



COMUNE DI ISOLA DI CAPO RIZZUTO

Provincia di Crotona



POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DEL PORTO REGIONALE DI LE CASTELLA

Progetto Definitivo

C. OPERE MARITTIME

C.01

RELAZIONE IDRAULICO MARITTIMA

Data:

15-01-2021

Scala:

PROGETTAZIONE:



Architetto
PASQUALE BILLARI

Ingegnere
ACHILLE TRICOLI

Ingegnere
DOMENICO CONDELLI

Ingegnere
GIUSEPPE V. RACCO

Geologo
FRANCESCO SCERRA

PROJECT MANAGER

Ing. Antonino Sutera



PROGETTISTI

ing. Davide Ferlazzo
ing. Domenico Condelli
arch. Pasquale Billari
ing. Giuseppe V. Racco
ing. Achille Tricoli
ing. Roberta C. De Clario

GRUPPO DI LAVORO

ing. Simone Fiumara
arch. Rossella Faralla
arch. Erica Pipitò
arch. Roberto Lembo

GEOLOGO

geol. Francesco Scerra

REVISIONI	Rev. n°	Data	Motivazione

R.U.P.

Visti/Approvazioni

ing. A. Otranto

Codice elaborato:

DNC122_PD_C01_2021-01-15-R0_Relaz.Idr.Marittima_FRL

INDICE

1	PREMESSA	4
2	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	6
3	APPROCCIO METODOLOGICO	7
4	RACCOLTA ED ANALISI DEI DATI DISPONIBILI	8
	4.1 DATI DI ONDA E VENTO	8
	4.2 DATI DI LIVELLO MARINO	10
	4.3 DATI BATIMETRICI	12
5	CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO	14
6	ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI	20
	6.1 ANALISI SU BASE ANNUALE	20
	6.1.1 Altezza d'onda significativa	20
	6.1.2 Intensità del vento	24
	6.1.3 Livelli marini	25
	6.2 ANALISI STAGIONALE	26
7	PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DAL LARGO VERSO COSTA	28
	7.1 ESTENSIONE DEL MODELLO, BATIMETRIA DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO	28
	7.2 RISULTATI DEL MODELLO D'ONDA	30
	7.3 PROPAGAZIONE DELLA SERIE TEMPORALE QUARANTENNALE	31
	7.4 PROPAGAZIONE DEGLI EVENTI ESTREMI	35
	7.4.1 Propagazione degli eventi estremi calcolati su base annuale	36
	7.4.2 Propagazione degli eventi estremi calcolati su base stagionale	39
8	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO LOCALE ACCOPPIATO ONDA-CORRENTE	42
	8.1 DOMINIO DI CALCOLO, BATIMETRIA E CONDIZIONI AL CONTORNO	42
	8.2 RISULTATI DEL MODELLO LOCALE ACCOPPIATO ONDA-CORRENTE	44
	8.3 DEFINIZIONE DEL LIVELLO MARINO DI RIFERIMENTO PER LA PROGETTAZIONE	51
9	AGITAZIONE ONDOSA RESIDUA INTERNA AL BACINO	52
	9.1 ESTENSIONE DEL MODELLO E BATIMETRIA	53
	9.2 STRATO ASSORBENTE (SPONGE LAYER)	56
	9.3 LINEE DI GENERAZIONE DEL MOTO ONDOSO	57

RELAZIONE GENERALE

9.4	<i>PARAMETRI DI RIFLESSIONE</i>	57
9.5	<i>SCelta DELLE ONDE DI RIFERIMENTO PER LO STUDIO</i>	59
9.6	<i>RISULTATI DEL MODELLO DI AGITAZIONE ONDOSA - STATO ATTUALE</i>	61
9.7	<i>ANALISI CRITICA DELLA SOLUZIONE PROGETTUALE A BASE DI GARA</i>	72
9.8	<i>RISULTATI DEL MODELLO DI AGITAZIONE ONDOSA – STATO DI PROGETTO</i>	86
9.9	<i>RISULTATI DEL MODELLO DI AGITAZIONE ONDOSA – STATO DI PROGETTO - STAGIONE ESTIVA</i>	95
10	SINTESI E COMMENTI	100
11	RIFERIMENTI	101

1 PREMESSA

Il presente elaborato riporta tutte le attività di analisi e di modellazione numerica svolte a supporto del Progetto Definitivo dei lavori di "Potenziamento infrastrutturale del Porto Regionale di Le Castella" (CUP J44J18000000002 – CIG 7562032238).

Gli interventi previsti saranno finanziati con risorse a valere sul POR Calabria FESR/FSE 2014-2020 Asse VII - Sviluppo delle reti di mobilità sostenibile, Obiettivo Specifico 7.2 "Miglioramento della competitività del sistema portuale e interportuale", Azione 7.2.2 "Potenziare infrastrutture e attrezzature portuali e interportuali di interesse regionale, ivi inclusi il loro adeguamento ai migliori standard ambientali, energetici e operativi e il potenziamento dell'integrazione dei porti con le aree retroportuali".

Il layout progettuale, che si pone l'obiettivo di migliorare il livello di fruibilità, la capacità ricettiva e di relazione con il territorio, oltre alla necessaria messa in sicurezza dell'infrastruttura portuale di Le Castella, prevede la realizzazione di una serie di interventi infrastrutturali.

In sintesi l'intervento è teso al miglioramento della competitività del sistema portuale attraverso il consolidamento e potenziamento del molo sopraflutto che, unitamente al prolungamento del molo sottoflutto esistente, consentirà un miglioramento delle condizioni di agitazione interna del bacino portuale, oltre che un aumento dei posti barca destinati ai pescherecci (grazie al prolungamento del sopraflutto) e la possibilità di ospitare imbarcazioni turistiche anche più grandi a seguito del miglioramento delle condizioni del fondale della darsena.

Nell'ottica di valorizzare l'infrastruttura portuale ai fini dello sviluppo turistico è altresì prevista la realizzazione di una stazione marittima, di un'area destinata alla manutenzione delle imbarcazioni, della riqualificazione del parcheggio a monte del Porto Pescherecci e della viabilità di servizio a monte della banchina Tramontana. Inoltre saranno valorizzati i percorsi pedonali adiacenti le banchine Ostro e Scirocco e realizzato un piccolo anfiteatro con vista darsena turistica.

Infine si prevede la futura realizzazione di una stazione di rifornimento in testata al nuovo molo di sottoflutto, predisponendo la realizzazione dei sottoservizi dal piazzale prossimo al parcheggio sino in testa al molo.

Rimandando ai documenti specialistici per la descrizione in dettaglio degli stessi, si evidenzia come la modellazione numerica abbia permesso, tra l'altro, una significativa ottimizzazione delle opere previste dal progetto posto a base di gara, con particolare riferimento alla loro efficacia: in particolare, la nuova scogliera emersa prevista in prossimità dell'imboccatura portuale, anche in considerazione dell'impatto paesaggistico e di ulteriori vincoli autorizzativi, è stata oggetto di attenta e dedicata analisi al fine di quantificare l'effettivo livello di protezione dell'opera sulla penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio acqueo portuale. L'approfondimento modellistico ha sancito l'opportunità di non prevedere tale scogliera nel nuovo layout portuale.

Il presente studio è stato affrontato utilizzando diversi codici di simulazione della famiglia MIKE, sviluppati da DHI (Danish Hydraulic Institute), il gruppo di modelli numerici più completo ed affidabile oggi disponibile nel campo delle risorse idriche.

Di seguito sono sinteticamente elencate le attività previste nello studio:

- acquisizione dei dati di onda e vento al largo del sito e definizione del clima meteomarinario dell'area;
- definizione degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno e per settori direzionali;
- implementazione di un modello bidimensionale per la propagazione verso costa del clima ondoso ordinario e degli eventi estremi per assegnato tempo di ritorno;
- implementazione di un modello di dettaglio bidimensionale integrato onda – corrente per la ricostruzione del moto ondoso e della circolazione locale a supporto della definizione, dell'ottimizzazione e del dimensionamento della struttura in progetto, in funzione delle sollecitazioni

RELAZIONE GENERALE

attese;

- modellazione dell'agitazione ondosa interna al bacino portuale, finalizzata alla stima del tempo di inoperatività (*downtime*) nelle varie aree.

A seguire si riportano in dettaglio i dati utilizzati, l'approccio metodologico, la tipologia di codici numerici utilizzati e i risultati ottenuti.

Le attività di modellazione sono state effettuate in stretta collaborazione e a supporto dei tecnici di DINAMICA s.r.l., incaricati dal Comune di Isola Capo Rizzuto per la redazione del Progetto Definitivo.

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Punta delle Castelle, nome abbreviato nella più conosciuta Le Castella, è una frazione di Isola di Capo Rizzuto in provincia di Crotone, sulla costa ionica della Calabria.

Il sito è noto principalmente per la fortezza costruita su di un'isola tidale, per le sue coste di sabbia di vario spessore e per le scogliere con resti archeologici greco-romani tuttora visibili.

L'attuale porto si trova nell'insenatura a levante del borgo ed è composto da una darsena posta a nord, destinata solo ad imbarcazioni con pescaggio minore di 2 m, e da uno specchio acqueo a sud delimitato da un molo di sopraflutto curvilineo e da un piccolo molo di sottoflutto.

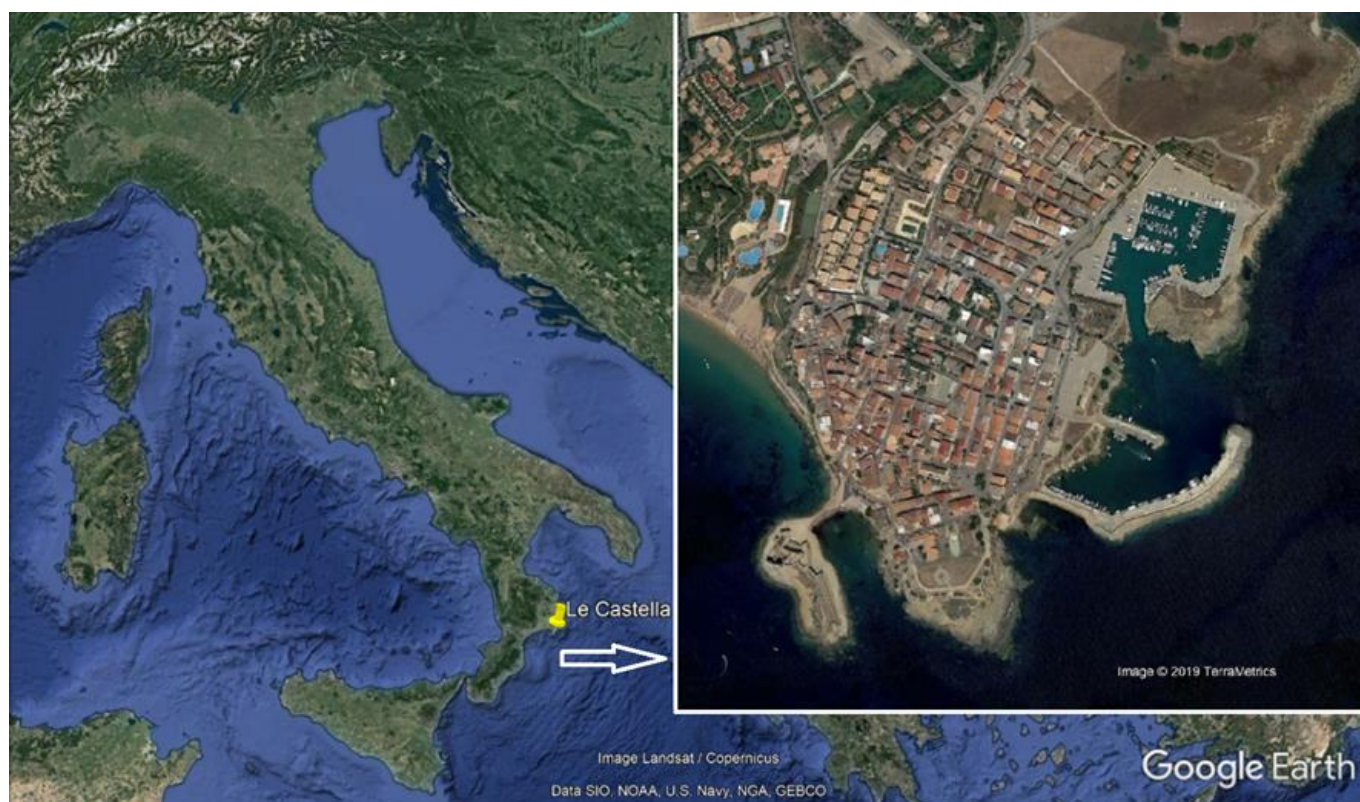


Figura 2-1 Inquadramento territoriale

3 APPROCCIO METODOLOGICO

La prima fase di studio (capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) ha previsto la raccolta e l'analisi dei dati batimetrici (provenienti sia da carte nautiche digitali, sia da un rilievo di dettaglio realizzato nel mese di Agosto del 2019 dalla società Geonautics S.r.l.), e dei dati meteomarini, questi ultimi nella forma di serie temporale dei principali parametri d'onda (altezza significativa, periodo medio e di picco, direzione di provenienza) e di vento (intensità e direzione).

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

Nel punto al largo "MWM" è stata inoltre predisposta un'analisi statistica direzionale delle altezze d'onda, annuale e stagionale, per assegnato tempo di ritorno, propedeutica alla simulazione, ad elevata risoluzione spaziale, della propagazione degli eventi estremi (da varie direzioni) con associato tempo di ritorno pari a 50 anni. Tale tempo di ritorno è stato indicato dai progettisti come riferimento per gli interventi di potenziamento infrastrutturale del porto in progetto (capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

La serie storica quarantennale di onda al largo è stata quindi propagata verso costa attraverso la predisposizione del modello bidimensionale MIKE 21 SW (Spectral Waves) di DHI (capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), modello spettrale di terza generazione in grado di simulare le principali trasformazioni che il moto ondoso subisce per effetto principalmente dell'interazione con il fondo (attrito, rifrazione, shoaling, frangimento) e delle dissipazioni al largo dovute al frangimento da eccessiva ripidità (white capping).

I risultati del modello di propagazione largo-sottocosta, sotto forma di serie temporali dei principali parametri d'onda, sono stati quindi estratti per la caratterizzazione del moto ondoso in corrispondenza del porto.

Infine, si è proceduto con l'analisi dell'agitazione ondosa residua interna al porto attraverso l'utilizzo del modulo BW (Boussinesq Waves) del codice di calcolo bidimensionale MIKE 21 di DHI, tra gli strumenti più avanzati e completi per la simulazione di onde corte e lunghe in bacini portuali, darsene ed aree costiere in generale (capitolo 8). Attraverso l'implementazione di tale modello è stato possibile stimare l'onda residua nel bacino protetto dal molo di sopraflutto nella sua configurazione attuale e in quella di progetto, quantificando il "downtime" (tempo di inoperatività nelle varie aree), sia in riferimento al clima ondoso annuale, sia a quello stagionale.

4 RACCOLTA ED ANALISI DEI DATI DISPONIBILI

4.1 Dati di onda e vento

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 paraggio in esame la boa non è disponibile o non è sufficientemente rappresentativa.

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).

Nelle immagini a seguire, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e Figura 4-2, è riportata la batimetria di riferimento, per l'intero bacino del Mar Mediterraneo e per un dettaglio locale del sito oggetto di studio, per la componente modellistica di moto ondoso; la risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati mediante confronti con anemometri, boe ondametriche, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da sette missioni satellitari.

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

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarino al largo di Le Castella 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 3 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta limitata l'interazione dell'onda con il fondale, che viene pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito;
- la localizzazione del punto di estrazione 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

RELAZIONE GENERALE

troppo onerosi.

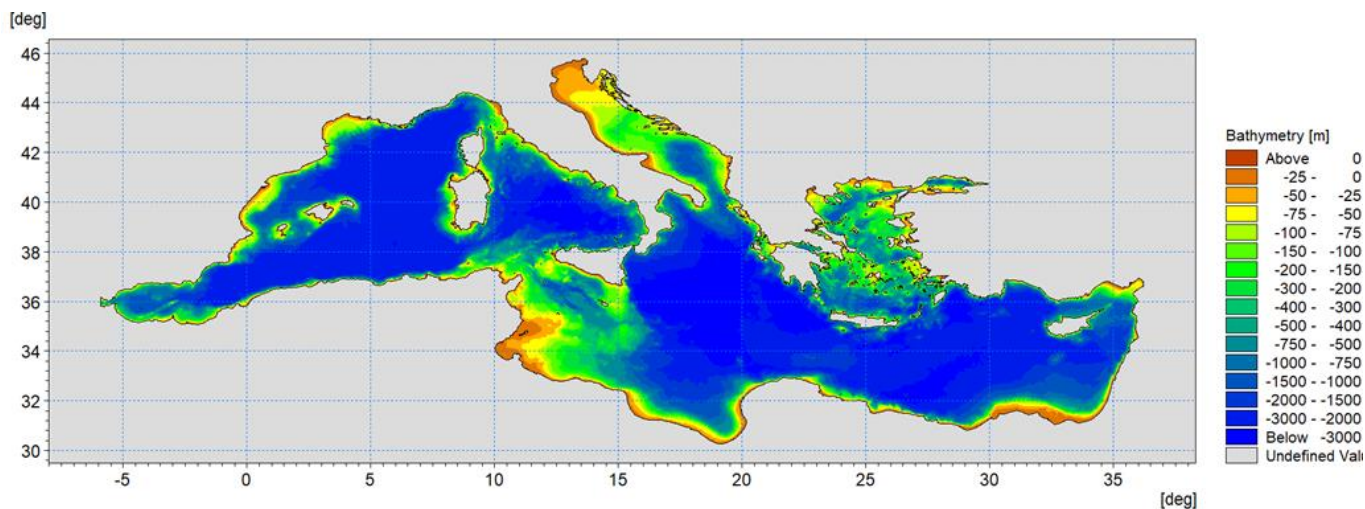


Figura 4-1 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

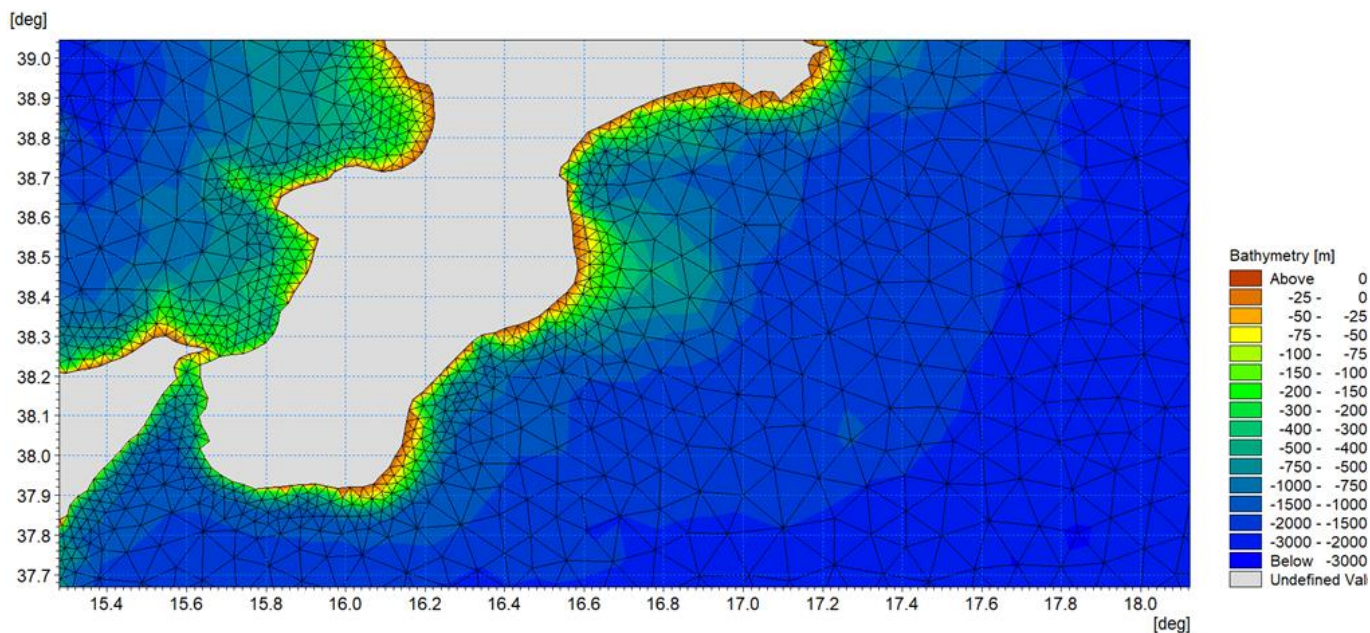


Figura 4-2 Dettaglio sulla zona oggetto di studio della batimetria del database MWM

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

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

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]
-------	----------	----------

RELAZIONE GENERALE

MWM	17.050	38.856
-----	--------	--------



Figura 4-3 Ubicazione del punto di estrazione dal database MWM (1.1.1979 – 31.12.2018)

4.2 Dati di livello marino

Per i dati di livello marino si è fatto riferimento alla stazione mareografica di Crotona, la più vicina alla zona di studio, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale (RMN) gestita da ISPRA. Lo strumento è ubicato presso il porto, 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).

Crotona è una delle trentasei stazioni mareografiche gestite dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, con disponibilità di dati di livello a partire dall'anno 2010 a scansione oraria nel primo periodo di funzionamento e di 10 minuti per gli ultimi anni.

RELAZIONE GENERALE

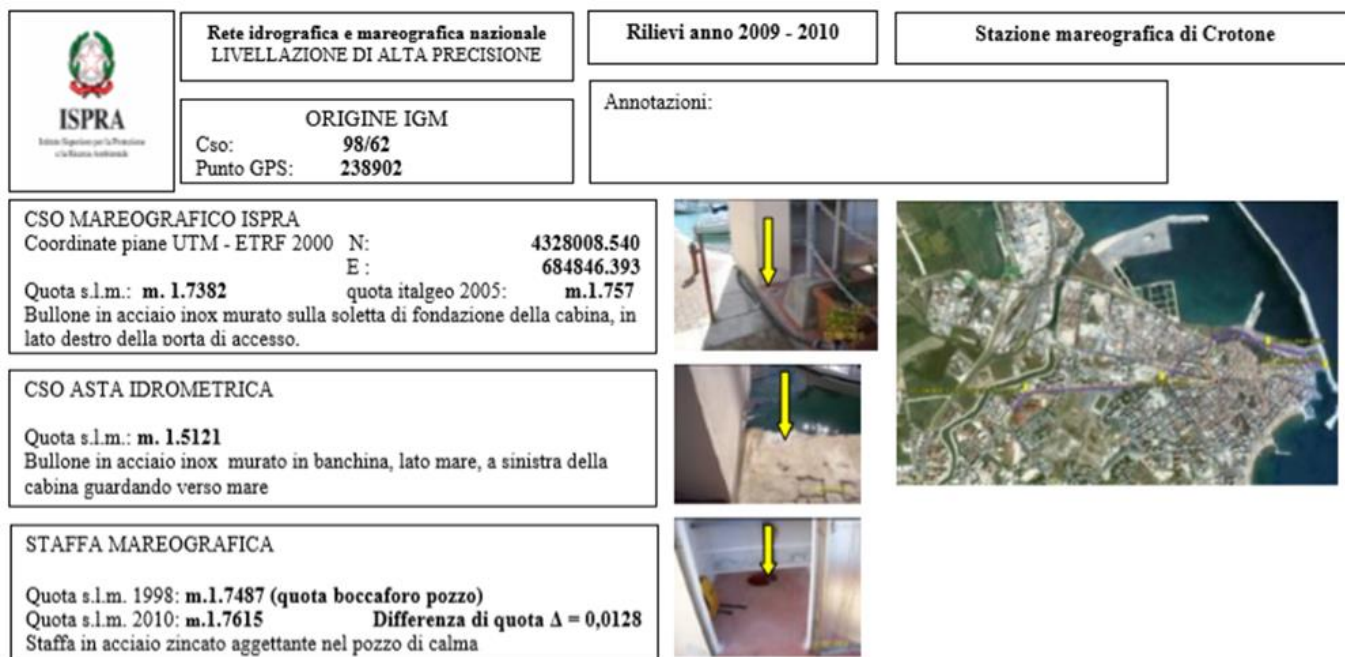


Figura 4-4 Monografia mareografo di Crotona

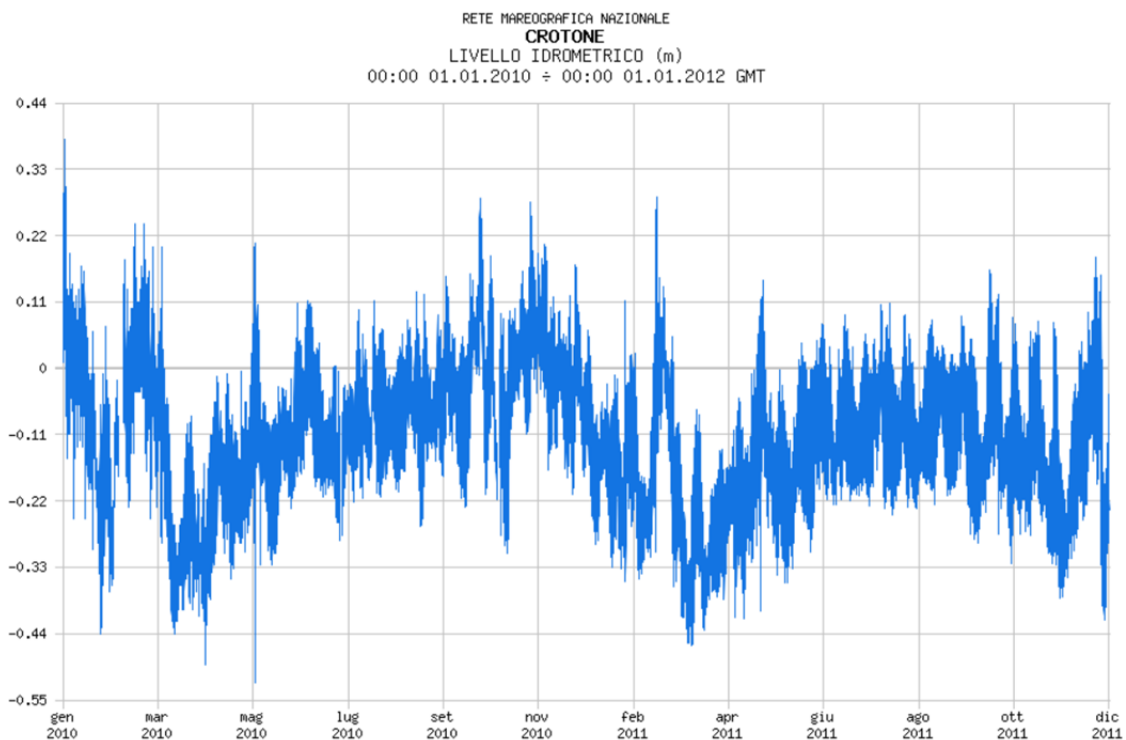


Figura 4-5 Misure di livello idrometrico registrate dal mareografo di Crotona dal 1/1/2010 al 1/1/2012

4.3 Dati batimetrici

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

- rilievo batimetrico di dettaglio con maglia 0.25 x 0.25 m dei fondali del porto e dei fondali esterni fino alla batimetrica -10 m, svolti il 7 - 8 agosto 2019 su un perimetro di circa 4 km dalla società Geonautics S.r.l.;
- le dimensioni del dominio di calcolo del modello numerico sono tuttavia più estese rispetto all'area per la quale risultano disponibili i dati batimetrici di dettaglio. A integrazione di tali dati 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. I dati forniti da questo database sono direttamente importabili nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo di DHL, consentendo quindi una rapida caratterizzazione batimetrica dell'area.

Nelle figure a seguire si riportano, rispettivamente, la traccia del rilievo di dettaglio (Figura 4-7) ed un estratto della carta nautica digitale del litorale in esame (Figura 4-6).

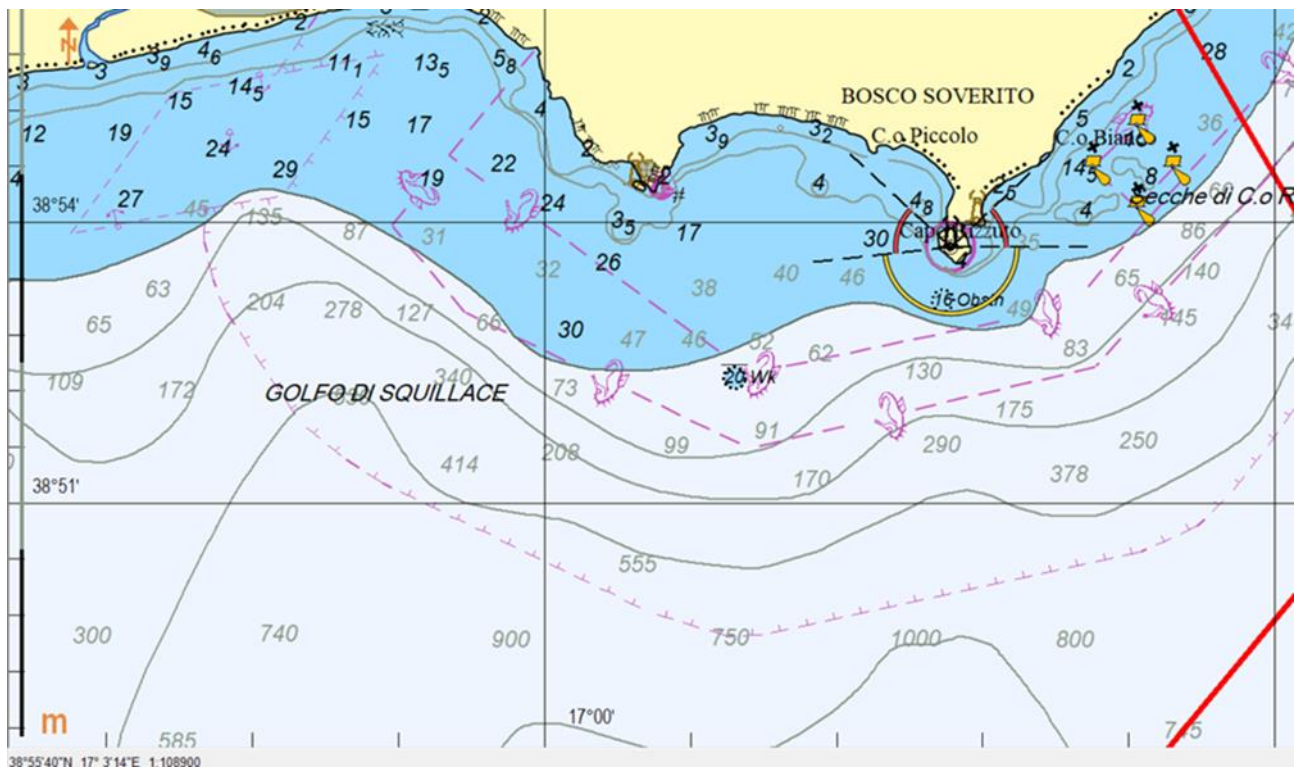


Figura 4-6 Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 di C-MAP per il tratto di litorale in esame

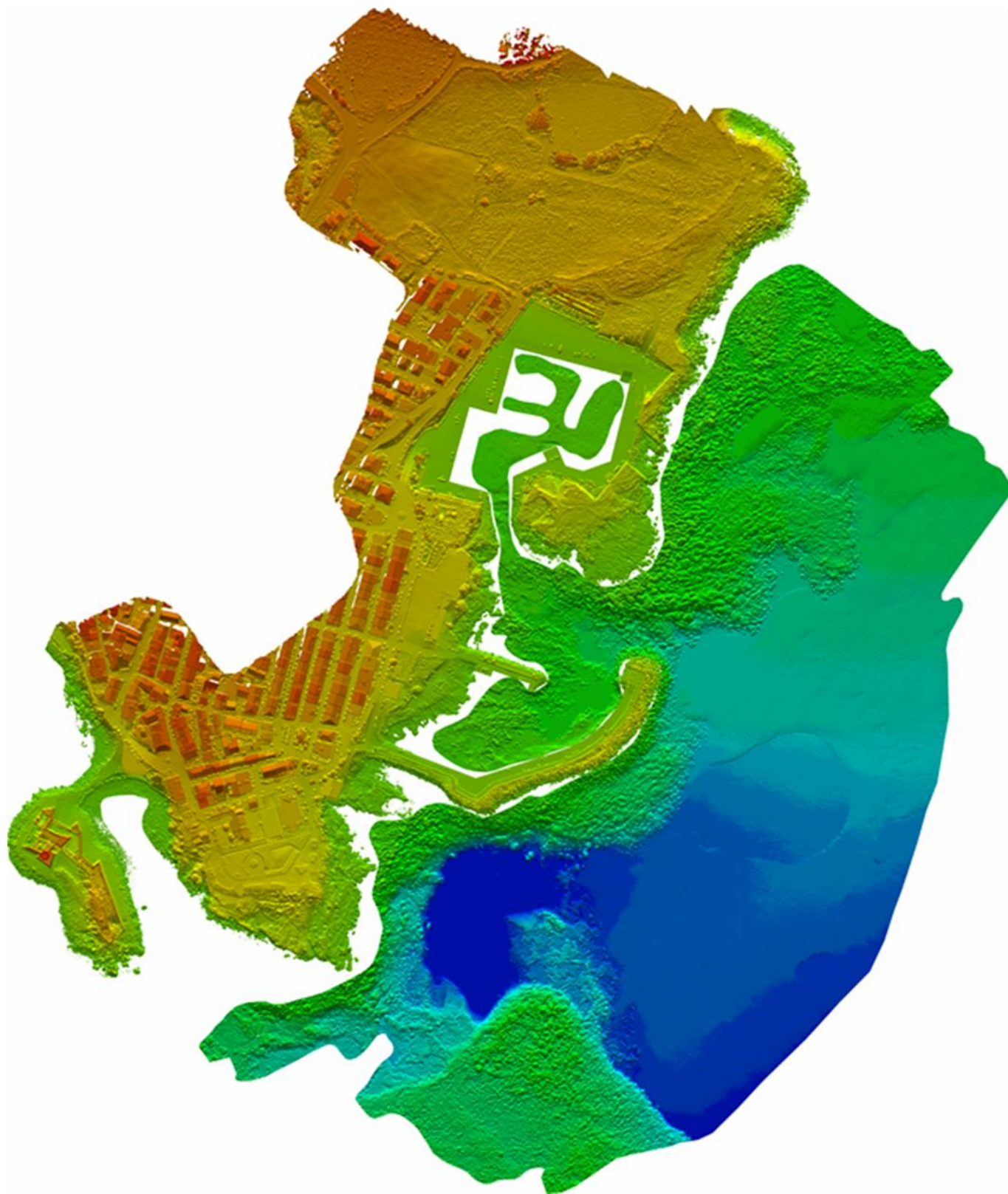


Figura 4-7 Rilievo di dettaglio: DTM dei dati topo-batimetrici acquisiti con sistema MBES nell'area di indagine

5 CARATTERIZZAZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO

Come anticipato nella sezione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, l'analisi del clima ondoso e del vento al largo di Le Castella si basa sul Mediterranean Wind Wave Model (MWM). In particolare, si fa qui riferimento ai principali parametri descrittivi per l'onda (altezza d'onda significativa H_s , periodo di picco T_p , direzione media di propagazione MWD) e per il vento (intensità WS e direzione di provenienza WD).

Dall'analisi della serie storica di altezza d'onda significativa ricostruita al largo (Figura 5-1), ad una distanza da costa pari a circa 7 km, emerge che nel periodo dei 40 anni considerati sono stati superati 6.5 m di altezza d'onda significativa in sole due occasioni, nel dicembre del 1990 e nel dicembre del 2008, mentre i 5 m sono stati raggiunti e superati in numerose occasioni.

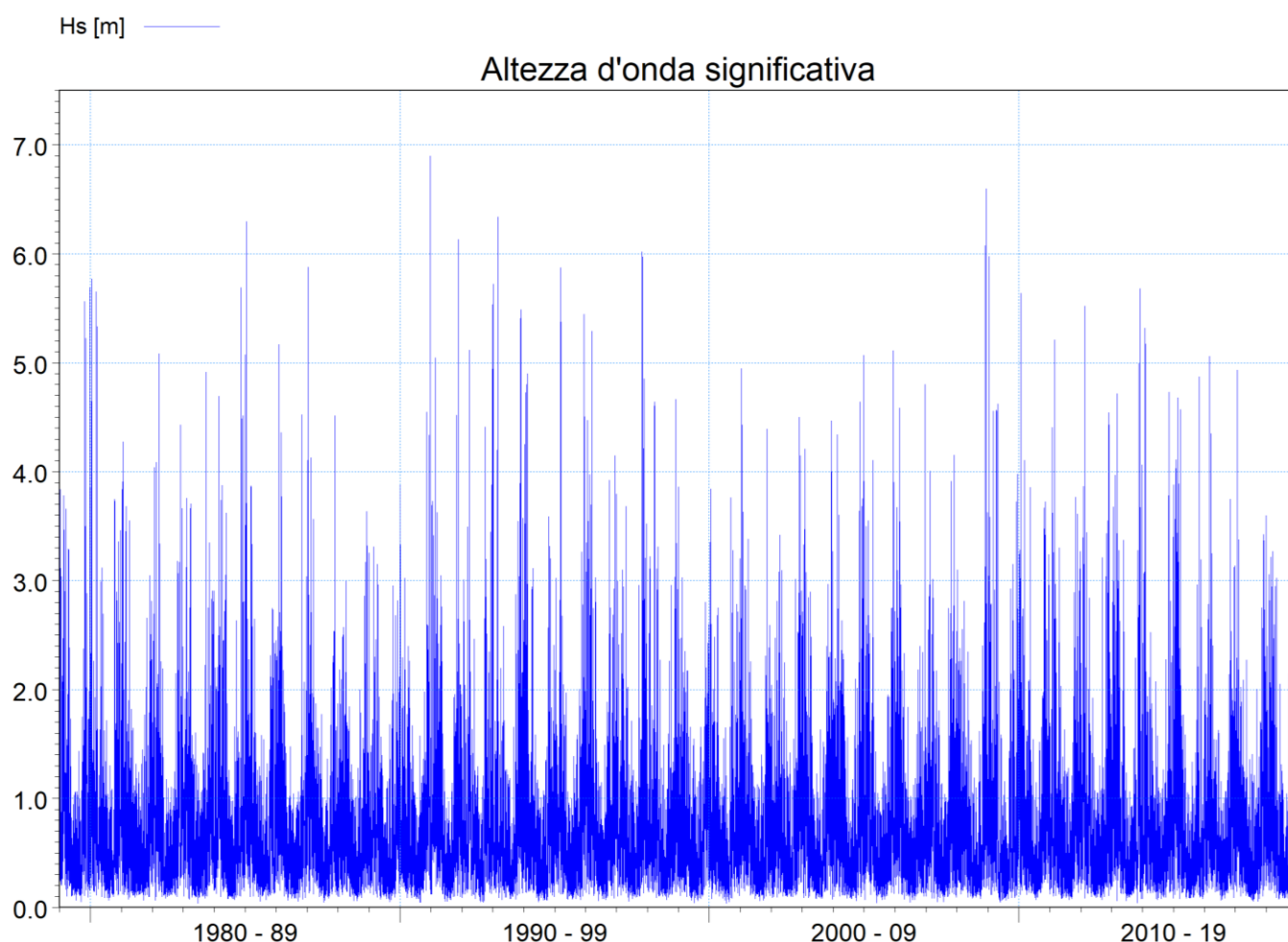


Figura 5-1 Andamento delle altezze d'onda nel punto MWM al largo di Le Castella (Lon 17.050°E, Lat 38.856°N), per il periodo 1979-2018

Il processamento della serie di dati ha permesso inoltre di predisporre la rosa del clima ondoso (Figura 5-2) e la tabella delle frequenze di occorrenza, per classi di altezza d'onda significativa in funzione della direzione media di provenienza (Tabella 5-1)

RELAZIONE GENERALE

L'analisi combinata della rosa del clima ondoso e della tabella di frequenza evidenzia che gli eventi più intensi provengono dal secondo quadrante, con particolare riferimento alle direzioni comprese indicativamente tra 110° N e 150° N, da Est / Sud-Est. Le onde più frequenti, circa il 21% del totale, provengono da Sud / Sud-Ovest (180°N<MWD<210°N).

La frequenza delle condizioni di calma (qui associata a valori di altezza d'onda significativa inferiori a 0.25 m/s) è pari al 16% del totale (poco meno di 2 mesi/anno).

