vento per il punto MWM e la relativa rappresentazione in forma di rosa.

La rosa (Figura 3-5) e la distribuzione della velocità del vento in funzione delle direzioni di provenienza (Tabella 3.2) estratte dal database MWM mettono in evidenza che i venti più intensi provengono dal secondo quadrante (Scirocco/Ostro), che comprende circa il 20% degli eventi, e dai settori 270-300°N da cui proviene circa il 17% degli eventi del quarto quadrante.

La velocità del vento è inferiore a 8 m/s nel 83% dei casi, mentre la frequenza associata alle intensità del vento superiori a 20 m/s è pari a circa 0.09% in media (principalmente provenienti dal settore di Scirocco). La frequenza della condizione di calma (qui associata a valori di intensità inferiori a 2 m/s) è pari a circa il 33% del totale.

La condizione di calma, qui associata ad intensità del vento inferiore a 2 m/s, si verifica per circa il 16% del tempo, ovvero per circa 2 mesi all'anno in media.

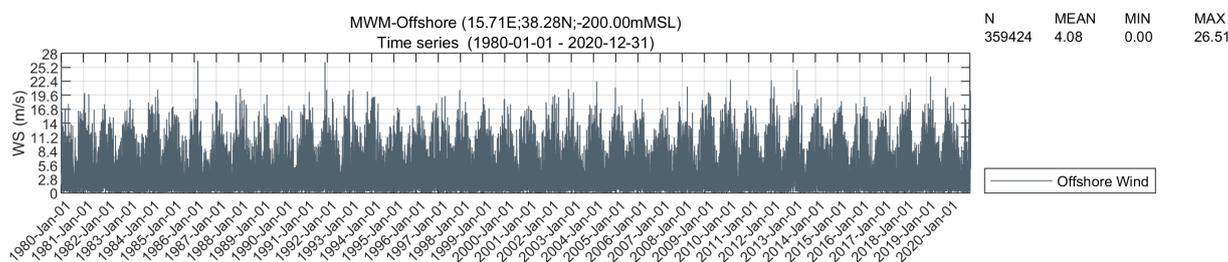
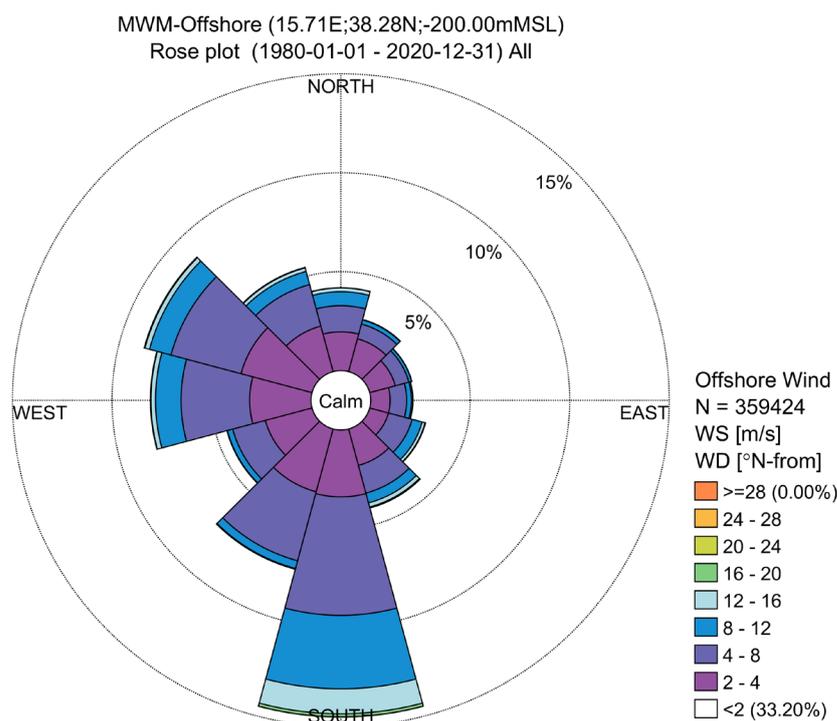


Figura 3-4 Ricostruzione storica di velocità del vento WS per il punto MWM (15.709° E, 38.281° N) nel periodo 1979-2020

**Tabella 3.2** Frequenza per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) nel punto MWM (15.709° E, 38.281° N) per l'intero periodo 1979-2020

Dir [°N]	WS [m/s]								Total
	[0-2]	[2-4]	[4-8]	[8-12]	[12-16]	[16-20]	[20-24]	[24-28]	
[-15-15]	3.535	1.962	1.318	0.709	0.191	0.011	-	-	7.726
[15-45]	3.343	1.717	0.771	0.218	0.021	0.001	-	-	6.070
[45-75]	2.685	1.332	0.705	0.145	0.012	0.002	-	-	4.880
[75-105]	2.125	0.978	0.828	0.241	0.066	0.008	0.001	-	4.245
[105-135]	1.947	0.976	1.234	0.519	0.153	0.022	0.003	-	4.853
[135-165]	2.274	1.907	1.449	0.513	0.215	0.046	0.004	0.001	6.409
[165-195]	2.579	3.382	5.988	3.713	1.261	0.156	0.006	0.001	17.086
[195-225]	2.554	3.287	3.608	0.408	0.037	0.001	-	-	9.895
[225-255]	2.530	2.426	1.698	0.281	0.021	0.001	-	-	6.957
[255-285]	2.822	3.081	3.446	1.284	0.232	0.022	0.001	-	10.888
[285-315]	3.364	3.692	3.645	1.117	0.239	0.033	0.003	-	12.092
[315-345]	3.445	2.383	2.172	0.688	0.185	0.025	0.001	-	8.898
<b>Total</b>	<b>33.202</b>	<b>27.122</b>	<b>26.862</b>	<b>9.835</b>	<b>2.631</b>	<b>0.327</b>	<b>0.018</b>	<b>0.003</b>	<b>100.000</b>



**Figura 3-5** Rosa del vento per il punto MWM (15.709° E, 38.281° N) per il periodo 1979-2020, con la discretizzazione per settori di direzione di provenienza. La calma, qui associata a intensità inferiori a 2 m/s, si verifica per il 33% del tempo

### 3.1.2 Dati di moto ondoso

Dalla serie storica di altezza d'onda significativa al largo estratta dal database MWM (Figura 3-6) emerge che nel periodo dei 42 anni considerati si raggiungono valori massimi di altezza significativa  $H_s$  fino a 6.4 m.

Il valore massimo presente nella serie risulta associato alla prima mareggiata Gennaio 1980 (con un valore di altezza d'onda significativa  $H_s$  al picco pari a circa 6.4 m), seguito da quella del 21 Dicembre 1991 ( $H_s$  al picco pari a circa 6.2 m).

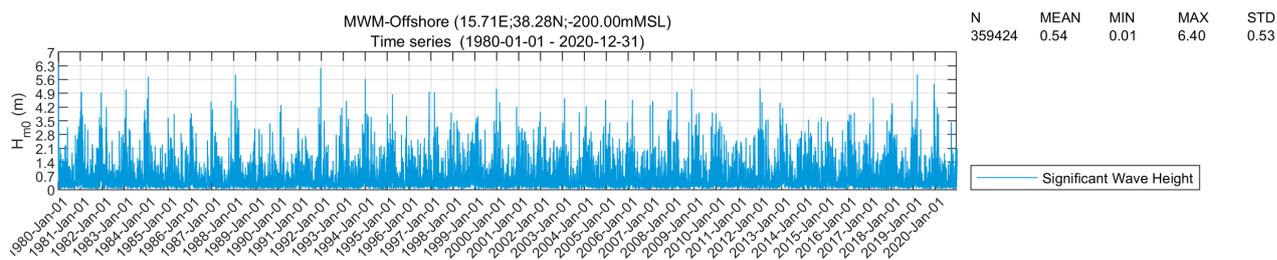


Figura 3-6 Andamento delle altezze d'onda nel punto MWM (15.709° E, 38.281° N)

Come anticipato, per i dati di onda e di vento al largo di Scilla si è fatto riferimento al database Mediterranean Wind Wave Model (MWM). A seguire si riporta il clima ondoso nella tradizionale forma di rosa (Figura 3-7) e la tabella delle frequenze di occorrenza per classi di altezza d'onda significativa e direzione di provenienza (Tabella 3.3).

Il clima ondoso al largo di Scilla è caratterizzato dalla prevalenza di onde provenienti dal quarto quadrante, con particolare riferimento alle direzioni 300° N e 330° N (settore di Maestrale). Queste direzioni comprendono circa il 73% delle onde complessive. Nel 87% dei casi l'altezza d'onda è inferiore a 1 m, mentre la frequenza associata ad altezze superiori a 4 m (che provengono esclusivamente dal settore sopra indicato) è pari a circa 51 h /anno in media. Le condizioni di calma (qui associata a valori di altezza d'onda significativa inferiori a 0.50 m) si presentano con frequenza assai elevata, prossima al 63% del totale.

Tabella 3.3 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (in ore) per il punto MWM (15.709° E, 38.281° N) per l'intero periodo 1979-2020

Dir [°N]	Hs [m]									Total
	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-1]	[1-2]	[2-3]	[3-4]	[4-5]	[5-6]	[6-7]	
[-15-15]	2.316	1.535	1.435	0.646	0.072	0.002	0.001	-	-	6.006
[15-45]	0.113	0.278	0.184	0.011	-	-	-	-	-	0.585
[45-75]	0.075	0.251	0.177	0.010	-	-	-	-	-	0.514
[75-105]	0.094	0.366	0.231	0.009	-	-	-	-	-	0.700
[105-135]	0.075	0.321	0.141	0.002	-	-	-	-	-	0.539
[135-165]	0.045	0.248	0.146	0.006	-	-	-	-	-	0.445
[165-195]	0.088	0.834	0.608	0.026	-	-	-	-	-	1.556
[195-225]	1.911	3.260	1.783	0.046	-	-	-	-	-	7.000
[225-255]	2.387	1.249	0.530	0.019	-	-	-	-	-	4.184
[255-285]	2.769	1.336	0.704	0.125	-	-	-	-	-	4.935
[285-315]	11.041	13.601	12.575	6.532	1.252	0.247	0.045	0.005	-	45.298
[315-345]	12.083	7.258	5.065	2.762	0.787	0.226	0.046	0.009	0.002	28.238
<b>Total</b>	<b>32.996</b>	<b>30.537</b>	<b>23.578</b>	<b>10.193</b>	<b>2.112</b>	<b>0.475</b>	<b>0.093</b>	<b>0.014</b>	<b>0.002</b>	<b>100.000</b>

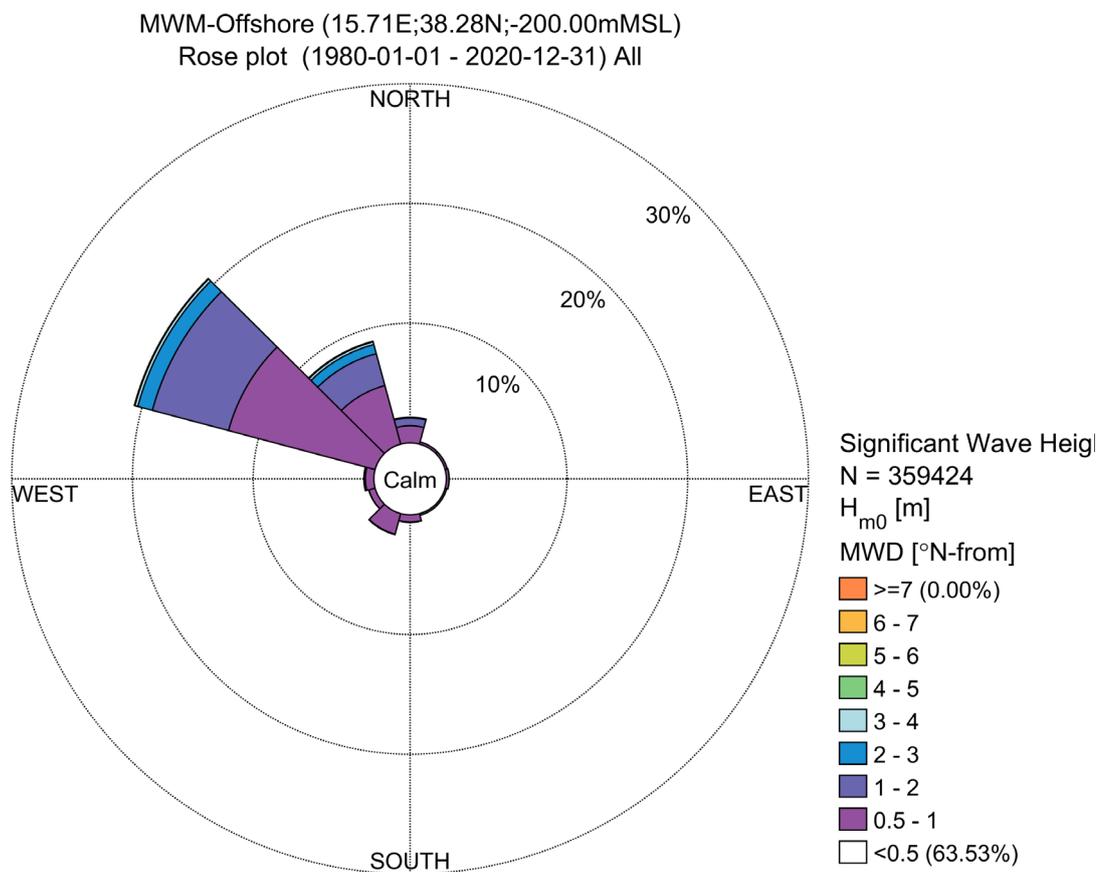


Figura 3-7 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (15.709° E, 38.281° N)

### 3.2 Dati di livello della superficie marina

Per la definizione dei livelli marini da considerare nella progettazione degli interventi si è fatto riferimento alla serie osservata del mareografo di Reggio Calabria, il più vicino al sito e con maggior disponibilità di dati affidabili nel periodo recente (la monografia della stazione mareografica è riportata in Figura 3-8). In particolare, per le elaborazioni svolte nel presente studio si è fatto riferimento alle registrazioni disponibili nel periodo 1.1.2000 – 31.12.2018. I dati utilizzati, registrati ad intervalli orari o di dieci minuti, sono stati omogeneizzati e depurati dei dati anomali o mancanti. L'analisi dei dati di livello è riportata nella sezione 5.2.

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

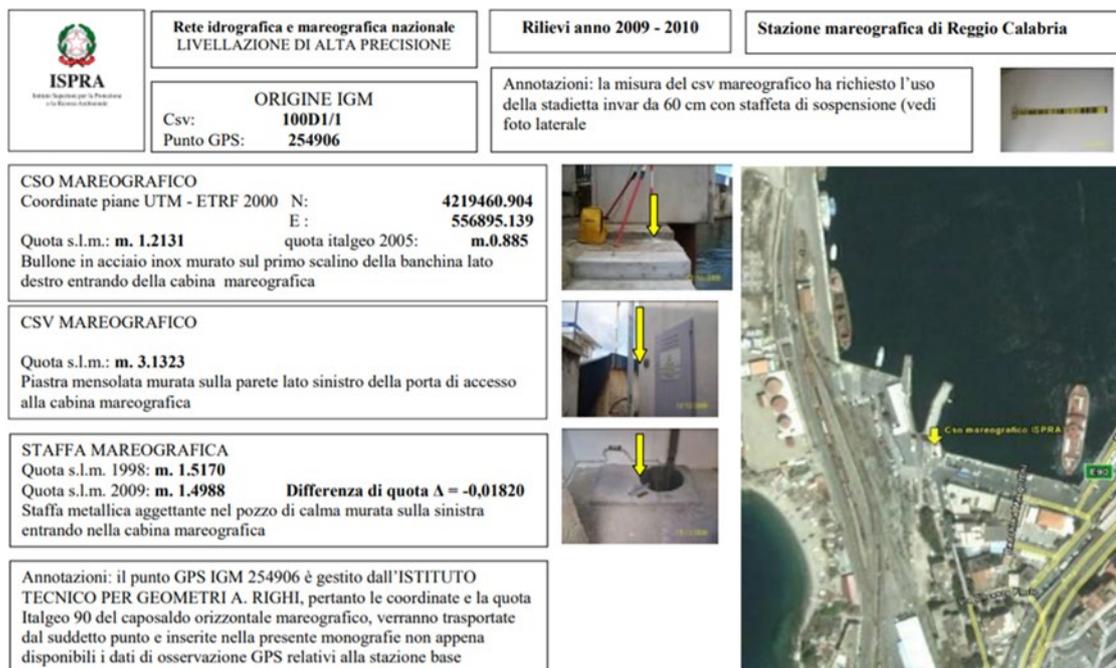


Figura 3-8 Monografia della stazione mareografica di Reggio Calabria

### 3.3 Dati topo-batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica del sito si è prevalentemente fatto riferimento al rilievo di dettaglio appositamente effettuato da Geounautics nel 2021.

Le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico implementato sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risulta disponibile tale rilievo. A integrazione dei nuovi dati locali, sono state pertanto utilizzate le 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 (Figura 3-10). 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.

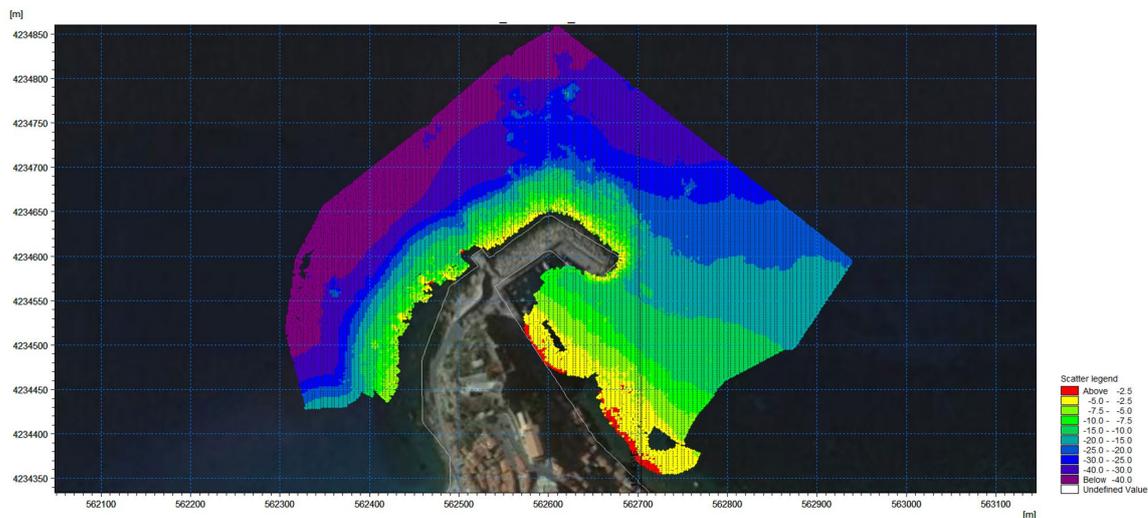


Figura 3-9 Rilievo di dettaglio dell'area oggetto dell'intervento in progetto (Geonautics, 2021)

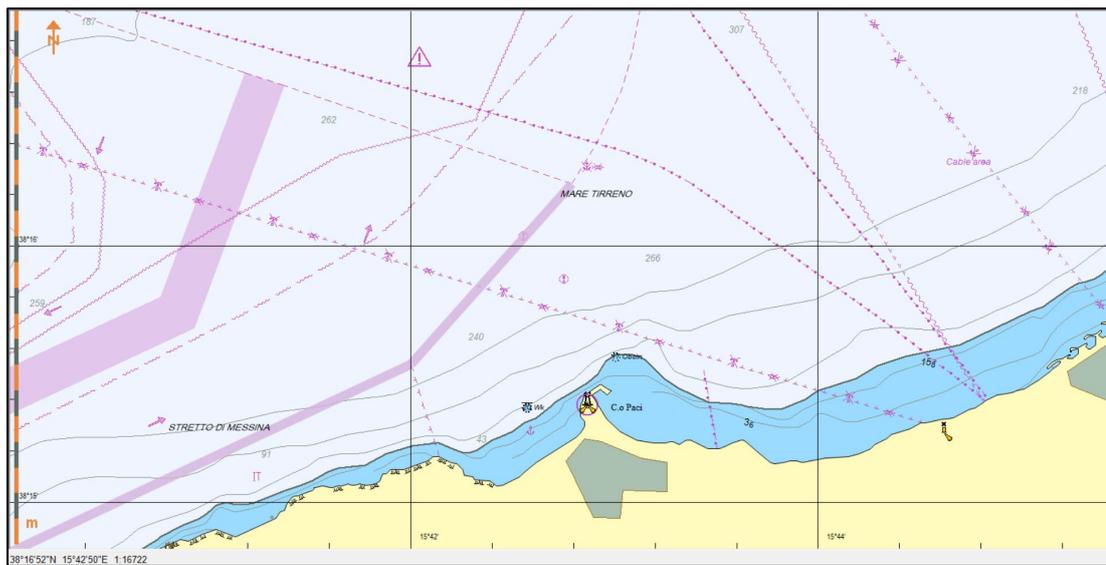


Figura 3-10 Rappresentazione della cartografia nautica digitale per il sito oggetto di studio (Jeppesen)

## 4 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO

Al fine di propagare l'intera serie quarantennale di moto ondoso dal largo, ovvero dal punto di estrazione MWM sino a Scilla, è stato utilizzato il modulo SW (Spectral Waves) di MIKE 21, 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 offshore, 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);
- 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 mesh e per ciascun istante temporale di calcolo (time step), sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, *radiation stress*.

### 4.1 Batimetria, dominio di calcolo e condizioni al contorno

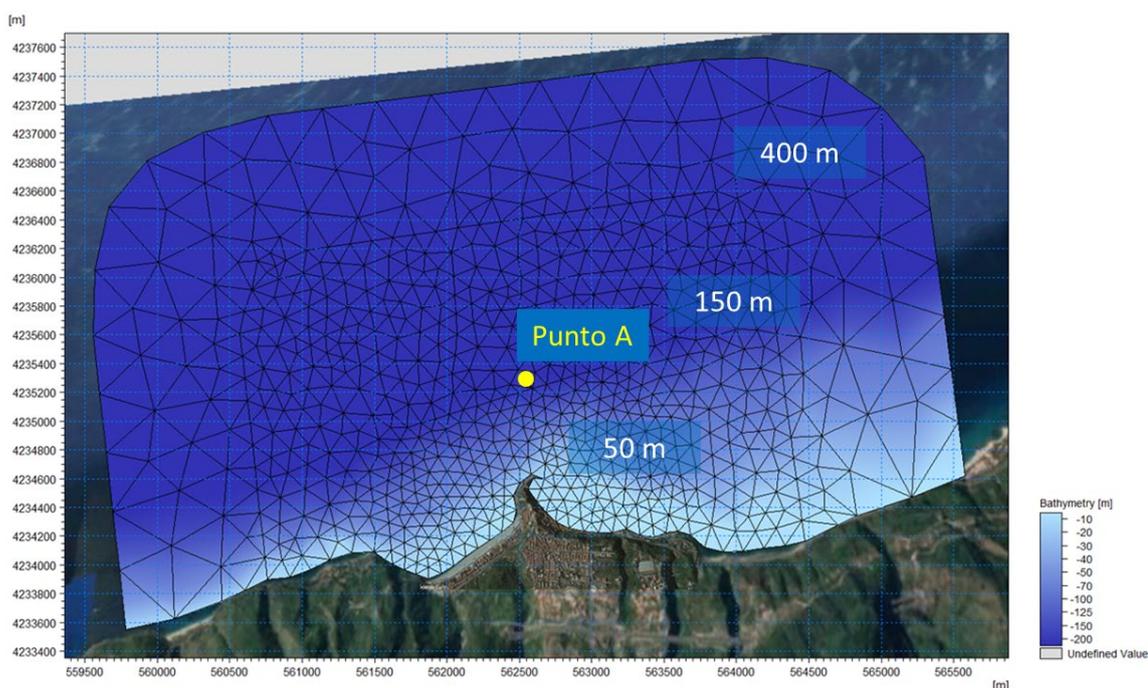
Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 3.3, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre la porzione di costa che si estende per circa 3 km a Ovest e a Est del porto di Scilla e l'area di mare antistante, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 6 km e un'estensione verso il largo di circa 3 km. La dimensione 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 di dettaglio effettuato nel 2021 da Geonautics.

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 400 m, per arrivare fino a circa 50 m nella zona più prossima al sito di studio. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 1'500 elementi (Figura 4-1). La figura mostra il risultato finale del processamento dei dati batimetrici a disposizione, e riporta l'estensione del modello, la risoluzione variabile delle maglie, la batimetria di calcolo e infine il punto di estrazione denominato Punto A.

I principali parametri d'onda estratti dal database MWM (par 3.1.2) sono stati utilizzati come condizione al contorno di largo del modello (i dati sono stati assunti uniformi lungo il contorno aperto).



**Figura 4-1** Modello MIKE 21 SW per la propagazione del moto ondoso dal largo a costa: griglia di calcolo e batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione. Il poligono in rosso identifica l'area interessata da ulteriore modellazione di dettaglio descritta nel Capitolo 6

## 4.2 Risultati del modello d'onda

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 sotto costa.

A seguire si riportano alcuni esempi (da Figura 4-2 a Figura 4-5) di mappe di distribuzione dell'altezza d'onda, caratterizzate da differenti direzioni di provenienza al largo.

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 l'onda subisce da largo verso costa.

La trasposizione dell'intera serie di dati orari estratti dal dataset MWM ha fornito indicazioni generali sulle modalità di propagazione del moto ondoso al largo di Scilla e ha permesso di ottenere le principali grandezze d'onda in tutti i punti del dominio di calcolo. In particolare, la variazione cromatica mette in evidenza l'effetto della rifrazione (il fronte d'onda tende a disporsi parallelo a costa) per le onde da nord-ovest, che determina una certa schermatura a favore del litorale sito a est del porto. Le onde provenienti da nord e nord-est subiscono minore dissipazione, ma sono anche generalmente poco energetiche oltre che poco frequenti.

In termini generali i risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali, caratterizzata da contenute dissipazioni dell'energia ondosa nel corso della propagazione delle onde verso costa.

