



# COMUNE DI LENI (PROVINCIA DI MESSINA)

## OPERE DI ATTUAZIONE DEL PIANO REGOLATORE PORTUALE DI RINELLA 1° STRALCIO FUNZIONALE PROGETTO DEFINITIVO



### PROGETTAZIONE:



### RILIEVI E INDAGINI:



Dott. A. Analfino  
Dott. biol. G. Catalano

ARCHEOLOGO:  
*Daniela Raia*

RESPONSABILE INTEGRAZIONI DELLE  
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Antonino SUTERA

PROGETTISTI:

Ing. Umberto RICCI  
Ing. Antonino SUTERA  
Ing. Giuseppe BERNARDO  
Ing. Massimo TONDELLO  
Ing. Andrea PEDRONCINI  
Ing. Roberta Chiara DE CLARIO

GEOLOGIA:

Geol. Marco SANDRUCCI

GRUPPO DI LAVORO:

Ing. Giuseppe CUTRUPI  
Ing. Stefania FERLAZZO  
Ing. Simone FIUMARA  
Arch. Francesca GANGEMI  
Arch. Erica PIPITO'  
Ing. Silvia BERIOTTO  
Ing. Nicola SGUOTTI  
Ing. Silvia TORRETTA  
Ing. Fabio VINCI

COORD. SICUREZZA PROGETTAZIONE:

Ing. Giuseppe BERNARDO



## D.01

## STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

Questo elaborato è di proprietà della Proger S.p.A. pertanto non può essere riprodotto né integralmente, né in parte senza l'autorizzazione scritta della stessa. Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui è stato fornito.

Nome File  
DNC135\_PD\_D.01\_2020-12-18\_R1\_Studio idraulico marittimo.DHI.docx

Scala

Commessa

P20070

Codice Elaborato

D 00 00 G AB 01

REVISIONI	REV. n°	DATA	MOTIVAZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
	01	18/12/2020	Verifica progetto	Ing. Silvia TORRETTA	Ing. Giuseppe BERNARDO	Ing. Antonino SUTERA
	00	30/10/2020	Prima emissione	Ing. Silvia TORRETTA	Ing. Andrea PEDRONCINI	Ing. Antonino SUTERA

R.U.P.:

Arch. Domenico ARCORACI

VISTI/APPROVAZIONI:



## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO DEL SITO DI STUDIO</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>DATI DISPONIBILI</b>	<b>5</b>
	3.1 <i>DATI METEOMARINI</i>	5
	3.2 <i>DATI DI LIVELLO DELLA SUPERFICIE MARINA</i>	14
	3.3 <i>DATI TOPO-BATIMETRICI</i>	14
<b>4</b>	<b>PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSI</b>	<b>17</b>
	4.1 <i>BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO</i>	17
	4.2 <i>RISULTATI DEL MODELLO D'ONDA</i>	19
<b>5</b>	<b>ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI</b>	<b>24</b>
	5.1 <i>ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA</i>	24
	5.2 <i>INTENSITÀ DEL VENTO</i>	30
	5.3 <i>LIVELLO MARINO</i>	33
<b>6</b>	<b>MODELLAZIONE DI DETTAGLIO ONDA-CORRENTE</b>	<b>35</b>
	6.1 <i>DOMINIO DI CALCOLO E BATIMETRIA</i>	35
	6.2 <i>SELEZIONE DELLE CONDIZIONI D'ONDA</i>	37
	6.3 <i>RISULTATI DEL MODELLO INTEGRATO ONDA-CORRENTE</i>	41
<b>7</b>	<b>CALCOLO DELL'AGITAZIONE ONDOSA RESIDUA</b>	<b>64</b>
	7.1 <i>ESTENSIONE DEL MODELLO E BATIMETRIA</i>	65
	7.2 <i>DEFINIZIONE DELLO STRATO ASSORBENTE (SPONGE LAYER)</i>	67
	7.3 <i>DEFINIZIONE DELLE LINEE DI GENERAZIONE</i>	68
	7.4 <i>DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI RIFLESSIONE</i>	70
	7.5 <i>SELEZIONE DELLE ONDE DI RIFERIMENTO PER LO STUDIO</i>	70
	7.6 <i>RISULTATI DEL MODELLO</i>	73
<b>8</b>	<b>SINTESI E CONCLUSIONI</b>	<b>80</b>
<b>9</b>	<b>RIFERIMENTI</b>	<b>81</b>

## 1 PREMESSA

Il presente elaborato illustra tutte le attività di analisi e di modellazione numerica svolte a supporto del Progetto Definitivo delle "Opere di attuazione del Piano Regolatore Portuale di Rinella. 1° Stralcio Funzionale" (CUP D21C18000280002 – CIG 8075254668).

Per la caratterizzazione del clima ondoso al largo di Rinella 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 di Rinella. 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 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 di primo stralcio e, attraverso la quantificazione del cosiddetto "downtime", stimare l'operatività dello specchio acqueo parzialmente protetto dalla nuova opera.

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 HD (Hydrodynamics), modulo idrodinamico bidimensionale;
- MIKE 21 BW (Boussinesq Wave), modulo di agitazione ondosa interna ai porti.

Le attività di modellazione sono state effettuate in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di Dinamica s.r.l. ed HS Marine s.r.l.



## 2 INQUADRAMENTO DEL SITO DI STUDIO

L'area in cui ricade il sito di intervento è collocata nella porzione meridionale dell'isola di Salina nel Comune di Leni (Messina). Si estende a occidente dalla foce del torrente Vallonazzo ad Ovest fino alla baia di Rinella ad Est per circa m 360.

L'isola di Salina appartiene al gruppo centrale delle isole Eolie, ed è la più alta dal punto di vista topografico (962 m s.l.m.m.).

Il territorio del Comune di Leni si estende per 8.56 Km<sup>2</sup> tra mare e collina ed è attualmente sviluppato attorno ad un piccolo approdo, protetto dalle ondatazioni di Ponente da un molo foraneo accostabile e dotato di una piccola banchina. L'utilizzo principale dello scalo marittimo è quello di terminal per aliscafi e traghetti.

Ad Est dell'approdo esistente, di fronte all'abitato, si sviluppa una piccola spiaggia, utilizzata anche come scalo per le imbarcazioni della piccola pesca, e quindi una franata in pietrame e massi. Ad Ovest si sviluppa un tratto di costa alta con franata al piede.



Figura 2-1 Area di studio: approdo di Rinella, Comune di Leni, Isole Eolie

## 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.

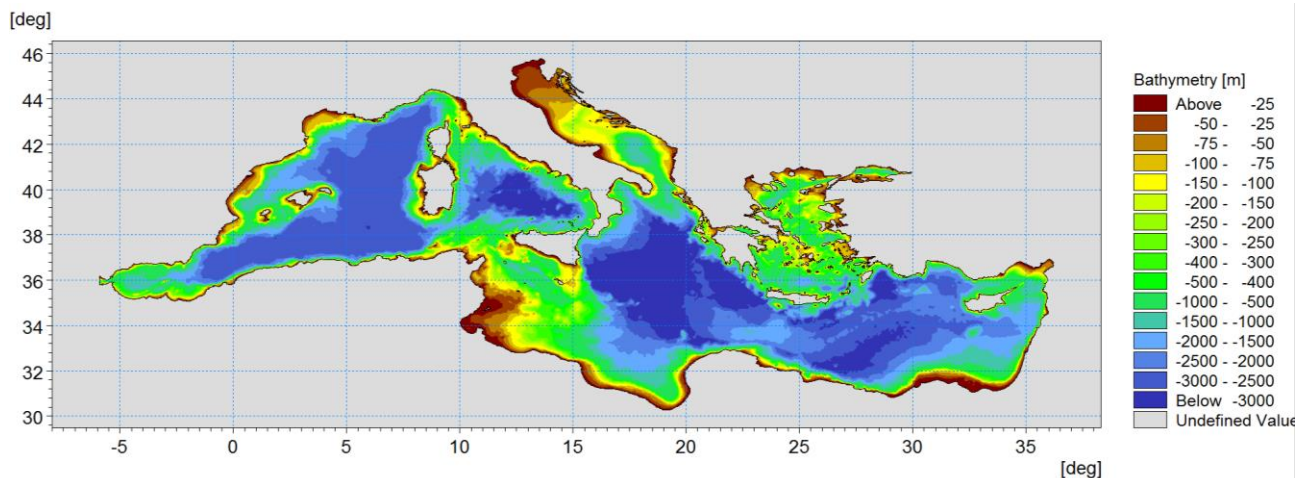


Figura 3-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

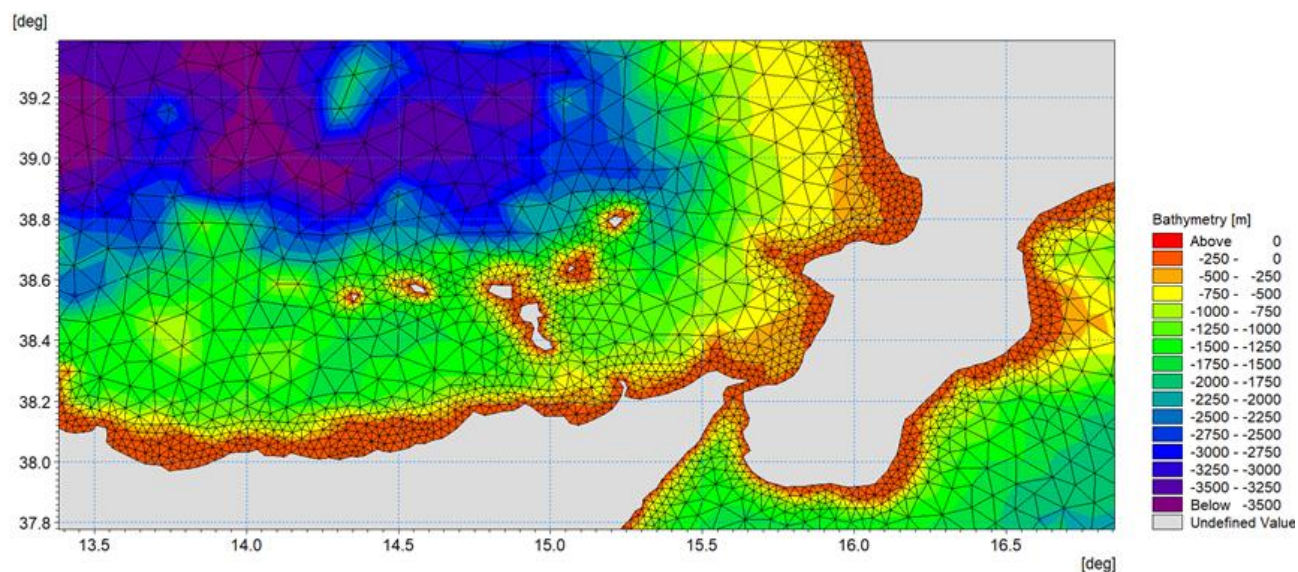


Figura 3-2 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sulla zona di studio

Per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito oggetto di studio si è fatto riferimento al sopra citato database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto diffusamente 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



STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

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 5 km dal sito in esame, per l'estrazione delle serie temporali orarie di vento e onda per i 41 anni di riferimento (1979-2019).

In particolare, sulla base delle informazioni desunte dallo studio idraulico marittimo incluso nello Studio di Fattibilità DNC109\_PFTE\_B.01, e della significatività, sia in termini di frequenza di occorrenza che di valore di altezza d'onda significativa, del clima ondoso con provenienza dal settore di Libeccio-Ponente, si è selezionato una cella MWM a Ovest-Sud/Ovest dell'approdo oggetto di studio.

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 (14.775° E, 38.537° N) i cui dati dal 1979 al 2019 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	14.775	38.537

### 3.1.1 Dati di vento

A seguire (Figura 3-4 e Figura 3-5) si riportano rispettivamente la serie temporale delle velocità del vento per il punto MWM e la relativa rappresentazione in forma di rosa.

Come si può osservare, nel periodo dei 41 anni considerati si raggiungono valori massimi di velocità del vento fino a 24 m/s circa. Dall'analisi della rosa si evince che il vento da Ovest presenta la maggiore frequenza di accadimento, mentre, in relazione alle intensità, si registrano eventi intensi sia da Ponente che da Levante. La frequenza dei venti da Sud, proprio per l'effetto schermante della Sicilia, risulta più ridotta sia in termini di frequenza che intensità.

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.

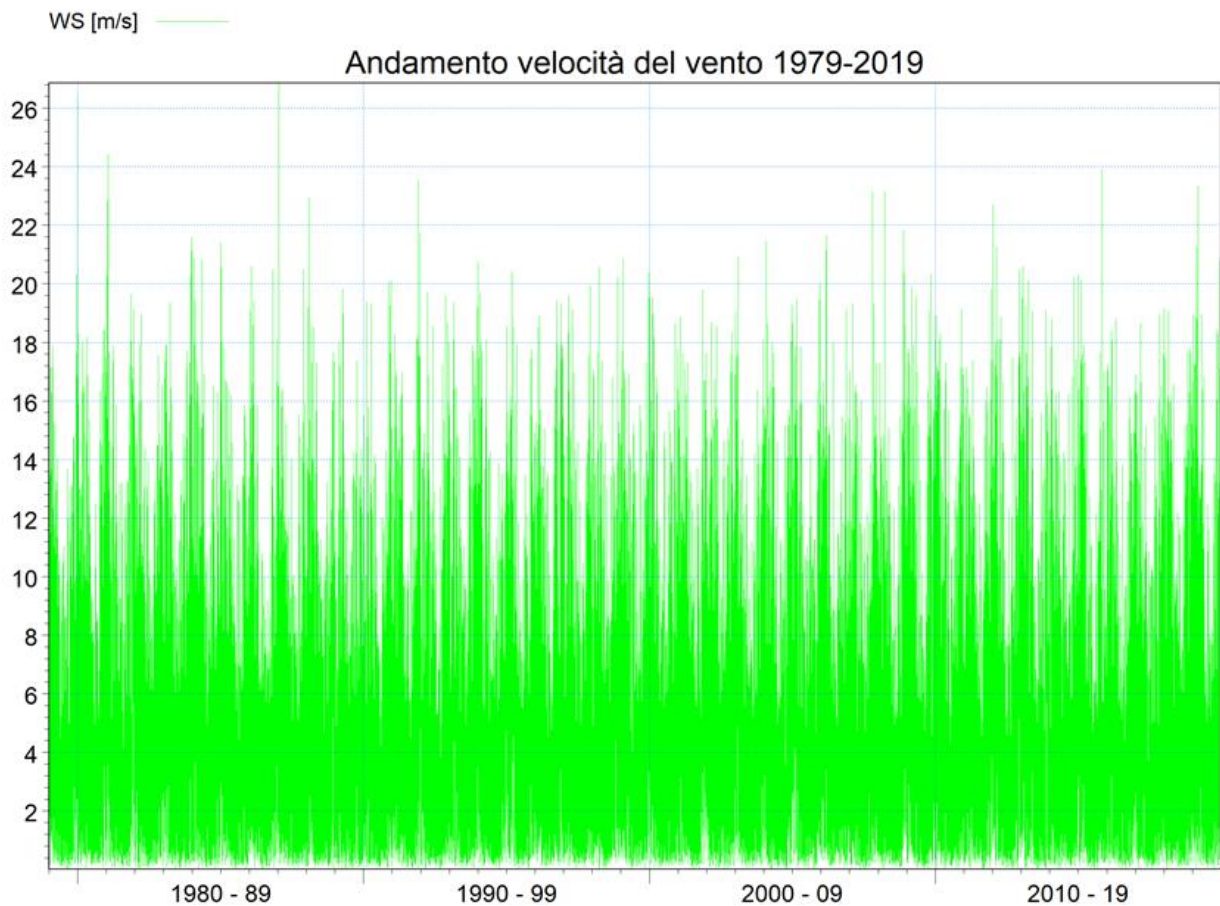


Figura 3-4 Ricostruzione storica di velocità del vento  $W_s$  per il punto MWM (Lon 14.775° E, Lat 38.537° N) nel periodo 1979-2019



STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

Tabella 3-2 Frequenza per classi di intensità del vento WS (colonne) e direzione media WD (righe) nel punto MWM (Lon 14.775° E, Lat 38.537° N) per l'intero periodo 1979-2019

		WS[m/s]														
		<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	>28
WD[°]	<10	1753	2488	1381	888	672	516	266	114	44	3	1				
	10-20	1730	2302	1198	846	663	372	160	65	15	10					
	20-30	1676	2269	1275	947	587	324	116	40	21	14	5	1			
	30-40	1642	2385	1344	950	614	359	136	69	18	4	3	1	1		
	40-50	1585	2523	1395	809	549	281	173	70	29	12	6				
	50-60	1580	2629	1474	702	428	183	68	39	21	10	1				
	60-70	1586	2813	1744	720	309	159	71	26	15	4	1	1			
	70-80	1647	3104	2060	880	405	219	148	60	19	9	2	1			
	80-90	1622	3373	2315	1045	597	373	182	97	35	9	6				
	90-100	1527	3386	2554	1340	739	396	211	95	30	8					
	100-110	1581	3275	2554	1563	930	581	261	80	13	1					
	110-120	1468	2962	2308	1651	1275	730	357	152	30	2					
	120-130	1412	2486	2072	1660	1338	838	450	170	57	13	2				
	130-140	1262	2171	1696	1390	1125	645	312	139	54	18	2				
	140-150	1248	1743	1140	809	484	262	135	73	26	16	1				
	150-160	1176	1439	640	302	151	87	46	36	15	9	1				
	160-170	1173	1137	401	177	80	30	10	5	1						
	170-180	1063	1088	347	118	73	22	5	3	2						
	180-190	1115	1076	327	147	63	21	10	0	1						
	190-200	1117	1072	372	173	76	34	10	6	0	1					
	200-210	1117	1205	528	281	171	84	26	13	3						
	210-220	1220	1428	817	483	379	218	82	41	13	9	0	1	0		
	220-230	1305	1832	1180	809	590	424	197	82	29	7	1				
	230-240	1378	2234	1801	1367	960	667	409	230	79	19	2	0	0	1	
	240-250	1508	3031	2721	2048	1526	1101	617	296	101	19	2				
	250-260	1688	3998	4112	2835	2074	1495	853	332	134	16	4	0	1		
	260-270	1862	4974	5389	3575	2433	1817	991	619	198	57	13	7			
	270-280	1945	5607	5971	3875	2732	1750	1062	572	209	51	11	1			
	280-290	2159	6009	6110	3912	2255	1356	803	385	152	27	8	5			
	290-300	2211	5849	5690	3327	1878	1075	529	251	107	41	11	5	0	1	
	300-310	2208	5413	4522	2601	1252	702	358	154	78	34	7	4			
	310-320	2250	4982	3556	1786	906	431	220	117	56	18	5	2			
	320-330	2066	4311	2693	1326	649	349	187	100	28	21	8	1			
	330-340	2049	3623	2127	1128	654	362	183	78	38	11	4				
	340-350	1913	3113	1757	1073	698	473	306	149	57	15	3				
>350	1899	2726	1530	1041	739	506	335	156	53	9	1					

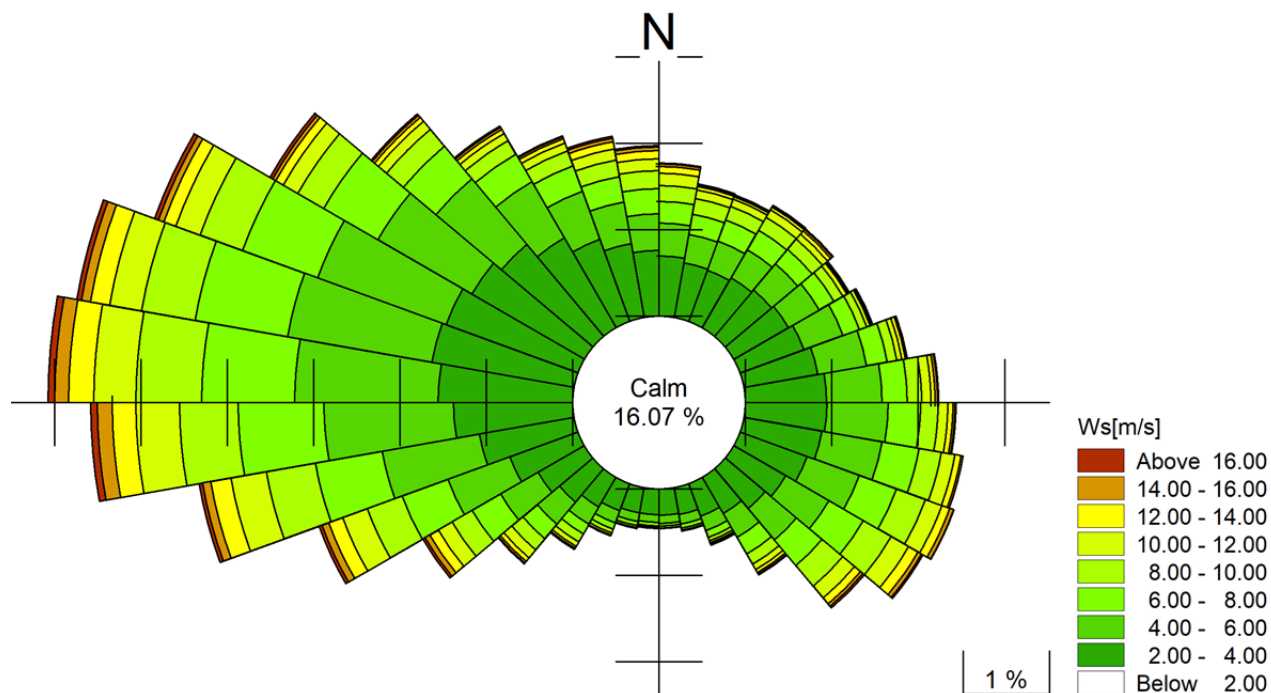


Figura 3-5 Rosa del vento per il punto MWM (Lon 14.775° E, Lat 38.537° N) per il periodo 1979-2019, con la discretizzazione per settori di direzione di provenienza. La calma, qui associata a intensità inferiori a 2 m/s, si verifica per il 16% del tempo, ovvero per circa 2 mesi all'anno in media.

### 3.1.2 Dati di moto ondoso

Dalla serie storica di altezza d'onda significativa al largo estratta dal database MWM emerge che nel periodo dei 41 anni considerati si raggiungono valori massimi di altezza significativa  $H_s$  fino a oltre 7.5 m.

Il valore massimo presente nella serie risulta associato alla mareggiata del 31 Gennaio 1988 (con un valore di altezza d'onda significativa  $H_s$  al picco pari a circa 7.6 m), seguito da quella dell'11 Gennaio 1987 ( $H_s$  al picco pari a circa 7.5 m). L'analisi dei dati evidenzia che negli ultimi vent'anni non vi sono eventi caratterizzati da altezza significativa al picco superiore ai 7 m.

Dall'analisi della rosa del clima ondoso (Figura 3-7) e della tabella delle frequenze di occorrenza (Tabella 3-3) si evince che le mareggiate più frequenti e più intense provengono dal settore di Ponente, con particolare riferimento alle direzioni di provenienza comprese tra 270°N e 310°N. Complessivamente, tale settore racchiude circa il 43% delle onde presenti nel database, corrispondente a poco più di 5 mesi / anno in media.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica per circa il 20% del tempo (corrispondenti a circa 2.5 mesi / anno in media).

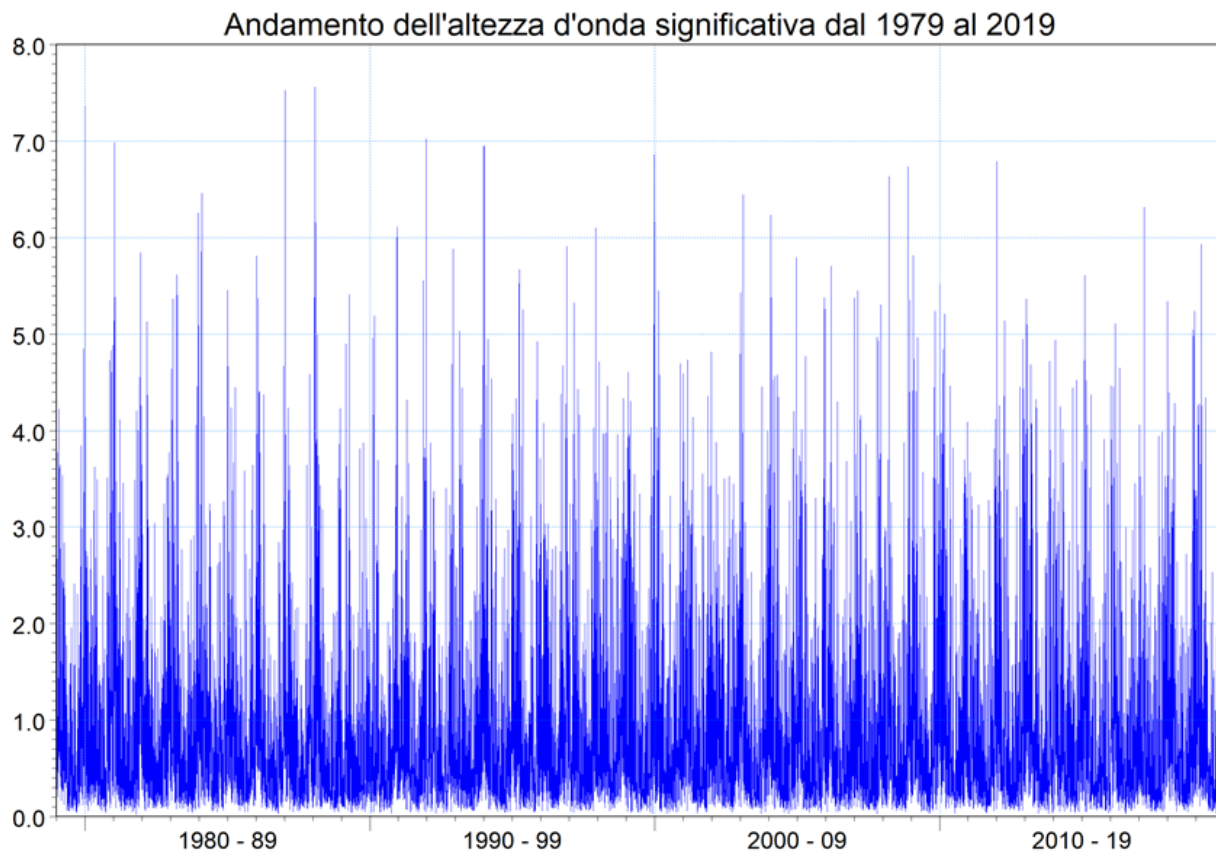


Figura 3-6 Andamento delle altezze d'onda nel punto MWM (Lon 14.775° E, Lat 38.537° N)

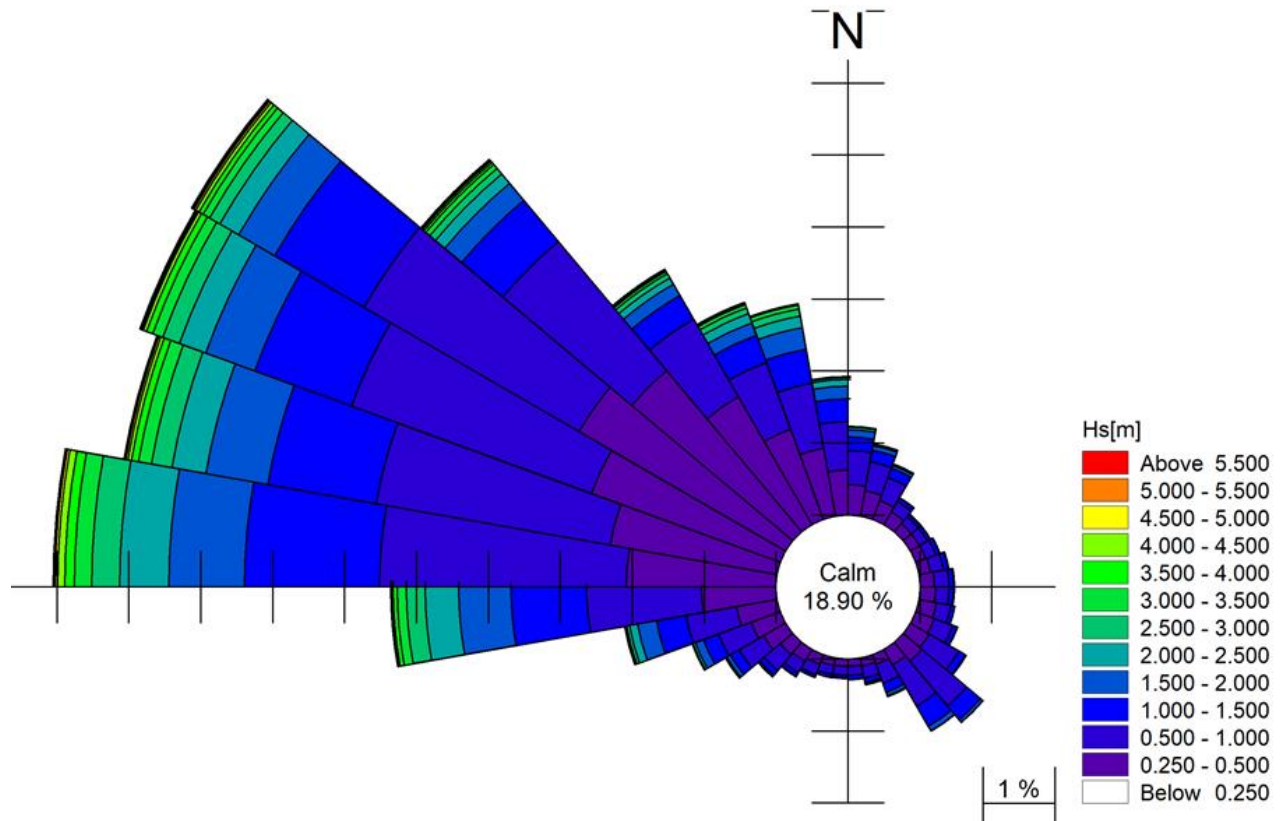


Figura 3-7 Rosa del clima ondoso al largo per il punto MWM (Lon 14.775° E, Lat 38.537° N)

**Tabella 3-3 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (in ore) per il punto MWM (Lon 14.775° E, Lat 38.537° N) per l'intero periodo 1979-2019**

		Hs[m]																
		<0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	>8.0
MWD[°]	<10	3193	1689	700	343	120	38	9	11	4	2							
	10-20	2427	1471	570	248	68	29	6	2									
	20-30	1836	1222	519	151	57	11											
	30-40	1285	593	173	33	16	3											
	40-50	964	445	132	42	6												
	50-60	940	458	163	27	7												
	60-70	946	513	209	35	5	1											
	70-80	1047	667	253	30	3												
	80-90	1261	732	230	48	6												
	90-100	1395	656	238	35													
	100-110	1458	739	200	18													
	110-120	1488	987	245	20													
	120-130	1603	1712	384	43													
	130-140	1669	2912	924	150	8												
	140-150	1184	2369	1177	256	27												
	150-160	712	1003	502	170	54	1											
	160-170	588	606	243	84	27	10											
	170-180	535	465	183	28	9	2											
	180-190	559	449	151	25	5	3											
	190-200	617	450	141	22	1												
	200-210	775	563	111	29	10												
	210-220	1023	674	183	48	3												
	220-230	1283	1047	303	93	22	3	1										
	230-240	1890	1399	532	210	66	13	5										
	240-250	2487	1735	807	424	136	28	14	2	1								
	250-260	3366	2553	1505	943	410	166	73	31	1	1							
	260-270	6750	5735	3795	2592	1694	925	462	188	81	42	12	6	1	1	5	1	
	270-280	11640	12324	6753	3776	2483	1373	873	477	349	134	73	25	8	8	1		
	280-290	11983	11857	5519	3146	1721	1052	641	373	168	94	52	33	14	7	1		
	290-300	14817	12766	5165	2610	1398	866	535	343	160	86	64	20	10	11	4	1	
	300-310	18224	12406	5166	2077	1097	591	377	238	170	104	70	31	20	16	1		
	310-320	19167	8405	2694	1095	609	374	250	132	89	57	32	21	11	6	1		
	320-330	16384	4479	1369	653	367	243	122	63	45	22	8	1					
330-340	11952	3546	1444	673	480	301	173	73	35	12								
340-350	8005	3307	1731	1077	600	349	203	47	12	1								
>350	4794	2414	1157	615	349	96	28	15	8	2								



### 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 Palermo, il più vicino al sito con maggior disponibilità di dati recenti continui (dal 1992 al 2019).

Lo strumento, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale ([www.mareografico.it](http://www.mareografico.it)), è ubicato presso la stazione navale della Guardia di Finanza, alla radice del molo CT Bersagliere, Lat 38° 07' 12", Lon 13° 22' 22", (Figura 3-8).

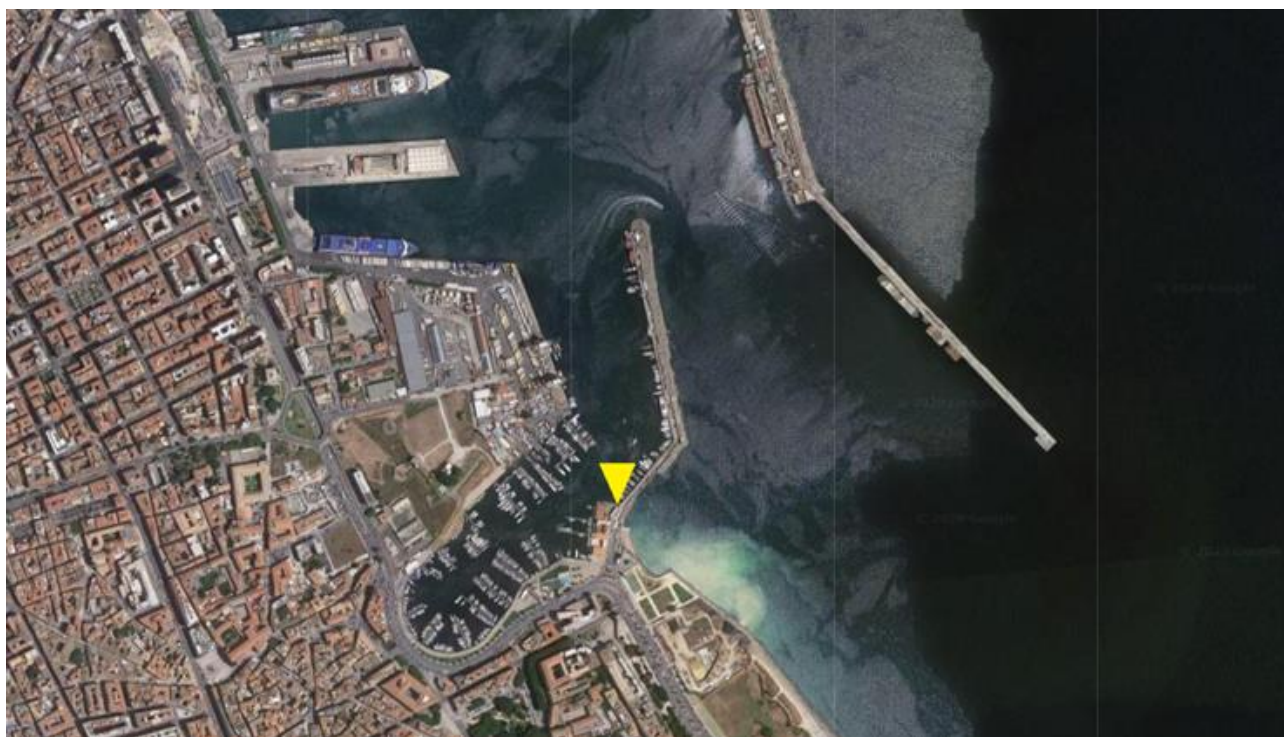
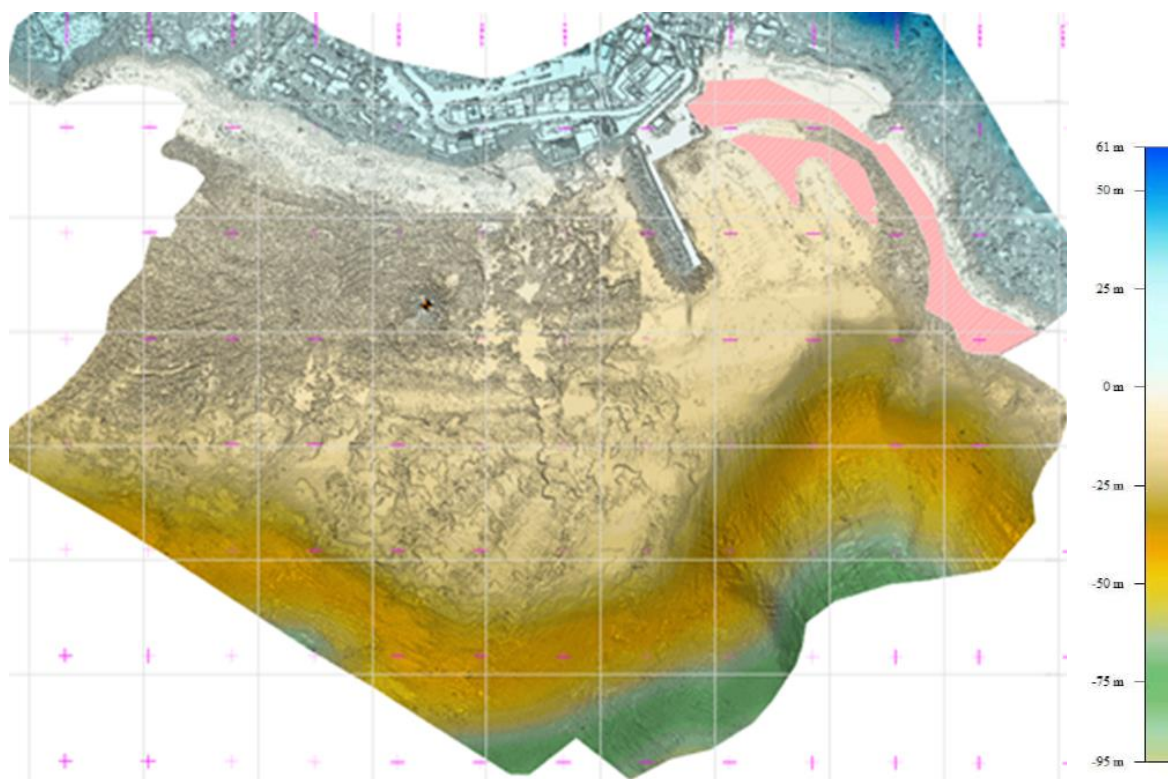


Figura 3-8 Ubicazione del mareografo di Palermo all'interno del porto

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 5.3.

### 3.3 Dati topo-batimetrici

Per la caratterizzazione topo-batimetrica del sito si è prevalentemente fatto riferimento al recente rilievo di dettaglio predisposto da Geonautics nell'Agosto del 2020 (Figura 3-9).



**Figura 3-9 Rilievo di dettaglio dell'area oggetto dell'intervento in progetto (Geonautics, Agosto 2020)**

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 3-10 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 Rinella, 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 dell'isola di Salina limitrofa al porto di Rinella e l'area di mare antistante, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 9.5 km e un'estensione verso il largo di 4.5 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 mese di Agosto 2020 da Geonautics.

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

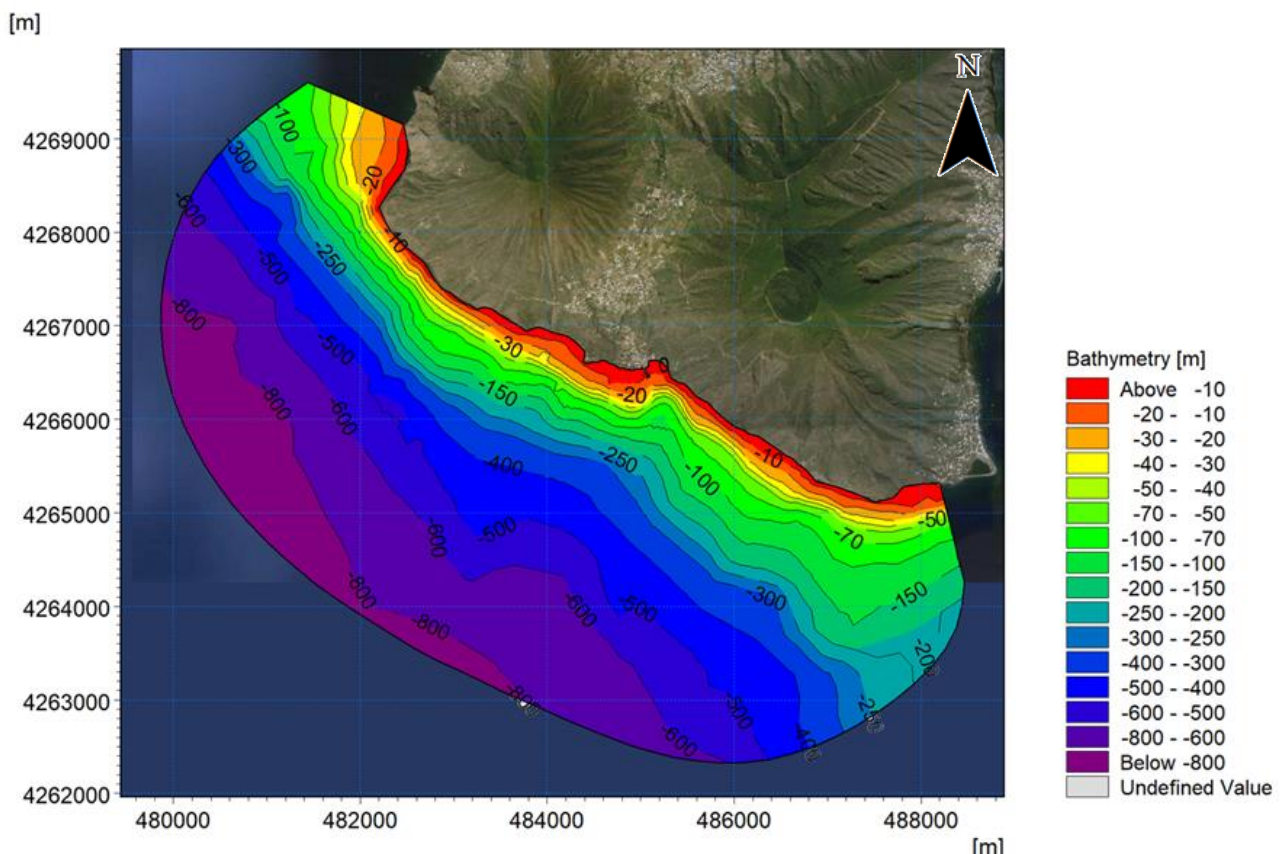


Figura 4-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 250 m, per arrivare a circa 30 m nella zona prossima al sito di studio. In totale, la *mesh* di calcolo è costituita da circa 7'700 elementi (Figura 4-2).

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).