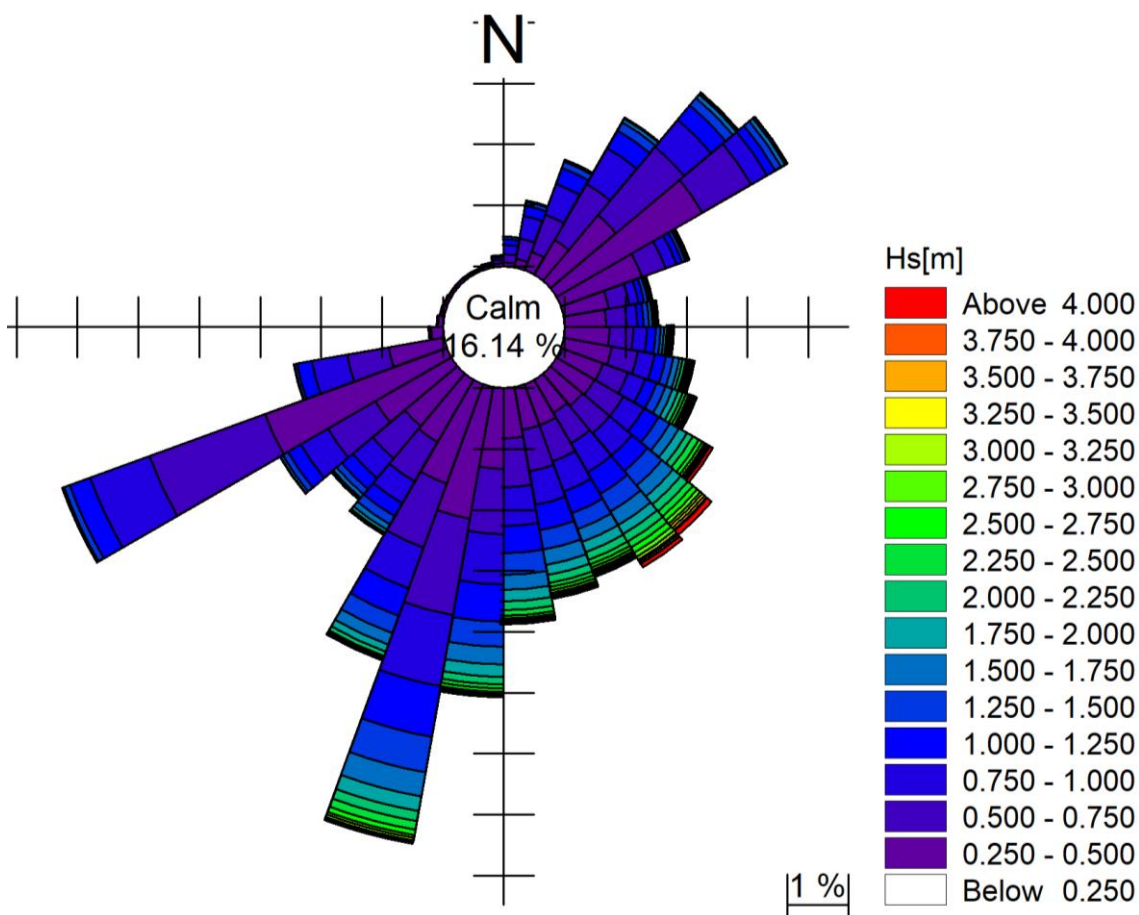


Figura 5-2 Rosa del clima ondoso per il punto MWM (Lon 17.050°E, Lat 38.856°N) per i 40 anni di dati a disposizione

RELAZIONE GENERALE

Dall'analisi della serie storica quarantennale di intensità del vento ricostruita al largo (Figura 5-3) emerge che l'evento caratterizzato dalle intensità più elevate è quello del Gennaio 1980 (oltre 27 m/s su base oraria, circa 100 km/h, direzione di provenienza Maestrale).

L'analisi combinata della rosa del vento (Figura 5-4) e della tabella di frequenza (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) evidenzia che i venti più intensi e più frequenti provengono da Nord. La frequenza del vento proveniente dalle direzioni comprese tra 350° e 20° è pari a circa il 22% del totale, pari a quasi 3 mesi/anno. Meno frequenti ma con intensità tra le maggiori anche gli eventi provenienti dalle direzioni comprese tra 260° e 290°N.

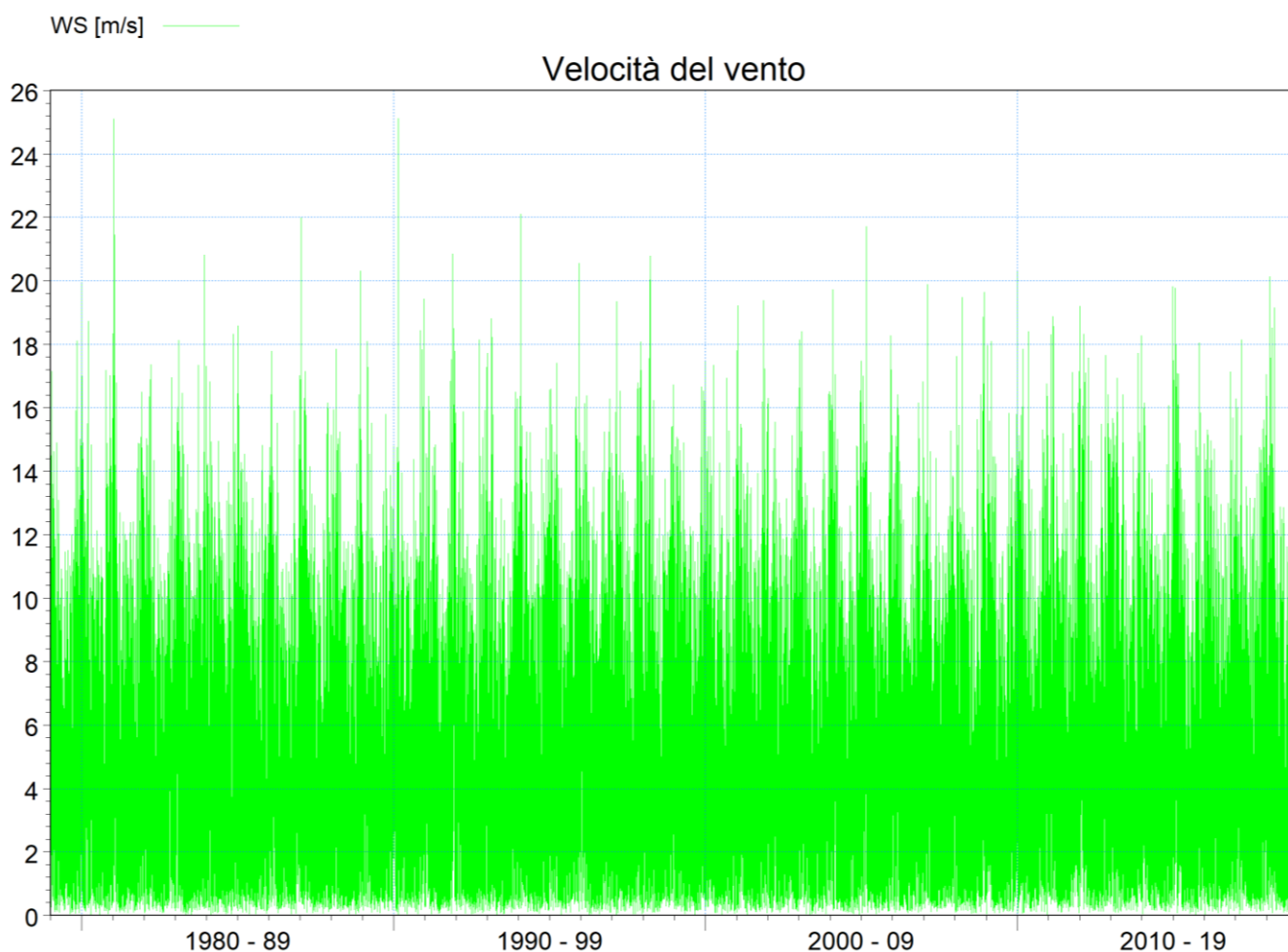


Figura 5-3 Andamento delle intensità del vento nel punto MWM al largo di Le Castella (Lon 17.050°E, Lat 38.856°N), per il periodo 1979-2018

RELAZIONE GENERALE

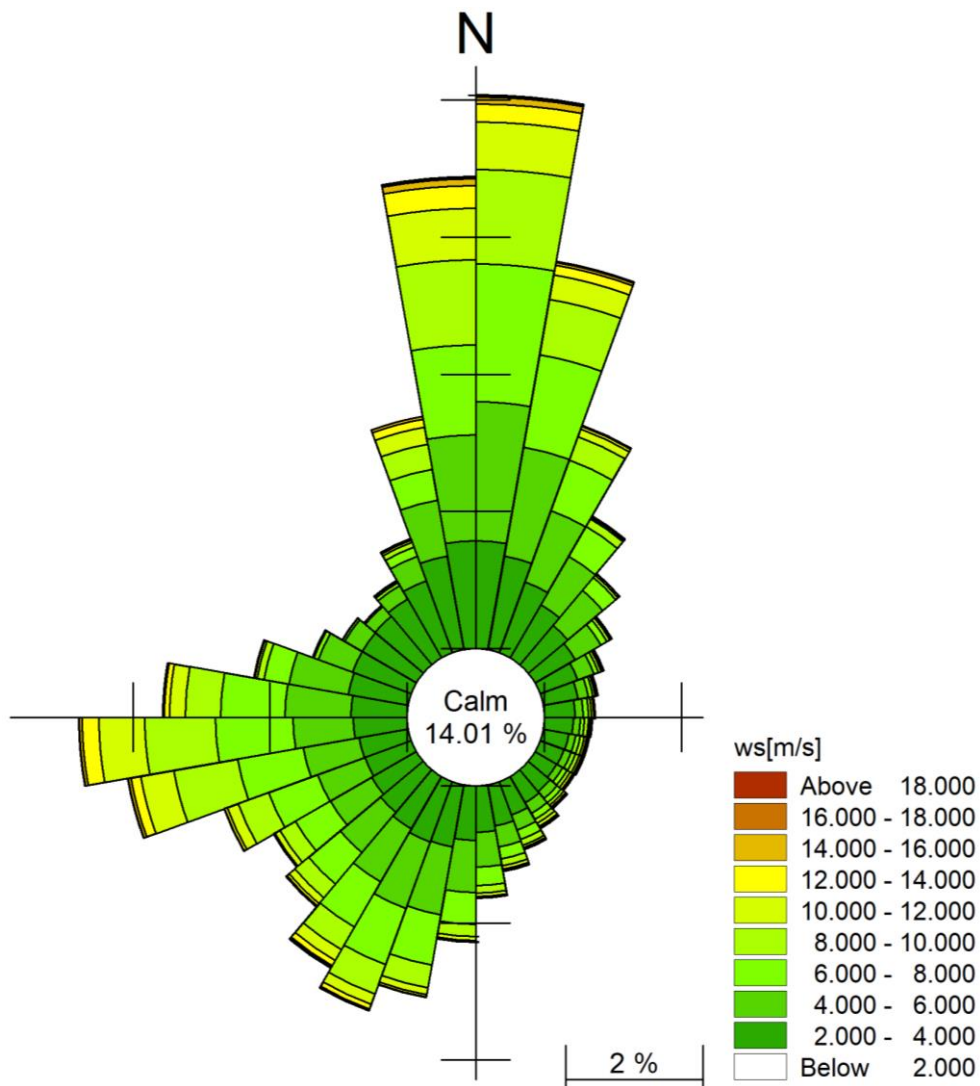


Figura 5-4 Rosa dell'intensità del vento per il punto MWM (Lon 17.050°E, Lat 38.856°N) per i 40 anni di dati a disposizione

RELAZIONE GENERALE

Tabella 5-2 Frequenza di occorrenza per classi di intensità del vento (WS) e direzione media di provenienza (WD) per il punto MWM (Lon 17.050°E, Lat 38.856°N) per il periodo 1979-2018

		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
WD [°]	<10	1748	5514	7116	7038	4831	2442	905	360	100	17	5			
	10-20	1604	4870	5640	4812	2883	1274	505	141	33	18	9			
	20-30	1523	3846	3879	2772	1268	425	141	36	9	8	6	0	1	
	30-40	1367	3140	2861	1771	440	94	35	18	5	4	7			
	40-50	1265	2652	2339	838	164	80	18	12	2	2				
	50-60	1177	2364	1523	348	166	83	24	13	1	1				
	60-70	1123	2044	877	260	130	82	47	20	5	1				
	70-80	1035	1813	519	240	130	84	31	24	8	2				
	80-90	1040	1574	397	271	157	111	49	39	12	1				
	90-100	1029	1485	362	212	179	108	67	24	15	1				
	100-110	1080	1336	353	236	200	122	85	45	16	4				
	110-120	1082	1310	375	249	195	135	68	46	16	2				
	120-130	1107	1288	356	240	196	150	66	35	10	2				
	130-140	1075	1462	466	253	196	107	73	31	20	2				
	140-150	1142	1541	638	357	231	184	85	41	10	4	3			
	150-160	1158	1796	850	511	300	144	73	16	11	1				
	160-170	1157	2147	1095	607	366	177	82	19	5	2				
	170-180	1223	2377	1768	957	392	180	60	11	3	1				
	180-190	1276	2786	2662	1623	633	195	69	18	5	1	2			
	190-200	1236	3231	3528	2609	1194	334	123	42	2	1	1			
	200-210	1312	3305	3597	3066	1581	572	252	90	13	3	1			
	210-220	1334	3078	3159	2662	1332	630	306	100	33	12				
	220-230	1411	2851	2689	2113	912	385	138	62	18	4				
	230-240	1365	2638	2448	2065	922	289	74	17	3	1				
	240-250	1407	2532	2567	2674	1651	596	144	29	6	4				
	250-260	1402	2549	2898	3417	3326	1720	505	127	24	1				
	260-270	1401	2758	3088	3976	3617	2324	857	141	24	6	1			
	270-280	1407	2880	3386	3284	1804	795	262	66	17	9	2	2		
	280-290	1573	3106	3093	1297	351	123	43	9	5	4	1	1	1	
	290-300	1533	3205	1855	246	61	16	6	1						
	300-310	1592	3217	1029	111	17	11	0	1						
	310-320	1707	3223	664	77	18	5	3	1						
	320-330	1783	3472	793	193	84	29	8	3						
330-340	1773	3918	1326	496	273	123	66	17	4						
340-350	1856	4874	2888	1614	1292	882	420	147	15						
>350	1820	5509	5413	4603	4367	2640	1131	374	93	16	2	1			

6 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI

Le serie temporali dei dati di onda e vento al largo sono state processate al fine di ricavare i valori di altezza d'onda significativa e intensità del vento per assegnato tempo di ritorno.

6.1 Analisi su base annuale

6.1.1 Altezza d'onda significativa

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

In accordo con i progettisti, si è proceduto alla definizione delle caratteristiche degli eventi di progetto con tempo di ritorno pari a 50 anni, periodo preso a riferimento per gli interventi previsti. L'analisi è stata effettuata per settori direzionali, selezionando le direzioni di provenienza più rappresentative per il sito oggetto di studio. In considerazione dell'esposizione del punto MWM al largo e della naturale protezione dell'imboccatura del porto di Le Castella dagli eventi da Nord, per l'analisi degli eventi estremi sono state considerate le direzioni comprese tra 100°N a 250°N. Nello specifico, sono stati identificati 5 settori direzionali, denominati con le lettere A-B-C-D-E, di ampiezza pari a 30° ciascuno (Figura 6-1).

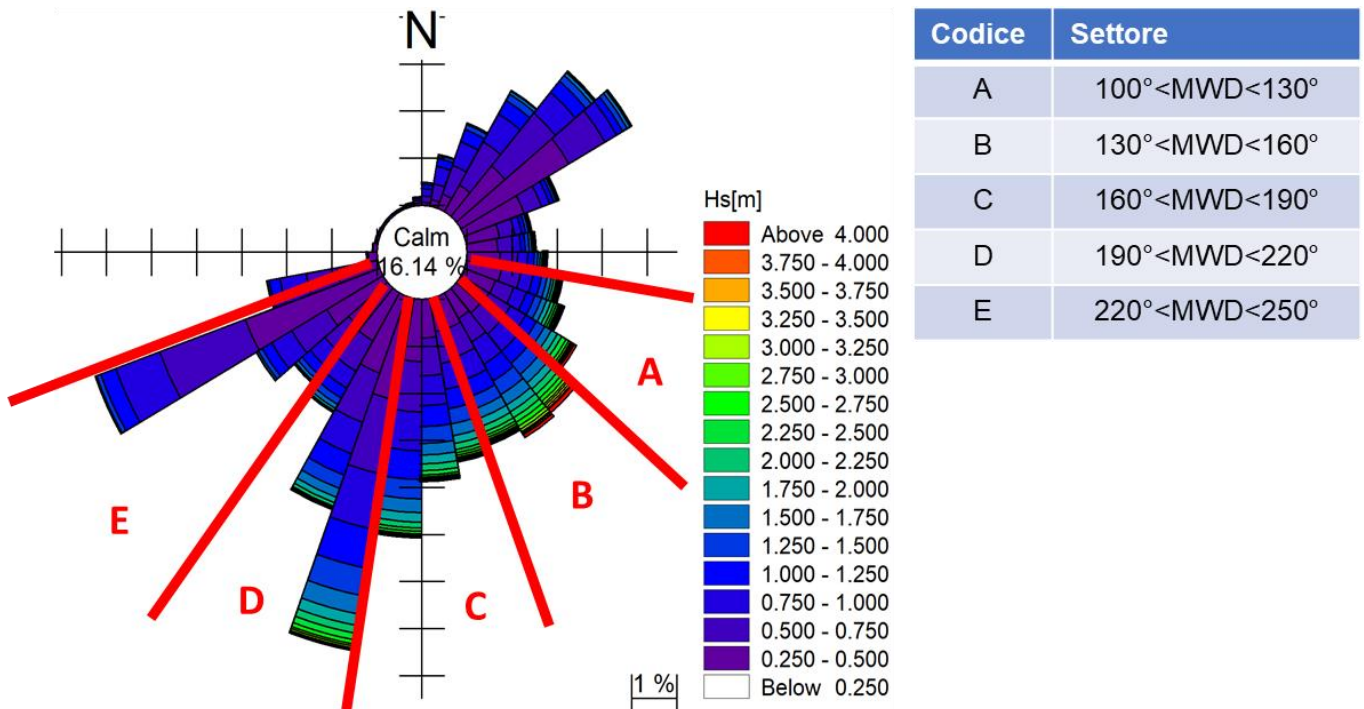


Figura 6-1 Suddivisione della rosa del clima ondoso del punto MWM in settori direzionali di 30°, propedeutica all'analisi statistica delle onde estreme

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

RELAZIONE GENERALE

approcci, tutti opportunamente testati e confrontati, con la selezione del metodo che meglio approssimava i dati a disposizione.

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

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

Nel caso in esame, sempre in riferimento all'altezza d'onda, per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri (da Figura 6-2 a Figura 6-6), risultata quella con miglior aderenza al campione di dati.

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

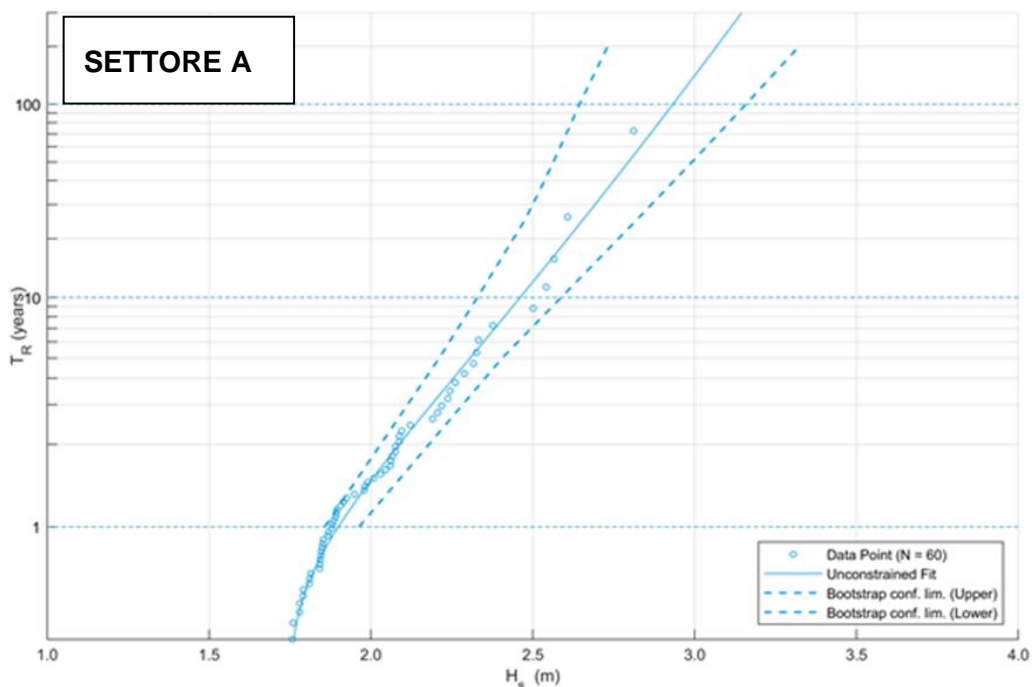


Figura 6-2 Settore A (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 100°N e 130°N) - Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

RELAZIONE GENERALE

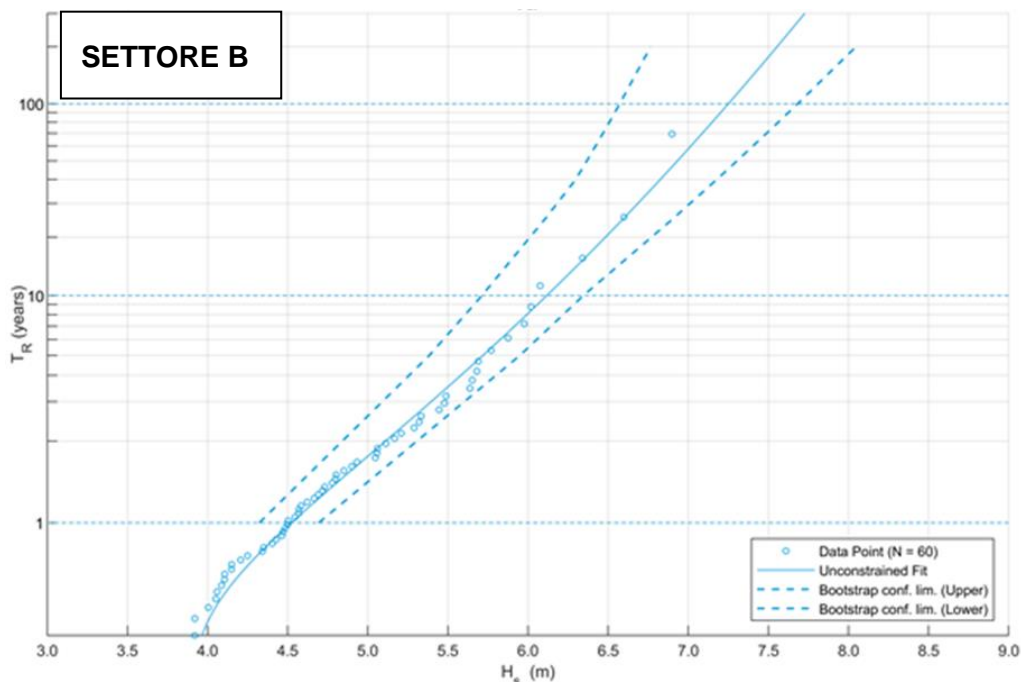


Figura 6-3 Settore B (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 130°N e 160°N) -Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

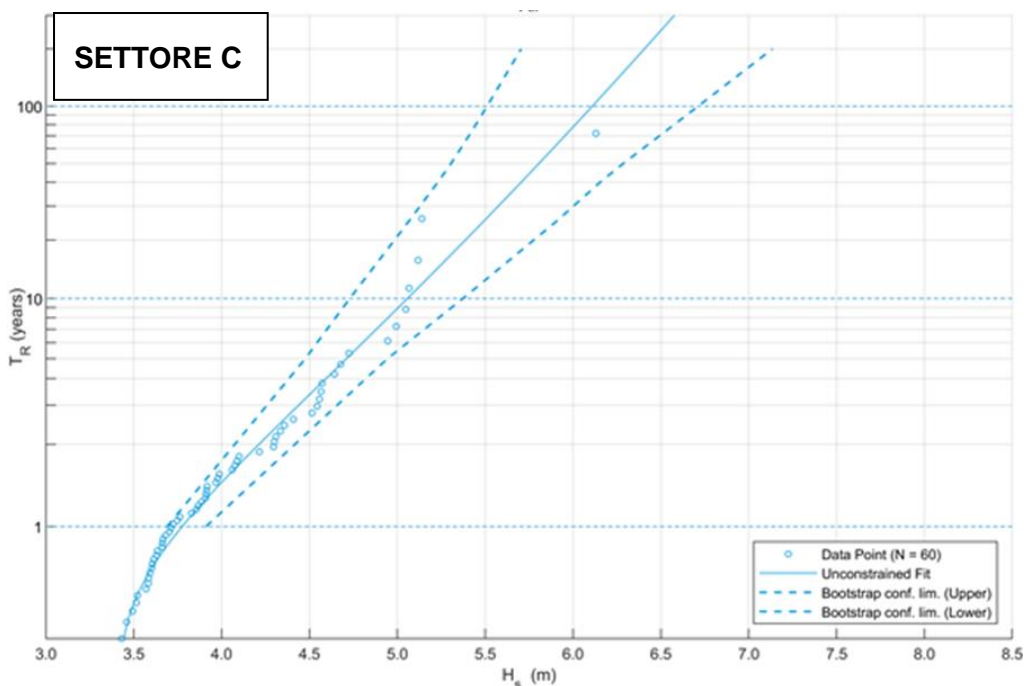


Figura 6-4 Settore C (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 160°N e 190°N) -Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

RELAZIONE GENERALE

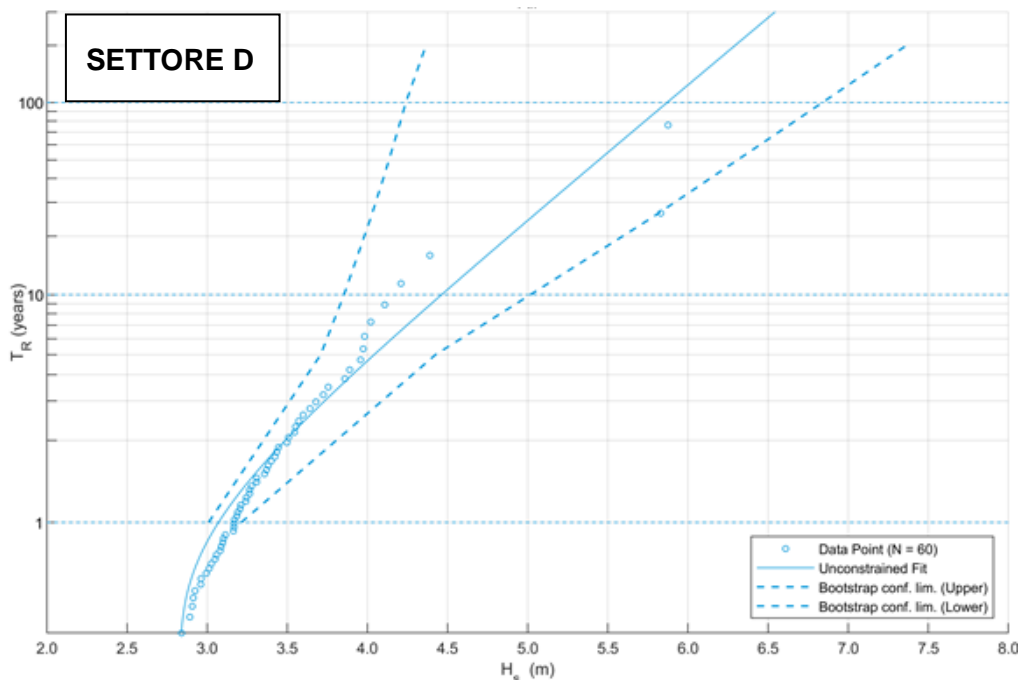


Figura 6-5 Settore D (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 190°N e 220°N) -Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

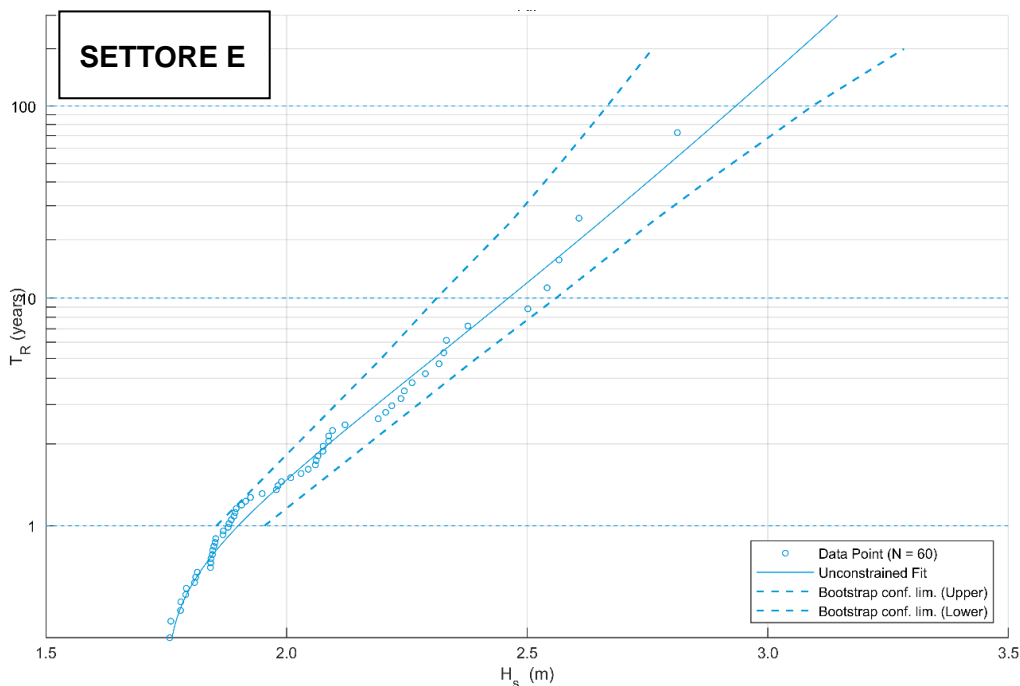


Figura 6-6 Settore E (direzione media di provenienza dell'onda compresa tra 220°N e 250°N) -Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi alle altezze d'onda significative dei 60 maggiori eventi di mareggiata degli ultimi 40 anni nel punto di MWM

RELAZIONE GENERALE

La tabella a seguire riporta i valori di altezza d'onda significativa, nel punto MWM, risultanti dalla statistica direzionale per gli eventi estremi per il tempo di ritorno di 50 anni di interesse per la progettazione degli interventi previsti.

Tabella 6-1 Valori risultanti dall'analisi statistica delle altezze d'onda significativa direzionale nel punto MWM per tempo di ritorno pari a 50 anni

Altezza d'onda significativa – TR 50 anni	
Settore direzionale	Hs [m]
A (100°N<MWD<130°N)	2.80
B (130°N<MWD<160°N)	6.93
C (160°N<MWD<190°N)	5.81
D (190°N<MWD<220°N)	5.45
E (220°N<MWD<250°N)	2.80

6.1.2 Intensità del vento

Con il medesimo approccio descritto al paragrafo precedente, si è proceduto all'analisi statistica anche per la serie di dati di intensità di vento estratta dal punto MWM.

L'analisi è esclusivamente funzionale alla definizione dell'ulteriore contributo all'onda per effetto del vento che soffia all'interno del dominio di calcolo. Pertanto, l'analisi statistica è stata effettuata in riferimento alle sole direzioni di provenienza da mare verso terra (direzioni comprese tra 90°N e 300°N).

L'intensità del vento per il tempo di ritorno pari a 50 anni preso a riferimento per le attività di progettazione è risultata pari a 22 m/s (Figura 6-7).

RELAZIONE GENERALE

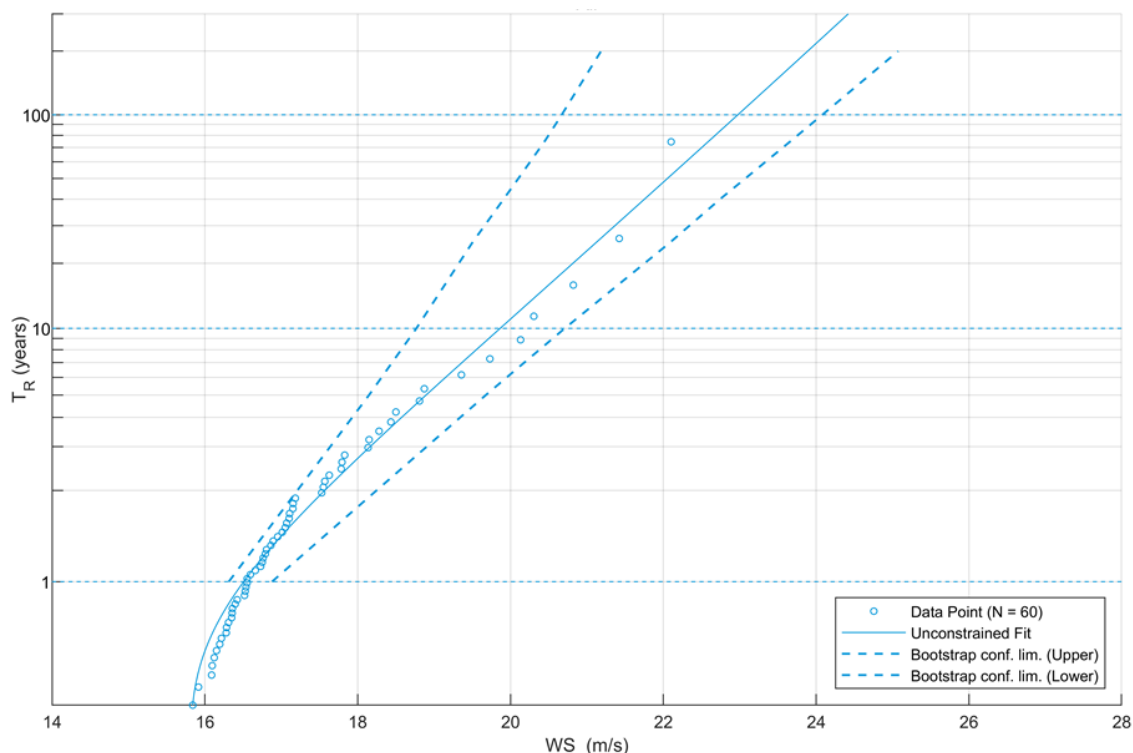


Figura 6-7 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati del punto di MWM relativi all'intensità di vento dei 60 maggiori eventi con direzione di provenienza 90°N <WD<300°N degli ultimi 40 anni

6.1.3 Livelli marini

L'analisi dei dati del mareografo è basata su circa 10 anni di osservazioni (2010-2019) a passo regolare orario (2010 ed inizio 2011) o 10 minuti (dal 2011 ad oggi).

La procedura adottata per l'analisi statistica dei livelli del mareografo è del tutto analoga a quella illustrata in precedenza per le altezze d'onda e l'intensità del vento. Anche in questo caso per rappresentare il comportamento del fenomeno di interesse in relazione alla popolazione di riferimento e alla finalizzazione dell'analisi è stata presa a riferimento la distribuzione statistica Weibull a due parametri.

Il numero complessivo di eventi presi in considerazione è pari a 30 (3 all'anno in media). Il criterio di indipendenza adottato (in termini di intervallo minimo tra due eventi) è pari a 24 ore.

A seguire grafico e tabella con i risultati dell'analisi statistica. Con tale approccio si è ottenuto un livello marino pari a 0.59 m per il tempo di ritorno pari a 50 anni preso a riferimento per le attività di progettazione.

RELAZIONE GENERALE

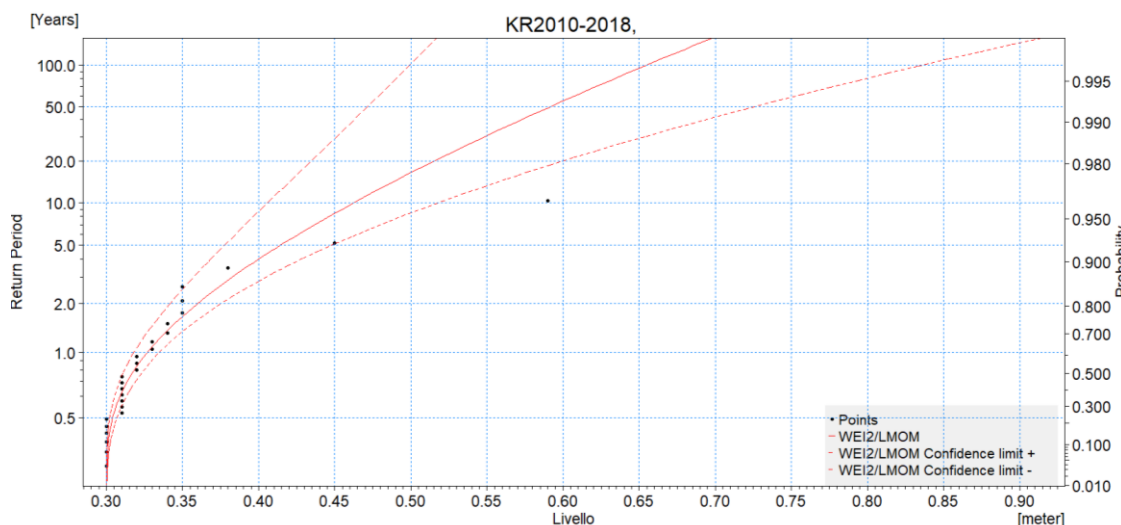


Figura 6-8 Distribuzione statistica di Weibull a due parametri per il campione di dati relativi ai 30 valori di livello più elevati registrati dal mareografo di Crotone nel periodo 2010-2019

Tabella 6-2 Valori risultanti dall’analisi statistica dei livelli marini per assegnato tempo di ritorno dai dati del mareografo di Crotone

MAREOGRAFO DI CROTONE	
Tempo di ritorno [anni]	W.L. [m s.l.m.]
50	0.59

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. Ai fini della determinazione dei livelli di riferimento di fronte al molo del porto di Le Castella, quest’ultimo contributo è stato pertanto calcolato a parte, con la predisposizione di un modello idrodinamico bidimensionale (MIKE 21 HD, le cui caratteristiche sono illustrate in dettaglio al capitolo 8) in grado di simulare la distribuzione dei livelli superficiali in risposta al frangimento dell’onda. In particolare, i livelli superficiali sono stati calcolati in relazione ad un’altezza d’onda corrispondente ad un tempo di ritorno cinquantennale.

6.2 Analisi stagionale

A completamento dell’analisi, le medesime elaborazioni effettuate su base annuale sono state ripetute su base stagionale, al fine di valutare l’operatività estiva delle aree interne al bacino portuale.

A seguire si riportano i valori di altezza d’onda significativa calcolata per il periodo “estivo”, qui considerato a partire dal 1 Aprile fino al 30 Settembre, e calcolato sulla base della serie quarantennale di dati a

RELAZIONE GENERALE

disposizione (Tabella 6-3).

Si specifica che la metodologia adottata segue il medesimo approccio illustrato per l'analisi su base annuale e si riferisce ai settori direzionali A – B – C – D. Le onde provenienti dal settore E non sono infatti da considerarsi rilevanti ai fini dell'agitazione interna al bacino.

Tabella 6-3 Valori risultanti dall'analisi statistica stagionale (estiva) delle altezze d'onda significativa direzionale nel punto MWM per tempo di ritorno pari a 50 anni

ESTATE (1/4-30/09)	
Altezza d'onda significativa – TR 50 anni	
Settore direzionale	Hs [m]
A (100°N<MWD<130°N)	1.85
B (130°N<MWD<160°N)	2.10
C (160°N<MWD<190°N)	2.10
D (190°N<MWD<220°N)	1.92

7 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO DAL LARGO VERSO COSTA

Come anticipato ed illustrato nella sezione dedicata all'approccio metodologico dello studio (capitolo 3), il clima ondoso ordinario sottocosta in corrispondenza del porto di Le Castella è stato definito propagando le onde dal largo verso costa con il modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves) di DHI, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia 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);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

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

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

Sulla base dei dati disponibili, descritti alla sezione 4.3, è stata predisposta una batimetria di calcolo a maglia triangolare che copre tutto il tratto di litorale che si estende approssimativamente dal promontorio di Capo Rizzuto ad Ovest e Le Castella ad Est, per uno sviluppo costiero complessivo di oltre 9 km. L'estensione spaziale e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare

RELAZIONE GENERALE

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 si è fatto riferimento al database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di CMAP e al rilievo batimetrico di dettaglio effettuato da Geonautics nell'agosto 2019.