Per supportare la progettazione del nuovo molo portuale si è proceduto con l'estrazione della serie di altezza d'onda significativa in un punto sottocosta, denominato *punto A*, a circa 700 m a nord rispetto al molo di Scilla, e con la relativa analisi statistica degli eventi estremi (Capitolo 5). Per l'identificazione dei valori delle caratteristiche d'onda in corrispondenza del molo in progetto si è successivamente proceduto con l'implementazione di un ulteriore modello d'onda (descritto al Capitolo 6), caratterizzato da un dominio di calcolo circoscritto alla zona di interesse, ma predisposto con una maggior risoluzione spaziale degli elementi della mesh.

L'ubicazione del punto A è mostrata in Figura 4-1, con la relativa rosa del clima ondoso, è riportata nella seguente Figura 4-6 nonché in Tabella 4.1 dove sono riportate le frequenze di accadimento per settori direzionali e soglie di altezza d'onda. Si osserva che il clima ondoso nel punto A, caratterizzato da una profondità di circa 200 m, non differisce molto rispetto a quello descritto per il punto MWM al largo (Figura 3-7): le onde più frequenti ed alte provengono ancora dai settori 300-330°N nel quale vanno a confluire le onde che al largo provengono da ovest per effetto della rifrazione, fino a contenere circa l'88% degli eventi a cui il paraggio del porto di Scilla è esposto.

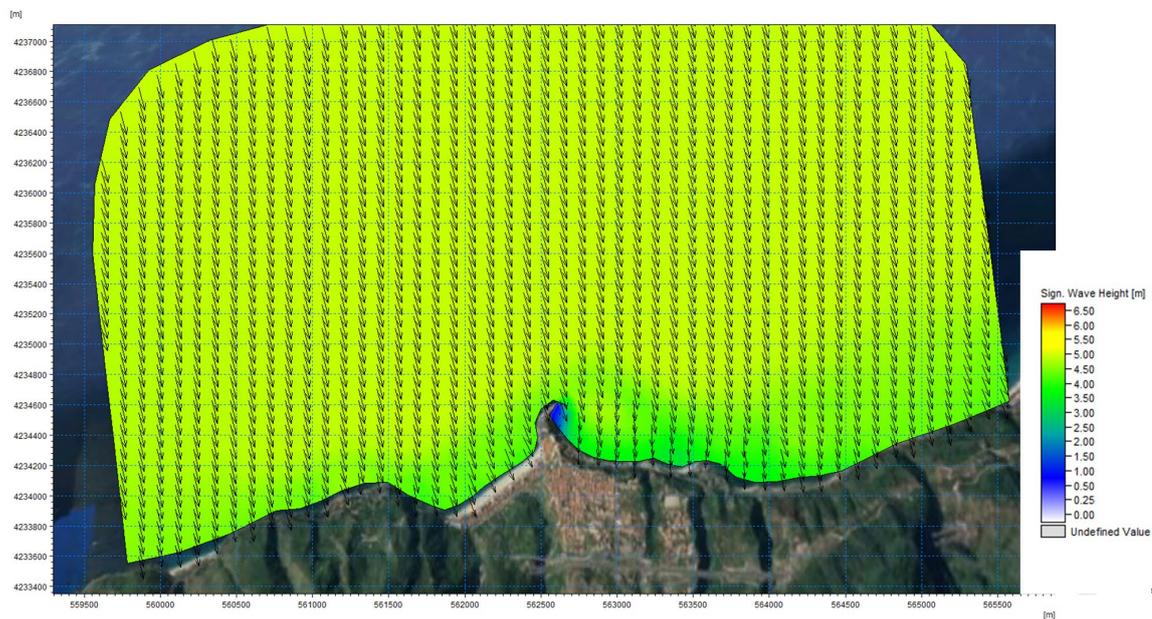


Figura 4-2 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento del 21 Gennaio 1981, caratterizzato al largo da  $H_s = 4.9$  m,  $T_p = 9.6$  s e  $MWD = 344^\circ N$

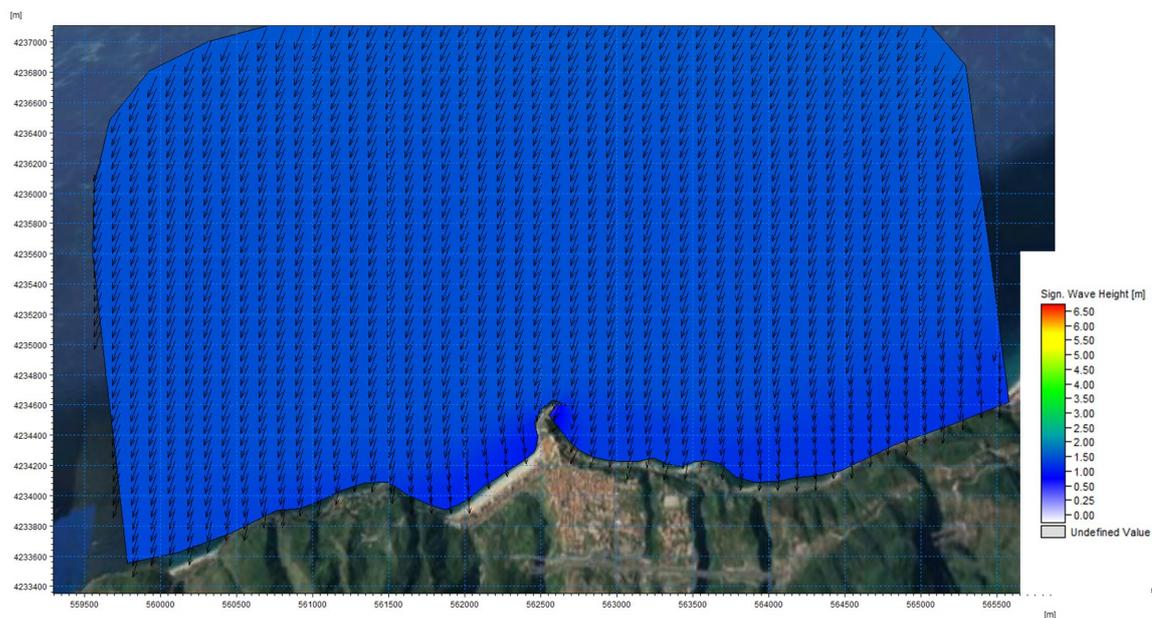


Figura 4-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento del 1 Gennaio 1985, caratterizzato al largo da  $H_s = 1.6$  m,  $T_p = 6.4$  s e  $MWD = 28^\circ N$

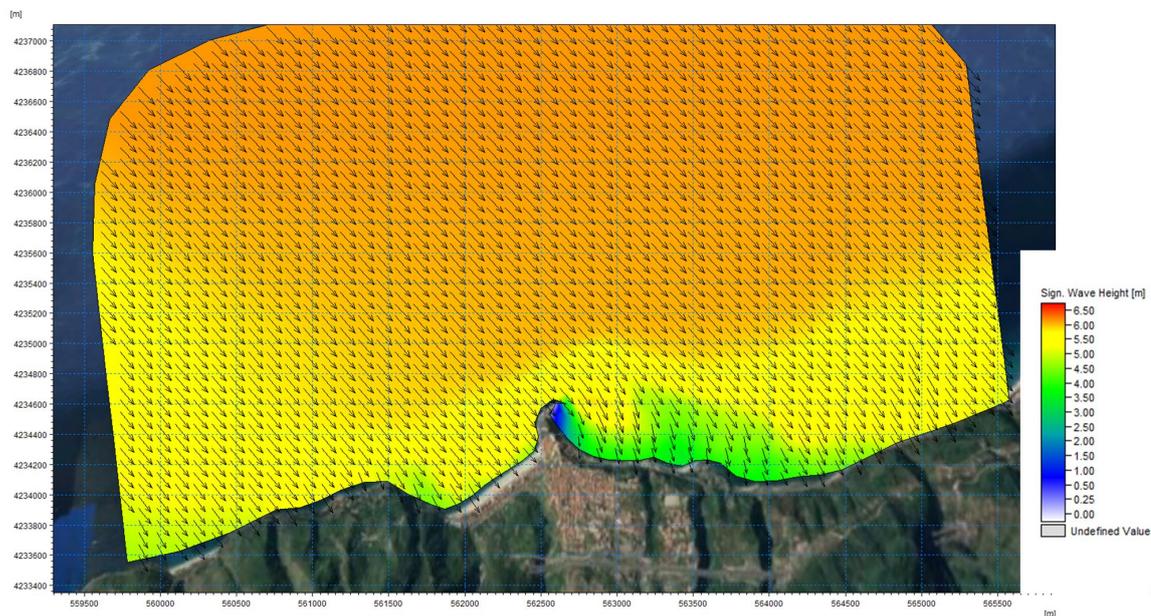


Figura 4-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento del 21 Dicembre 1991, caratterizzato al largo da  $H_s = 6.2$  m,  $T_p = 11.7$  s e  $MWD = 316^\circ N$

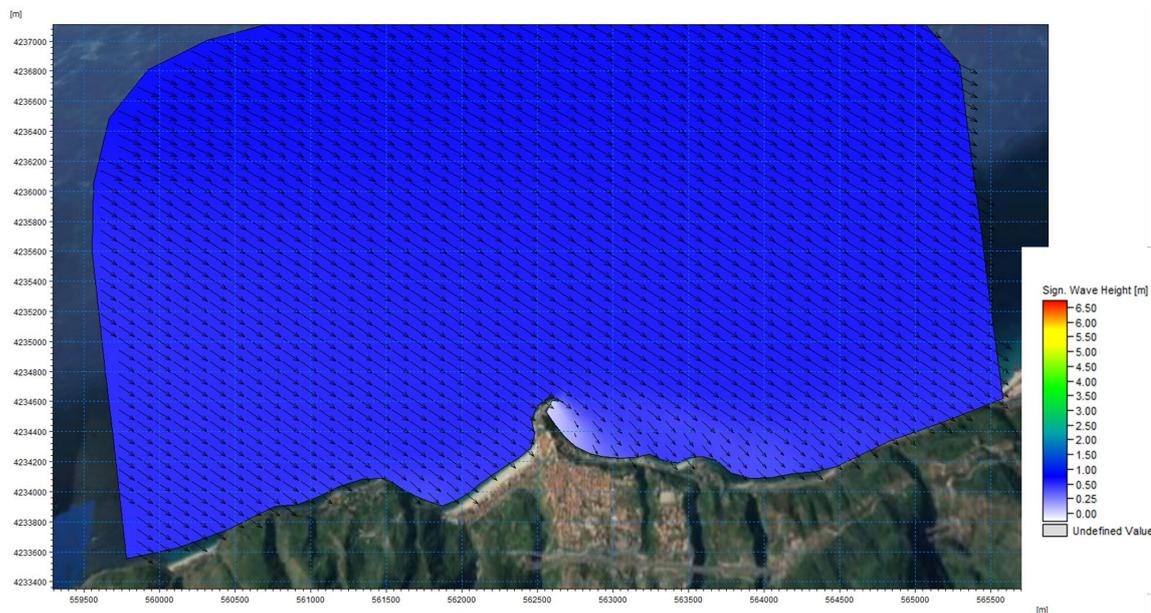


Figura 4-5 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento del 21 Gennaio 1992, caratterizzato al largo da  $H_s = 0.7$  m,  $T_p = 6.8$  s e  $MWD = 295^\circ N$

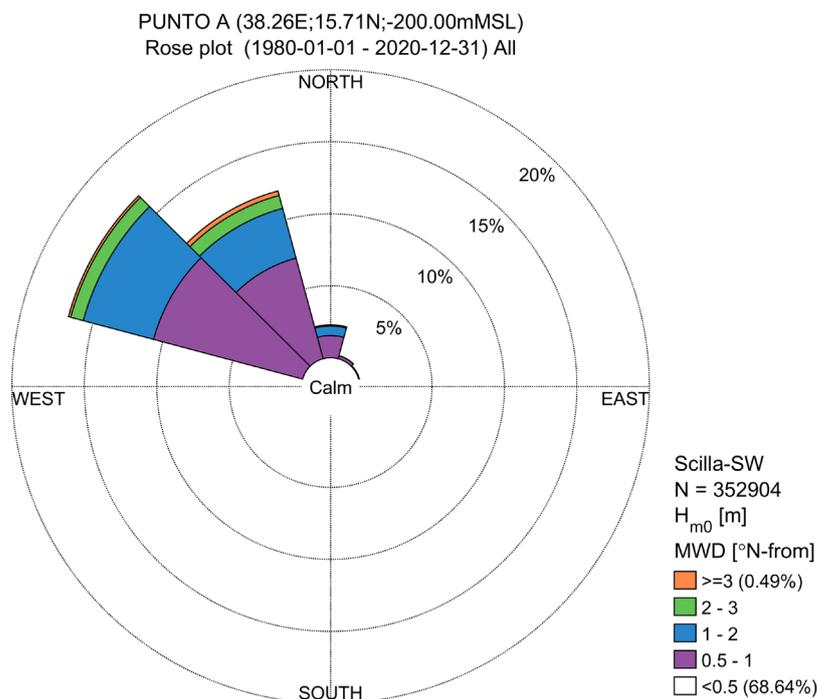


Figura 4-6 Rosa del moto ondoso per il punto A, a circa 700 m al largo del porto di Scilla

Tabella 4.1 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (in ore) per il punto A per l'intero periodo 1979-2020

Dir [°N]	Hs [m]									Total
	[0-0.25]	[0.25-0.5]	[0.5-1]	[1-2]	[2-3]	[3-4]	[4-5]	[5-6]	[6-7]	
[-15-15]	2.805	1.882	1.538	0.670	0.075	0.002	0.001	-	-	6.973
[15-45]	0.488	0.554	0.215	0.008	-	-	-	-	-	1.265
[45-75]	0.983	0.381	0.052	0.001	-	-	-	-	-	1.417
[75-105]	0.262	0.000	-	-	-	-	-	-	-	0.262
[105-135]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.000
[135-165]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.000
[165-195]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.000
[195-225]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.000
[225-255]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.000
[255-285]	2.020	-	-	-	-	-	-	-	-	2.020
[285-315]	20.119	13.053	10.652	5.024	0.901	0.140	0.022	0.001	-	49.912
[315-345]	15.483	10.608	7.234	3.573	0.928	0.256	0.058	0.010	0.002	38.152
<b>Total</b>	<b>42.159</b>	<b>26.478</b>	<b>19.691</b>	<b>9.275</b>	<b>1.904</b>	<b>0.399</b>	<b>0.080</b>	<b>0.012</b>	<b>0.002</b>	<b>100</b>

## 5 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI

### 5.1 Altezza d'onda significativa

Sulla base della serie di valori di altezza d'onda significativa  $H_s$  estratta nel punto A, si è proceduto con l'analisi statistica degli eventi estremi al largo del porto di Scilla. Per le verifiche di tracimazione (in riferimento al tempo di ritorno 50 anni) l'analisi è stata effettuata anche su base stagionale estiva (mesi da Giugno a Settembre, inclusi).

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 e 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.

Per l'analisi si è proceduto nel seguente modo:

- estrazione, dalla serie temporale di dati orari in corrispondenza del punto A, di eventi statisticamente indipendenti. Il criterio di indipendenza degli eventi è legato sia all'intervallo di tempo che li separa (tipicamente non meno di 36 ore) sia all'evidenza che l'onda, tra due eventi indipendenti, scenda al di sotto di una determinata soglia (in genere pari al 70% del minore dei due valori associati agli eventi indipendenti);
- *fit* della distribuzione di probabilità con gli eventi selezionati, sia omnidirezionale / annuale, sia direzionale / stagionale. 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, per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalità dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri, che meglio rappresentava l'andamento del campione.

A partire dall'intera serie temporale ultra-quarantennale si è proceduto ad estrarre, con approccio direzionale, per settori di 30° di ampiezza, un numero sufficientemente rappresentativo di eventi statisticamente indipendenti, caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa in riferimento allo specifico settore.

In Figura 5-1 - Figura 5-3 si riportano i risultati grafici della distribuzione statistica omnidirezionale e per ognuno dei settori direzionali di esposizione, mentre la Tabella 5.1 riassume i valori estremi omnidirezionali e direzionali di altezza d'onda significativa per assegnato periodo di ritorno.

Figura 5-4 rappresenta la distribuzione statistica omnidirezionale di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei maggiori eventi occorsi nella stagione estiva (da Giugno a Settembre) dei 42 anni disponibili (dati MWM).

I valori del periodo di picco  $T_p$  riportati in tabella sono stati stimati attraverso le relazioni  $H_s-T_p$  definite

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

sulla base del campione dati di ogni settore direzionale di 30° (Figura 5-5) facendo riferimento al percentile 95%, mentre la direzione media dell'onda MWD è stata definita pari al valore centrale del settore stesso.

**Tabella 5.1 Valori estremi direzionali e omnidirezionali per vari periodi di ritorno risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa  $H_s$  nel punto A al largo di Scilla**

	Periodo di Ritorno (anni)									
	1		5		10		50		112	
Direzione (°N)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
0	2.0	8.1	2.8	8.6	3.1	8.7	3.9	9.1	4.2	9.2
30	0.7	6.4	1.0	6.7	1.2	6.7	1.4	6.9	1.6	7.0
60	0.5	3.3	0.7	3.6	0.8	3.8	1.0	4.0	1.1	4.1
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	3.7	11.6	4.5	12.1	4.9	12.3	5.6	12.6	6.0	12.7
330	4.0	11.2	5.0	11.9	5.5	12.1	6.4	12.5	6.9	12.7
OMNI	4.1	11.5	5.1	12.0	5.5	12.1	6.4	12.5	6.9	12.7

**Tabella 5.2 Valore estremo omnidirezionale estivo per 50 anni periodo di ritorno risultante dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa  $H_s$  nel punto A al largo di Scilla**

Valori estremi estivi - omnidirezionali	
Periodo di Ritorno (anni)	
50	
$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
3.4	10.1

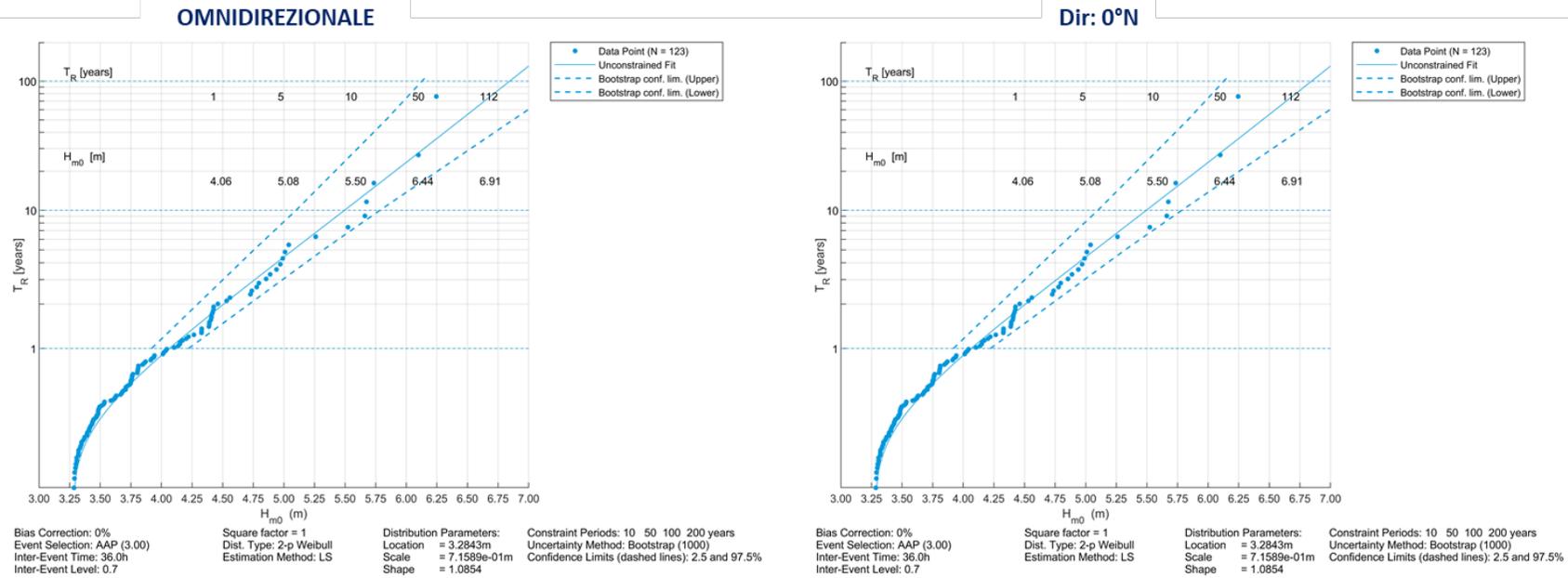


Figura 5-1 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative: omnidirezionale (a sinistra) e per il settore direzionale 0°N (a destra) nel punto A al largo di Scilla

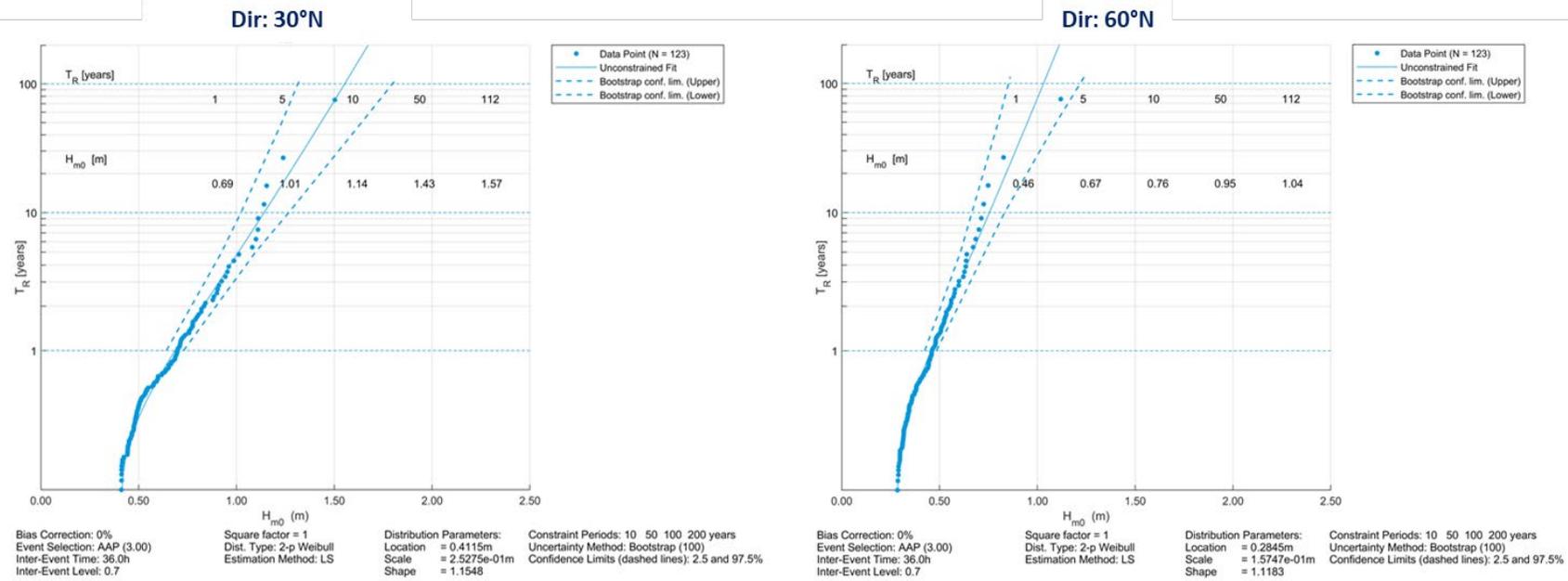


Figura 5-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative: per i settori direzionali 30°N (a destra) e 60°N (a sinistra) nel punto A al largo di Scilla

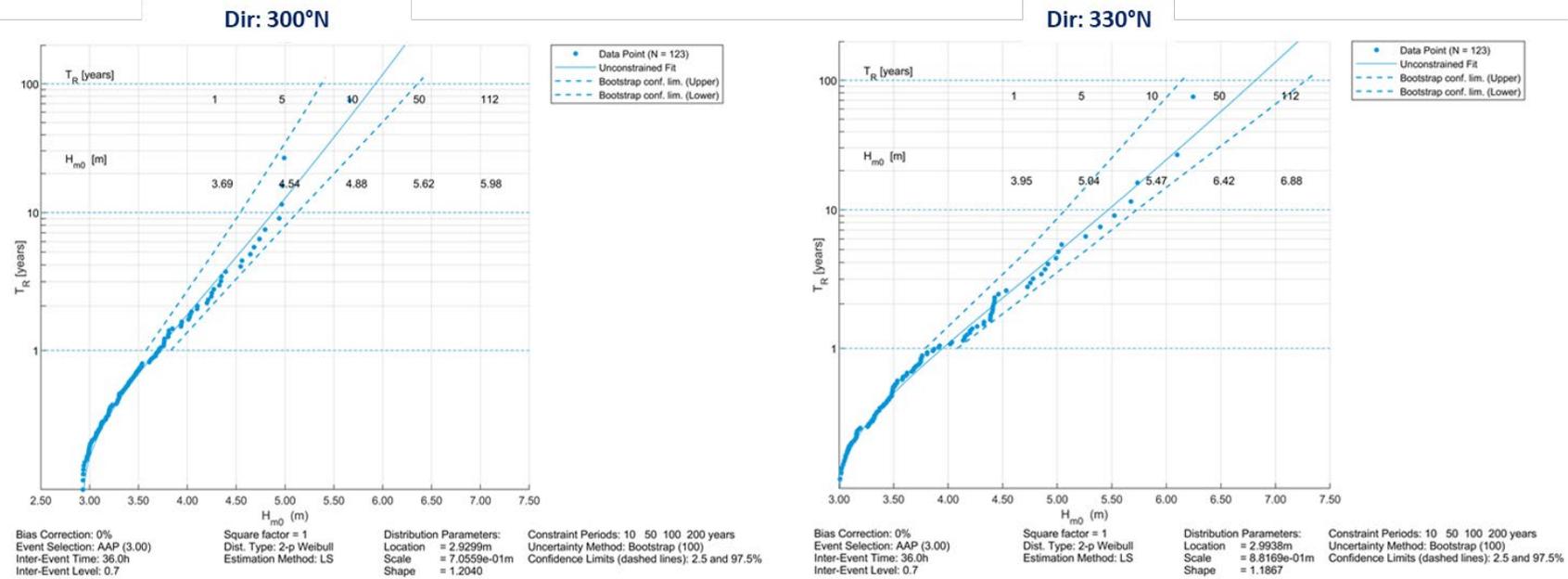


Figura 5-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative: per i settori direzionali 300°N (a destra) e 330°N (a sinistra) nel punto A al largo di Scilla