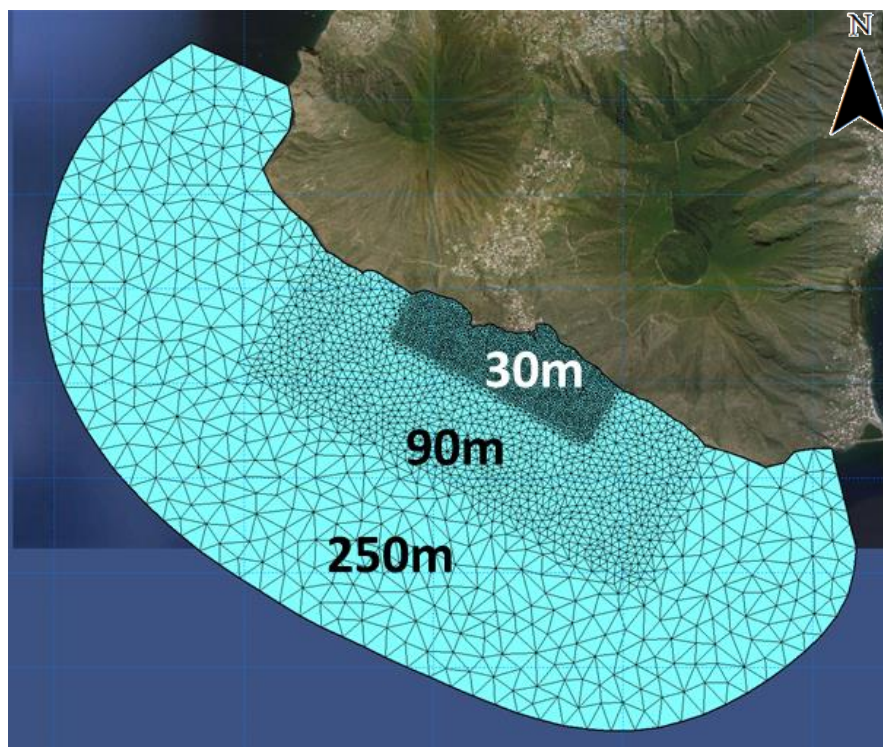


Figura 4-2 Rappresentazione della differente risoluzione della mesh di calcolo utilizzata nel modello di propagazione del moto ondoso MIKE 21 SW

## 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 sottocosta.

In queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che 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 Rinella e ha permesso di ottenere le principali grandezze d'onda in tutti i punti del dominio di calcolo.

In particolare, la variazione cromatica mette bene in evidenza l'effetto della rifrazione (il fronte d'onda tende a disporsi parallelo a costa) per le onde da Libeccio e da Ponente, nonché l'effetto di parziale protezione che la conformazione dell'isola di Salina garantisce a Rinella per le ondate da Ponente e, soprattutto, da Maestrale.

In termini generali i risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le caratteristiche pendenze elevate dell'isola di Salina determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa.

A seguire si riportano alcuni esempi di mappe di distribuzione dell'altezza d'onda, caratterizzate da una differente direzione di provenienza.

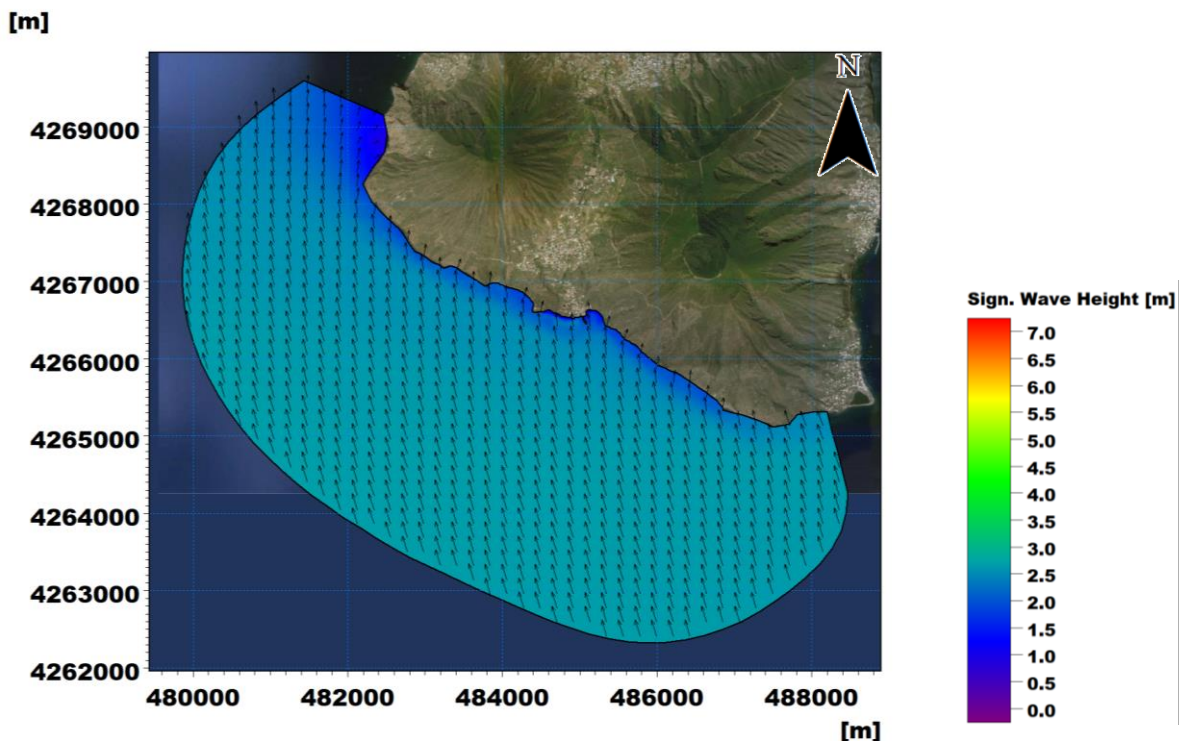


Figura 4-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento del 31 Marzo 1981 ore 6, caratterizzato al largo da  $H_s= 2.7$  m,  $T_p= 6.6$  s e  $MWD= 163^\circ N$

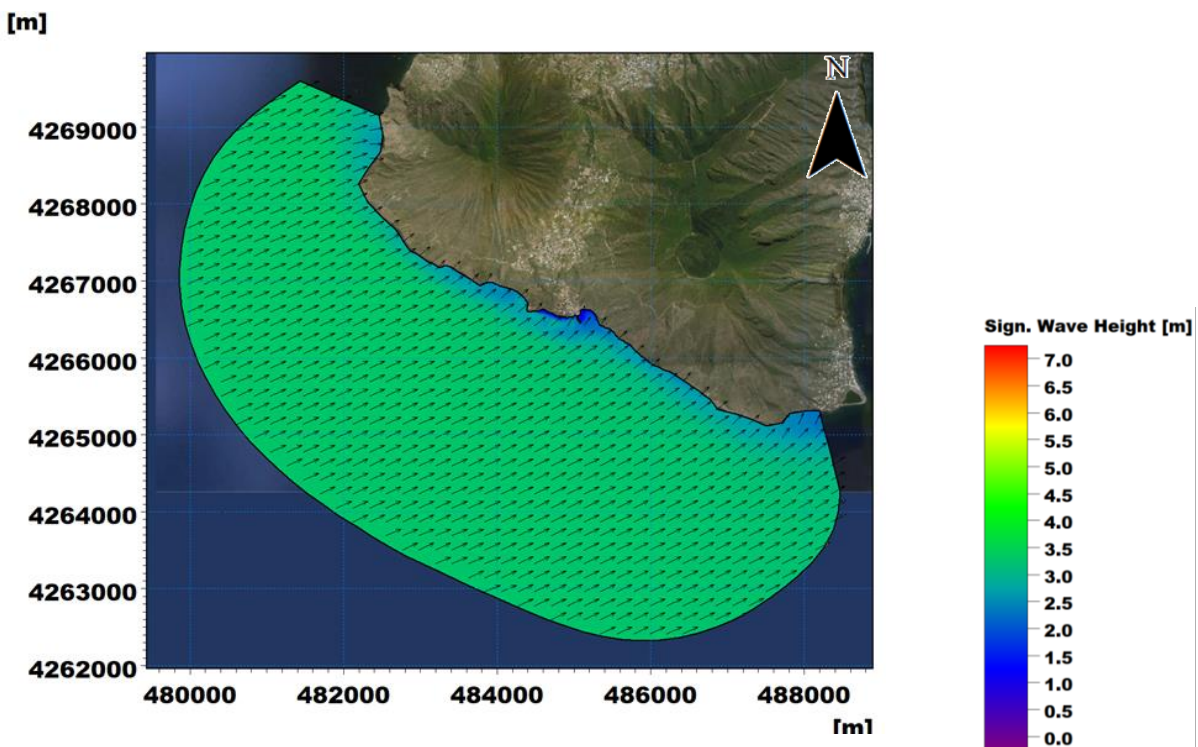


Figura 4-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento del 18 Dicembre 2010 ore 5, caratterizzato al largo da  $H_s= 3.3$  m,  $T_p= 7.9$  s e  $MWD= 246^\circ N$



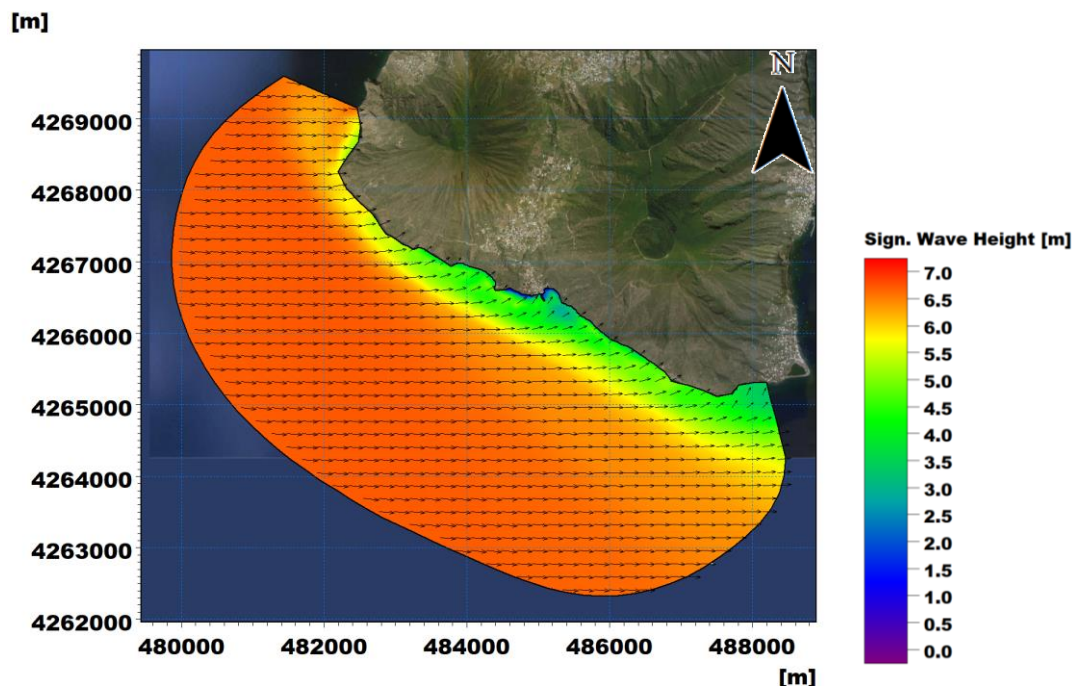


Figura 4-5 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento del 12 Gennaio 1987 ore 4, caratterizzato al largo da  $H_s= 6.7$  m,  $T_p= 12.3$  s e  $MWD= 275^\circ N$

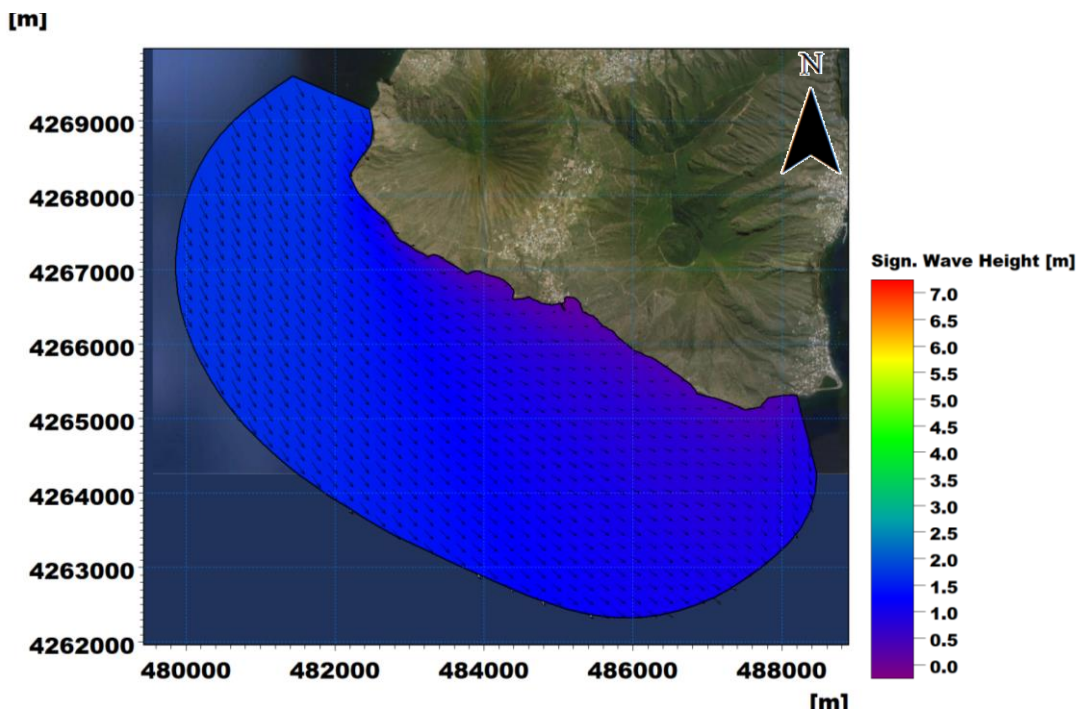


Figura 4-6 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento del 20 Maggio 2010 ore 22, caratterizzato al largo da  $H_s= 1.7$  m,  $T_p= 3.4$  s e  $MWD= 332^\circ N$

Osservando le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa sull'intero dominio di calcolo si evince che:

- per le onde provenienti da Scirocco, l'attenuazione dell'altezza d'onda significativa avviene per la sola interazione con il fondale, in prossimità della costa dell'isola di Salina (Figura 4-3);
- per gli eventi di mareggiata da Libeccio (Figura 4-4), ed in maniera più evidente per quelli provenienti da Ponente (Figura 4-5), si osserva la rotazione della direzione del moto ondoso nella trasposizione dal largo verso riva per effetto del fenomeno della rifrazione;
- per le onde da Maestrale, la zona di interesse per l'intervento in progetto rimane protetta per la naturale morfologia dell'isola di Salina (Figura 4-6).

Per supportare la progettazione del nuovo molo portuale si è quindi proceduto con l'estrazione della serie di altezza d'onda significativa in un punto sottocosta, denominato *punto S*, a circa 1 km a Sud rispetto all'approdo di Rinella, 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 modello bidimensionale integrato onda-corrente (Capitolo 6), caratterizzato da un dominio di calcolo ridotto alla zona di interesse, ma predisposto con una maggior risoluzione spaziale degli elementi della mesh.

A seguire si riporta l'ubicazione del punto S (Figura 4-7) e la relativa rosa del clima ondoso (Figura 4-8).



**Figura 4-7 Ubicazione del punto di estrazione S rappresentata alla scala locale (a sinistra) e ad una scala più ampia (a destra, con indicazione del punto di estrazione MWM)**

Il punto S, caratterizzato da una profondità di 250 m, è condizionato dalla vicinanza con la costa, e dalla rotazione che il moto ondoso compie nell'avvicinarsi alla riva. Rispetto alla rosa del clima ondoso al largo (Figura 3-5) le onde più frequenti ed alte provengono da un più ristretto settore di Ponente,  $260^{\circ}\text{N} < \text{MWD} < 280^{\circ}\text{N}$ , mentre assume maggior importanza, anche per la valutazione della penetrazione degli eventi di mareggiata nel bacino portuale, il clima ondoso da Scirocco,  $130^{\circ}\text{N} < \text{MWD} < 160^{\circ}\text{N}$ .

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

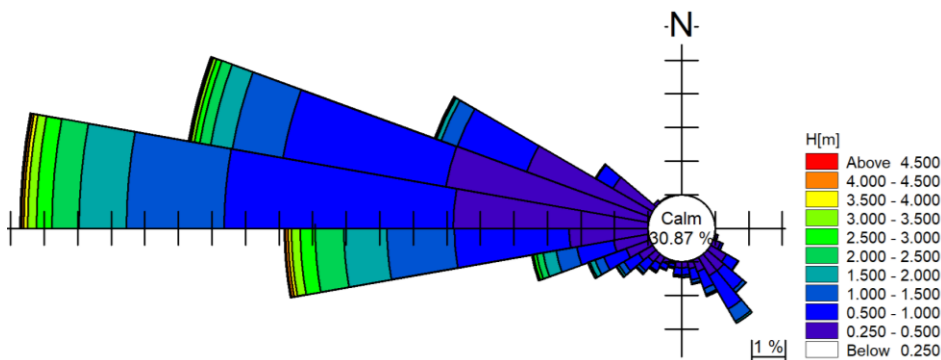


Figura 4-8 Rosa del moto ondoso per il punto S, a circa 1 km al largo del porto di Rinella

Tabella 4-1 Frequenza per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (in ore) per il punto S per l'intero periodo 1979-2019

		Hs[m]															
		<0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	>7.5
MWD[°]	<10	247	1														
	10-20	205															
	20-30	181															
	30-40	153															
	40-50	178															
	50-60	175															
	60-70	235															
	70-80	304															
	80-90	460	1														
	90-100	865															
	100-110	2214	14														
	110-120	2883	246	3													
	120-130	4385	1375	85													
	130-140	4204	2643	420	15												
	140-150	3750	4083	1496	237	12											
	150-160	2193	1955	646	227	50	1										
	160-170	1378	1195	350	112	29	10										
	170-180	1030	759	229	33	13	2										
	180-190	983	732	205	28	5	1										
	190-200	533	365	123	25	3											
	200-210	845	563	105	30	11											
	210-220	1272	822	211	52	2											
	220-230	1768	1248	352	104	26	4	1									
	230-240	2853	1787	649	258	79	18	8									
	240-250	4439	2571	1039	567	195	43	17	3	1	1						
	250-260	6524	3999	2305	1423	693	349	142	50	2	1	0	1				
	260-270	14404	12257	7300	4611	3045	1600	899	400	242	89	36	10	4	8	5	
	270-280	31404	24384	#####	5152	2875	1609	926	426	246	110	68	28	5			
280-290	39940	17777	5486	2369	1162	608	371	171	88	43	8	2	2				
290-300	41331	7907	1831	513	179	55	16	7									
300-310	25735	2165	173	2													
310-320	4127	27															
320-330	1280	12															
330-340	830	3															
340-350	451	2															
>350	285	1															



## 5 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI

### 5.1 Altezza d'onda significativa

Per definire il periodo di ritorno degli eventi ondosi da considerare nel dimensionamento delle opere è stato fatto riferimento a quanto riportato nelle "Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime" edite a cura del Consiglio Superiore LL.PP. nel 1996. Il tempo di ritorno viene definito in funzione di:

- tipo di infrastruttura;
- livello di sicurezza richiesto;
- rischio di perdite di vite umane;
- danneggiamento ammesso;
- ripercussione economica in caso di danneggiamento.

La combinazione del tempo di vita dell'opera  $T_V$  e della probabilità di danneggiamento  $P_f$  determina il tempo di ritorno dell'evento di progetto  $T_{rp}$ , secondo la seguente espressione:

$$T_{rp} = T_V / \left[ -\ln(1 - P_f) \right]$$

Rimandando all'elaborato D.05 per i dettagli delle caratteristiche specifiche individuate per ciascun corpo d'opera e le assunzioni adottate, si riportano i tempi di ritorno richiesti a supporto della progettazione della nuova struttura, pari a:

- 50 anni, per le verifiche di tracimazione;
- 70 anni, per il dimensionamento delle opere a gettata previste;
- 154 anni, per il dimensionamento dei cassoni e del muro paraonde in progetto.

Sulla base della serie di valori di altezza d'onda significativa  $H_s$  estratti nel punto S, si è quindi proceduto con l'analisi statistica degli eventi estremi. 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 S, 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);

## STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

- *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*.

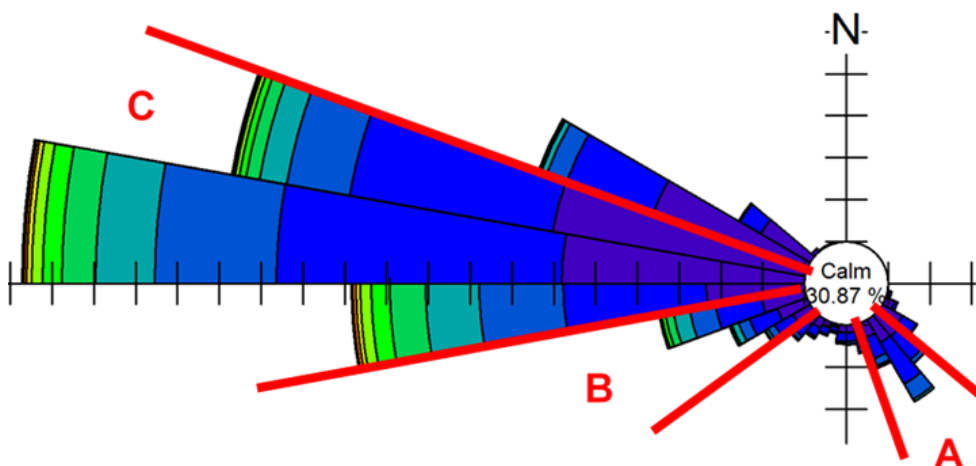
Nel caso in esame, per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalità dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri, che meglio rappresentava l'andamento del campione.

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.

Gli eventi di volta in volta selezionati per ciascun settore sono stati pari a 60.

Sulla base della frequenza di accadimento e significatività per l'approdo di Rinella, in accordo con l'intero gruppo di lavoro, sono stati selezionati per lo studio dell'area in esame i seguenti settori di 30°:

- **Settore A:** eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 130°N e 160°N (MWD media di riferimento: 145°N);
- **Settore B:** eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 230°N e 260°N (MWD media di riferimento: 245°N);
- **Settore C:** eventi caratterizzati da una direzione media di provenienza compresa tra 260°N e 290°N (MWD media di riferimento: 275°N).

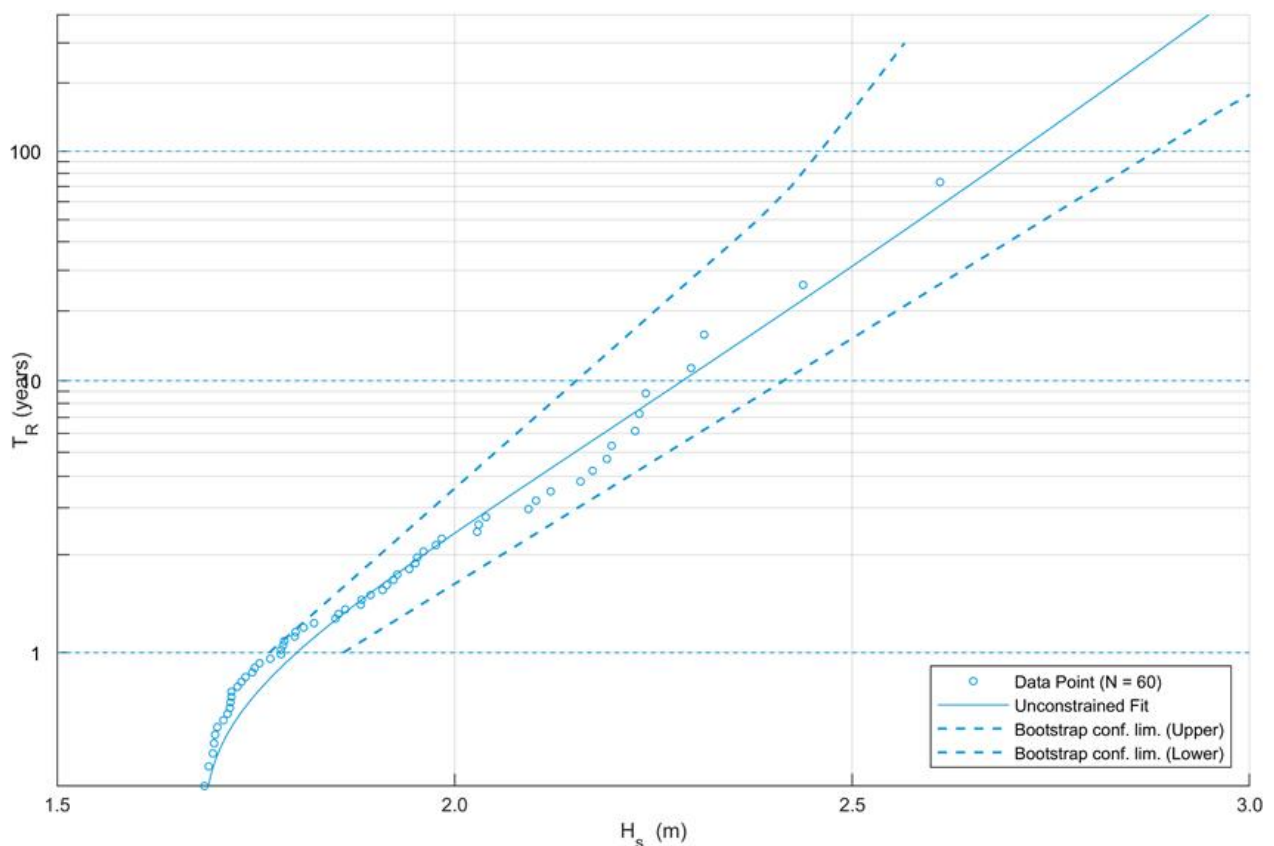


**Figura 5-1 Rosa del clima per il punto S con indicazione dei tre settori selezionati per l'analisi statistica degli eventi estremi: Settore A, con 130°N < MWD < 160°N (Scirocco); Settore B, con 230°N < MWD < 260°N (Libeccio); Settore C, con 260°N < MWD < 290°N (Ponente)**

L'ampiezza del settore di Ponente (settore C) è stata selezionata, cautelativamente, comprendendo le direzioni degli eventi caratterizzati dai valori più elevati di altezza d'onda significativa, comprese le mareggiate storicamente più intense registrate a Salina (1 Gennaio 1987, 31 Dicembre 1979, 22 Dicembre 1983, 16 Gennaio 1981, 31 Gennaio 1988), e comunque con la più alta frequenza di accadimento. Si è ritenuto significativo anche valutare le sollecitazioni per le onde provenienti dal settore di Libeccio (settore B), caratterizzato da eventi meno intensi e molto meno frequenti, ma con una direzione potenzialmente più penetrante nel bacino portuale di Rinella. L'analisi degli eventi con direzione media di propagazione da Scirocco (settore C) sono stati inseriti in considerazione dell'assenza di ostacoli e/o di attenuazioni alla propagazione dell'onda dal largo sino all'interno dello specchio acqueo dell'approdo di Rinella e risulta particolarmente utile ai fini della valutazione del *downtime* del bacino (capitolo 7).

**5.1.1 Analisi degli eventi estremi non stagionale**

A seguire si riportano i risultati grafici della distribuzione statistica per ognuno dei settori direzionali identificati e una tabella riassuntiva con le altezze d'onda significativa per assegnato tempo di ritorno.



**Figura 5-2 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al Settore direzionale A 130°N-160°N, MWD=145°N, estratte nel punto S, 1 km al largo del Porto di Rinella**

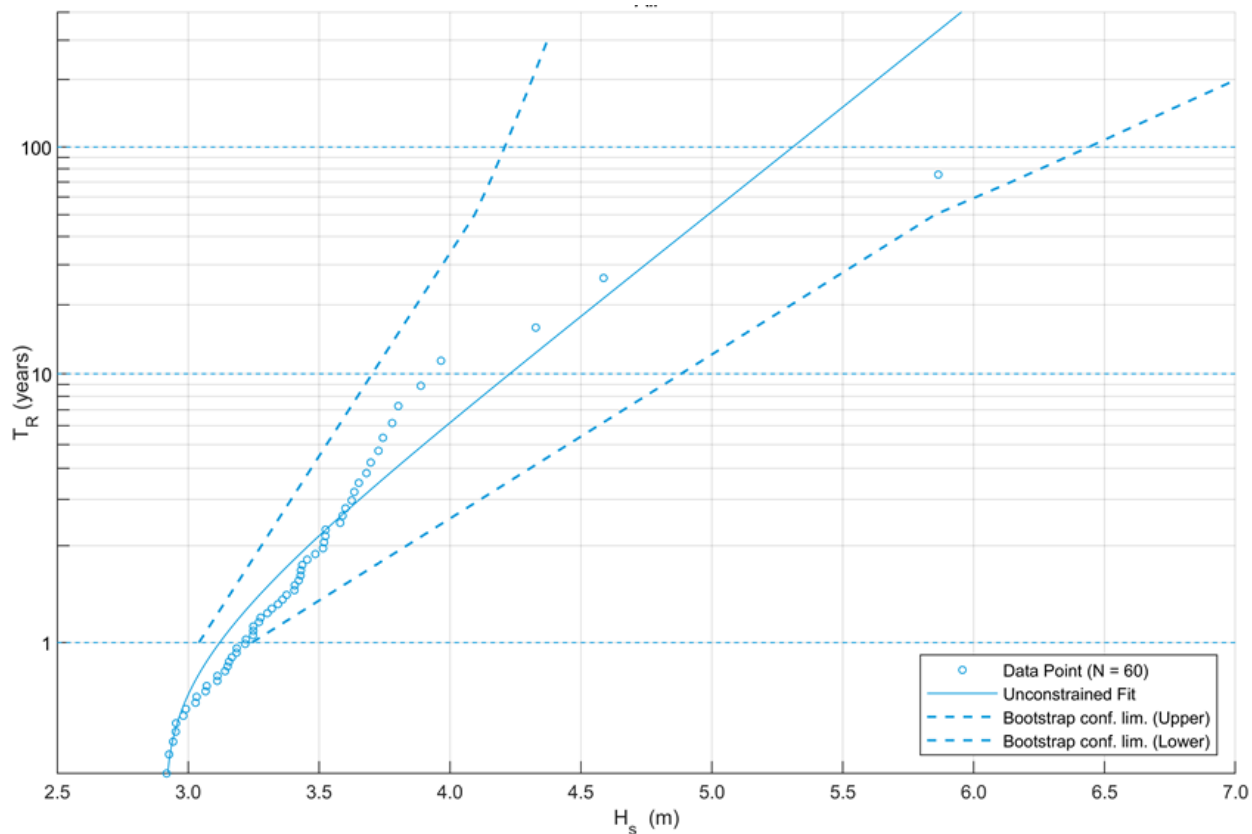


Figura 5-3 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al Settore direzionale B 230°N-260°N, MWD=245°N, estratte nel punto S, 1 km al largo del Porto di Rinella



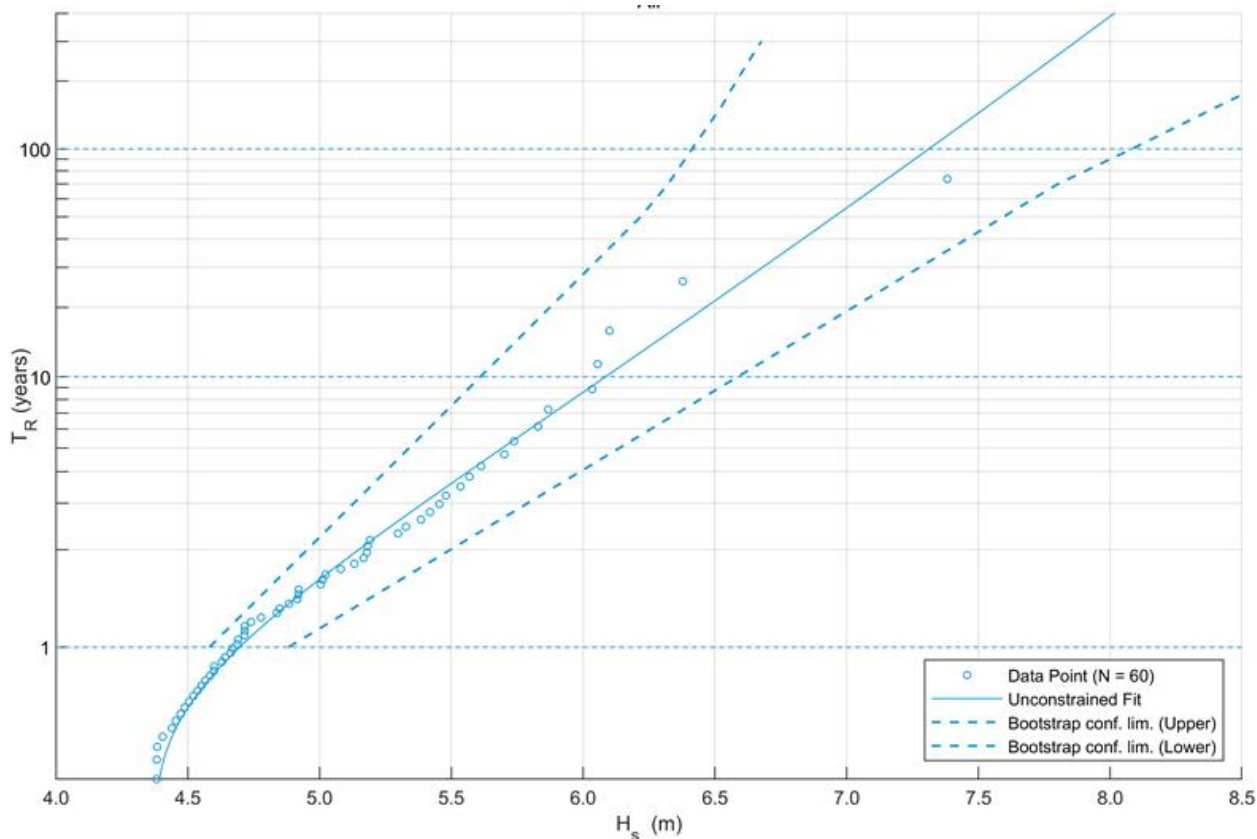


Figura 5-4 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi degli ultimi 41 anni relative al Settore direzionale C 260°N-290°N, MWD=275°N, estratte nel punto S, 1 km al largo del Porto di Rinella

Tabella 5-1 Valori risultanti dalla statistica degli estremi per l'altezza d'onda significativa Hs per i vari settori direzionali A, B e C nel punto S

TR [anni]	SETTORE A SCIROCCO	SETTORE B LIBECCIO	SETTORE C PONENTE
	Hs [m]	Hs [m]	Hs [m]
1	1.80	3.12	4.70
50	2.58	4.99	6.95
70	2.65	5.14	7.13
100	2.71	5.31	7.31
154	2.78	5.51	7.53

**5.1.2 Analisi degli eventi estremi – stagionale (estiva)**

A seguire si riporta la distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi occorsi nella stagione estiva (da Giugno a Settembre) degli ultimi 41 anni (dati MWM), relativi ai tre settori direzionali studiati.

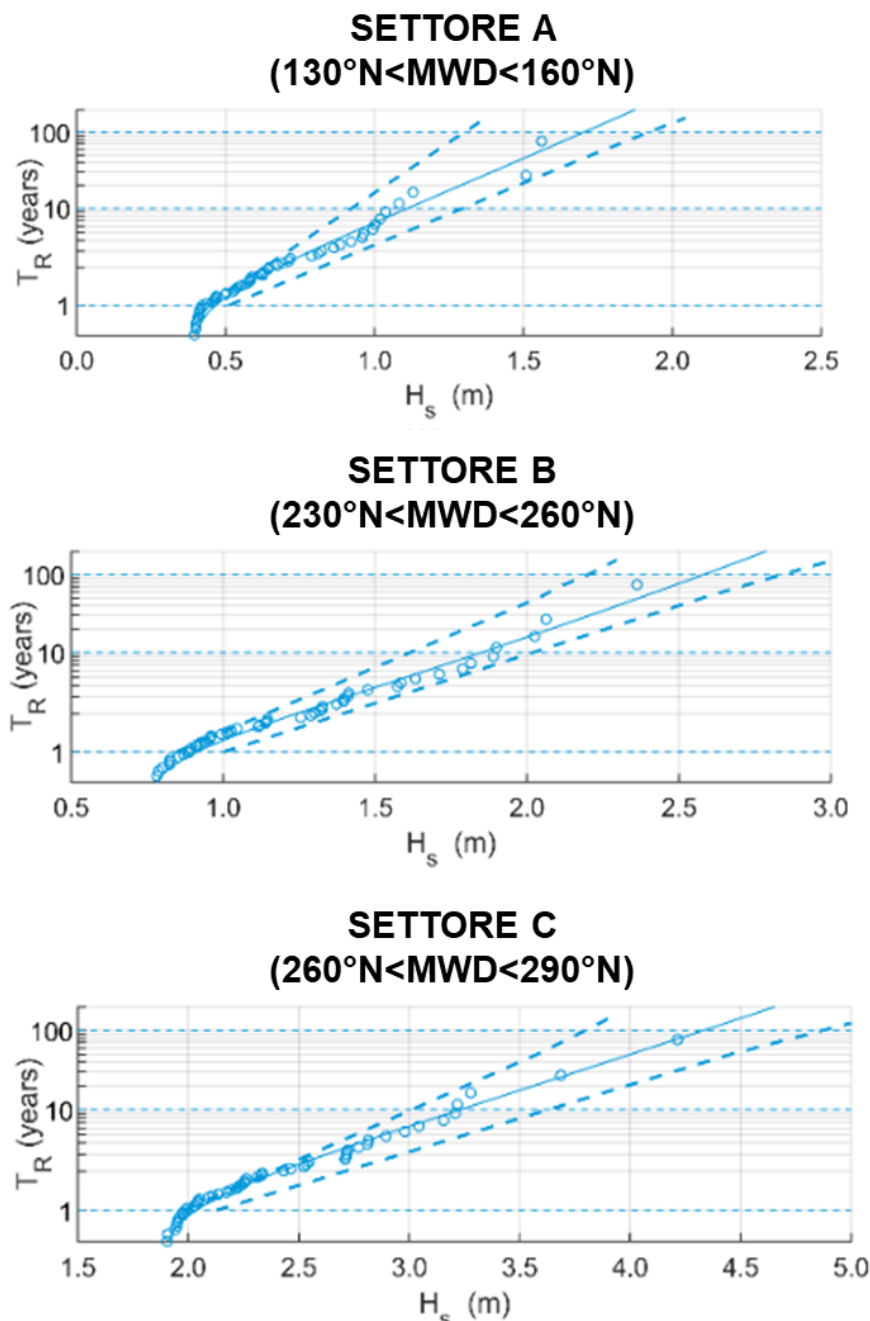


Figura 5-5 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relative alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi occorsi nella stagione estiva, Giugno-Settembre, degli ultimi 41 anni relative al Settore direzionale A, da 130°N a 160°N (in alto), al Settore B, da 230°N a 260°N (al centro), e al Settore C, da 260°N a 290°N (in basso)

**Tabella 5-2 Valori risultanti dalla statistica degli estremi, per la stagione estiva (Giugno-Settembre), per l'altezza d'onda significativa Hs per i vari settori direzionali A, B e C**

ANALISI STATISTICA ESTIVA		
Settore	TR [anni]	Hs [m]
A	50	1.41
B	50	2.13
C	50	3.41

## 5.2 Intensità del vento

L'analisi dei venti estremi è stata effettuata a supporto delle successive simulazioni del moto ondoso dal largo a costa. Per ogni settore direzionale d'onda, sono state individuate le direzioni di provenienza del vento in grado di contribuire all'innalzamento dell'onda nella sua propagazione verso costa. I venti estremi risultanti dall'analisi sono stati successivamente utilizzati quale ulteriore forzante locale nel modello bidimensionale integrato onda-corrente (Capitolo 5).

Per i valori di intensità del vento l'analisi statistica si basa sull'intera serie temporale dei dati estratti nel punto al largo (database MWM), estraendo un numero sufficientemente significativo di eventi statisticamente indipendenti (60, come per l'analisi statistica relativa all'altezza d'onda).

A seguire si riportano grafici e tabelle risultanti dall'analisi statistica direzionale della velocità del vento.