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

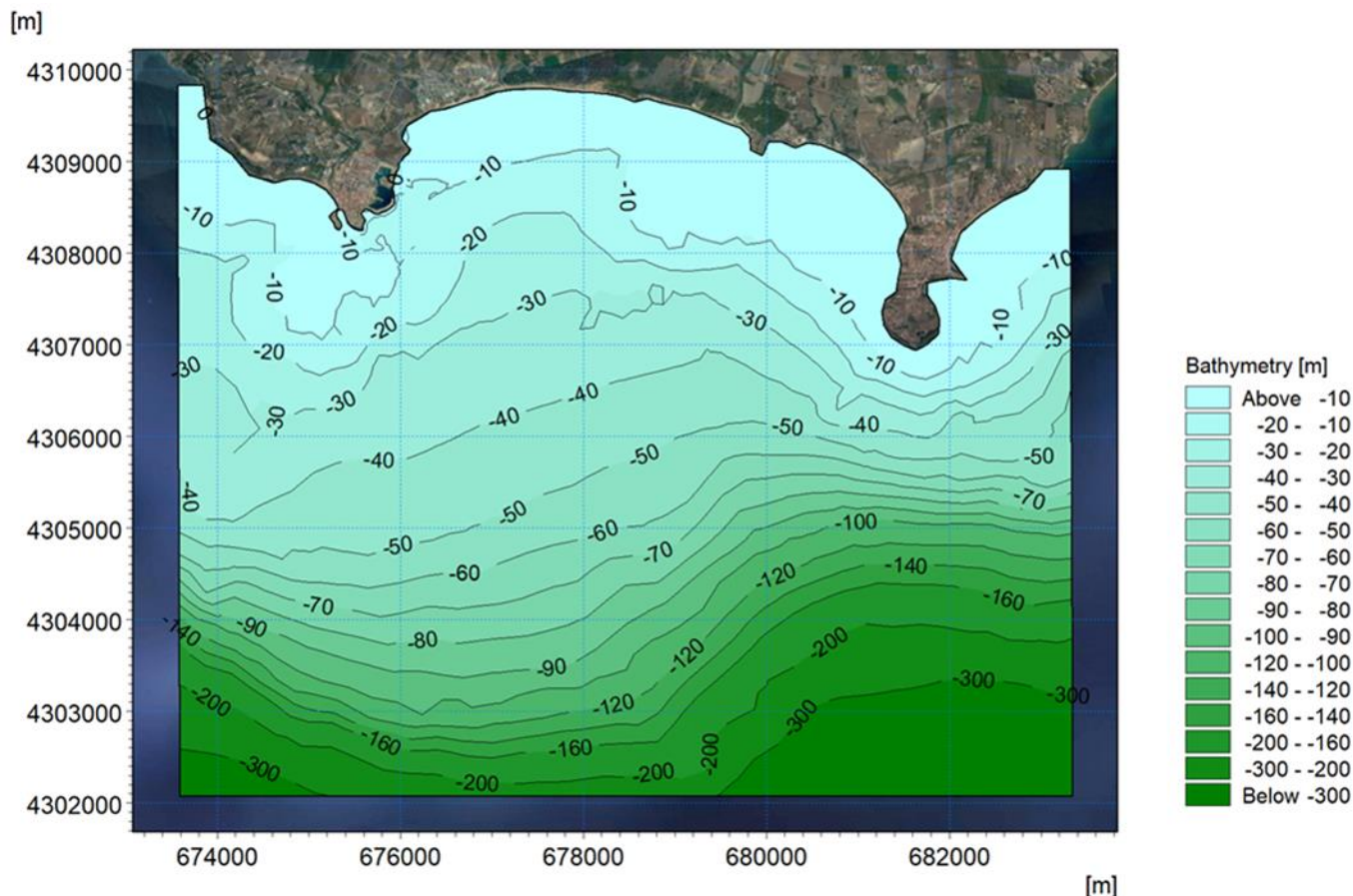


Figura 7-1 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

La batimetria del modello è stata costruita utilizzando un approccio a maglia flessibile: la risoluzione spaziale al largo (lunghezza media dei lati dei triangoli) è di circa 300 m, per arrivare a circa 50 m nella zona più prossima al porto di Le Castella. In totale la mesh di calcolo è costituita da circa 5'000 elementi.

La serie temporale quarantennale dei principali parametri d'onda estratta dal database MWM (sezione 4.1) è stata utilizzata come condizione al contorno di largo del modello (i dati sono stati assunti uniformi lungo il contorno aperto, a circa 7 km dalla costa).

RELAZIONE GENERALE

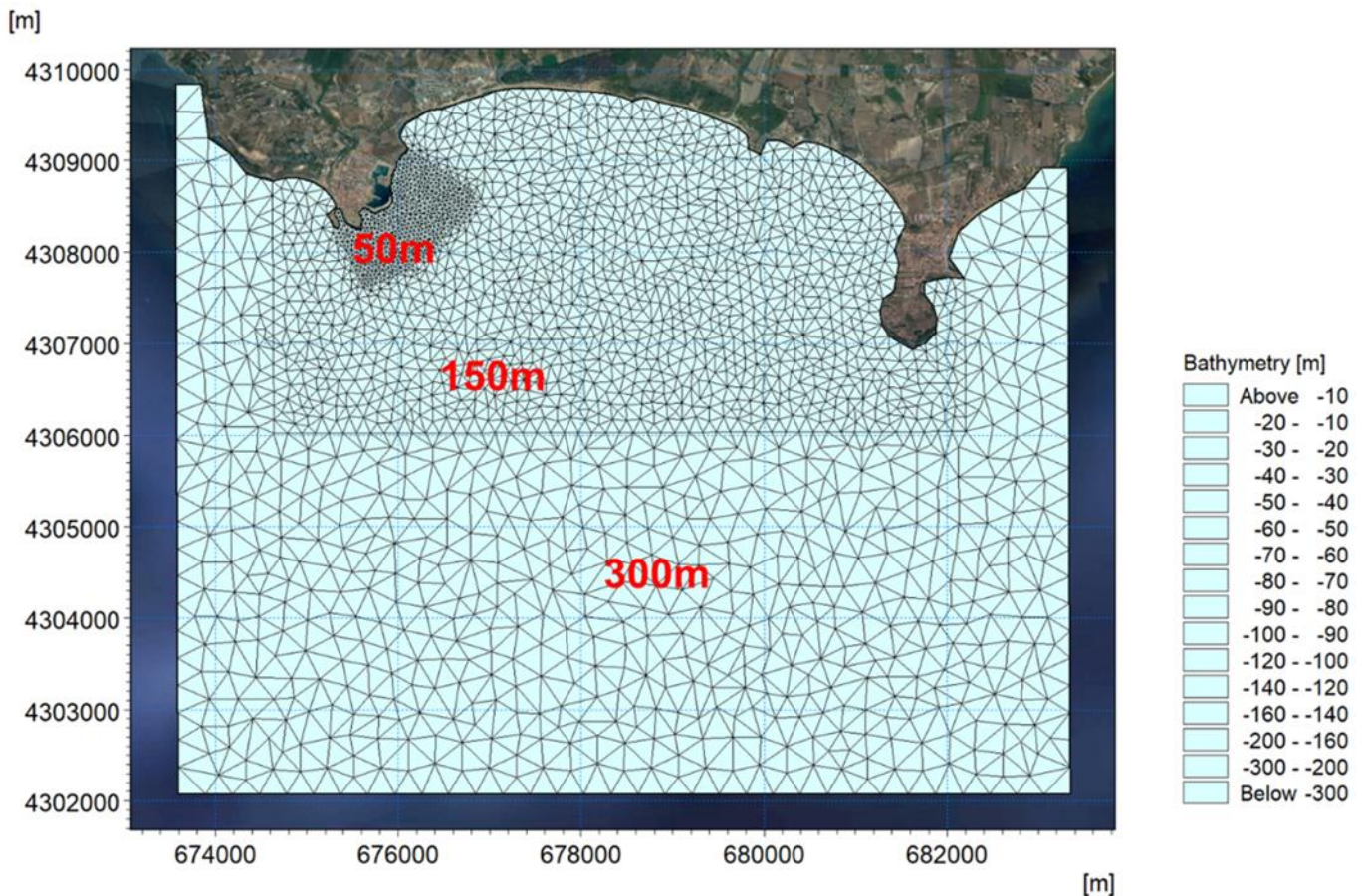


Figura 7-2 Risoluzione spaziale della mesh di calcolo del modello d'onda utilizzato per la propagazione dell'intera serie quarantennale

7.2 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 delle caratteristiche d'onda 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 nella sua propagazione da largo verso costa.

In particolare, la variazione cromatica mette bene in evidenza l'effetto schermante del promontorio naturale di Capo Rizzuto a Levante e l'area del Castello di Le Castella, prominente sul mare, a Ponente.

I risultati del modello d'onda mostrano una distribuzione delle altezze d'onda piuttosto regolare con l'andamento dei fondali: le pendenze elevate determinano infatti ben poche dissipazioni dell'energia ondosa con l'avvicinarsi alla costa ad eccezione della zona antistante all'isola tidale, ove sorge la nota fortezza, caratterizzata da bassi fondali e da un'articolata linea di riva.

Il modello d'onda è stato utilizzato sia per la propagazione dell'intera serie, ovvero dei 40 anni di dati orari, sia per la propagazione delle onde (da vari settori direzionali) con tempo di ritorno pari a 50 anni, derivanti

RELAZIONE GENERALE

dall'analisi statistica riportata al capitolo 6.1.1.

7.3 Propagazione della serie temporale quarantennale

La propagazione verso costa dell'intera serie di dati orari estratti dal dataset MWM ha fornito indicazioni generali sulle modalità di propagazione del moto ondoso nella porzione di mare in esame e ha permesso di ottenere le principali grandezze d'onda in tutti i punti del dominio di calcolo, fornendo anche la possibilità di selezionare le condizioni d'onda nei pressi dell'imboccatura portuale da simulare successivamente con il modello di agitazione interna, descritto al capitolo 9 del presente studio.

Infine, la variazione dell'orientazione dei vettori nell'avvicinamento a costa, che tendono a disporsi perpendicolarmente ad essa, mette in evidenza il fenomeno della rifrazione. Questo fenomeno è tanto più marcato quanto più la direzione di provenienza delle onde al largo è inclinata rispetto alla perpendicolare a costa.

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

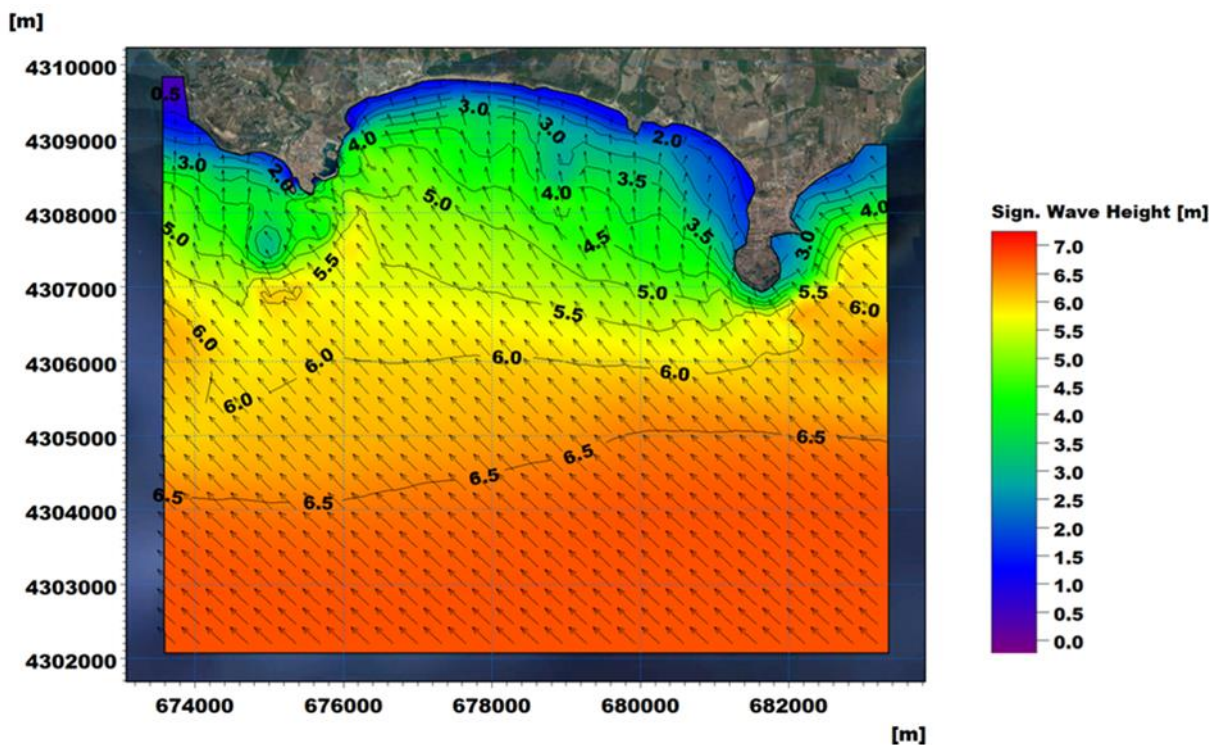


Figura 7-3 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per il time step corrispondente alle ore 23 del 24/12/1990, caratterizzato da un evento con $H_s=6.9$ m, $T_p= 11.6$ s e $MWD=133$ °N

RELAZIONE GENERALE

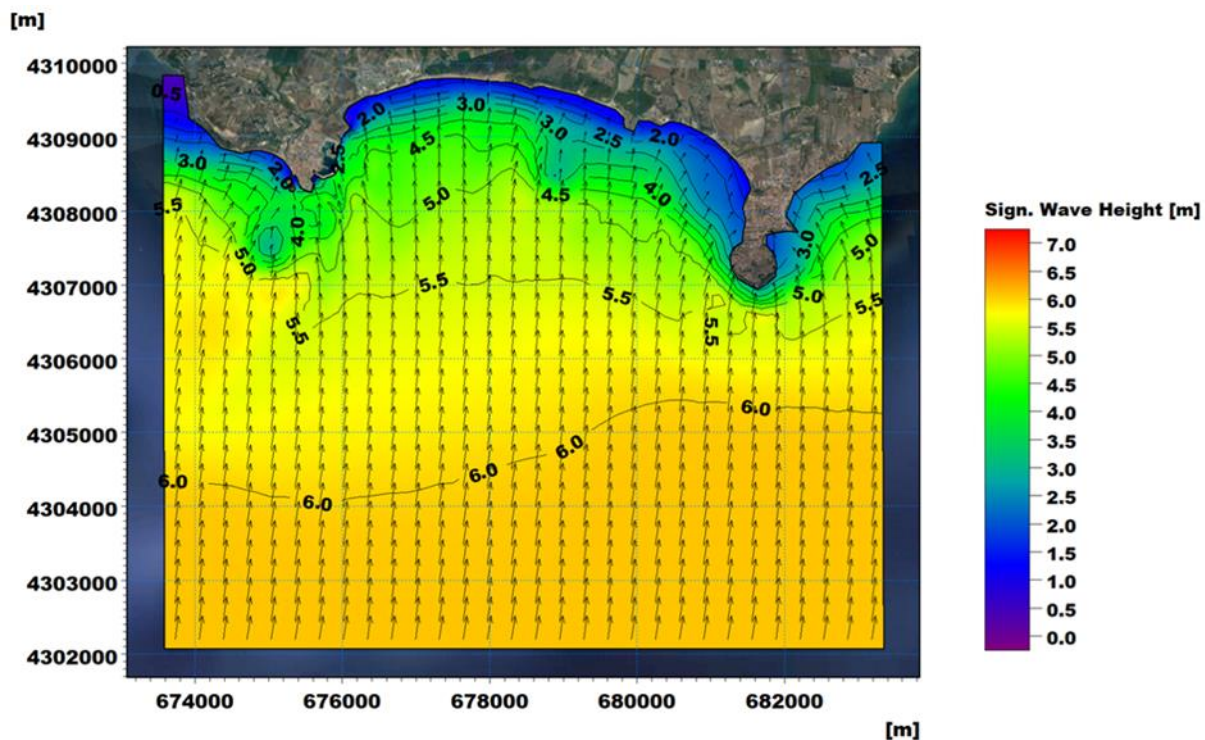


Figura 7-4 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per il time step corrispondente alle ore 11 del 24/11/1991, caratterizzato da un evento con $H_s=6.1$ m, $T_p=10.6$ s e $MWD=190^\circ N$

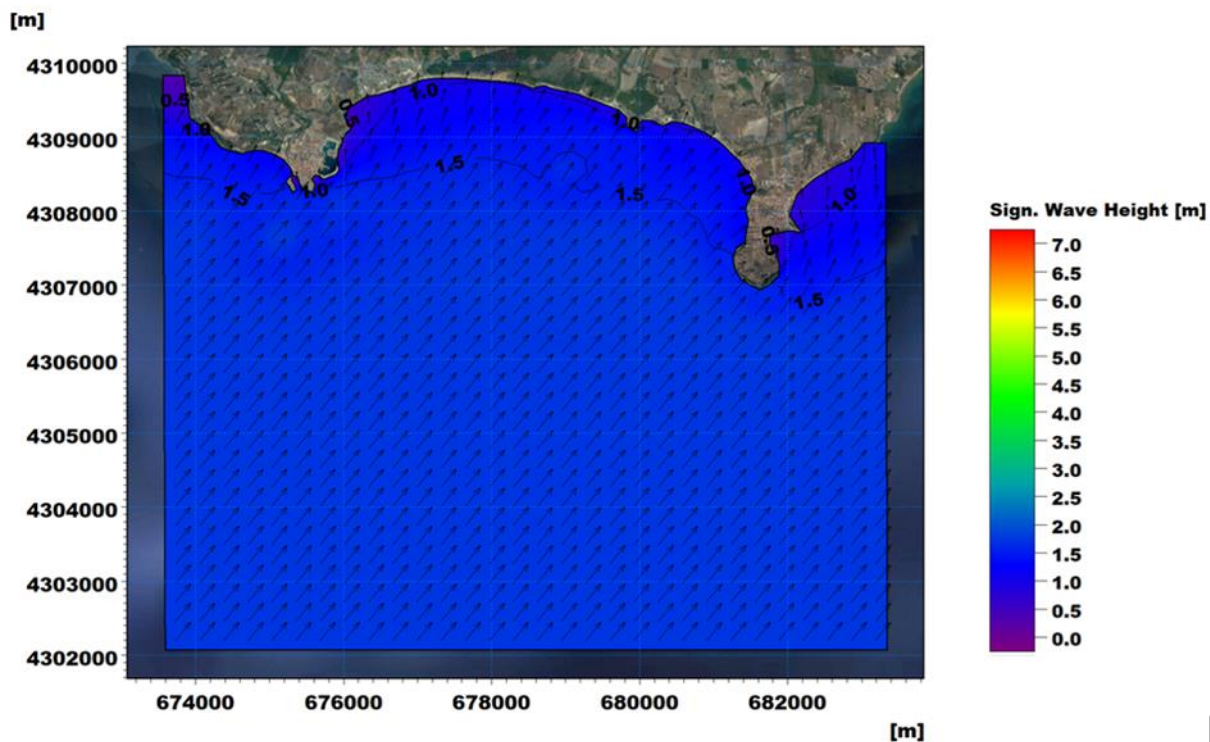


Figura 7-5 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per il time step corrispondente alle ore 9 del 17/02/1987, caratterizzato da un evento con $H_s=1.9$ m, $T_p=5.7$ s e $MWD=232^\circ N$

RELAZIONE GENERALE

Per caratterizzare il clima ondoso sottocosta nell'area antistante l'imboccatura del porto di Le Castella è stata estratta la serie dei vari parametri caratteristici dell'onda risultanti dalla simulazione di lungo periodo in un punto ubicato a circa 500 m dalla struttura stessa (Figura 7-6).

Nella figura a seguire è inoltre riportato il clima ondoso sotto forma di rosa e di tabella di occorrenza, da cui emerge, come prevedibile data la conformazione della costa, che le onde di interesse per l'area di studio provengono dal secondo e dal terzo quadrante: il settore regnante comprende le direzioni comprese tra i 170°N e i 200°N (30% del totale) mentre il settore dominante comprende le direzioni 140°N<MWD<180°N.

La condizione di calma, qui associata ad una altezza d'onda significativa inferiore a 0.25 m, si verifica per circa il 36% del tempo (corrispondente a oltre 4 mesi / anno).

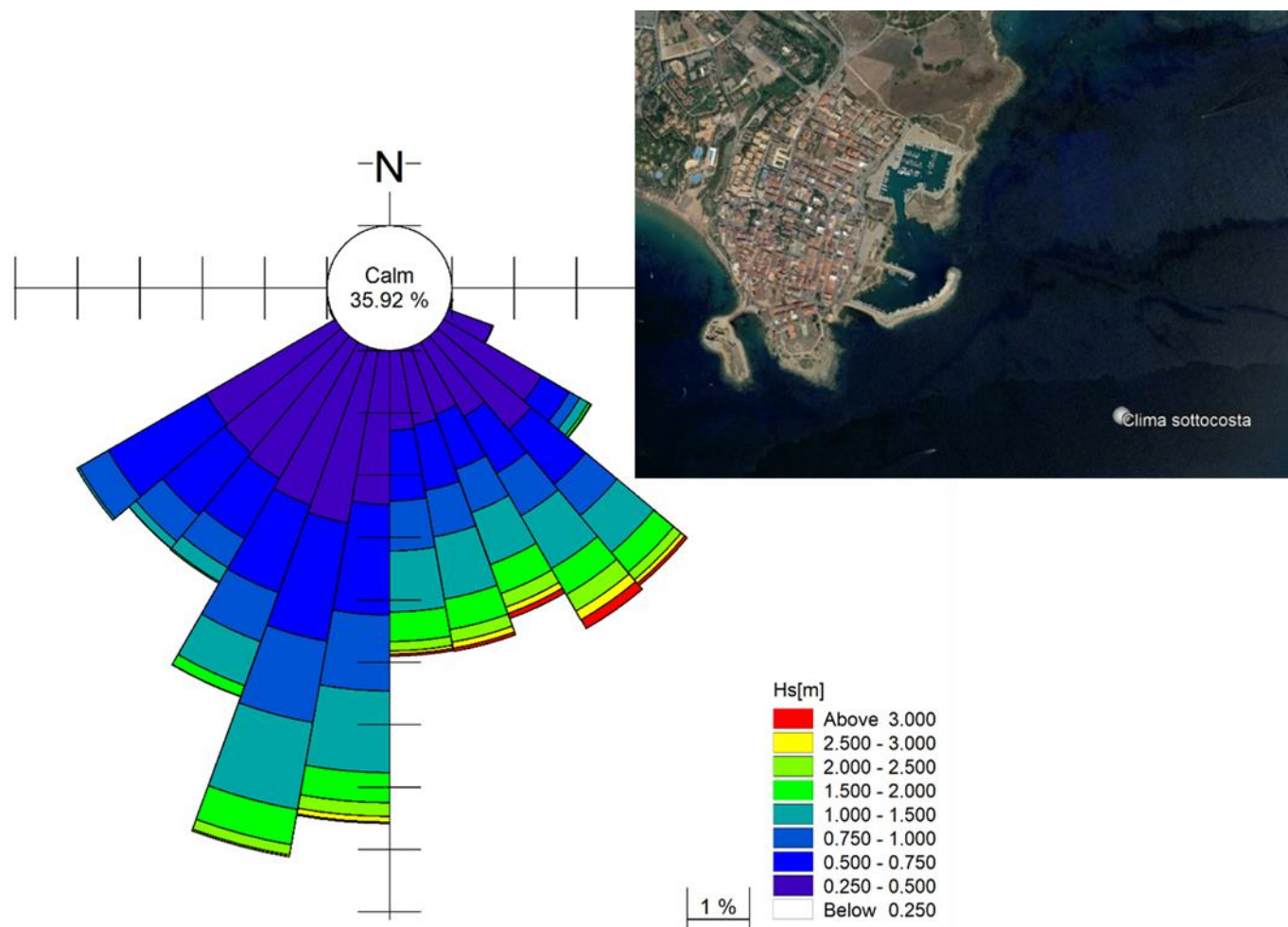


Figura 7-6 Ubicazione del punto di estrazione (in alto a destra) e rosa del clima ondoso sottocosta

RELAZIONE GENERALE

Tabella 7-1 Frequenza di occorrenza per classi di intensità dell'altezza d'onda significativa (Hs) e direzione media di provenienza (MWD) per il punto sottocosta per il periodo 1979-2018

MWD [°]	Hs [m]																			
	<0.25	0.25-0.50	0.5-0.75	0.75-1.00	1.00-1.25	1.25-1.50	1.50-1.75	1.75-2.00	2.00-2.25	2.25-2.50	2.50-2.75	2.75-3.00	3.00-3.25	3.25-3.50	3.50-3.75	3.75-4.00	4.00-4.25	4.25-4.50	4.50-4.75	>4.75
	<10																			
10-20																				
20-30																				
30-40																				
40-50																				
50-60																				
60-70																				
70-80																				
80-90																				
90-100																				
100-110	10184	29																		
110-120	33010	259																		
120-130	29895	5117	367	41	5															
130-140	11065	6710	2884	1209	597	315	139	44	33	23	3									
140-150	6469	5613	3907	2378	1772	1296	795	488	256	170	115	55	65	28	11	8	1	1		
150-160	5097	4837	4214	3245	2306	1432	1068	810	699	530	288	215	142	114	81	51	49	8	2	
160-170	4348	5370	4307	3225	2517	1694	1330	833	534	341	282	173	102	59	36	17	3			
170-180	5179	9779	7464	5135	3501	2101	1405	876	454	281	174	87	58	37	24	19	5	6		
180-190	5263	8403	5924	4224	2923	1921	1371	896	673	320	207	103	37	3						
190-200	5845	11866	8507	5566	3348	1972	949	369	83	19	3									
200-210	6774	11200	4501	1623	545	119	43	1												
210-220	6416	9077	4237	1251	143	23	5													
220-230	3429	11598	5144	352	5															
230-240	536	82	1																	
240-250	121	4																		
250-260	56																			
260-270																				
270-280																				
280-290																				
290-300																				
300-310																				
310-320																				
320-330																				
330-340																				
340-350																				
>350																				

7.4 Propagazione degli eventi estremi

La propagazione degli eventi estremi dal largo verso il porto ha avuto come principale obiettivo l'identificazione delle caratteristiche d'onda sottocosta finalizzate al dimensionamento delle opere previste.

Su indicazione del progettista, i valori di altezza d'onda significativa simulati sono quelli risultanti dall'analisi statistica per tempo di ritorno pari a 50 anni (Tabella 6-1), mentre il periodo di picco T_p da associare all'onda è stato definito sulla base della correlazione Hs- T_p del campione di dati specifico di ciascun settore direzionale. A tale scopo sono stati graficizzati, per ogni settore direzionale in esame, i valori di periodo di picco in funzione dell'altezza d'onda significativa appartenenti alla serie estratta dal punto di estrazione MWM.

Dai cinque grafici ottenuti sono stati estrapolati, con un approccio cautelativo, i valori di T_p da associare ai valori di altezza d'onda significativa risultanti dall'analisi statistica per tempo di ritorno 50 anni.

A titolo esemplificativo si riporta nella figura a seguire la rappresentazione delle coppie Hs- T_p appartenenti al settore direzionale 130°N-160°N.

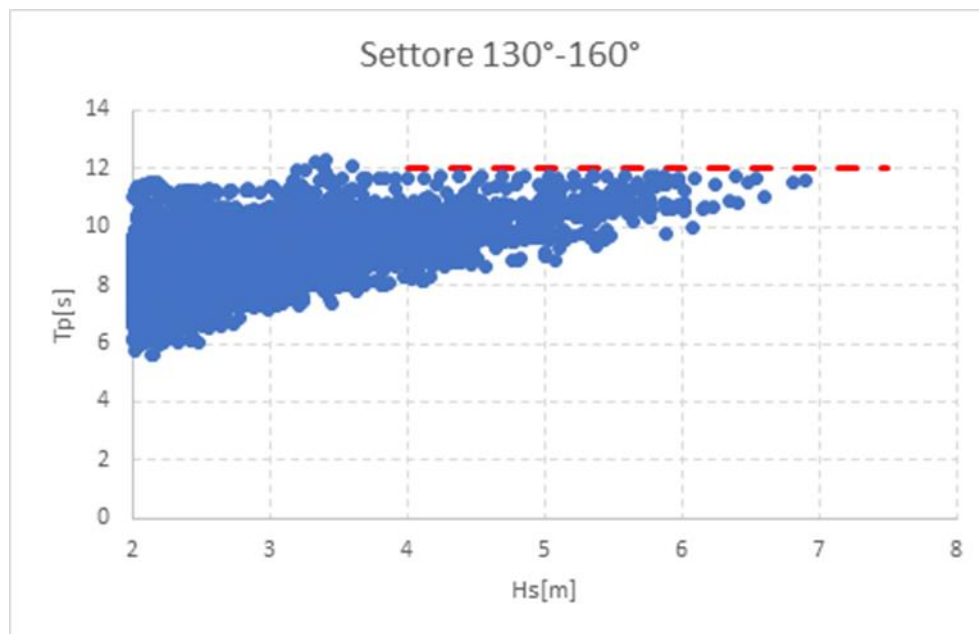


Figura 7-7 Settore B: rappresentazione delle coppie "Hs- T_p " per il punto MWM per il periodo 1.1.1979 – 31.12.2018. In tratteggio rosso indicazione del valore del periodo T_s pari a 12 s cautelativamente selezionato per l'evento estremo

Per quanto concerne la direzione da associare alle onde estreme, si è proceduto con il calcolo sulla base della media pesata degli eventi appartenenti ad ogni singolo settore.

In Tabella 6-1 sono riportate le caratteristiche degli eventi estremi per cui si è proceduto alla propagazione dal largo verso riva.

Si specifica che al modello di propagazione è stato innestato un ulteriore modello di dettaglio onda-corrente, caratterizzato da un minore estensione del dominio e una maggiore risoluzione spaziale, che ha permesso un'adeguata descrizione dei processi di onda e corrente sottocosta e una più precisa definizione delle caratteristiche dell'onda da prendere a riferimento per la fase di progettazione (Capitolo 8).

RELAZIONE GENERALE

Tabella 7-2 Caratteristiche degli eventi estremi direzionali al largo per tempo di ritorno pari a 50anni

Eventi estremi – TR 50 anni			
Settore direzionale	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
A (100°N<MWD<130°N)	2.80	12	117
B (130°N<MWD<160°N)	6.93	12	144
C (160°N<MWD<190°N)	5.81	11	176
D (190°N<MWD<220°N)	5.45	11	201
E (220°N<MWD<250°N)	2.80	9	238

Cautelativamente, è stato associato a ciascun evento l'ulteriore contributo del vento nel dominio di calcolo. La direzione del vento è stata considerata pari a quella dell'onda, mentre per l'intensità quella associata al medesimo tempo di ritorno preso a riferimento per l'onda, 50 anni.

Infine, le condizioni al contorno di livello del modello d'onda sono state impostate sul valore estremo risultato dell'analisi statistica dei dati osservati presso la stazione mareografica di Crotona. Il dato comprende i contributi di marea astronomica, pressione atmosferica (barometro inverso) e vento (wind setup) ma, come già specificato, non contempla il contributo locale dell'onda (wave setup). Tale ulteriore contributo locale viene simulato con il modello idrodinamico utilizzato sul dominio locale che riproduce l'innalzamento complessivo del livello marino (storm surge).

A seguire si riportano le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda risultanti dalle simulazioni degli eventi estremi cinquantennali per le cinque direzioni considerate. I risultati ottenuti hanno fornito le condizioni al contorno per il modello integrato di dettaglio onda-idrodinamica descritto a seguire.

7.4.1 Propagazione degli eventi estremi calcolati su base annuale

Dall'analisi della distribuzione dell'altezza d'onda significativa per gli eventi estremi dai vari settori direzionali considerati si osserva come siano più critiche, sia per direzione di provenienza che per altezza d'onda, le condizioni simulate in riferimento ai settori B e C.

Per i settori A, D ed E, essendo le onde caratterizzate da una maggior inclinazione rispetto alla costa, si evidenzia in modo più chiaro il fenomeno della rifrazione, che dissipa significativamente l'energia ondata nella propagazione verso costa.

RELAZIONE GENERALE

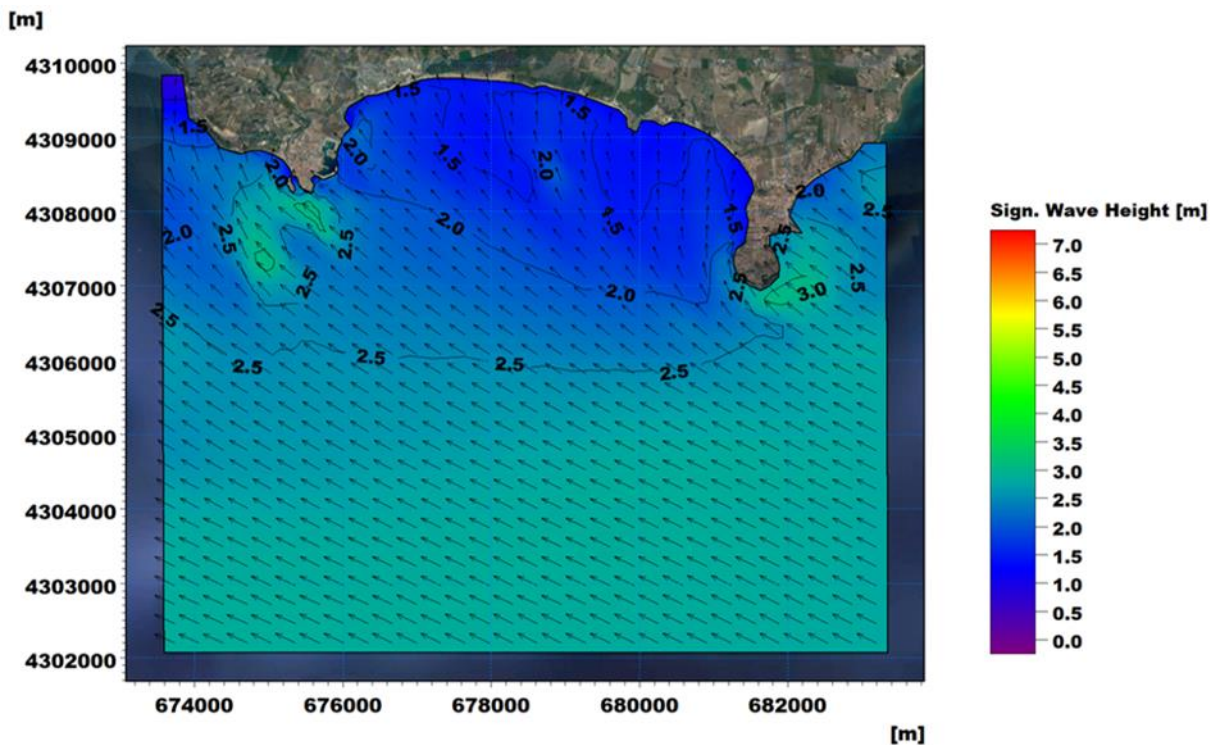


Figura 7-8 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore A, con $H_s=2.80$ m, $T_p= 12$ s e $MWD=117$ °N

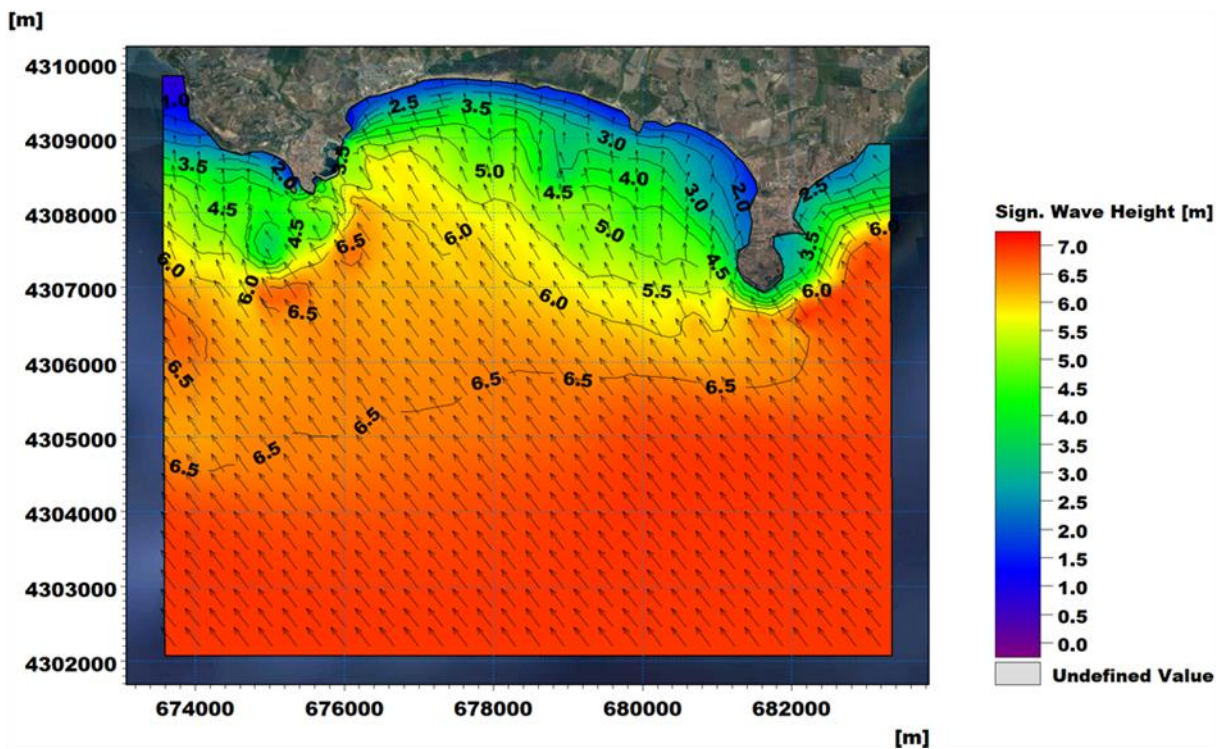


Figura 7-9 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore B, con $H_s=6.93$ m, $T_p= 12$ s e $MWD=144$ °N

RELAZIONE GENERALE

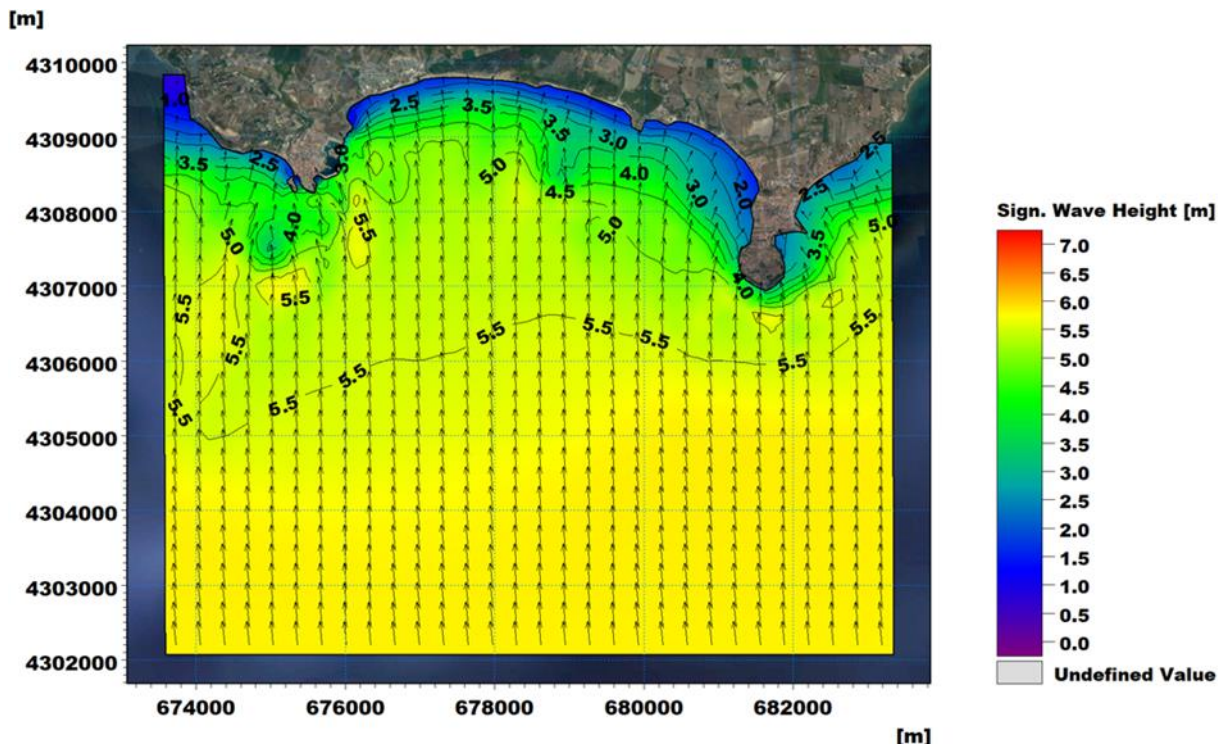


Figura 7-10 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore C, con $H_s=5.81$ m, $T_p= 11$ s e $MWD=176$ °N