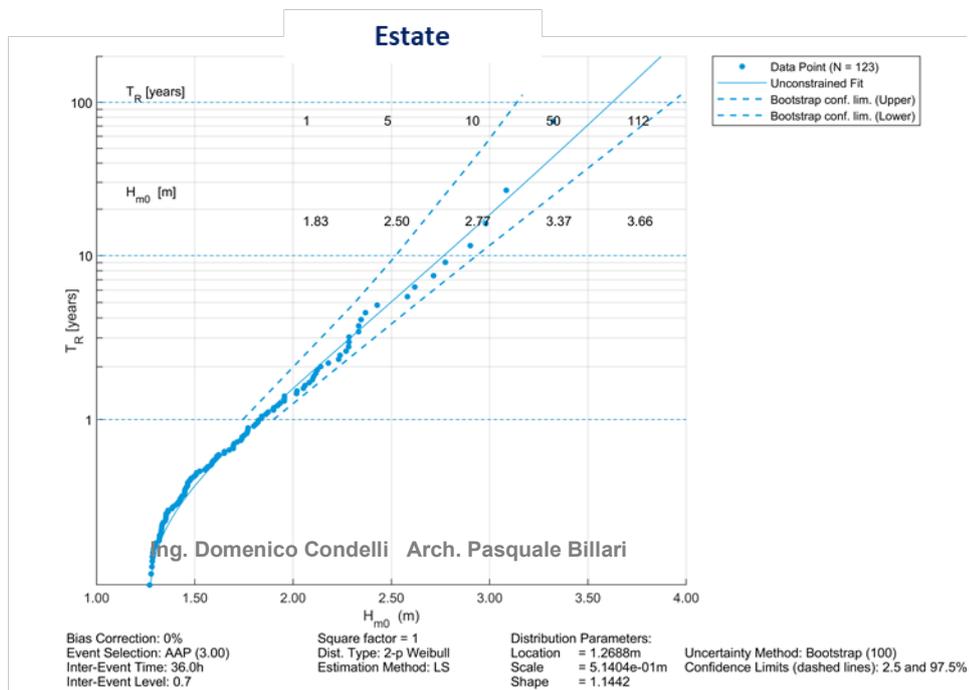


Figura 5-4 Distribuzione omnidirezionale di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative occorsi nella stagione estiva nel punto A al largo di Scilla

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

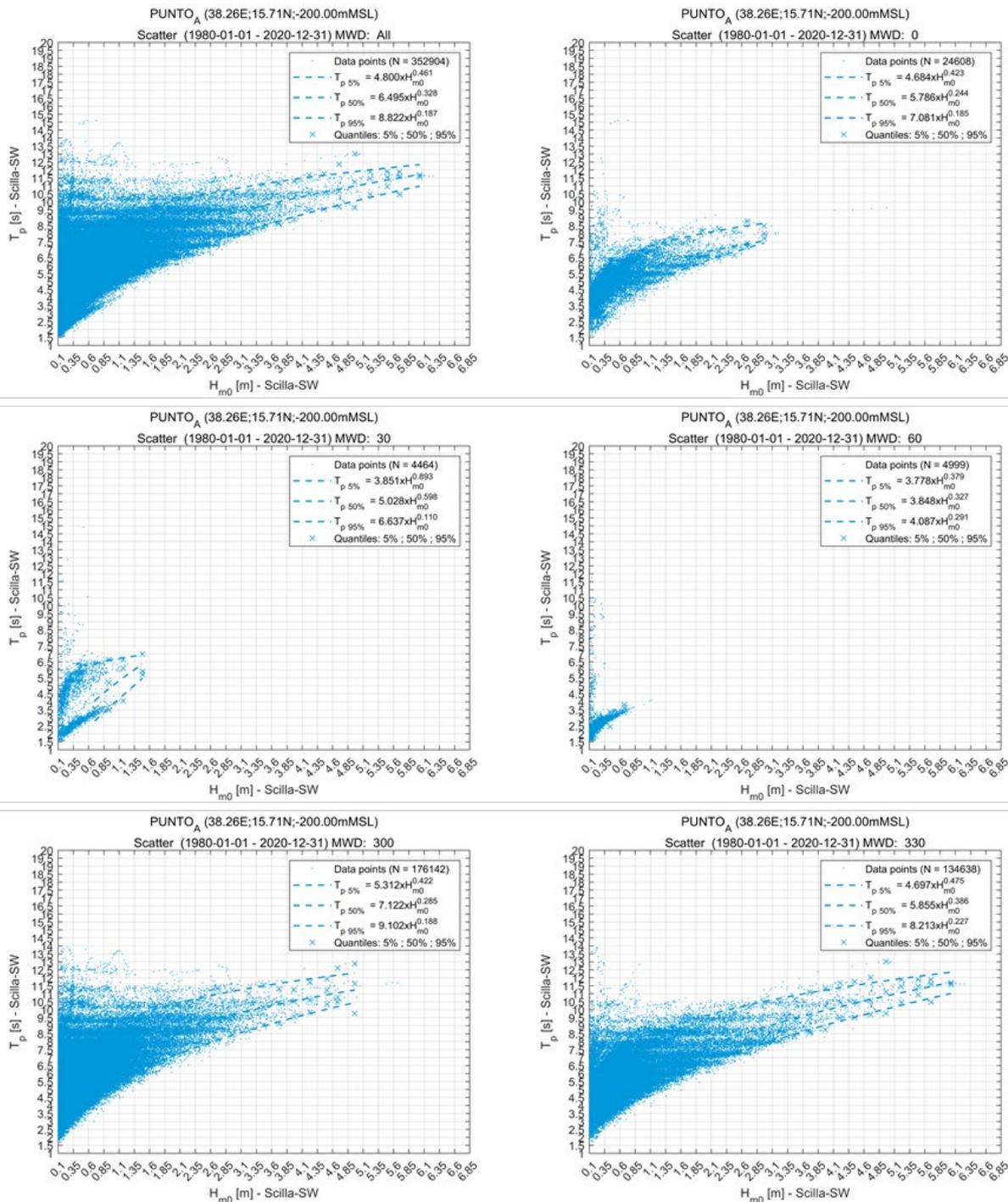
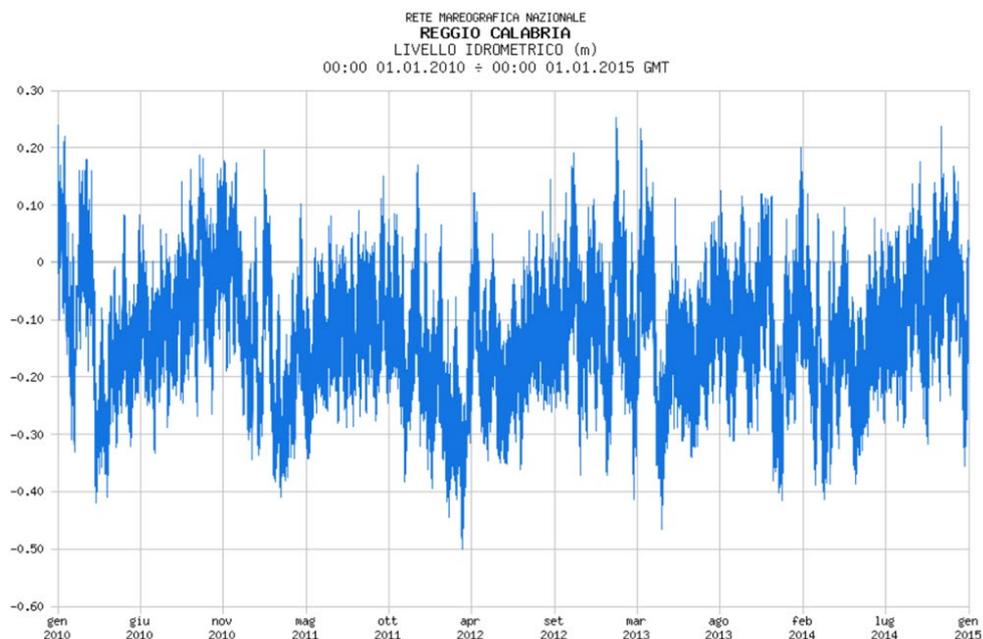


Figura 5-5 Distribuzione omnidirezionale e direzionali dei dati  $H_s$ - $T_p$  nel punto A

## 5.2 Livello marino



**Figura 5-6 Osservazioni del livello idrometrico al mareografo di Reggio Calabria (dettaglio 2013 - 2015)**

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Reggio Calabria. 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.

La statistica dei livelli per assegnato tempo di ritorno ha fornito i valori riportati in Tabella 5.3.

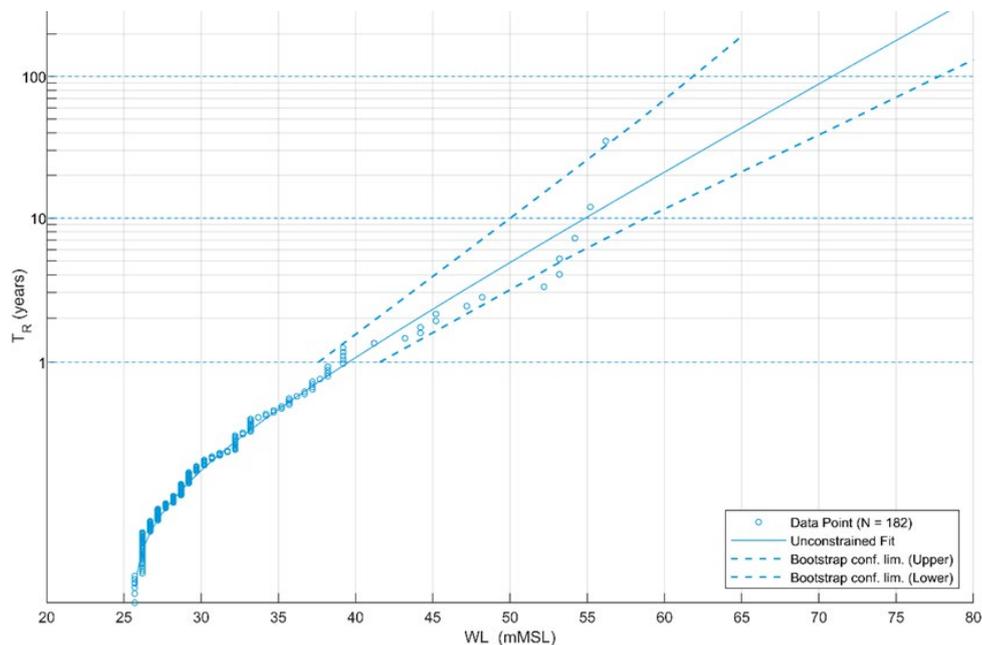


Figura 5-7 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Reggio Calabria (2000-2019)

Tabella 5.3 Valori di livello del mare per assegnato tempo di ritorno (dati mareografo di Reggio Calabria)

Tempo di ritorno [anni]	Livello [m s.l.m.]
1	0.40
5	0.50
10	0.55
25	0.61
50	0.66
100	0.71
112	0.75

## 6 MODELLAZIONE DI DETTAGLIO ONDE ESTREME

Al fine di simulare la distribuzione locale del moto ondoso in corrispondenza del porto di Scilla, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves), già descritto in precedenza per la propagazione da largo a costa, è stato implementato su un dominio di dettaglio locale, a maggiore risoluzione spaziale.

### 6.1 Dominio di calcolo e batimetria

Il modello di dettaglio è stato implementato su un dominio di calcolo ridotto rispetto a quello utilizzato per la propagazione largo-costa e risulta esteso lungo costa per circa 2 km e verso il largo per circa 1.2 km.

Il risultato finale di interpolazione dei dati batimetrici a disposizione, sul dominio di calcolo adottato, è mostrato nell'immagine a seguire, in cui sono rappresentate l'estensione del modello di dettaglio e la batimetria di calcolo. Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto per una caratterizzazione di moto ondoso e idrodinamica su profondità limitate e garantire allo stesso tempo la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area è stata suddivisa in differenti sottodomini, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente. Nello specifico, si passa da una risoluzione di circa 50 m nella zona più al largo, a una zona intermedia a 20 m, sino a 5 metri nell'area dell'intervento in progetto come evidenziato in Figura 6-1.

La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso costa consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, *shoaling*, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

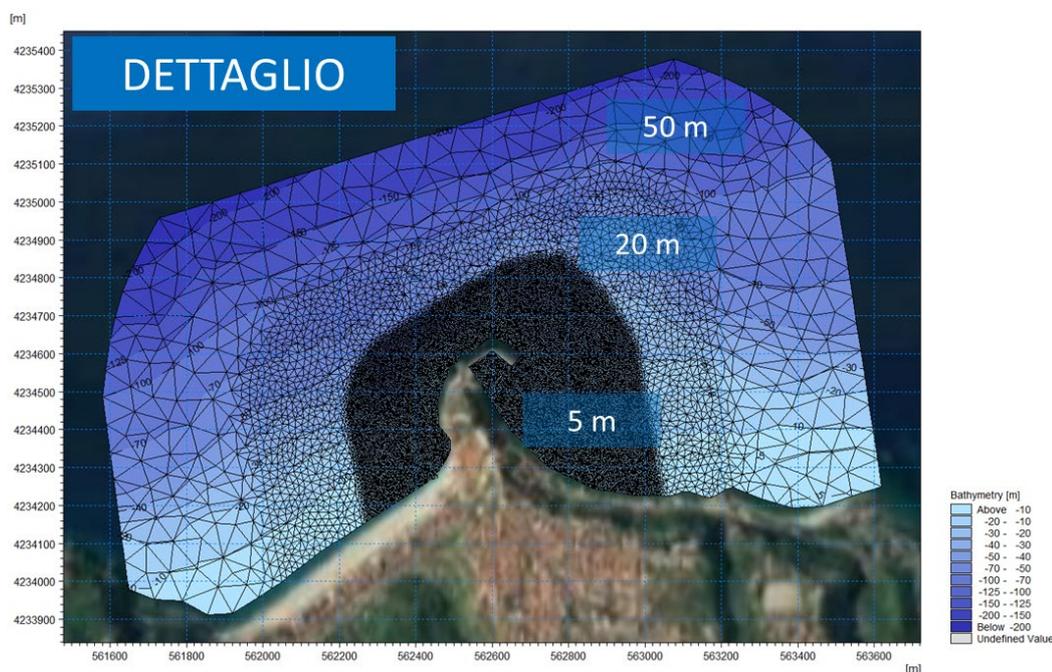


Figura 6-1 Griglia di calcolo e batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

## 6.2 Selezione delle condizioni d'onda

Come anticipato nel capitolo precedente, il modello di dettaglio è stato utilizzato per mettere a disposizione del gruppo di progettazione le indicazioni sulle caratteristiche delle onde sottocosta per il corretto dimensionamento del prolungamento del molo e per la verifica di tracimazione lungo tutto il perimetro del molo esistente.

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi statistica direzionale della serie di altezza d'onda significativa estratta nel punto A sono stati simulati, per ciascun settore direzionale, gli eventi estremi con tempo di ritorno pari a:

- 50 anni, a supporto della verifica della tracimazione;
- 112 anni, a supporto del dimensionamento delle opere a gettata.

In Tabella 6.1 si riportano le caratteristiche delle condizioni d'onda simulate.

A ulteriore supporto delle verifiche di tracimazione è stata inoltre simulata la condizione estrema estiva omnidirezionale associata ad un tempo di ritorno di 50 anni (Tabella 5.2), cui è stata assegnata come direzione di provenienza la più gravosa del settore di esposizione i.e., 330°N.

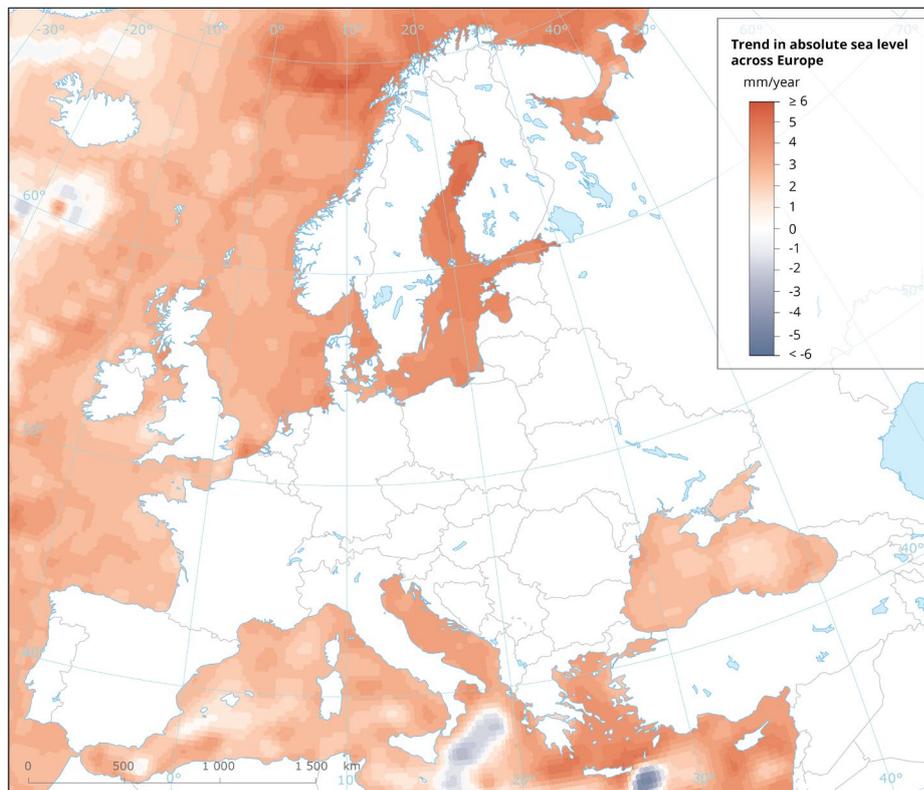
**Tabella 6.1 Elenco delle condizioni estreme associate a tempi di ritorno di 50 e 112 anni simulate con il modello 2D di dettaglio**

Direzione (°N)	Periodo di Ritorno (anni)					
	50			112		
	Hs [m]	Tp [s]	WL [m]	Hs [m]	Tp [s]	WL [m]
0	3.9	9.1	0.81	4.2	9.2	1.08
30	1.4	6.9		1.6	7.0	
60	1.0	4.0		1.1	4.1	
90	-	-		-	-	
120	-	-		-	-	
150	-	-		-	-	
180	-	-		-	-	
210	-	-		-	-	
240	-	-		-	-	
270	-	-		-	-	
300	5.6	12.6		6.0	12.7	
330	6.4	12.5		6.9	12.7	
OMNI	6.4	12.5	6.9	12.7		

Si precisa che alle condizioni d'onda sopra riportate, nelle simulazioni numeriche con il modello di dettaglio è stato cautelativamente associato un livello del mare di riferimento (WL) pari a 0.81 m per il tempo di ritorno 50 anni e 1.08 m per tempo di ritorno 112 anni, risultante dalla combinazione dei valori di livello per associato tempo di ritorno del mareografo di Reggio Calabria (Tabella 5.3), integrati con un valore pari a 0.15 m e 0.33 m di "Sea Level Rise".

Per la definizione di quest'ultimo contributo si è fatto riferimento all'analisi della European Environment Agency, che ha sintetizzato con una mappa la distribuzione spaziale del trend del Mean Sea Level per il territorio europeo. Le stime pubblicate si basano su oltre un ventennio di osservazioni

satellitari (dal Gennaio 1993 a Dicembre 2017. Nell'area di mare al largo di Scilla l'incremento di livello annuo misurato è di circa 2.9 mm/anno (Figura 6-2). Il medesimo trend è stato assunto costante per entrambi i periodi di ritorno simulati (50 e 112 anni).



**Figura 6-2** Mappa di distribuzione del trend di Mean Sea Level in Europa e Mar Nero basato sulle osservazioni satellitari disponibili tra Gennaio 1993 e Dicembre 2017 (fonte: European Environment Agency)

### 6.3 Risultati del modello di dettaglio

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento simulato, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso in tutti i punti del dominio di calcolo. I risultati del modello, riportati a seguire, fanno principalmente riferimento a mappe di altezza d'onda e direzione di provenienza.

Da Figura 6-4 a Figura 6-13 si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa per tutti gli eventi simulati, su buona parte del dominio di calcolo. Come già osservato per il modello d'onda a larga scala, in queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori mostrano le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa evidenziando l'effetto schermante che la presenza di ostacoli naturali, come promontori, o opere di difesa artificiali, come pennelli o scogliere, offrono al sito in esame per le differenti direzioni di provenienza dell'onda.

L'analisi dei risultati conferma quanto osservato nei risultati del modello di largo (Capitolo 4). Gli eventi estremi con direzione media di propagazione da 300-330°N raggiungono il molo del porto in esame con scarsa dissipazione di energia: il molo determina una buona schermatura del bacino interno, schermatura che interessa anche il tratto di costa a est delle banchine per circa 200 m per effetto della rotazione delle onde intorno alla testata del molo. Con onde provenienti da Nord (0°N), tale schermatura è decisamente limitata alle banchine interne e le onde giungono a costa quasi indisturbate, con energia ridotta per il solo effetto della rifrazione dovuta all'interazione delle onde con il fondale.

La propagazione degli eventi estremi ha avuto come principale obiettivo l'identificazione dei valori delle caratteristiche d'onda sottocosta utili al dimensionamento delle opere in progetto. Sulla base delle esigenze progettuali si è proceduto con l'estrazione dei risultati lungo tre transetti (nel seguito T1, T2 e T3), discretizzati con 33 punti come descritto in Figura 6-3.

Le caratteristiche delle onde in termini di  $H_s$ ,  $T_p$  e direzione associata estratte nei suddetti punti a partire dai risultati delle simulazioni effettuate sono riportate in Tabella 6.2 - Tabella 6.4 per il periodo di ritorno di 50 anni, e in Tabella 6.5 - Tabella 6.7 per il periodo di ritorno di 112 anni. Infine, Tabella 6.8 fornisce i parametri delle onde a costa per la simulazione della condizione estrema estiva con periodo di ritorno di 50 anni, estratta nei 33 punti dei transetti considerati.