**Tabella 5-3 Valori di intensità del vento WS [m/s] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica direzionale**

Settore direzionale onda	Settore direzionale vento	TR 50 anni	TR 70 anni	TR 154 anni
		WS [m/s]	WS [m/s]	WS [m/s]
A (130°N<MWD<160°N)	90°<WD<180°N	21.3	21.6	22.1
B (230°N<MWD<260°N)	180°<WD<270°N	25.0	25.6	27.1
C (260°N<MWD<290°N)	230°<WD<320°N	26.3	27.0	28.5

### ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI INTENSITA' DEL VENTO SETTORE 90°N-180°N

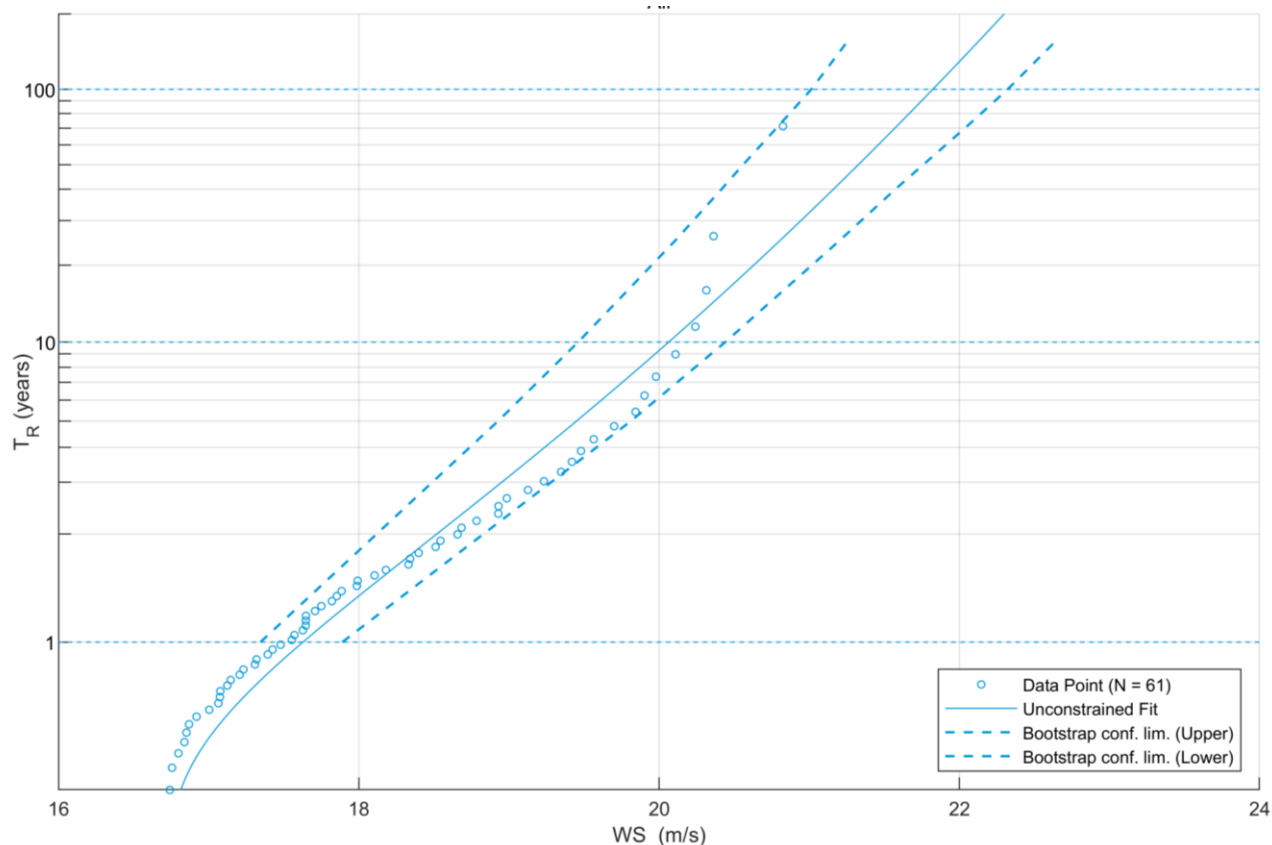


Figura 5-6 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento con provenienza dal secondo quadrante (90°N<WD<180°N) degli ultimi 41 anni estratte nel punto MWM al largo di Rinella



### ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI INTENSITA' DEL VENTO SETTORE 180°N-270°N

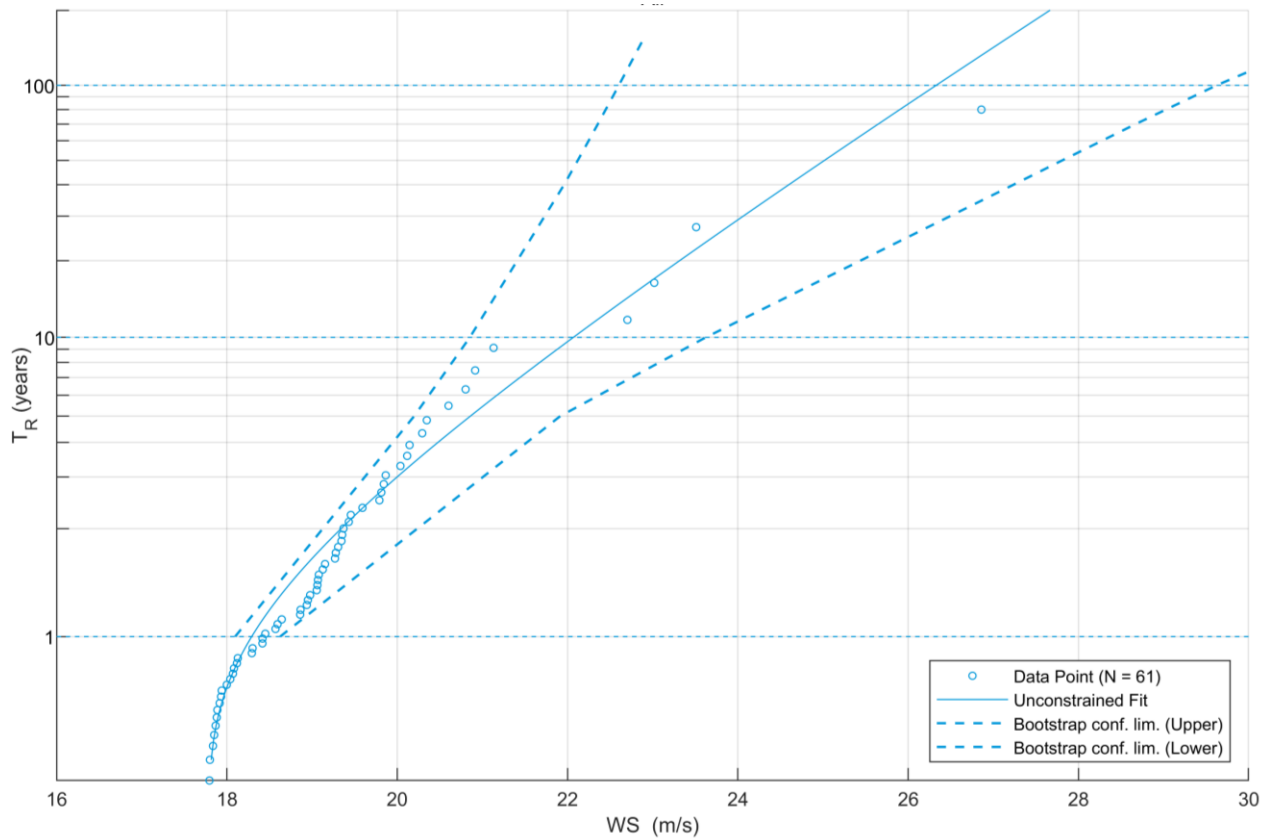
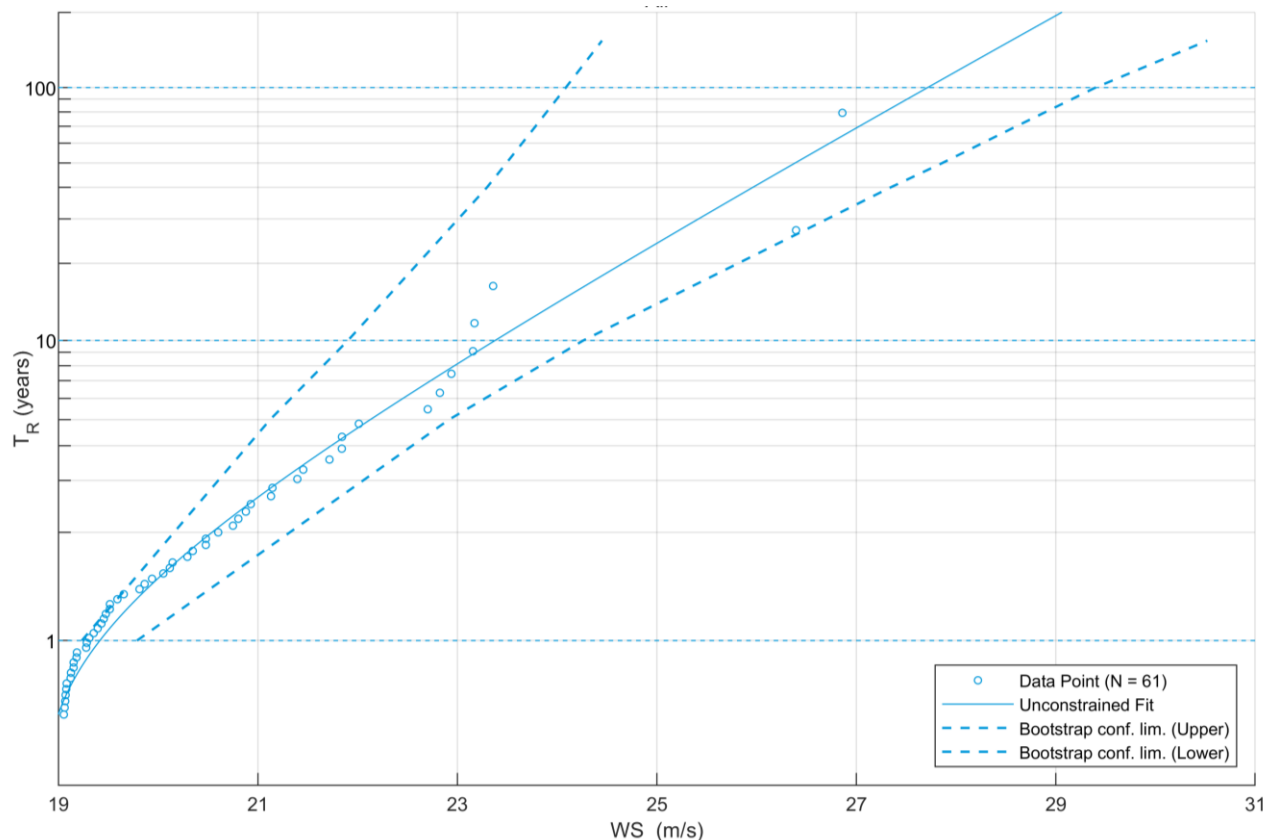


Figura 5-7 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento con provenienza dal terzo quadrante (180°N<WD<270°N) degli ultimi 41 anni estratte nel punto MWM al largo di Rinella

## ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI INTENSITA' DEL VENTO SETTORE 230°N-320°N



**Figura 5-8** Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi all'intensità del vento con provenienza dal terzo settore ( $230^{\circ}N < Wd < 320^{\circ}N$ ) degli ultimi 41 anni estratte nel punto MWM al largo di Rinella

### 5.3 Livello marino

L'analisi statistica dei dati di livello del mare si basa sulla serie di livello idrometrico registrata dal mareografo di Palermo. 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 è stata impostata sui 100 valori più elevati

registrati dal mareografo nel periodo di dati a disposizione, ed ha fornito i valori riportati in Tabella 5-4.

**ANALISI STATISTICA DEI VALORI ESTREMI DI LIVELLO MARINO**

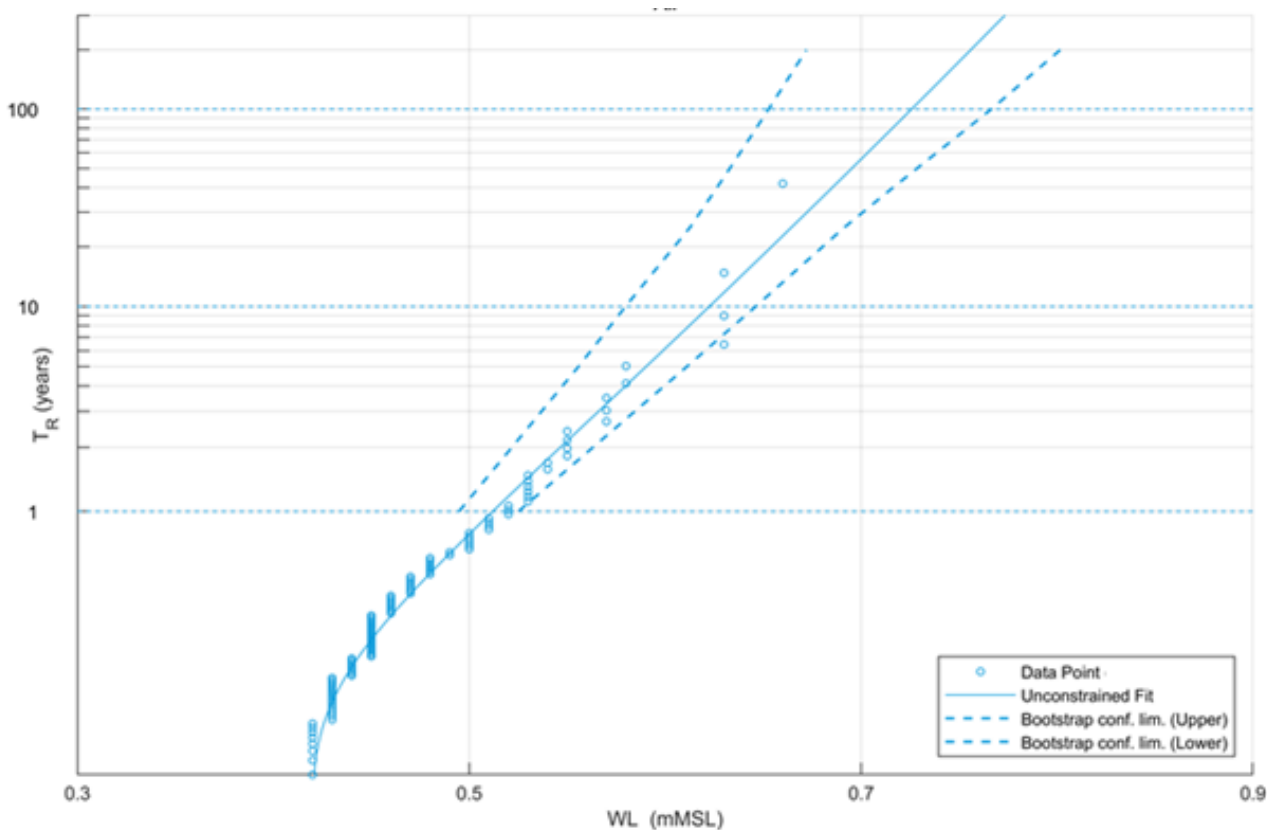


Figura 5-9 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai livelli marini registrati dal mareografo di Palermo (1992-2019)

Tabella 5-4 Valori di livello marino WL [m] per diversi periodi di ritorno TR, risultanti dall'analisi statistica

Mareografo Palermo	TR 50 anni	TR 70 anni	TR 154 anni
Livello marino WL [m]	0.70	0.71	0.75

## 6 MODELLAZIONE DI DETTAGLIO ONDA-CORRENTE

Al fine di simulare la distribuzione locale del moto ondoso e delle correnti in corrispondenza del porto di Rinella, il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves), già descritto in precedenza per la trasposizione da largo a riva, è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics).

Il modulo MIKE 21 HD (Hydrodynamics), cuore del codice bidimensionale MIKE 21, simula le variazioni di livello e di corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica. La versione Flexible Mesh utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale, al pari del modello d'onda, è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il modulo necessita di una serie di dati di input, che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

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

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno, ma anche la direzione e il verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascun elemento di calcolo, è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- velocità di corrente e direzione;
- densità, temperatura e salinità (se rilevanti).

Una descrizione di dettaglio del modulo idrodinamico HD del codice di calcolo MIKE 21 è disponibile in Allegato B.

### 6.1 Dominio di calcolo e batimetria

Il modello integrato 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 2.4 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 e la batimetria di calcolo.

Si specifica che, in considerazione della prevista rimozione della porzione rocciosa dello Scoglio dell'Ariana caratterizzata da profondità inferiori ai 5 m, si è provveduto, in accordo con il gruppo di lavoro, ad inserire tale variazione nella batimetria di calcolo.



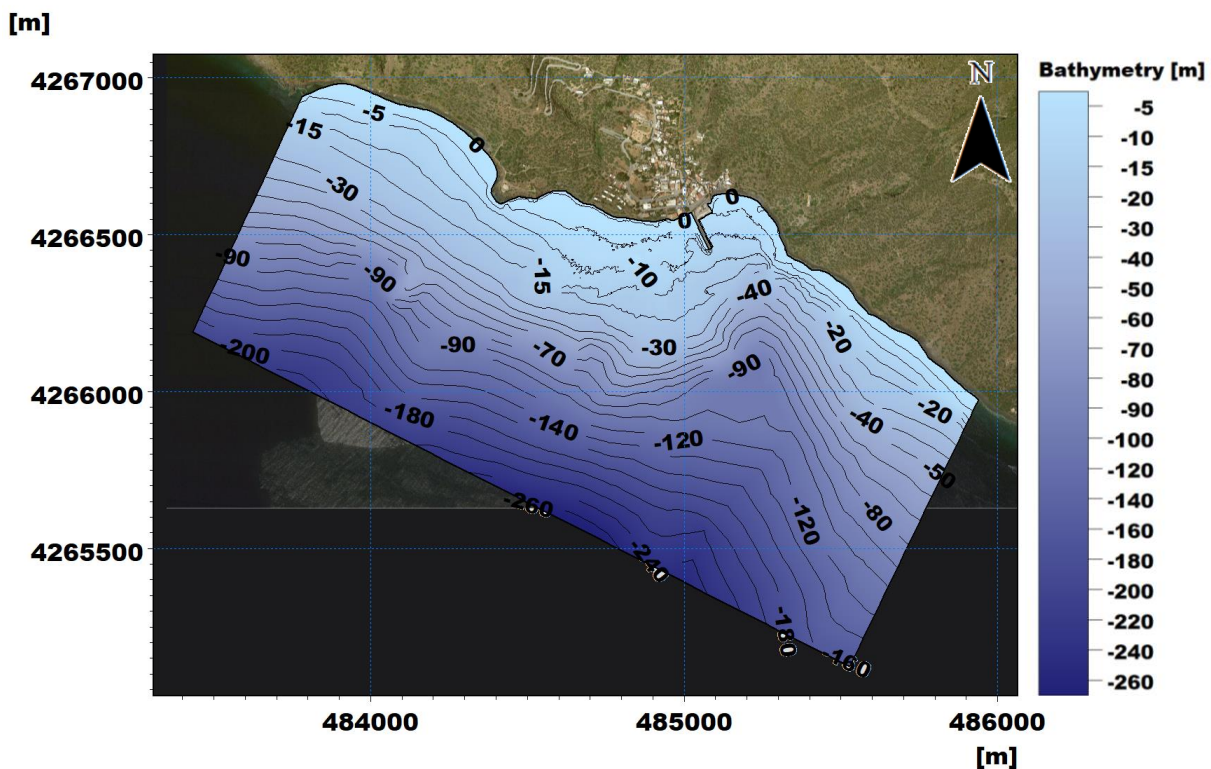


Figura 6-1 Batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

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 15 m, sino a 5 metri nell'area dell'intervento in progetto.

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.

In Figura 6-2 è illustrata la risoluzione della mesh di calcolo del modello, complessivamente costituita da circa 51'000 elementi.

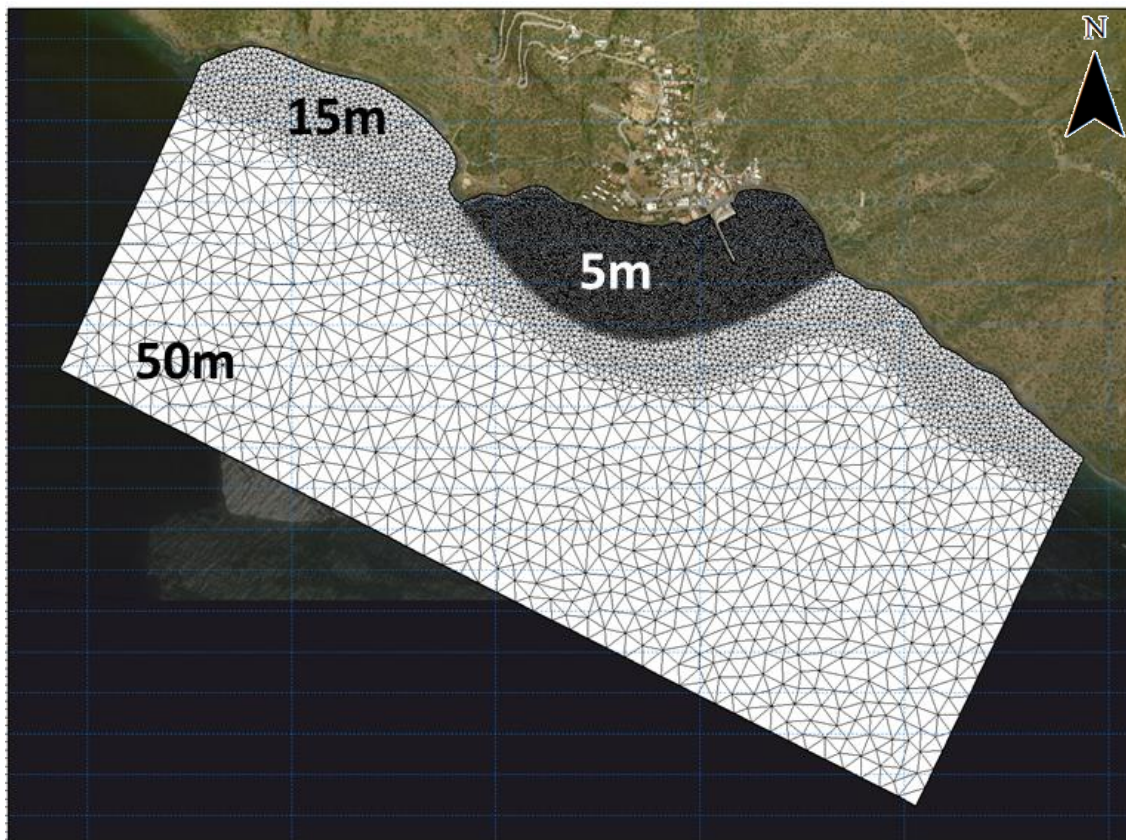


Figura 6-2 Risoluzione della mesh di calcolo del modello di dettaglio

## 6.2 Selezione delle condizioni d'onda

Come anticipato nel capitolo precedente, il modello integrato onda e corrente è stato utilizzato per fornire ai progettisti le indicazioni sulle caratteristiche delle onde sottocosta per il corretto dimensionamento dei vari corpi d'opera costituenti il nuovo molo e per la verifica di tracimazione dello stesso.

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

- 50 anni, a supporto della verifica della tracimazione;
- 75 anni, a supporto del dimensionamento delle opere a gettata;
- 154 anni, a supporto del dimensionamento di cassoni e paraonde.

I valori del periodo di picco  $T_p$  sono stati stimati attraverso le relazioni  $H_s-T_p$  definite sulla base del campione dati di ogni settore direzionale di  $30^\circ$  (da Figura 6-3 a Figura 6-5), mentre la direzione media dell'onda MWD è stata definita pari al valore centrale del settore stesso.

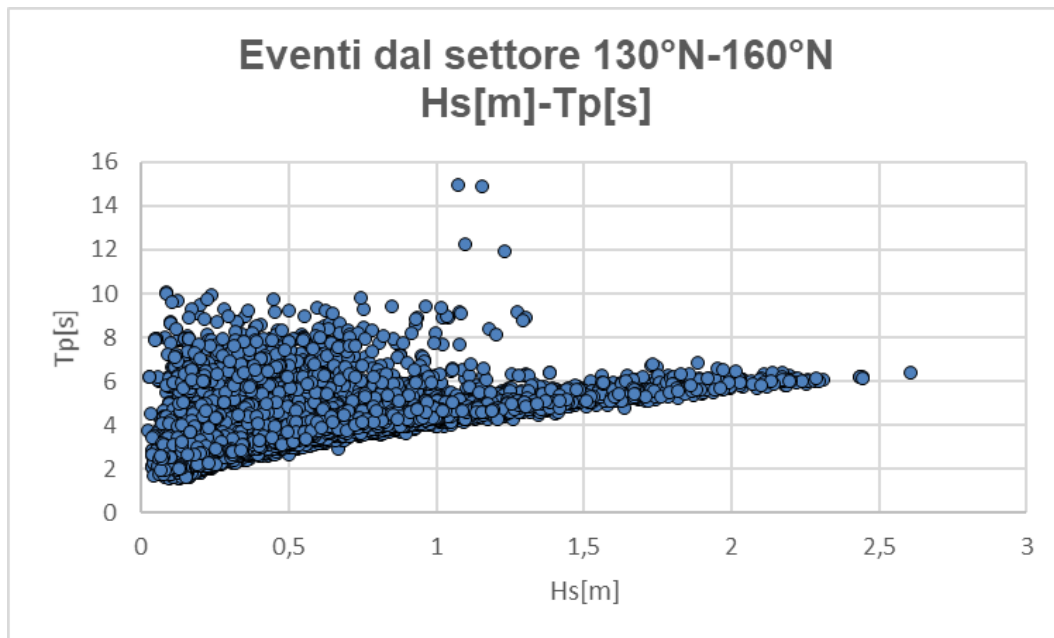


Figura 6-3 Campione dati Hs-Tp orari estratti nel punto S e provenienti dal settore direzionale di Sirocco, da 130°N a 160°N

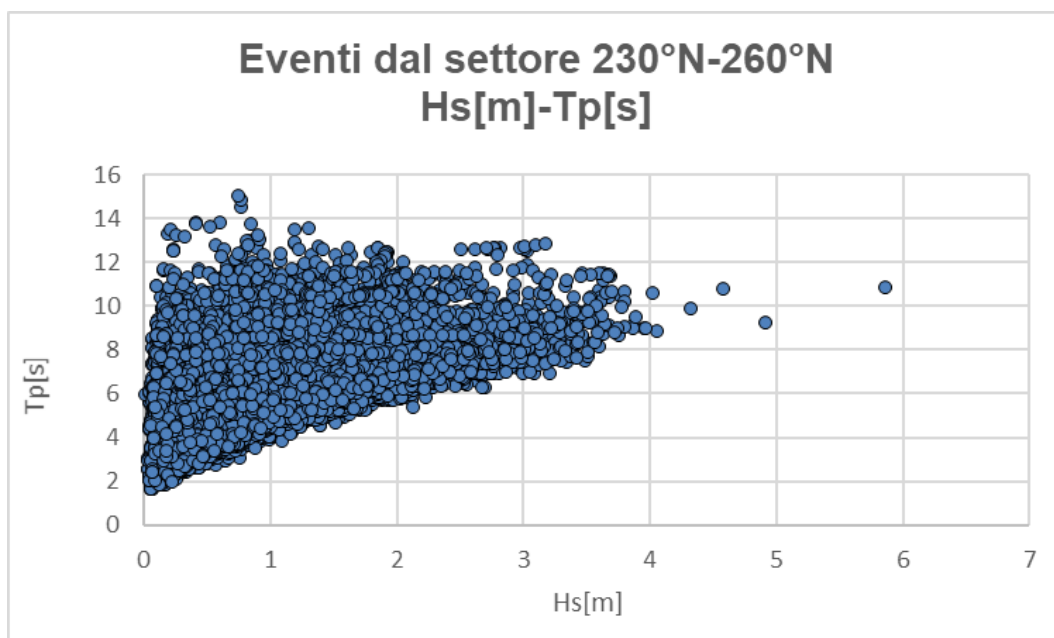


Figura 6-4 Campione dati Hs-Tp orari estratti nel punto S e provenienti dal settore direzionale di Libeccio, da 230°N a 260°N

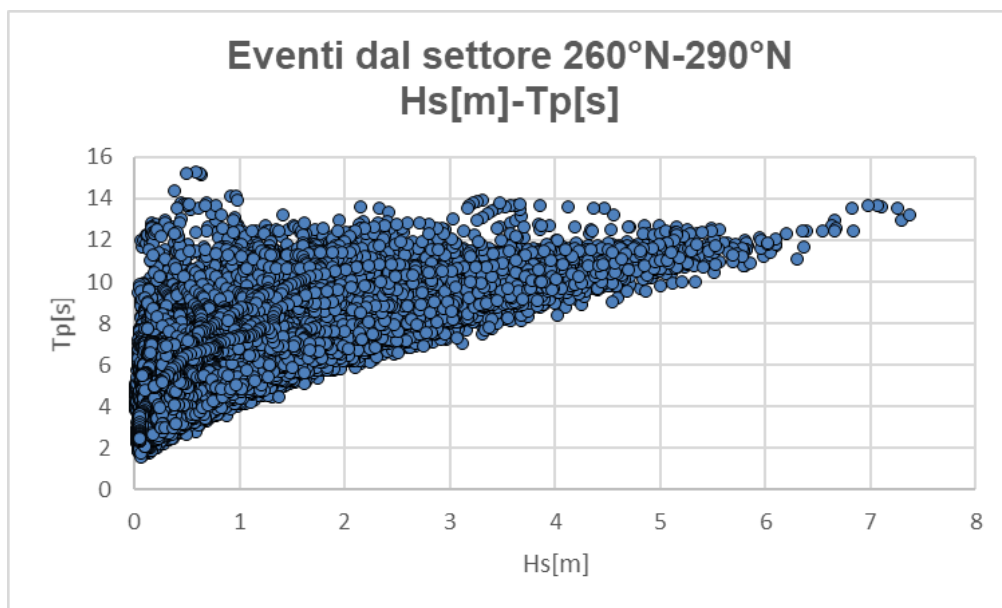


Figura 6-5 Campione dati Hs-Tp orari estratti nel punto S e provenienti dal settore direzionale di Ponente, da 260°N a 290°N

Nella tabella a seguire si riportano le caratteristiche delle condizioni d'onda simulate.

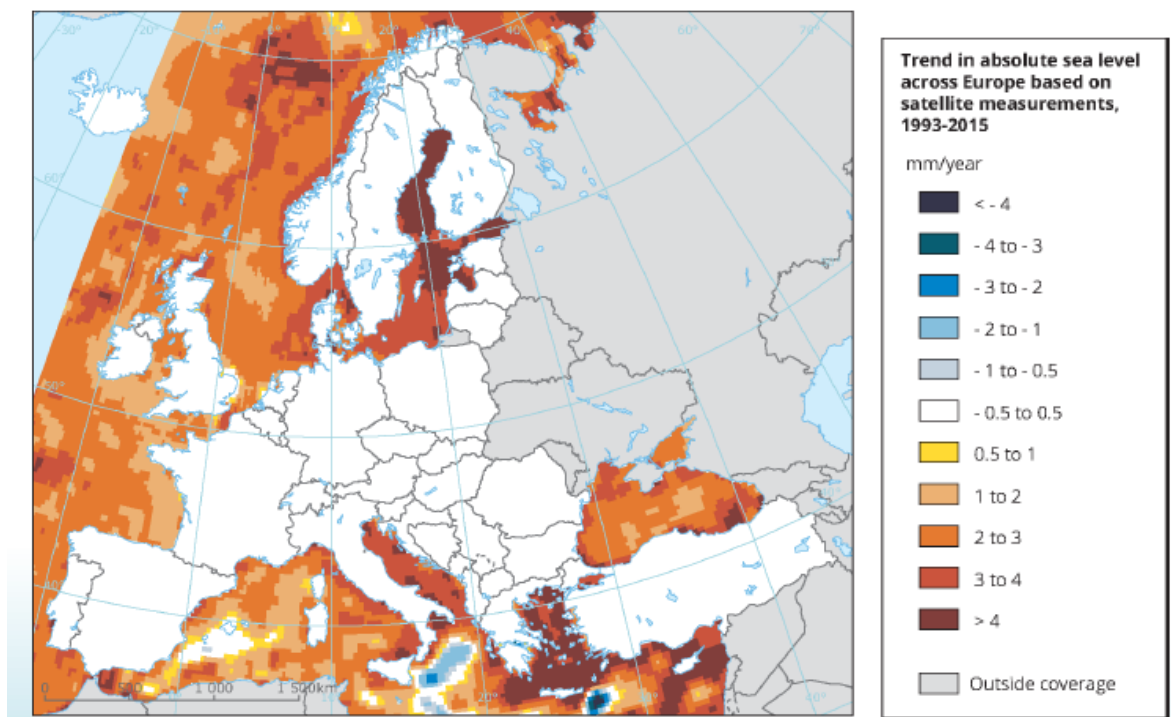
Tabella 6-1 Elenco delle condizioni di onda estrema, associata a tempi di ritorno pari a 50, 70 e 154 anni, simulate con il modello 2D di dettaglio integrato onda-corrente

ID Condizione	Settore di provenienza	TR [anni]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°]
S1	Scirocco	50	2.58	6.5	145
S2	Scirocco	70	2.65	6.5	145
S3	Scirocco	154	2.78	7.0	145
L1	Libeccio	50	4.99	10.0	245
L2	Libeccio	70	5.14	10.0	245
L3	Libeccio	154	5.51	11.0	245
P1	Ponente	50	6.95	12.5	275
P2	Ponente	70	7.13	12.5	275
P3	Ponente	154	7.53	13.0	275



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 pari a 0.90 m per il tempo di ritorno 50 anni, 0.91 m per il tempo di ritorno 70 anni e 0.95 m per tempo di ritorno 154 anni, risultante dalla combinazione dei valori di livello per associato tempo di ritorno del mareografo di Palermo (Tabella 5-4), integrati con un valore pari a 0.20 m di Sea Level Rise. Per la definizione di quest'ultimo incremento 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 2015).

Nell'intorno dell'isola di Salina l'incremento di livello annuo previsto è superiore a 4 mm (Figura 6-6), per cui, considerando tale trend associato alla vita utile dell'opera pari a 50 anni, si ottiene il valore di 20 cm sopra indicato.



**Figura 6-6** Mappa di distribuzione del trend di Mean Sea Level in Europa e Mar Nero basato sulle osservazioni satellitari disponibili tra il Gennaio 1993 e Dicembre 2015 (fonte European Environment Agency)

A supporto delle verifiche di tracimazione si è ritenuto opportuno simulare gli eventi estremi direzionali per assegnato tempo di ritorno riferiti alla sola stagione estiva, comprensiva del clima ondoso dal 1 Giugno al 30 Settembre. In Tabella 6-2 sono riportate le condizioni di onda simulate in termini di altezza d'onda, periodo di picco e direzione media di propagazione.

Anche per queste simulazioni è stato contestualmente applicato un valore di livello del mare ottenuto dalla combinazione dei valori risultanti dall'analisi della serie registrata a Palermo (in questo caso riferita al valore massimo estivo), pari a 0.36 m, incrementato con il valore di Sea Level Rise precedentemente illustrato.

**Tabella 6-2 Elenco delle condizioni d'onda selezionati per le simulazioni con il modello 2D di dettaglio (onda e conseguente circolazione locale) con riferimento al periodo Giugno-Settembre**

ID condizione stagionale (periodo Giugno – Settembre)	Settore di provenienza	TR [anni]	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°]
S4	Scirocco	50	1.41	5.5	145
L4	Libeccio	50	2.13	8.0	245
P4	Ponente	50	3.41	9.0	275

### 6.3 Risultati del modello integrato onda-corrente

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascun evento simulato, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche 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;
- mappe di velocità e direzione di corrente.

#### 6.3.1 Risultati del modello d'onda

Come già osservato per il modello d'onda a larga scala, in queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori mostrano in maniera efficace 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.

Dall'analisi dei risultati si evince che gli eventi estremi con direzione media di propagazione da 145°N (da Figura 6-7 a Figura 6-9) raggiungono il litorale in esame senza riduzioni significative. La direzione di incidenza inibisce, di fatto, la rifrazione. Dalle mappe di distribuzione dell'altezza d'onda si evidenzia che il Porto di Rinella, come atteso, è particolarmente esposto a questo tipo di eventi.

Per le condizioni d'onda provenienti da Libeccio (da Figura 6-10 a Figura 6-12) si riscontrano limitate riduzioni nei valori di altezza d'onda nella propagazione dell'onda da largo verso riva. Come già rilevato per il modello a più larga scala, si osserva la rotazione del moto ondoso per effetto di rifrazione nell'avvicinamento verso la costa.

Sia per le condizioni L1, L2, L3 sia, in modo più evidente, per gli eventi estremi P1, P2, P3 si osserva l'effetto schermante che il molo esistente garantisce a tergo della struttura stessa e dove attualmente vengono ormeggiate piccole imbarcazioni.

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda significativa per tutti gli eventi selezionati, sia per l'intero dominio di calcolo che per il dettaglio relativo all'area oggetto dell'intervento.

**Analisi su base non stagionale**

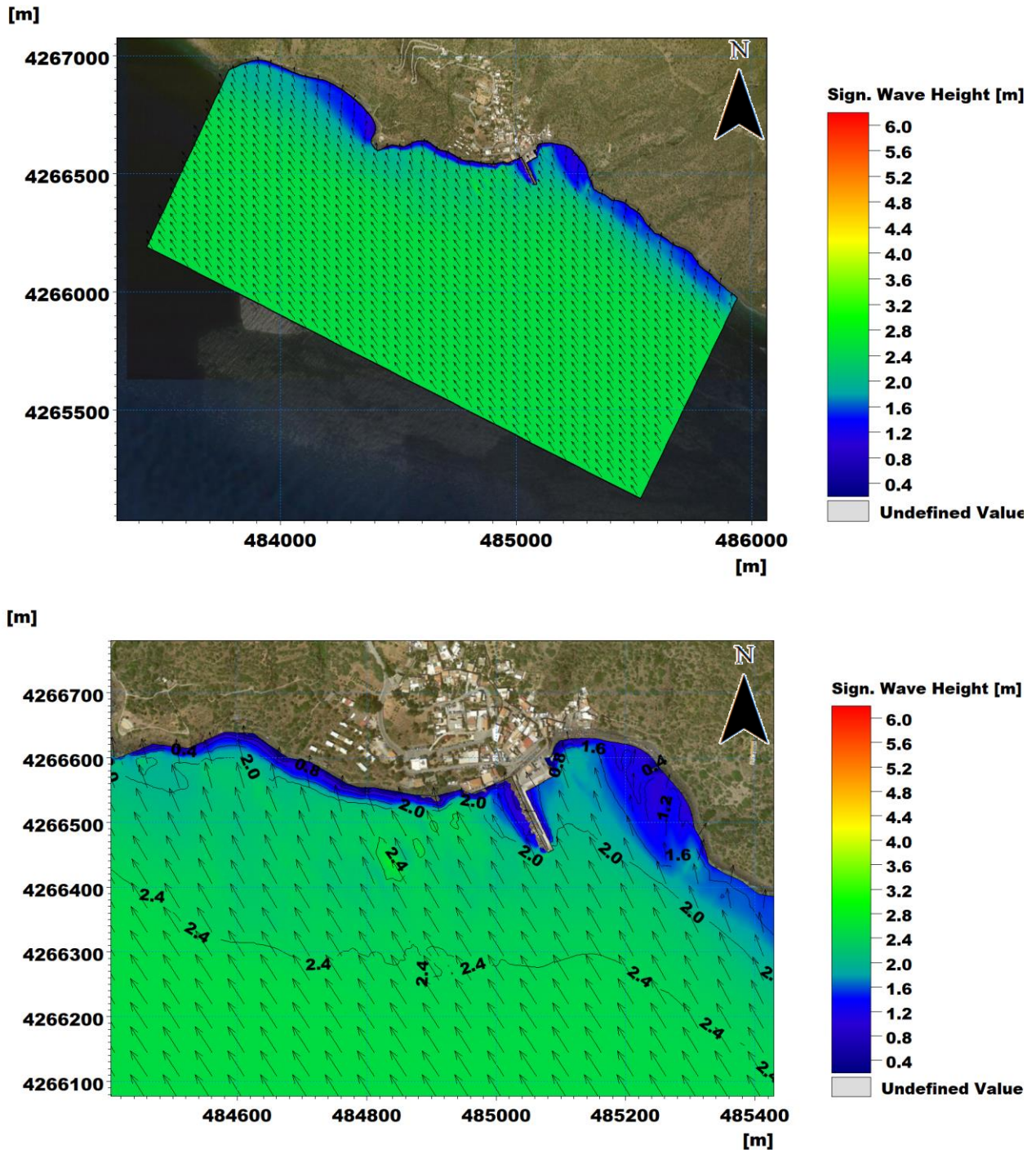


Figura 6-7 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, denominata "S1", con  $H_s = 2.58$  m,  $T_p = 6.5$  s, caratterizzata da  $MWD = 145^\circ$



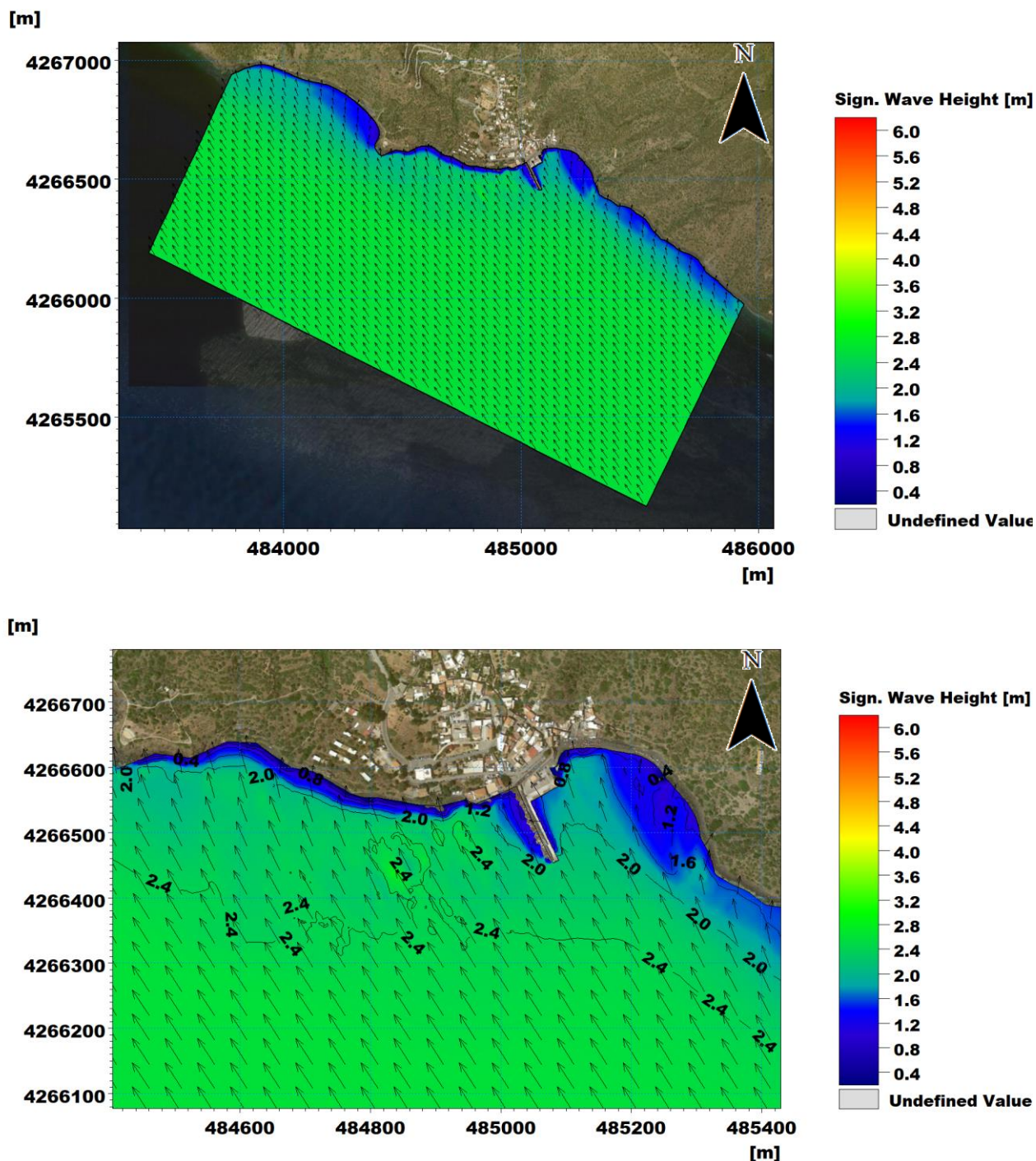


Figura 6-8 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 70 anni, denominata "S2", con  $H_s=2.65$  m,  $T_p=6.5$  s, caratterizzata da  $MWD=145^\circ N$

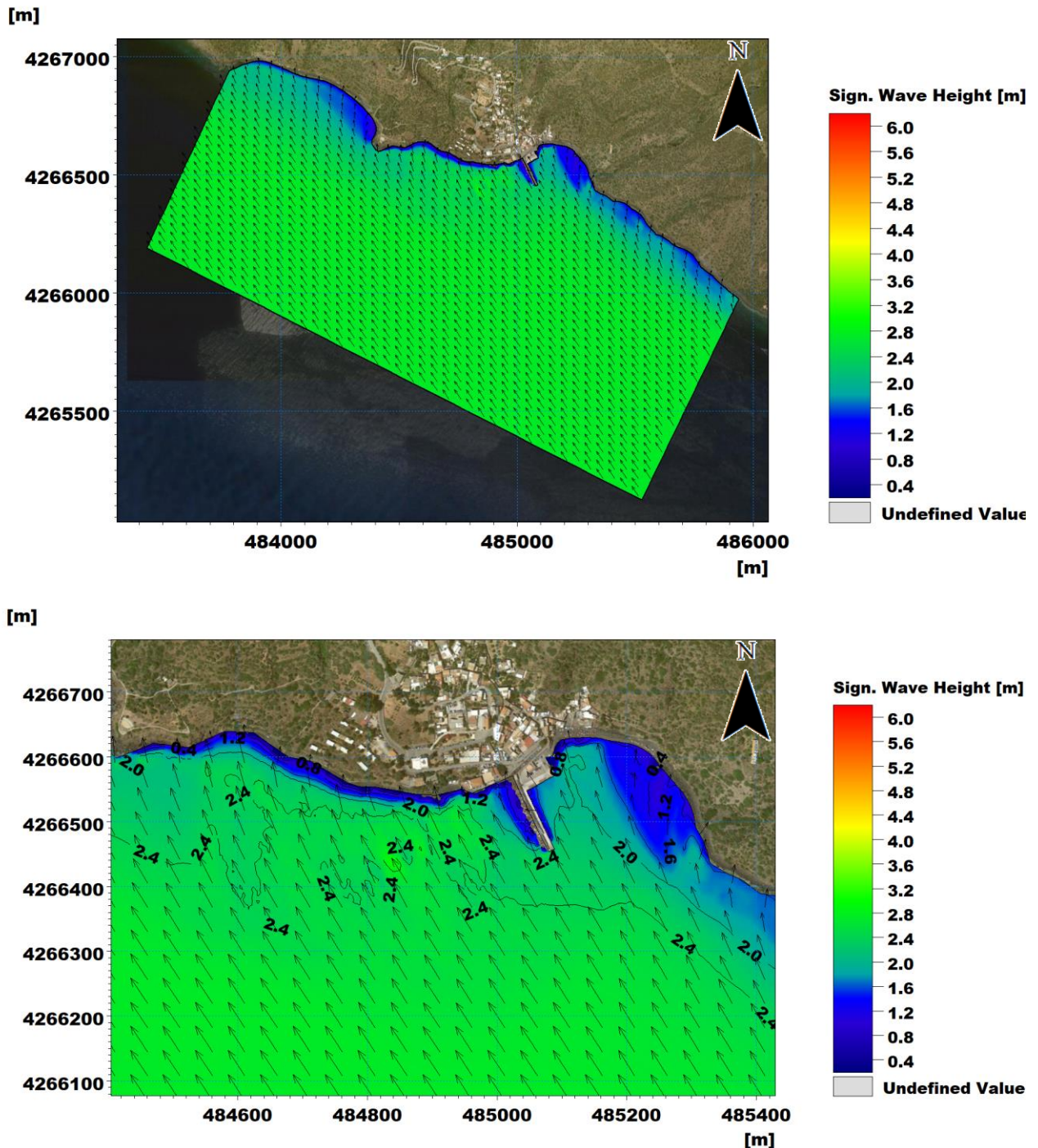


Figura 6-9 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 154 anni, denominata "S3", con  $H_s=2.78$  m,  $T_p=7.0$  s, caratterizzata da  $MWD=145^\circ N$