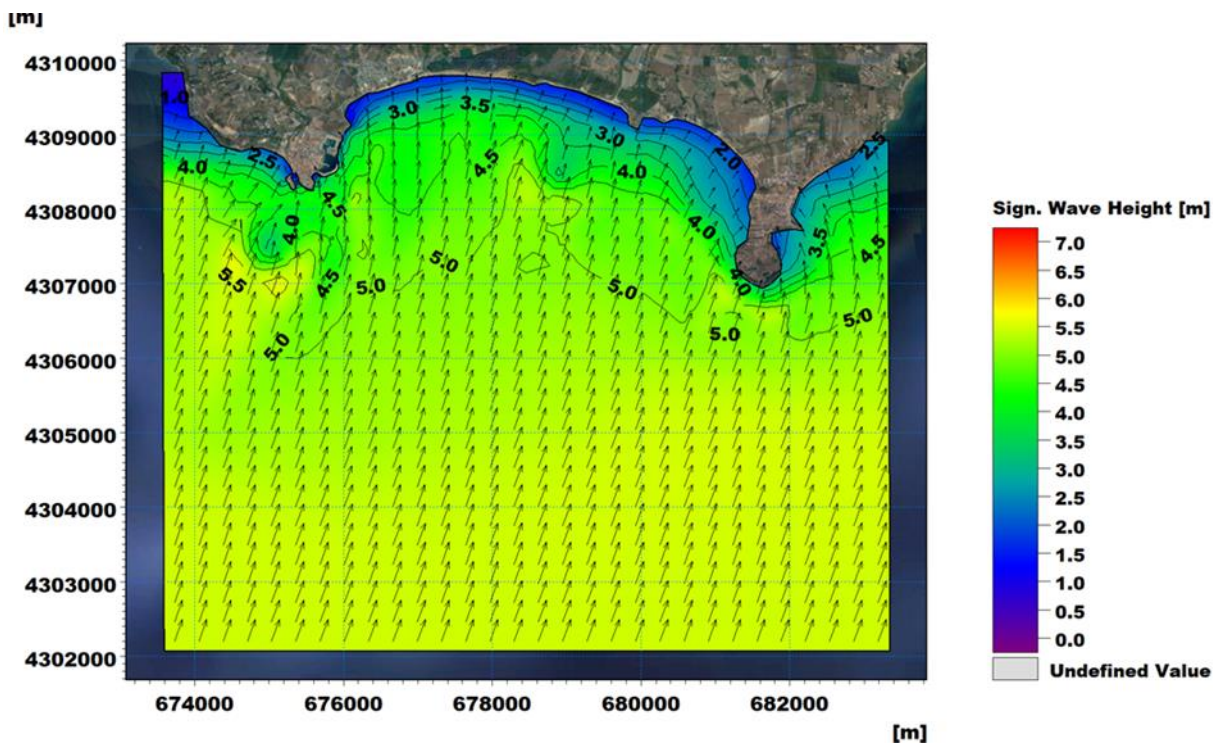


Figura 7-11 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore D, con $H_s=5.45$ m, $T_p= 11$ s e $MWD=201$ °N

RELAZIONE GENERALE

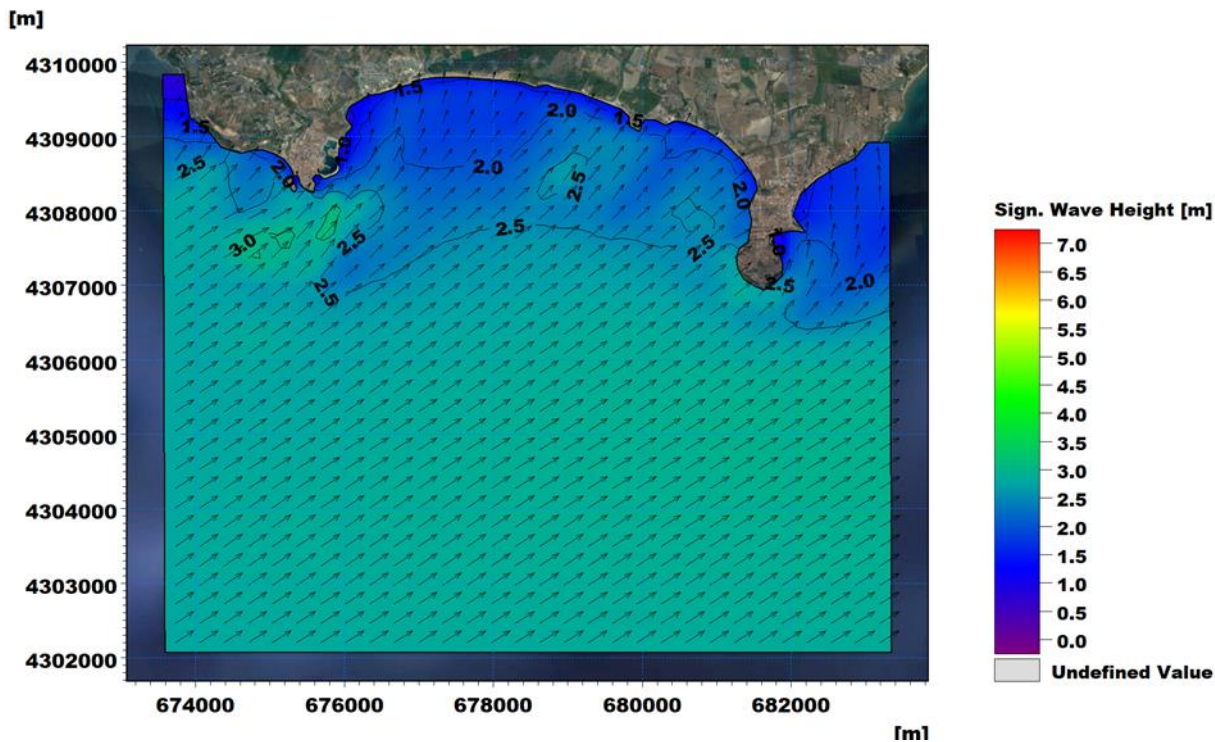


Figura 7-12 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore E, con $H_s=2.80$ m, $T_p=9$ s e $MWD=238^\circ N$

Oltre agli eventi con tempo di ritorno 50 anni, sono stati propagati anche gli eventi con tempo di ritorno 5 anni, i cui risultati in corrispondenza dell'imboccatura del porto sono stati utilizzati nell'ambito della modellazione dell'agitazione ondosa residua (capitolo 9).

7.4.2 Propagazione degli eventi estremi calcolati su base stagionale

Nelle figure a seguire si riportano le mappe di distribuzione delle altezze d'onda significativa degli eventi estremi calcolati su base stagionale estiva (Tabella 6-3 Tabella 6-3 Valori risultanti dall'analisi statistica stagionale (estiva) delle altezze d'onda significativa direzionale nel punto MWM per tempo di ritorno pari a 50 anni).

RELAZIONE GENERALE

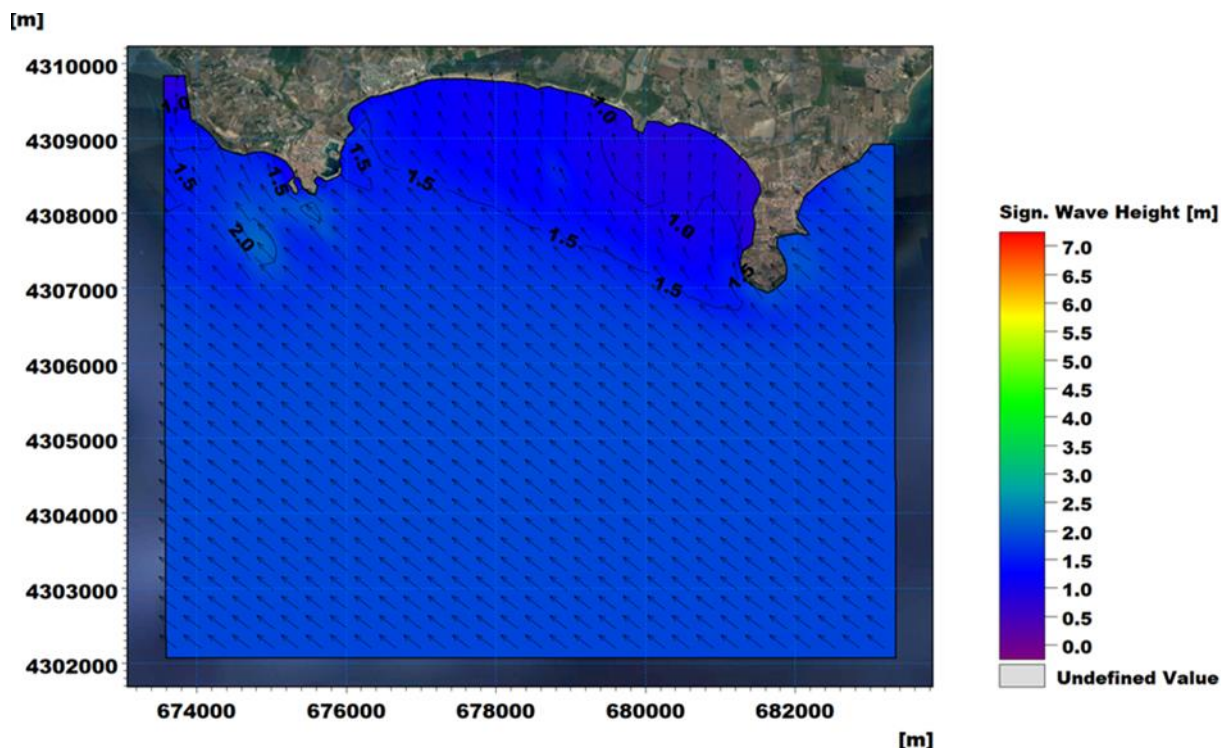


Figura 7-13 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni su base stagionale estiva, proveniente dal settore A

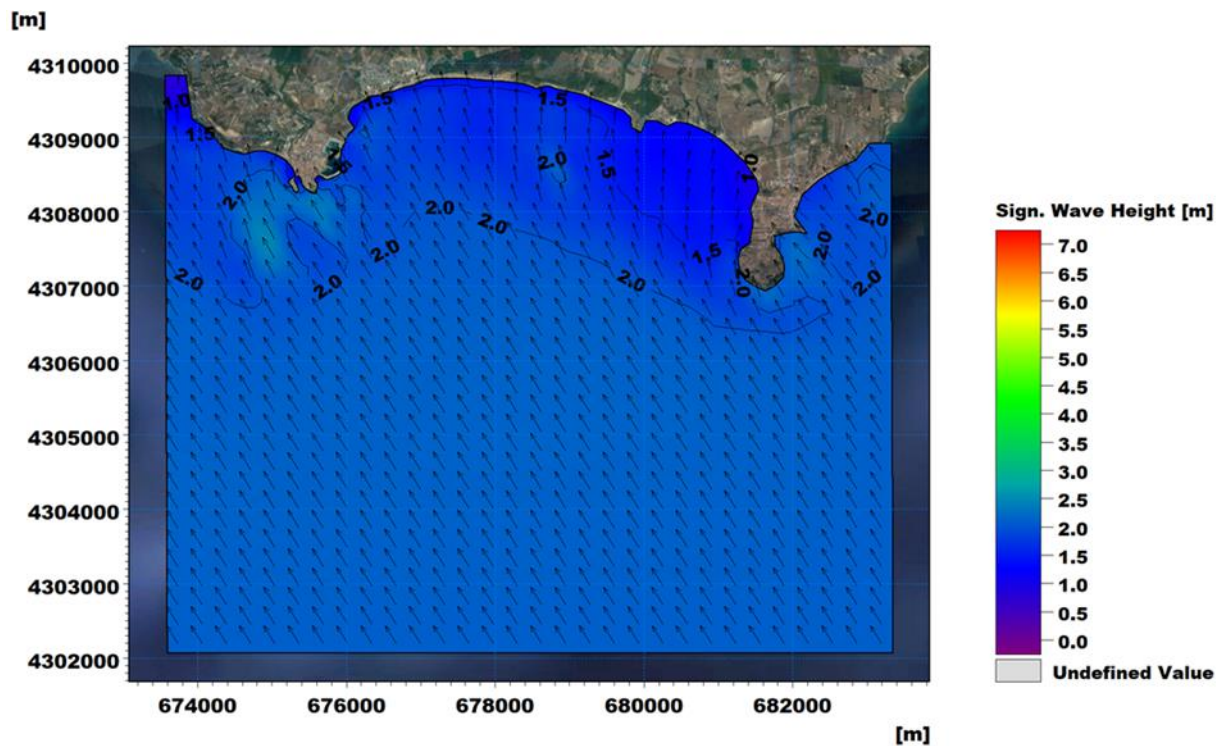


Figura 7-14 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni su base stagionale estiva, proveniente dal settore B

RELAZIONE GENERALE

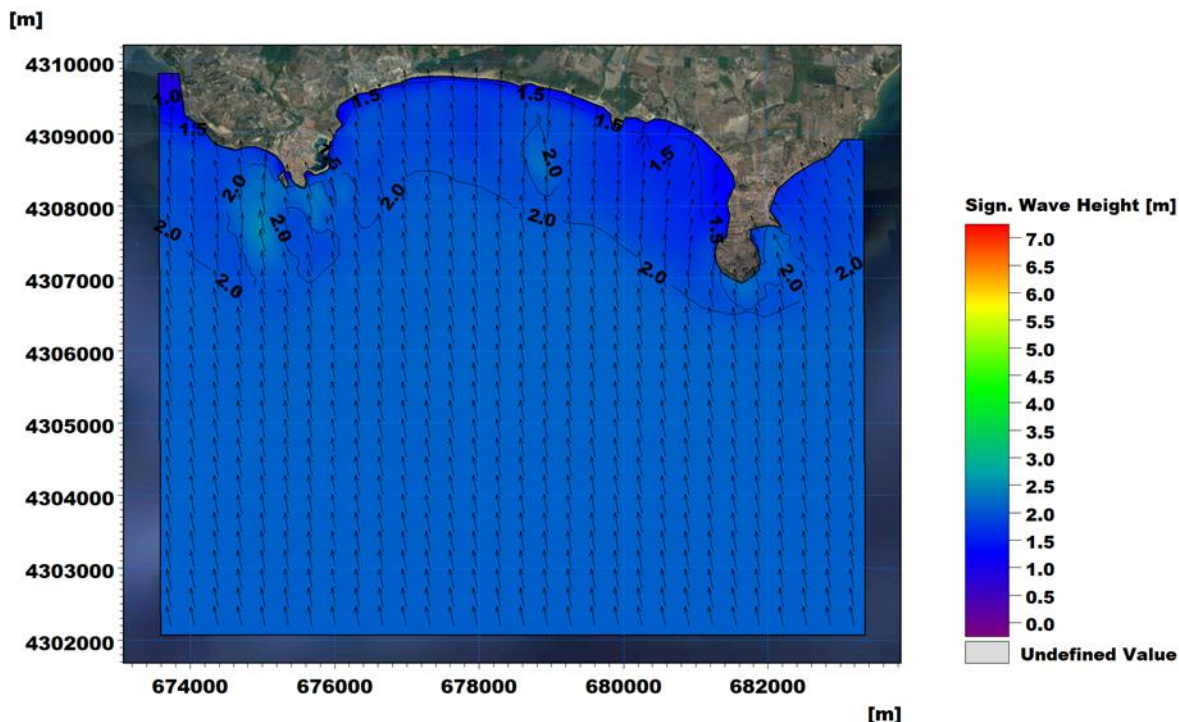


Figura 7-15 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni su base stagionale estiva, proveniente dal settore C

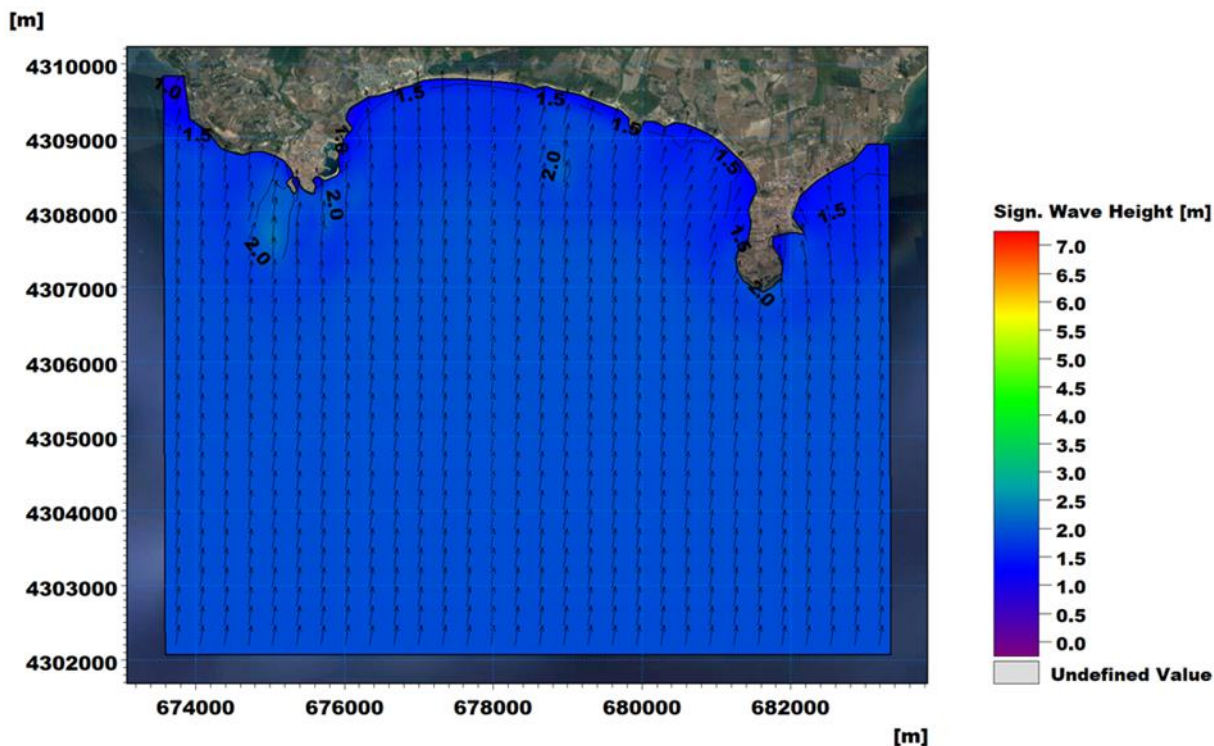


Figura 7-16 Distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni su base stagionale estiva, proveniente dal settore D

8 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO LOCALE ACCOPPIATO ONDA-CORRENTE

Il modello di dettaglio combinato onda-idrodinamica, implementato su un dominio più ridotto ma a maggior risoluzione, è stato implementato per riprodurre i cinque eventi estremi di onda ed i relativi innalzamenti locali di livello della superficie marina (*wave setup*).

Al modello d'onda MIKE 21 SW (Spectral Waves), già descritto in precedenza, è stato integrato il modulo idrodinamico MIKE 21 HD (Hydrodynamics), cuore del codice bidimensionale MIKE 21, che 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 dei 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 direzione e 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.

A seguire si riporta la descrizione dell'implementazione del modello integrato onda-idrodinamica, con le assunzioni adottate, le condizioni al contorno e i relativi risultati.

8.1 Dominio di calcolo, batimetria e condizioni al contorno

Il modello integrato è stato implementato su un dominio di calcolo limitato alla zona di interesse ed è esteso lungo costa per circa 1.0 km e verso il largo per circa 0.8 km.

In analogia con il modello d'onda a larga scala, descritto in precedenza, per la caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di studio si è fatto riferimento ai dati del rilievo di dettaglio a disposizione, integrato con le batimetriche della cartografia nautica digitale (rif par.4.3).

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.

RELAZIONE GENERALE

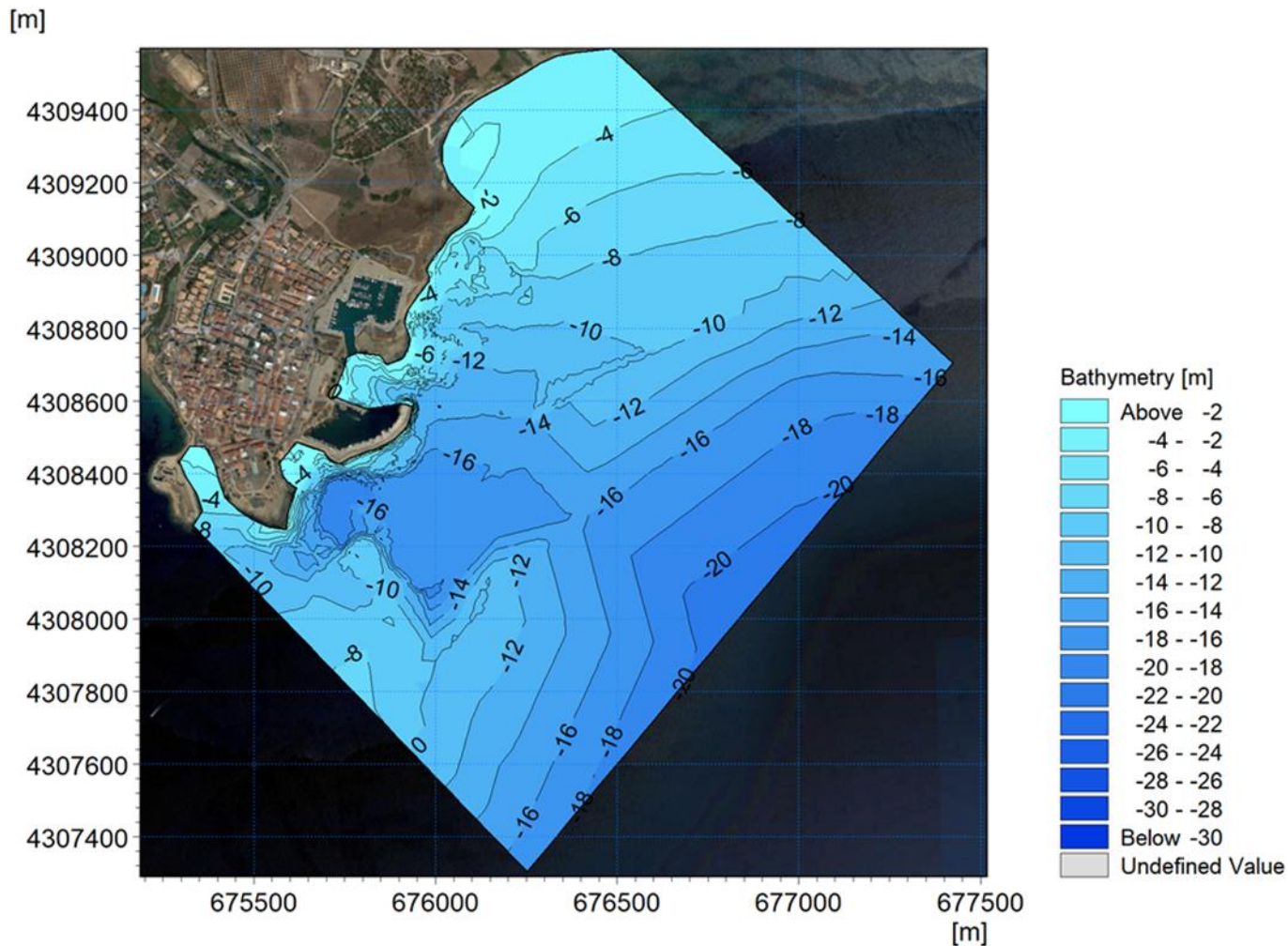


Figura 8-1 Batimetria del modello di dettaglio ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio richiesto per una caratterizzazione di moto ondoso e idrodinamica su profondità limitate e garantire 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 circa 50 m nella zona più al largo, a una zona a 5 m per la zona limitrofa al porto in esame.

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 8-2 è illustrata, a differente livello di dettaglio, la mesh di calcolo del modello, che complessivamente è costituita da circa 20'000 elementi.

RELAZIONE GENERALE

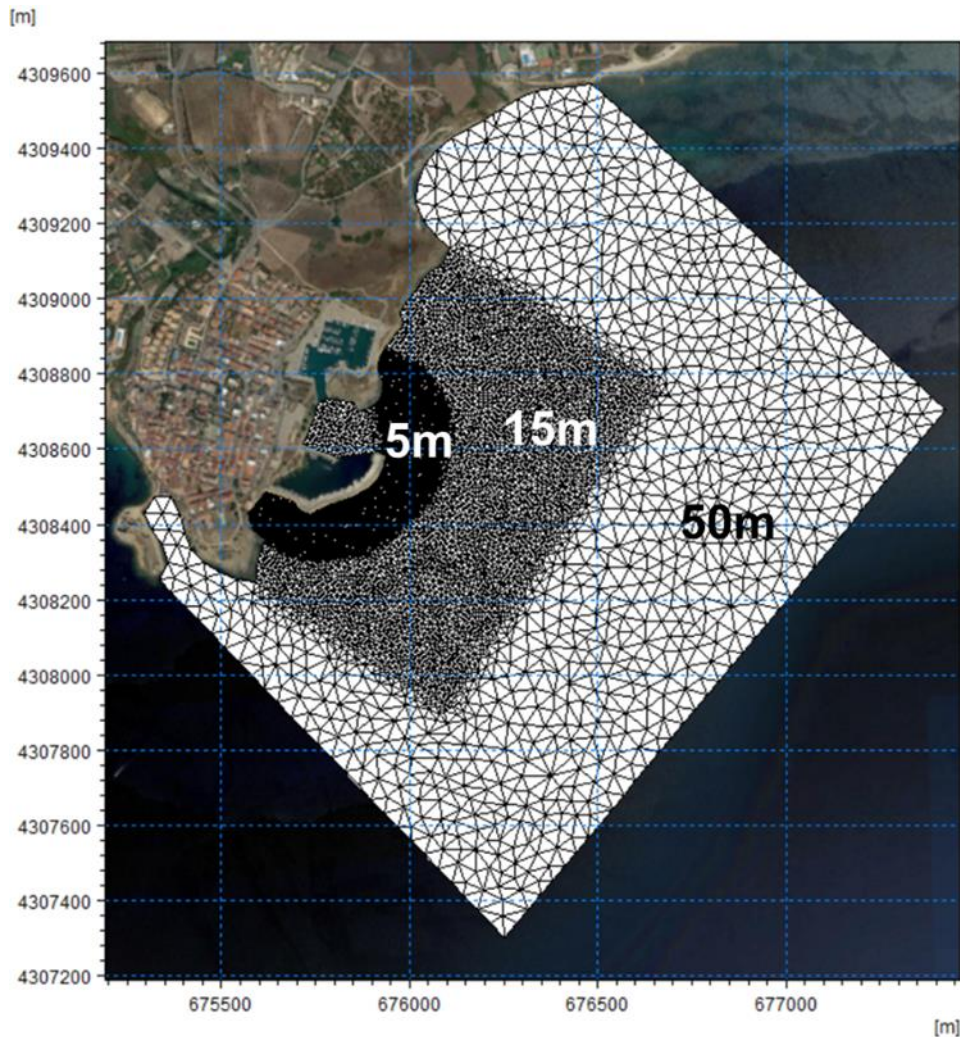


Figura 8-2 Risoluzione spaziale della mesh del modello di dettaglio

Come già anticipato, le condizioni al contorno delle simulazioni relative agli eventi estremi con tempo di ritorno 50 anni provenienti dai cinque settori direzionali considerati sono state estratte dai risultati del modello d'onda a più larga scala (sezione 7.4)

Sia il vento che il livello sono stati inseriti nel dominio di calcolo come ulteriori forzanti locali.

8.2 Risultati del modello locale accoppiato onda-corrente

Le simulazioni condotte hanno permesso di ottenere, per ciascuna condizione esaminata, i risultati delle principali grandezze di moto ondoso ed idrodinamiche in tutti i punti del dominio di calcolo, in particolare:

- distribuzione dell'altezza d'onda;
- distribuzione dei livelli superficiali, comprensivi di wave setup.

Come per il modello d'onda descritto in precedenza, nelle mappe di distribuzione dell'altezza d'onda

RELAZIONE GENERALE

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

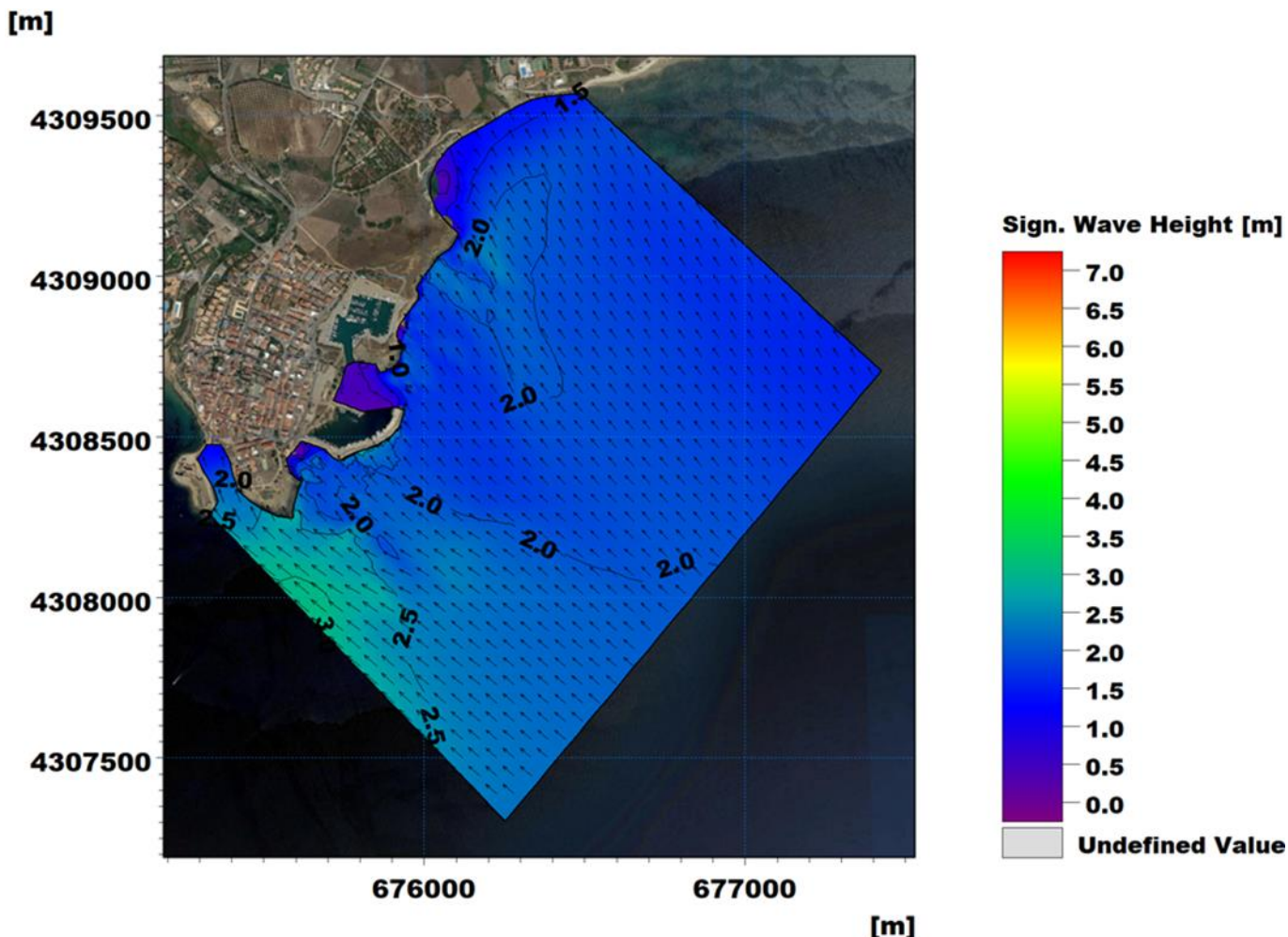


Figura 8-3 Modello di dettaglio: distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore A

Dalla distribuzione dell'altezza d'onda sul dominio di calcolo si evidenzia una zona a minor profondità nella zona antistante il castello che condiziona una regolare e graduale dissipazione nella zona a Sud-Ovest del dominio del modello.

Dalle mappe risulta inoltre evidente l'effetto di protezione offerto dal molo sopraflutto sulla zona dell'avamposto di Le Castella, anche se per una completa risoluzione delle differenti fenomenologie che si instaurano all'interno del bacino si rimanda alla sezione dedicata alla simulazione di agitazione interna (rif capitolo 9).

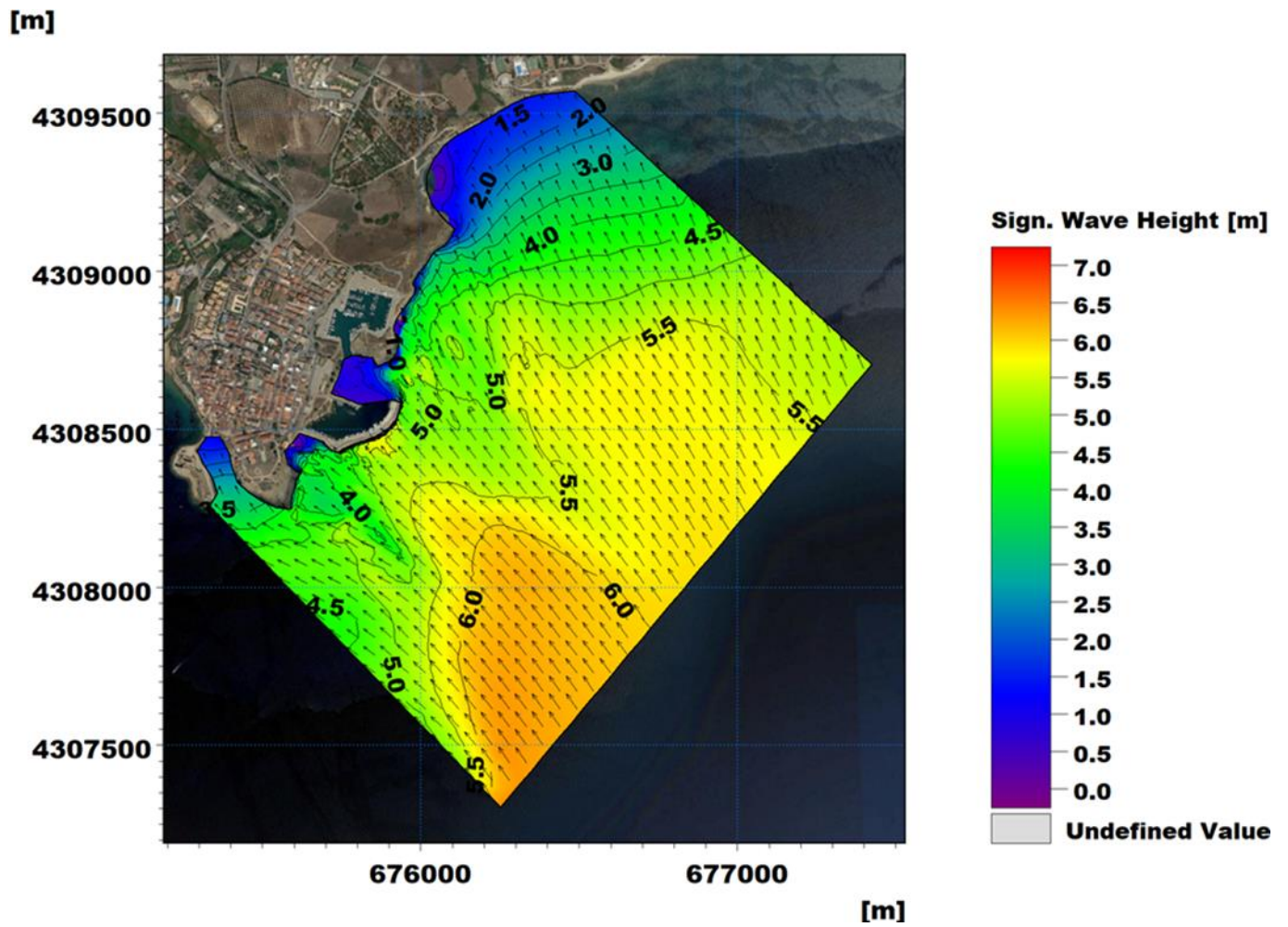


Figura 8-4 Modello di dettaglio: distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore B

RELAZIONE GENERALE

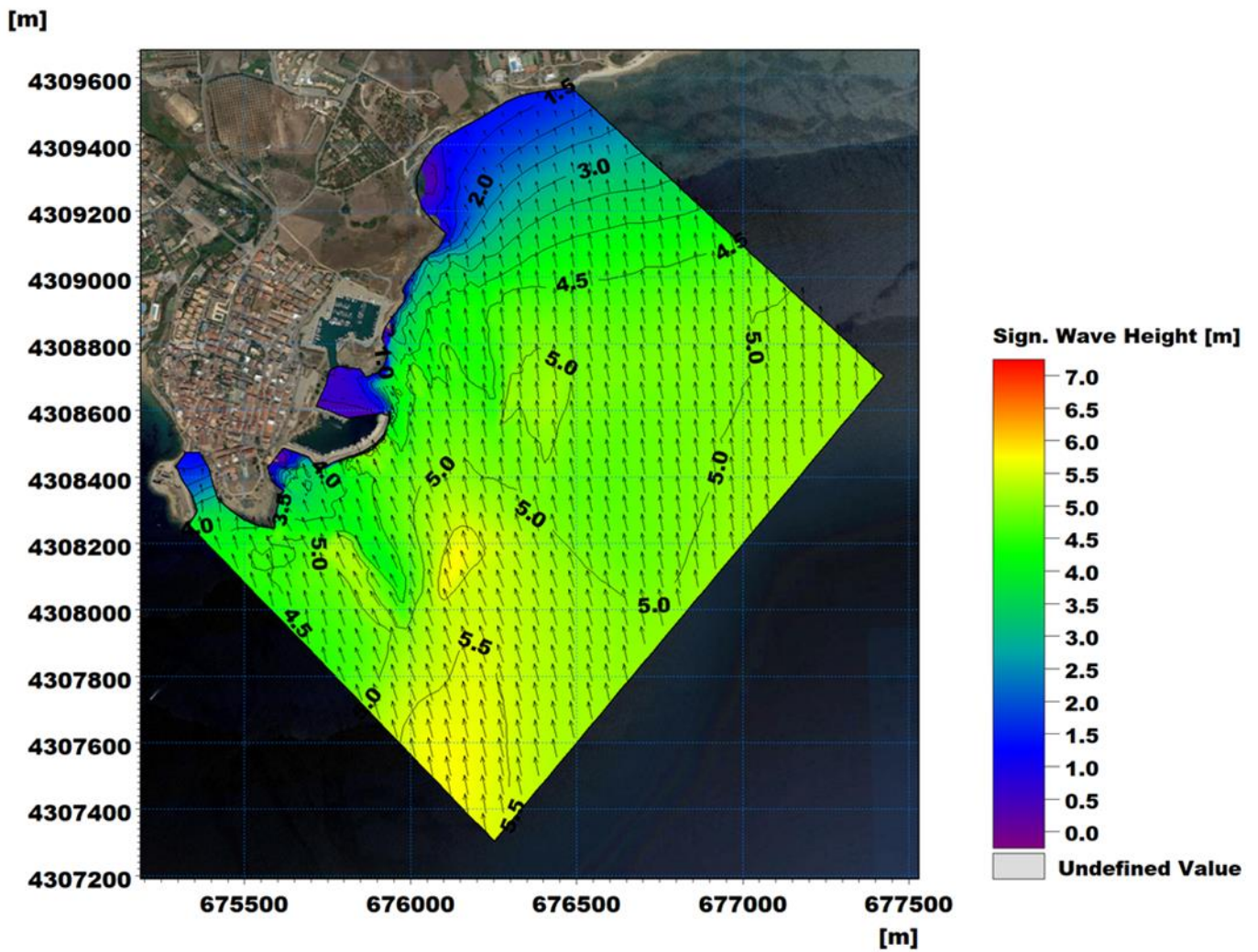


Figura 8-5 Modello di dettaglio: distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore C