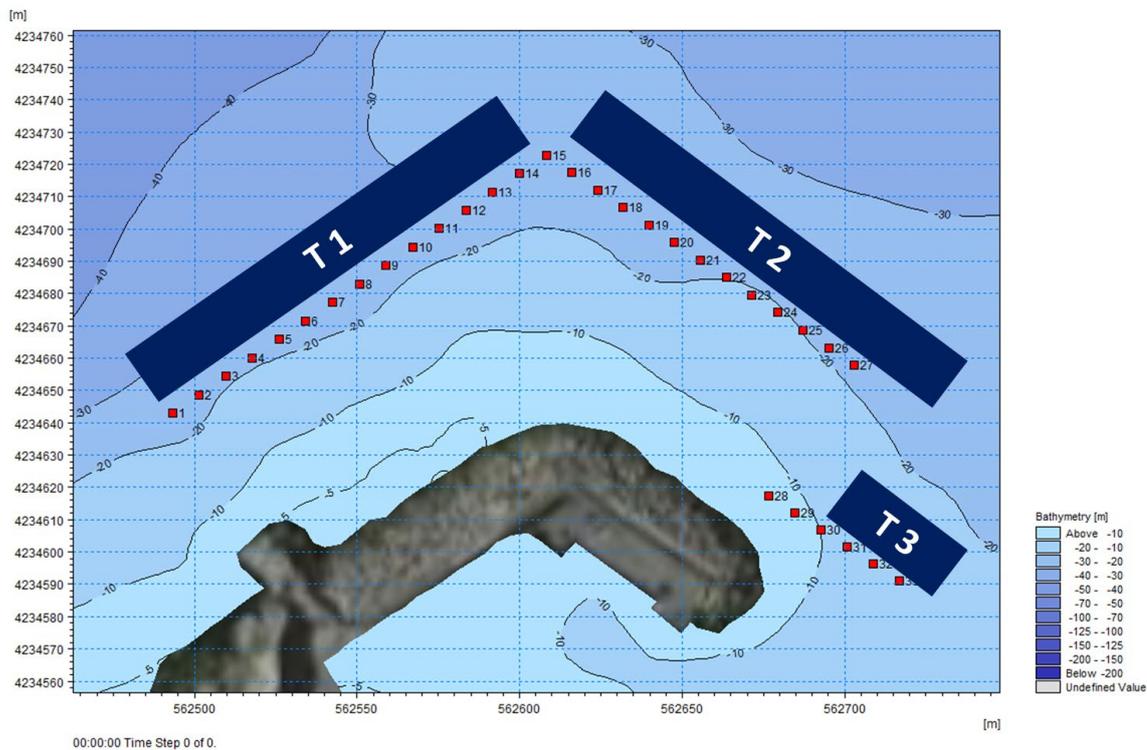


Figura 6-3 Posizione dei 33 punti di estrazione dei risultati delle simulazioni degli eventi estremi in corrispondenza del molo del porto di Scilla (transetti T1, T2 e T3)

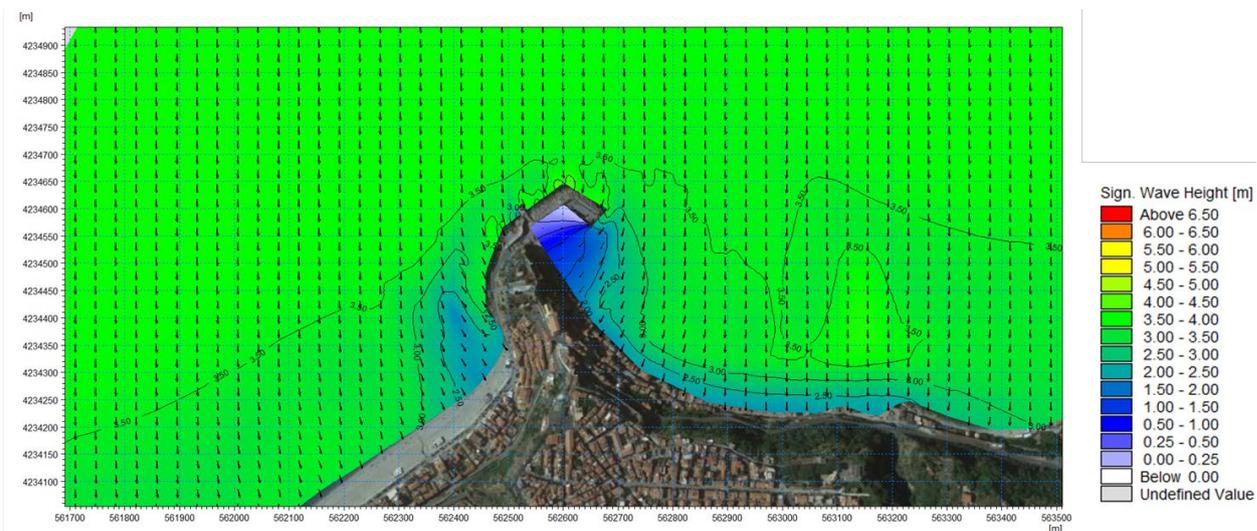


Figura 6-4 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 0°N con associato tempo di ritorno pari a 50 anni

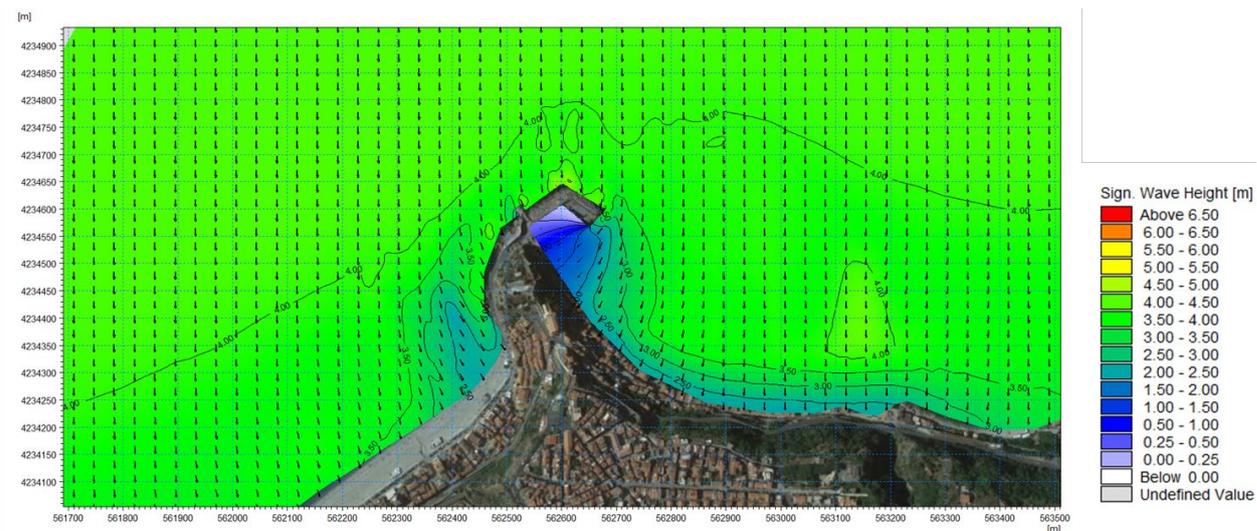


Figura 6-5 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 0°N con associato tempo di ritorno pari a 112 anni

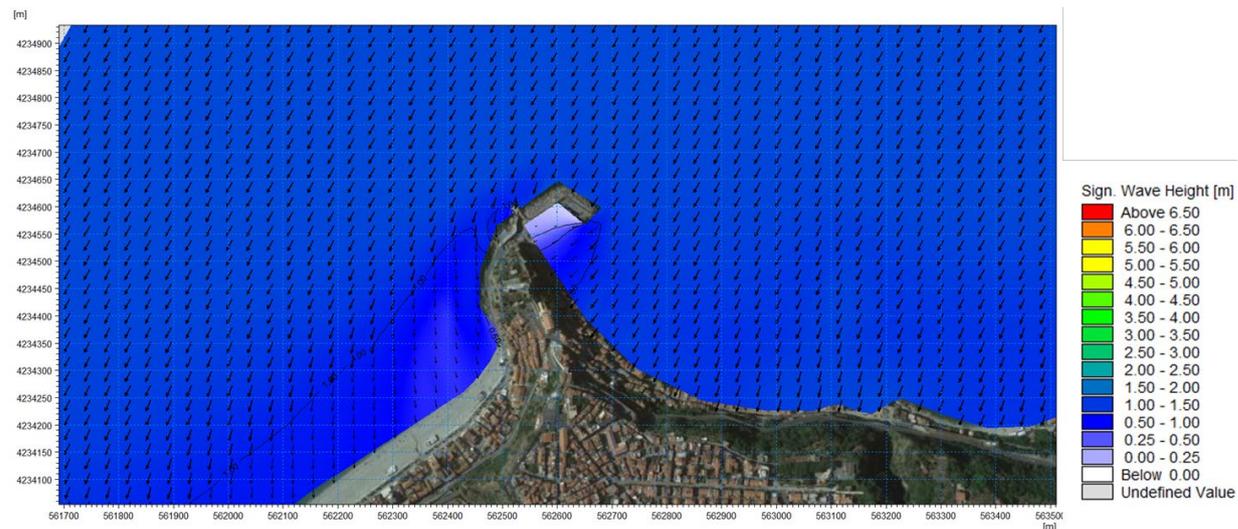


Figura 6-6 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 30°N con associato tempo di ritorno pari a 50 anni

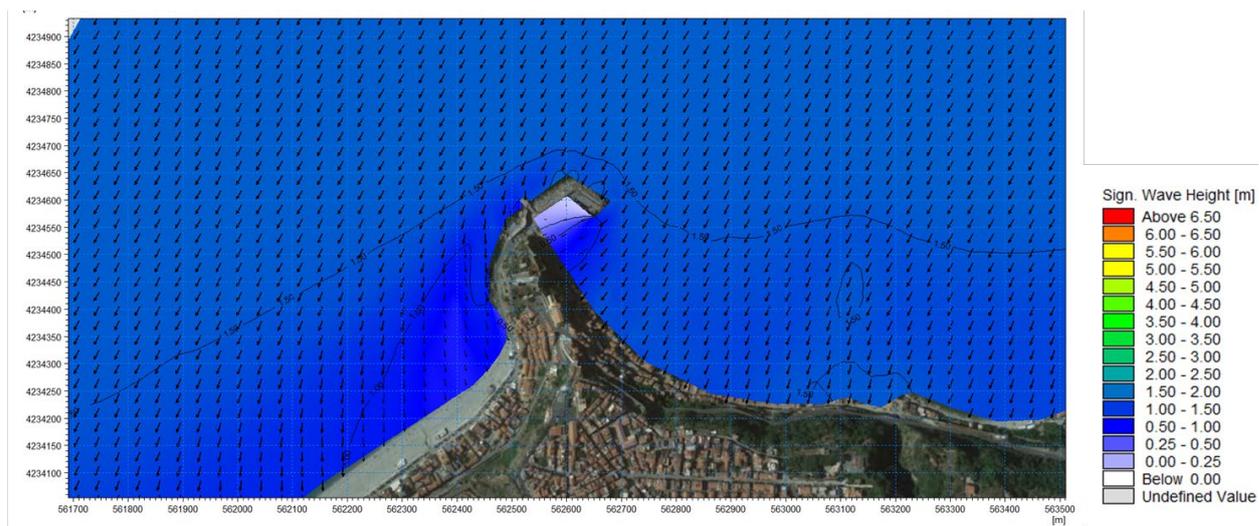


Figura 6-7 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 30°N con associato tempo di ritorno pari a 112 anni

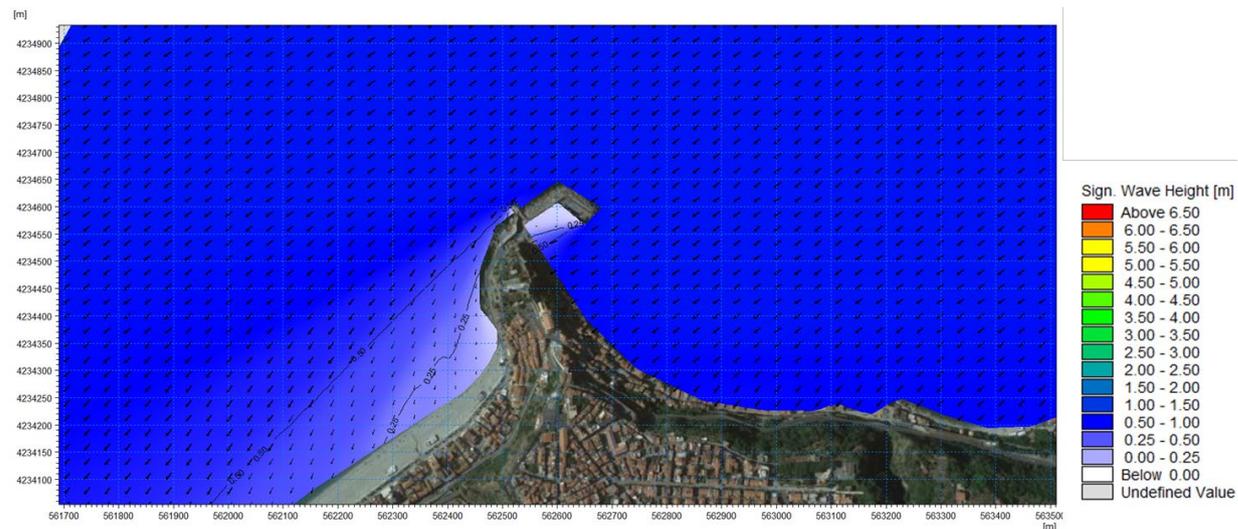


Figura 6-8 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 60°N con associato tempo di ritorno pari a 50 anni

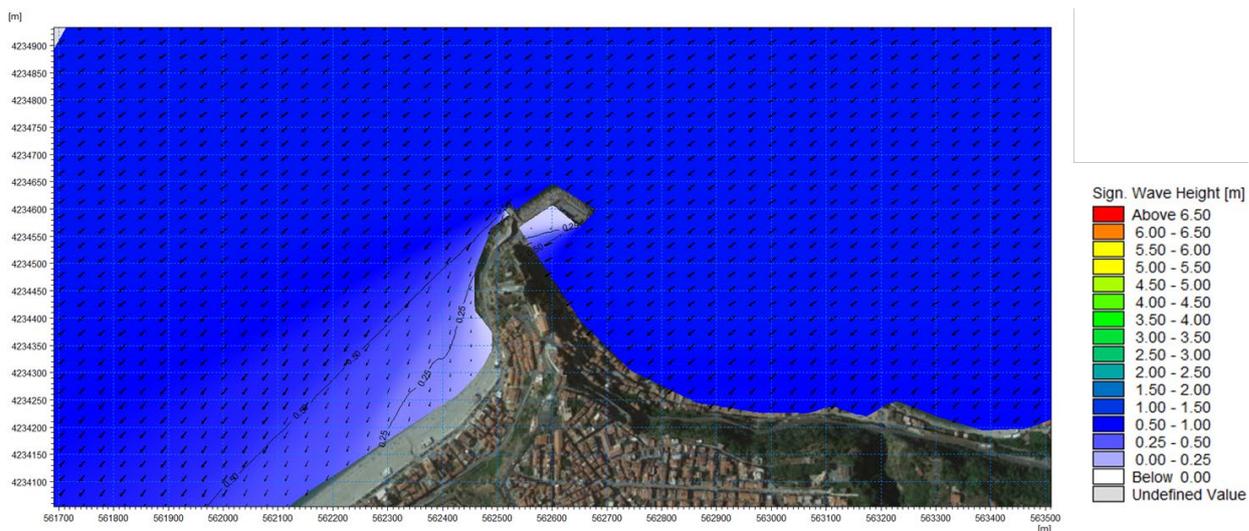


Figura 6-9 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 60°N con associato tempo di ritorno pari a 112 anni

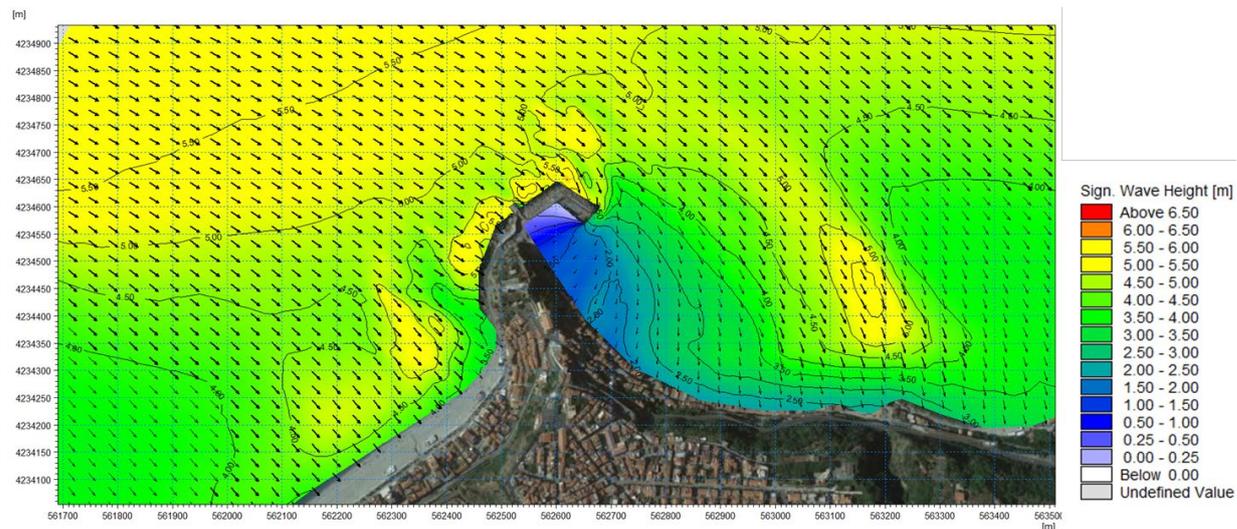


Figura 6-10 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 300°N con associato tempo di ritorno pari a 50 anni

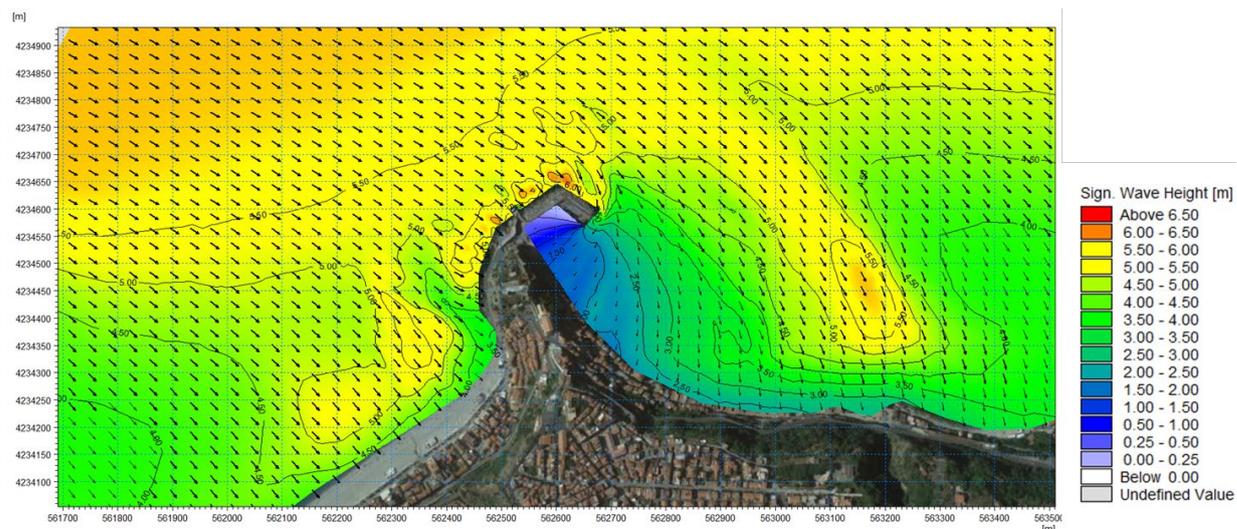


Figura 6-11 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 300°N con associato tempo di ritorno pari a 112 anni

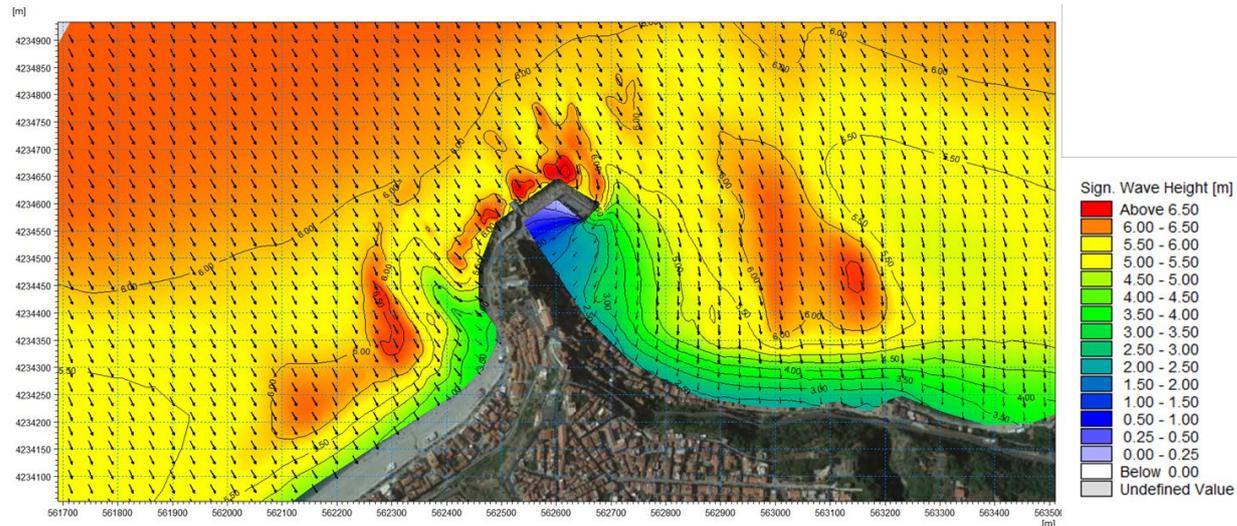


Figura 6-12 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 330°N con associato tempo di ritorno pari a 50 anni

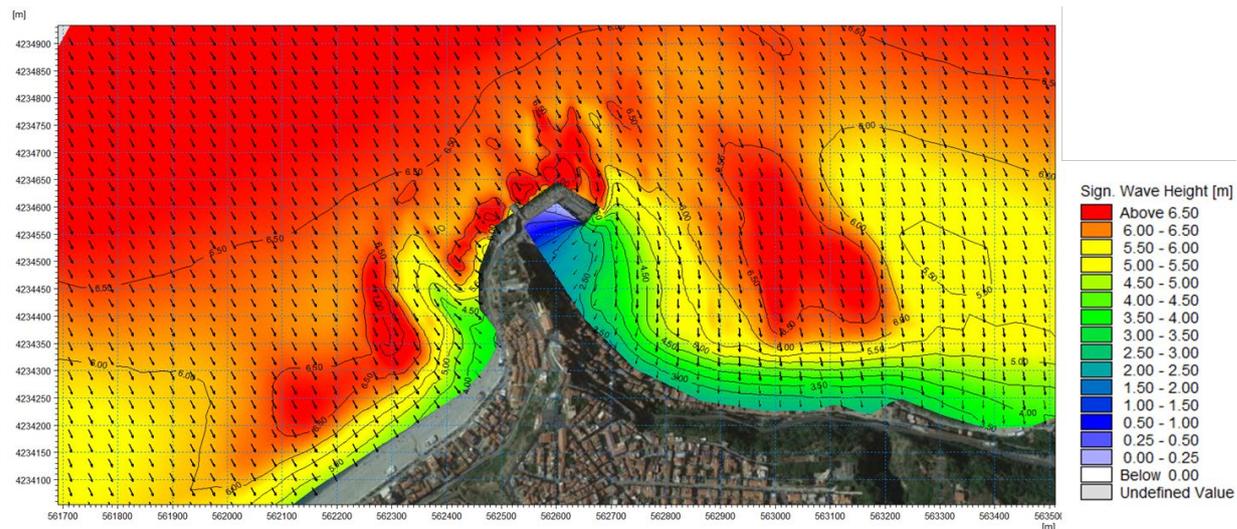


Figura 6-13 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda al largo proveniente da 330°N con associato tempo di ritorno pari a 112 anni

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

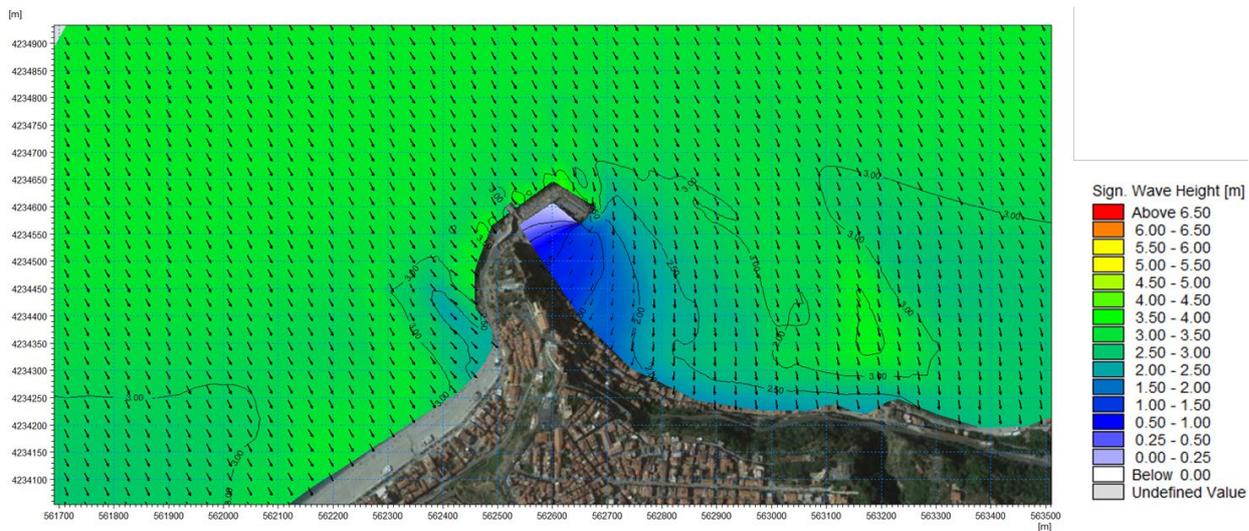


Figura 6-14 Distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio del Porto di Scilla per onda estrema estiva al largo proveniente da 330°N con associato tempo di ritorno pari a 50 anni

Tabella 6.2 Parametri delle onde estreme estratte in corrispondenza del transetto T1 (punti da 1 a 15), associate al periodo di ritorno di 50 anni

		Transetto T1 - Periodo di Ritorno: 50 anni														
Dir al largo [°N]	0			30			60			300			330			
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	
1	3.4	9.1	355	1.3	6.9	24	0.9	4.1	52	4.7	12.6	308	5.7	12.5	328	
2	3.4	9.1	355	1.3	6.9	24	0.9	4.1	53	4.8	12.6	306	5.9	12.5	327	
3	3.4	9.1	355	1.3	6.9	25	0.9	4.1	53	4.9	12.6	307	6.0	12.5	327	
4	3.4	9.1	356	1.3	6.9	26	0.9	4.1	53	4.9	12.6	308	6.0	12.5	328	
5	3.4	9.1	356	1.3	6.9	26	0.9	4.1	53	4.9	12.6	308	6.0	12.5	328	
6	3.4	9.1	357	1.3	6.9	27	0.9	4.1	53	5.0	12.6	308	6.0	12.5	328	
7	3.4	9.1	357	1.3	6.9	27	0.9	4.1	53	5.0	12.6	308	5.9	12.5	327	
8	3.5	9.1	357	1.3	6.9	27	0.9	4.1	53	5.0	12.6	306	5.8	12.5	327	
9	3.5	9.1	357	1.3	6.9	27	0.9	4.1	53	5.0	12.6	305	5.8	12.5	327	
10	3.5	9.1	357	1.3	6.9	28	0.9	4.1	53	5.0	12.6	306	5.8	12.5	329	
11	3.6	9.1	357	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	4.9	12.6	306	5.9	12.5	330	
12	3.6	9.1	358	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	4.9	12.6	306	6.0	12.5	329	
13	3.6	9.1	358	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.0	12.6	306	6.1	12.5	328	
14	3.6	9.1	358	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.1	12.6	305	6.1	12.5	328	
15	3.6	9.1	359	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.2	12.6	305	6.1	12.5	329	

Tabella 6.3 Parametri delle onde estreme estratte in corrispondenza del transetto T2 (punti da 15 a 27), associate al periodo di ritorno di 50 anni

		Transetto T2 - Periodo di Ritorno: 50 anni														
Dir al largo [°N]	0			30			60			300			330			
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	
15	3.6	9.1	359	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.2	12.6	305	6.1	12.5	329	
16	3.6	9.1	359	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.2	12.6	306	6.2	12.5	330	
17	3.6	9.1	360	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.2	12.6	309	6.3	12.5	332	
18	3.6	9.1	360	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.1	12.6	312	6.4	12.5	334	
19	3.6	9.1	360	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.1	12.6	315	6.3	12.5	335	
20	3.5	9.1	1	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.0	12.6	318	6.3	12.5	336	
21	3.5	9.1	1	1.3	6.9	29	0.9	4.1	53	5.0	12.6	320	6.2	12.5	337	
22	3.5	9.1	1	1.3	6.9	29	0.9	4.1	53	4.9	12.6	323	6.1	12.5	338	
23	3.4	9.1	2	1.3	6.9	29	0.9	4.1	53	4.8	12.6	325	6.0	12.5	340	
24	3.4	9.1	3	1.3	6.9	30	0.9	4.1	53	4.7	12.6	328	5.8	12.5	342	
25	3.4	9.1	4	1.3	6.9	30	0.9	4.1	53	4.4	12.6	330	5.6	12.5	344	
26	3.4	9.1	3	1.3	6.9	29	0.9	4.1	53	4.2	12.6	330	5.4	12.5	344	
27	3.4	9.1	3	1.3	6.9	29	0.9	4.1	53	4.0	12.6	329	5.3	12.5	344	