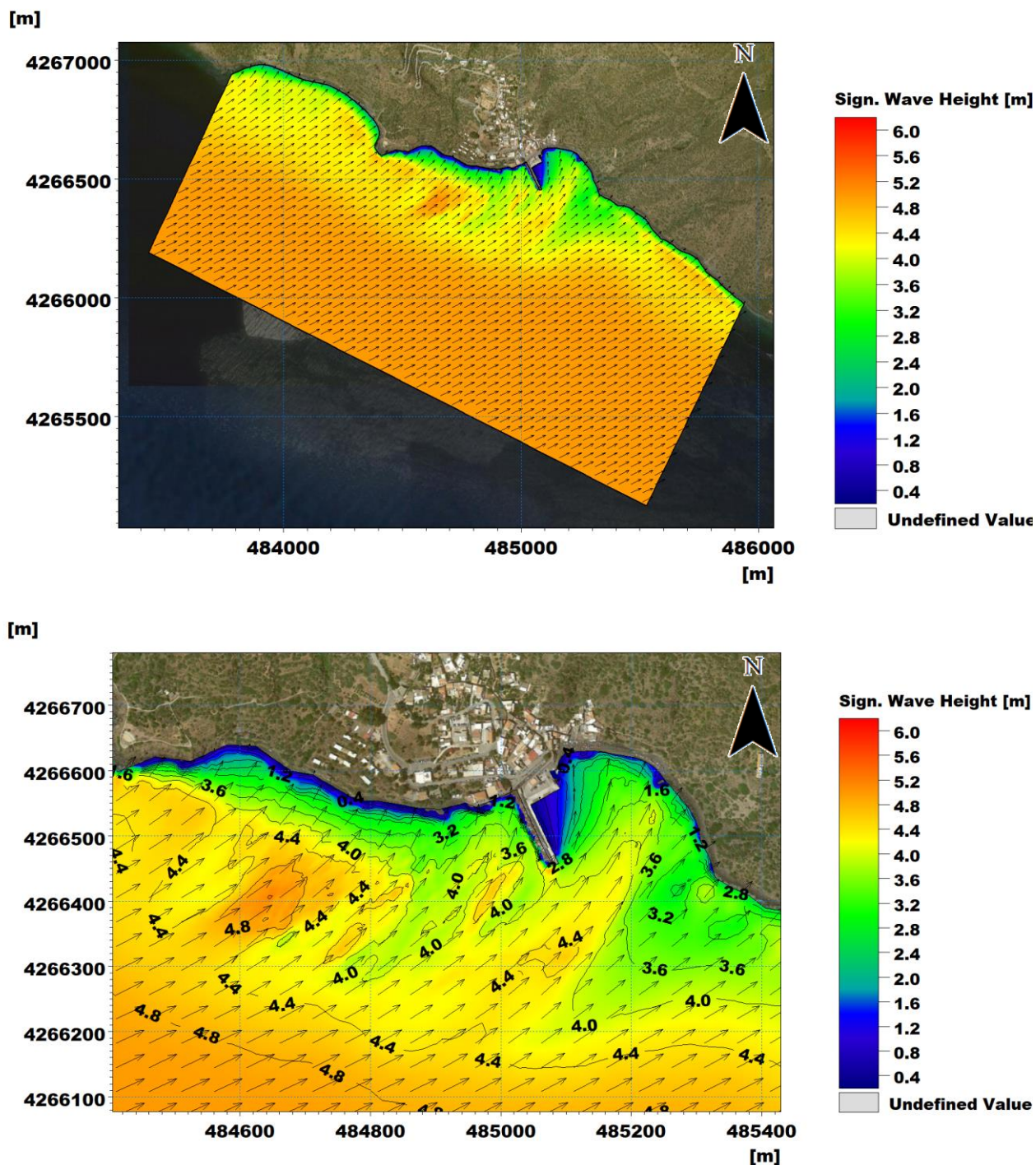


Figura 6-10 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, denominata "L1", con  $H_s=4.99$  m,  $T_p=10.0$  s, caratterizzata da  $MWD=245^\circ N$

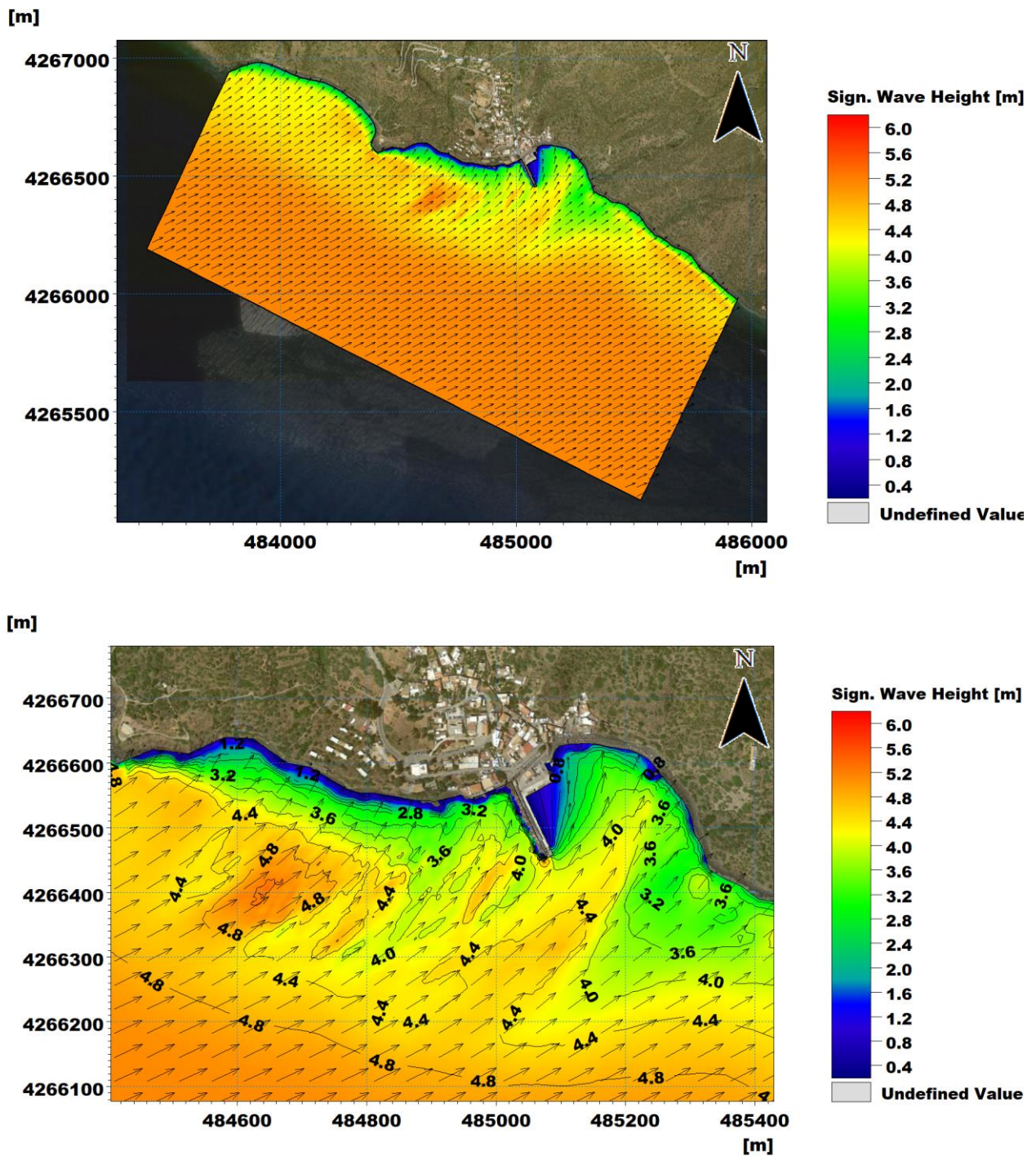


Figura 6-11 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 70 anni, denominata "L2", con  $H_s=5.14$  m,  $T_p=10.0$  s, caratterizzata da  $MWD=245^\circ N$



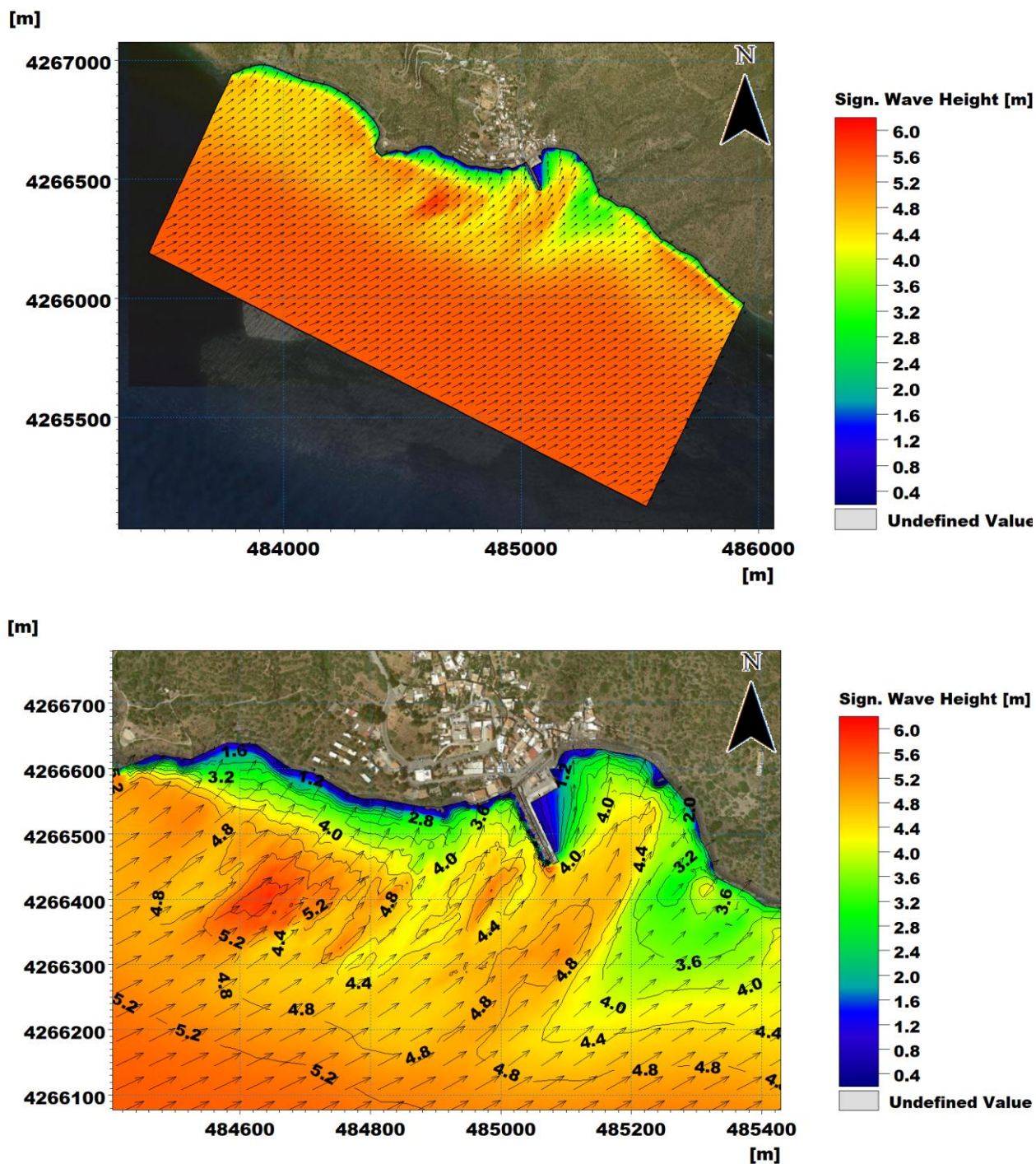


Figura 6-12 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 154 anni, denominata "L3", con  $H_s=5.52$  m,  $T_p=11.0$  s, caratterizzata da  $MWD=245^\circ N$

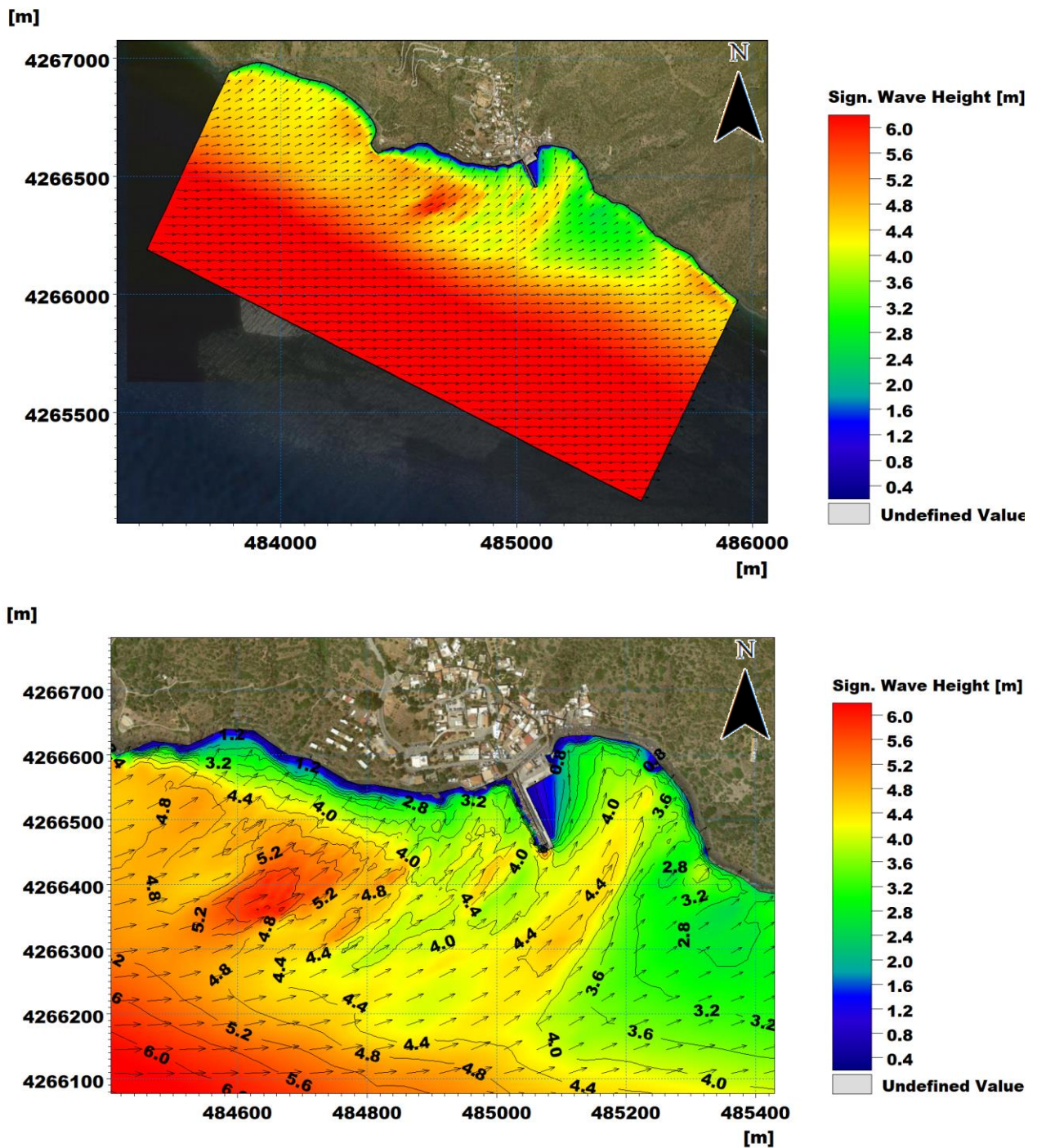


Figura 6-13 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, denominata "P1", con  $H_s=6.95$  m,  $T_p=12.5$  s, caratterizzata da  $MWD=275^\circ N$



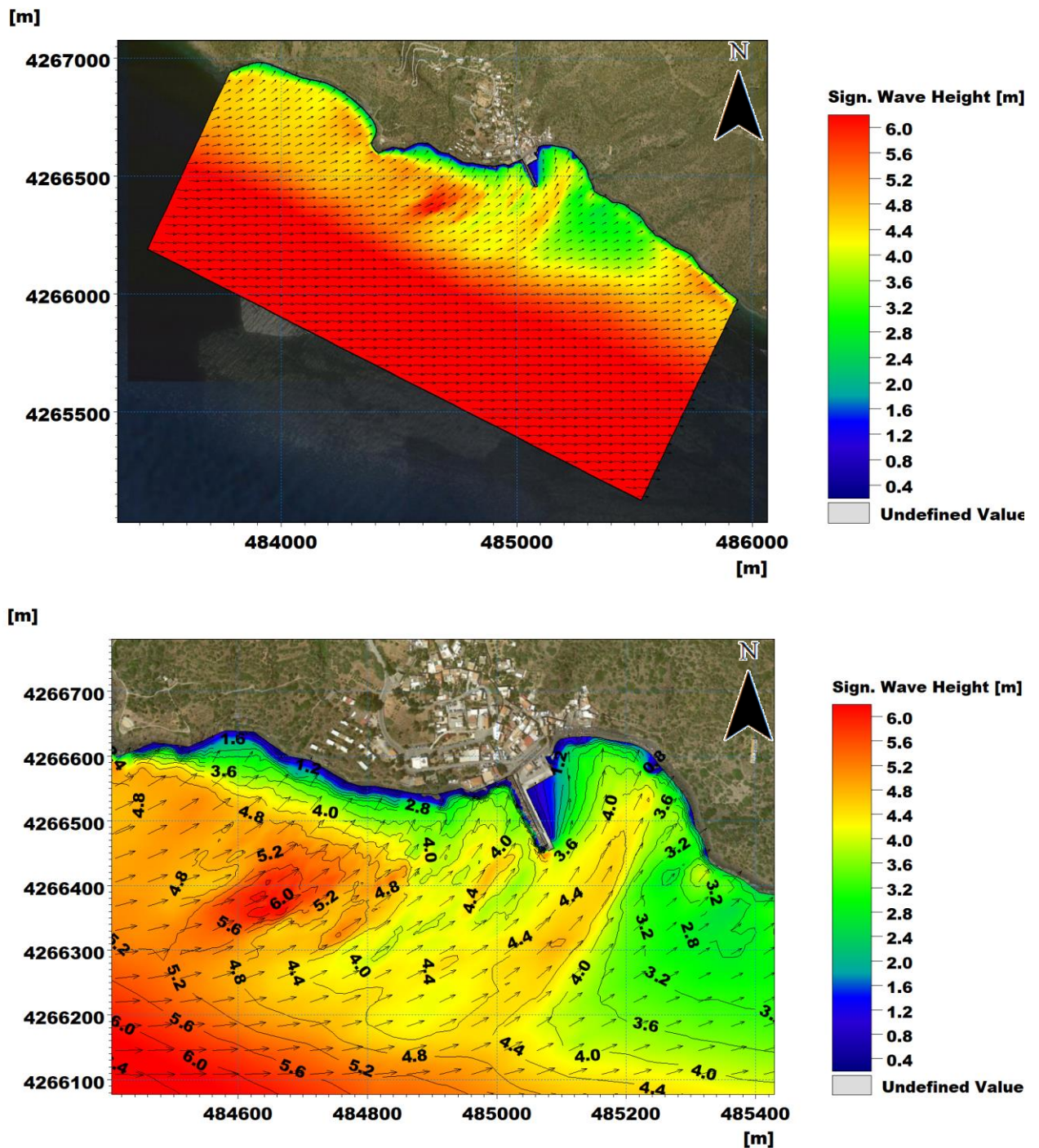


Figura 6-14 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 70 anni, denominata "P2", con  $H_s=7.13$  m,  $T_p=12.5$  s, caratterizzata da  $MWD=275^\circ N$



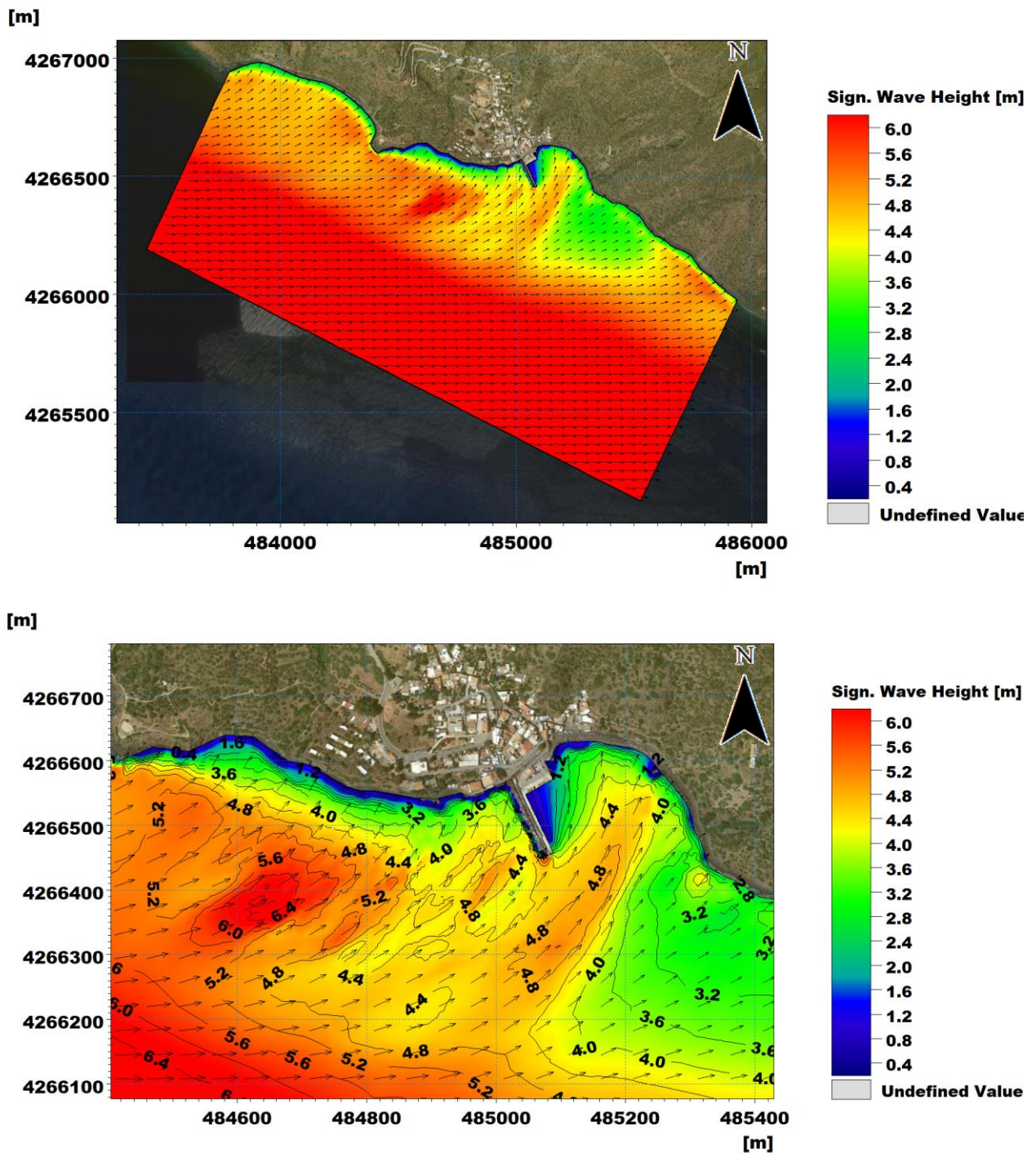


Figura 6-15 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione con associato tempo di ritorno pari a 154 anni, denominata "P3", con  $H_s=7.53$  m,  $T_p=13.0$  s, caratterizzata da  $MWD=275^\circ N$

STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

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 archi, discretizzati in una serie di punti, ad una distanza di circa 25 m dal piede del molo in progetto.

A seguire si riporta l'ubicazione dei sessantotto punti di estrazione, ogni 10 m, lungo la struttura (Figura 6-16), mentre in Tabella 6-3 ne vengono riportate le coordinate dei punti e in Tabella 6-4 le caratteristiche d'onda estratte dai risultati delle simulazioni effettuate.

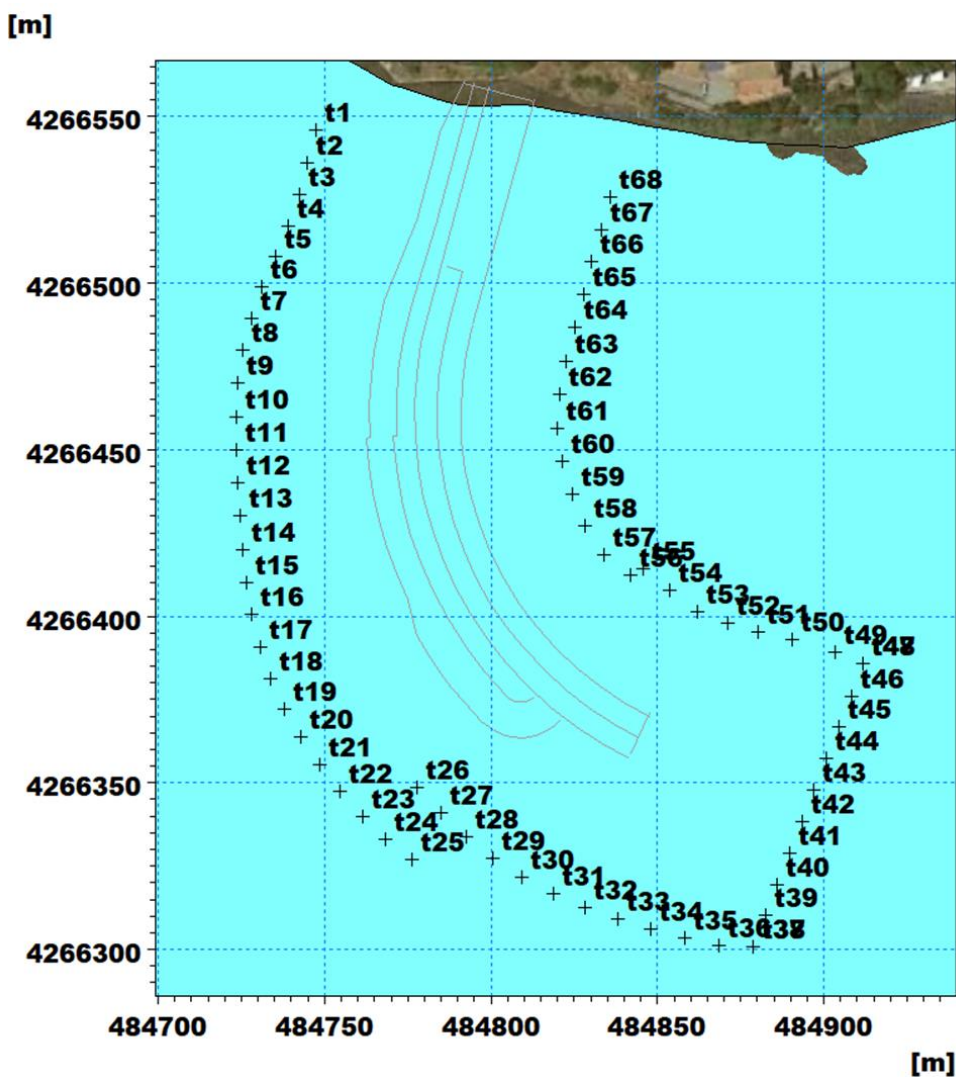


Figura 6-16 Punti di estrazione dei risultati delle simulazioni degli eventi estremi in corrispondenza del nuovo molo

## STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

Tabella 6-3 Coordinate X, Y (sistema di riferimento UTM 33 WGS84) e profondità Z, per i 68 punti ubicati a 25 m dal piede dell'opera selezionati a supporto del dimensionamento del molo

punto	Coordinata X [m]	Coordinata Y [m]	Profondità Z [m]	punto	Coordinata X [m]	Coordinata Y [m]	Profondità Z [m]
1	484747	4266546	0.90	35	484882	4266310	16.30
2	484745	4266536	2.37	36	484886	4266320	14.71
3	484742	4266526	3.45	37	484890	4266329	13.89
4	484739	4266517	3.64	38	484893	4266338	13.39
5	484735	4266508	4.14	39	484897	4266348	12.03
6	484731	4266499	4.82	40	484901	4266357	11.23
7	484728	4266489	5.14	41	484904	4266367	11.26
8	484725	4266480	5.63	42	484908	4266376	10.93
9	484724	4266470	6.16	43	484912	4266386	10.22
10	484723	4266460	6.50	44	484778	4266349	13.44
11	484724	4266450	6.31	45	484785	4266341	14.02
12	484724	4266440	6.66	46	484792	4266334	14.49
13	484725	4266430	7.42	47	484800	4266327	15.11
14	484725	4266420	7.72	48	484809	4266322	15.87
15	484727	4266410	8.62	49	484819	4266317	16.90
16	484728	4266400	8.70	50	484828	4266313	16.81
17	484731	4266391	9.22	51	484838	4266309	16.71
18	484734	4266381	10.71	52	484848	4266306	16.36
19	484738	4266372	12.27	53	484858	4266303	16.84
20	484743	4266364	13.01	54	484868	4266301	16.85
21	484749	4266355	13.14	55	484879	4266301	16.45
22	484755	4266348	13.03	56	484836	4266526	0.87
23	484761	4266340	13.13	57	484833	4266516	2.50
24	484768	4266333	13.71	58	484830	4266506	3.32
25	484776	4266327	14.48	59	484828	4266496	3.56
26	484912	4266386	10.22	60	484825	4266487	4.52
27	484903	4266389	10.39	61	484823	4266477	4.37
28	484890	4266393	9.58	62	484821	4266467	4.97
29	484880	4266395	9.33	63	484820	4266457	5.63
30	484871	4266398	9.19	64	484822	4266447	5.89
31	484862	4266402	6.88	65	484825	4266437	6.43
32	484854	4266408	5.59	66	484828	4266427	6.32
33	484846	4266414	5.00	67	484834	4266419	5.27
34	484879	4266301	16.45	68	484842	4266412	5.00





**Analisi su base stagionale (1 Giugno – 30 Settembre)**

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda per le condizioni d'onda "estive", per associato tempo di ritorno 50 anni, dai tre settori direzionali selezionati.

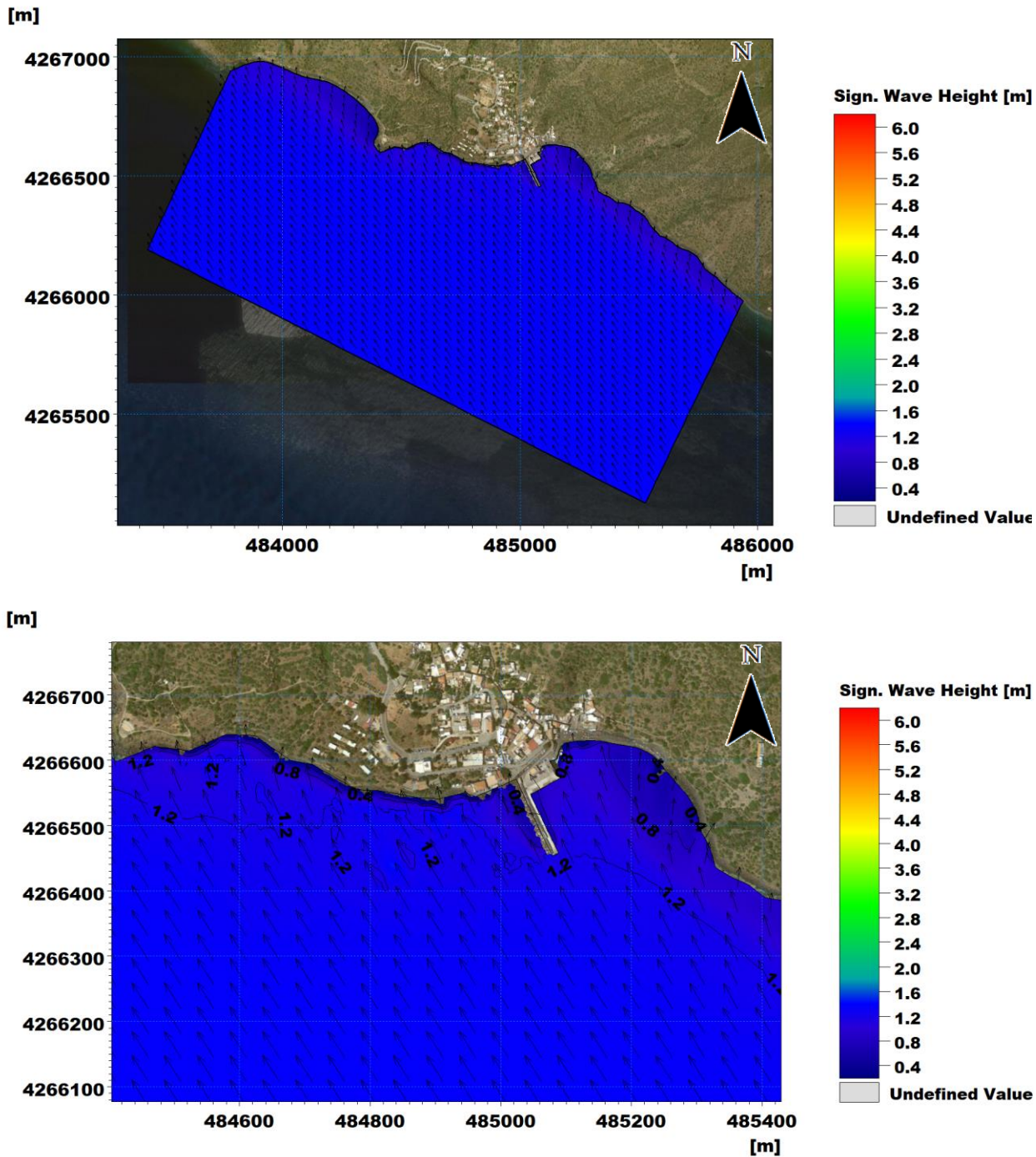


Figura 6-17 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione estiva con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, denominata "S4", con  $H_s=1.41$  m,  $T_p=5.5$  s, caratterizzata da  $MWD=145^\circ N$



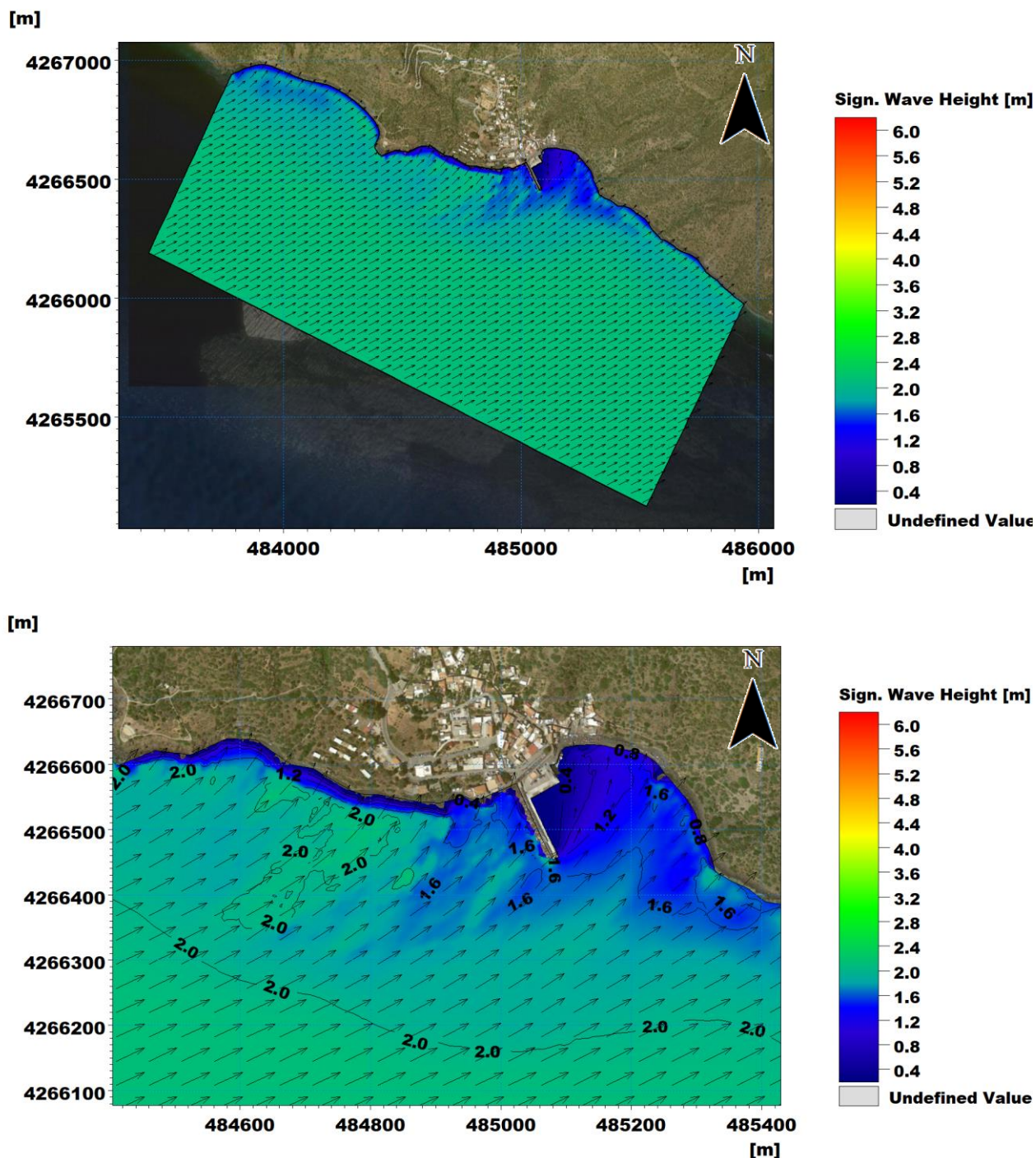


Figura 6-18 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione estiva con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, denominata "L4", con  $H_s=2.13$  m,  $T_p=8.0$  s, caratterizzata da  $MWD=245^\circ N$

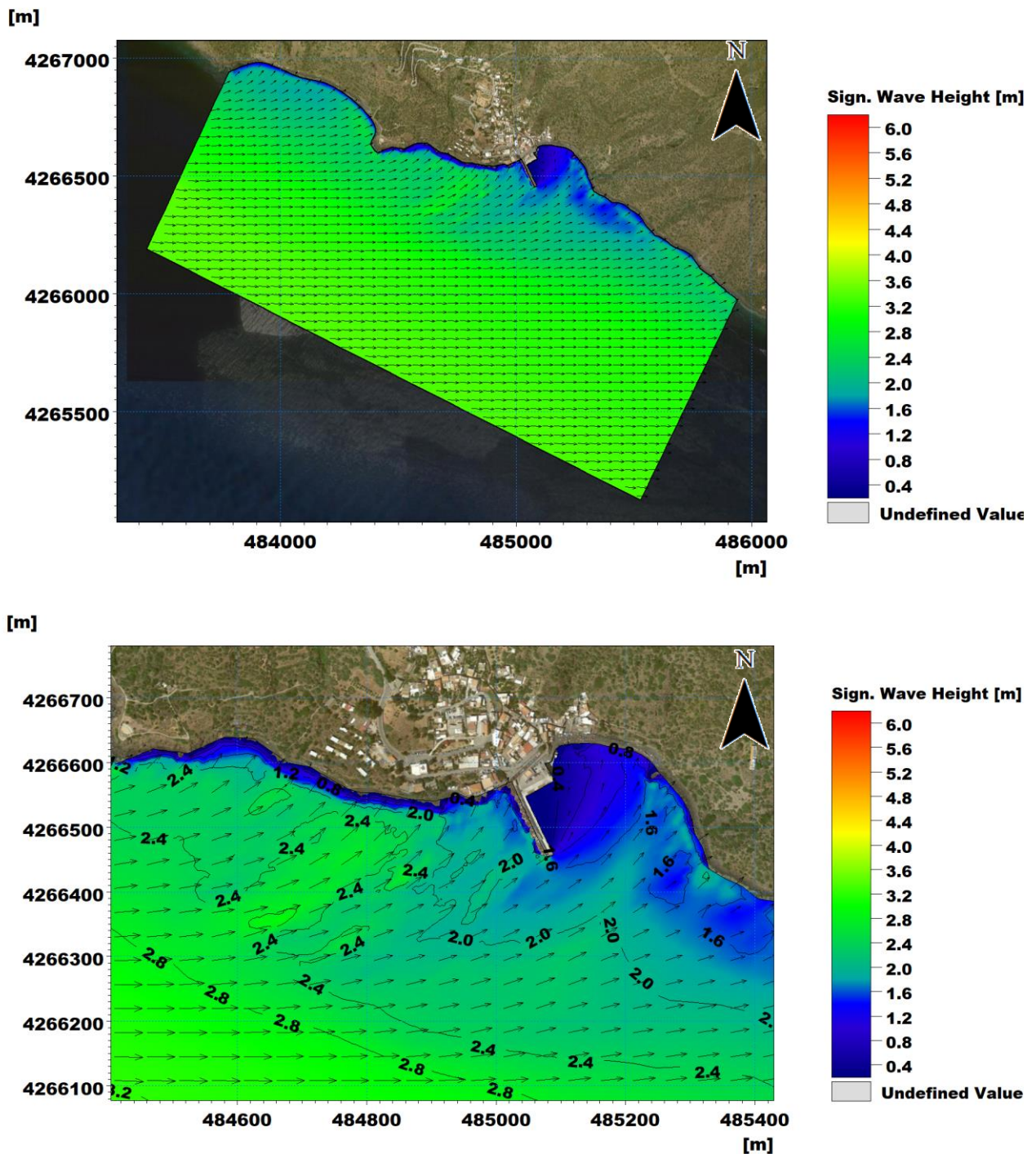


Figura 6-19 Distribuzione dell'altezza d'onda sull'intero dominio (in alto) e sul dettaglio del Porto di Rinella (in basso) per la condizione estiva con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, denominata "P4", con  $H_s=3.41$  m,  $T_p=9.0$  s, caratterizzata da  $MWD=275^\circ N$



STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

**Tabella 6-5 Condizioni delle onde estreme estive, tempi di ritorno pari a 50 anni, estratte nei 68 punti selezionati a supporto della verifica di tracimazione dell'opera in progetto**

Punto	ESTATE Ponente TR50		ESTATE Libeccio TR50		ESTATE Scirocco TR50	
	Hs[m]	MWD[°]	Hs[m]	MWD[°]	Hs[m]	MWD[°]
1	1.95	220	1.63	217	1.13	183
2	2.37	222	2.08	218	1.21	170
3	2.38	224	2.04	219	1.18	162
4	2.45	226	2.06	221	1.20	161
5	2.54	231	2.08	225	1.20	159
6	2.45	234	1.96	226	1.21	159
7	2.38	234	1.91	226	1.24	157
8	2.38	234	1.94	228	1.23	155
9	2.48	239	2.01	232	1.23	155
10	2.47	240	1.96	232	1.25	153
11	2.66	239	2.09	231	1.22	151
12	2.67	239	2.06	231	1.23	151
13	2.55	241	1.97	233	1.23	151
14	2.60	242	1.98	233	1.24	150
15	2.59	243	1.95	234	1.26	149
16	2.66	243	1.97	234	1.27	149
17	2.69	244	1.97	234	1.26	149
18	2.60	245	1.88	234	1.28	148
19	2.38	248	1.79	235	1.31	148
20	2.33	250	1.78	236	1.32	148
21	2.30	253	1.79	237	1.32	148
22	2.25	252	1.83	237	1.32	148
23	2.33	251	1.91	235	1.31	148
24	2.43	249	1.94	236	1.32	148
25	2.47	249	1.88	237	1.32	148
26	1.99	243	1.68	232	1.29	149
27	2.02	243	1.69	232	1.28	149
28	2.06	241	1.67	231	1.29	149
29	2.04	243	1.67	234	1.30	149
30	2.07	237	1.68	229	1.27	150
31	2.15	229	1.72	222	1.24	152
32	2.35	228	1.83	221	1.28	150
33	2.59	235	1.99	227	1.28	151
34	2.10	254	1.81	239	1.34	148
35	2.08	253	1.80	239	1.34	148
36	2.07	251	1.79	238	1.32	149
37	1.96	250	1.71	237	1.32	149
38	1.97	249	1.71	235	1.31	149
39	2.01	246	1.71	234	1.30	149
40	2.06	246	1.73	234	1.31	149
41	2.05	246	1.74	234	1.30	149
42	2.00	245	1.71	234	1.29	149
43	1.99	243	1.68	232	1.29	149
44	2.35	249	1.90	235	1.32	148
45	2.44	249	1.89	237	1.32	148
46	2.42	249	1.83	237	1.33	148
47	2.28	252	1.75	238	1.33	148
48	2.19	252	1.78	236	1.33	148
49	2.18	252	1.79	237	1.34	148
50	2.15	252	1.77	238	1.34	148
51	2.09	254	1.77	239	1.34	148
52	2.09	254	1.81	238	1.34	148
53	2.10	254	1.82	238	1.34	148
54	2.10	254	1.81	239	1.34	148
55	2.10	254	1.81	239	1.34	148
56	2.03	207	1.69	207	1.15	171
57	2.38	217	2.09	216	1.19	168
58	2.36	217	2.04	215	1.26	156
59	2.45	217	2.03	214	1.25	154
60	2.43	220	1.97	216	1.21	155
61	2.53	224	2.01	219	1.29	152
62	2.50	227	1.94	221	1.28	152
63	2.52	233	1.94	226	1.32	150
64	2.50	235	1.93	228	1.34	148
65	2.34	236	1.80	228	1.35	150
66	2.27	238	1.76	230	1.35	153
67	2.33	241	1.87	233	1.33	156
68	2.69	235	2.10	228	1.27	151

### 6.3.2 Risultati del modello idrodinamico

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le condizioni d'onda selezionate, che forniscono una esaustiva rappresentazione dell'attuale circolazione locale e hanno fornito ulteriori elementi utili alla progettazione degli interventi.