RELAZIONE GENERALE

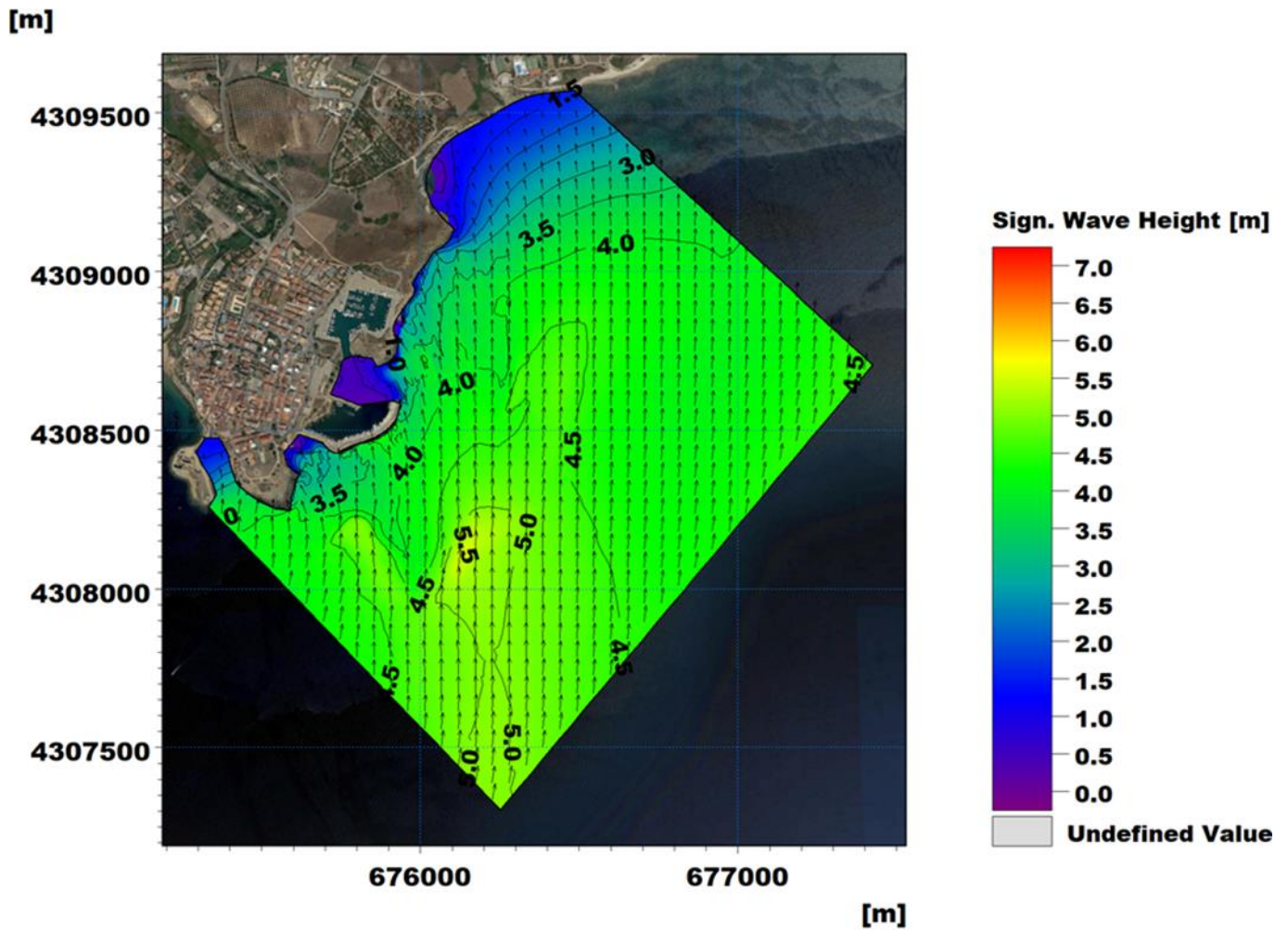


Figura 8-6 Modello di dettaglio: distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore D

RELAZIONE GENERALE

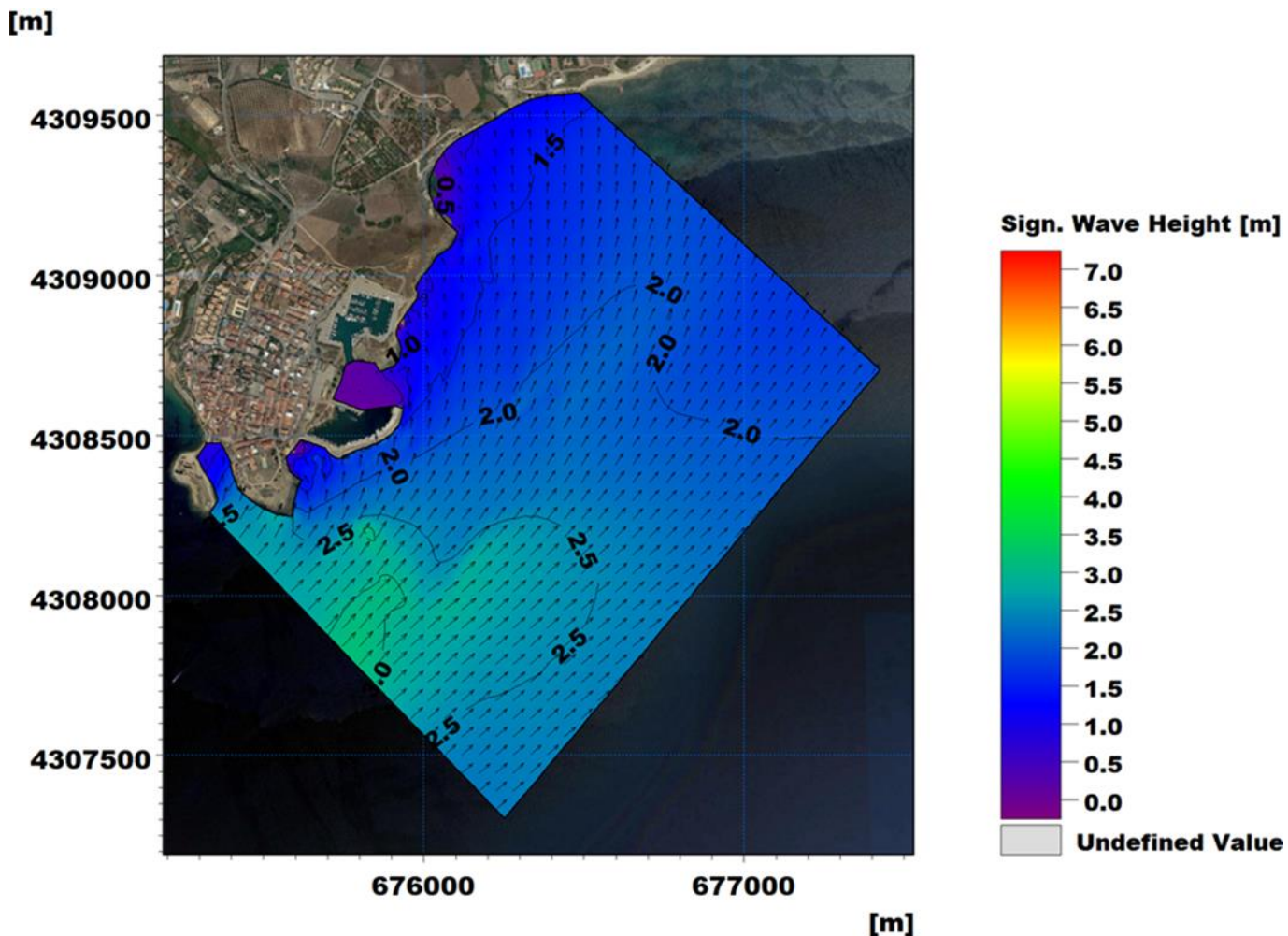


Figura 8-7 Modello di dettaglio: distribuzione dell'altezza d'onda significativa nel dominio di calcolo per l'evento estremo con associato tempo di ritorno pari a 50 anni, proveniente dal settore E

I risultati del modello locale sono stati quindi estratti, per tutte le condizioni d'onda simulate, in quattro punti, selezionati in accordo con il gruppo di lavoro, di cui tre ad una distanza di circa 40 m dal molo e uno nella zona centrale dell'imboccatura del porto, per l'utilizzo nella progettazione e verifica degli interventi in progetto.

In Figura 8-8 è riportata l'ubicazione esatta dei punti di estrazione selezionati, mentre in Tabella 8-1 sono restituiti i valori per i vari settori.

RELAZIONE GENERALE



Figura 8-8 Ubicazione dei punti di estrazione delle caratteristiche d’onda risultanti dalla simulazione degli eventi estremi utili alla progettazione degli interventi

Tabella 8-1 Valori di altezza d’onda significativa nei punti di estrazione sottocosta 1-2-3-4 risultanti dalla simulazione della propagazione largo-costa degli eventi estremi direzionali con assegnato periodo di ritorno pari a 50 anni

ESTRAZIONI SOTTOCOSTA – TR 50 ANNI				
Settore direzionale	PUNTO 1 Hs [m]	PUNTO 2 Hs [m]	PUNTO 3 Hs [m]	PUNTO 4 Hs [m]
A (100°N<MWD<130°N)	1.9	2.2	1.7	1.9
B (130°N<MWD<160°N)	4.2	5.7	4.9	5.0
C (160°N<MWD<190°N)	3.8	4.9	4.3	4.2
D (190°N<MWD<220°N)	3.3	4.0	3.5	3.4
E (220°N<MWD<250°N)	1.8	1.9	1.5	1.1

8.3 Definizione del livello marino di riferimento per la progettazione

Nell'immagine a seguire si riporta la distribuzione dei livelli marini nella zona di studio. I livelli risultanti tengono già in considerazione sia l'effettivo contributo dell'onda frangente (che, come si può osservare, è tanto maggiore quanto più il fondale si riduce), sia l'innalzamento del livello marino indotto dallo storm surge (marea astronomica + barometro inverso + wind setup) calcolato mediante analisi statistica dei dati del mareografo di Crotona (sezione 6.1.3).

Come si può osservare in Figura 8-9, il livello superficiale associabile a un evento combinato (storm surge e onda cinquantennali) è pari, nel tratto di molo posto a profondità più limitate, a circa 0.70 m.

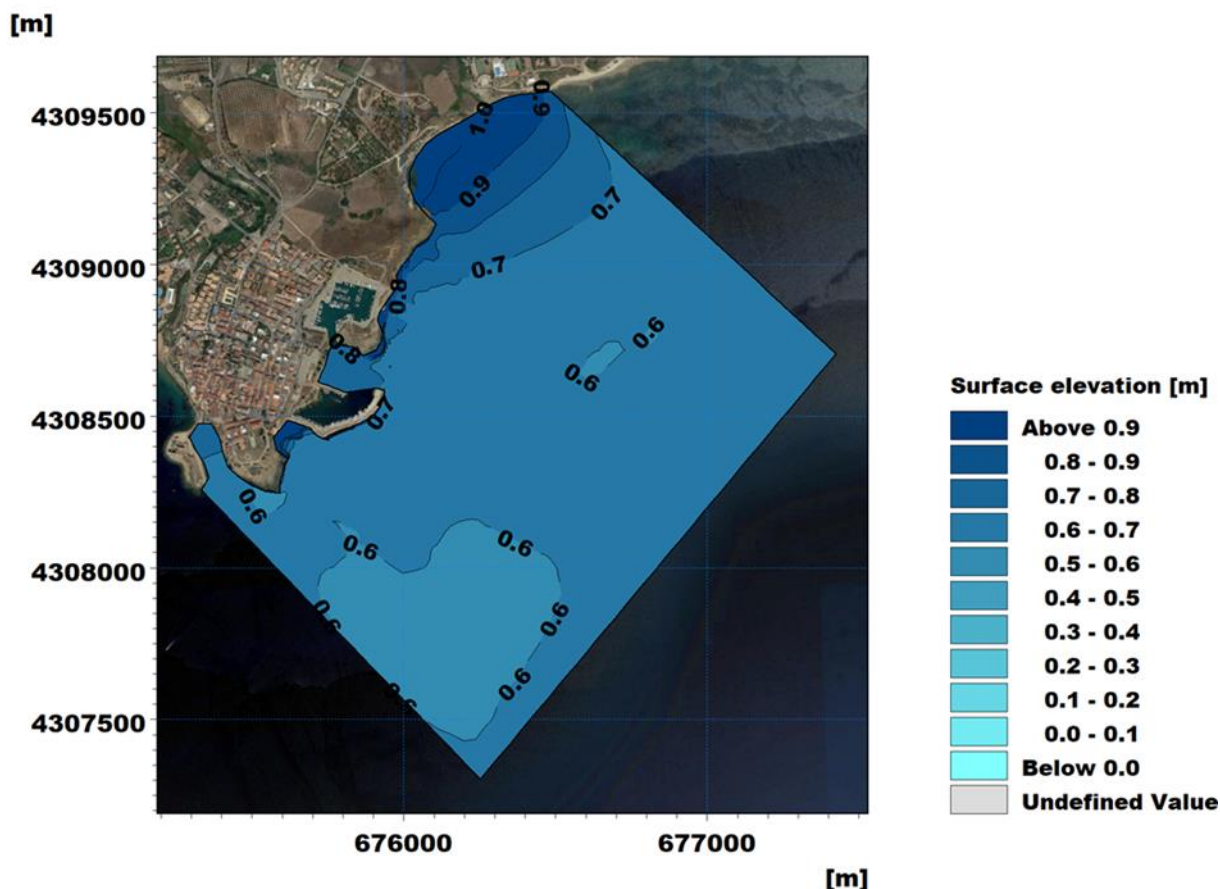


Figura 8-9 Settore direzione B: distribuzione dei livelli superficiali sul dominio di calcolo del modello di dettaglio come somma del contributo di storm surge e di wave setup (TR 50 anni)

9 AGITAZIONE ONDOSA RESIDUA INTERNA AL BACINO

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

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

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

MIKE 21 BW include sia la modalità bidimensionale sia quella monodimensionale, ed è basato sulla soluzione numerica nel dominio del tempo delle equazioni di Boussinesq attraverso uno schema implicito alle differenze finite. Le equazioni includono i termini non lineari e la dispersione in frequenza che 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.

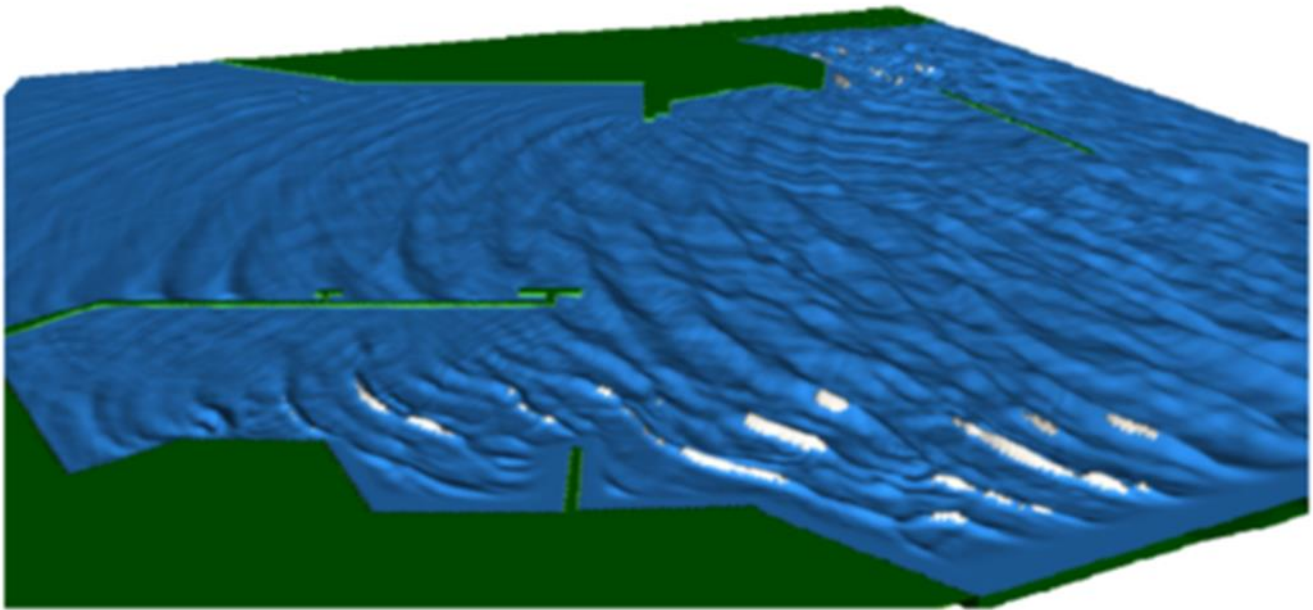


Figura 9-1 Esempio di distribuzione dei livelli superficiali (creste e cavi d'onda) calcolata con il modulo MIKE 21 BW

9.1 Estensione del modello e batimetria

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

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, si è fatto riferimento ai rilievi di dettaglio realizzati nell'Agosto 2019, integrati con il database di carte nautiche digitalizzate CM-93 di C-MAP.

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

In particolare, sono state realizzate due griglie di calcolo, una per la verifica della configurazione attuale e una per la configurazione di progetto. Per una adeguata simulazione dell'ampio settore di provenienza delle onde, entrambe le griglie di calcolo, che si differenziano solo nella geometria del layout portuale, sono state ruotate in senso antiorario di 20° rispetto al Nord e risultano composte complessivamente da 1'200 x 800 (960'000) celle per una superficie totale pari a poco meno di 4 Km².

In Figura 9-2 sono rappresentati il layout portuale e il contorno della griglia di calcolo.

RELAZIONE GENERALE

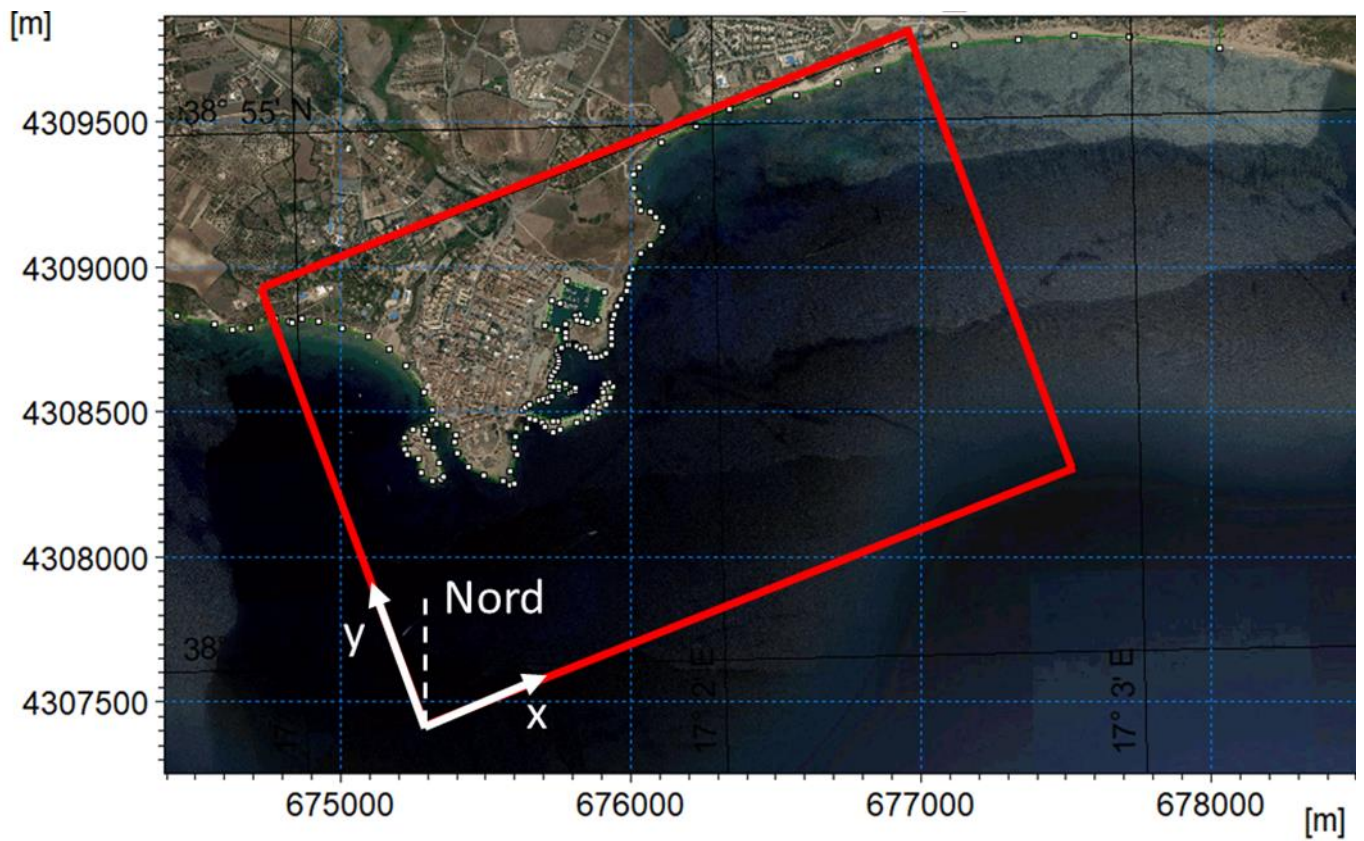


Figura 9-2 Contorno della griglia di calcolo (in colore rosso) utilizzata per la modellazione dell'agitazione ondosa interna al bacino portuale.

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

Relativamente alle aree emerse ed alle strutture, è stato imposto un valore di quota costante, pari a 10 metri, ipotizzando l'impossibilità di sormonto da parte delle acque. Le due batimetrie così costruite, attuale e di progetto, sono riportate rispettivamente nelle immagini di Figura 9-3 e Figura 9-4.

RELAZIONE GENERALE

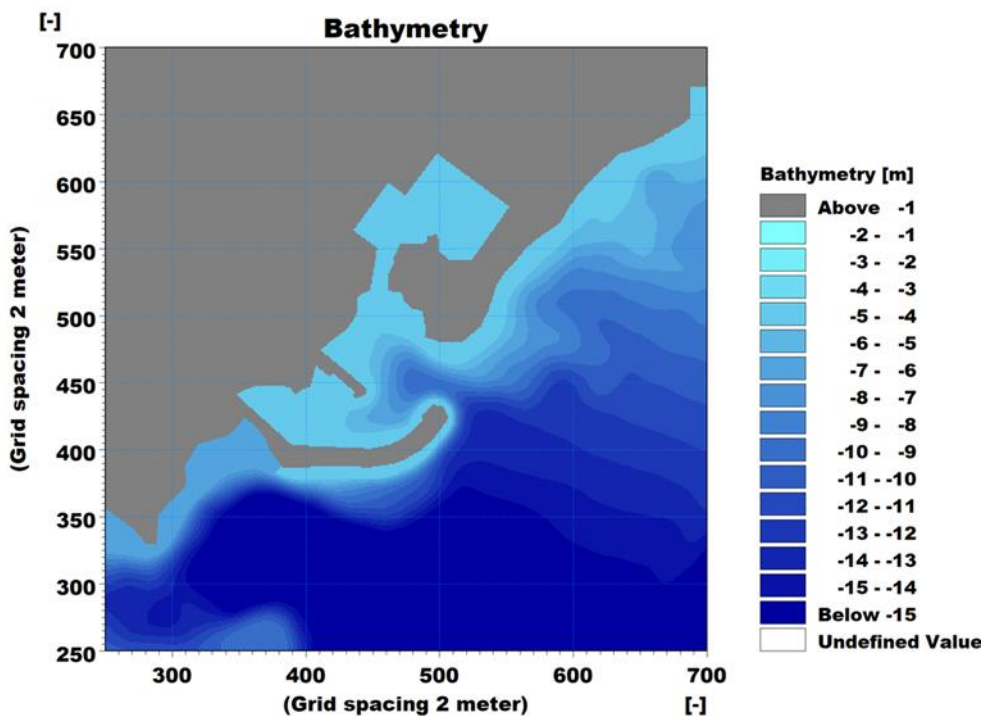


Figura 9-3 Dettaglio sulla zona portuale della batimetria di calcolo relativa allo stato attuale

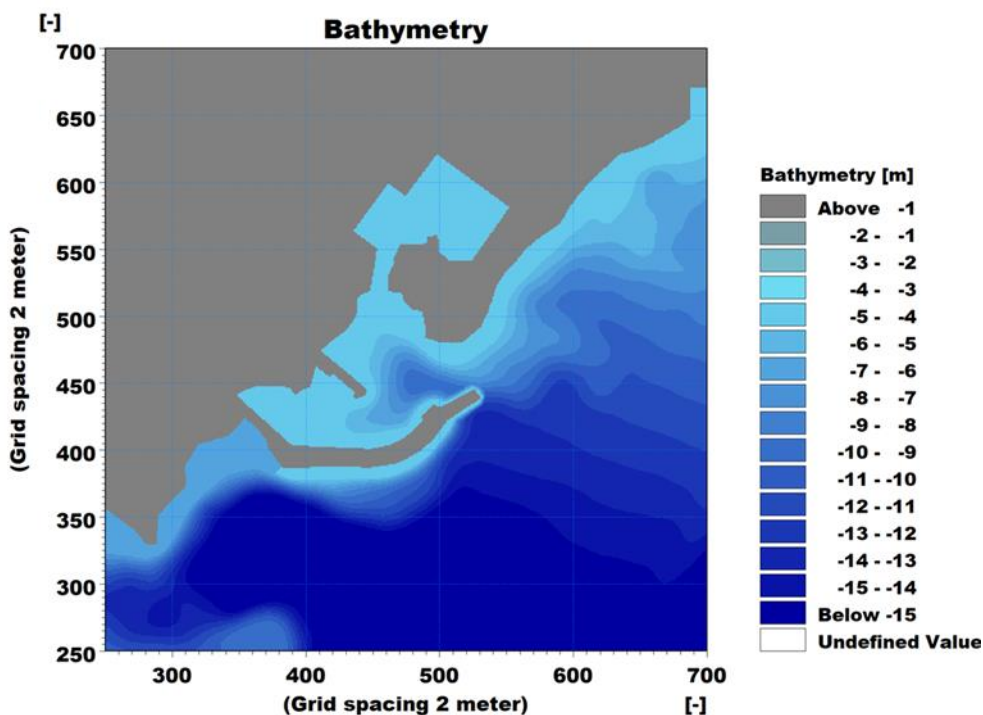


Figura 9-4 Dettaglio sulla zona portuale della batimetria di calcolo relativa allo stato di progetto

9.2 Strato assorbente (*sponge layer*)

Il modulo MIKE 21 BW funziona concettualmente come se fosse 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 quattro contorni chiusi, in corrispondenza di essi vengono introdotti appositi strati assorbenti, definiti *sponge layers*, al fine di inibire il fenomeno di riflessione fittizia che verrebbe a crearsi in corrispondenza dei bordi del dominio.

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

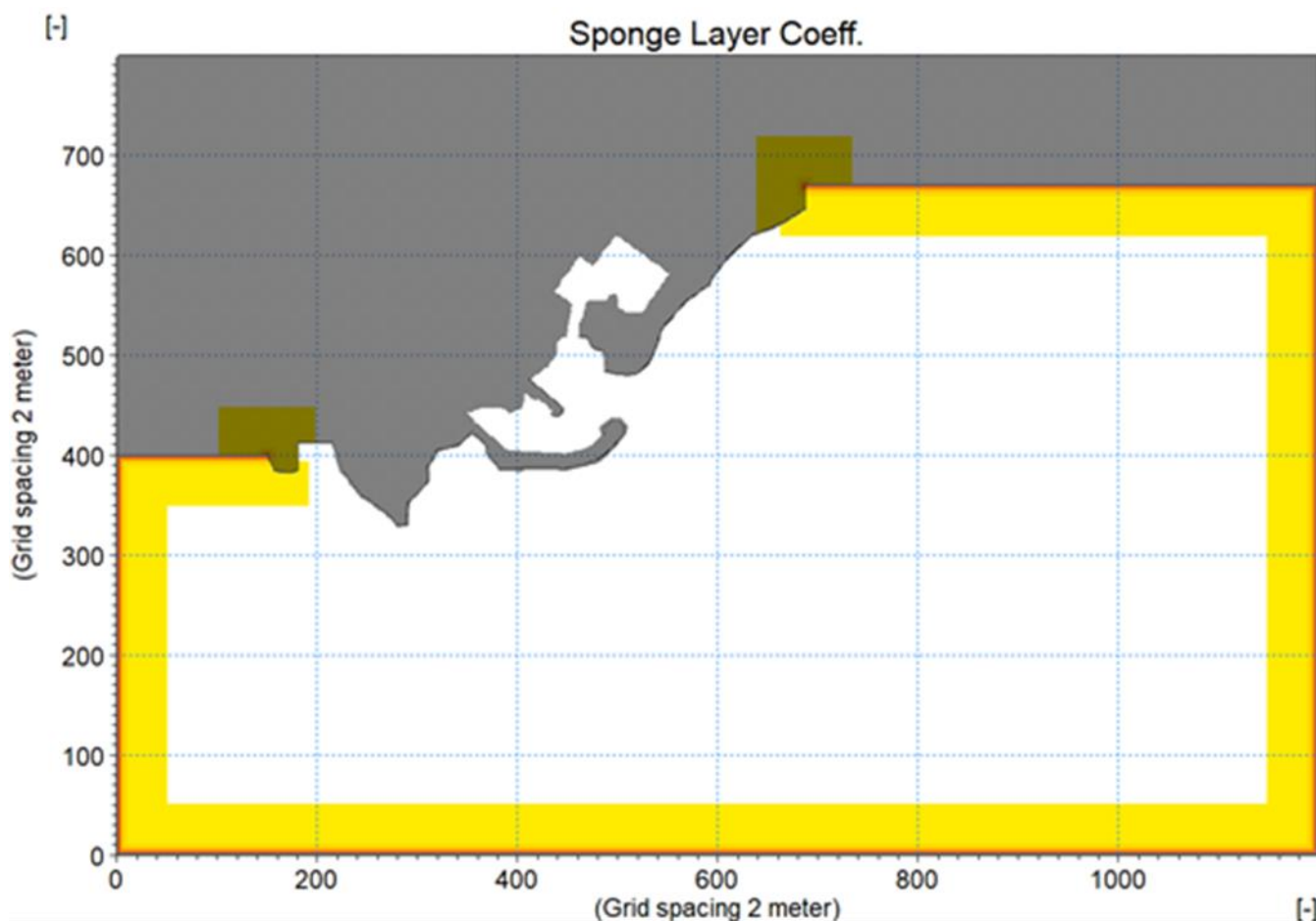


Figura 9-5 Localizzazione dello strato assorbente (tonalità di giallo e rosso) in riferimento alla griglia di calcolo del layout attuale

9.3 Linee di generazione del moto ondoso

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.

Per ognuna delle due griglie di calcolo è stata individuata una linea di generazione, posizionata in modo da favorire la propagazione delle onde all'interno del dominio e del bacino portuale.

In Figura 9-6 è illustrata la posizione della linea di generazione relativa alle simulazioni sul porto di Le Castella.

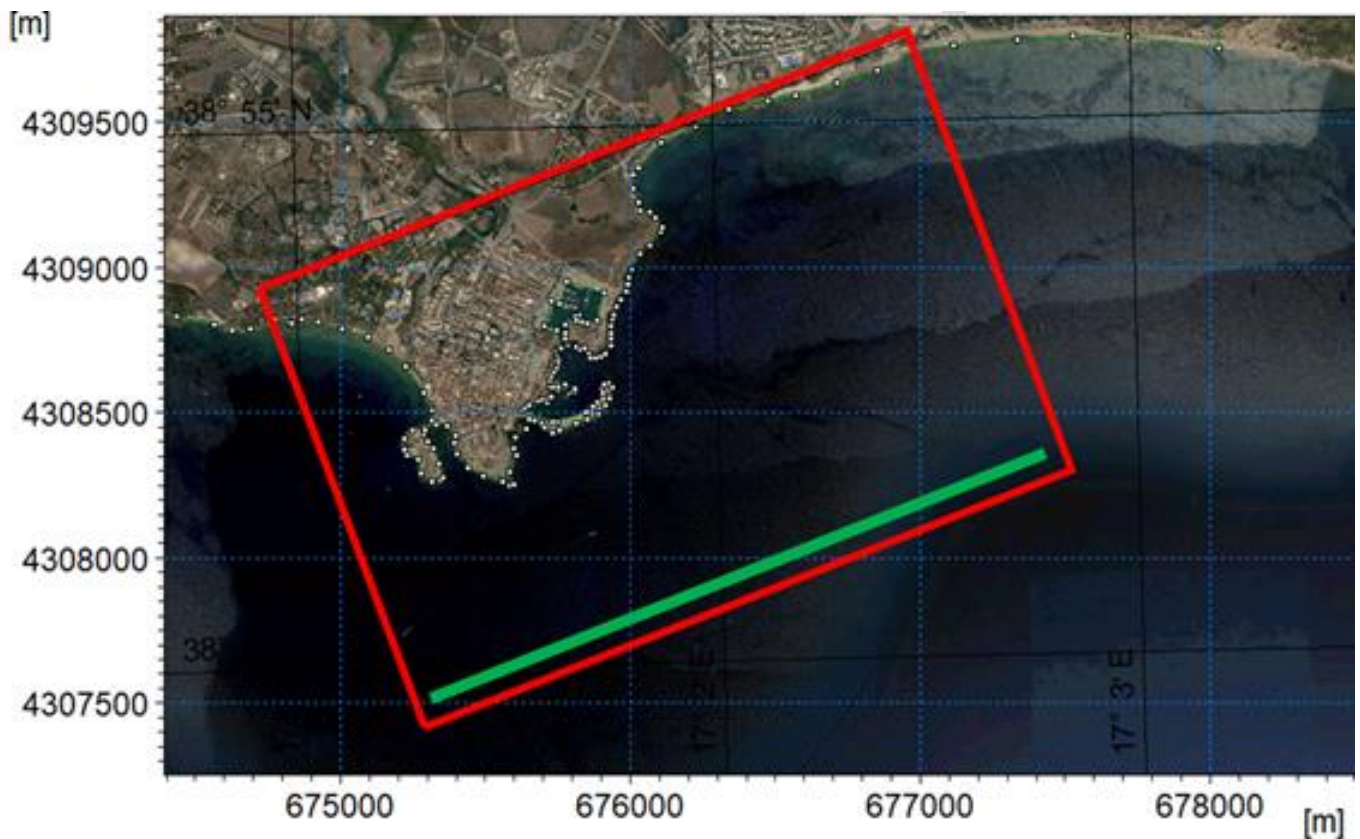


Figura 9-6 Localizzazione della linea di generazione (in verde) relativa alla griglia di calcolo dello stato attuale (in rosso)

9.4 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

RELAZIONE GENERALE

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, una gamma di coefficiente di riflessione.

Nel caso specifico, tali coefficienti sono stati definiti in funzione delle caratteristiche strutturali del layout portuale. In Figura 9-7 è illustrata la suddivisione del layout portuale nelle varie tipologie strutturali mentre in Tabella 9-1 è riportata la descrizione della gamma di valori del coefficiente di riflessione assegnati per ogni tipologia di struttura.



Figura 9-7 Illustrazione della tipologia degli arredi interni al bacino portuale di Le Castella

Tabella 9-1 Tipologia di struttura ed intervallo di valori per il coefficiente di riflessione

Tipologia di struttura	Coefficiente di riflessione
Scogliera in massi naturali	0.3-0.5
Parete verticale piana	0.95
Celle antiriflettenti	0.6-0.7

9.5 Scelta delle onde di riferimento per lo studio

L'obiettivo del modello di agitazione ondosa portuale è di ricavare la distribuzione dell'altezza d'onda interna al bacino per varie combinazioni di altezza, periodo e direzione d'onda in ingresso al porto. Tale obiettivo si raggiunge attraverso il calcolo del cosiddetto "coefficiente di disturbo". Il coefficiente di disturbo è definito, in ciascun punto interno al porto, come il rapporto tra l'altezza d'onda nel punto e quella al di fuori del porto (al contorno aperto del modello):

$$C_{Dist} = H_{s,in} / H_{s,out}$$

Di conseguenza, moltiplicando i valori del coefficiente di disturbo per le altezze d'onda in ingresso al porto si potrà ottenere il valore dell'agitazione ondosa residua in un qualunque punto interno 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 da simulare con il modello di agitazione è stata effettuata in riferimento ai soli settori direzionali che, sulla base dell'analisi del clima ondoso al largo e della geometria del porto, possano determinare un effetto di disturbo non trascurabile all'interno del bacino.

Il porto di Le Castella risulta esposto ad un settore di traversia piuttosto ampio, da Nord-Est fino a Sud-Ovest. Nel processo di selezione è stato applicato un filtro iniziale sulle direzioni, che ha permesso di effettuare una prima scrematura eliminando tutte le onde aventi direzioni tali da non penetrare all'interno del bacino portuale. Nello specifico, sono state selezionate solo le onde provenienti dal settore direzionale compreso tra 120°N e 200°N della serie estratta sottocosta nella propagazione di lungo periodo da largo verso riva (sezione 7.3), discretizzato a settori di 20°, escludendo le onde per le quali il bacino portuale risulta protetto dal molo di sopraflutto.

La definizione delle onde di riferimento per le simulazioni è stata condotta nell'ottica di analizzare il comportamento del layout portuale in termini di agitazione interna rispetto a diverse condizioni selezionate prendendo a riferimento le indicazioni presenti nel documento "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC Associazione Internazionale di Navigazione (Sezione Italiana)", Febbraio 2002. In particolare, sono state selezionate le seguenti condizioni:

- onda ordinaria con frequenza di accadimento pari a 1 o 2 giorni all'anno (condizione "comfort");
- onda con periodo di ritorno pari a 5 anni (condizione "di sicurezza");
- onda con periodo di ritorno pari a 50 anni (condizione "limite").

L'analisi della condizione di "comfort" è stata condotta selezionando 7 onde a partire dal clima ondoso ordinario sottocosta (Figura 7-6), una o due per ogni settore direzionale di 20° individuato. Per la definizione della direzione media di propagazione si è fatto riferimento alla direzione centrale del settore mentre per il periodo di picco T_p è stata ricavata una relazione empirica costruita sulla base degli eventi di ciascun settore.

In Tabella 9-2 sono illustrate le caratteristiche delle onde selezionate per le successive simulazioni della condizione di "comfort".

RELAZIONE GENERALE

Tabella 9-2 Onde di riferimento per la verifica delle condizioni di comfort

ONDA	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
1	1.25	7.3	130°
2	1.75	7.9	150°
3	2.50	8.7	150°
4	1.75	7.4	170°
5	2.50	8.2	170°
6	1.50	6.6	190°
7	2.25	7.6	190°

L'analisi della condizione "limite" e della condizione "di sicurezza" è stata condotta in riferimento all'analisi statistica degli eventi estremi. Nelle due tabelle a seguire sono illustrate le caratteristiche delle onde estratte a 500 m dall'imboccatura del porto (Figura 7-6) dai risultati delle simulazioni delle mareggiate critiche con associato tempo di ritorno pari a 5 e 50 anni (sezione 7.4), rispettivamente per verificare le condizioni "di sicurezza" e per quella "limite". Anche per questi eventi la direzione media di propagazione è stata assunta pari alla direzione centrale del settore mentre per il periodo di picco Tp si è fatto riferimento alla relazione empirica costruita sulla base degli eventi di ciascun settore.

Tabella 9-3 Onde di riferimento per la verifica delle condizioni di sicurezza (TR = 5 anni)

ONDA	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
8	1.72	8.40	130°
9	4.84	10.8	150°
10	4.16	9.9	170°
11	3.55	9.1	190°

Tabella 9-4 Onde di riferimento per la verifica delle condizioni limite (TR = 50 anni)

ONDA	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
12	2.07	8.7	130°
13	5.85	11.4	150°
14	5.07	10.4	170°
15	4.60	10.1	190°

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 adottato uno spettro di tipo JONSWAP.

9.6 Risultati del modello di agitazione ondosa - stato attuale

La presente sezione illustra i risultati del modello di agitazione ondosa in riferimento ai criteri suggeriti nelle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, AIPCN-PIANC".

In particolare, il PIANC raccomanda i seguenti limiti di altezza d'onda significativa all'interno del porto relativamente alla condizione di "comfort", particolarmente importante nel caso di bacini in cui si preveda la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni: Hs = 0.15 m per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiori a 5 giorni all'anno.