Tabella 6.4 Parametri delle onde estreme estratte in corrispondenza del transetto T3 (punti da 28 a 33), associate al periodo di ritorno di 50 anni

		Transetto T3 - Periodo di Ritorno: 50 anni														
Dir al largo [°N]	0			30			60			300			330			
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	
28	3.6	9.1	359	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.2	12.6	305	6.2	12.4	7	
29	3.6	9.1	359	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.2	12.6	306	6.0	12.5	7	
30	3.6	9.1	360	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.2	12.6	309	5.4	12.5	7	
31	3.6	9.1	360	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.1	12.6	312	4.7	12.5	4	
32	3.6	9.1	360	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.1	12.6	315	4.4	12.5	359	
33	3.5	9.1	1	1.4	6.9	29	0.9	4.1	53	5.0	12.6	318	4.4	12.5	356	

Tabella 6.5 Parametri delle onde estreme estratte in corrispondenza del transetto T1 (punti da 1 a 15), associate al periodo di ritorno di 112 anni

		Transetto T1 - Periodo di Ritorno: 112 anni														
Dir al largo [°N]	0			30			60			300			330			
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	
1	3.8	9.2	355	1.4	7.0	24	0.9	4.1	52	5.0	12.7	308	6.2	12.7	328	
2	3.8	9.2	354	1.5	7.0	24	0.9	4.1	53	5.1	12.7	306	6.3	12.7	327	
3	3.8	9.2	355	1.5	7.0	25	0.9	4.1	53	5.2	12.7	307	6.5	12.7	327	
4	3.8	9.2	355	1.5	7.0	25	0.9	4.1	53	5.3	12.7	308	6.5	12.7	328	
5	3.8	9.2	356	1.5	7.0	26	0.9	4.1	53	5.3	12.7	308	6.5	12.7	328	
6	3.8	9.2	356	1.5	7.0	27	0.9	4.1	53	5.3	12.7	308	6.5	12.7	328	
7	3.8	9.2	357	1.5	7.0	27	0.9	4.1	53	5.4	12.7	308	6.3	12.7	327	
8	3.8	9.2	357	1.5	7.0	27	0.9	4.1	53	5.4	12.7	306	6.2	12.7	327	
9	3.9	9.2	357	1.5	7.0	27	0.9	4.1	53	5.4	12.7	305	6.2	12.7	327	
10	3.9	9.2	357	1.5	7.0	28	0.9	4.1	53	5.4	12.7	306	6.3	12.7	329	
11	3.9	9.2	357	1.5	7.0	28	0.9	4.1	53	5.3	12.7	306	6.4	12.7	330	
12	4.0	9.2	358	1.6	7.0	29	0.9	4.1	53	5.3	12.7	307	6.5	12.7	329	
13	4.0	9.2	358	1.6	7.0	29	0.9	4.1	53	5.4	12.7	306	6.6	12.7	328	
14	4.0	9.2	358	1.6	7.0	29	0.9	4.1	53	5.5	12.7	305	6.6	12.7	328	
15	4.0	9.2	359	1.6	7.0	29	0.9	4.1	53	5.6	12.7	305	6.6	12.7	329	

Tabella 6.6 Parametri delle onde estreme estratte in corrispondenza del transetto T2 (punti da 16 a 27), associate al periodo di ritorno di 112 anni

		Transetto T2 - Periodo di Ritorno: 112 anni														
Dir al largo [°N]	0			30			60			300			330			
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	
15	4.0	9.2	359	1.6	7.0	29	0.9	4.1	53	5.6	12.7	305	6.6	12.7	329	
16	4.0	9.2	359	1.6	7.0	29	0.9	4.1	53	5.6	12.7	306	6.7	12.7	330	
17	4.0	9.2	359	1.6	7.0	29	0.9	4.1	53	5.5	12.7	309	6.8	12.7	332	
18	4.0	9.2	360	1.6	7.0	29	0.9	4.1	53	5.5	12.7	312	6.9	12.7	334	
19	3.9	9.2	360	1.5	7.0	29	0.9	4.1	53	5.5	12.7	315	6.9	12.7	335	
20	3.9	9.2	1	1.5	7.0	29	0.9	4.1	53	5.4	12.7	318	6.8	12.7	336	
21	3.9	9.2	1	1.5	7.0	29	0.9	4.1	53	5.4	12.7	320	6.7	12.7	337	
22	3.8	9.2	1	1.5	7.0	29	0.9	4.1	53	5.3	12.7	323	6.6	12.7	338	
23	3.8	9.2	2	1.5	7.0	29	0.9	4.1	53	5.2	12.7	325	6.4	12.7	340	
24	3.8	9.2	3	1.5	7.0	30	0.9	4.1	53	5.0	12.7	328	6.3	12.7	342	
25	3.7	9.2	4	1.5	7.0	30	0.9	4.1	53	4.8	12.7	330	6.1	12.7	344	
26	3.7	9.2	3	1.5	7.0	29	0.9	4.1	53	4.5	12.7	329	5.9	12.7	344	
27	3.7	9.2	3	1.5	7.0	29	0.9	4.1	53	4.3	12.7	329	5.7	12.7	344	

Tabella 6.7 Parametri delle onde estreme estratte in corrispondenza del transetto T3 (punti da 28 a 33), associate al periodo di ritorno di 112 anni

		Transetto T3 - Periodo di Ritorno: 112 anni														
Dir al largo [°N]	0			30			60			300			330			
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]	
28	4.0	9.2	16	1.5	7.0	34	0.9	4.1	53	5.1	12.6	356	6.6	12.6	7	
29	3.7	9.2	16	1.4	7.0	34	0.9	4.1	53	5.0	12.6	358	6.4	12.7	7	
30	3.5	9.2	17	1.4	7.0	35	0.9	4.1	53	4.6	12.6	359	5.9	12.7	7	
31	3.3	9.2	16	1.4	7.0	34	0.9	4.1	53	3.9	12.7	355	5.1	12.7	4	
32	3.3	9.2	12	1.5	7.0	32	0.9	4.1	53	3.6	12.7	349	4.8	12.7	359	
33	3.4	9.2	10	1.5	7.0	31	0.9	4.1	53	3.5	12.7	346	4.8	12.7	356	

Tabella 6.8 Parametri delle onde estreme estratte in corrispondenza dei transetto T1, T2 e T3 per la condizione estrema estiva al largo proveniente da 330°N con associato tempo di ritorno pari a 50 anni

	Transetto T1 Periodo di Ritorno: 50 anni		
Stagione	Estate		
Dir al largo [°N]	330		
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
1	3.1	10.1	329
2	3.1	10.1	328
3	3.1	10.1	328
4	3.1	10.1	329
5	3.1	10.1	329
6	3.1	10.1	329
7	3.1	10.1	329
8	3.1	10.1	328
9	3.1	10.1	328
10	3.1	10.1	329
11	3.1	10.1	330
12	3.2	10.1	330
13	3.2	10.1	329
14	3.2	10.1	329
15	3.2	10.1	329

	Transetto T2 Periodo di Ritorno: 50 anni		
Stagione	Estate		
Dir al largo [°N]	330		
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
15	3.2	10.1	329
16	3.2	10.1	330
17	3.3	10.1	332
18	3.3	10.1	333
19	3.2	10.1	333
20	3.2	10.1	335
21	3.2	10.1	335
22	3.1	10.1	336
23	3.1	10.1	338
24	3.0	10.1	340
25	2.9	10.1	341
26	2.8	10.1	342
27	2.8	10.1	342

	Transetto T3 Periodo di Ritorno: 50 anni		
Stagione	Estate		
Dir al largo [°N]	330		
ID Punto	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
28	3.2	10.1	2
29	3.1	10.1	2
30	2.8	10.1	3
31	2.5	10.1	359
32	2.3	10.1	355
33	2.3	10.1	353

## 7 CALCOLO DELL'AGITAZIONE ONDOSA RESIDUA

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. È 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 residua interna al porto è stato utilizzato il modulo BW (Boussinesq Waves) del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21 di DHI, tra i modelli 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 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.

### 7.1 Estensione del modello e batimetria

Il modello di agitazione ondosa è stato implementato su un dominio di calcolo sufficientemente ampio da comprendere l'intero bacino dell'approdo di Scilla ed una porzione di mare antistante, un'estensione complessivamente adeguata a simulare la propagazione delle onde in avvicinamento alle strutture portuali.

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, si è fatto riferimento ai rilievi di dettaglio descritti al paragrafo 3.3, integrati 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 2 m.

Nello specifico è stata realizzata una griglia di calcolo composta complessivamente da 1450 x 750 (1'087'500) celle. In Figura 7-1 è illustrato il dominio di calcolo insieme ai dati batimetrici utilizzati.

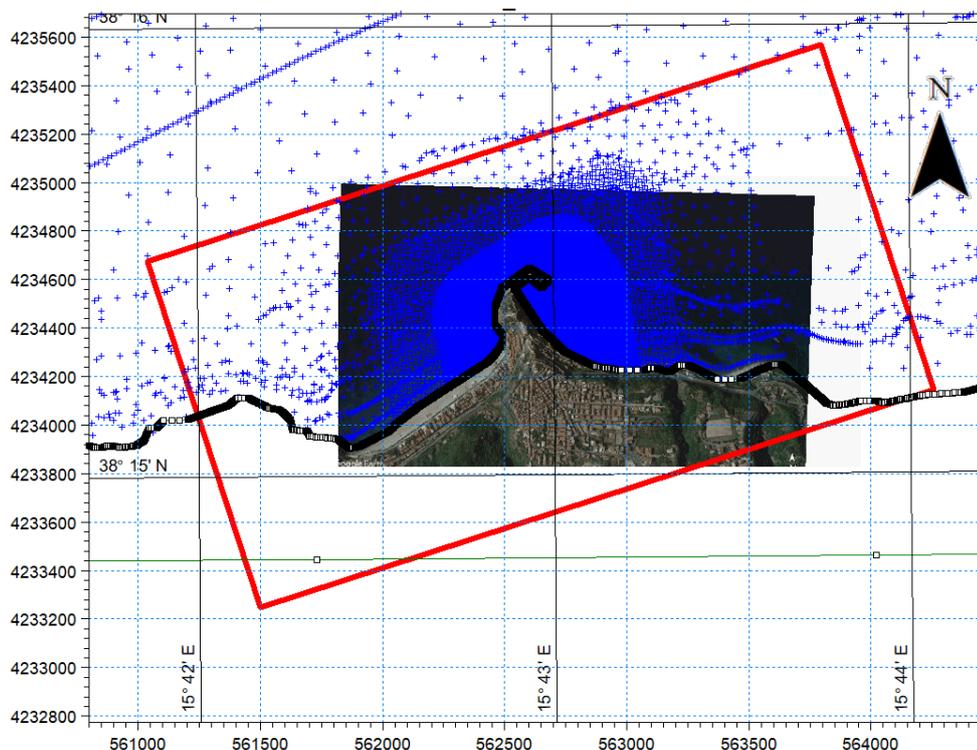


Figura 7-1 Estensione del dominio di calcolo (in colore rosso) e dati batimetrici di dettaglio utilizzati per la modellazione dell'agitazione ondosa interna al bacino portuale

## 7.2 Condizioni ondose simulate in riferimento alle raccomandazioni PIANC

Nell'ambito di questa sezione viene illustrato lo studio dell'agitazione ondosa portuale in relazione ai criteri contenuti nelle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana)". Tali raccomandazioni definiscono i valori suggeriti di altezza d'onda significativa ammissibile all'interno dei porti relativamente alle onde corte. In particolare, il PIANC raccomanda il soddisfacimento di tre condizioni:

- condizione di "comfort":  $H_s = 0.15$  m,  
per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;
- condizione di "sicurezza":  $H_s = 0.30$  m,  
per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;
- condizione "limite":  $H_s = 0.50$  m,  
per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

## STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

Le simulazioni sono state condotte in riferimento al layout di stato attuale ed a quello di progetto che prevede un allungamento del molo di soprafflutto di 48m. Le simulazioni sono state condotte in riferimento ai dati di moto ondoso al largo estratti nel punto A e descritti nelle sezioni precedenti.

Al fine di verificare il soddisfacimento dei criteri PIANC si è reso necessario predisporre una serie di simulazioni sia in riferimento al clima ondoso ordinario, finalizzate alla verifica della condizione di comfort, sia in riferimento agli eventi estremi, finalizzate alla verifica delle condizioni di sicurezza (T=5 anni) e limite (T=50 anni).

Per quanto riguarda la simulazione delle onde estreme si è fatto riferimento all'analisi direzionale nel punto A riportata al paragrafo 5.1. Nello specifico sono state selezionate le condizioni ondose associate ai 3 settori direzionali di riferimento (300°N, 330°N e 0°N) caratterizzate da periodi di ritorno di 5 e 50 anni. Come direzione media di provenienza è stata selezionata la direzione centrale di ogni settore mentre i periodi di picco associati sono stati ricavati dalle relazioni  $H_s-T_p$  specifiche per ciascun settore riportate al paragrafo 5.1.

Le simulazioni delle onde utili alla verifica delle condizioni di comfort, sono state ricavate invece dall'analisi del clima ordinario, sempre in riferimento al punto A, e riportata al paragrafo 3.1.2. Nello specifico sono state individuate 6 direzioni di riferimento (300°N, 315°N, 330°N, 345°N, 0°N e 15°N). Per ciascuna direzione sono state individuate, dalla tabella delle occorrenze  $H_s$ -MWD, altezze d'onda caratterizzate da una frequenza di accadimento indicativamente pari a qualche giorno all'anno mentre i periodi di picco sono stati ricavati, anche in questo caso, dalle relazioni  $H_s-T_p$  specifiche per ciascun settore.

**Tabella 7.1 Condizioni d'onda ordinarie ed estreme utilizzate per la verifica della condizione limite, di sicurezza e comfort**

		MWD [°N]	Hs [m]	Tp [s]
Ordinarie	1	300	1.5	8.0
	2	315	2.0	7.7
	3	330	2.0	7.7
	4	345	1.5	6.8
	5	0	1.0	5.8
	6	15	1.0	5.8
T5	7	300	4.5	10.9
	8	330	5.0	10.9
	9	0	2.8	8.7
T50	10	300	5.6	11.6
	11	330	6.4	12.0
	12	0	3.8	9.8

### 7.3 Configurazioni simulate e parametri di riflessione

Come anticipato nei paragrafi precedenti, le simulazioni sono state condotte in riferimento a 2

configurazioni: quella di stato attuale e quella che prevede l'allungamento del molo di sopraflutto di circa 48m mediante la realizzazione di una banchina a parete verticale. Il dettaglio dei due layouts simulati è riportato in Figura 1 2.

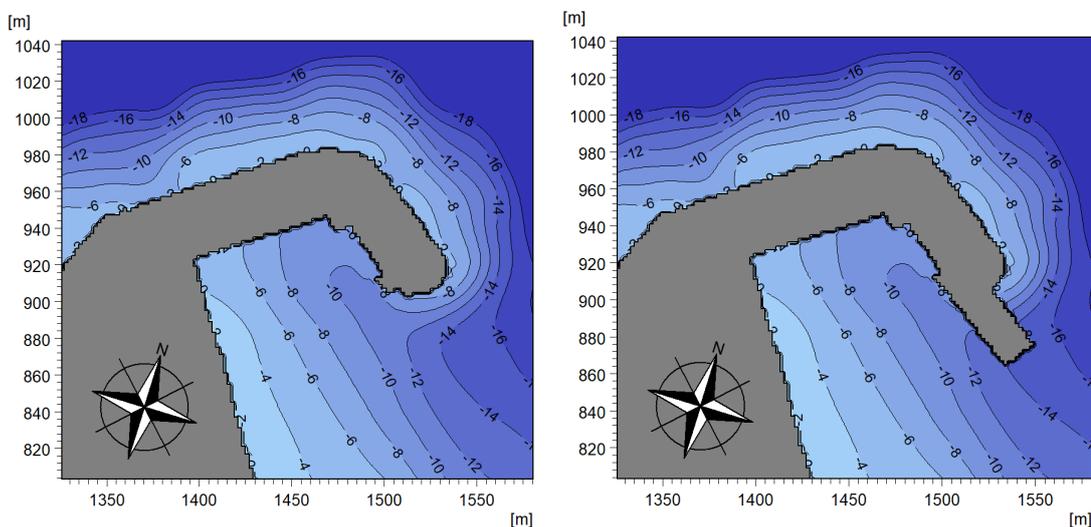


Figura 7-2 Layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra)

Per quanto riguarda i parametri di riflessione è stato utilizzato un coefficiente di riflessione compreso tra 0.3 e 0.4 per la mantellata del molo di sopraflutto. Viceversa, tutte le banchine interne ed anche il prolungamento di progetto sono state considerate cautelativamente completamente riflettenti (coefficiente di riflessione pari a 1). In Figura 7-3 è riportata la schematizzazione dei coefficienti di riflessione utilizzati, laddove non è specificato nulla è da considerarsi come completamente riflettente.

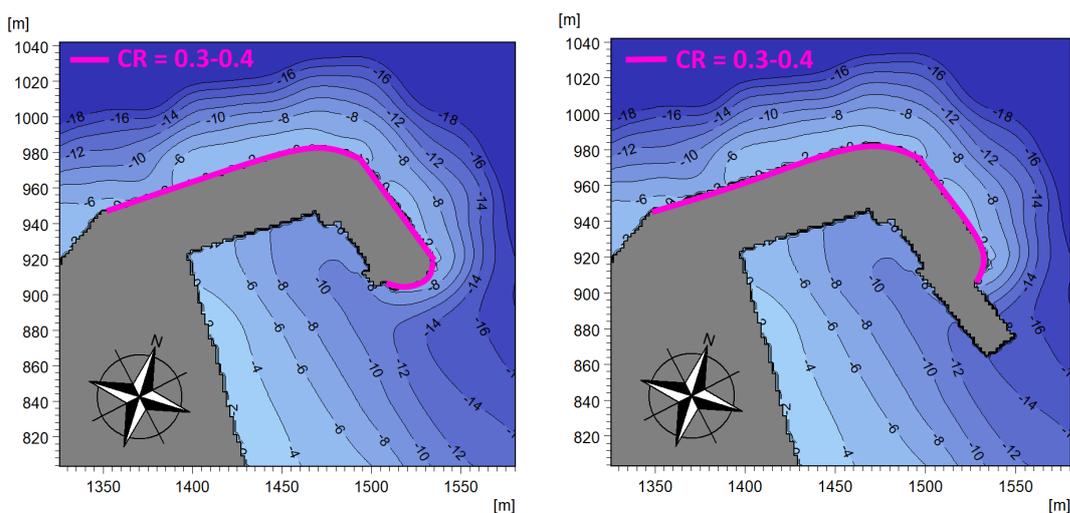


Figura 7-3 Parametri di riflessione utilizzati per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra)

## 7.4 Definizione dello strato assorbente

Il modulo MIKE 21 BW funziona concettualmente come un modello fisico in vasca. I contorni del modello sono chiusi e l'introduzione delle onde avviene internamente al dominio mediante apposite linee di generazione. Essendo il dominio costituito da quattro 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 strato assorbente relativo alla griglia di calcolo dello stato attuale; le tonalità variabili da rosso a giallo indicano il variare progressivo del grado di assorbimento dell'energia dell'onda.

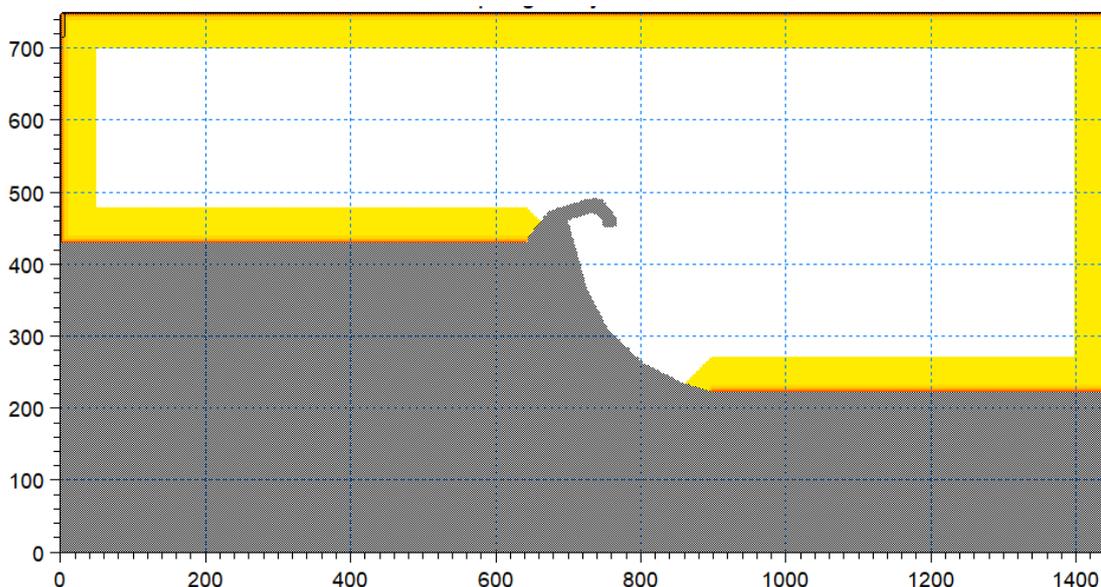
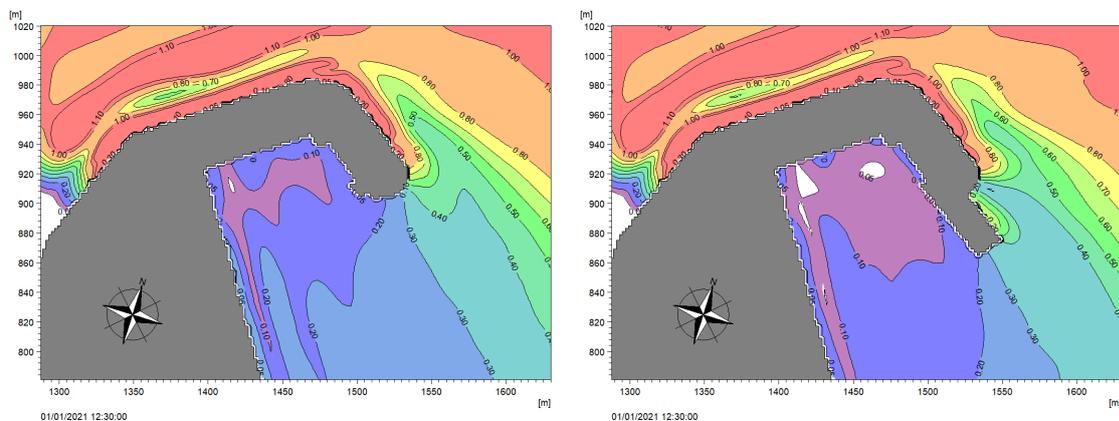


Figura 7-4 Localizzazione dello strato assorbente (tonalità di giallo e rosso) in riferimento alla griglia di calcolo del layout attuale

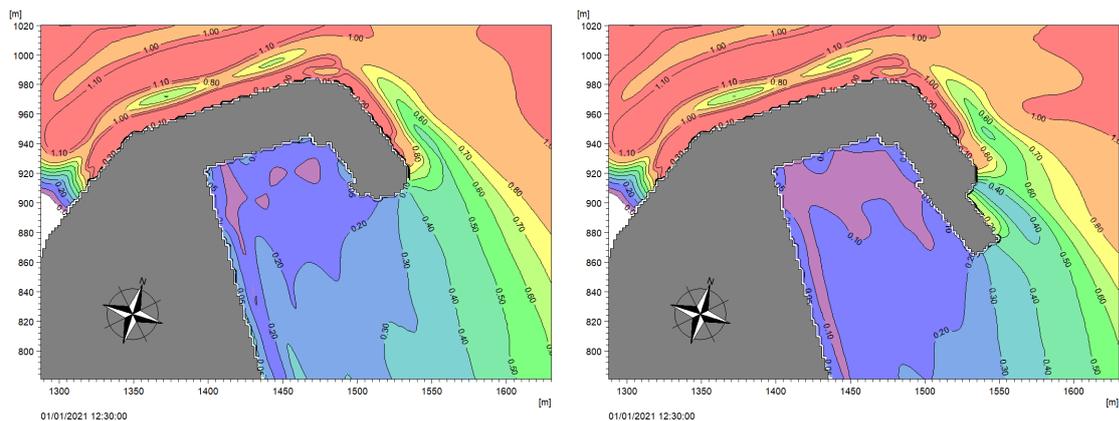
## 7.5 Risultati delle simulazioni: verifica della "condizione di comfort"

Al fine di procedere alla verifica delle condizioni di comfort, come descritto in precedenza, sono state condotte diverse simulazioni definite sulla base di un set di onde (6), selezionate in funzione del clima ondoso al largo dell'imboccatura portuale (nel punto A) e rappresentative dell'intero ventaglio di condizioni ondose del sito oggetto di studio.

Per ognuna delle onde simulate il modello fornisce, in ciascun punto del dominio di calcolo, il coefficiente di disturbo. Tale parametro adimensionale è definito come il rapporto tra l'altezza d'onda nel punto e quella al di fuori del porto (al contorno aperto del modello). I campi di coefficiente di disturbo sono illustrati per le 6 condizioni ondose ordinarie nelle immagini da Figura 7-5 a Figura 7-10 sia in riferimento allo stato attuale che in quello di progetto.