Le correnti litoranee sono generate per effetto dei gradienti dei radiation stress indotti dalle onde sul fondo, massimi in corrispondenza del frangimento. Le condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una fascia più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta invece influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

Nel caso degli eventi estremi da Scirocco si osserva la generazione di una corrente litoranea con direzione da Levante a Ponente, che lambisce la costa fino alla spiaggia di Rinella, per poi staccarsi, ruotare attorno alla testata del molo e poi riavvicinarsi alla linea di riva, per una fascia di 50-60 m di larghezza.

Le velocità massime risultano comunque poco superiori ad 1.0-1.2 m/s per i tempi di ritorno 50 anni (Figura 6-20) e 70 anni (Figura 6-21), fino a 1.5 m/s per l'evento estremo associato ai 154 anni (Figura 6-22).

All'aumentare del tempo di ritorno, e quindi della gravosità del moto ondoso incidente, maggiore è la velocità del flusso e l'ampiezza della fascia litoranea interessata dalla corrente.

Per gli eventi estremi da Libeccio e da Ponente il flusso ha una direzione principale da Ponente verso Levante. La corrente litoranea si sviluppa e corre parallela alla riva sino al molo ove si divide in due rami principali di cui il principale prosegue lungo la costa dell'isola mentre l'altro ruota in senso antiorario all'interno dell'attuale bacino ove approdano le imbarcazioni, invorticandosi con locali accelerazioni del flusso.

Per queste condizioni di onda, la corrente si sviluppa su una fascia di circa 100 m e raggiunge velocità massime localmente superiori ai 2 m/s. Per gli eventi estremi con associato tempo di ritorno pari a 154 anni, nel caso di direzione di provenienza da Libeccio (Figura 6-25) si osservano intensità anche superiori ai 2.5 m/s in prossimità della testata del molo e in corrispondenza delle zone caratterizzate dalle profondità minori. Per l'evento estremo da Ponente (Figura 6-28), con associato tempo di ritorno 154 anni, la fascia litoranea interessata da flussi con velocità superiori a 1.5 m è compresa tra i 100 m e i 150 m.

A seguire si riportano le mappe di intensità di corrente di tutte le condizioni d'onda simulate.



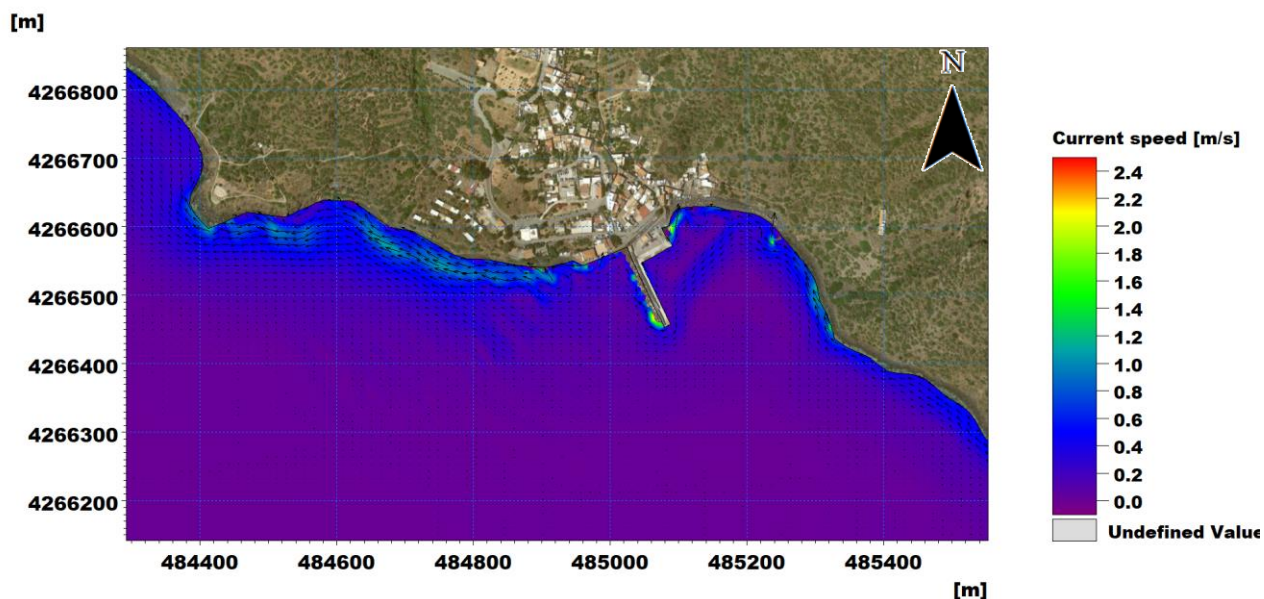


Figura 6-20 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da Scirocco, con associato Tempo di Ritorno pari a 50anni, denominata "S1", con  $H_s=2.58$  m,  $T_p=6.5$  s e  $MWD=145^\circ N$

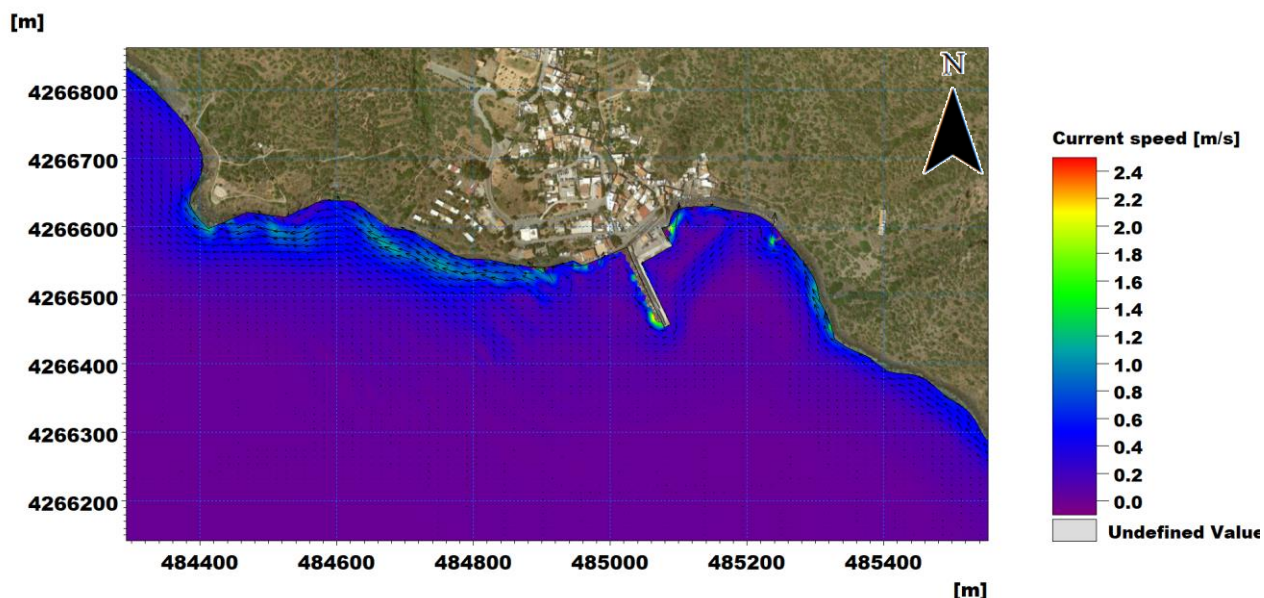


Figura 6-21 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da Scirocco, con associato Tempo di Ritorno pari a 70anni, denominata "S2", con  $H_s=2.65$  m,  $T_p=6.5$  s e  $MWD=145^\circ N$

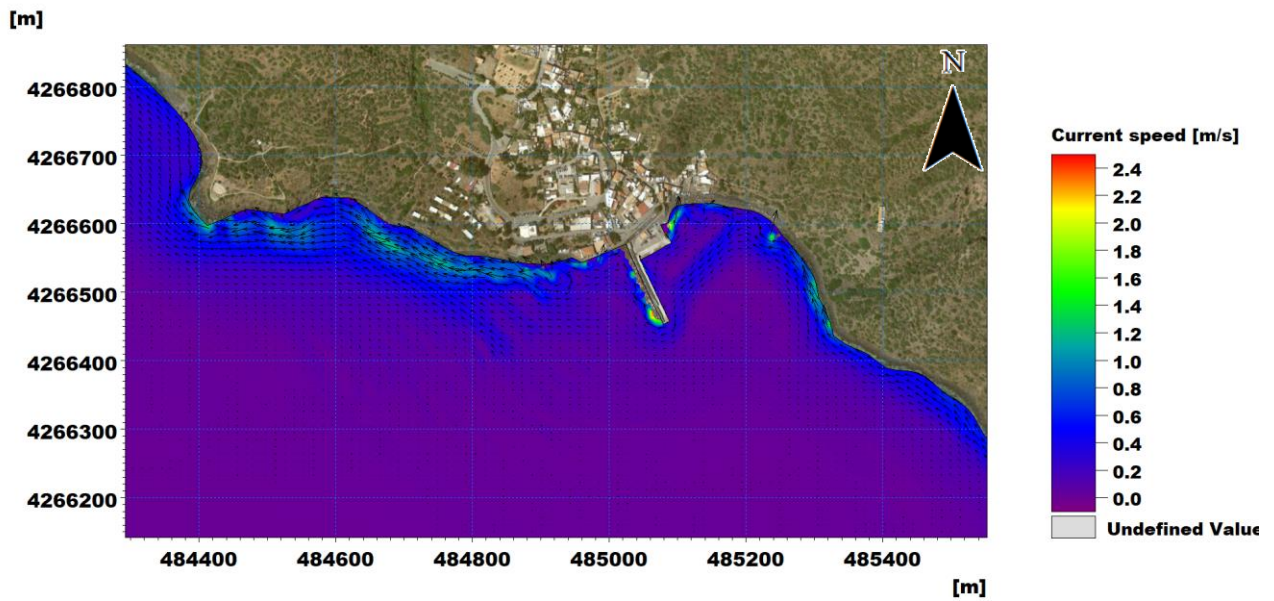


Figura 6-22 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da Scirocco, con associato Tempo di Ritorno pari a 154anni, denominata "S3", con  $H_s=2.78$  m,  $T_p=7.0$  s e  $MWD=145^\circ N$

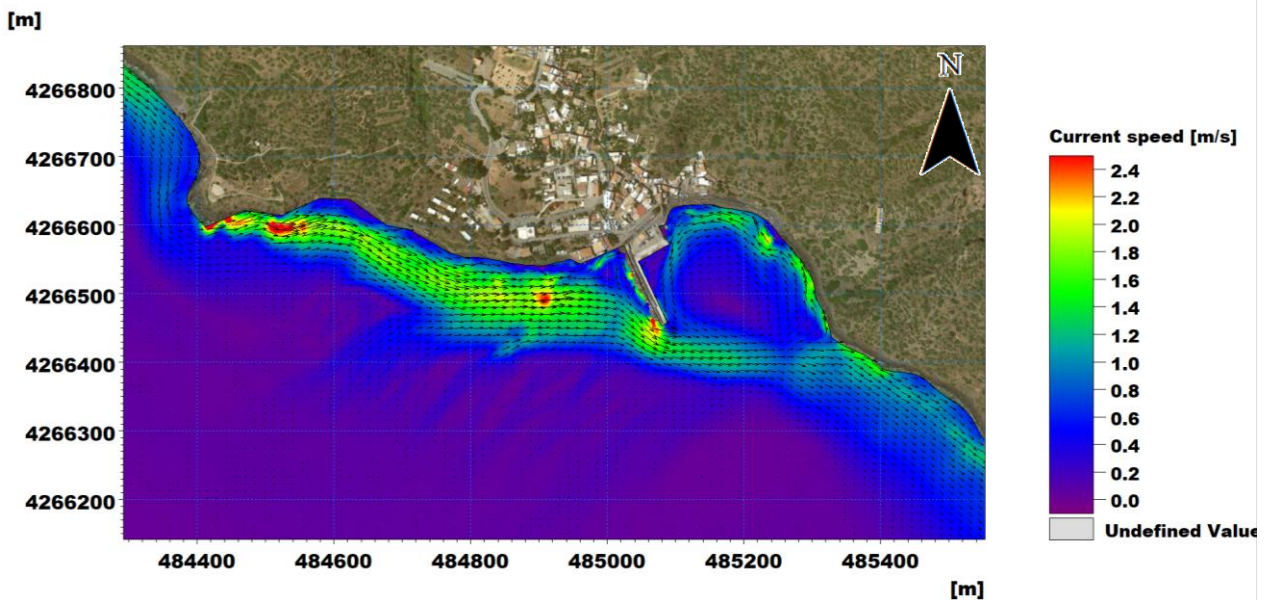


Figura 6-23 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da Libeccio, con associato Tempo di Ritorno pari a 50anni, denominata "L1", con  $H_s=4.99$  m,  $T_p=10.0$  s e  $MWD=245^\circ N$



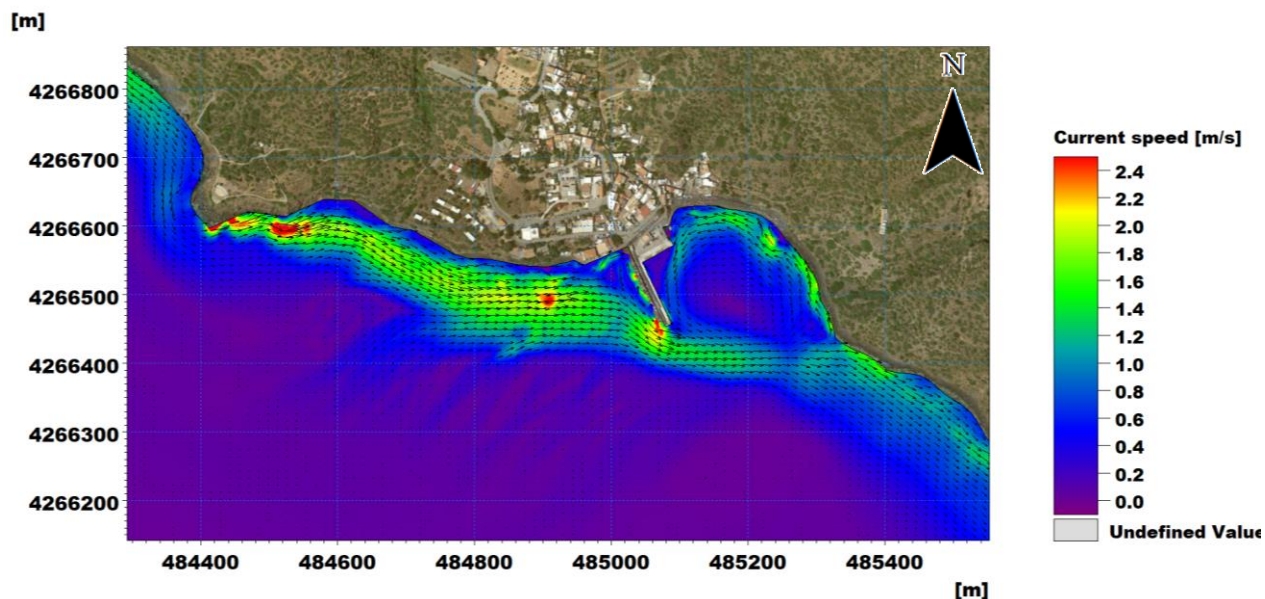


Figura 6-24 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da Libeccio, con associato Tempo di Ritorno pari a 70anni, denominata "L2", con  $H_s=5.14$  m,  $T_p=10.0$  s e  $MWD=245^\circ N$

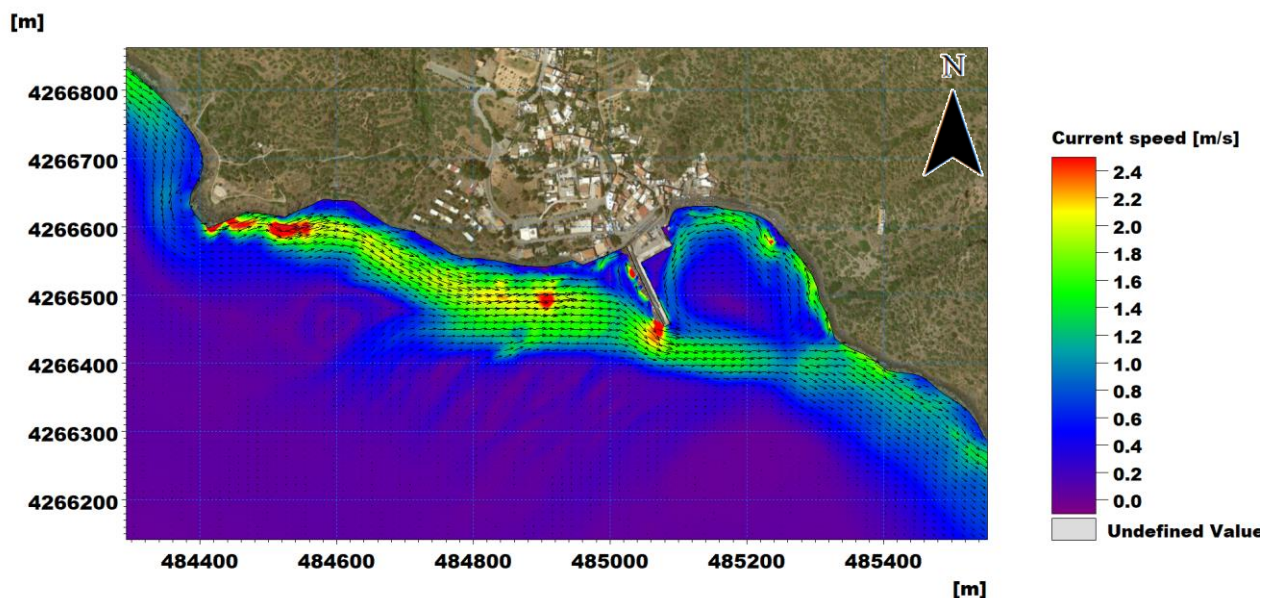


Figura 6-25 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da Libeccio, con associato Tempo di Ritorno pari a 154anni, denominata "L3", con  $H_s=5.51$  m,  $T_p=11.0$  s e  $MWD=245^\circ N$



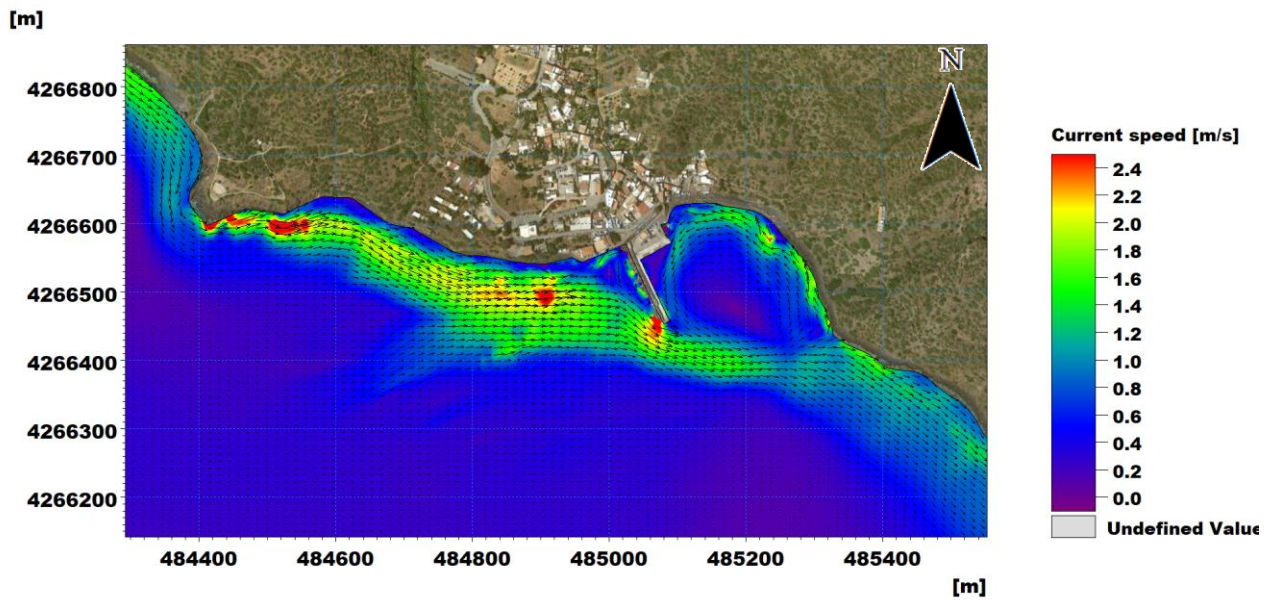


Figura 6-26 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da Ponente, con associato Tempo di Ritorno pari a 50anni, denominata "P1", con  $H_s=6.95$  m,  $T_p=12.5$  s e  $MWD=275^\circ N$

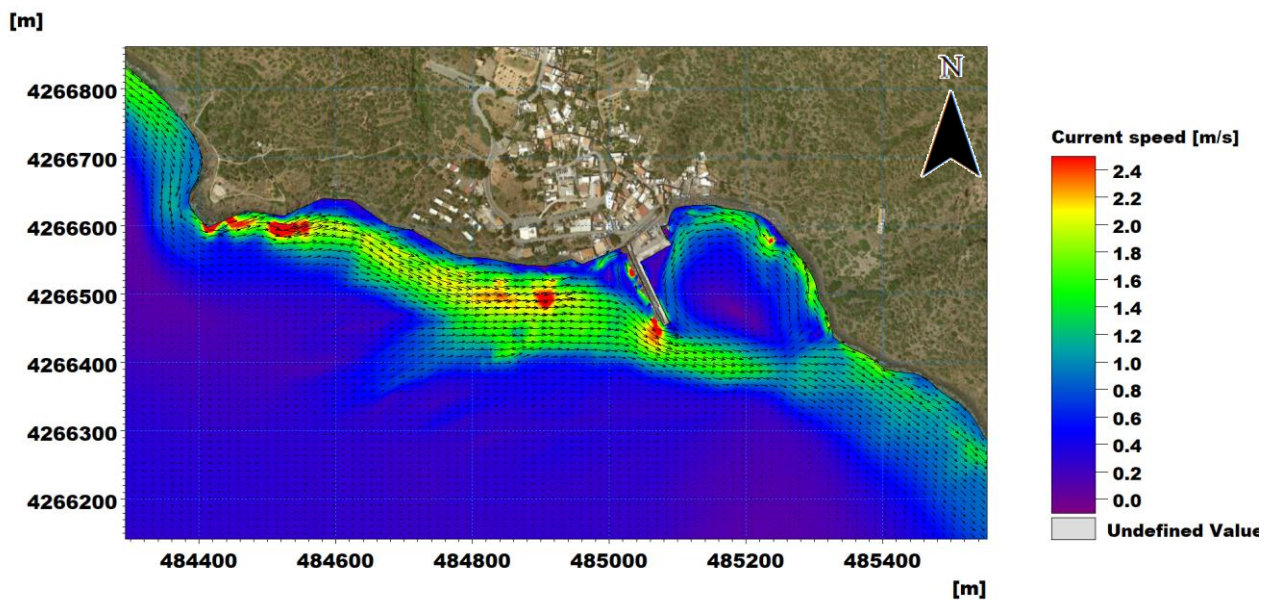


Figura 6-27 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da POnente, con associato Tempo di Ritorno pari a 70anni, denominata "P2", con  $H_s=7.13$  m,  $T_p=12.5$  s e  $MWD=275^\circ N$

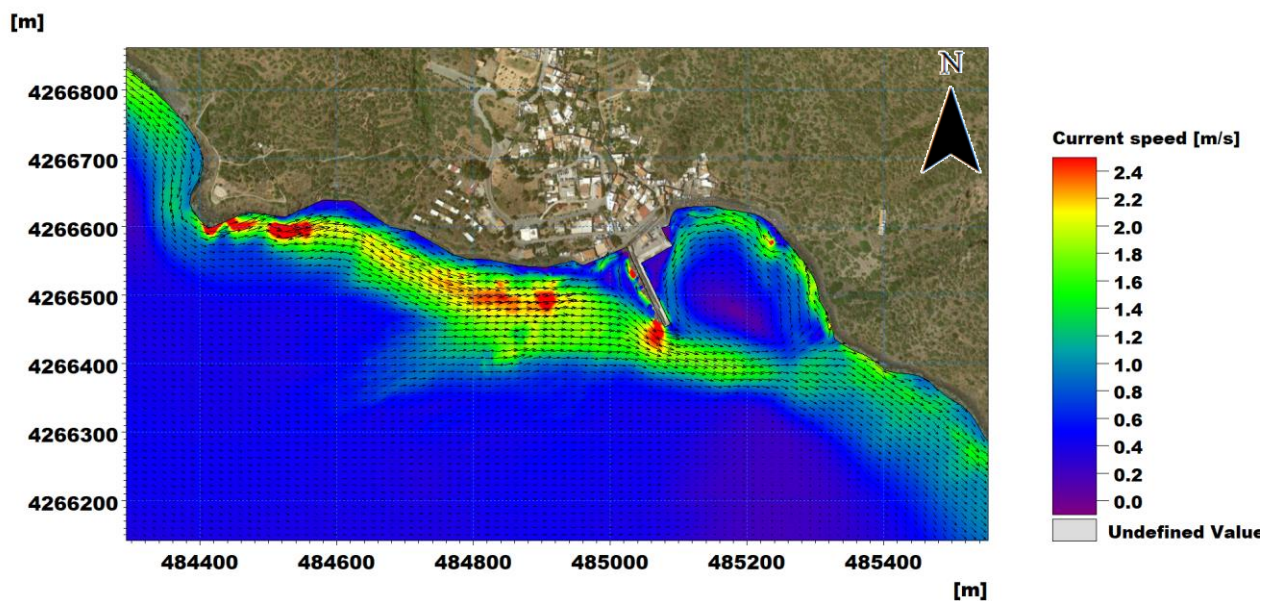


Figura 6-28 Mappa della distribuzione delle intensità di corrente nell'area del Porto di Rinella per la condizione d'onda da Ponente, con associato Tempo di Ritorno pari a 154anni, denominata "P3", con  $H_s=7.53$  m,  $T_p=13.0$  s e  $MWD=275^\circ N$

## 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 interna allo specchio acqueo protetto dal nuovo molo secondo lo stralcio progettuale oggetto della progettazione è stato utilizzato il modulo BW (Boussinesq Wave) 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 B al presente elaborato.



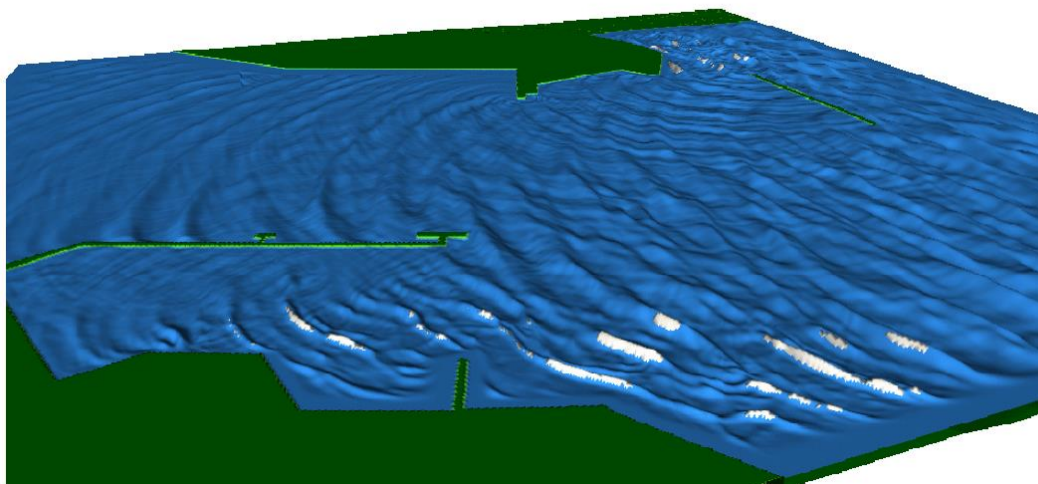


Figura 7-1 Esempio di elevazione superficiale calcolata con il modulo MIKE 21 BW

## 7.1 Estensione del modello e batimetria

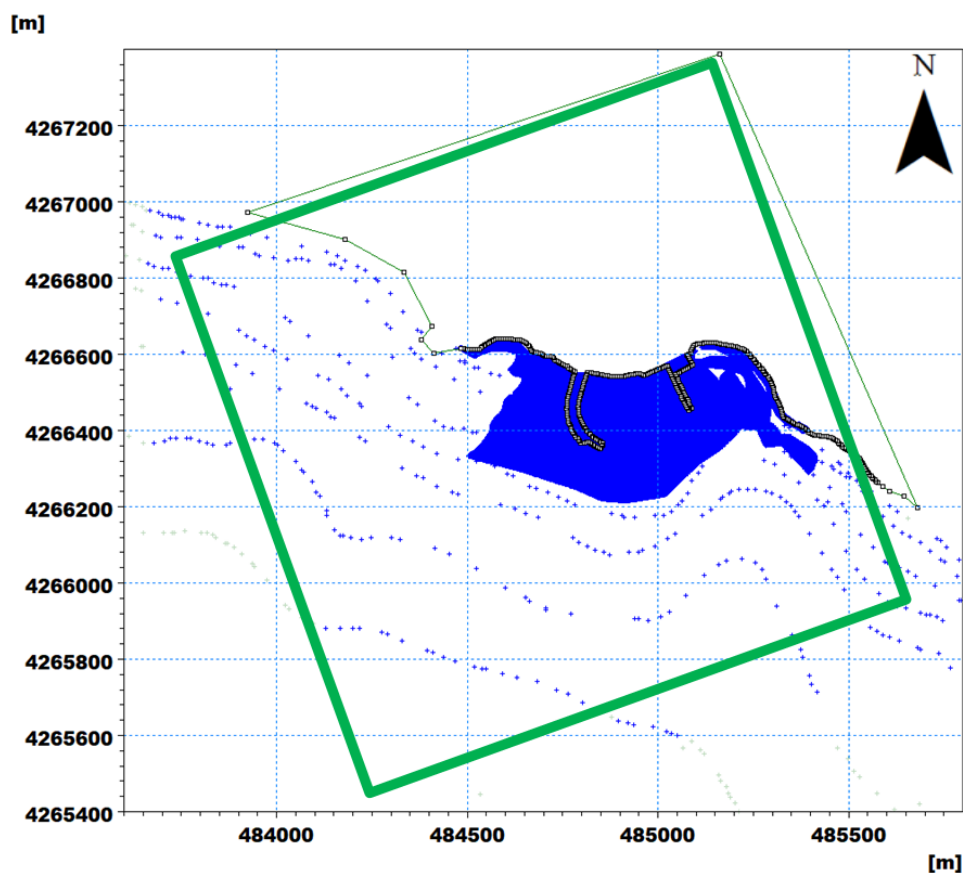
Il modello di agitazione ondosa è stato implementato su un dominio di calcolo sufficientemente ampio da comprendere sia il nuovo bacino protetto dal molo in progetto, sia una porzione di mare antistante, sufficientemente estesa da comprendere tutti gli elementi che influiscono sulla propagazione delle onde in avvicinamento all'area di interesse.

Vista la posizione del sito di studio e la realizzazione parziale delle opere pianificate per il nuovo porto di Rinella (il nuovo molo nella configurazione di primo stralcio lascia al bacino un'ampia apertura a Sud), ai fini del calcolo dell'agitazione residua sono state prese in considerazione sia le onde entranti da Ponente, più frequenti e critiche, sia quelle da Scirocco, caratterizzate da altezza d'onda minore ma più penetranti.

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

La risoluzione spaziale della griglia di calcolo è vincolata dal dettaglio nella descrizione degli elementi strutturali che costituiscono il layout del porto e, in funzione delle caratteristiche del sito, è stato scelto di adottare celle di lato pari a 2 m.

La griglia di calcolo, con orientazione pari a 340°N, è composta complessivamente da 850 x 750 (637'500) celle per una superficie totale pari a 2,55 Km<sup>2</sup> (Figura 7-2).



**Figura 7-2 Griglia di calcolo del modello di agitazione ondosa (in verde) con indicazione dei punti quotati utilizzati per la definizione della batimetria di calcolo (in azzurro)**

Le quote di rilievo sono state successivamente interpolate sulla griglia di calcolo al fine di ricostruire la geometria del fondale nell'area di interesse. In tale fase sono stati adottati opportuni accorgimenti finalizzati a rendere la batimetria più regolare ma pur sempre aderente e rappresentativa della realtà fisica. Anche in questo caso è stata apportata la modifica delle profondità in corrispondenza dello scoglio dell'Ariana, considerando l'intervento previsto di rimozione delle asperità presenti con profondità inferiore a 5 m.

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

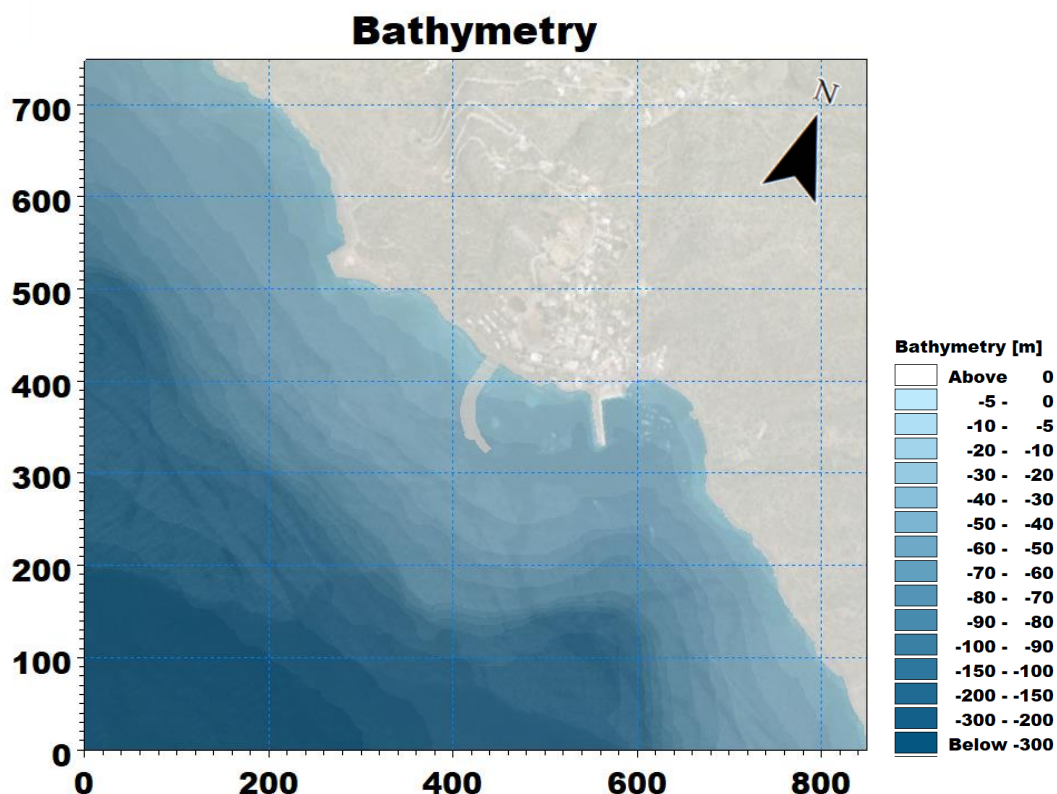


Figura 7-3 Batimetria di calcolo

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

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

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

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



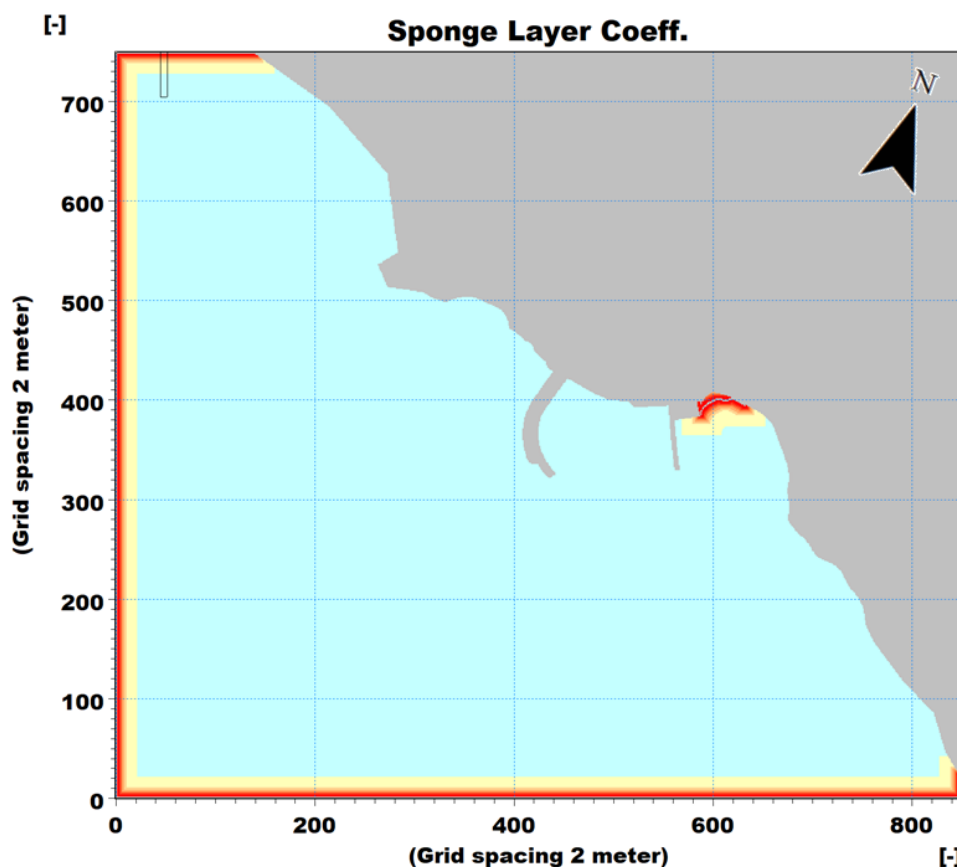


Figura 7-4 Localizzazione dello strato assorbente (tonalità di giallo e rosso) nella griglia di calcolo

### 7.3 Definizione delle linee di generazione

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

In considerazione della direzione di provenienza delle onde selezionate è stato necessario utilizzare 2 distinte linee di generazione, posizionate in modo da favorire la propagazione all'interno del dominio e del bacino di tutte le condizioni d'onda di riferimento (Figura 7-5 e Figura 7-6). Si specifica che per le onde da Scirocco è stata utilizzata esclusivamente la prima linea di generazione, per le onde da Ponente è stata utilizzata esclusivamente la seconda linea di generazione, mentre per le onde da Libeccio sono state adottate entrambe.