Per la verifica delle condizioni di comfort, le altezze d'onda interne al bacino sono state ricavate dai risultati delle simulazioni utilizzando il coefficiente di disturbo. Tale parametro, adimensionale, come già ricordato è definito per ogni punto come il rapporto tra l'altezza d'onda locale e l'altezza d'onda in ingresso al porto. Tale parametro rappresenta il principale indicatore dell'agitazione interna conseguente a tutte le trasformazioni complessivamente subite dall'onda dal largo verso l'interno del porto e può essere ragionevolmente assunto costante, per ogni settore direzionale, all'interno di un intervallo di valori di altezza d'onda 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. Tale approccio ha consentito di verificare la rispondenza del layout progettuale alle condizioni di "comfort".

L'assunzione di invariabilità dei coefficienti di disturbo con l'altezza d'onda non risulta più valida in corrispondenza delle più alte onde risultanti dall'analisi degli eventi estremi, in riferimento alle quali è stato necessario condurre ulteriori simulazioni, i cui risultati sono presentati in seguito al fine di verificare il rispetto delle condizioni "di sicurezza" e "limite".

Sulla base dei risultati delle simulazioni, la verifica rispetto alle condizioni di comfort è stata condotta in riferimento a diverse aree, individuate sulla base di posizione, esposizione, tipologia di arredo ed in corrispondenza delle quali sono state fornite indicazioni specifiche del livello di agitazione ondosa.

Nelle immagini a seguire sono illustrate le aree individuate in riferimento al layout definitivo.

RELAZIONE GENERALE



Figura 9-8 Individuazione delle aree adottate per la verifica delle condizioni di comfort

L'analisi combinata dei coefficienti di disturbo associati alle diverse condizioni d'onda simulate e delle loro frequenze di accadimento (di cui alla sezione 7.3) ha permesso di calcolare, per ogni area di riferimento, il numero di giorni medio annuo per il quale è previsto il superamento del valore soglia prefissato, pari a 0.15 m.

Nelle immagini a seguire viene riportata la distribuzione del coefficiente di disturbo per ognuna delle sette onde selezionate per la verifica delle condizioni di comfort (Tabella 9-2).

RELAZIONE GENERALE

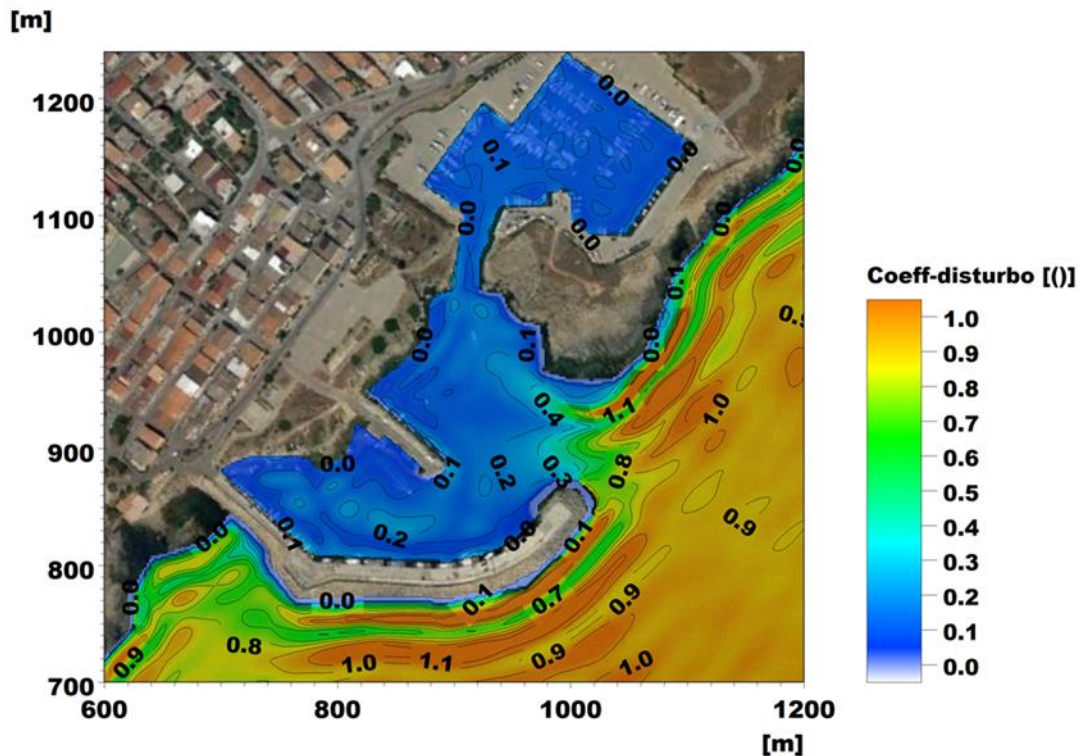


Figura 9-9 Stato attuale: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 1

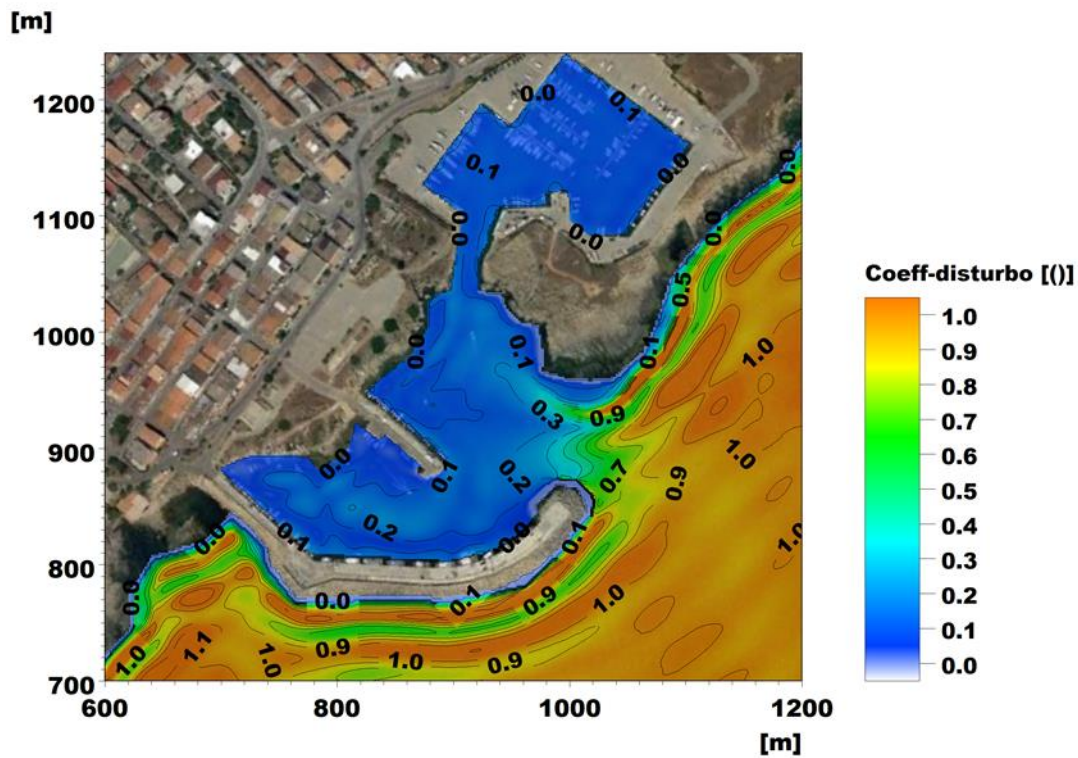


Figura 9-10 Stato attuale: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 2

RELAZIONE GENERALE

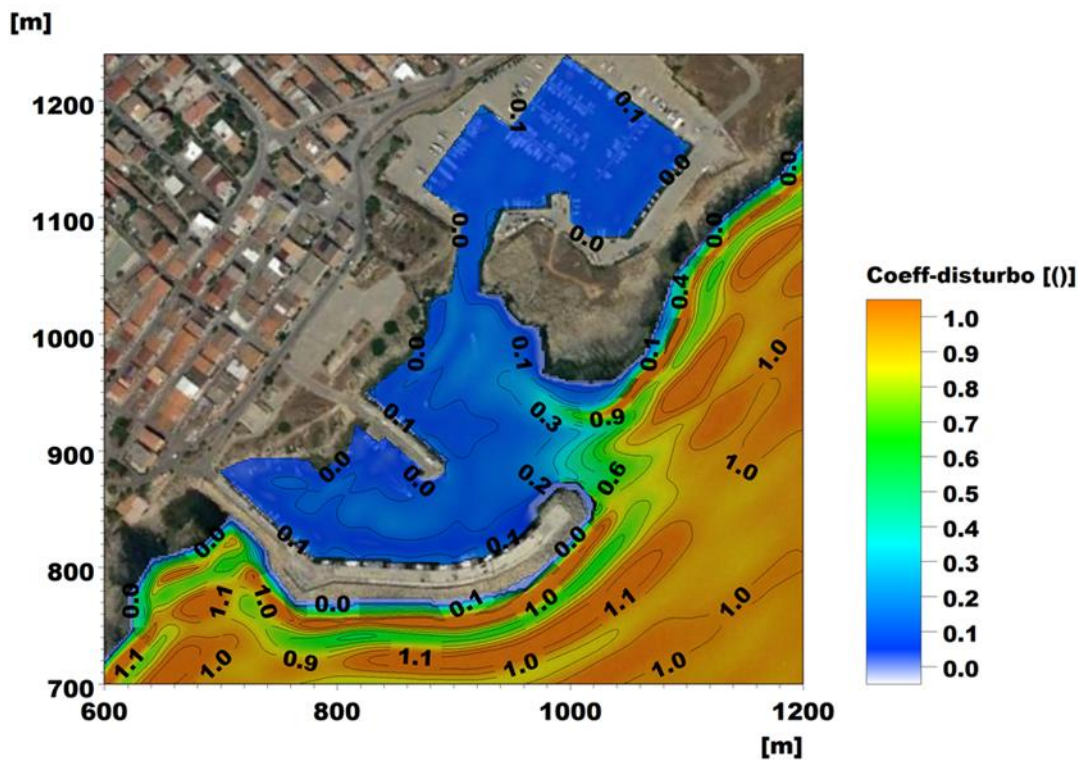


Figura 9-11 Stato attuale: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 3

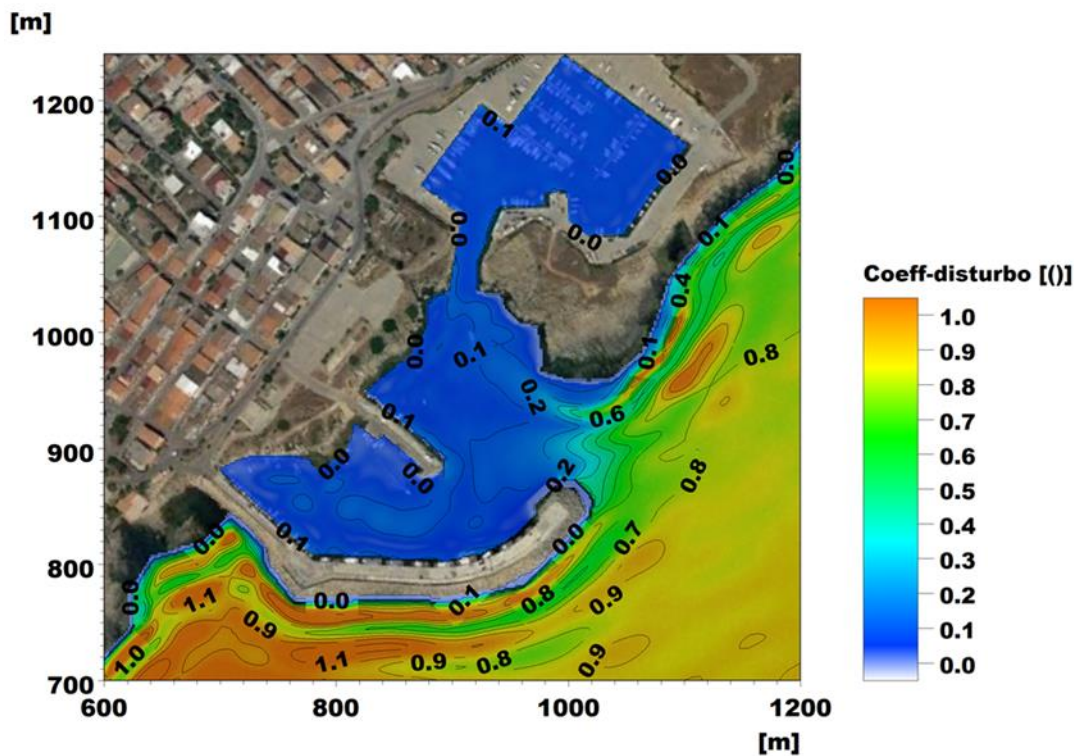


Figura 9-12 Stato attuale: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 4

RELAZIONE GENERALE

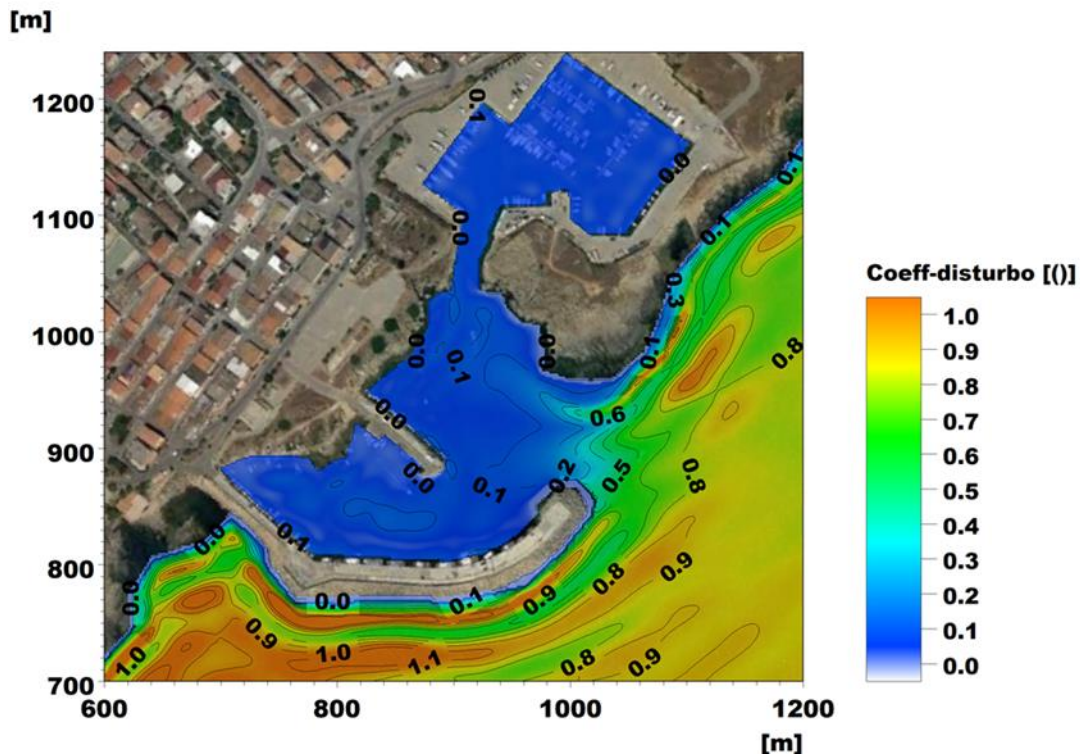


Figura 9-13 Stato attuale: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 5

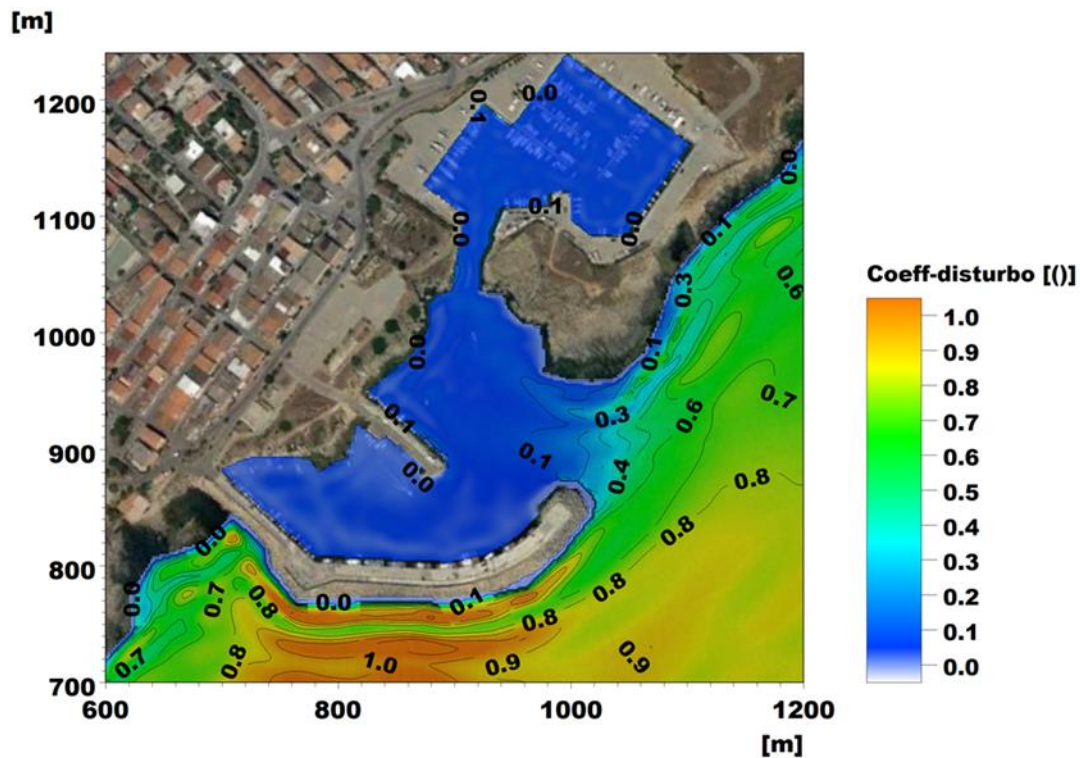


Figura 9-14 Stato attuale: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 6

RELAZIONE GENERALE

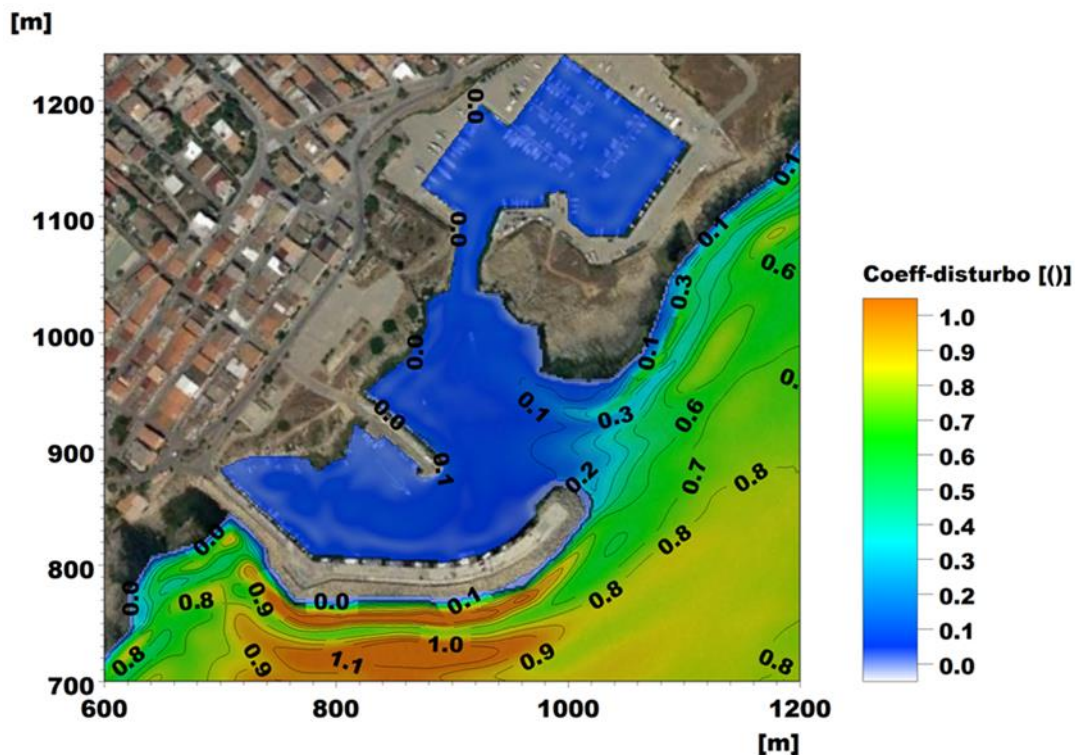


Figura 9-15 Stato attuale: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 7

La

Tabella 9-5 presenta, per ciascuna area di riferimento individuata, il numero totale di giorni per cui risulta superato il valore soglia indicato dal PIANC.

Tabella 9-5 Numero di giorni all'anno di superamento del valore soglia di 0.15 m. In rosso le condizioni non verificate

Zona di riferimento	Numero giorni di superamento [gg]				TOTALE
	Settore 120°-140°	Settore 140°-160°	Settore 160°-180°	Settore 180°-200°	
Area 1	0.5	3.0	1.8	0.0	circa 5
Area 2	2.1	13.4	7.4	0.7	oltre 20
Area 3	2.0	12.5	4.6	0.0	tra 15 e 20
Area 4	2.5	13.4	11.4	0.7	quasi 30

La condizione di comfort per lo stato attuale risulta verificata solo nell'area 1, quella più interna al porto di Le Castella.

RELAZIONE GENERALE

L'analisi delle condizioni di sicurezza è stata condotta in relazione alle onde con periodo di ritorno pari a 5 anni illustrate in Tabella 9-3, eventi per i quali il PIANC raccomanda una altezza d'onda residua all'interno del porto non superiore a 0.30 m.

Anche in questo caso l'Area 1, più protetta rispetto alle altre, risulta quasi sempre al di sotto del valore soglia indicato, ad eccezione della condizione d'onda 9, proveniente da 150°N, che per intensità d'evento e direzione risulta la più critica tra quelle selezionate.

Sempre al di sopra del valore di riferimento del PIANC risulta invece l'Area 2, antistante l'imboccatura del porto che, nell'attuale configurazione del bacino, risulta poco protetta dagli eventi più intensi.

Le Aree 3 e 4 sono parzialmente verificate per le condizioni d'onda 8 e 11, mentre si osservano valori di Hs superiori a 0.30 m per le condizioni 9 e 10, provenienti rispettivamente da 150°N e 170°N.

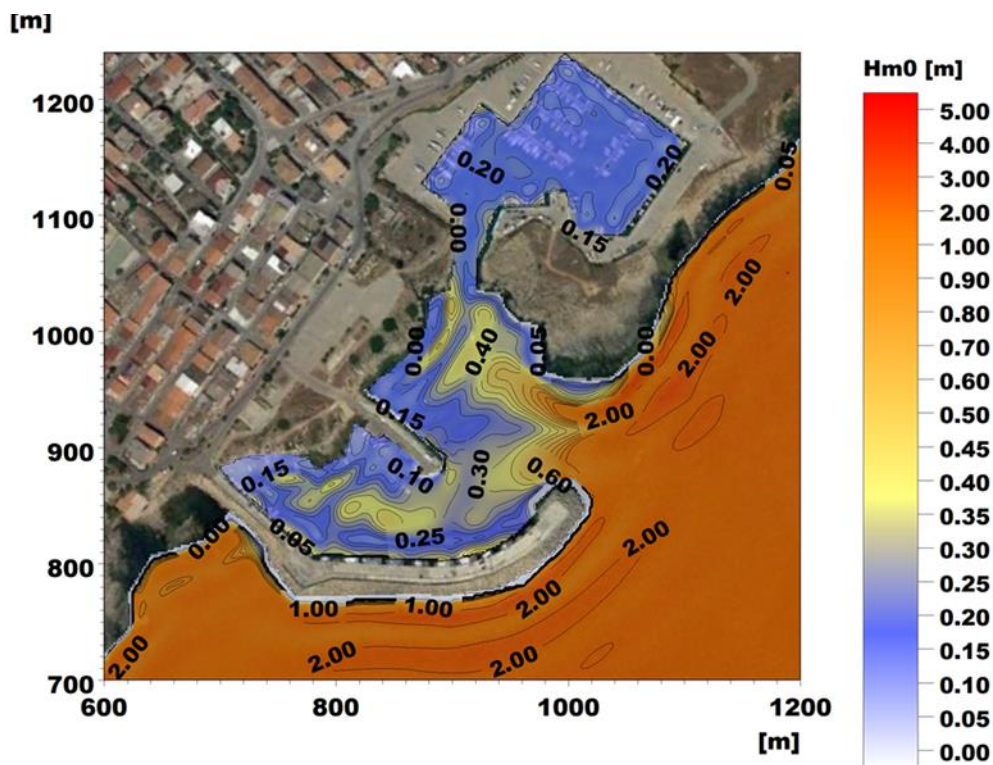


Figura 9-16 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 8 per la verifica della condizione di sicurezza

RELAZIONE GENERALE

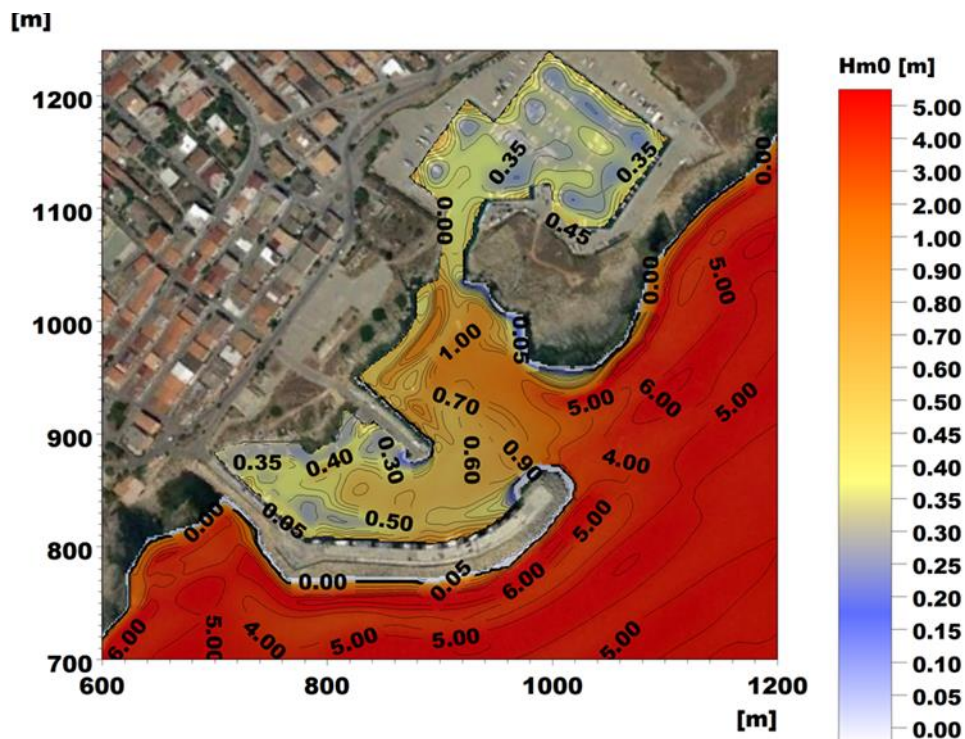


Figura 9-17 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 9 per la verifica della condizione di sicurezza

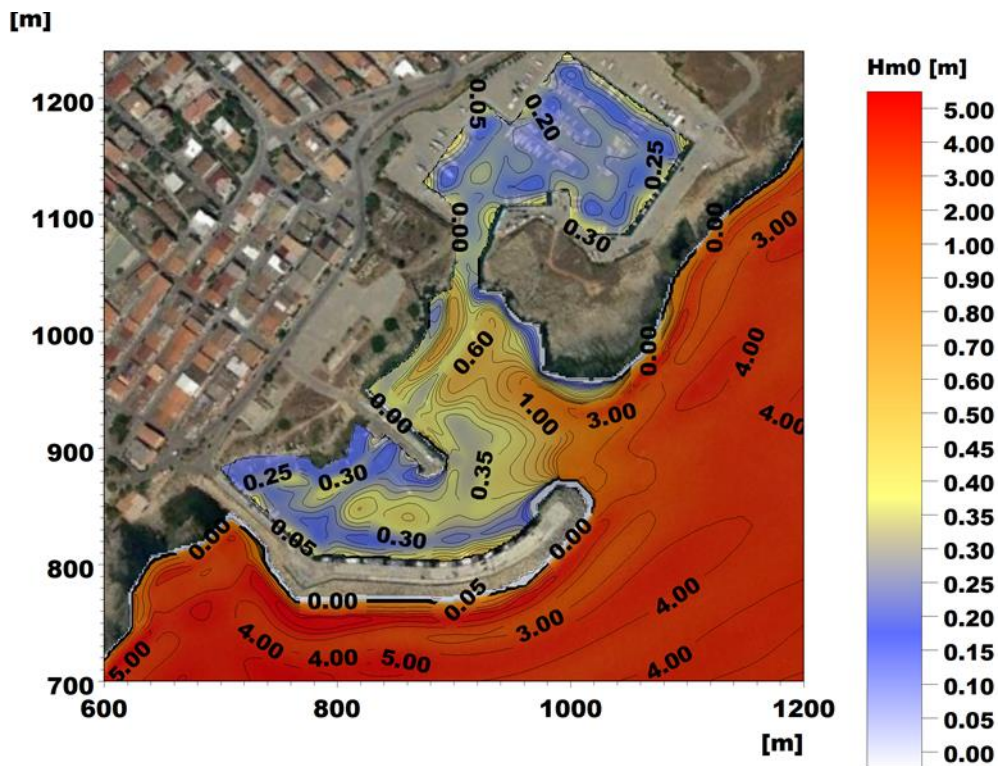


Figura 9-18 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 10 per la verifica della condizione di sicurezza

RELAZIONE GENERALE

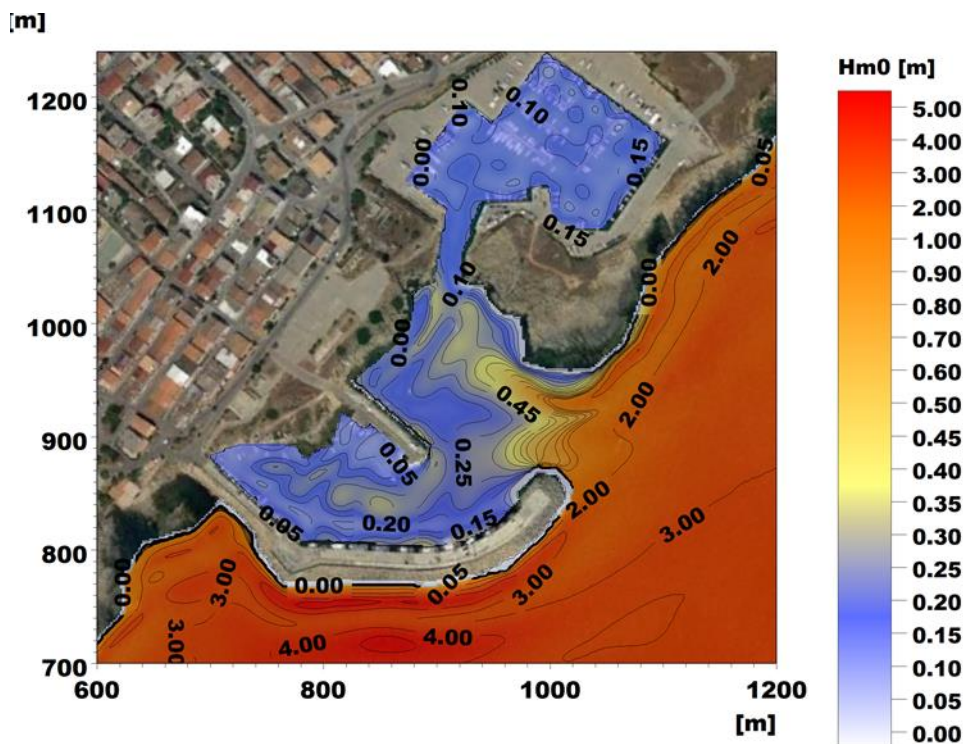


Figura 9-19 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 11 per la verifica della condizione di sicurezza

Tabella 9-6 Verifica delle condizioni di sicurezza per lo stato attuale. In rosso le condizioni non verificate

Zona di riferimento	Valori massimi di Hs			
	Settore 120°-140°	Settore 140°-160°	Settore 160°-180°	Settore 180°-200°
	Onda 8	Onda 9	Onda 10	Onda 11
Area 1	0.20	0.35	0.28	0.15
Area 2	0.40	0.80	0.50	0.25
Area 3	0.35	0.40	0.35	0.25
Area 4	0.40	0.60	0.40	0.25

L'analisi delle condizioni limite è stata condotta in riferimento alle onde con periodo di ritorno pari a 50 anni illustrate in Tabella 9-4 per le quali il PIANC raccomanda Hs < 0.50 m.

Nelle immagini a seguire sono presentati i campi di altezza d'onda residua per il layout attuale del porto.

Le onde 12, proveniente da 130°N e l'onda 15, proveniente da 190°N, risultano verificate per la quasi totalità del bacino portuale, ad eccezione della zona antistante l'imboccatura. La condizione più penalizzante è anche in questo caso associata all'onda da 150°N (onda 13), che comporta in praticamente tutte le zone del porto valori di agitazione interna superiori alla soglia indicata dal PIANC.

RELAZIONE GENERALE

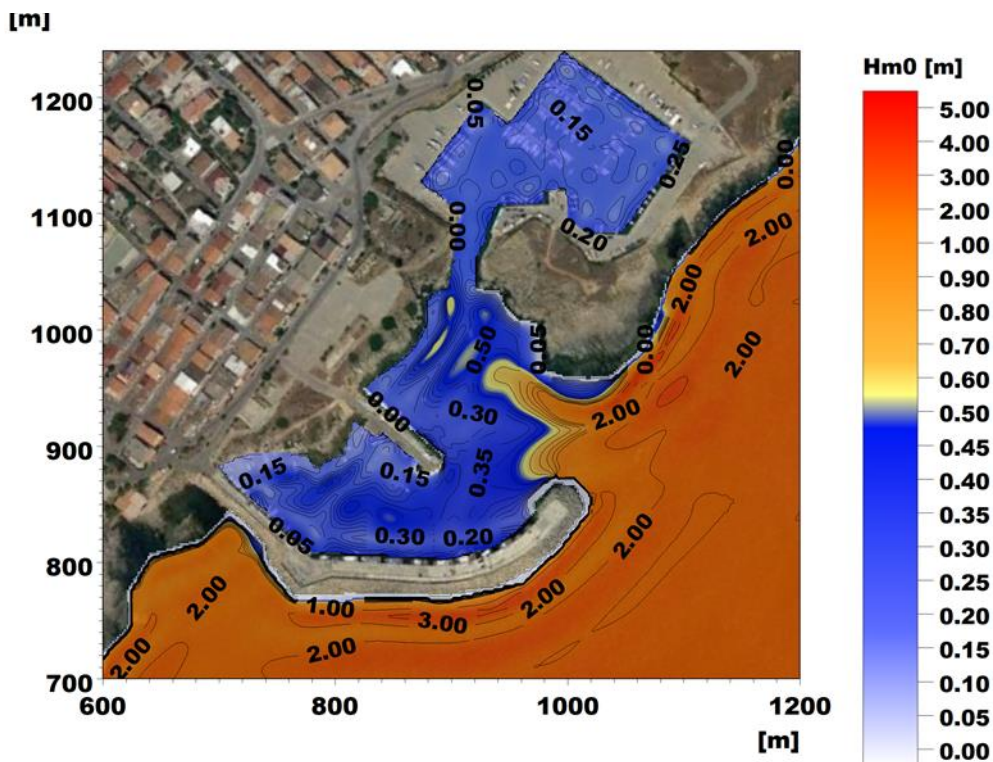


Figura 9-20 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 12 per la verifica della condizione limite

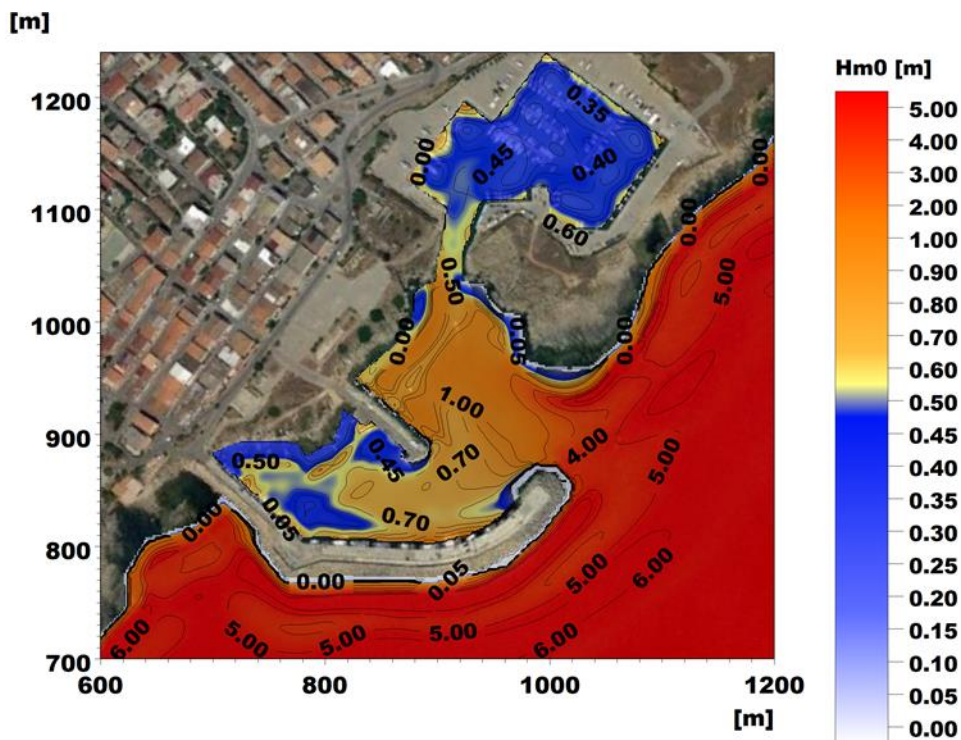


Figura 9-21 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 13 per la verifica della condizione limite

RELAZIONE GENERALE

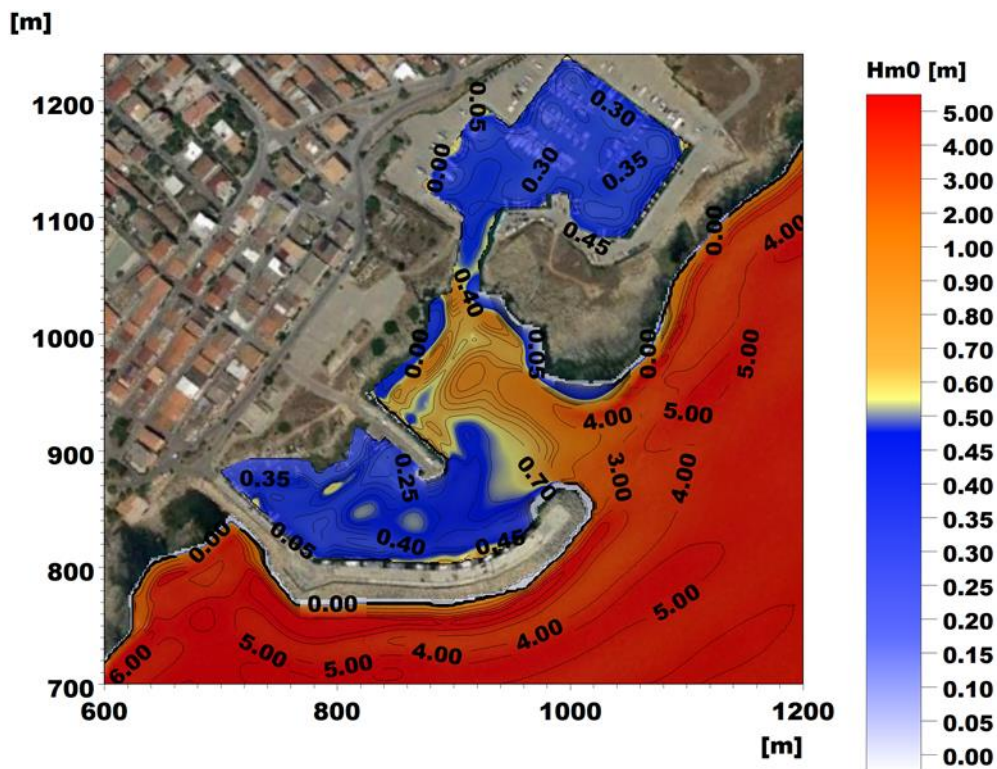


Figura 9-22 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 14 per la verifica della condizione limite

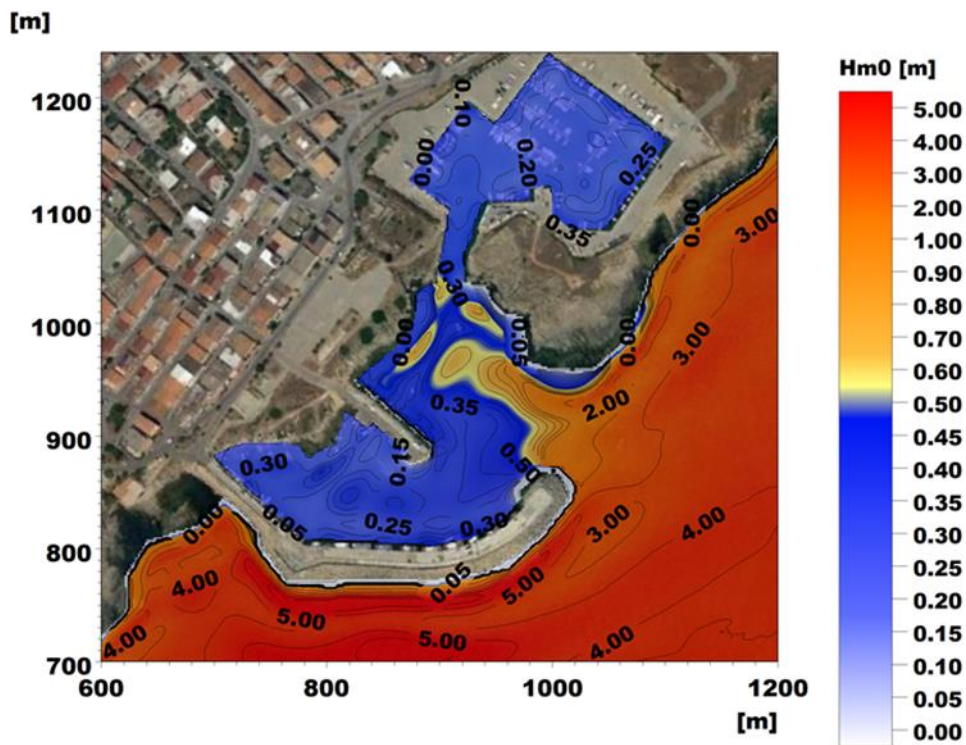


Figura 9-23 Stato attuale: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 15 per la verifica della condizione limite

RELAZIONE GENERALE

Tabella 9-7 Verifica delle condizioni limite per lo stato attuale. In rosso le condizioni non verificate

Zona di riferimento	Valori massimi di Hs			
	Settore 120°-140°	Settore 140°-160°	Settore 160°-180°	Settore 180°-200°
	Onda 12	Onda 13	Onda 14	Onda 15
Area 1	0.25	0.50	0.45	0.30
Area 2	0.50	1.20	0.90	0.50
Area 4	0.45	0.60	0.50	0.35
Area 5	0.45	0.70	0.50	0.35

9.7 Analisi critica della soluzione progettuale a base di gara

Come anticipato in premessa, la modellazione numerica ha permesso una significativa ottimizzazione delle opere previste dal progetto posto a base di gara, con particolare riferimento alla loro efficacia. In particolare, la nuova scogliera emersa, prevista imbasata sul basso fondale roccioso in prossimità dell'imboccatura (elemento B in Figura 9-24), è stata oggetto di attenta e dedicata analisi al fine di quantificare l'effettivo livello di protezione dell'opera sulla penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio acqueo portuale.