**Figura 7-5** Mappa del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 01 caratterizzata da una direzione di provenienza pari a 300°N



**Figura 7-6** Mappa del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 02 caratterizzata da una direzione di provenienza pari a 315°N

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

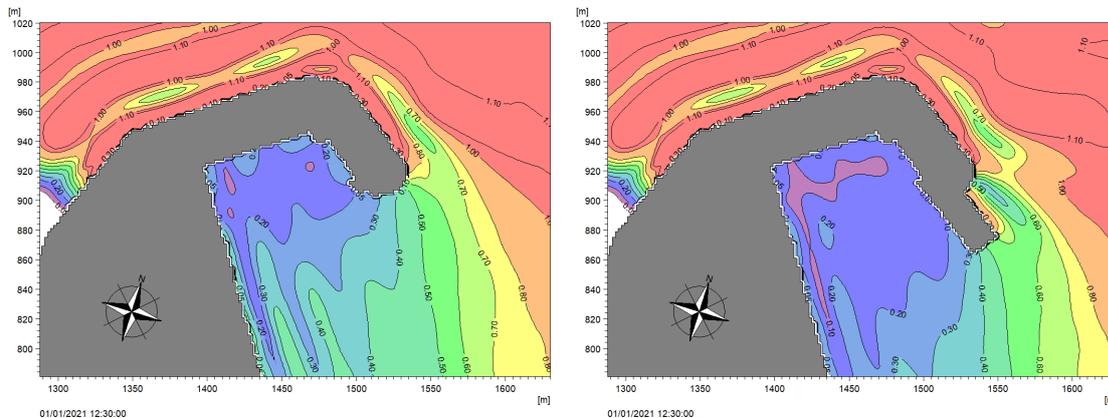


Figura 7-7 Mappa del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 03 caratterizzata da una direzione di provenienza pari a 330°N

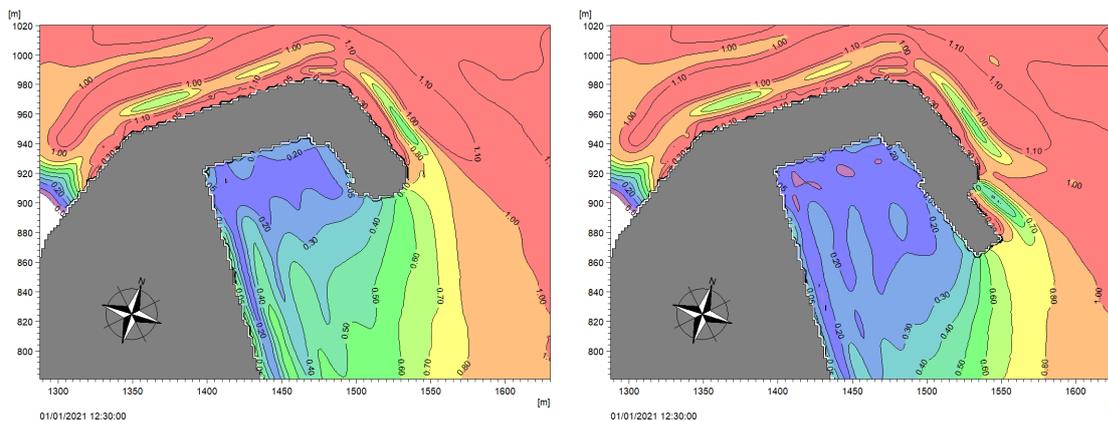


Figura 7-8 Mappa del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 04 caratterizzata da una direzione di provenienza pari a 345°N

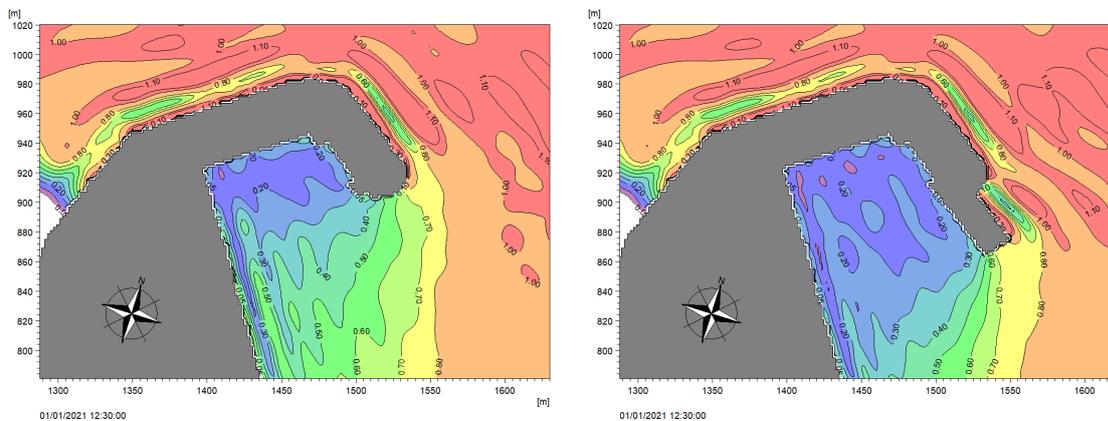
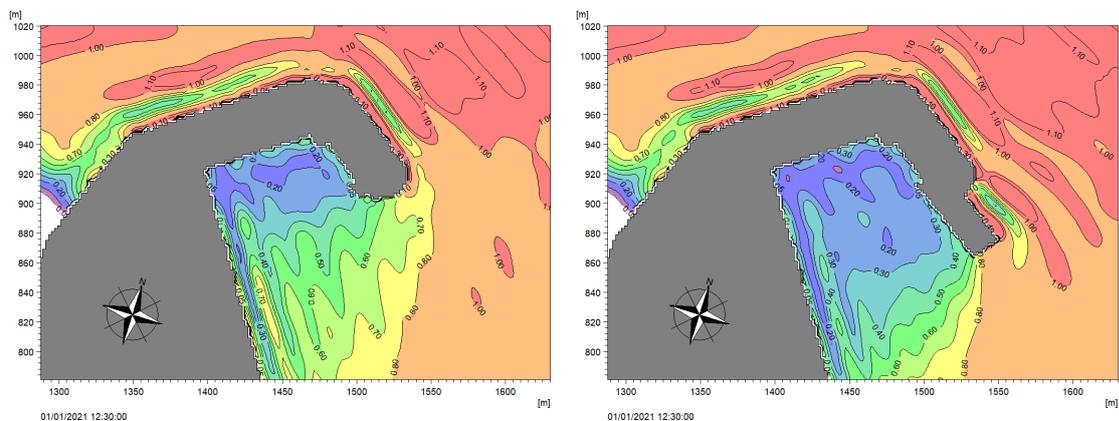


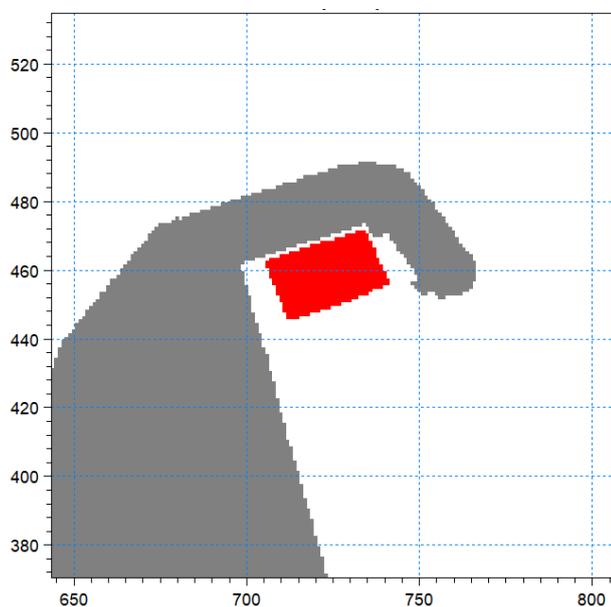
Figura 7-9 Mappa del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 05 caratterizzata da una direzione di provenienza pari a 0°N

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO



**Figura 7-10** Mappa del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 06 caratterizzata da una direzione di provenienza pari a 15°N

Successivamente, i risultati del modello sono stati processati al fine di calcolare per ognuna delle simulazioni il valore del coefficiente di disturbo medio in riferimento all'area di ormeggio individuata in Figura 7-11. In Tabella 7-2 sono presentati tali valori per ognuna delle 6 onde ordinarie simulate.



**Figura 7-11** Area di ormeggio individuata per la definizione della condizione di comfort

**Tabella 7-2 Coefficienti di disturbo medi calcolati in riferimento all'area di ormeggio presa in considerazione per ciascuna delle onde ordinarie (1-6)**

Onda	MWD [°N]	Attuale	Progetto
1	300	0.1004	0.069
2	315	0.1216	0.084
3	330	0.1544	0.118
4	345	0.1795	0.145
5	0	0.1856	0.161
6	15	0.2351	0.205

Incrociando i dati del clima ondoso relativi al punto A (riportati in Tabella 5.1) ed i valori del coefficiente di disturbo riportati in Tabella 7-2 è stato possibile poi calcolare il numero di ore (e giorni) di superamento della soglia di altezza d'onda significativa di 0.15 m utilizzata come valore di riferimento per la condizione di comfort (Tabella 7-3).

**Tabella 7-3 Valori (in giorni/anno) di superamento della soglia di altezza d'onda significativa di 0.15m in riferimento all'area di ormeggio individuata ed ai due layout simulati: attuale (a sinistra) e progetto (a destra)**

	Attuale	Progetto
ore	801	469
giorni	33.4	19.5

I risultati, sia in termini di campi di coefficienti di disturbo sia in termini di valori mediati nell'area di ormeggio, mostrano in maniera piuttosto evidente i benefici indotti dal prolungamento del molo di sopraflutto. Nello specifico si osserva una riduzione del coefficiente di disturbo che risulta essere compresa tra il 15% ed il 30% in funzione della direzione di provenienza dell'onda. Analizzando inoltre i dati riporta in Tabella 7-3 si osserva altresì che in nessuno dei due scenari (attuale e progetto) viene rispettata la raccomandazione PIANC (relativamente alla condizione di comfort) che definisce ammissibile il superamento della soglia di 15cm per non oltre 5 giorni all'anno. Nello specifico la soglia di 0.15m viene superata per 33.5 giorni all'anno nello scenario attuale e per 19.5 giorni all'anno nello scenario di progetto.

## 7.6 Risultati delle simulazioni: verifica della "condizione di sicurezza"

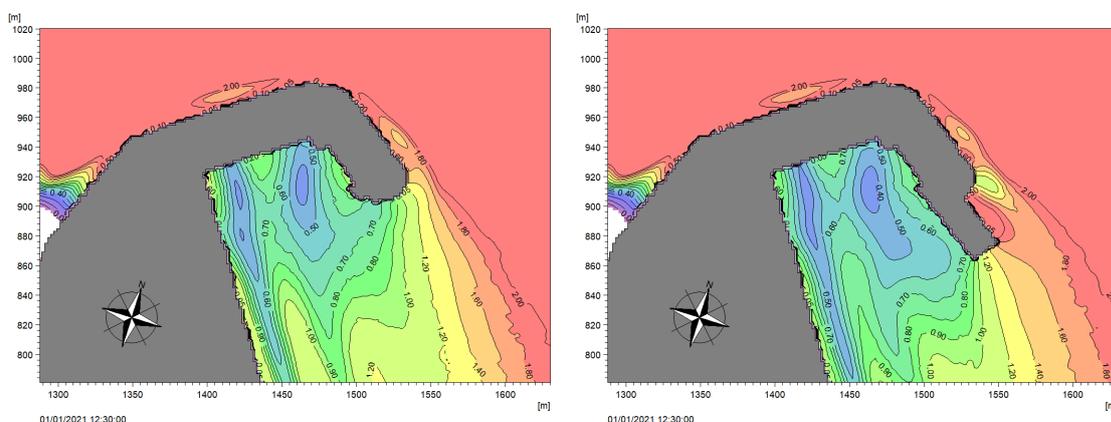
I risultati delle simulazioni in riferimento alle onde caratterizzate da periodo di ritorno di 5 anni, utili alla verifica della condizione di sicurezza, sono illustrati nelle immagini da Figura 7-12 a Figura 7-14 in riferimento ai due layout simulati (attuale e progetto). Si ricorda che le raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici definiscono per la condizione di sicurezza (caratterizzata da un

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

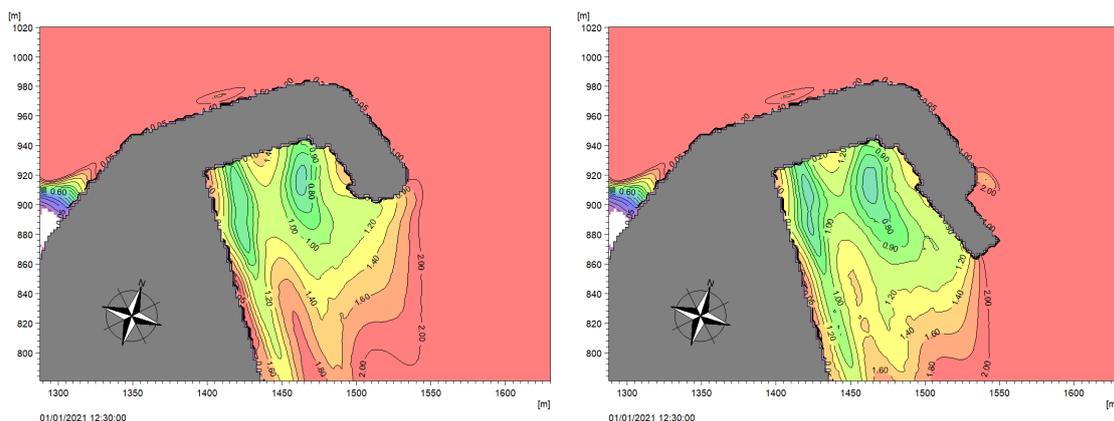
tempo di ritorno pari a 5 anni) un valore soglia di altezza d'onda significativa pari a 0.30m. In Tabella 7-4 sono riportati i valori di altezza d'onda mediati all'interno dell'area di ormeggio definita in Figura 7-11.

**Tabella 7-4 Valori di altezza all'interno del bacino portuale per le condizioni d'onda 7, 8 e 9, mediati nell'area di ormeggio in relazione allo stato attuale e a quello di progetto. La tabella riporta anche i valori di Altezza d'onda al largo**

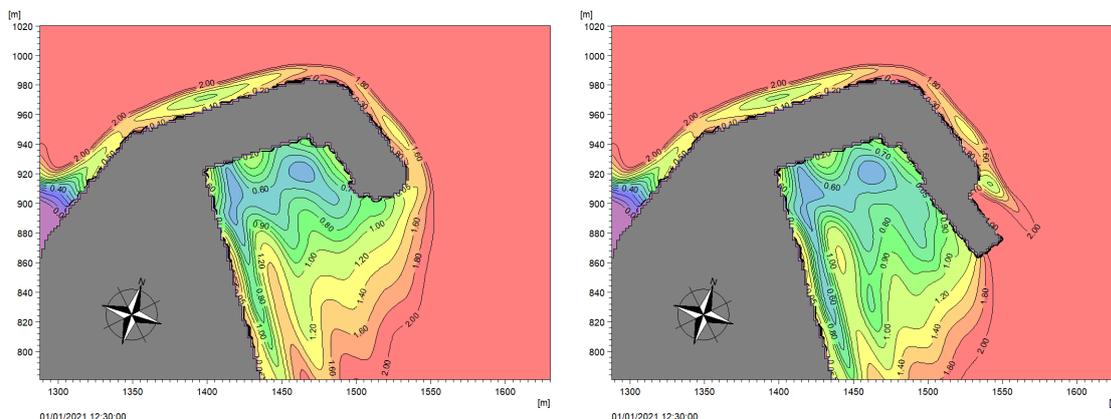
Onda	Hs largo [m]	MWD [°N]	Hs Attuale [m]	Hs Progetto [m]
7	4.5	300	0.62	0.55
8	5.0	330	0.99	0.90
9	2.8	0	0.62	0.60



**Figura 7-12 Mappa di altezza d'onda significativa all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 7 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 300°N**



**Figura 7-13 Mappa di altezza d'onda significativa all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 8 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 330°N**



**Figura 7-14** Mappa di altezza d’onda significativa all’interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 9 con periodo di ritorno pari a 5 anni e caratterizzata da direzione pari a 0°N

La lettura combinata delle mappe e dei risultati mediati nell’area di ormeggio evidenzia i benefici indotti dalla realizzazione dell’opera in progetto. Nello specifico si osservano riduzioni dell’agitazione ondosa interna dell’ordine compresa tra il 2% e il 12% al variare della direzione di provenienza dell’onda.

Si osserva altresì che in nessuno dei due scenari (attuale e progetto) viene rispettata la raccomandazione PIANC (relativamente alla condizione di sicurezza) che definisce non ammissibile il superamento della soglia di 30cm (in riferimento ad eventi con tempi di ritorno di 5 anni). I valori di altezza d’onda mediati nell’area di ormeggio superano abbondantemente la soglia di 0.3m.

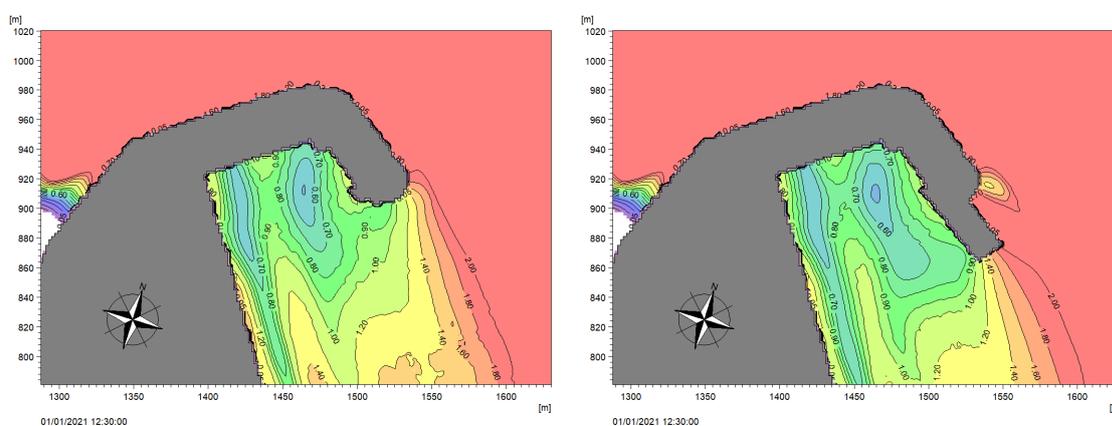
### 7.7 Risultati delle simulazioni: verifica della “condizione limite”

I risultati delle simulazioni in riferimento alle onde estreme caratterizzate da periodo di ritorno di 50 anni, utili alla verifica della condizione limite definita dal PIANC, sono illustrati nelle immagini da Figura 7-15 a Figura 7-17 in riferimento ai due layouts simulati (attuale e progetto). Si ricorda che le raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici definiscono come valore per la condizione limite (caratterizzata da un tempo di ritorno pari a 50 anni) un valore soglia di altezza d’onda significativa pari a 0.50m.

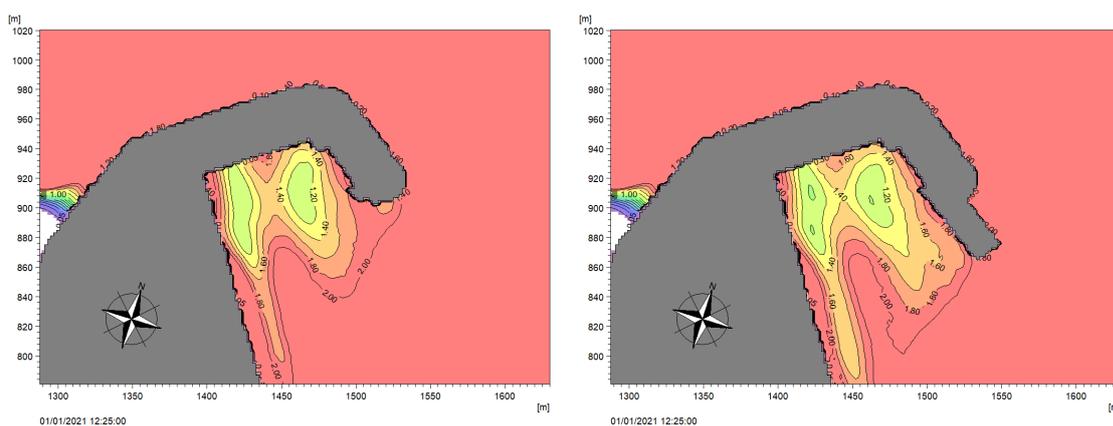
In Tabella 7-5 sono riportati i valori di altezza d’onda mediati all’interno dell’area di ormeggio definita in Figura 7-11.

**Tabella 7-5 Valori di altezza all'interno del bacino portuale per le condizioni d'onda 10, 11 e 12, mediati nell'area di ormeggio in relazione allo stato attuale e a quello di progetto. La tabella riporta anche i valori di Altezza d'onda al largo**

Onda	Hs	MWD [°N]	Attuale	Progetto
10	5.6	300	0.76	0.72
11	6.4	330	1.26	1.20
12	3.8	0	1.01	0.96

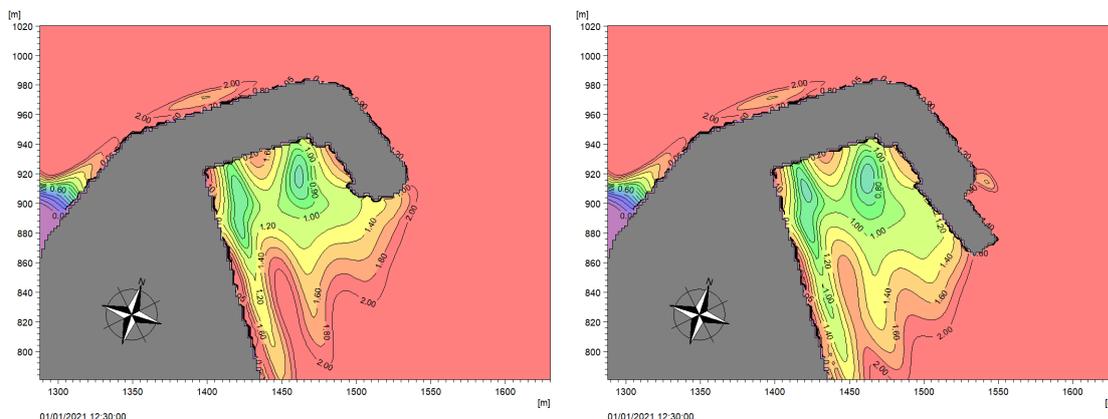


**Figura 7-15 Mappa di altezza d'onda significativa all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 10 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 300°N**



**Figura 7-16 Mappa di altezza d'onda significativa all'interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 11 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 330°N**

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO



**Figura 7-17** Mappa di altezza d’onda significativa all’interno del bacino portuale per il layout di stato attuale (a sinistra) e di progetto (a destra) – Onda 12 con periodo di ritorno pari a 50 anni e caratterizzata da direzione pari a 0°N

La lettura combinata delle mappe e dei risultati mediati nell’area di ormeggio evidenzia i benefici indotti dalla realizzazione dell’opera in progetto. Nello specifico si osservano riduzioni dell’agitazione ondosa interna comprese tra il 4% e il 5% al variare della direzione di provenienza dell’onda.

Si osserva altresì che in nessuno dei due scenari (attuale e progetto) viene rispettata la raccomandazione PIANC (relativamente alla condizione limite) che definisce non ammissibile, per i porti turistici, il superamento della soglia di 50cm (in riferimento ad eventi con tempi di ritorno di 50 anni). I valori di altezza d’onda mediati nell’area di ormeggio superano abbondantemente la soglia di 0.5m.

**7.8 Interpretazione dei risultati**

Le simulazioni di agitazione ondosa sono state condotte sia in riferimento allo stato attuale che in quello di progetto che prevede il prolungamento del molo di soprafflutto di circa 48m mediante la realizzazione di una banchina in calcestruzzo a parete verticale. Le simulazioni condotte in riferimento a 12 condizioni ondose, 6 relative a condizioni ondose ordinarie e 6 estreme, hanno evidenziato una significativa riduzione dell’agitazione ondosa interna nello scenario di progetto.

Analizzando i risultati, si può affermare che la realizzazione dell’opera di progetto determina una riduzione dell’agitazione ondosa interna. Tale riduzione può essere quantificata in riferimento alle diverse condizioni (comfort, sicurezza e limite) indicate nelle raccomandazioni PIANC. Nello specifico:

- per le condizioni di comfort si osserva una riduzione del coefficiente di disturbo compresa tra il 15% ed il 30% in funzione della direzione di provenienza dell’onda;
- per le condizioni di sicurezza si osserva una riduzione dell’altezza d’onda interna compresa tra il 2% ed il 12% in funzione della direzione di provenienza dell’onda;
- per le condizioni limite si osserva una riduzione dell’altezza d’onda interna compresa tra il 4% ed il 5% in funzione della direzione di provenienza dell’onda.

Si osserva altresì che in nessuno dei due scenari (attuale e progetto) vengono rispettate le raccomandazioni PIANC (relativamente alle condizioni di comfort, sicurezza e limite) relative ai porti turistici.

Nello specifico si può affermare quanto segue:

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

---

- la soglia di 0.15m (identificata come riferimento per l'operatività nelle raccomandazioni PIANC) viene superata per 33.5 giorni all'anno nello scenario attuale e per 19.5 giorni all'anno nello scenario di progetto. Si fa notare che le raccomandazioni PIANC definiscono ammissibile il superamento di tale soglia per non oltre 5 giorni all'anno;
- la soglia di 0.30m (identificata come riferimento per le condizioni di sicurezza nelle raccomandazioni PIANC in relazioni alle ondate con tempo di ritorno di 5 anni) viene abbondantemente superata sia in riferimento allo scenario di stato attuale che a quello di progetto;
- la soglia di 0.50m (identificata come riferimento per le condizioni limite nelle raccomandazioni PIANC in relazioni alle ondate con tempo di ritorno di 50 anni) viene abbondantemente superata sia in riferimento allo scenario di stato attuale che a quello di progetto.

## 8 SINTESI E CONCLUSIONI

Il presente studio descrive in dettaglio le attività di analisi e di modellazione numerica svolte a supporto del Progetto di ammodernamento del porto di Scilla, che prevede tra gli altri interventi un allungamento del molo di circa 48 m.