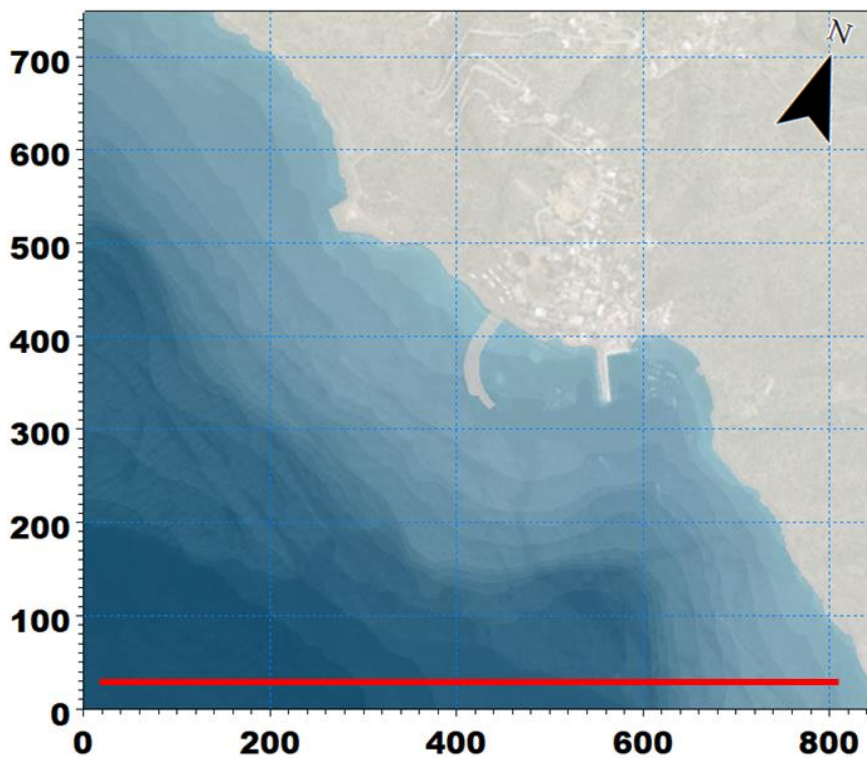


Figura 7-5 Localizzazione della prima linea di generazione (in rosso)

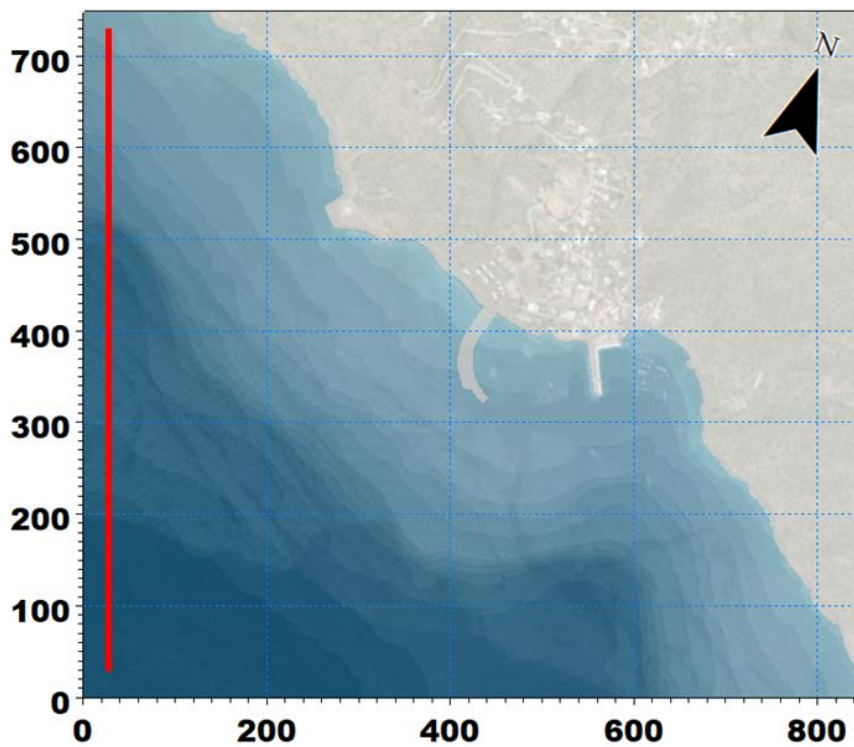


Figura 7-6 Localizzazione della seconda linea di generazione (in rosso)

## 7.4 Definizione dei parametri di riflessione

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

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

Nel presente studio tali coefficienti sono stati definiti in funzione delle caratteristiche delle strutture esistenti e in progetto, fornite dai progettisti (Figura 7-7).



Figura 7-7 Mappa dei coefficienti di riflessione assunti per le opere in progetti e quelle esistenti

## 7.5 Selezione delle onde di riferimento per lo studio

In considerazione del fatto che l'attuale fase di progettazione è relativa ad un primo stralcio della realizzazione del nuovo molo del porto di Rinella, risulta evidente che la protezione del nuovo bacino dall'agitazione ondosa risulterà, al termine di questa prima fase, parziale.

L'obiettivo dell'implementazione di un modello di agitazione ondosa alla configurazione di primo stralcio del molo è pertanto di fornire una stima dell'operatività del bacino stesso ancorché in assetto non definitivo. L'operatività è calcolata in termini di numero di giorni di superamento di prefissate soglie di altezza d'onda residua interna al bacino.



## STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

A tal fine sono stati utilizzati i risultati del modello in termini del cosiddetto coefficiente di disturbo, parametro definito come il rapporto tra l'altezza d'onda nel punto interno al bacino e quella al di fuori del porto (al contorno aperto del modello):

$$C_{Dist} = \frac{H_{Sin}}{H_{Sout}}$$

Moltiplicando i valori del coefficiente di disturbo per le altezze d'onda al largo si può ottenere, in ogni punto del bacino, il valore dell'agitazione ondosa residua interna al porto.

Il coefficiente di disturbo risulta fortemente dipendente dalla direzione di provenienza dell'onda e dal periodo di picco, mentre, all'interno di intervalli ragionevoli, risulta molto bassa la dipendenza dall'altezza d'onda.

La selezione delle condizioni d'onda da simulare è stata condotta scegliendo onde caratterizzate da una direzione media di provenienza (MWD) capace di generare un'agitazione ondosa interna al bacino portuale non trascurabile. Il porto di Rinella, in questa configurazione di primo stralcio, risulta esposto ad un settore di traversia piuttosto ampio, da SE fino a SO. La scelta delle onde di riferimento si è basata sul clima ondoso estratto in un "punto BW" (ubicazione in Figura 7-8), 500 m a sud dell'imboccatura del nuovo bacino.



**Figura 7-8 Ubicazione punto BW (Lon 14.828°E, Lat 38.541°N)**

In considerazione dell'esposizione del nuovo bacino portuale e della rosa del moto ondoso nel punto BW (Figura 7-9), le condizioni d'onda simulate con il modello BW fanno riferimento al settore direzionale compreso tra 130°N e 290°N. In particolare, il settore è stato discretizzato in 8 sotto-settori di 20° ciascuno.

Per ognuno degli otto settori è stato identificato e preso a riferimento per le simulazioni di agitazione ondosa il valore di altezza d'onda significativa  $H_s$  pari al 90°percentile del campione di eventi appartenenti al settore stesso.

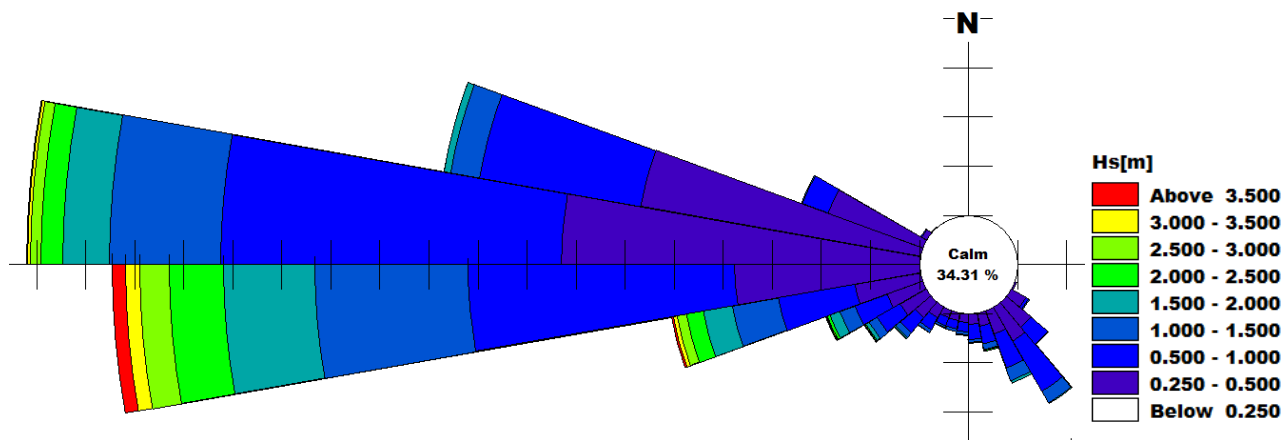


Figura 7-9 Rosa del moto ondoso nel punto BW (Lon 14.828°E, Lat 38.541°N)

Oltre alla direzione media di propagazione MWD, scelta pari alla direzione centrale di ogni singolo settore, a completamento della selezione delle condizioni d'onda si è provveduto ad associare a ciascuna onda un periodo di picco  $T_p$  con riferimento alle curve di regressione costruite sulla base degli eventi ricadenti nel settore stesso.

A seguire si riportano le caratteristiche delle condizioni d'onda selezionate:

Condizione d'onda	Hs [m]	$T_p$ [s]	MWD [°]
A	0.9	4.6	140
B	1.2	5.1	160
C	1.0	5.9	180
D	1.0	5.9	200
E	1.1	6.1	220
F	1.4	6.7	240
G	2.0	8.5	260
H	1.0	6.5	280

La propagazione delle onde prescelte è stata analizzata simulandone l'intero spettro in termini di direzione e frequenza, utilizzando onde direzionali irregolari, generate da un apposito applicativo di MIKE 21 BW. Per ogni onda di riferimento è stato assunto uno spettro di tipo JONSWAP.

## 7.6 Risultati del modello

Nelle immagini a seguire sono presentati i campi dei coefficienti di disturbo relativi alle onde simulate.

Come già anticipato il coefficiente di disturbo, adimensionale, è definito per ogni punto di calcolo come rapporto tra l'altezza d'onda risultante e l'altezza d'onda in ingresso al sistema e rappresenta il principale indicatore dell'agitazione interna conseguente a tutte le trasformazioni complessivamente subite dall'onda dal largo verso l'interno del porto. Tale coefficiente può essere ragionevolmente assunto costante, per ogni direzione d'onda, all'interno di un intervallo di valori di altezza tale da poter trascurare i termini non lineari della trasformazione del campo d'onda dal largo verso il bacino.

Attraverso questa assunzione, è possibile considerare quindi costanti, a pari direzione di provenienza, i valori dei coefficienti di disturbo forniti dal modello numerico relativamente all'insieme delle onde che, tra quelle che costituiscono il clima ondoso ordinario, presentano una frequenza indicativamente pari a qualche giorno all'anno.

Sulla base dei risultati delle simulazioni è stata stimata la frequenza di superamento di determinati valori soglia di  $H_s$  residua in riferimento a diverse aree destinate all'ormeggio delle imbarcazioni, individuate sulla base di posizione, esposizione, tipologia di arredo. Nell'immagine a seguire sono illustrate le aree individuate per l'analisi:

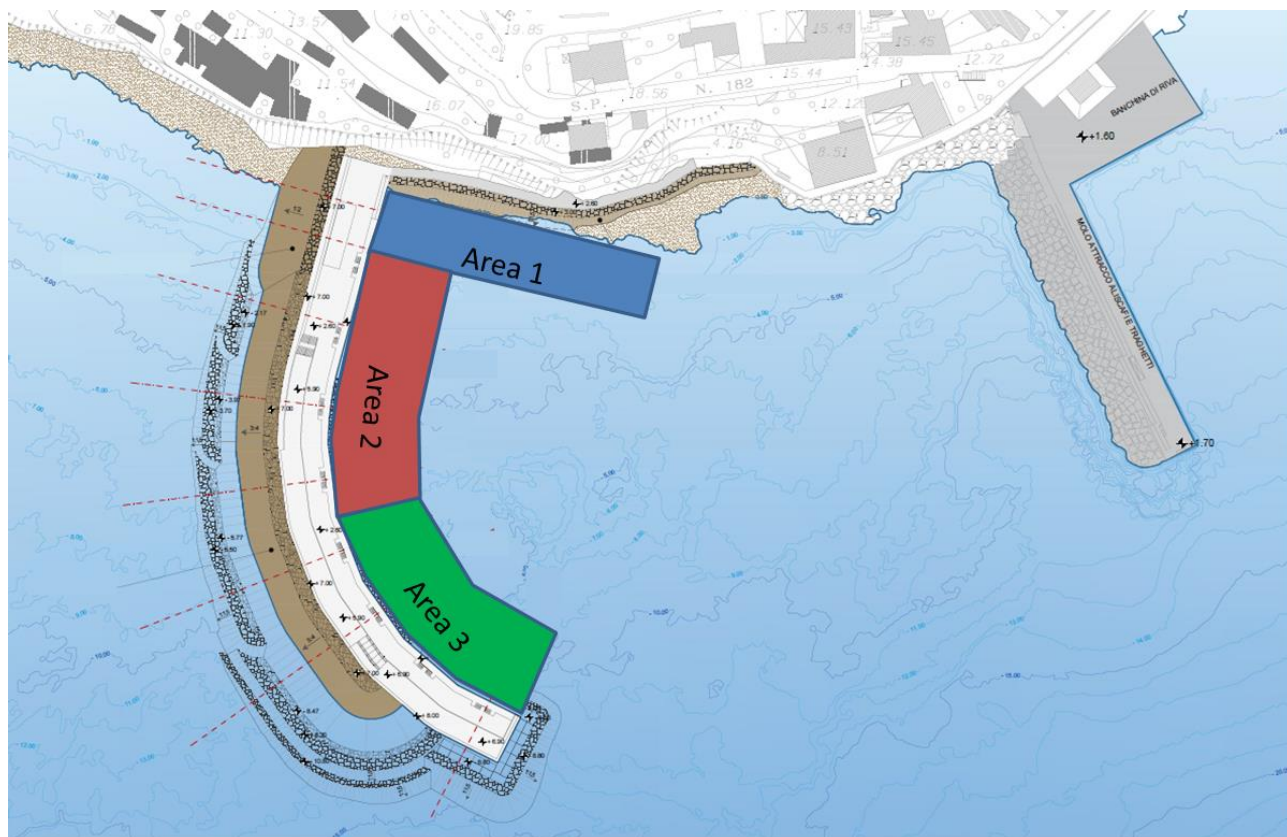


Figura 7-10 Individuazione delle aree individuate per la stima della frequenza di superamento di determinate soglie di altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Rinella



STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

L'analisi combinata dei campi dei coefficienti di disturbo e della frequenza delle classi "altezza d'onda vs direzione" ha permesso di calcolare, per ogni area di riferimento, il numero di giorni medio annuo per il quale è previsto il superamento dei valori soglia prefissati, qui assunti pari a 0.15 m e a 0.30 m.

Nelle immagini a seguire vengono riportate le distribuzioni del coefficiente di disturbo per gli otto scenari, mentre in Tabella 7-1 sono riportati i relativi valori.

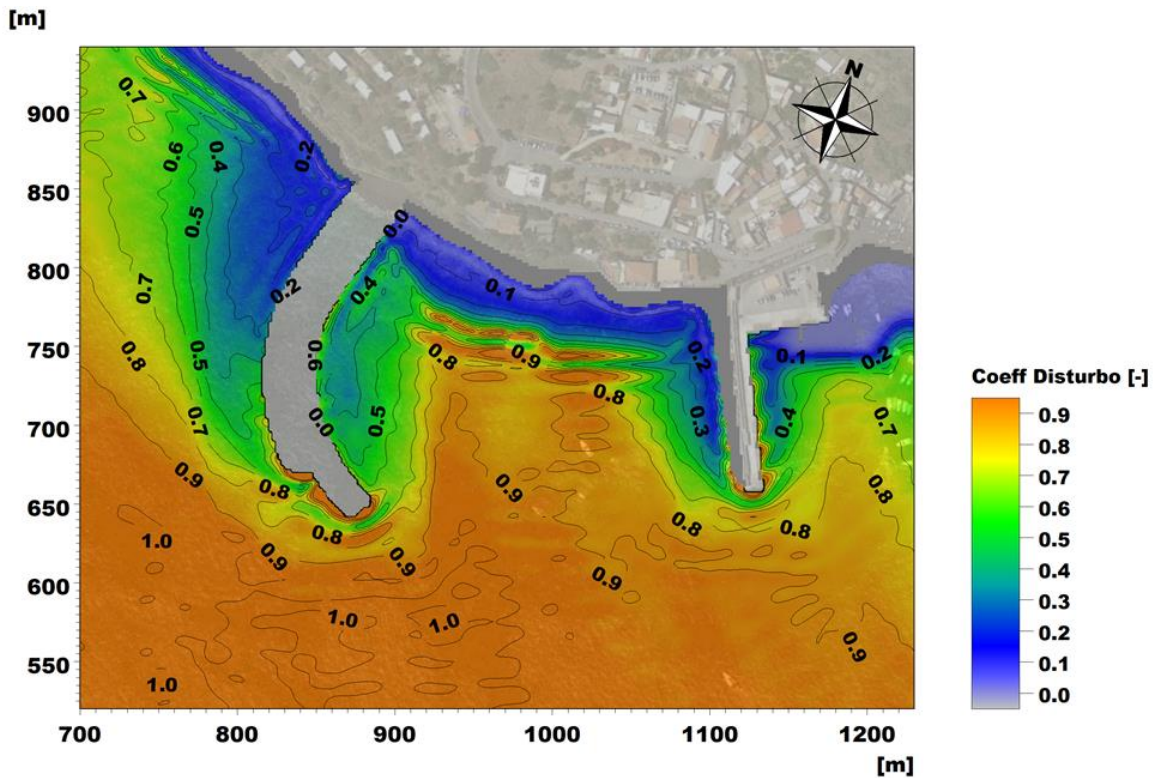


Figura 7-11 Onda A: distribuzione del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale di Rinella

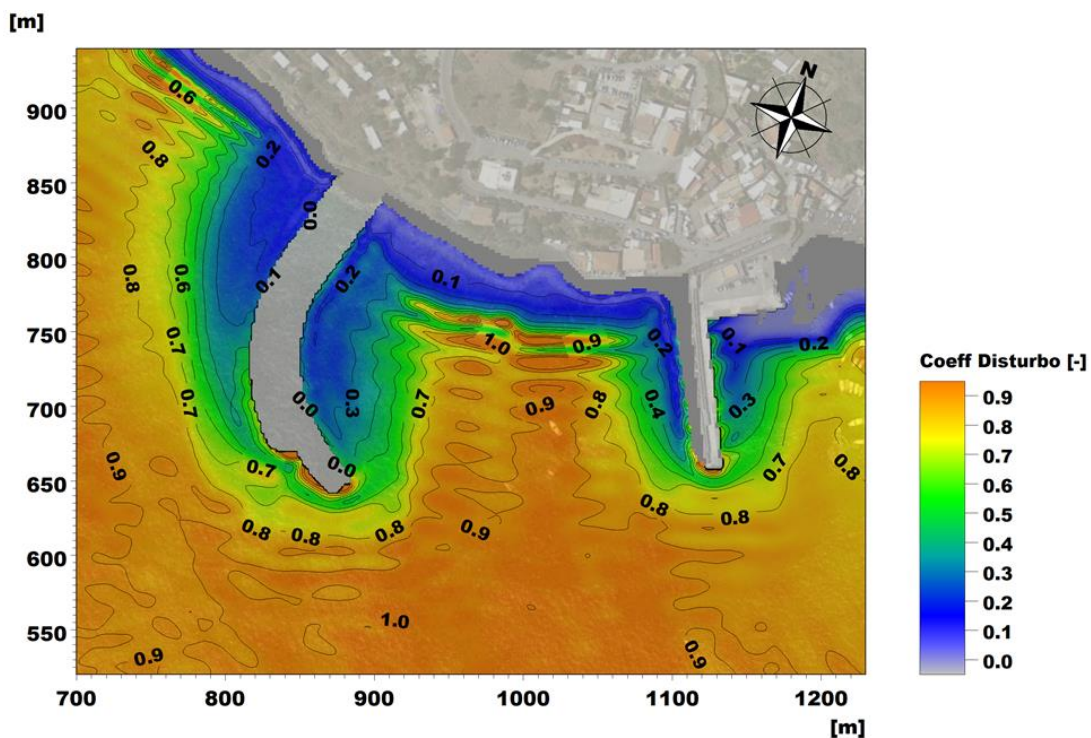


Figura 7-12 Onda B: distribuzione del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale di Rinella

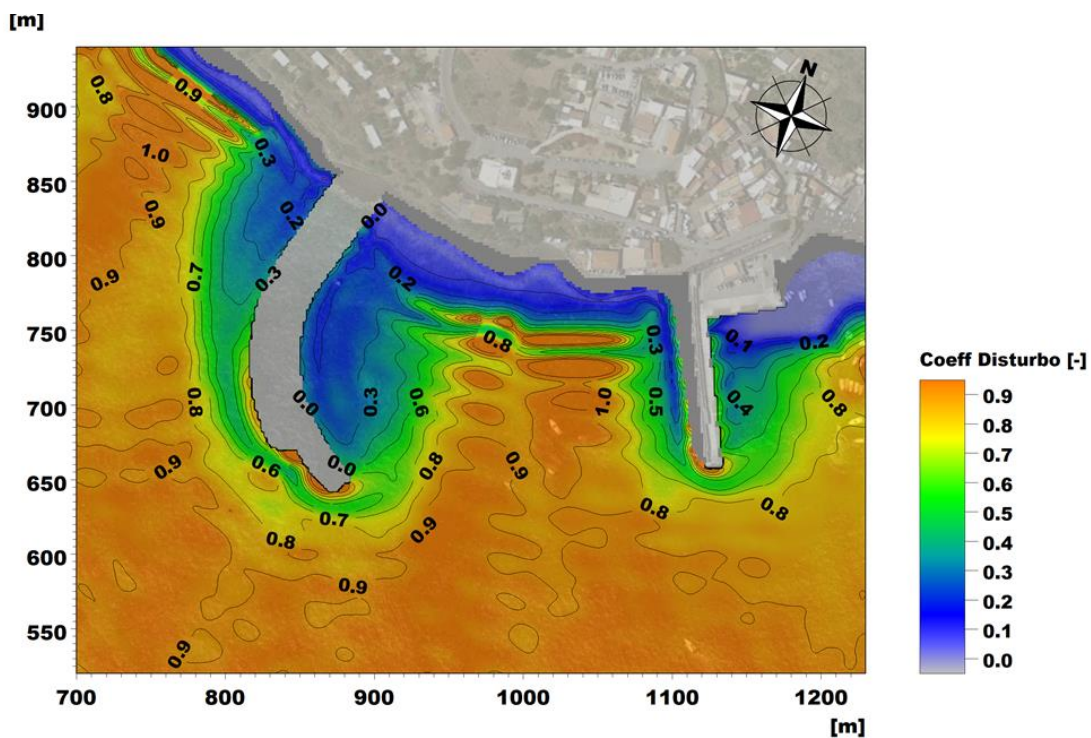


Figura 7-13 Onda C: distribuzione del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale di Rinella



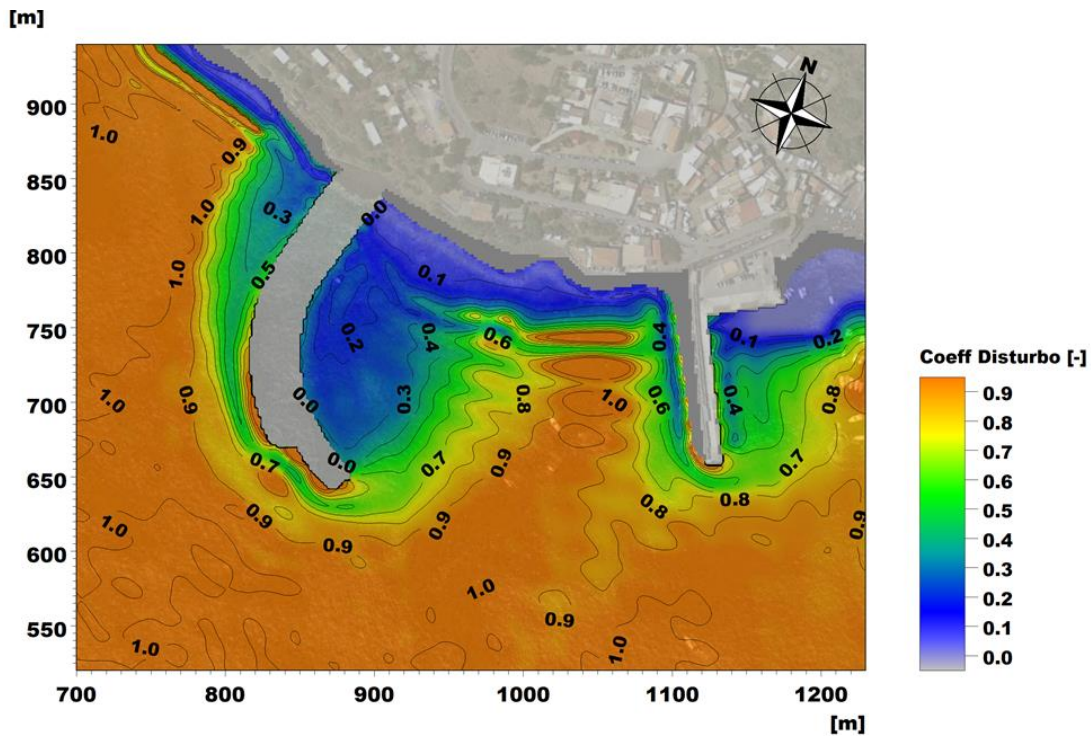


Figura 7-14 Onda D: distribuzione del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale di Rinella

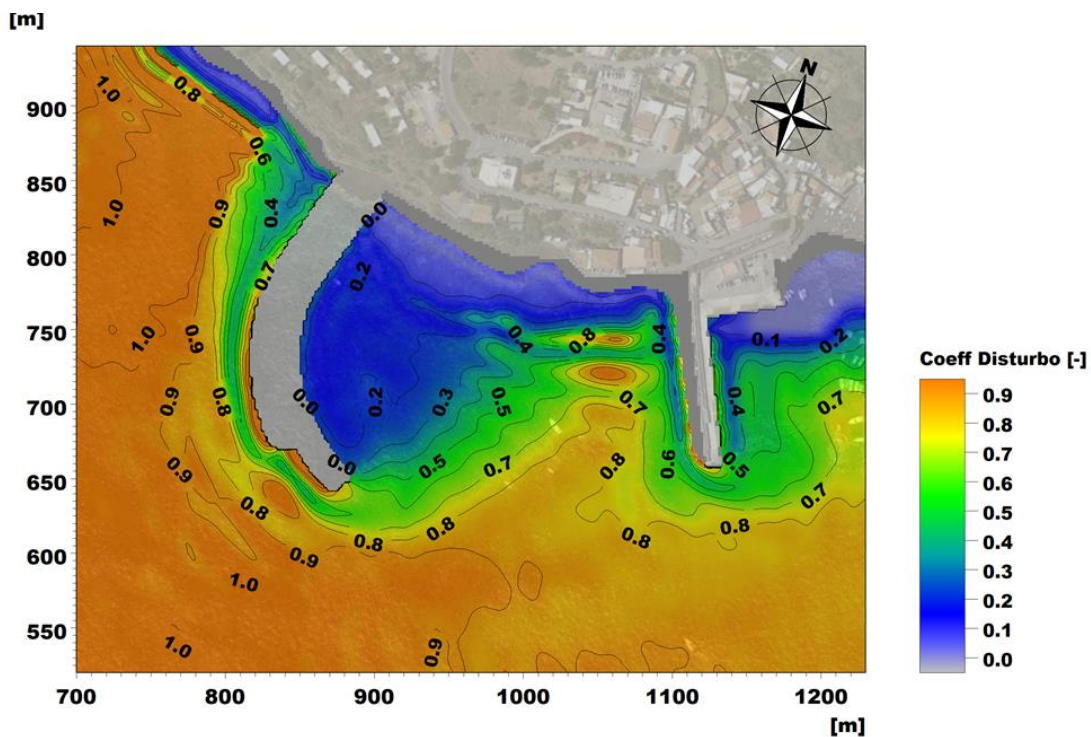


Figura 7-15 Onda E: distribuzione del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale di Rinella



STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

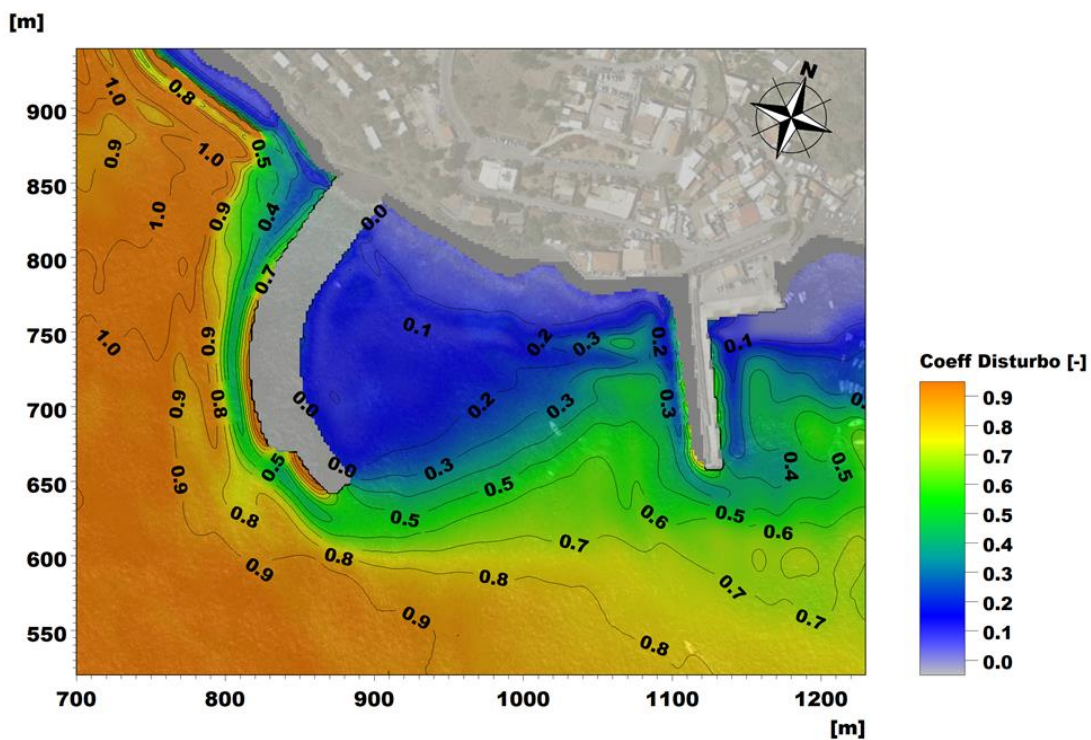


Figura 7-16 Onda F: distribuzione del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale di Rinella

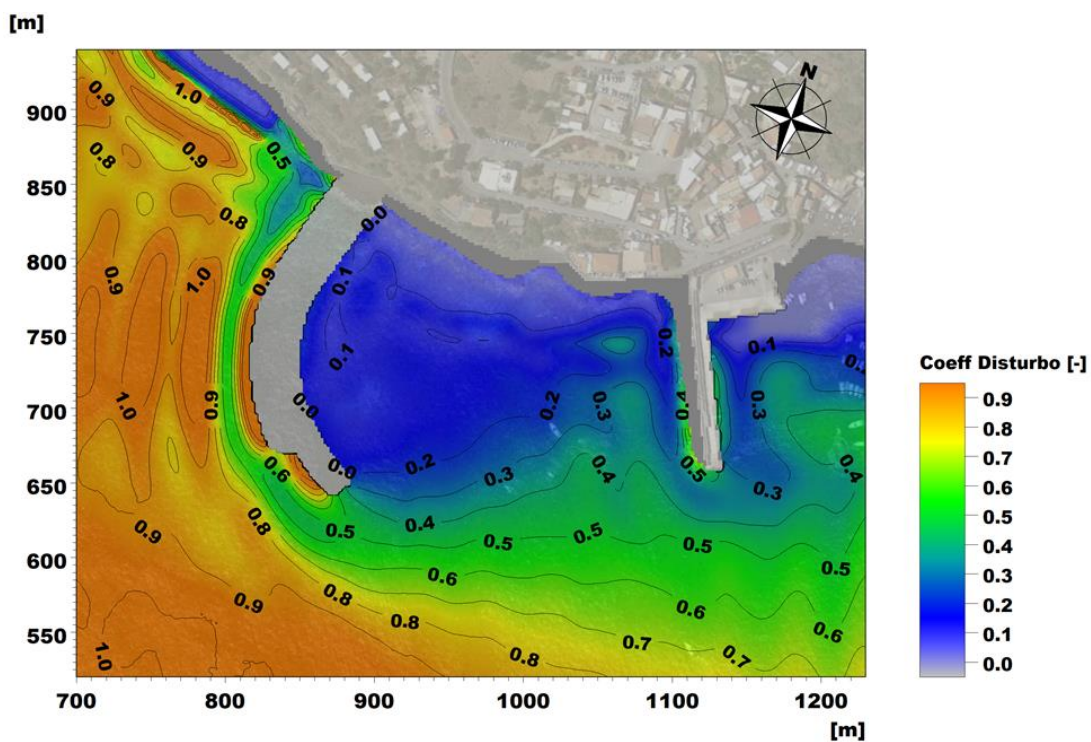


Figura 7-17 Onda G: distribuzione del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale di Rinella

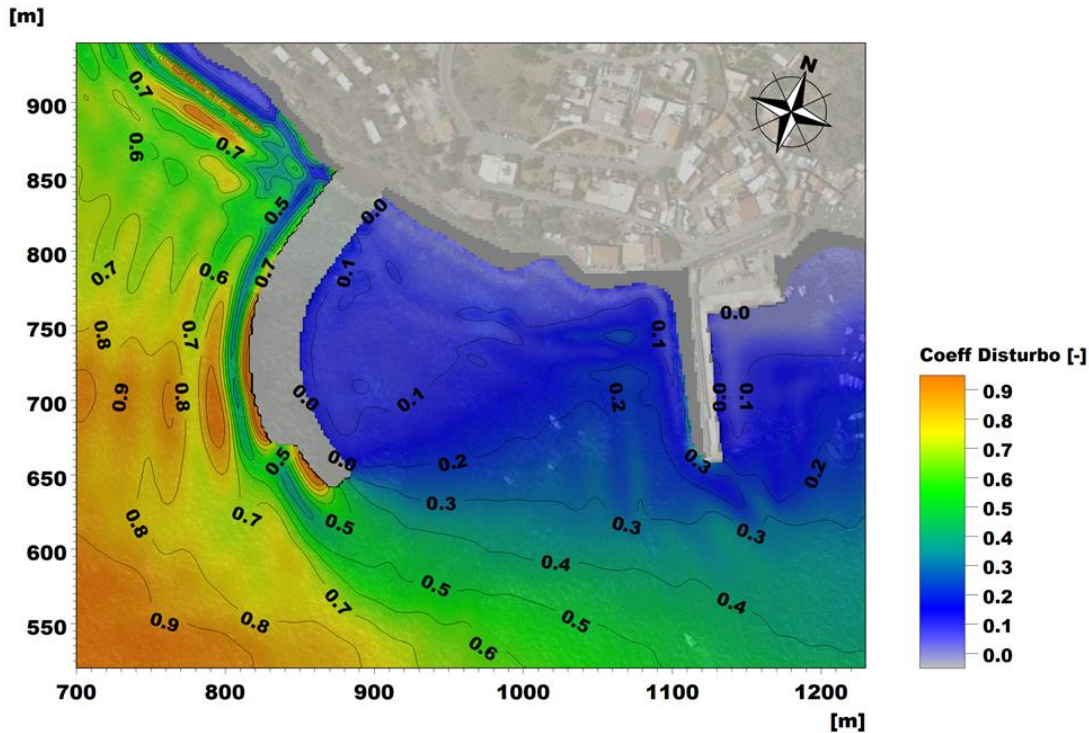


Figura 7-18 Onda H: distribuzione del coefficiente di disturbo all'interno del bacino portuale di Rinella

Tabella 7-1 Coefficiente di disturbo per le aree individuate nel bacino portuale di Rinella

Coefficiente di disturbo [-]								
Area	Onda A	Onda B	Onda C	Onda D	Onda E	Onda F	Onda G	Onda H
1	0.25	0.23	0.20	0.13	0.10	0.05	0.08	0.10
2	0.54	0.35	0.29	0.26	0.21	0.14	0.15	0.10
3	0.60	0.54	0.43	0.33	0.21	0.15	0.13	0.10

In Tabella 7-2 e Tabella 7-3 si riporta il numero di giorni di superamento medio annuo per un valore soglia di altezza d'onda residua interna assunto pari, rispettivamente, a 0.15 m e 0.30 m. Il totale dei giorni (ultima colonna) costituisce proprio il *downtime* associato alla soglia di altezza d'onda di volta in volta assunta.

**Tabella 7-2 Numero di giorni di superamento (medio annuo) della soglia di 0.15 m per le tre aree**

Hs>Hsoglia=0.15 m [gg]									
Area	Onda A	Onda B	Onda C	Onda D	Onda E	Onda F	Onda G	Onda H	TOTALE
1	5.3	3.8	1.2	0.2	0.2	0.0	11.5	6.4	<b>28.7</b>
2	11.2	7.0	2.4	1.3	2.1	3.0	34.6	6.4	<b>68.0</b>
3	11.2	8.2	3.5	1.7	2.1	3.4	27.7	6.4	<b>64.2</b>

**Tabella 7-3 Numero di giorni di superamento (medio annuo) della soglia di 0.30 m per le tre aree**

Hs>Hsoglia=0.30m [gg]									
Area	Onda A	Onda B	Onda C	Onda D	Onda E	Onda F	Onda G	Onda H	TOTALE
1	0.4	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.6	0.3	<b>2.3</b>
2	5.3	2.3	0.6	0.2	0.3	0.4	10.7	0.3	<b>20.1</b>
3	7.0	4.8	1.5	0.5	0.3	0.5	7.0	0.3	<b>21.9</b>



## 8 SINTESI E CONCLUSIONI

Il presente studio descrive in dettaglio tutte le attività di analisi e di modellazione numerica svolte a supporto del Progetto Definitivo delle "Opere di attuazione del Piano Regolatore Portuale di Rinella. 1° Stralcio Funzionale".

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 direzionale.

L'analisi del moto ondoso al largo ha permesso di comprendere il settore di provenienza degli eventi più severi (il settore di Ponente) e, attraverso la simulazione della propagazione largo-costa, di individuare le differenti modalità di abbattimento dell'onda a seconda della direzione media di provenienza.

I risultati della propagazione del moto ondoso da largo verso costa per l'intera serie dei 41 anni di dati orari a disposizione hanno inoltre permesso una caratterizzazione del clima ondoso sottocosta con processamento ed analisi statistica degli eventi estremi per un punto (denominato S), 1 km a sud dell'approdo di Rinella. A titolo di esempio, l'altezza d'onda con tempo di ritorno 50 anni per il settore di Ponente è pari a 6.95 m.

In funzione delle esigenze progettuali, la stima delle onde estreme è stata ottenuta in riferimento a diversi periodi di ritorno e settori direzionali:

- 50 anni, per le verifiche di tracimazione del molo;
- 70 anni, per il dimensionamento delle opere a gettata;
- 154 anni, per il dimensionamento di cassoni e paraonde.

Tali onde, per diversi settori direzionali, sono state simulate grazie alla predisposizione di un modello integrato onda-corrente, a maggior dettaglio e risoluzione spaziale rispetto al modello di propagazione largo-costa. I risultati del modello in termini di altezza d'onda, periodo e direzione in diversi punti in corrispondenza delle nuove opere in progetto sono stati messi a disposizione dei progettisti per il dimensionamento del nuovo molo e le opportune verifiche di tracimazione.

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 di primo stralcio e, attraverso la quantificazione del cosiddetto "downtime", stimare l'operatività dello specchio acqueo parzialmente protetto dalla nuova opera, per due differenti soglie di altezza d'onda residua, assunte pari a 0.15 m e a 0.30 m. Il superamento di tali valori è stato quantificato rispettivamente in circa 2 mesi e in 20 giorni.

## 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 2019. *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark
- [4] MIKE by DHI 2019. *MIKE 21 Hydrodynamic Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark
- [5] MIKE by DHI 2019. *MIKE 21 Boussinesq Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark
- [6] ENEA – Climate Modelling and Impact Laboratory - *Climate change and Sea Level Rise in the Mediterranean Sea: Result from a state of the art Regional Climate Model* – Remtech Expo 2019

## ALLEGATO A





## 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.

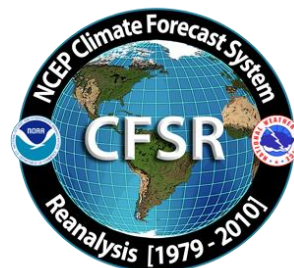


Figure A.1

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  $0.5^\circ$  horizontal resolution, while the vertical resolution changes greatly amongst the atmospheric variables, spanning from the single surface value up to values at 64 different isobaric levels.