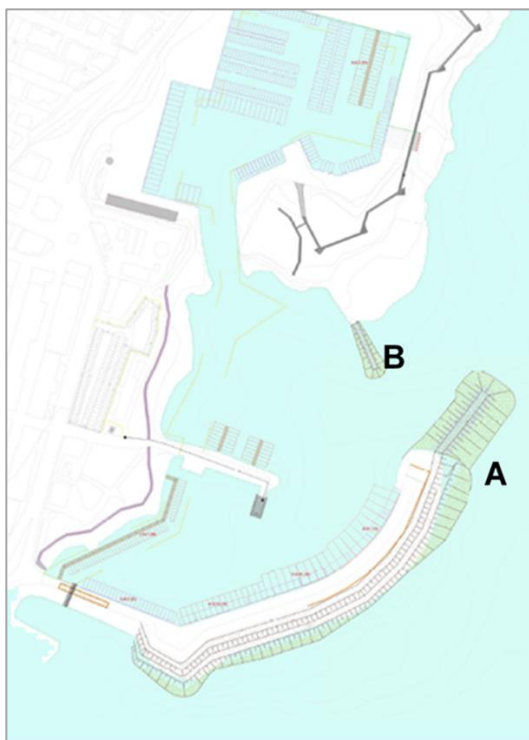


Figura 9-24 Configurazione di progetto a base di gara, con evidenziati gli interventi di allungamento del molo sopraflutto (A) e la scogliera emersa innestata sul basso fondale in roccia (B)

RELAZIONE GENERALE

Si è pertanto proceduto con una comparazione dei risultati di distribuzione dell'altezza d'onda residua in presenza ed assenza di tale pennello per le condizioni di onda più critiche emerse dall'analisi dell'agitazione ondosa di stato attuale, ovvero le onde 8 e 9, tra gli eventi con associato tempo di ritorno pari a 5 anni, e le onde 12 e 13, per il tempo di ritorno pari a 50 anni.

A seguire si riportano le mappe della distribuzione di altezza d'onda residua per le condizioni d'onda sopra citate, con evidenziato, attraverso una palette di colori dedicata, le aree dove vi è superamento del valore soglia indicato dal PIANC (scala del colore arancione-rosso).

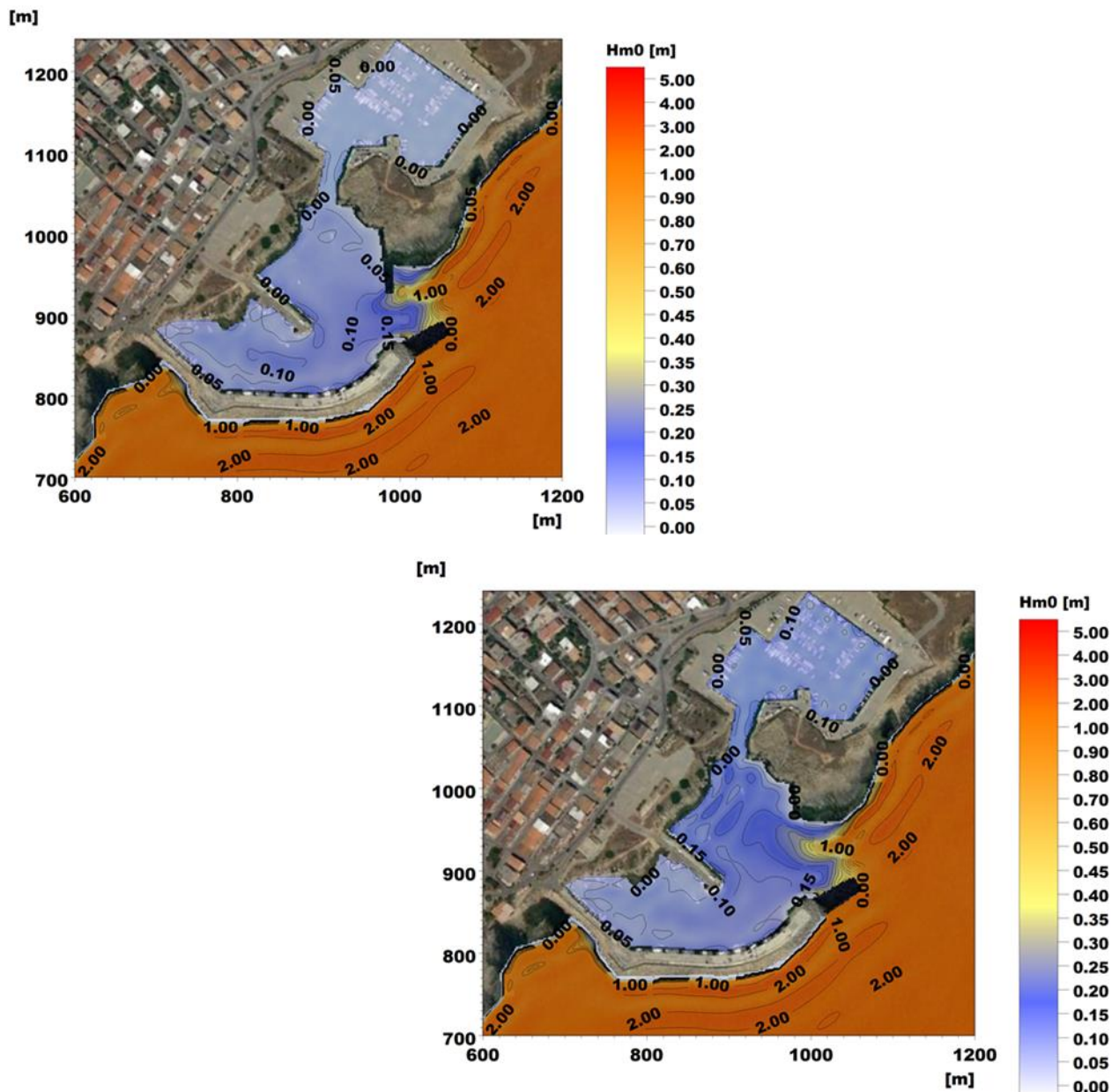


Figura 9-25 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda 8 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

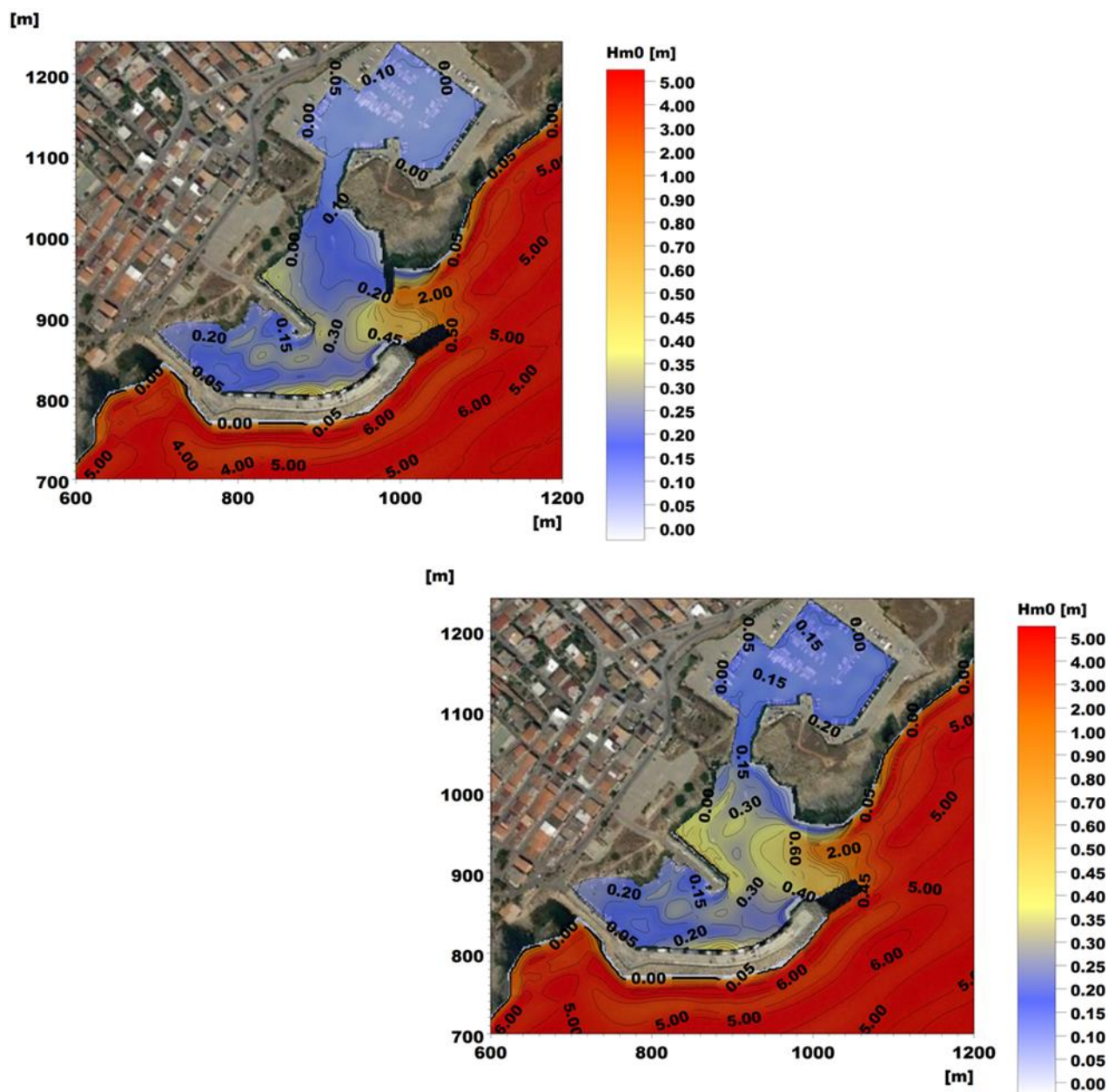


Figura 9-26 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda 9 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

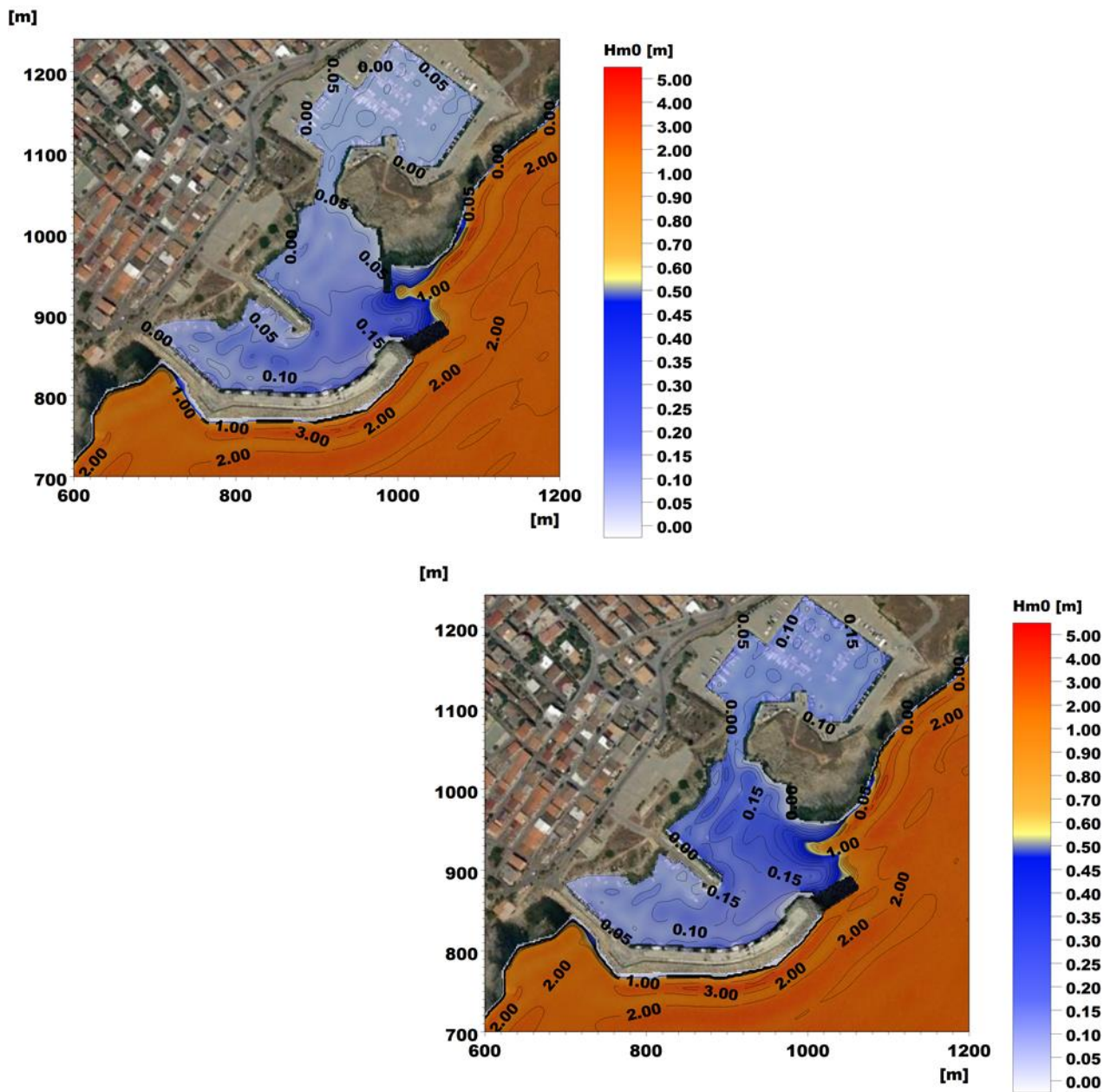


Figura 9-27 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda 12 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

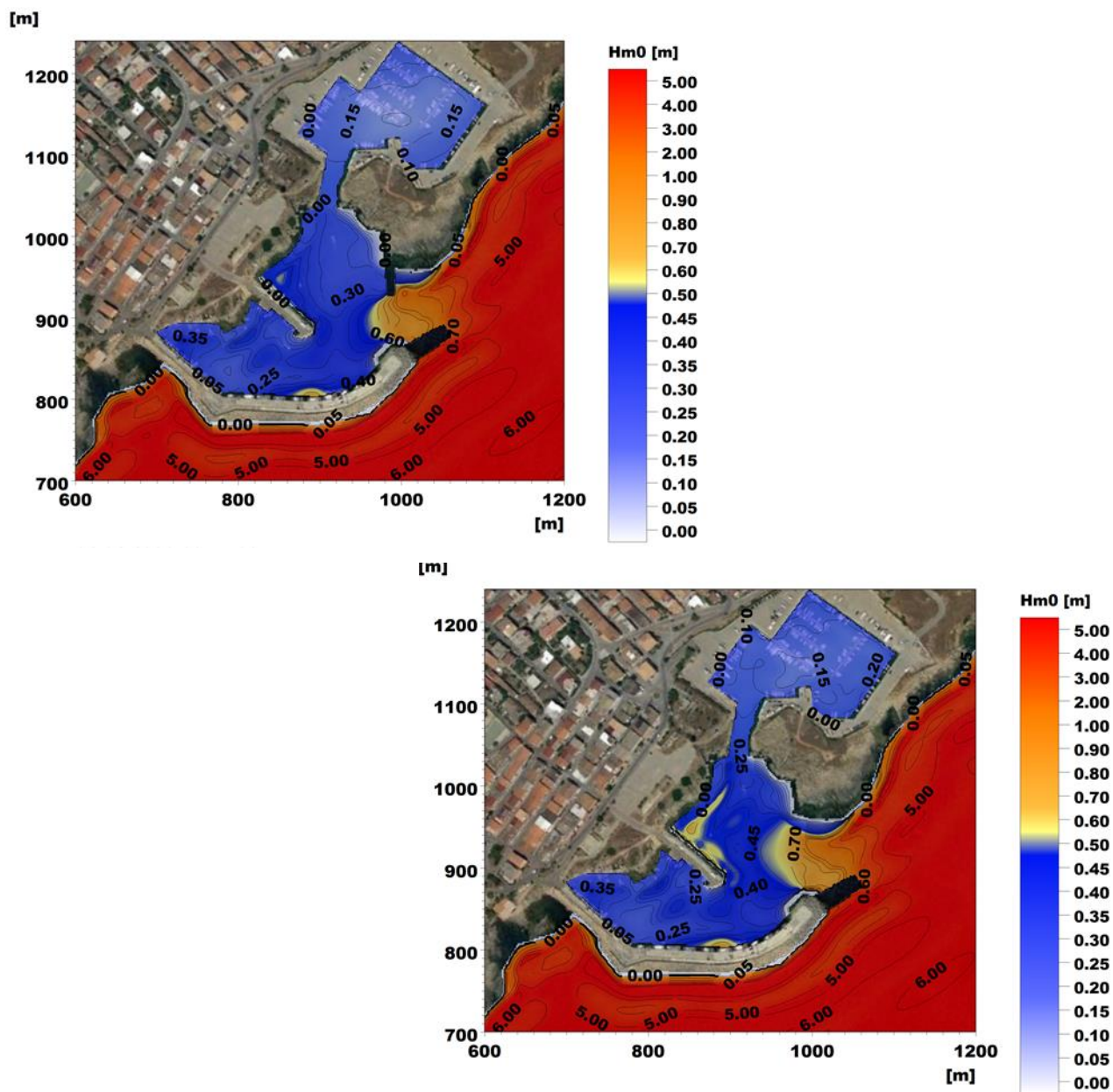


Figura 9-28 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda 13 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

Sebbene la presenza della scogliera comporti senza dubbio un effetto di protezione alla penetrazione del moto ondoso dentro il bacino, si osserva come questo sia sostanzialmente limitato alla zona antistante l'imboccatura (Area 2) e di entità tale da non essere determinante nel superamento o meno dei valori soglia di agitazione ondosa indicati nelle Raccomandazioni PIANC.

Infatti, per le condizioni d'onda con direzione 130° (onda 8 e onda 12), l'altezza d'onda rimane inferiore al valore soglia PIANC in tutte le Aree (1 - 2 - 3 - 4) sia in assenza che in presenza della scogliera. Al contrario, per le condizioni d'onda da 150° , caratterizzate da valori di altezza d'onda maggiore, nella Aree 2 e 4, per le condizioni d'onda dello scenario 13, l'altezza d'onda risulta superiore alla soglia PIANC di 0.50 m sia in

RELAZIONE GENERALE

assenza che in presenza della scogliera, rispettato invece nelle zone 1 e 3.

Al fine di prevedere un'operatività anche solo parziale durante l'anno per l'ormeggio delle imbarcazioni in alcune aree sono state verificate le condizioni PIANC in riferimento alla stagione estiva, di maggior interesse per la fruizione turistica, e che nella presente analisi è stata assunta comprensiva dei mesi Aprile, Maggio, Giugno, Luglio, Agosto e Settembre.

Sulla base dei valori degli eventi estremi risultanti dall'analisi statistica stagionale nel punto di largo (Tabella 6-3), e dei risultati della propagazione sottocosta degli eventi estremi stagionali, è stata predisposta una ulteriore comparazione dei risultati delle due configurazioni con e senza scogliera, questa volta su base stagionale.

Tabella 9-8 Caratteristiche sottocosta degli eventi estremi "estivi" con associato TR 5 anni per la verifica delle condizioni di sicurezza

ONDA	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
E1	0.92	6.7	130°
E2	1.26	7.2	150°
E3	1.42	7.0	170°
E4	1.54	6.7	190°

Tabella 9-9 Caratteristiche sottocosta degli eventi estremi "estivi" con associato TR 50 anni per la verifica delle condizioni limite

ONDA	Hs [m]	Tp [s]	MWD [°N]
E5	1.57	8.19	130°
E6	1.92	8.29	150°
E7	1.96	7.80	170°
E8	1.83	7.22	190°

RELAZIONE GENERALE

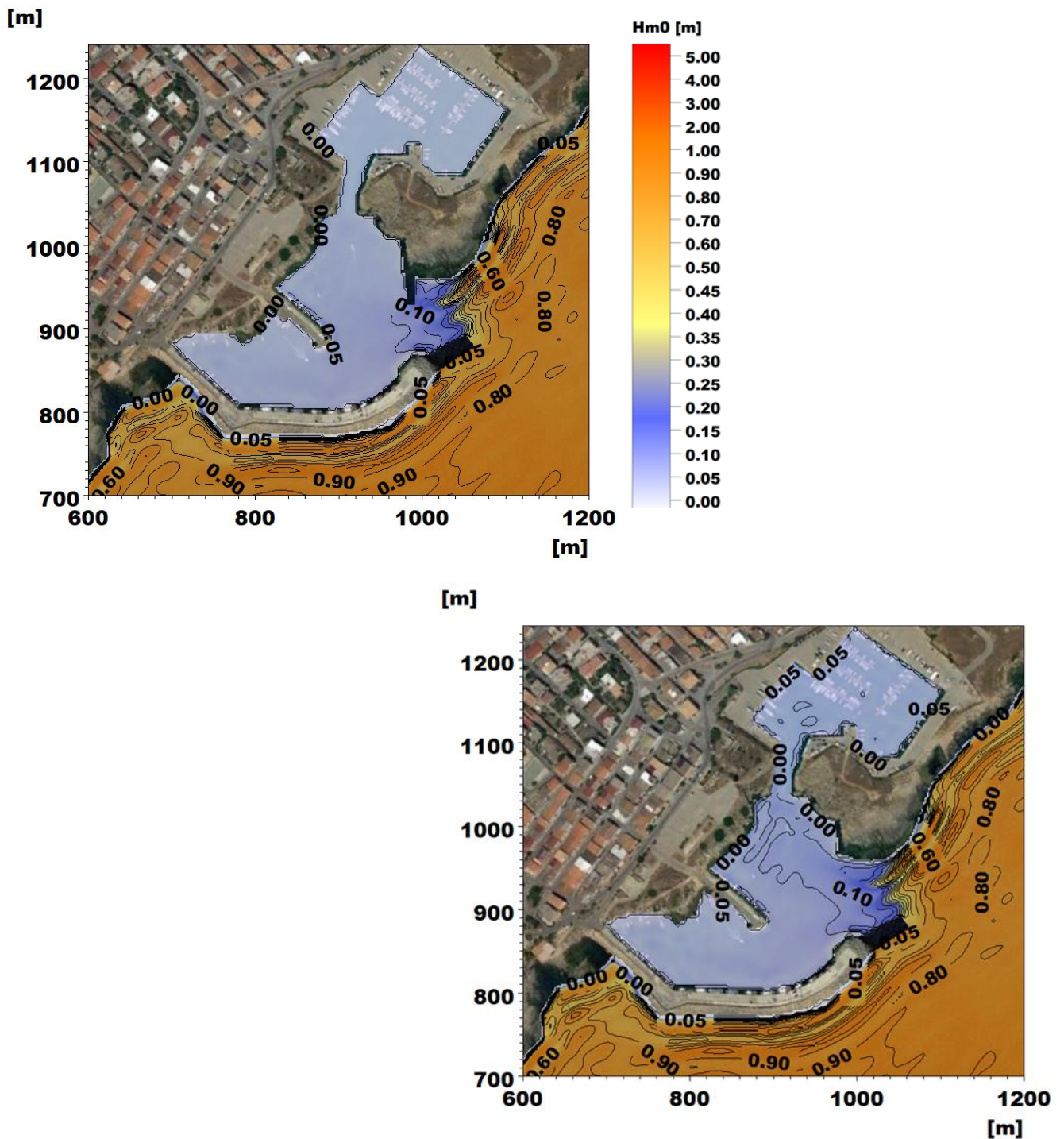


Figura 9-29 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda E1 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

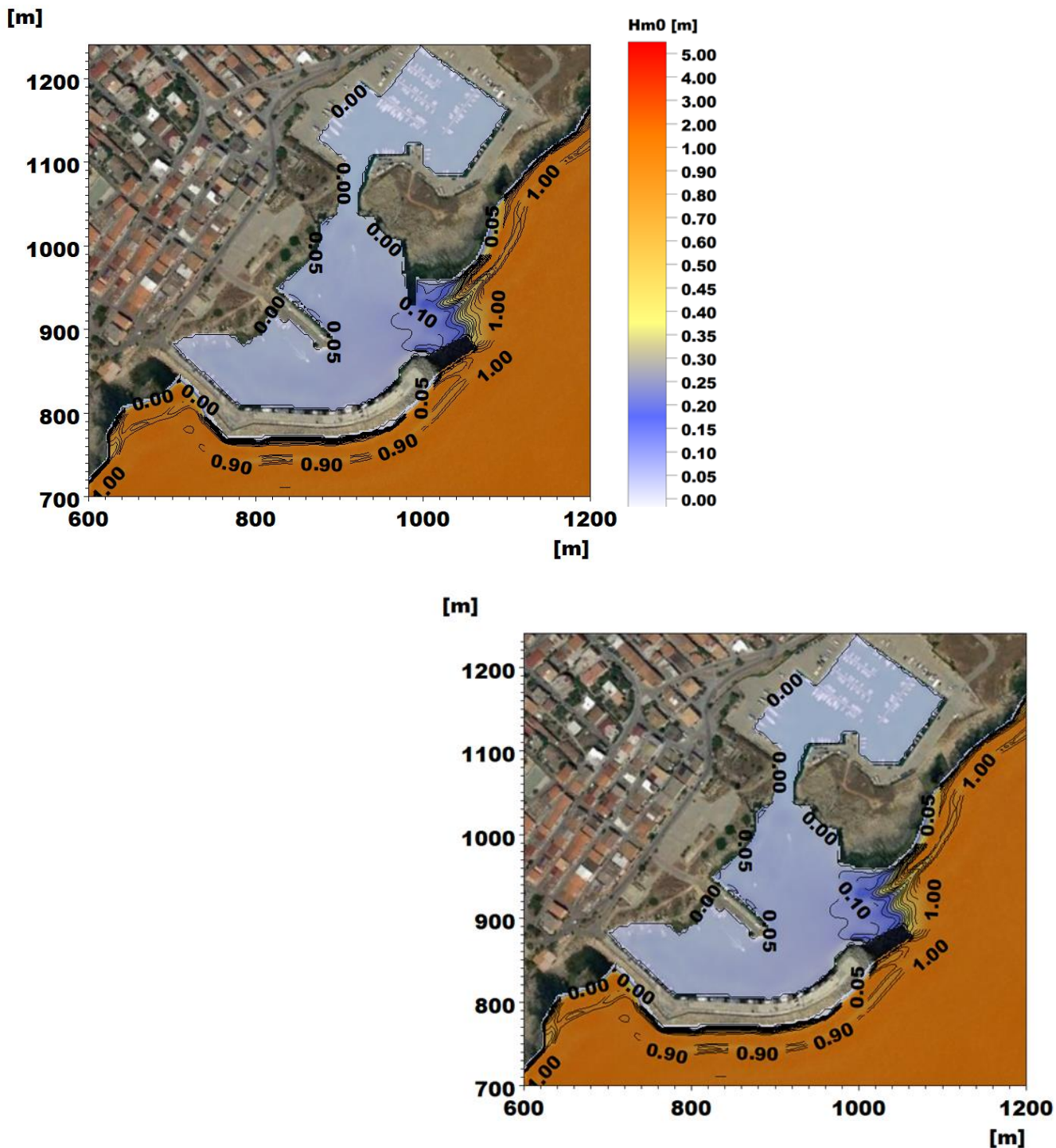


Figura 9-30 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda E2 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

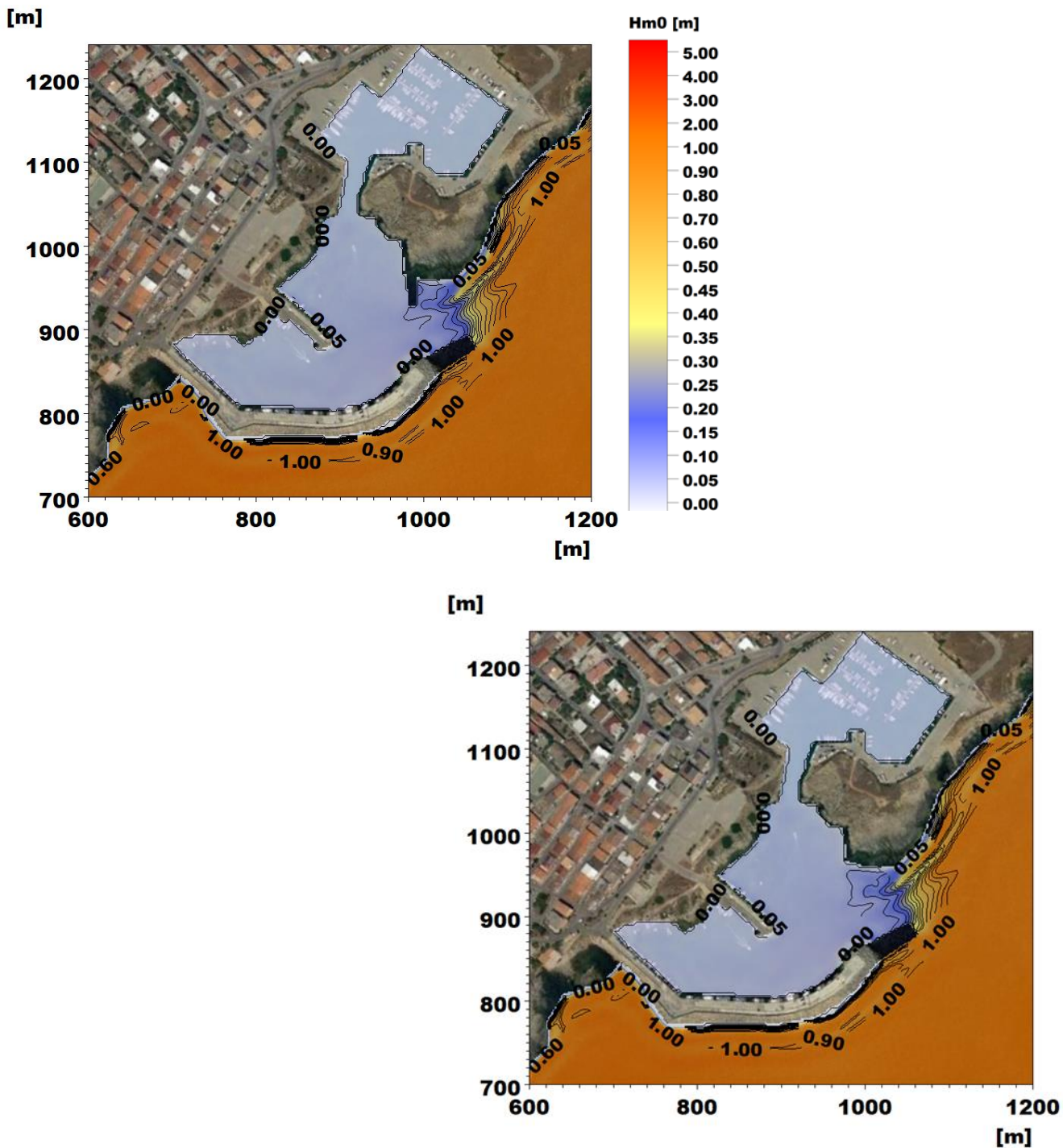


Figura 9-31 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda E3 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

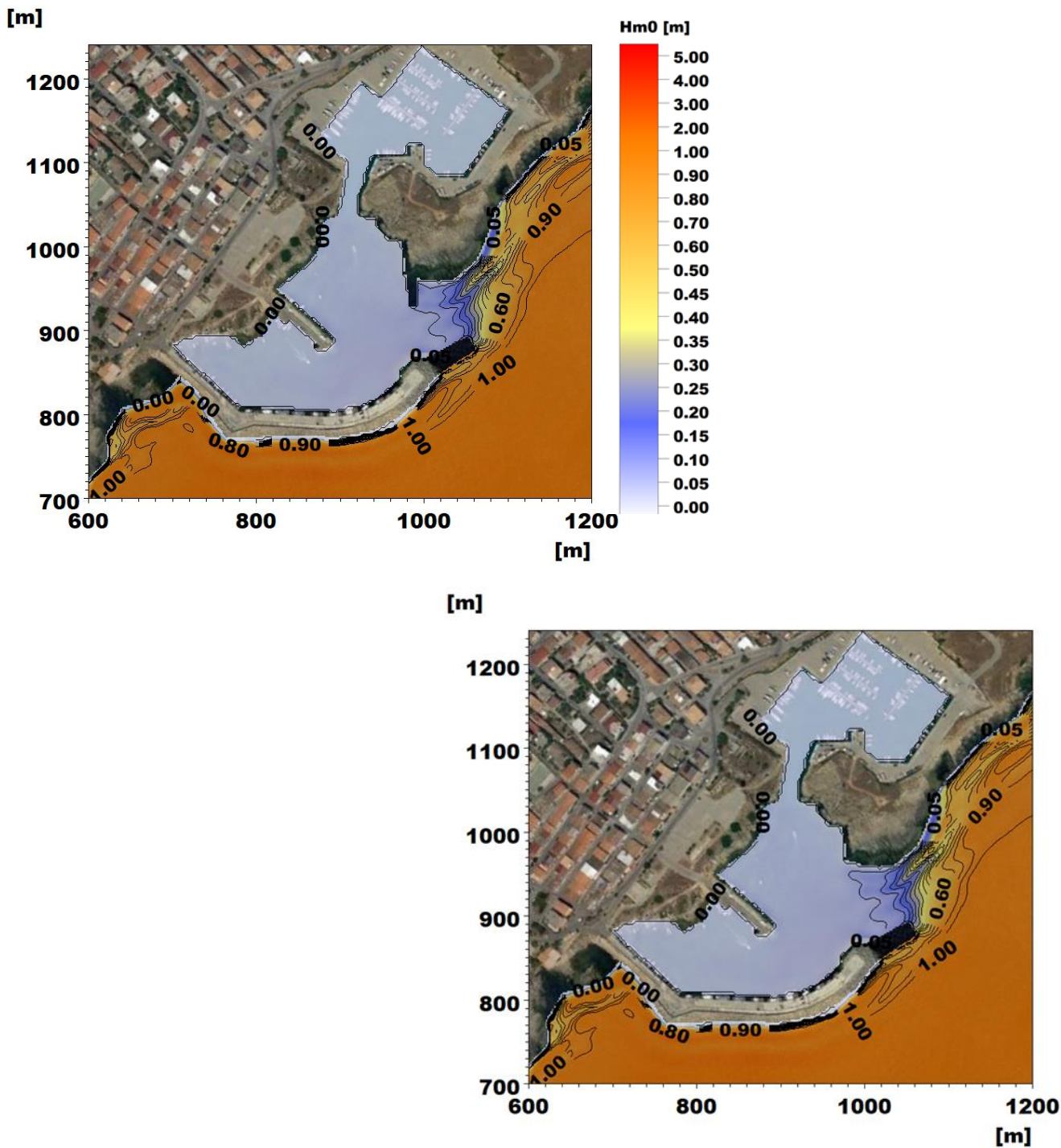


Figura 9-32 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda E4 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

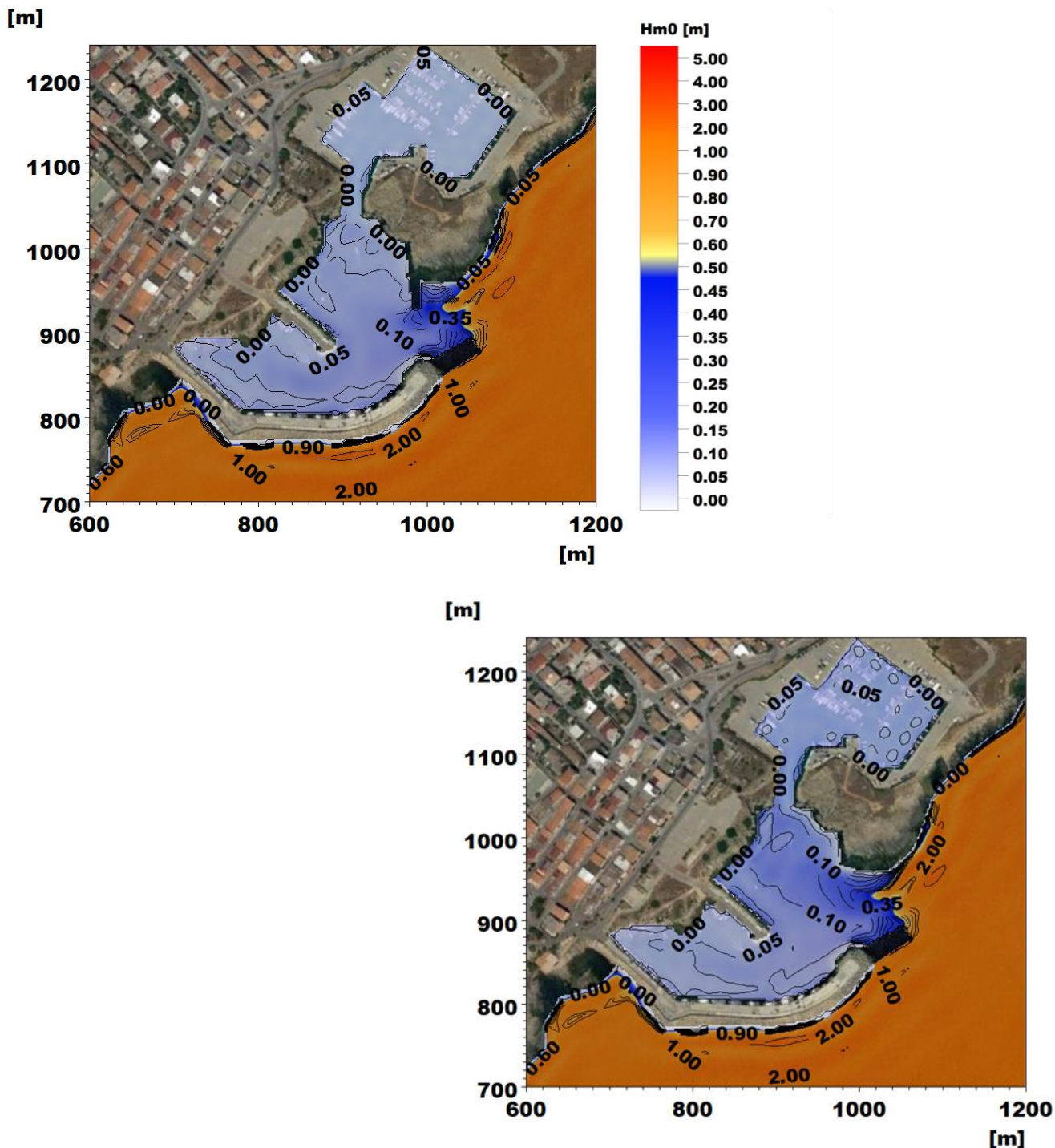


Figura 9-33 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda E5 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