Mediante l'utilizzo del database di ricostruzione delle condizioni di vento e onda nel Mar Mediterraneo (MWM - Mediterranean Wind Wave Model) è stato:

- caratterizzato il clima ondoso al largo;
- propagata l'intera serie ultra-quarantennale di moto ondoso da largo verso costa;
- predisposta l'analisi degli eventi estremi direzionali.

L'analisi del moto ondoso al largo ha permesso di individuare il settore di provenienza degli eventi più energetici, compreso tra 300 e 330 °N. La modellazione dell'intera serie di dati orari estratti dal dataset MWM ha fornito indicazioni generali sulle modalità di propagazione del moto ondoso al largo di Scilla e ha permesso di ottenere le principali grandezze d'onda in tutti i punti del dominio di calcolo. In particolare, i risultati hanno evidenziato il significativo effetto della rifrazione per le onde da nord-ovest, che determina una certa schermatura del litorale sito a est del porto. Le onde provenienti da nord e nord-est subiscono minore dissipazione, ma sono anche generalmente poco energetiche oltre che poco frequenti.

Per supportare la progettazione del nuovo molo portuale si è proceduto con l'estrazione della serie di altezza d'onda significativa in un punto sottocosta, denominato *punto A*, a circa 700 m a nord rispetto al molo di Scilla, e con la relativa analisi statistica degli eventi estremi (Capitolo 5). Per l'identificazione delle caratteristiche d'onda in corrispondenza del molo in progetto si è successivamente proceduto con l'implementazione di un ulteriore modello d'onda (descritto al Capitolo 6), caratterizzato da un dominio di calcolo circoscritto alla zona di interesse, ma predisposto con una maggior risoluzione spaziale degli elementi della mesh.

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi statistica direzionale della serie di altezza d'onda significativa estratta nel punto A sono stati simulati, per ciascun settore direzionale, gli eventi estremi con tempo di ritorno pari a:

- 50 anni, a supporto della verifica della tracimazione;
- 112 anni, a supporto del dimensionamento delle opere a gettata.

Infine, è stata condotta l'analisi dell'agitazione ondosa interna nei due scenari (attuale e progetto) mediante l'ausilio del codice di calcolo MIKE21 BW ed in riferimento alle raccomandazioni AIPCN-PIANC che riportano i valori di altezza d'onda significativa ammissibile all'interno dei porti per le tre condizioni: limite, sicurezza e comfort. I risultati dimostrano che in nessuno dei due scenari vengono rispettate le raccomandazioni PIANC (relativamente alle condizioni di comfort, sicurezza e limite) relative ai porti turistici.

Analizzando i risultati, si può affermare che la realizzazione dell'opera di progetto determina una riduzione dell'agitazione ondosa interna. Tale riduzione può essere quantificata come segue:

- per le condizioni di comfort si osserva una riduzione del coefficiente di disturbo compresa tra il 15% ed il 30% in funzione della direzione di provenienza dell'onda;
- per le condizioni di sicurezza si osserva una riduzione dell'altezza d'onda interna compresa tra il 2% ed il 12% in funzione della direzione di provenienza dell'onda;
- per le condizioni limite si osserva una riduzione dell'altezza d'onda interna compresa tra il 4% ed il 5% in funzione della direzione di provenienza dell'onda.

## 9 RIFERIMENTI

- [1] 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
- [2] CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - [www.jeppesen.com/marine/commercial/professional](http://www.jeppesen.com/marine/commercial/professional)
- [3] MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark
- [4] MIKE by DHI 2021. *MIKE 21 Boussinesq Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark

## **ALLEGATO A**

### **MWM: MEDITERRANEAN WIND AND WAVE MODEL**

## MWM: Mediterranean Wind Wave Model



## 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.

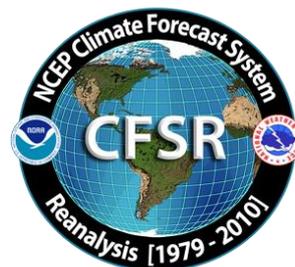


Figure A.1

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.

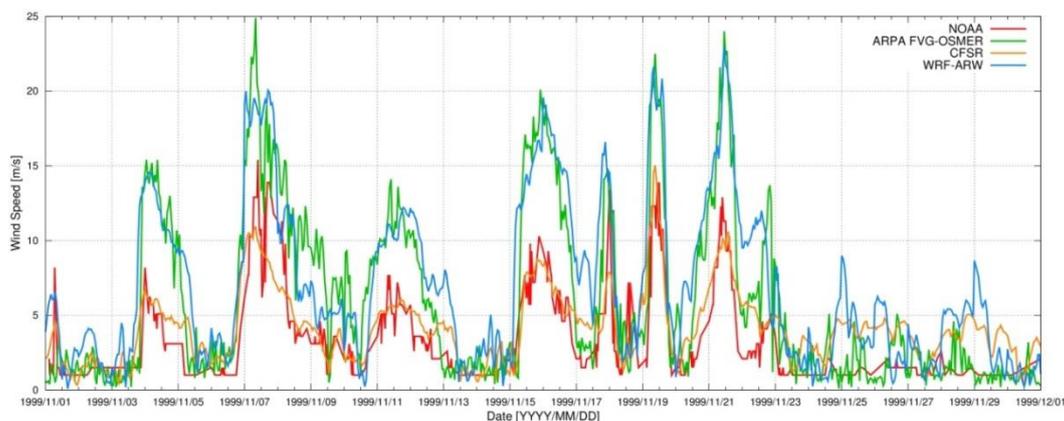


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

(<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:

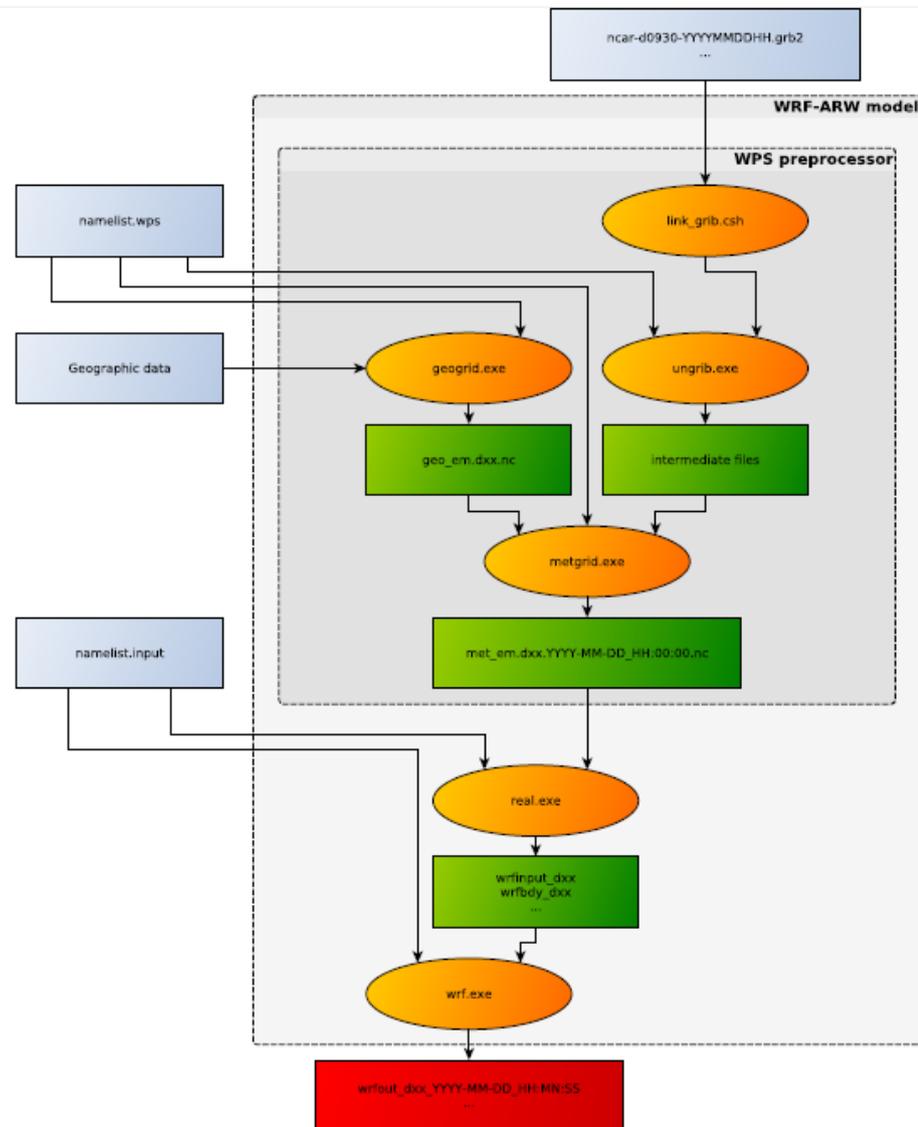


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

### 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).

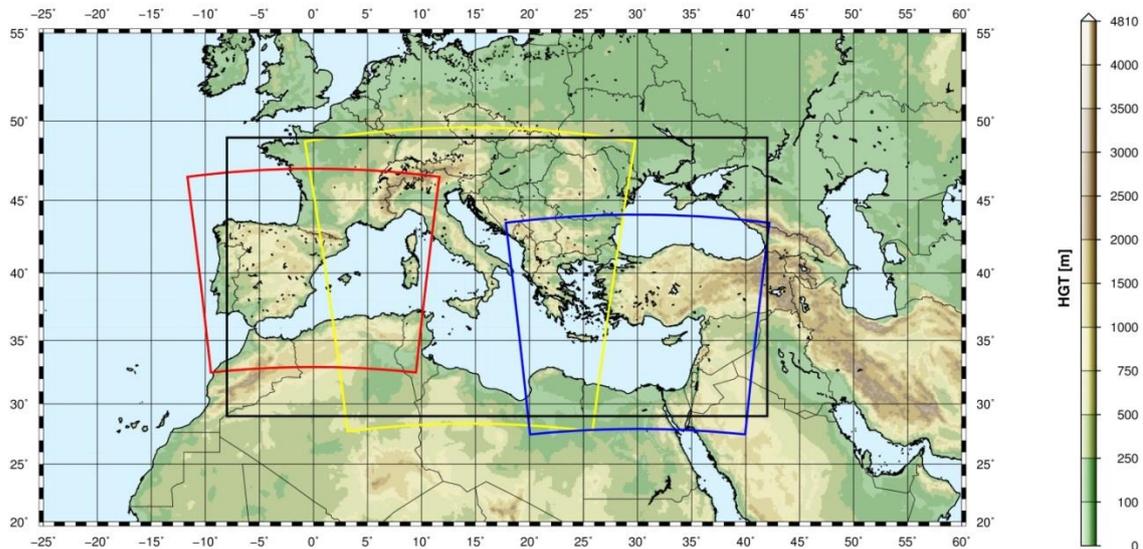


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

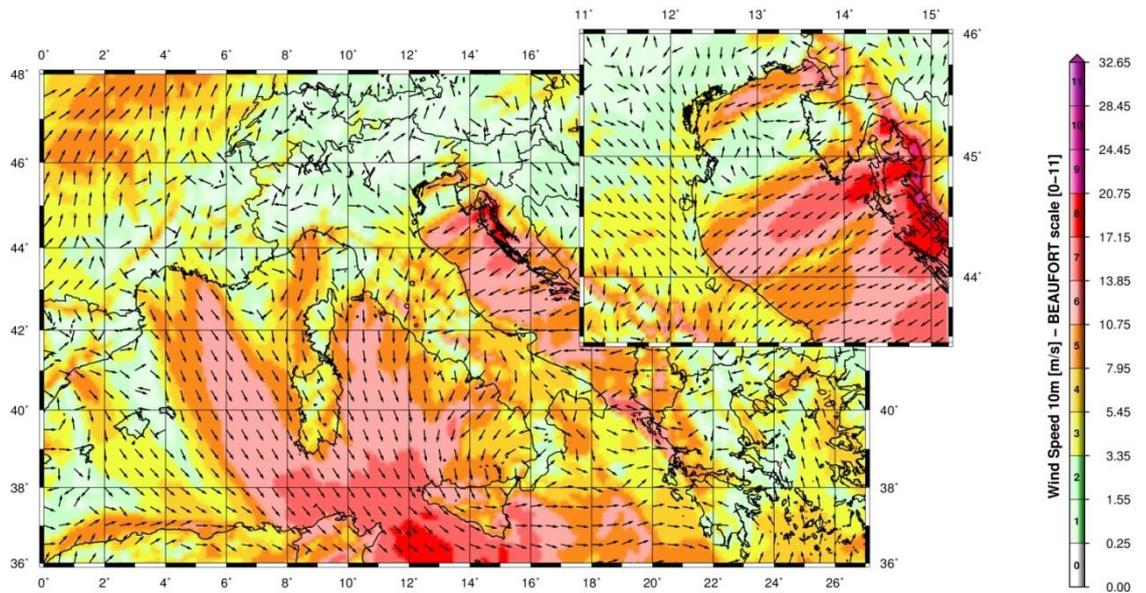


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

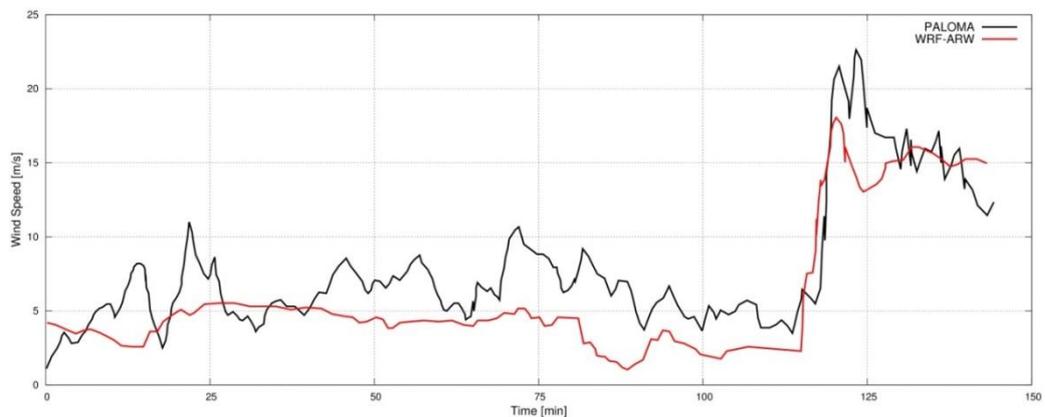


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black line corresponds to the measurement 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.

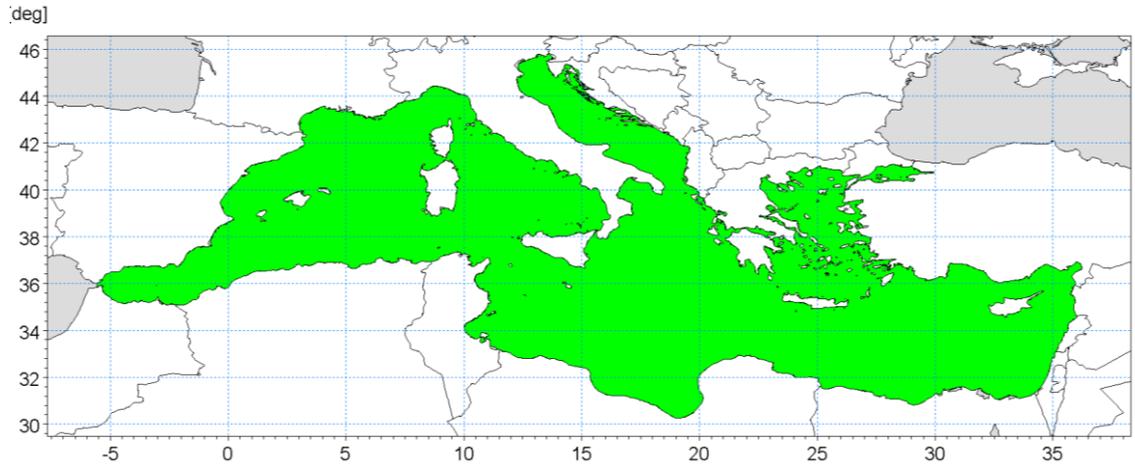


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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  $5 \div 10$  Km.