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

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

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

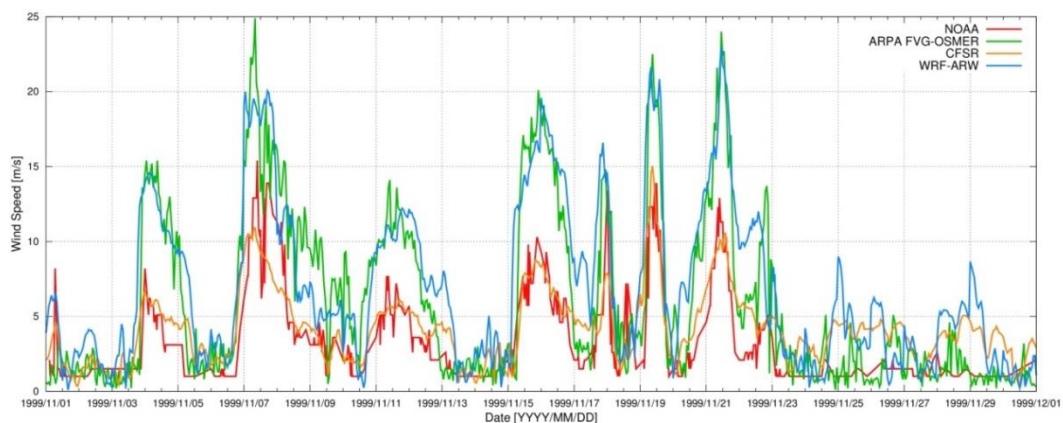


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

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

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

## WRF-ARW meteorological model

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



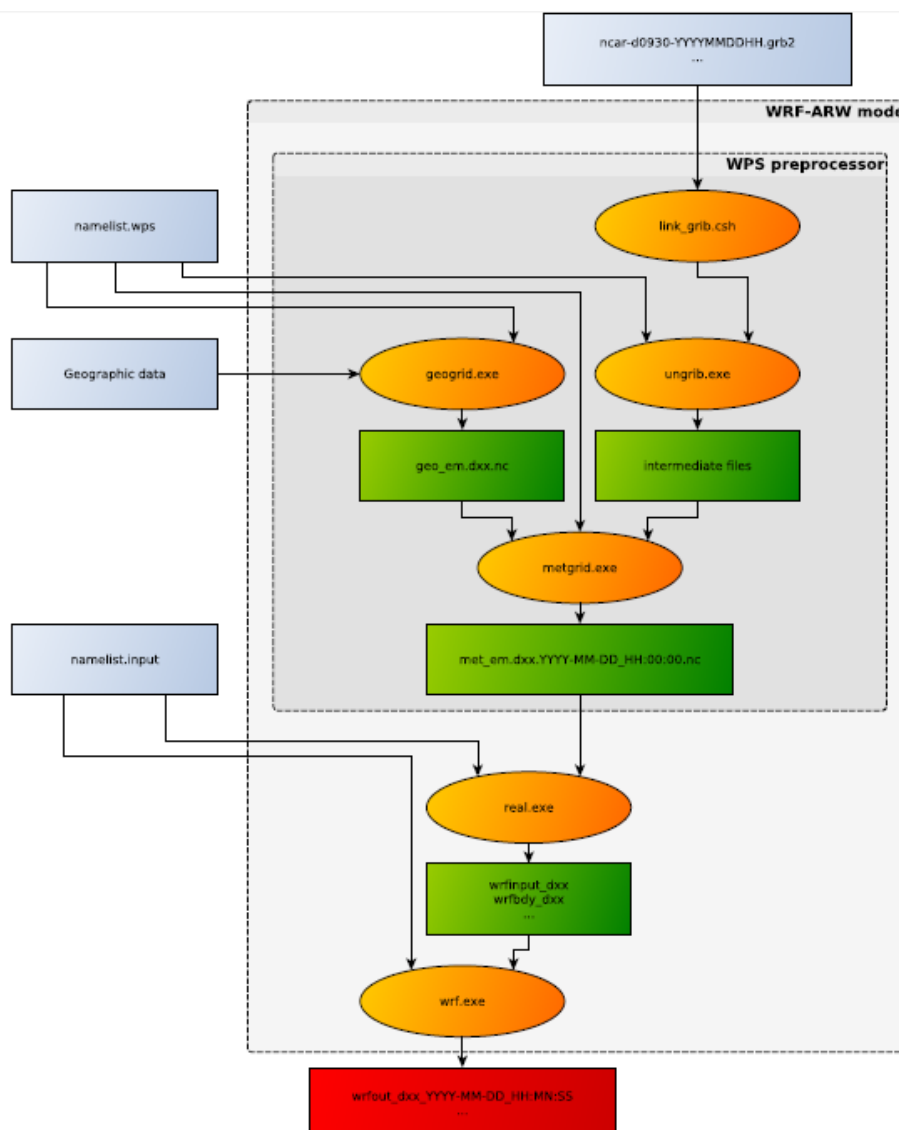


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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

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

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

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

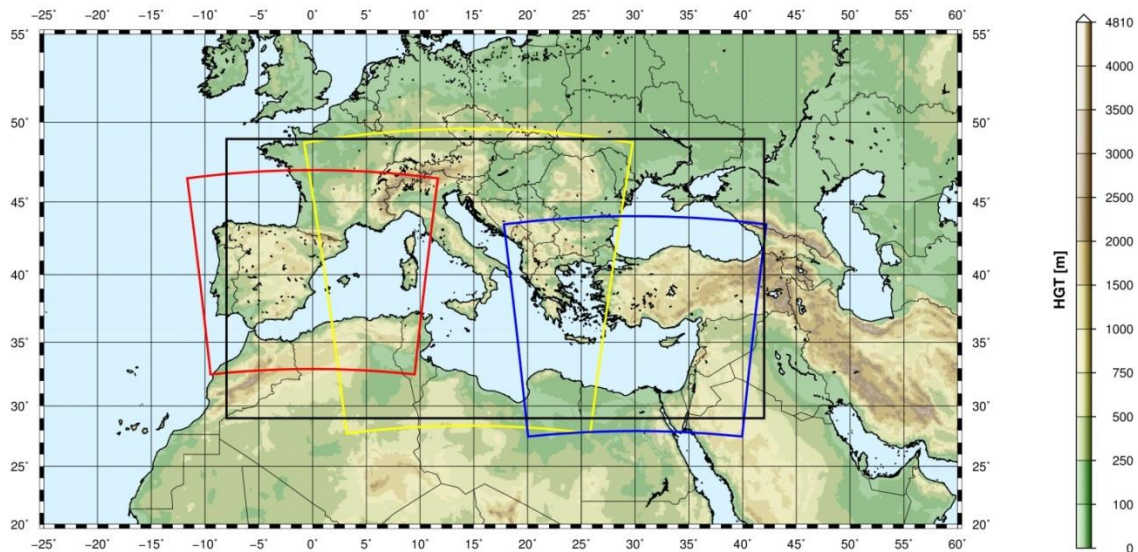


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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

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

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

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

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

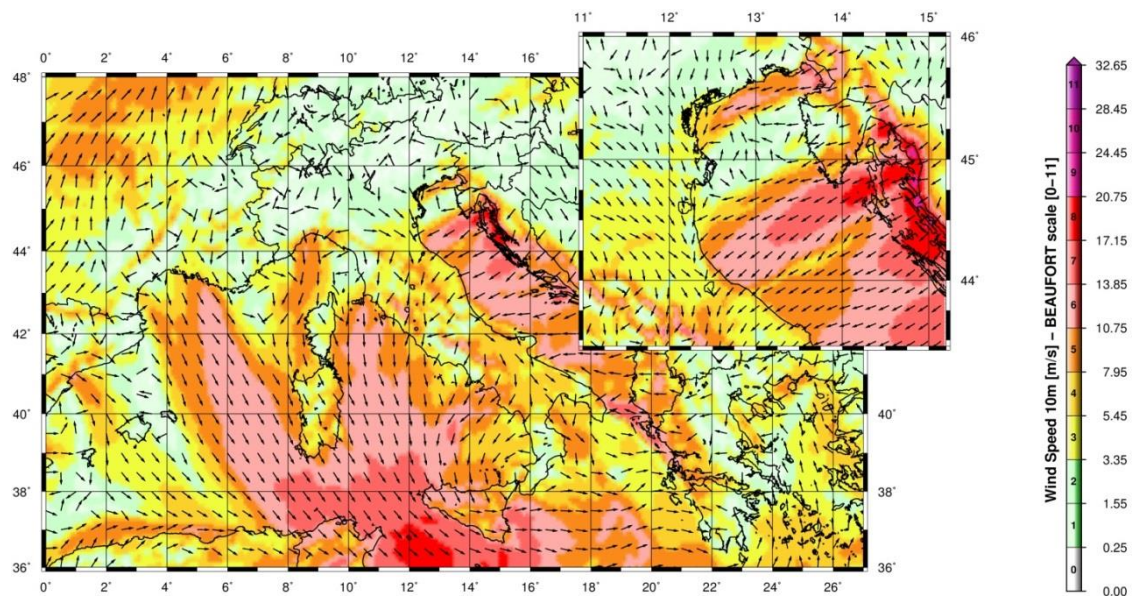


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

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

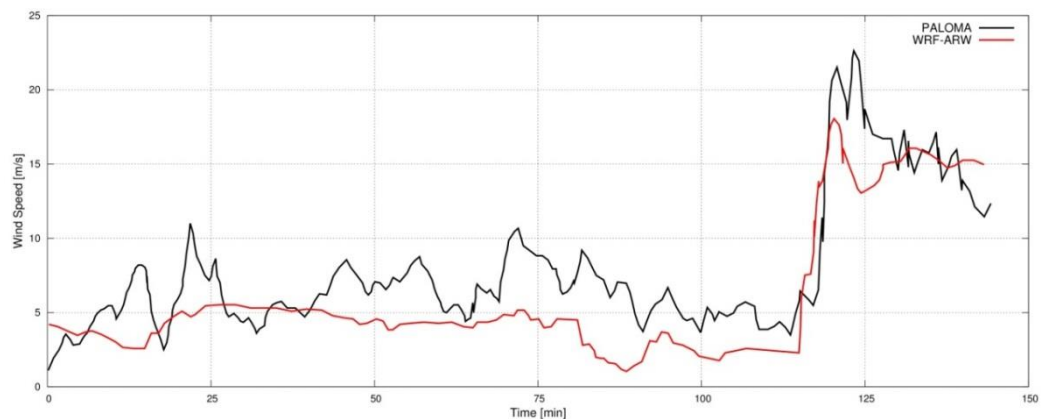


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black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

## MIKE 21 SW wave model

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

MIKE 21 SW includes two different formulations:

- Directional decoupled parametric formulation
- Fully spectral formulation

and includes the following physical phenomena:

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

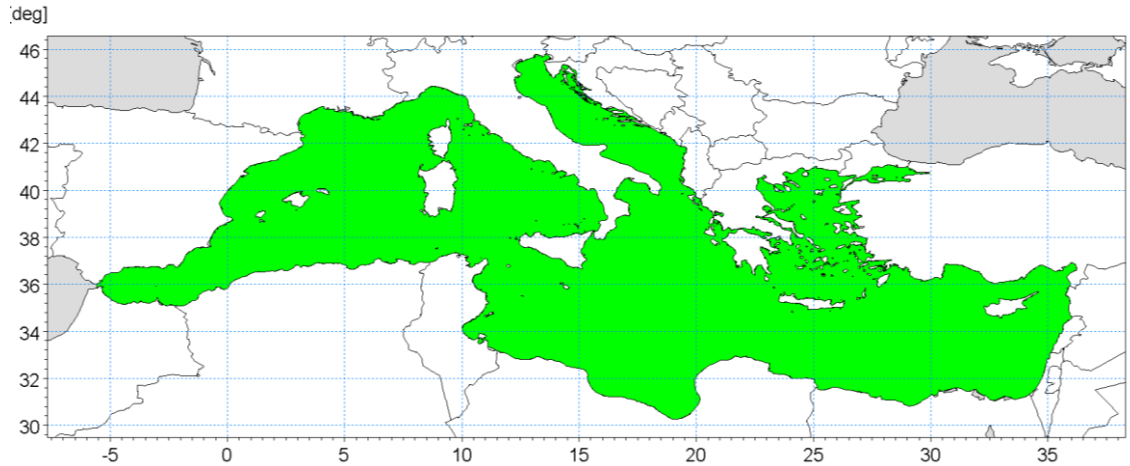


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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

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

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

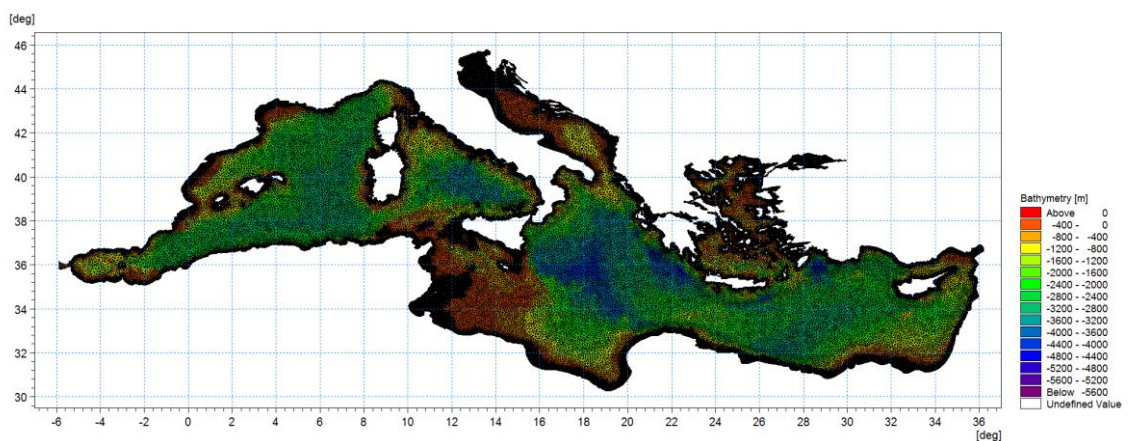


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

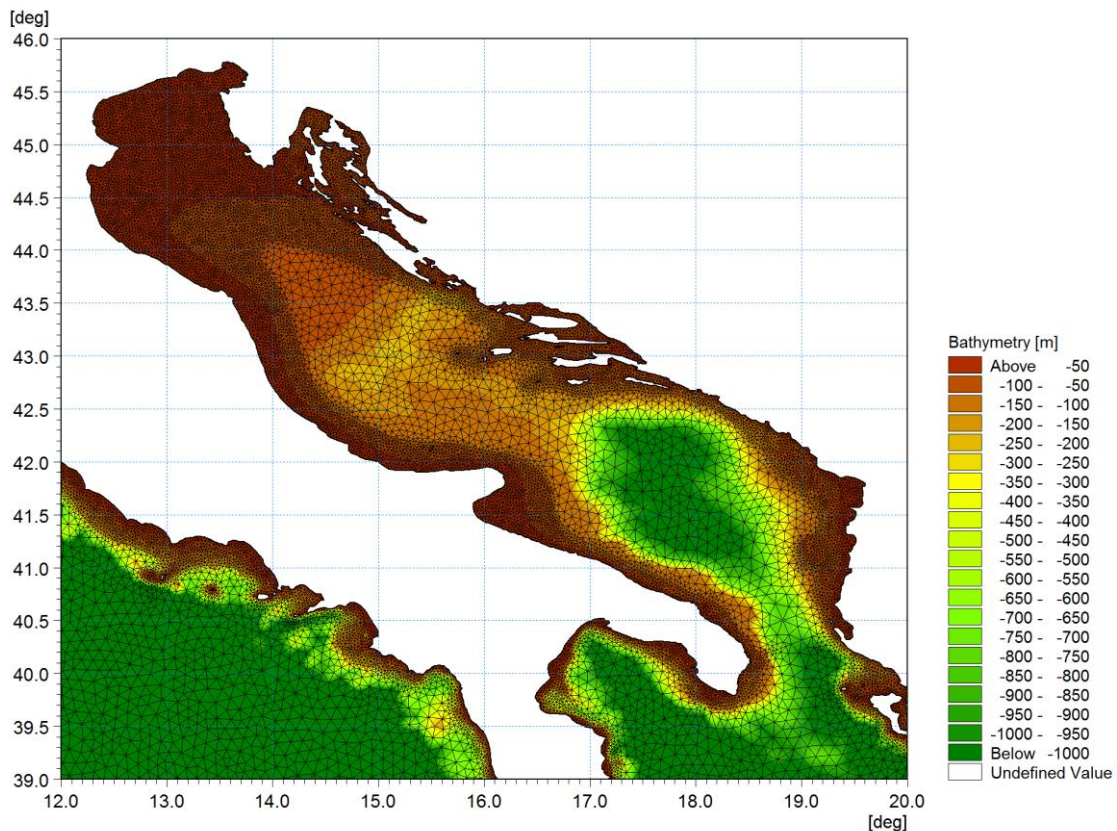


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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

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

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

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

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

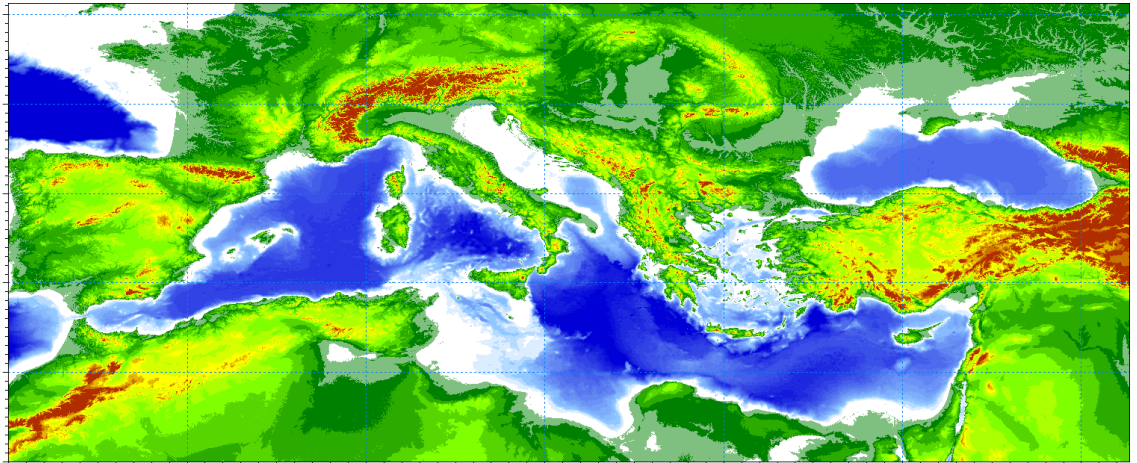


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO\_08 database

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

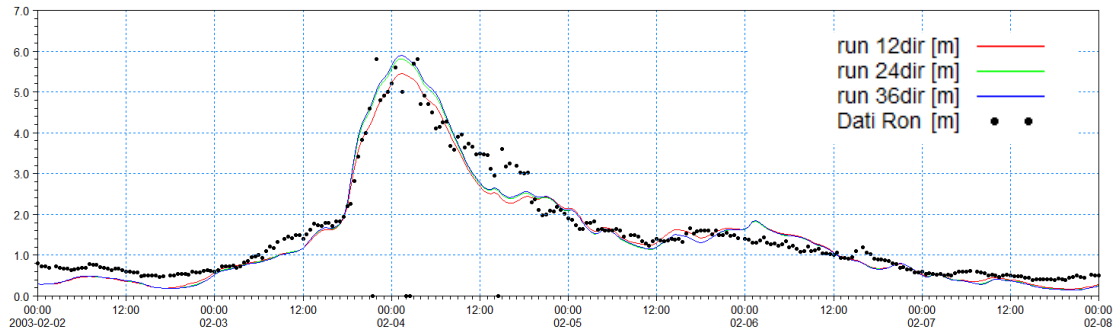


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

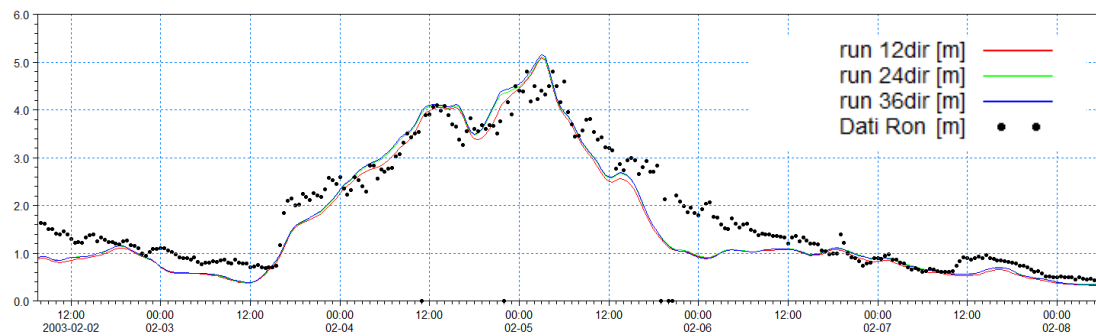


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

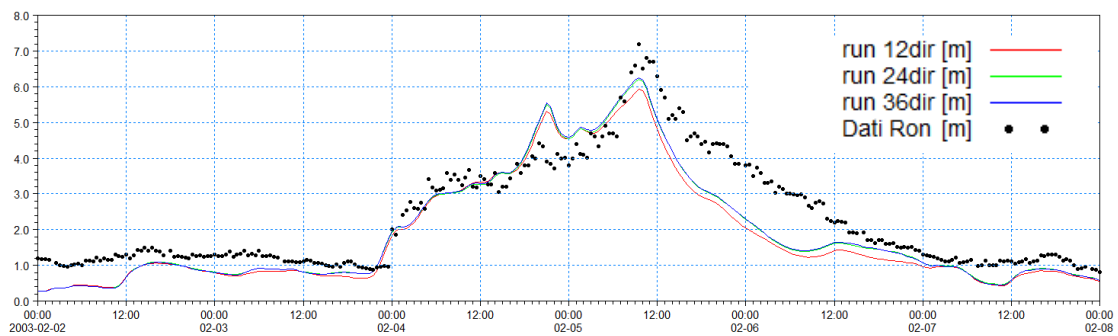


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions



## Available products of the MWM database

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

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

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

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

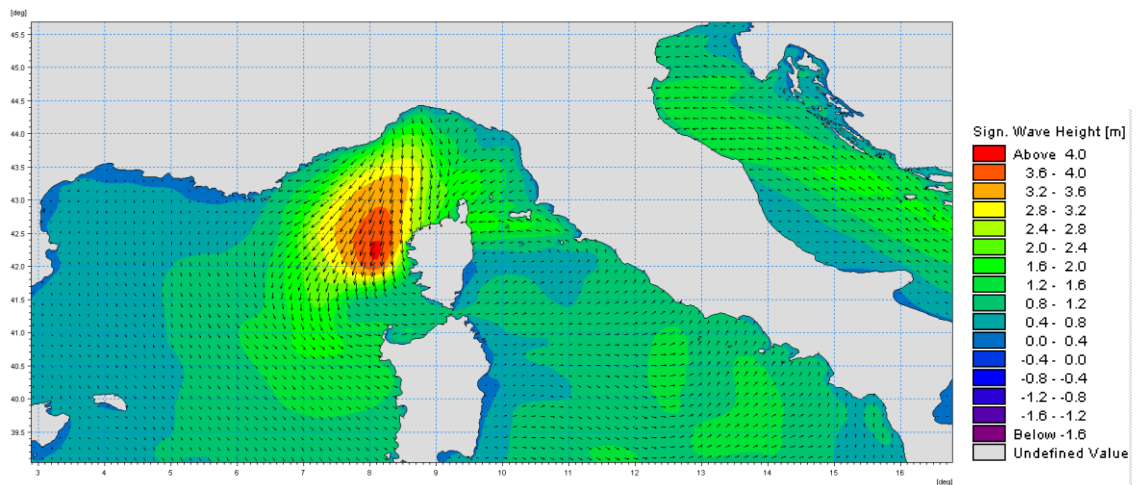


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

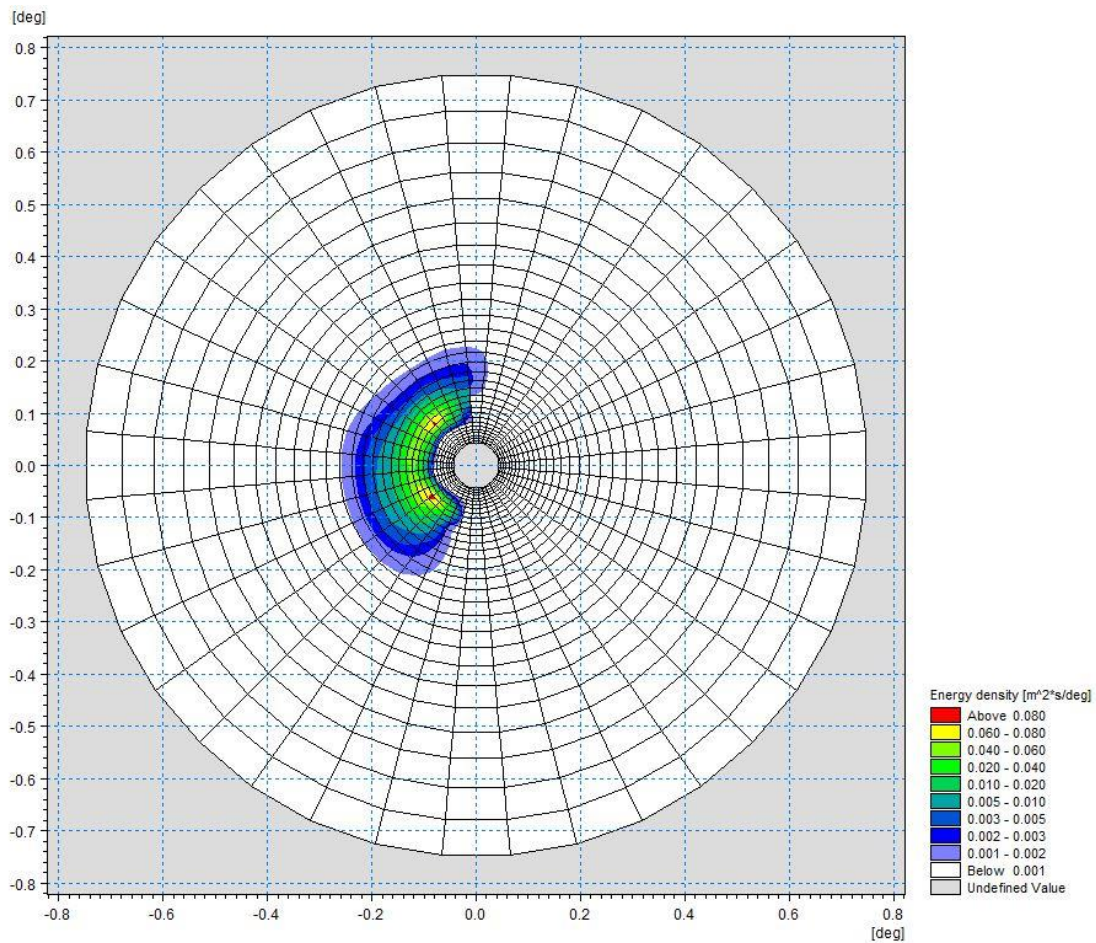


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

## References

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

## Web references

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

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

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

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

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

## **ALLEGATO B**



## MIKE 21

Modello bidimensionale per fiumi, laghi,  
aree costiere ed offshore





## INDICE

1	PREMESSA .....	1
2	MODULO D'ONDA (SW).....	4
3	MODULO IDRODINAMICO (HD FM).....	10
4	MODULO TRASPORTO SOLIDO - SEDIMENTI NON COESIVI (ST).....	15
5	MODULO TRASPORTO SOLIDO – SEDIMENTI COESIVI (MT).....	17
6	MODULO AVVEZIONE/DISPERSIONE (AD).....	22
7	MODULO DI BOUSSINESQ (BW).....	25

## 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:

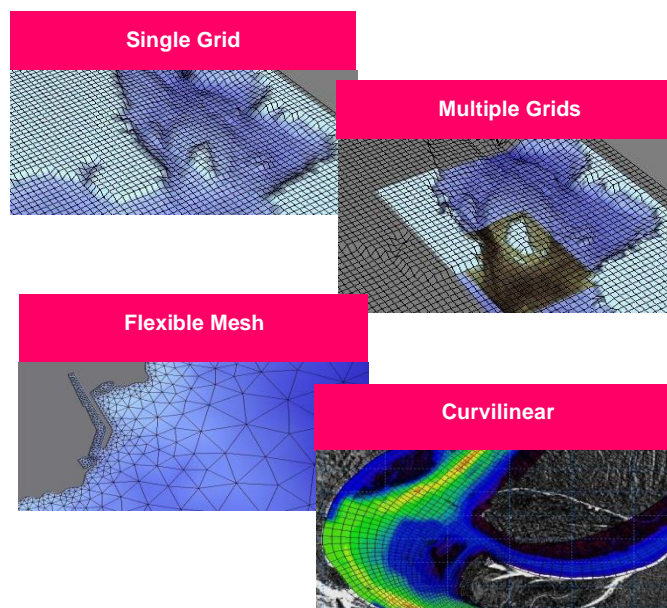
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo 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.

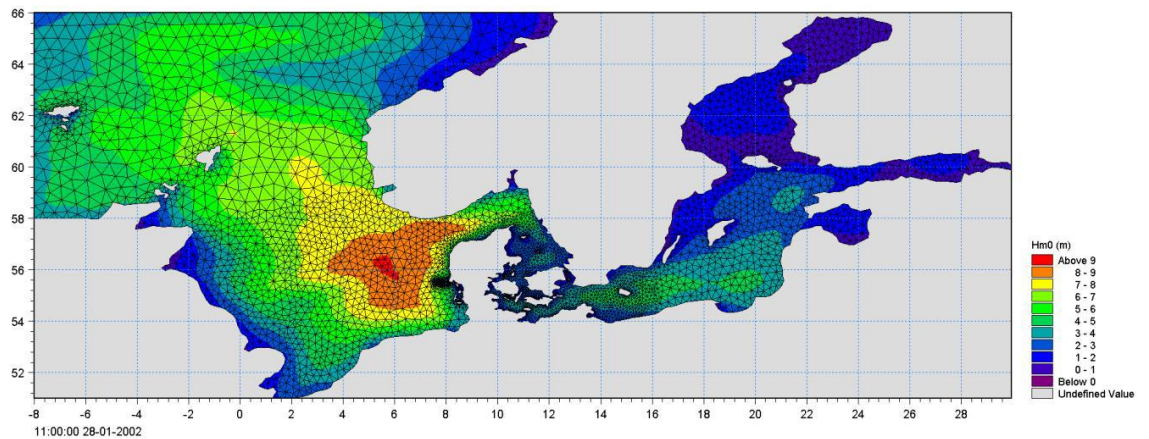
Il modello, nella formulazione “fully spectral”, include i seguenti fenomeni fisici:

- 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” (Holthuisen 1989) nel dominio delle frequenze introducendo come variabile dipendente il momento di ordine zero e di ordine uno. Le equazioni quindi diventano le seguenti:

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

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

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

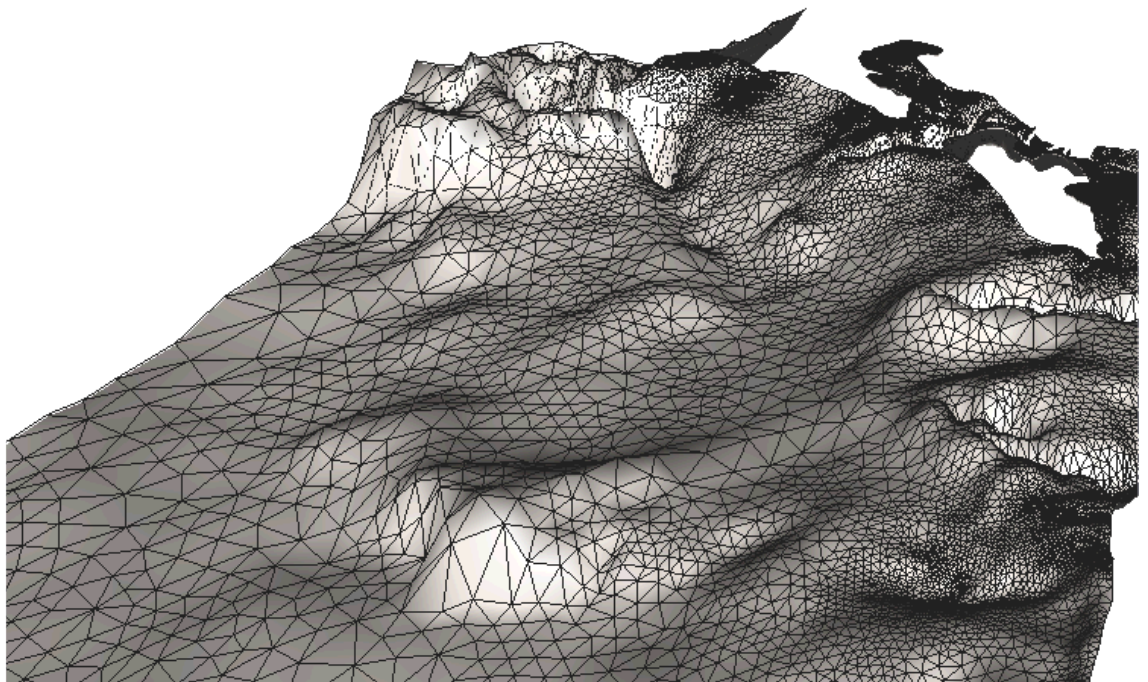
$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

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

## TECNICHE DI SOLUZIONE

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

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

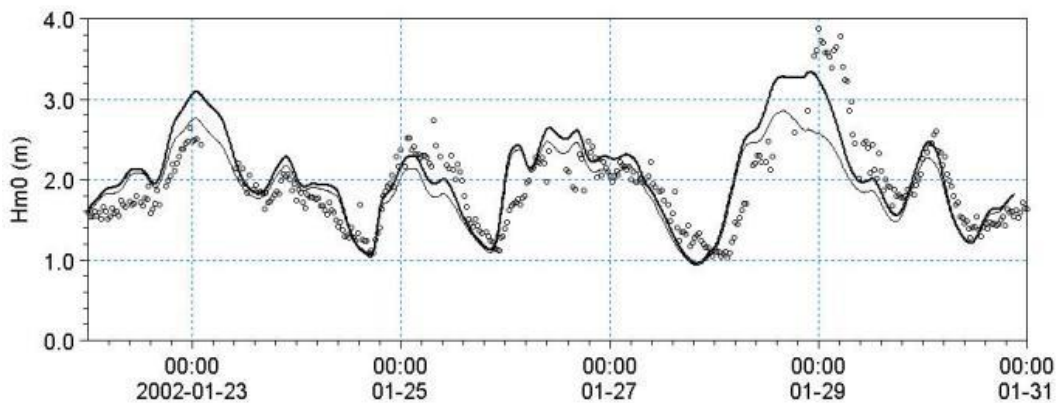
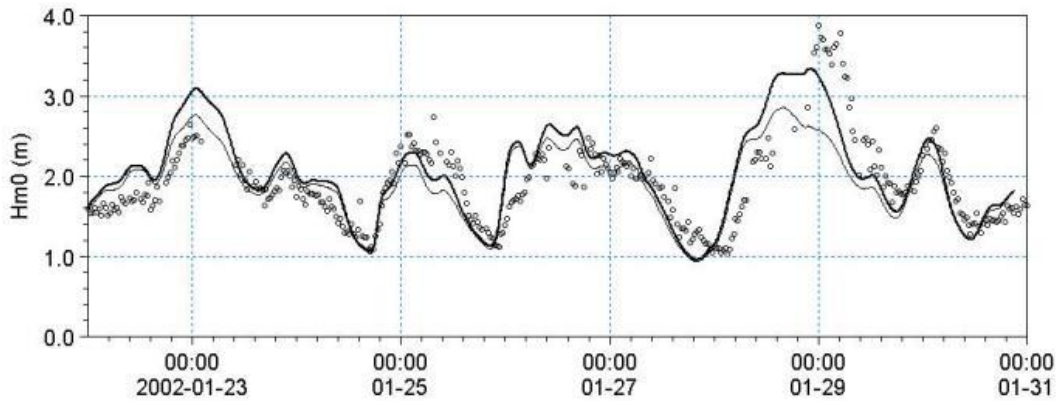
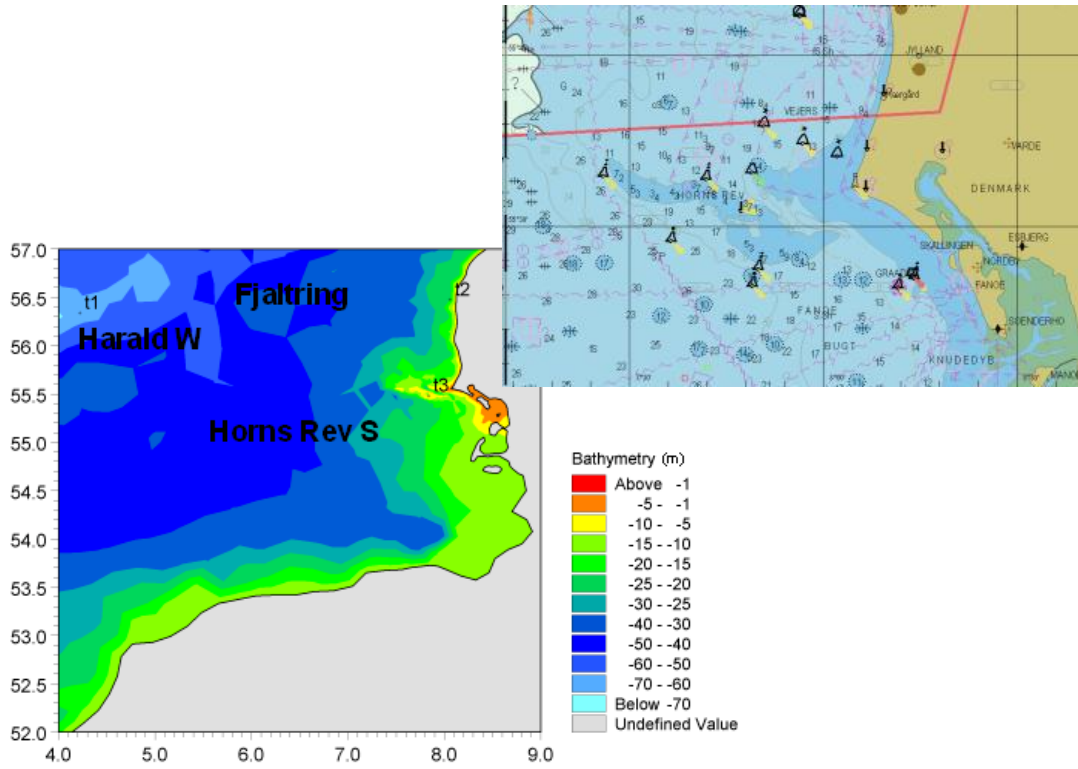


## INPUT AL MODELLO

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

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

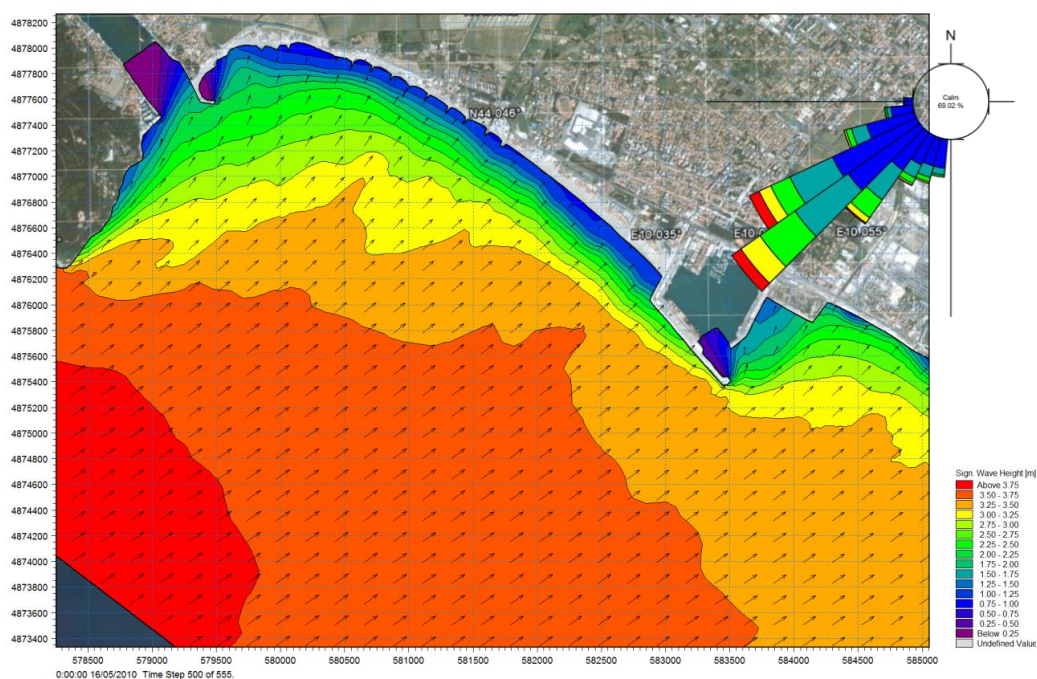




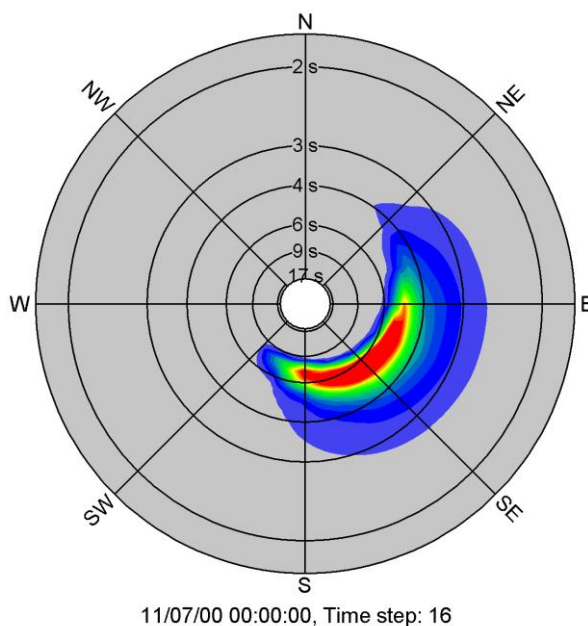
## OUTPUT DEL MODELLO

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

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



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



### 3 MODULO IDRODINAMICO (HD FM)

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

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

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

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

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

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

#### EQUAZIONI DEL MODELLO

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

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

Equazione di continuità:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente x:

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

Equazione della quantità di moto lungo la componente y:

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

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

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

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

I termini di diffusività orizzontale sono definiti da:

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

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

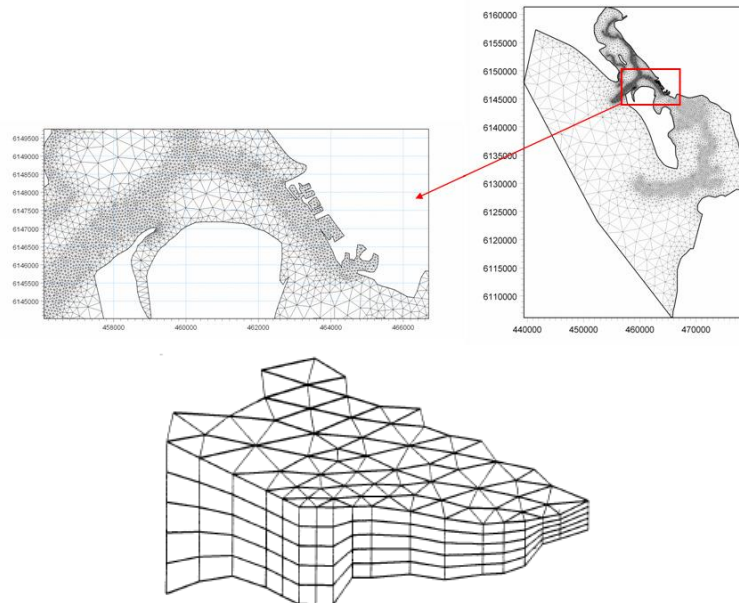


### Symbol list

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

## TECNICHE DI SOLUZIONE

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

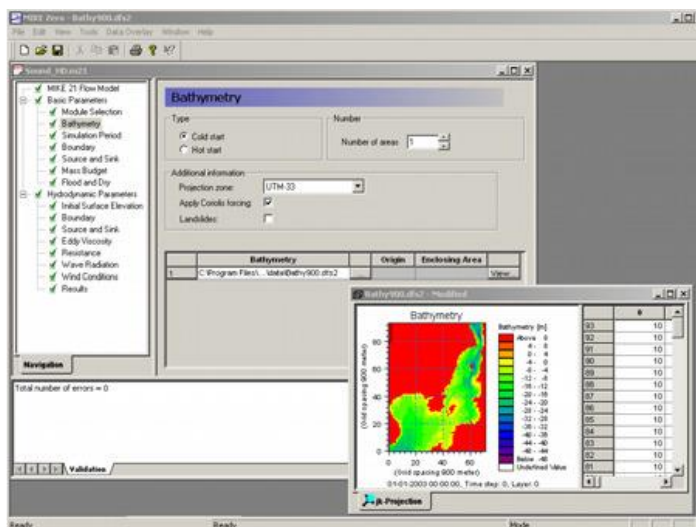


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

## INPUT AL MODELLO

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

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

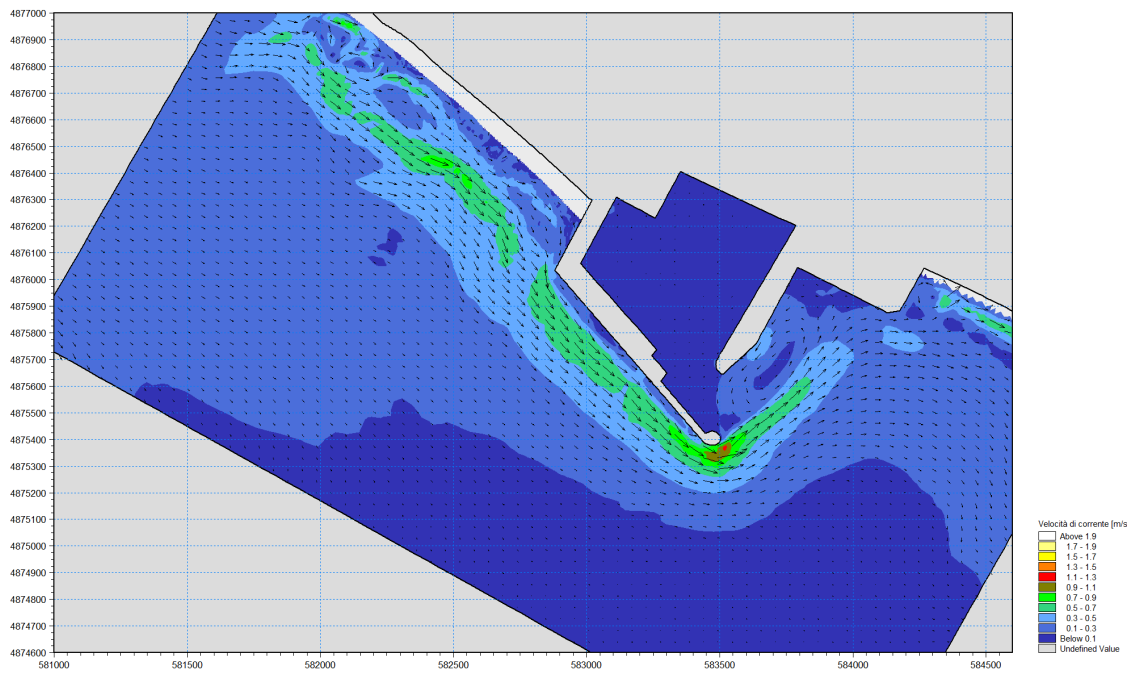


## OUTPUT DEL MODELLO

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

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

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



## 4 MODULO TRASPORTO SOLIDO - SEDIMENTI NON COESIVI (ST)

ST (Sand Transport) è il modulo di MIKE 21 per il calcolo della capacità di trasporto di sedimenti non coesivi, per effetto dell'azione combinata onde-correnti o delle sole correnti. MIKE 21 ST include svariate formulazioni di trasporto e può essere utilizzato indistintamente in campo marittimo-costiero o fluviale. In ambito fluviale MIKE 21 ST può essere sostituito dal MIKE 21 C che, utilizzando una griglia di calcolo curvilinea, rappresenta lo stato dell'arte tra i codici di calcolo per la morfologia fluviale.

Il modulo ST calcola il trasporto solido sulla base delle simulazioni idrodinamiche effettuate con il modulo HD ed eventualmente delle simulazioni di moto ondoso effettuate con SW. Per effettuare simulazioni a fondo mobile è possibile includere il feedback degli effetti dell'idrodinamica e della propagazione del moto ondoso sulla batimetria utilizzando i moduli HD, SW ed ST in maniera accoppiata.

Il modulo ST può essere applicato per la quantificazione della capacità di trasporto laddove il moto ondoso e/o le correnti causano trasporto di sedimenti non coesivi. ST può essere utilizzato per applicazioni a larga scala oppure a scala locale, laddove si desidera studiare l'impatto di strutture costiere sulla dinamica litoranea con risoluzioni dell'ordine del metro. Aree di applicazione tipiche sono: gestione e protezione dei litorali; ottimizzazione di layout portuali; studi di insabbiamento dei bacini portuali, morfologia costiera etc.



### TECNICHE DI SOLUZIONE

Il modulo ST di MIKE 21 presenta due diverse implementazioni numeriche a seconda che sia utilizzato in modalità "solo correnti" o modalità combinata onde-correnti.

#### Modalità combinata onda-corrente - approccio quasi 3D

Nel caso di effetto combinato di moto ondoso e correnti, i valori del trasporto solido sono calcolati attraverso la generazione di una tabella (Sediment Table) creata precedentemente alla simulazione. La generazione della tabella si basa su un approccio quasi-3D (metodo STP), tenendo conto delle condizioni locali di moto ondoso, del profilo di corrente e delle caratteristiche



sedimentologiche. Nel modello possono essere inclusi alcuni effetti secondari che possono avere una influenza sul trasporto solido, quali: la formazione di ripples, la pendenza del fondale, l'undertow, l'asimmetria del moto ondoso, lo streaming.

Per approccio "quasi 3D" si intende la possibilità di considerare (parametrizzandoli) alcuni aspetti tipicamente tridimensionali del trasporto solido anche se il calcolo del trasporto stesso viene effettuato attraverso un metodo, l'STP, che si basa su un approccio tipicamente 2D.

In particolare il modello tiene conto:

della caratterizzazione del profilo di corrente lungo la verticale: il valore di velocità di corrente mediato, preso in input da ST, viene ridistribuito lungo la verticale in modo tale da effettuare correttamente il calcolo del trasporto tenendo conto del reale profilo verticale di corrente;

della discretizzazione dell'onda infra-periodo: l'intero periodo dell'onda viene suddiviso in diversi step, per ciascuno dei quali viene effettuato il calcolo del trasporto.

#### Modalità "solo corrente"

Il modulo ST nella modalità "pure currents" offre la possibilità di includere il calcolo esplicito del trasporto in sospensione, attraverso la risoluzione dell'equazione di avvezione dispersione. In pratica, vengono tenuti in considerazione quegli effetti del trasporto che non si esauriscono nell'ambito di ciascuno step di calcolo del modello (formulazione di non-equilibrio, lag).

## 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);
- dati idrodinamici (livelli e campi di corrente calcolati con HD);
- dati di moto ondoso (campi di altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media di propagazione calcolati con SW);
- dati sedimentologici (diametro medio variabilità del fuso);
- parametri morfologici (tra cui la frequenza di upgrade della batimetria).

Input fondamentale per il modello è la cosiddetta "Sediment Table", un database che include i valori di capacità di trasporto calcolati al variare di: profondità, altezza dell'onda, velocità della corrente, granulometria del materiale di fondo ecc., in un range ipotizzato per tali grandezze. Durante la simulazione vera e propria, il modulo MIKE 21 ST "legge" le condizioni locali delle grandezze di interesse e preleva le informazioni dalla Sediment Table, calcolando il valore di capacità di trasporto da associare alla singola cella per interpolazione a partire dalle condizioni più prossime. La Sediment Table deve essere generata utilizzando l'apposito applicativo "Generation of Q3D Sediment Tables".

## OUTPUT DEL MODELLO

In output vengono rappresentati il campo vettoriale della capacità di trasporto (direzione ed entità del trasporto) i tassi di sedimentazione/erosione del fondo e, nel caso di simulazione a fondo mobile, le variazioni effettive della batimetria.

## 5 MODULO TRASPORTO SOLIDO – SEDIMENTI COESIVI (MT)

MT (Mud Transport) è il modulo di MIKE 21 che descrive l'erosione, il trasporto e la deposizione di limi e misture sabbie/limi sotto l'azione di correnti e di onde.

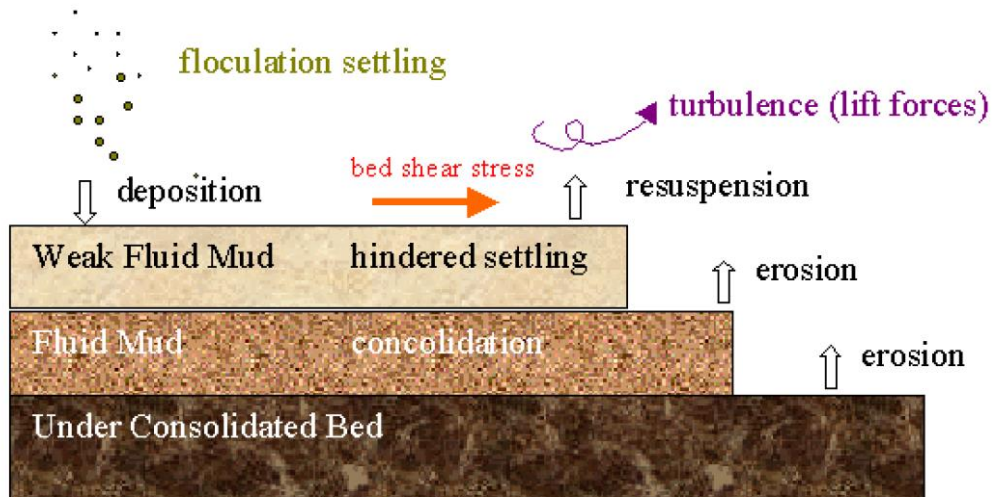
Il modulo MT calcola il trasporto solido sulla base delle simulazioni idrodinamiche effettuate con il modulo HD ed eventualmente delle simulazioni di moto ondoso effettuate con SW. Per effettuare simulazioni a fondo mobile è possibile includere il feedback degli effetti dell'idrodinamica sulla batimetria utilizzando i moduli HD, SW ed MT in maniera accoppiata.

Il Modulo MT può essere applicato in svariati casi, laddove si verificano fenomeni di erosione, deposizione e dispersione di sedimenti fini. In particolare: per studi di trasporto solido per materiali coesivi o per misture sabbie/limi in estuari o aree costiere, nelle quali sono importanti gli aspetti ambientali e può facilmente diminuire la qualità dell'acqua; insabbiamento nei porti, canali navigabili, fiumi, invasi; studi di dragaggio di fondali e del relativo plume.



E' possibile includere in MIKE 21 MT:

- simulazione di frazioni multiple di sedimenti;
- simulazione di diversi "bed layers";
- flocculazione;
- inclusione di sedimenti non-coesivi;
- bed shear stress risultanti dall'azione combinata onde-correnti;
- update morfologico del fondale;
- consolidamento.



### EQUAZIONI DEL MODELLO

Le equazioni del modulo MT sono basate essenzialmente su *Mehta et al.* (1989), che riguardano il movimento del sedimento fine in un fluido e la sua interazione con il fondo. L'azione del moto ondoso è introdotta mediante il "bed shear stress". L'equazione del trasporto è descritta di seguito (*Teisson 1991*):

$$\frac{\partial c^i}{\partial t} + \frac{\partial uc^i}{\partial x} + \frac{\partial vc^i}{\partial y} + \frac{\partial wc^i}{\partial z} - \frac{\partial w_s c^i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\nu_{Tx}}{\sigma_{Tx}^i} \frac{\partial c^i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\nu_{Ty}}{\sigma_{Ty}^i} \frac{\partial c^i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\nu_{Tz}}{\sigma_{Tz}^i} \frac{\partial c^i}{\partial z} \right) + S^i$$

### Symbol list

$t$	<i>time</i>
$x, y, z$ :	<i>Cartesian co-ordinates</i>
$u, v, w$ :	<i>flow velocity components</i>
$D_v$ :	<i>vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient</i>
$c^i$ :	<i>the <math>i</math>'th scalar component (defined as the mass concentration)</i>
$w_s^i$ :	<i>fall velocity</i>
$\sigma_{Tx}^i$ :	<i>turbulent Schmidt number</i>
$\nu_{Tx}$ :	<i>anisotropic eddy viscosity</i>
$S^i$ :	<i>source term</i>

La velocità di sedimentazione, descritta dal termine  $\frac{\partial w_s c^i}{\partial z}$ , può essere specificata come un valore costante se la concentrazione del sedimento risulta inferiore ad un determinato valore ( $c < c_{floc}$ ). Al di sotto di tale valore di concentrazione, la flocculazione può essere ritenuta trascurabile e pertanto si può applicare un valore costante della velocità di sedimentazione ( $w_s = k$ ).

Nel momento in cui  $c > c_{floc}$ , il sedimento inizia a flocculare e la velocità di sedimentazione viene descritta dalla relazione seguente (Burt 1986):

$$w_s = k \times \left( \frac{c}{\rho_{sediment}} \right)^\gamma$$

laddove  $k$  è una costante,  $\rho_{sediment}$  è la densità del sedimento e  $\gamma$  è un coefficiente che regola la sedimentazione.

Nel momento in cui viene raggiunta una concentrazione di sedimenti relativamente alta ( $c > c_{hindered}$ ) i fiocchi di sedimento iniziano ad ostacolarsi l'un l'altro, per tale motivo la velocità di sedimentazione si riduce. Tale riduzione è implementata nel codice secondo le formulazioni di Richardson e Zaki (1954) e Winterwerp (1999).

La Deposizione è descritta nel modo seguente (Krone, 1962):

$$S_D = w_s c_b p_D$$

dove  $w_s$  è la velocità di sedimentazione,  $c_b$  è la concentrazione di sedimento sospeso al fondo e  $p_D$  è espressione della probabilità di deposizione:

$$p_D = 1 - \frac{\tau}{\tau_{cd}}$$



L'erosione è trattata nel modello in due modi differenti, in funzione della consistenza del fondale. Per fondali consolidati, il tasso di erosione  $S_E$  viene definito nel modo seguente (Partheniades, 1965):

$$S_E = E \left( \frac{\tau_b}{\tau_c} - 1 \right)^n$$

dove  $E$  è l'erodibilità,  $n$  rappresenta la potenza dell'erosione,  $\tau_b$  è il "bed shear stress" mentre  $\tau_c$  è il "bed shear stress" critico.

Nel caso di fondale parzialmente consolidato il tasso di erosione viene definito secondo Parchure e Mehta (1985):

$$S_E = E \left( e^{\alpha \sqrt{\tau_b - \tau_c}} \right)$$

Nel caso simulazioni a lungo termine la consolidazione di sedimenti depositati può ricoprire un ruolo importante. Nel caso in cui si utilizzino diversi "bed layers" è possibile applicare un tasso di transizione ( $T_i$ ) che consente ai sedimenti degli strati superiori di passare agli strati inferiori (consolidamento).

## TECNICHE DI SOLUZIONE

La soluzione delle equazioni del trasporto è strettamente legata alla soluzione delle condizioni idrodinamiche. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base viene effettuata utilizzando un approccio ai volumi finiti. Il dominio spaziale è discretizzato da una suddivisione del continuo in celle non sovrapposte. Nel piano orizzontale viene utilizzata una mesh non strutturata mentre nel dominio verticale (nel caso di modello 3D) viene utilizzata una mesh strutturata. L'integrazione temporale è effettuata utilizzando uno schema esplicito.

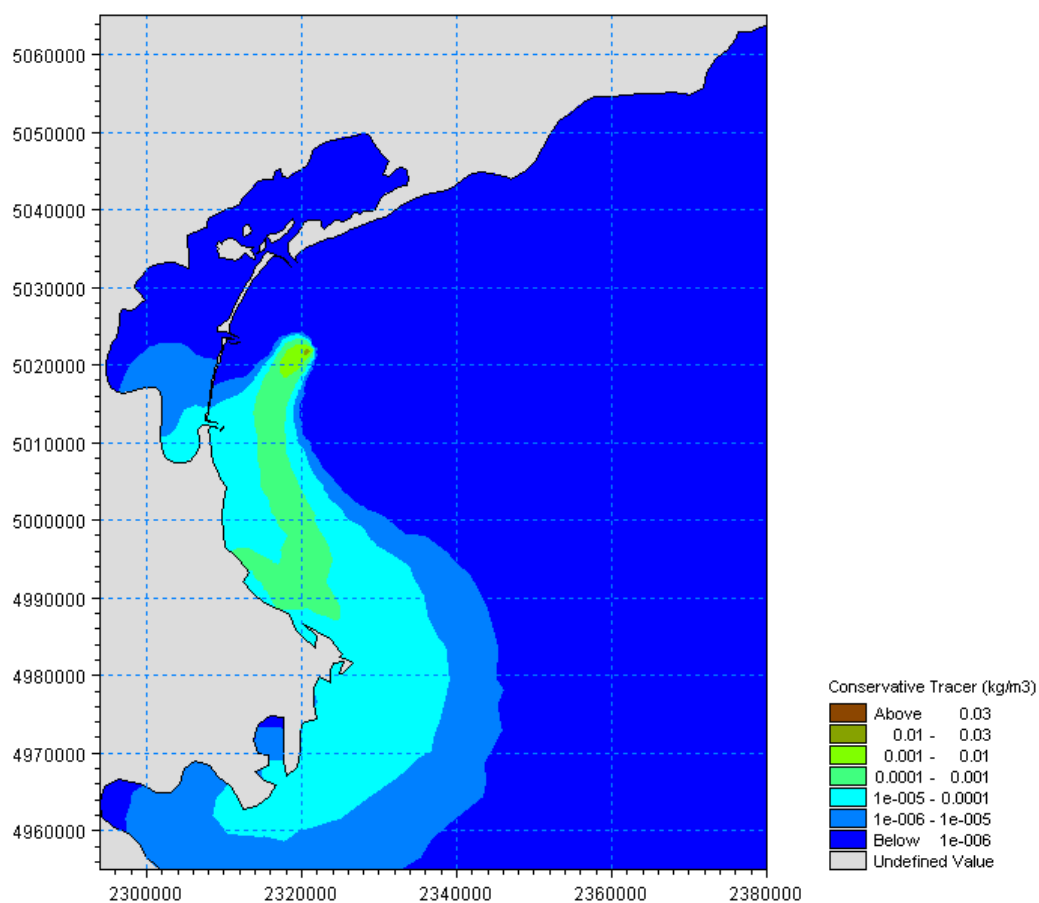
## INPUT AL MODELLO

Premesso che la dinamica dei sedimenti coesivi è tale da richiedere sempre un grande lavoro di calibrazione, i principali parametri da inserire in input sono i seguenti:

- velocità di sedimentazione;
- "shear stress" critico per l'erosione e la deposizione;
- caratteristiche dell'erosione (coefficienti di erosione e potenza);
- concentrazioni dei sedimenti ai contorni aperti;
- coefficienti di dispersione;
- spessore dei "bed layers";
- coefficienti di transizione tra i layers;
- densità dei "bed layers"

## OUTPUT DEL MODELLO

I principali output che fornisce il modello sono: concentrazioni di sedimenti sospesi nel tempo e nello spazio; spessori o massa di sedimenti che costituiscono i "bed layers"; tasso di sedimentazione netta, ecc..



## 6 MODULO AVVEZIONE/DISPERSIONE (AD)

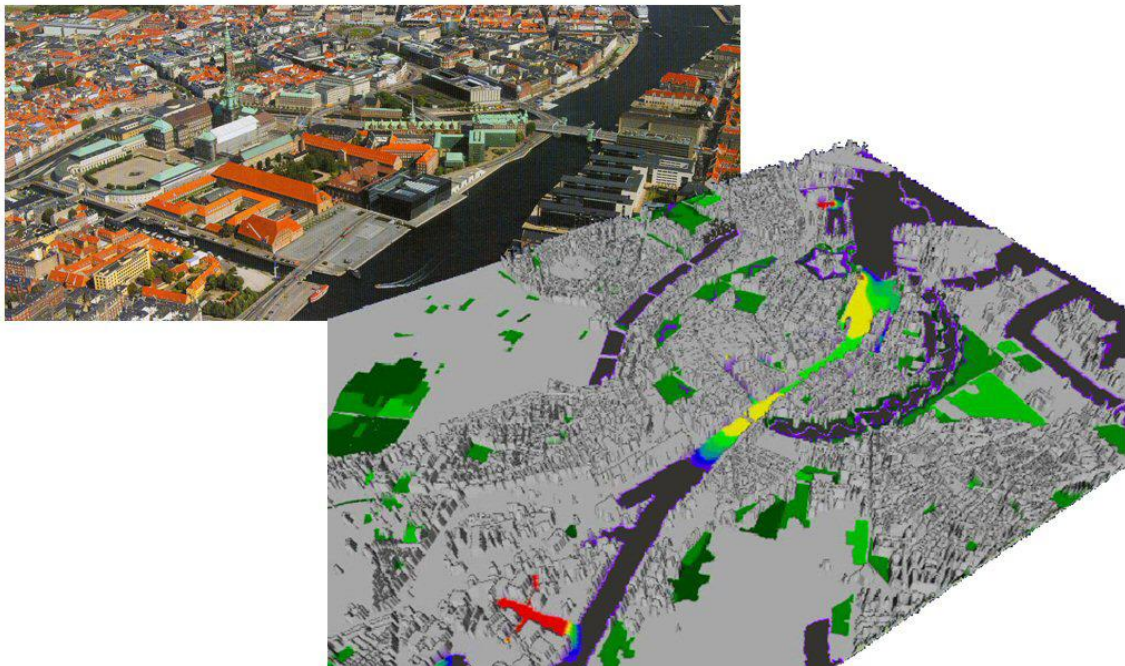
Il Modulo TR di MIKE 21 simula il comportamento di sostanze in sospensione o disciolte in acqua per effetto del flusso idrodinamico (avvezione) e dei processi di dispersione. Le sostanze possono essere conservative o non-conservative, organiche o inorganiche. Le reazioni di sostanze non-conservative possono essere simulate attraverso l'introduzione di un semplice decadimento dipendente dal solo fattore tempo.

La base idrodinamica per TR è costituita dal modulo idrodinamico HD, il quale può essere applicato sia per il flusso barotropico (densità costante) sia baroclino. In quest'ultimo caso l'effetto della densità variabile è incluso ed il modello risolve anche le equazioni di trasporto per salinità e temperatura.

Il modulo di avvezione/dispersione può essere applicato ad un'ampia gamma di fenomeni idraulici. Le aree di applicazione sono generalmente legate all'idrodinamica e al trasporto di sostanze disciolte, simulazioni di traccianti, studi di ricircolo e semplici studi di qualità delle acque.

Un'importante applicazione del modulo TR, a supporto della progettazione di darsene commerciali o turistiche, è rappresentata dallo studio della circolazione interna al bacino portuale, finalizzata a stimare i tempi necessari al ricambio completo e parziale delle acque interne al bacino stesso.

Il modulo TR è strettamente correlato a ECOLab, il codice di calcolo del DHI per la modellazione dei processi ecologici ed ambientali, il quale permette di simulare reazioni chimiche complesse e decadimento non lineare delle sostanze.



## EQUAZIONI DEL MODELLO

Il sistema modellistico del modulo TR, legato dinamicamente al modulo idrodinamico HD, è basato sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes valide per fluidi incomprimibili e soggette all'assunzione di Boussinesq e alla pressione idrostatica. L'equazione di continuità utilizzata per il calcolo del trasporto di una grandezza scalare è riportata di seguito:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_c + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S$$

Il termine di diffusività orizzontale è dato da:

$$F_c = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C$$

Per le simulazioni 2D, l'equazione di continuità è mediata sulla profondità ed è definita in maniera seguente:

$$\frac{\partial h\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{C}}{\partial y} = hF_c - hk_p\bar{C} + hC_s S$$

### Symbol list

$t$	<i>time</i>
$x, y, z$ :	<i>Cartesian coordinates</i>
$D_v$ :	<i>vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient</i>
$S$ :	<i>magnitude of discharge due to point sources</i>
$F_c$ :	<i>horizontal diffusion term</i>
$D_h$ :	<i>horizontal diffusion coefficient</i>
$h$ :	<i>depth</i>
$\bar{u}, \bar{v}$ :	<i>depth-averaged velocity components</i>
$C$ :	<i>concentration of scalar quantity</i>
$k_p$ :	<i>linear decay rate of scalar quantity</i>
$C_s$ :	<i>concentration of scalar quantity in source</i>

## TECNICHE DI SOLUZIONE

La soluzione delle equazioni del trasporto è strettamente legata alla soluzione delle condizioni idrodinamiche. La discretizzazione spaziale è effettuata utilizzando metodo ai volumi finiti con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri. L'integrazione temporale è effettuata utilizzando uno schema esplicito.

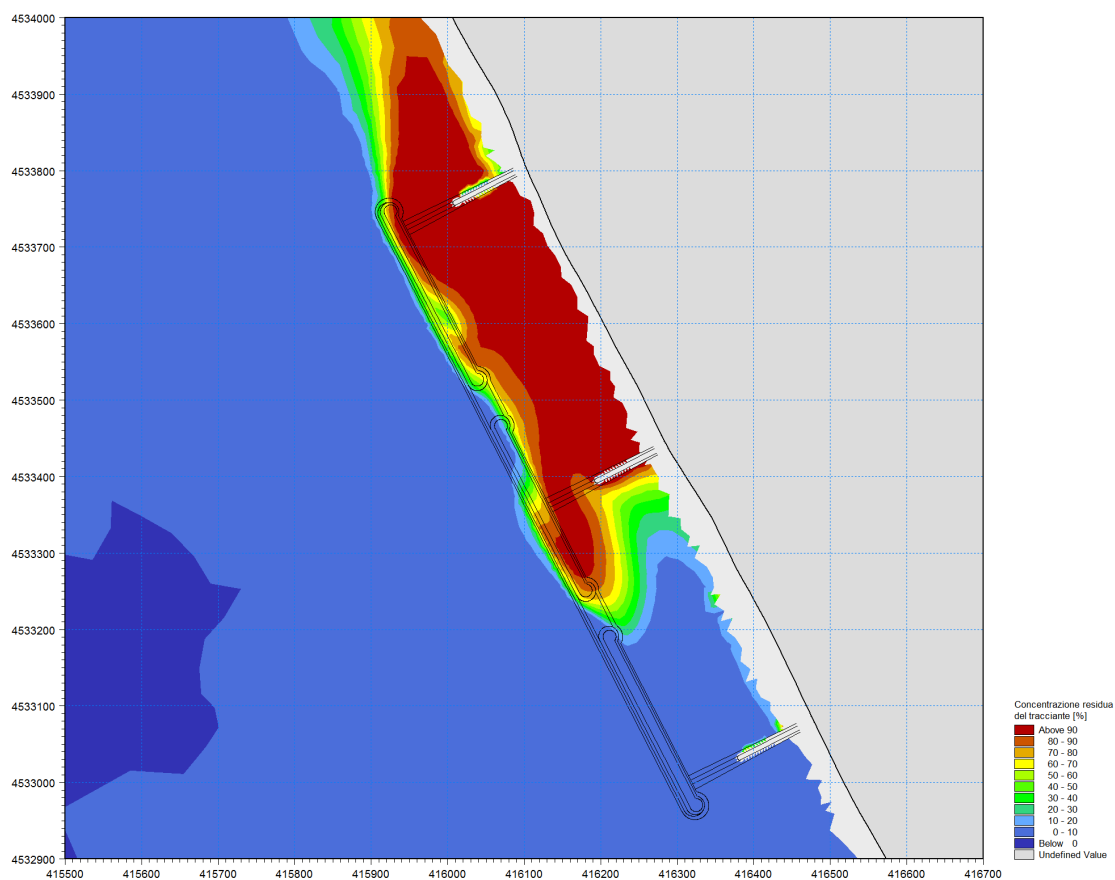


## INPUT AL MODELLO

I dati di input al modello sono relativi ai componenti da simulare, in particolare è necessario specificare: il tipo di componente, la formulazione scelta per il calcolo dei coefficienti di dispersione, la legge di decadimento, le condizioni iniziali e le condizioni al contorno (in termini di concentrazione del componente).

## OUTPUT DEL MODELLO

L'output del modello è rappresentato dalla distribuzione nel tempo della concentrazione dei componenti simulati.



## 7 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

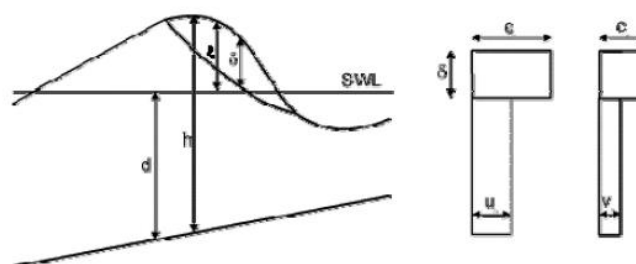
$P$	flux density in the x-direction ( $m^3/m/s$ )
$Q$	flux density in the y-direction ( $m^3/m/s$ )
$B$	Boussinesq dispersion coefficient (-)
$x, y$	Cartesian co-ordinates (m)
$t$	time (s)
$h$	total water depth ( $=d+\xi$ )
$d$	still water depth (m)
$g$	gravitational acceleration ( $= 9.81 m/s^2$ )
$n$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

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

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

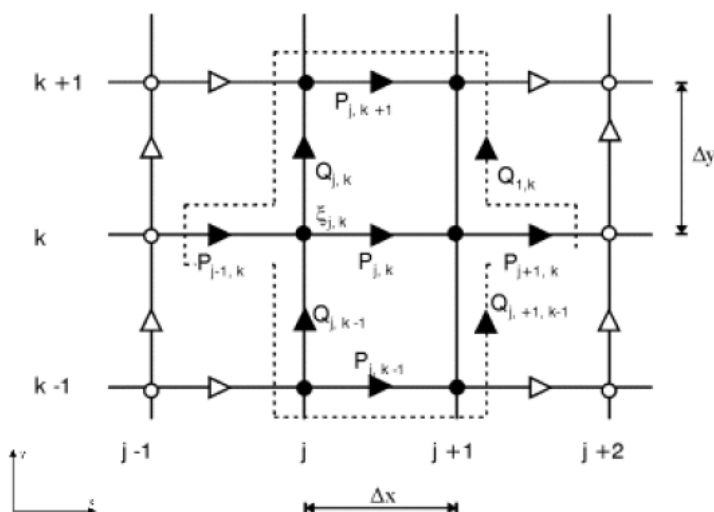
$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left( c_y - \frac{Q}{h} \right)^2$$



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.

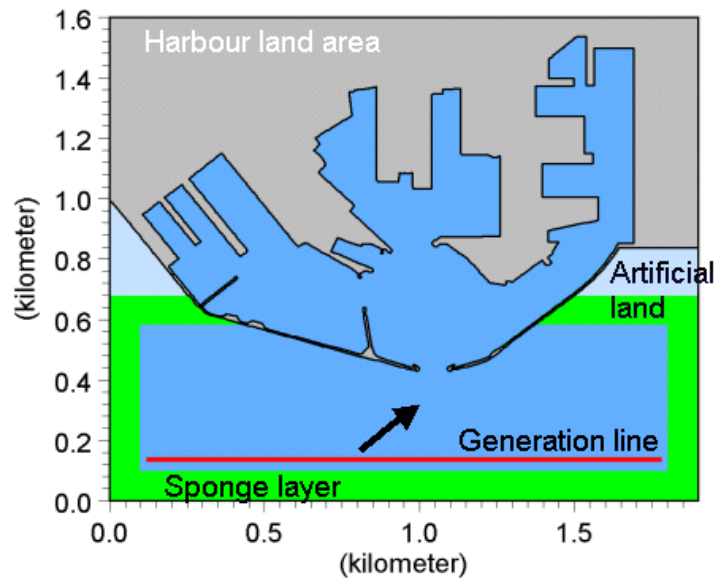
### INPUT AL MODELLO

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

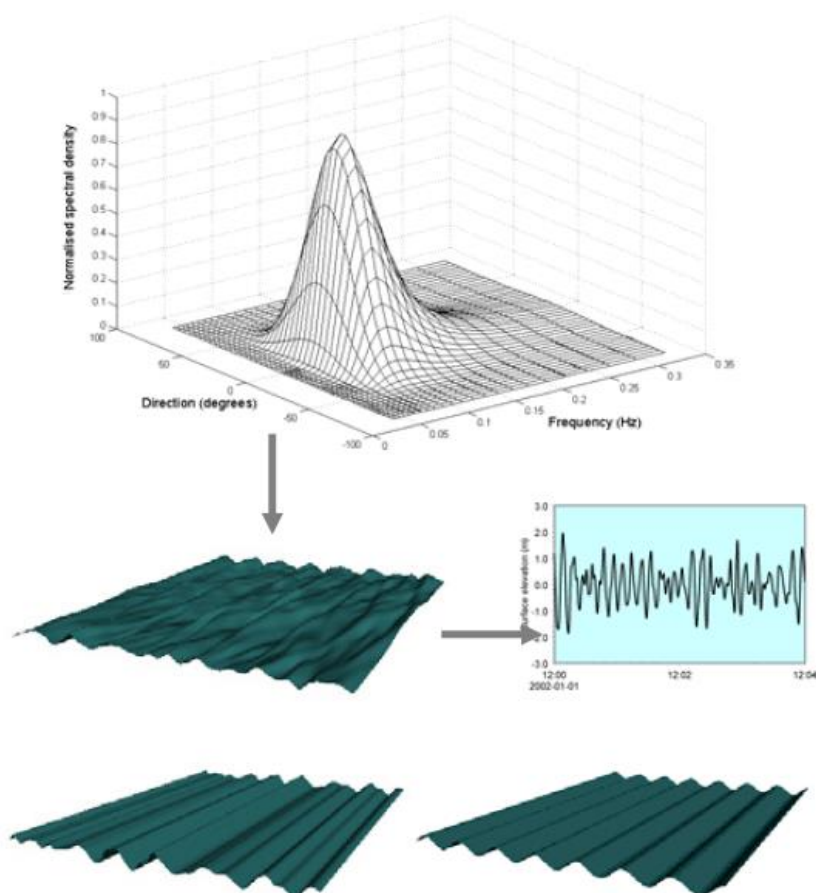


- parametri base (Batimetria, tipo di modello e scelta della formulazione, parametri numerici, tipo di boundaries, time step e durata della simulazione);
- altri dati (condizioni iniziali, condizioni al contorno, linee di generazione interne, frangimento, moving shoreline, attrito al fondo, riflessione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

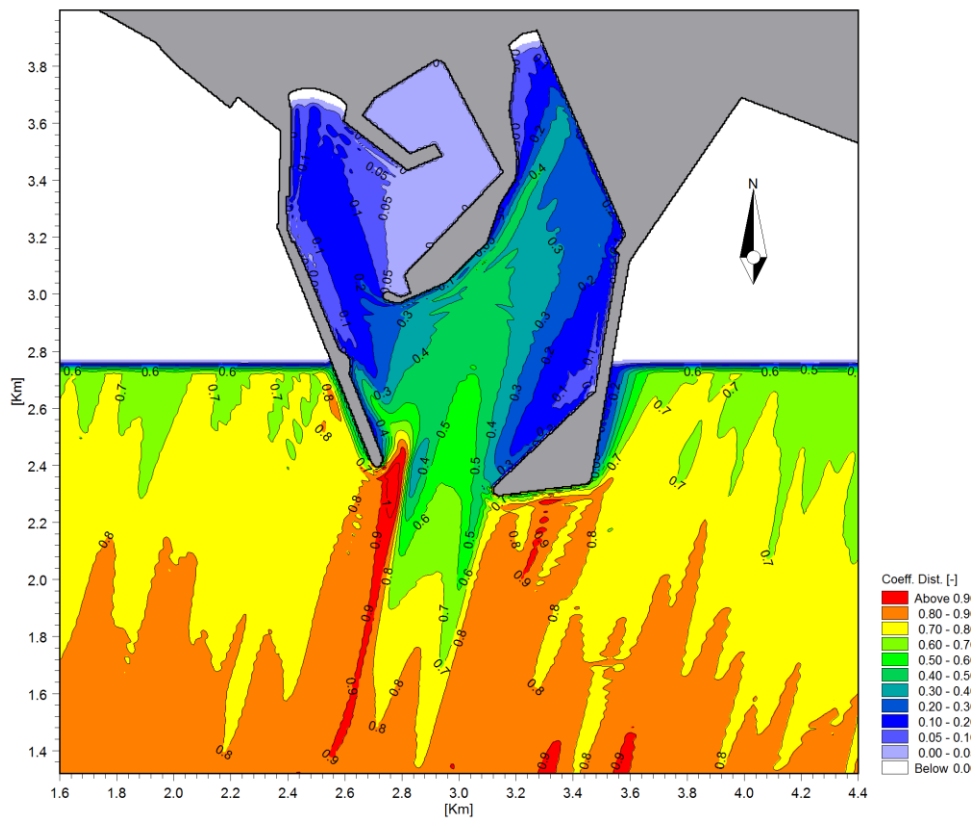
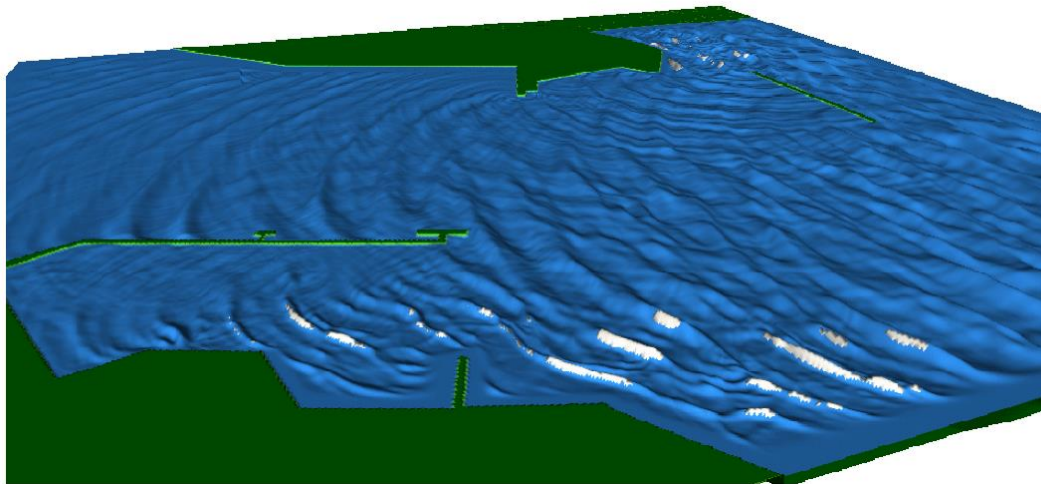


Le onde incidenti, in termini di variazione di superficie libera e flusso in ingresso, possono essere introdotte in due modi: attraverso i contorni aperti oppure mediante l'introduzione di linee di generazione interne. Le onde, monodirezionali regolari e irregolari, possono essere generate mediante uno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



## 8 MODULO SHORELINE MORPHOLOGY – (SM)

In questa sezione è illustrato il modello MIKE 21 Shoreline Morphology, un modello che combina in un unico strumento un approccio numerico bidimensionale per la caratterizzazione delle onde, correnti e trasporto di sedimenti e un approccio monodimensionale per la simulazione della posizione della linea di riva nel tempo. Nello specifico, il modello integra al suo interno i quattro moduli (elencati di seguito) che operano in maniera simultanea ed interagiscono tra di loro ad ogni step di calcolo:

- MIKE 21 SW – modulo d'onda;
- MIKE 21 HD – modulo idrodinamico;
- MIKE 21 ST – modulo di trasporto di sedimenti;
- MIKE 21 SM – modulo di evoluzione della linea di riva.

MIKE 21 SW (Spectral Waves) è il modello utilizzato per risolvere la propagazione delle onde in aree costiere ed offshore. Il modello è stato sviluppato dal DHI ed è in grado di simulare i fenomeni che hanno luogo nella propagazione del moto ondoso da largo verso riva. Tale modello, risolve la cosiddetta "Wave action balance equation" in riferimento ad una maglia triangolare non strutturata. Questo aspetto risulta fondamentale perché permette di utilizzare una maglia di calcolo 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.

MIKE 21 HD (HydroDynamics) è il modello utilizzato per risolvere la generazione e propagazione delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso. Il modello risolve la cosiddetta "non-linear shallow water equations" in riferimento alla stessa maglia di calcolo utilizzata per il modello d'onda. Nello specifico, il modello idrodinamico viene forzato dai campi di radiation stress ottenuti mediante l'applicazione di MIKE21 SW e consente di ottenere la distribuzione delle principali variabili idrodinamiche, quali: velocità di corrente, direzione della corrente e livelli.

MIKE 21 ST (Sand Transport) è il modello utilizzato per calcolare, una volta introdotte le caratteristiche dei sedimenti in termini di granulometria media (D50) e di variabilità del fuso (sediment gradation), la capacità di trasporto dovuta all'azione combinata di onde e correnti. Il modello inoltre permette di calcolare, in funzione dei gradienti di capacità di trasporto, i volumi erosi o depositati per ciascun elemento della mesh di calcolo.

MIKE 21 SM (Shoreline Module) è infine il modulo che, sulla base delle caratteristiche dell'onda, idrodinamiche e del trasporto variabili nel tempo e nel dominio di calcolo, fornisce l'evoluzione della linea di riva. Il modello divide l'intero dominio di calcolo in un numero finito di "strisce" perpendicolari alla linea di costa. Per ognuna delle strisce viene risolta l'equazione riportata di seguito, denominata "one-line modified equation":

$$\frac{dn}{dt} = \frac{vol}{dA_z}$$

dove  $dn$  rappresenta l'avanzamento o l'arretramento della linea di riva (*shoreline*) lungo la perpendicolare alla linea di costa nell'intervallo temporale  $dt$ ;  $vol$  è il volume accumulato/eroso nell'intera striscia durante l'intervallo temporale e  $dA_z$  rappresenta l'area della striscia proiettata sul piano verticale come mostrato nella Figura 8-1.



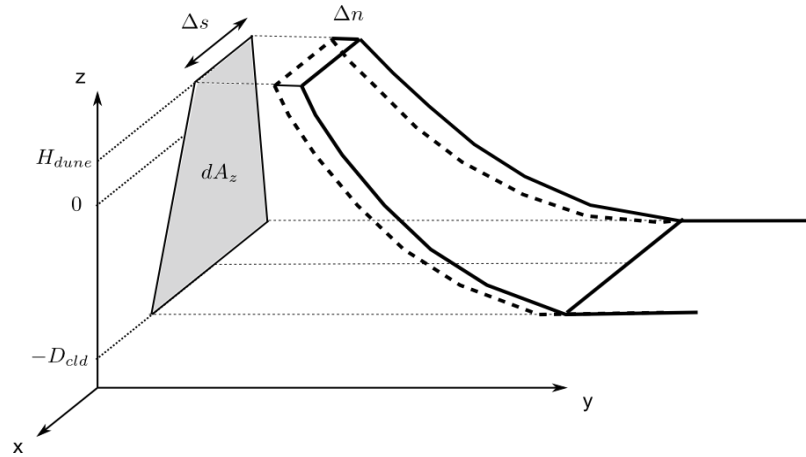


Figura 8-1 Schema della one-line modified equation

I quattro moduli descritti sono impiegati in sequenza: per ogni step temporale il modello effettua dapprima i calcoli relativi al moto ondoso, poi quelli idrodinamici e del trasporto ed in ultimo viene applicato lo Shoreline Morphology Module. Al termine del ciclo, viene aggiornata la batimetria che poi sarà utilizzata per il ciclo successivo. I moduli d'onda ed idrodinamico sono inoltre accoppiati dinamicamente, ovvero nella propagazione dell'onda si utilizzano la distribuzione dei livelli e delle correnti generate dal modulo idrodinamico e viceversa il calcolo delle variabili idrodinamiche è influenzato dai campi di altezza d'onda (in termini di *radiation stress*). Lo schema funzionale del modello è illustrato in Figura 8-2.

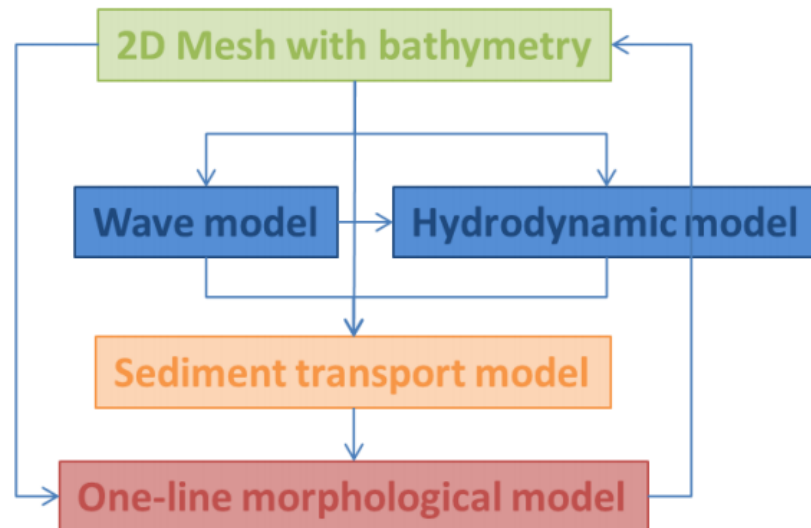


Figura 8-2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model