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

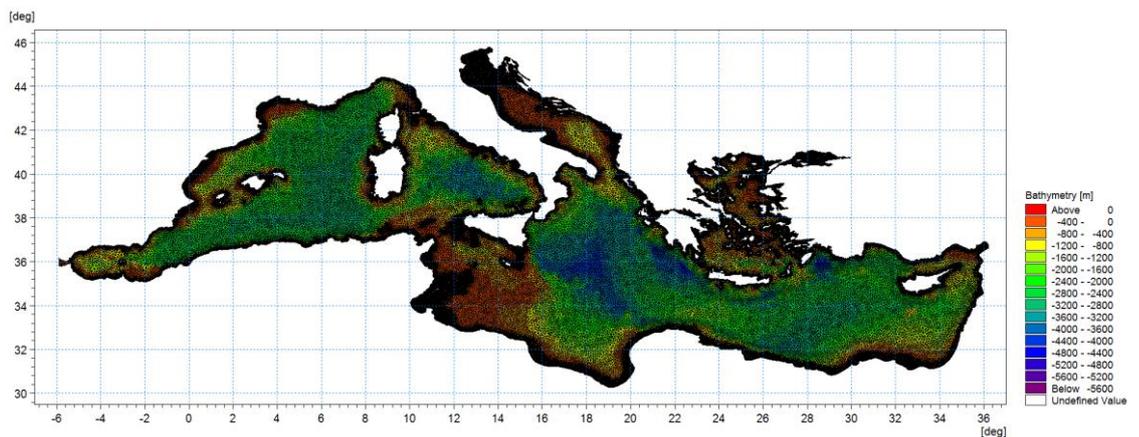


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

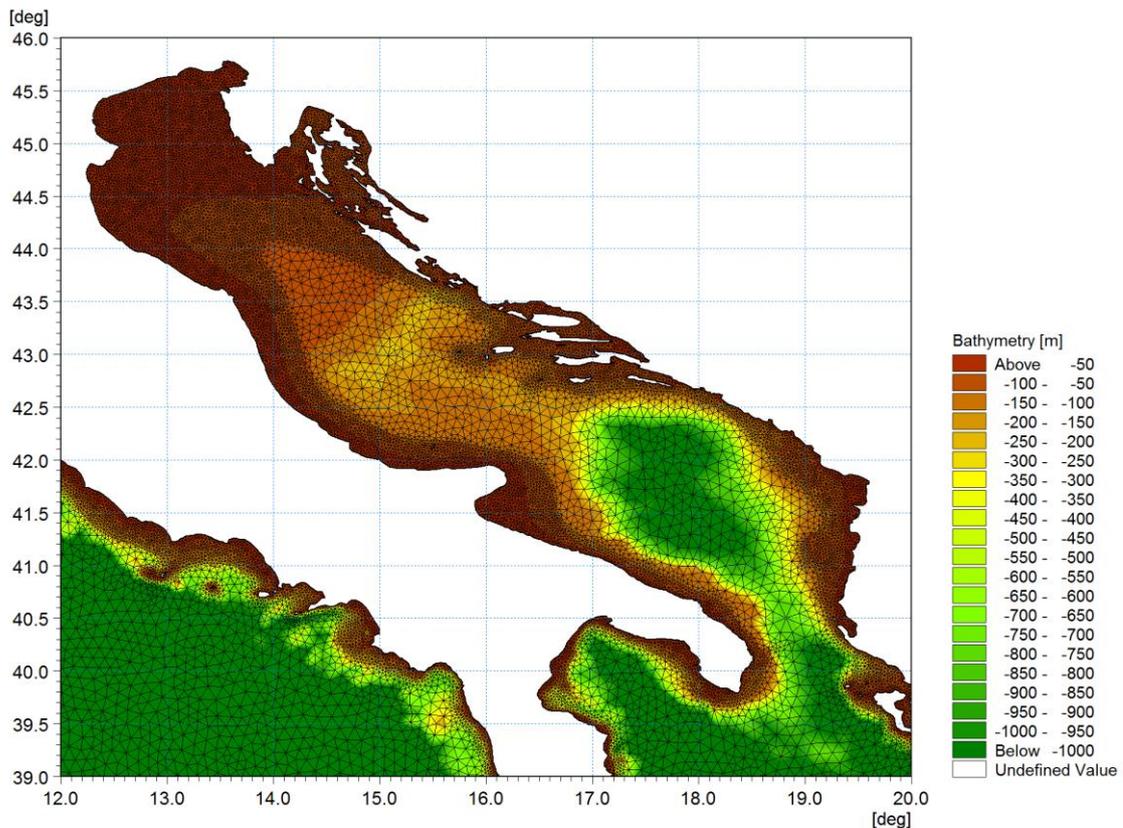


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

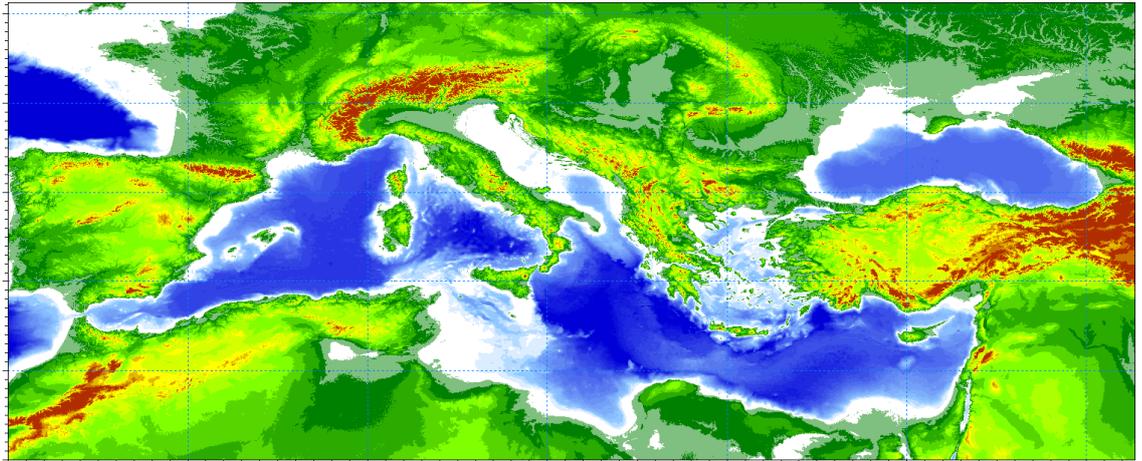


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO\_08 database

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  $360^\circ/24 = 15^\circ$

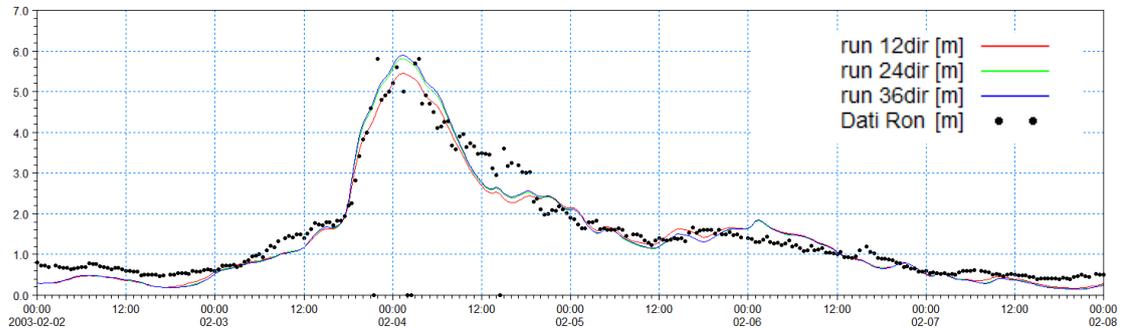


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

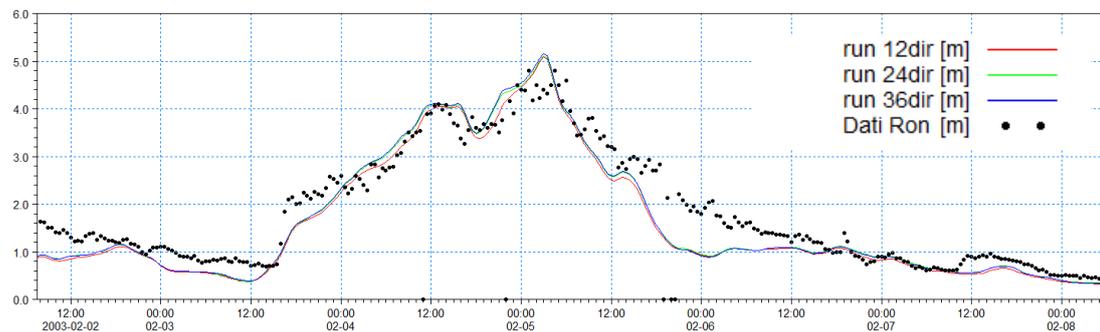


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

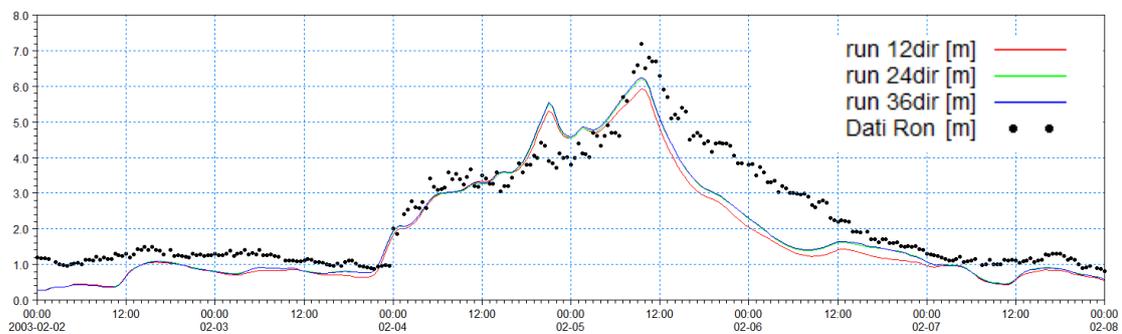


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

## 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.

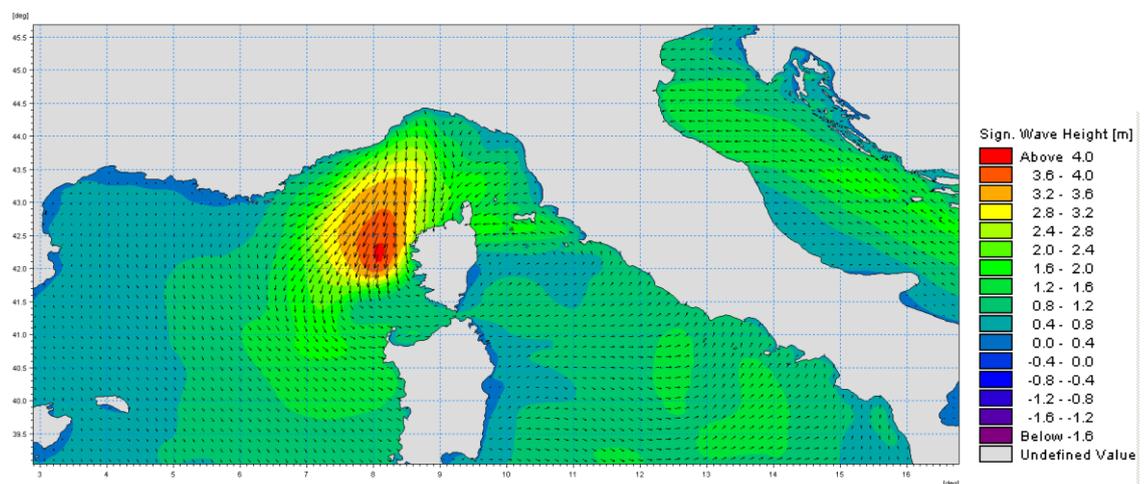


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

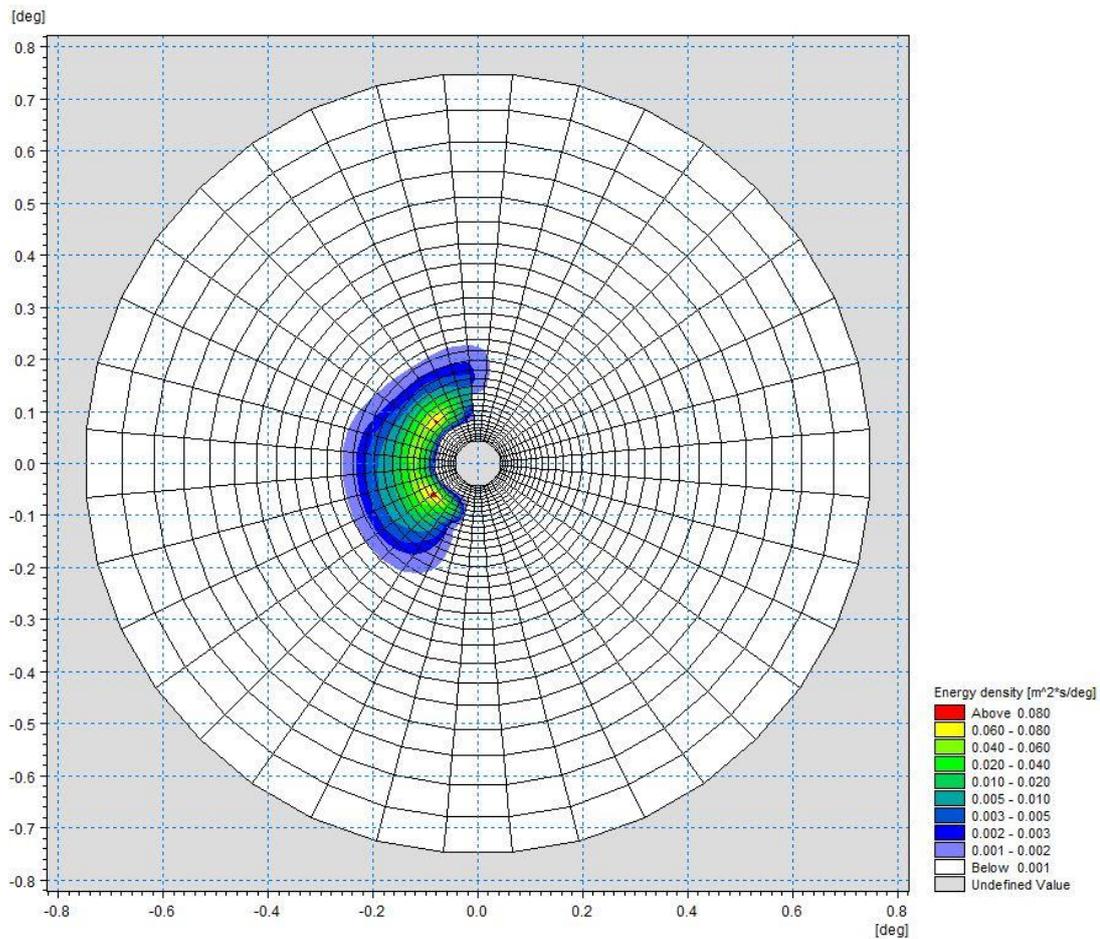


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

## 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.aviso.oceanobs.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**

**MIKE 21 SPECTRAL WAVE MODEL (SW)**

## 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.

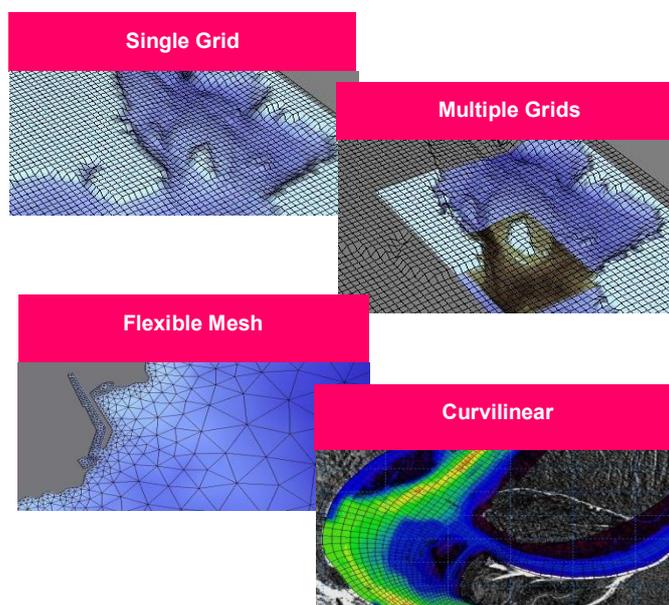
In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale 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 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.

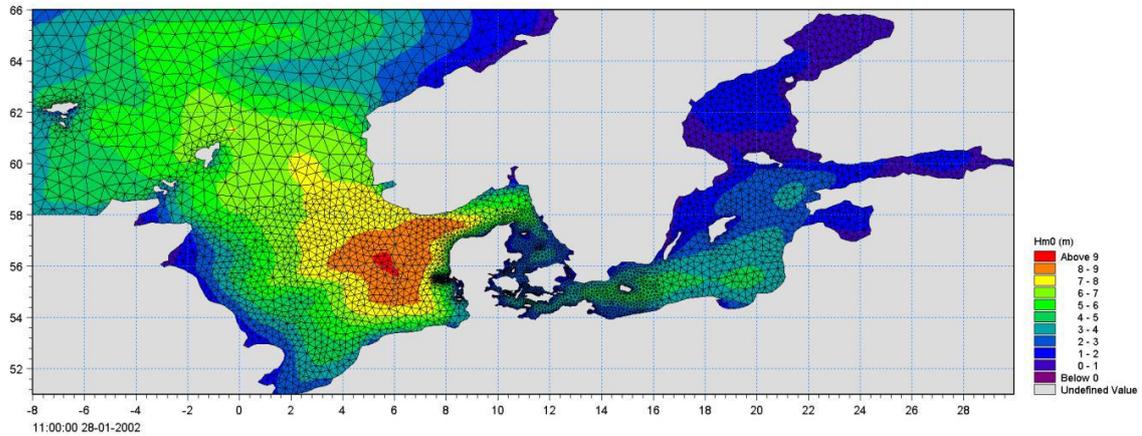
Il modello, nella formulazione “fully spectral”, include i seguenti fenomeni fisici:

- 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:

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

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

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

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” (Holthuijsen 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:

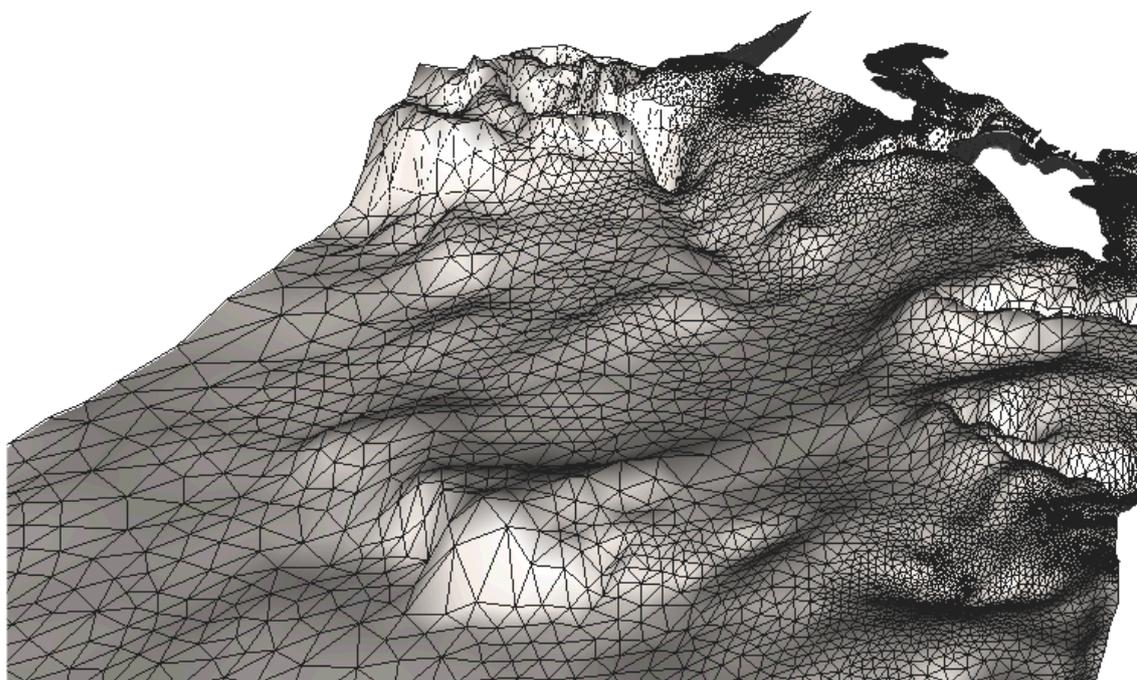
$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

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.

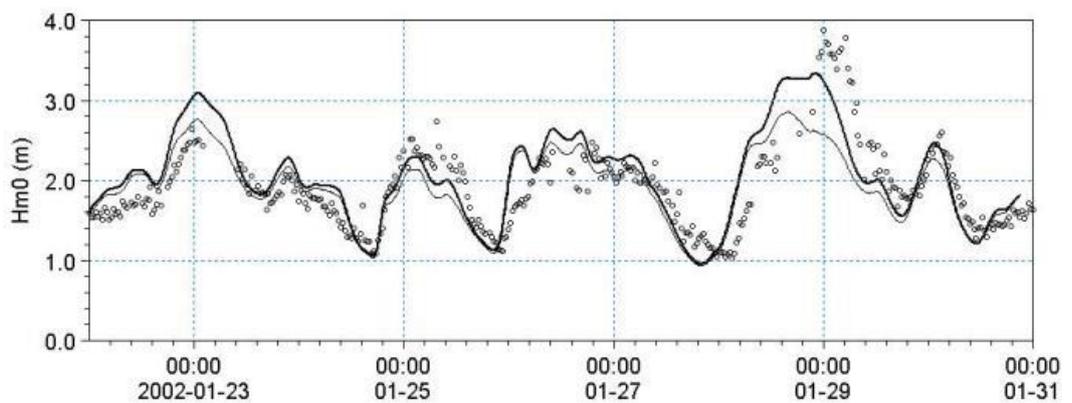
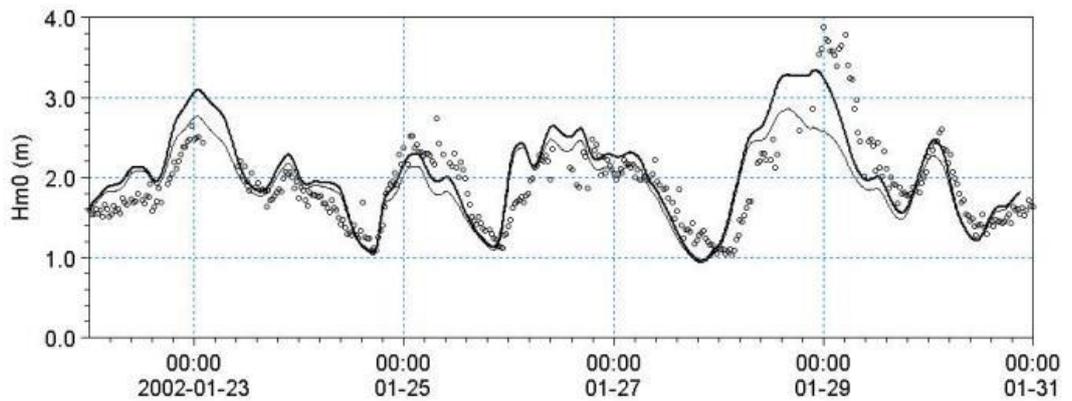
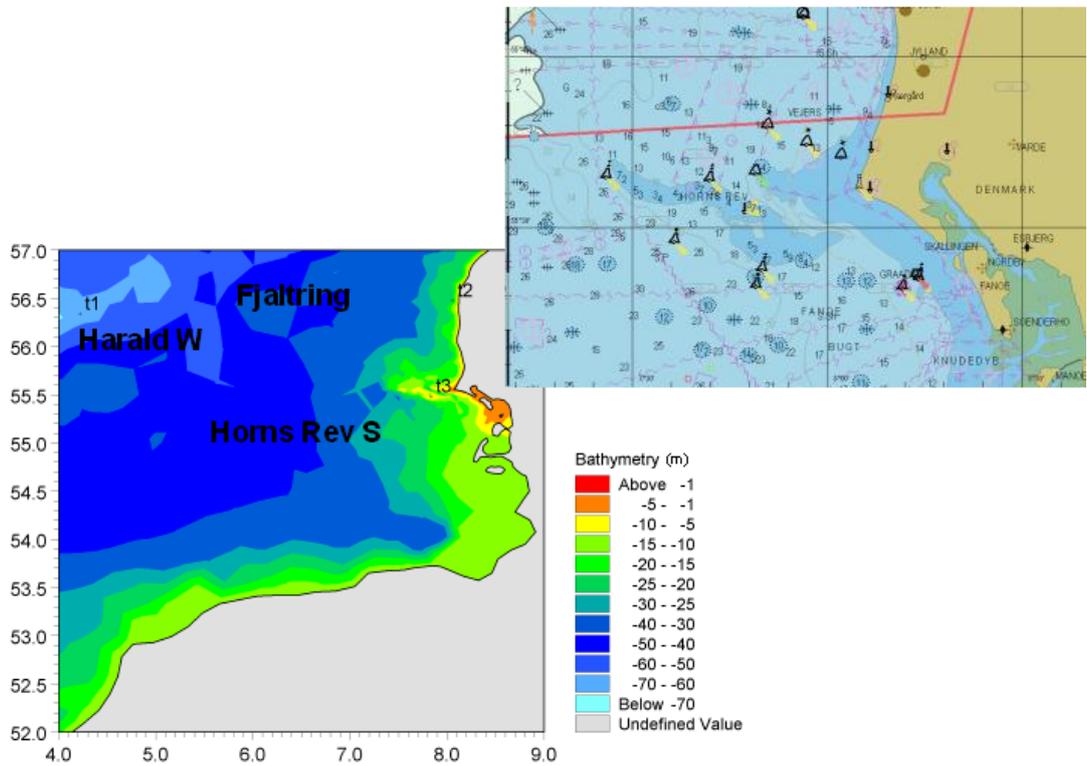
La discretizzazione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.



## INPUT AL MODELLO

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

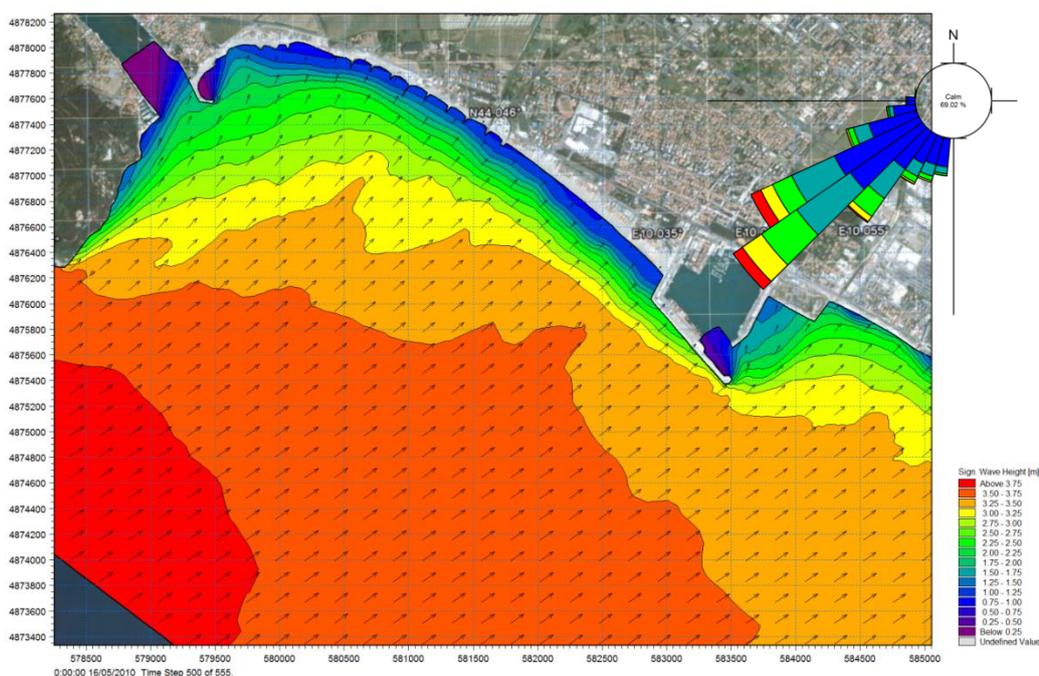
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);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



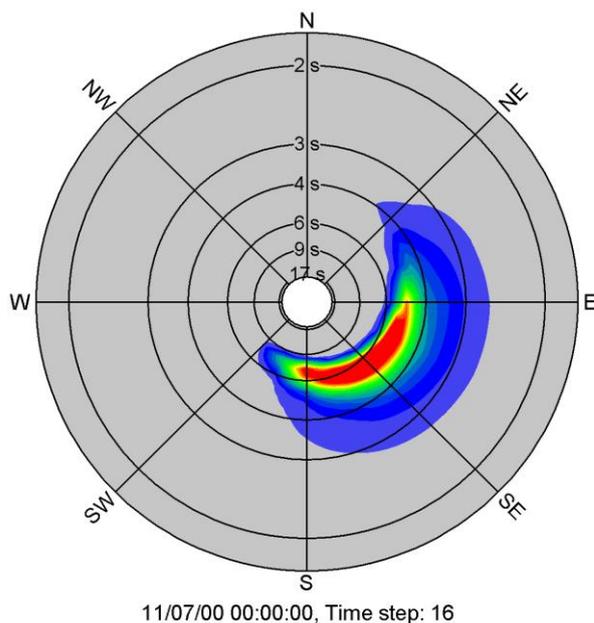
## OUTPUT DEL MODELLO

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**

**MIKE 21 BOUSSINESQ WAVE MODEL (BW)**

## 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

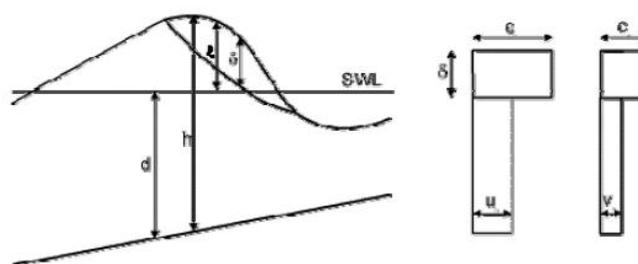
$P$	flux density in the x-direction ( $m^3/m/s$ )
$Q$	flux density in the y-direction ( $m^3/m/s$ )
$B$	Boussinesq dispersion coefficient (-)
$x, y$	Cartesian co-ordinates (m)
$t$	time (s)
$h$	total water depth ( $=d+\xi$ )
$d$	still water depth (m)
$g$	gravitational acceleration ( $= 9.81 m/s^2$ )
$n$	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:

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

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

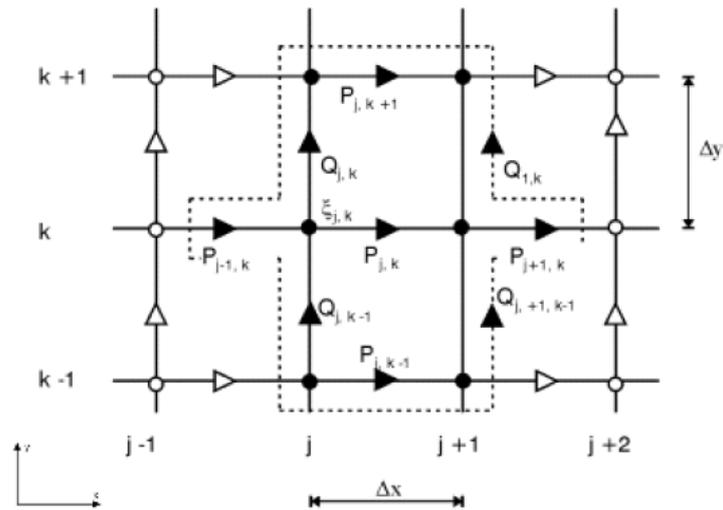
$$R_{yy} = \frac{\delta}{1-\delta/h} \left( c_y - \frac{Q}{h} \right)^2$$



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.



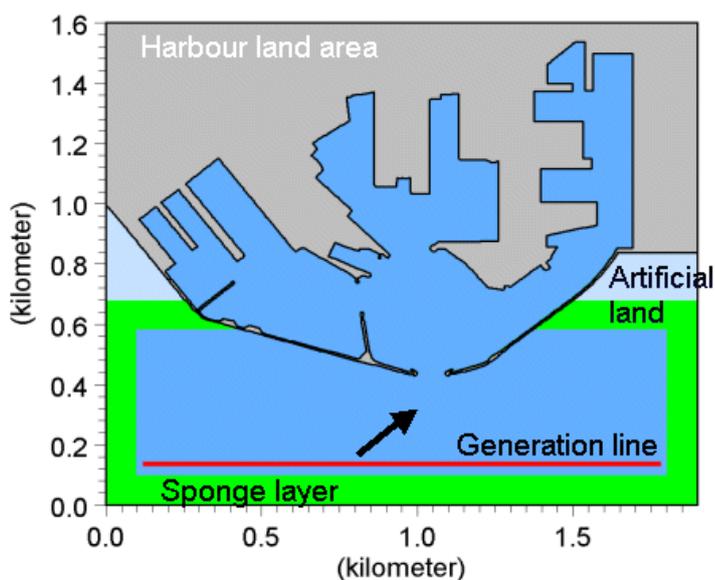
L'approssimazione alle differenze finite è effettuata direttamente a centro-cella, eccetto per i termini convettivi (Madsen and Sørensen 1992 e Madsen et al. 1997a). L'integrazione temporale è fatta utilizzando uno schema implicito non iterativo.

## INPUT AL MODELLO

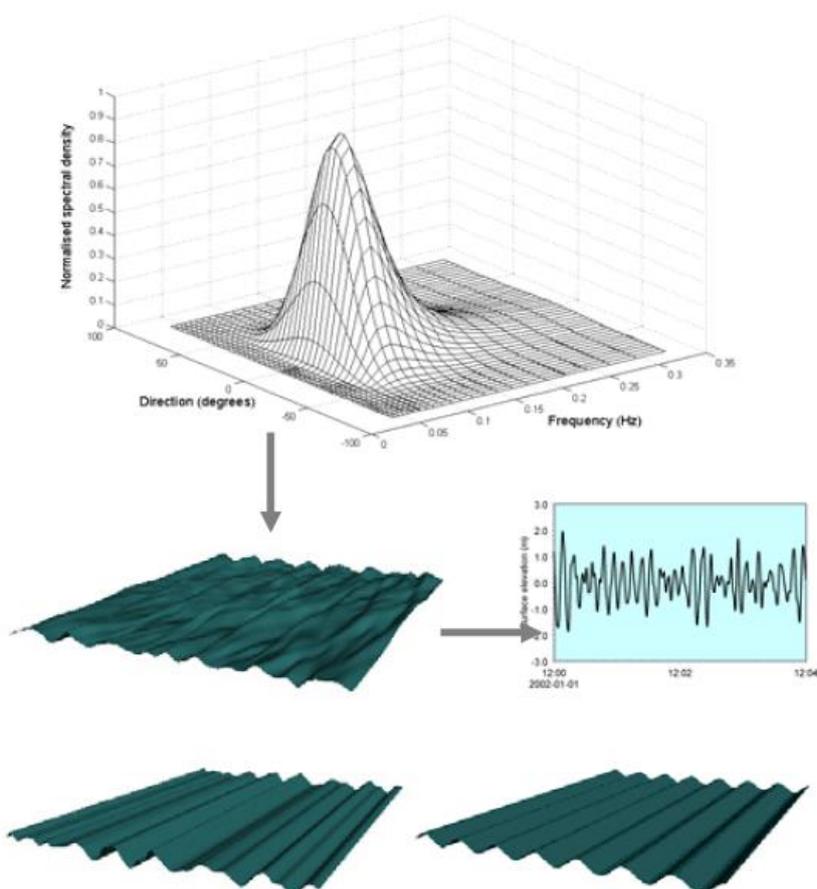
I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- 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).