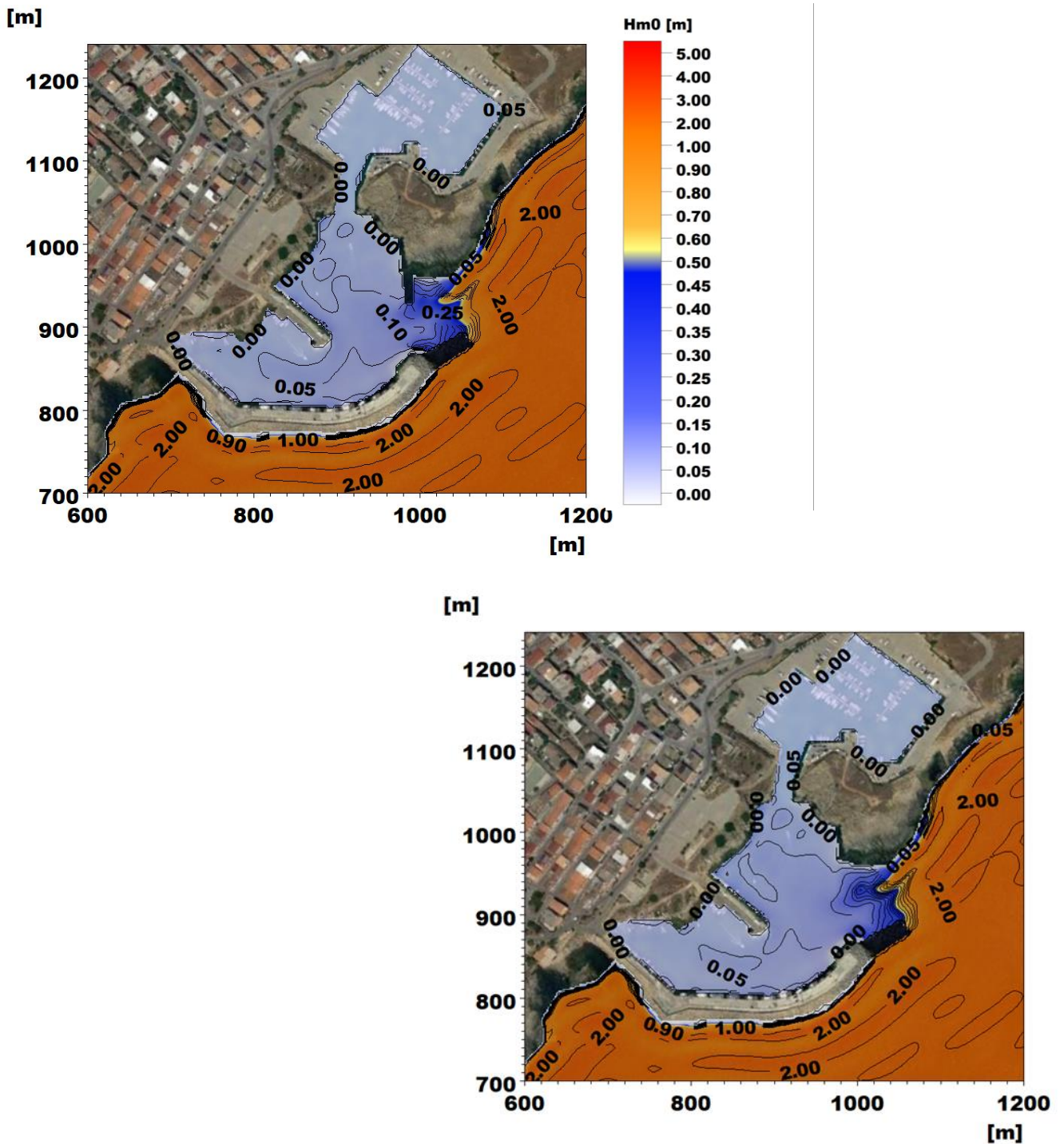


Figura 9-34 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda E6 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

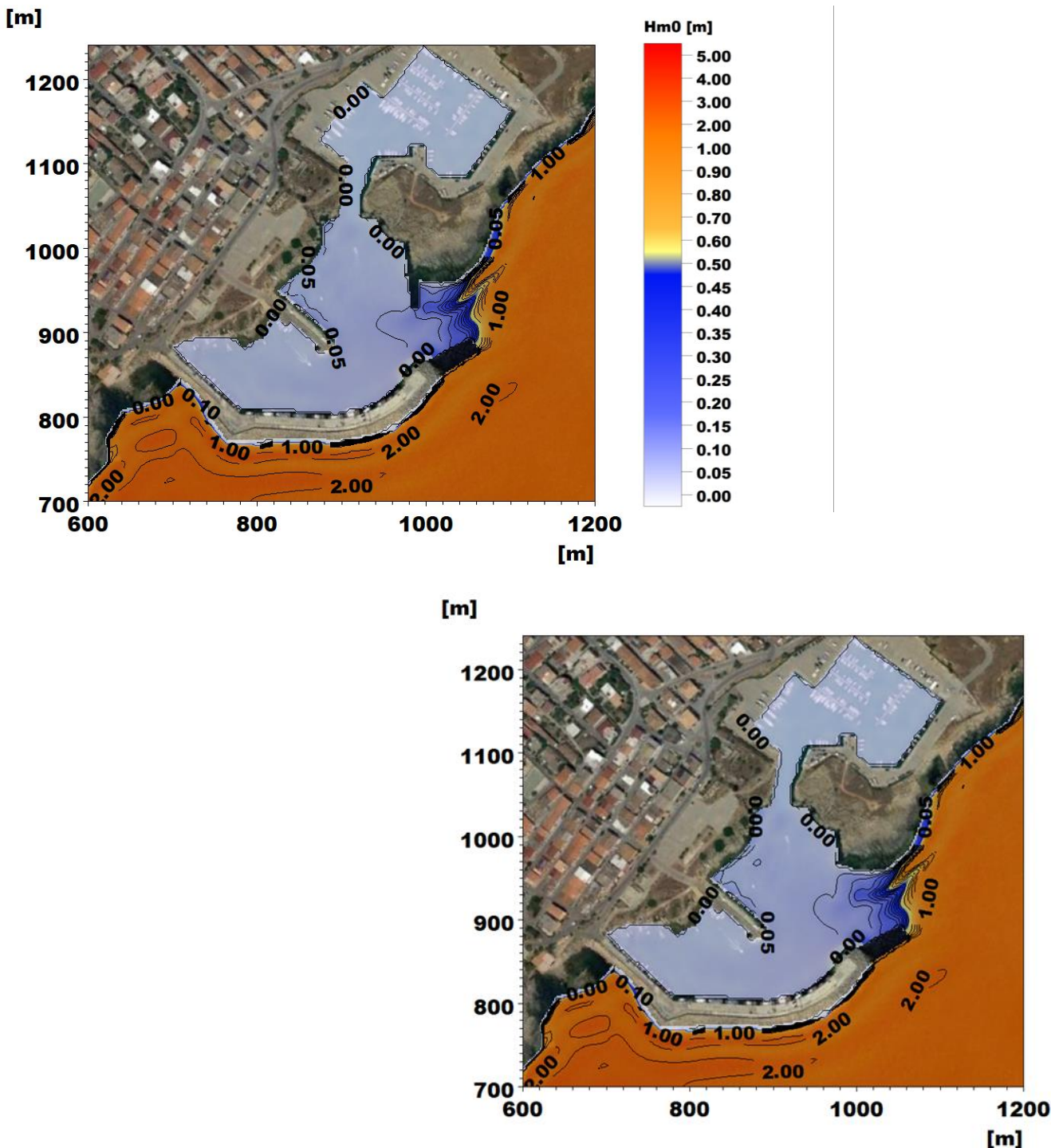


Figura 9-35 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda E7 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

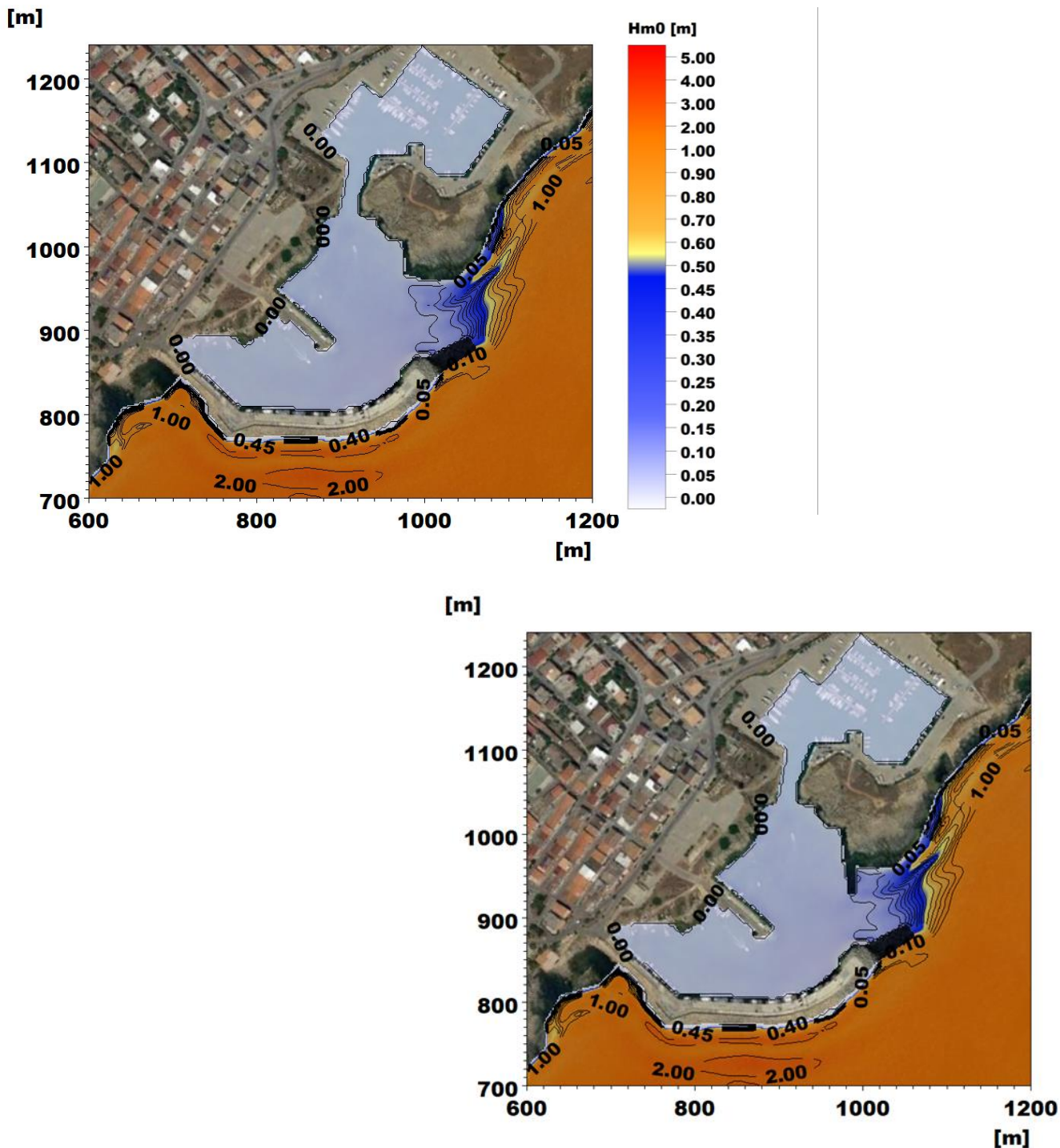


Figura 9-36 Distribuzione della altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale di Le Castella per l'onda E8 con il layout progettuale comprensivo della scogliera emersa e dell'allungamento del molo sopraflutto (in alto a sinistra) e nella versione senza scogliera (in basso a destra)

RELAZIONE GENERALE

Le mappe di agitazione ondosa interna riferite alle condizioni d'onda estiva confermano la limitata influenza della scogliera nella protezione del bacino portuale. Se per le onde stagionali con associato tempo di ritorno 50 anni (E5-E6-E7-E8) si osservano delle limitate differenze in prossimità dell'imboccatura, per gli eventi con TR=5 anni (E1-E2-E3-E4) la differente configurazione geometrica del porto non comporta apprezzabili variazioni nei risultati.

In considerazione dell'analisi svolta, sia in riferimento alle mareggiate annuali che agli eventi estremi stagionali, valutata la limitata influenza della scogliera sulla penetrazione delle onde nel bacino interno del porto di Le Castella (le differenze in termini di inoperatività sono trascurabili), in accordo con il gruppo di lavoro, si è deciso di eliminare dalla configurazione progettuale la scogliera prevista innestata sui bassi fondali rocciosi in prossimità dell'imboccatura.

A seguire si riportano tutti i risultati delle simulazioni di agitazione ondosa per la configurazione di progetto aggiornata.

9.8 Risultati del modello di agitazione ondosa – stato di progetto

Nelle figure a seguire sono riportate le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per la verifica delle condizioni di comfort, di sicurezza e limite, nella configurazione finale di layout progettuale del Porto di Le Castella.

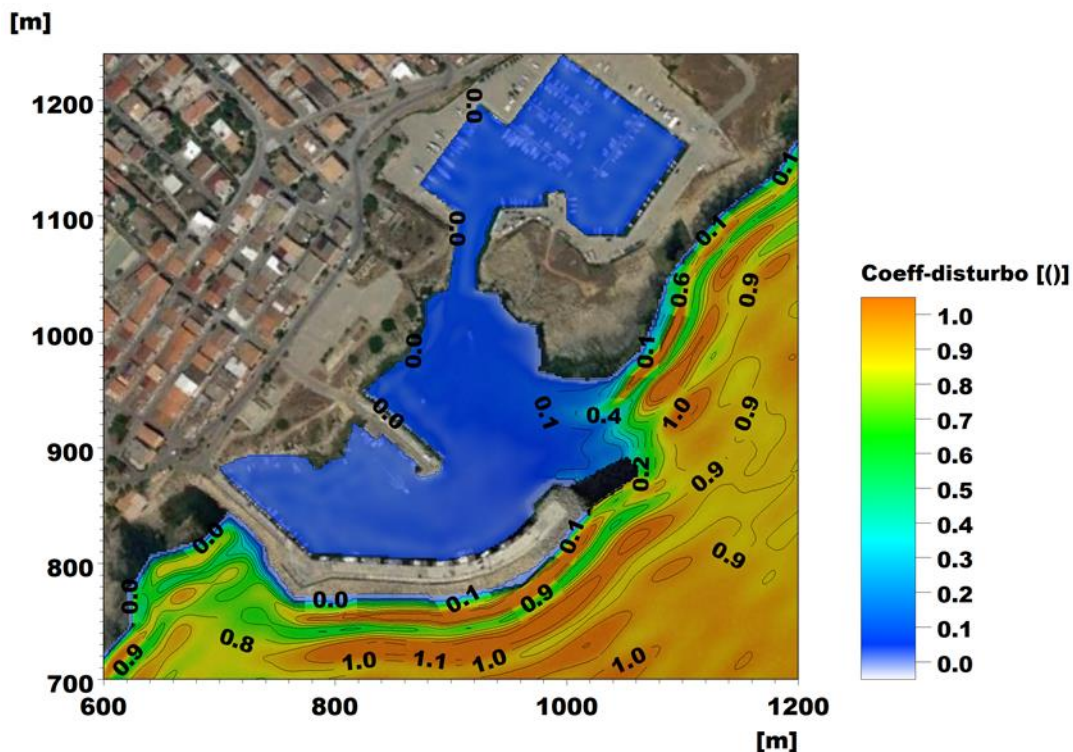


Figura 9-37 Stato di progetto: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 1

RELAZIONE GENERALE

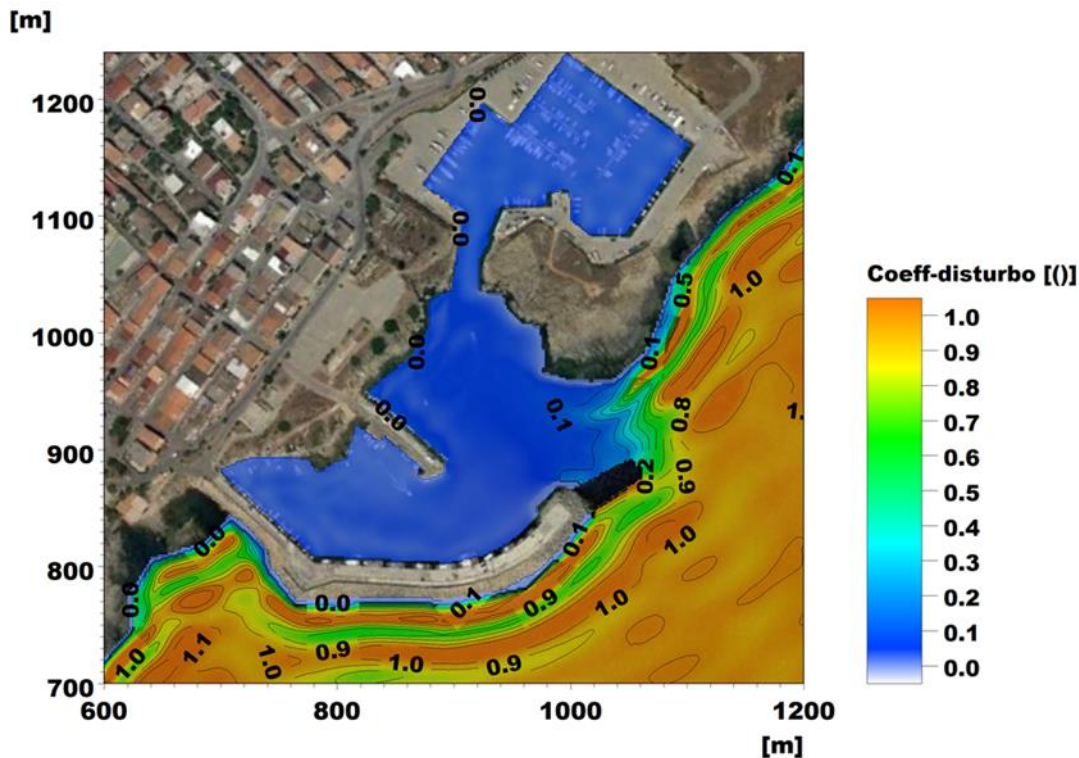


Figura 9-38 Stato di progetto: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 2

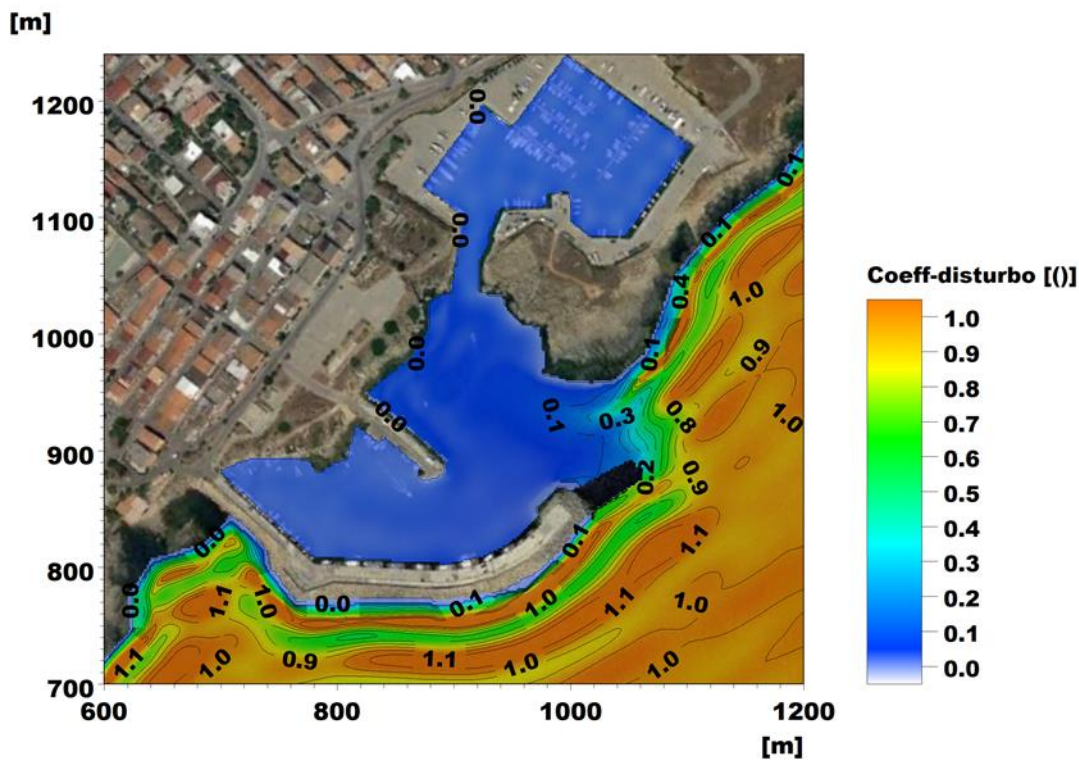


Figura 9-39 Stato di progetto: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 3

RELAZIONE GENERALE

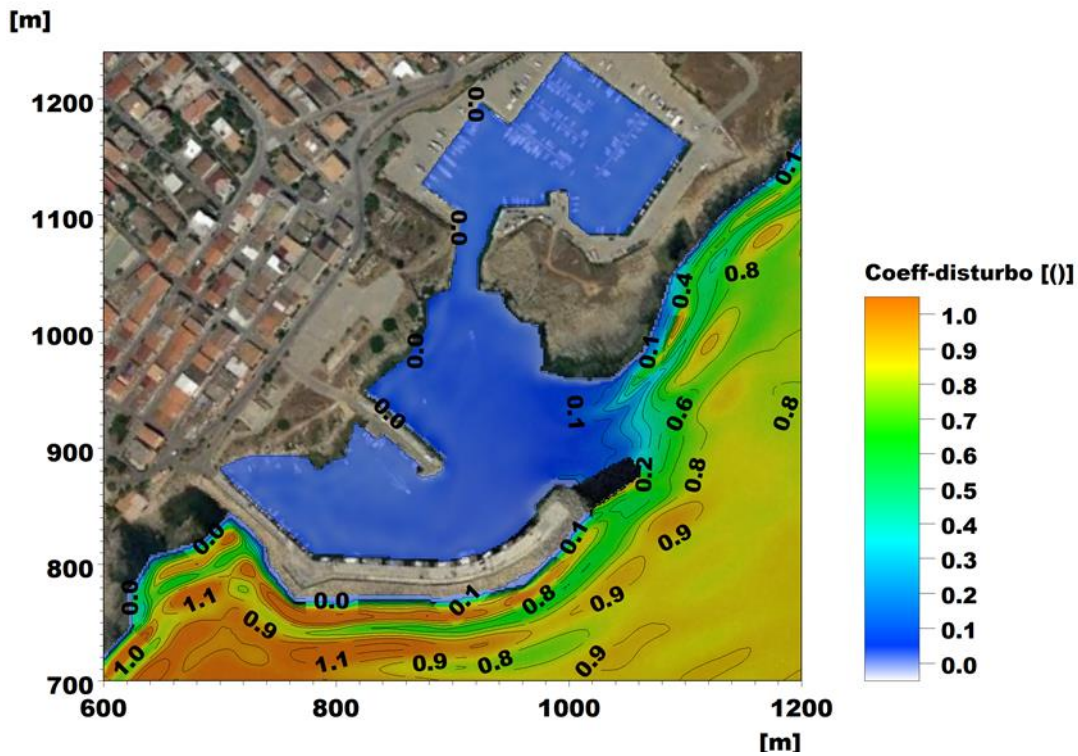


Figura 9-40 Stato di progetto: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 4

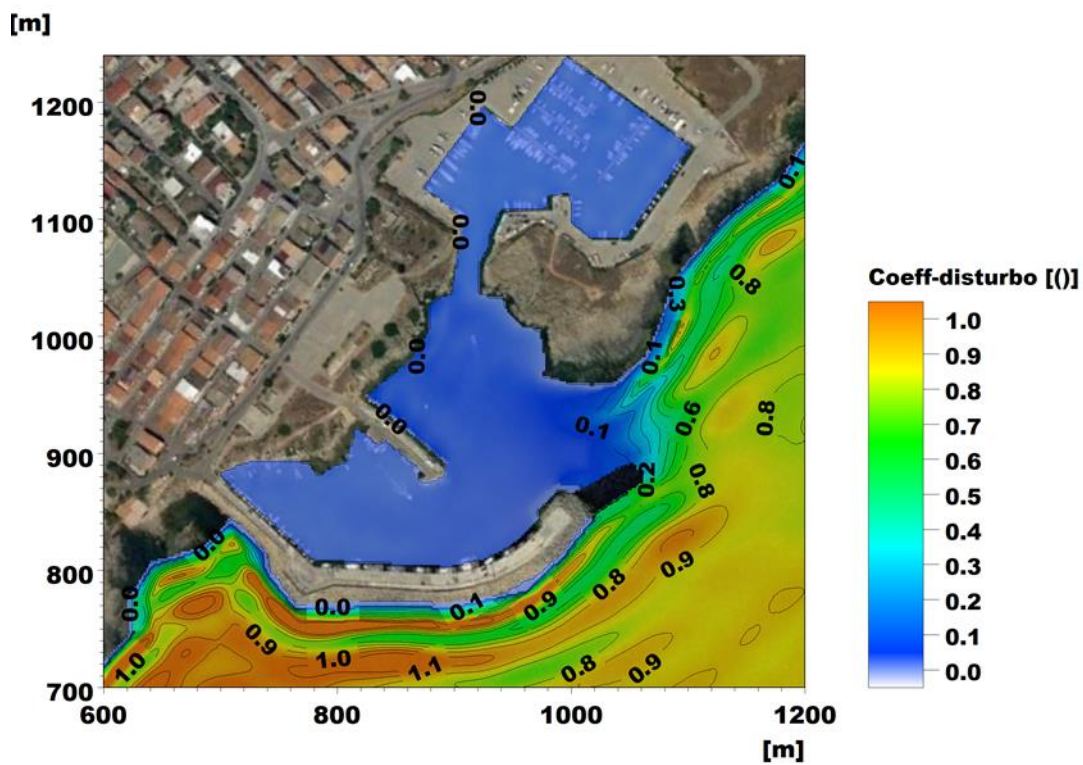


Figura 9-41 Stato di progetto: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 5

RELAZIONE GENERALE

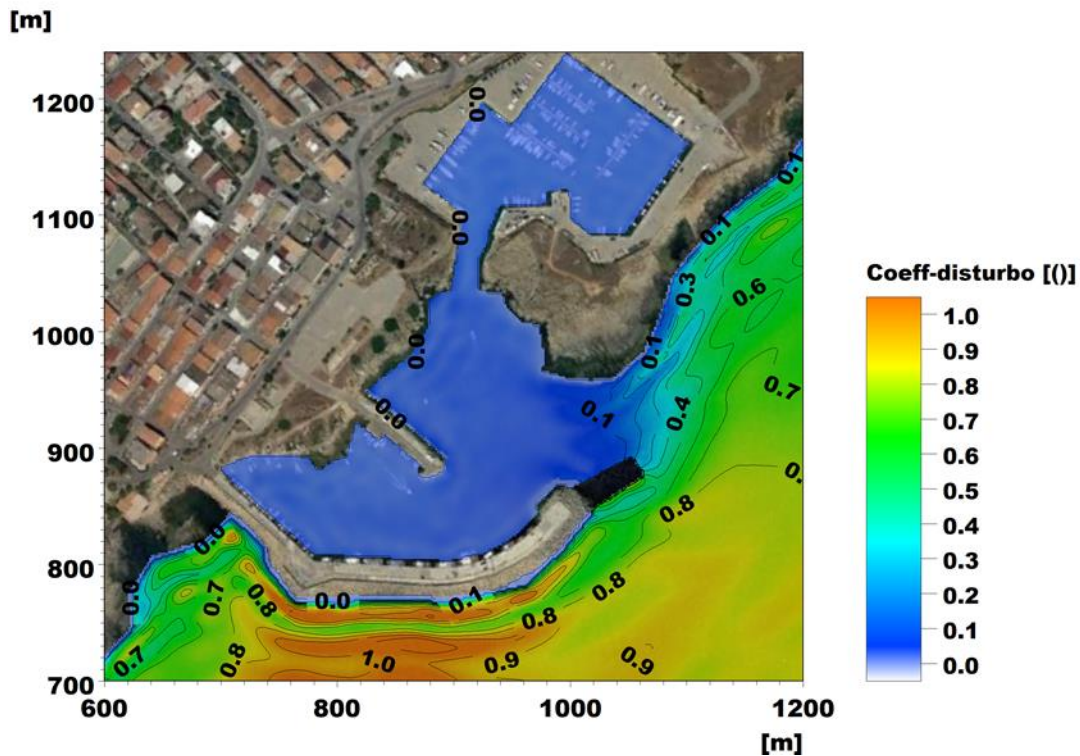


Figura 9-42 Stato di progetto: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 6

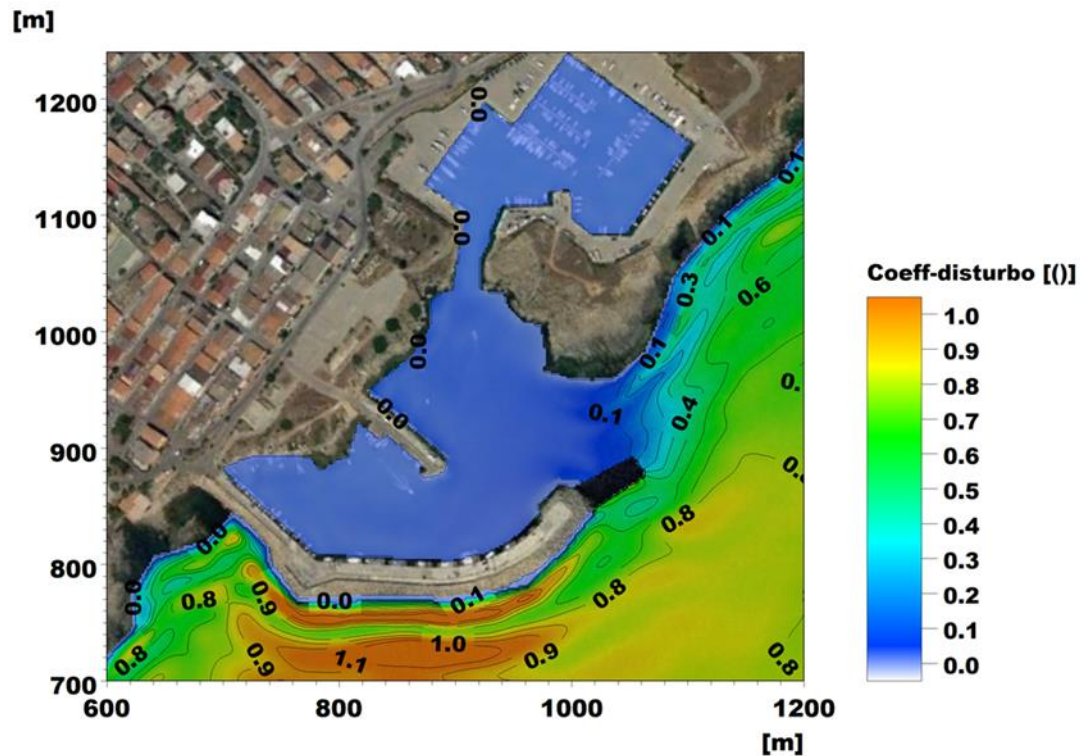


Figura 9-43 Stato di progetto: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l'onda 7

RELAZIONE GENERALE

Tabella 9-10 presenta, per ciascuna area di riferimento individuata, per lo stato di progetto, il numero totale di giorni per cui risulta superato il valore soglia indicato dal PIANC.

Tabella 9-10 Stato Progetto: numero di giorni all'anno di superamento del valore soglia di 0.15 m. In rosso le condizioni non verificate

Zona di riferimento	Numero giorni di superamento [gg]				TOTALE
	Settore 120°-140°	Settore 140°-160°	Settore 160°-180°	Settore 180°-200°	
Area 1	0.0	2.0	0.4	0.0	2.4
Area 2	0.1	6.3	7.4	0.0	13.8
Area 3	0.0	0.6	0.0	0.0	0.6
Area 4	0.0	1.3	0.4	0.0	1.7

Come già evidente dalle risultanze delle analisi illustrate in precedenza, la zona più esposta per cui permangono, seppur con sensibile miglioramento rispetto alla configurazione attuale, condizioni di agitazione ondosa superiore alle soglie suggerite dal PIANC è l'Area 2.

Per le altre aree l'allungamento previsto del molo risulta risolutivo per la verifica delle condizioni di comfort.

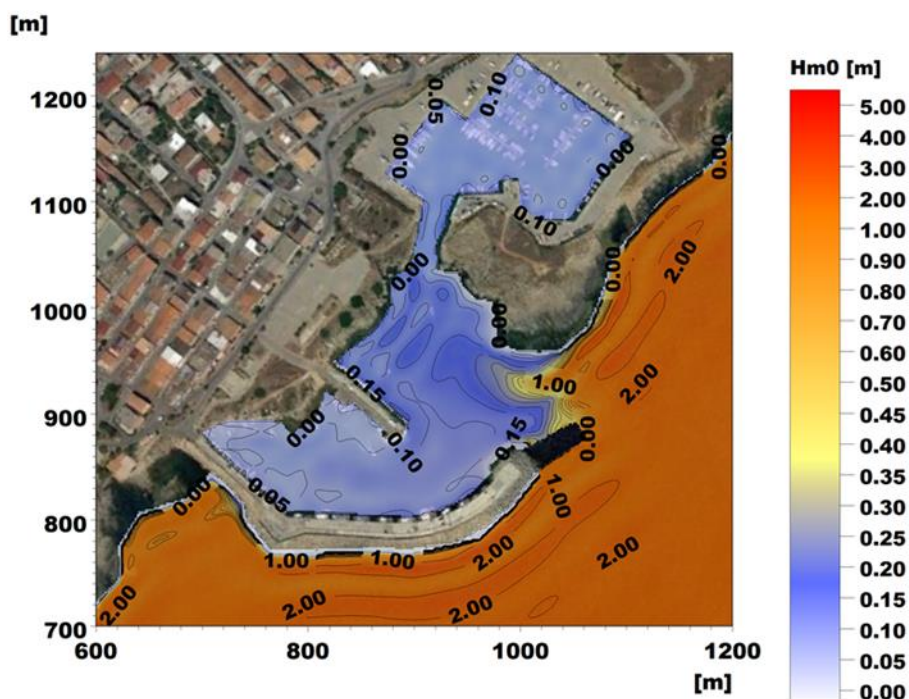


Figura 9-44 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 8 per la verifica della condizione di sicurezza

RELAZIONE GENERALE

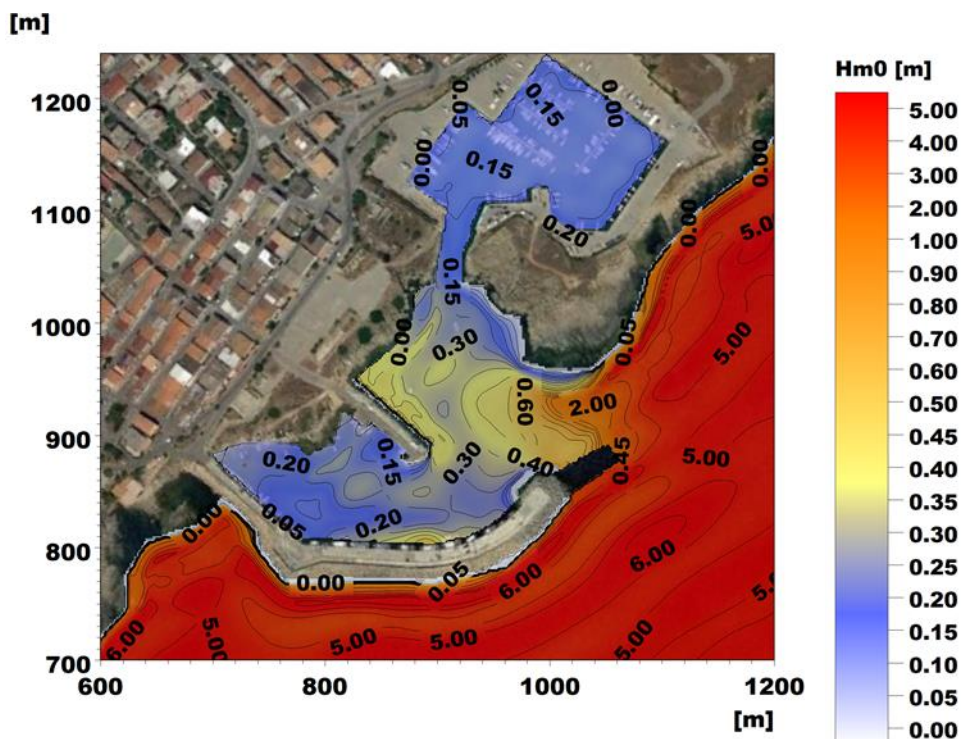


Figura 9-45 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 9 per la verifica della condizione di sicurezza

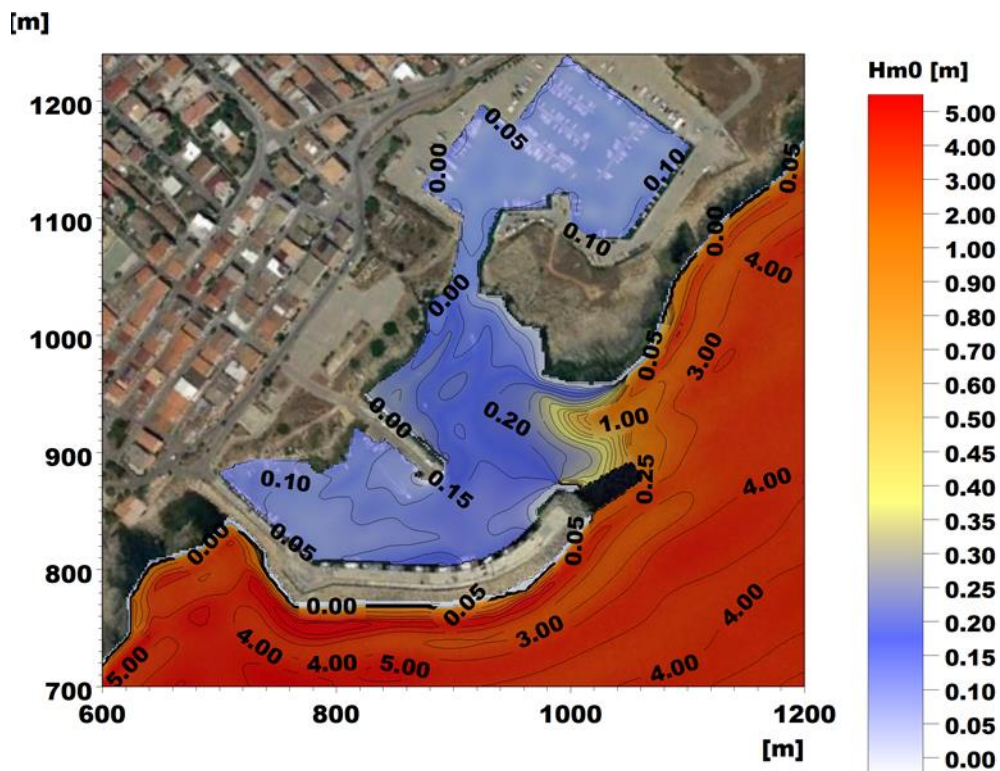


Figura 9-46 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 10 per la verifica della condizione di sicurezza

RELAZIONE GENERALE

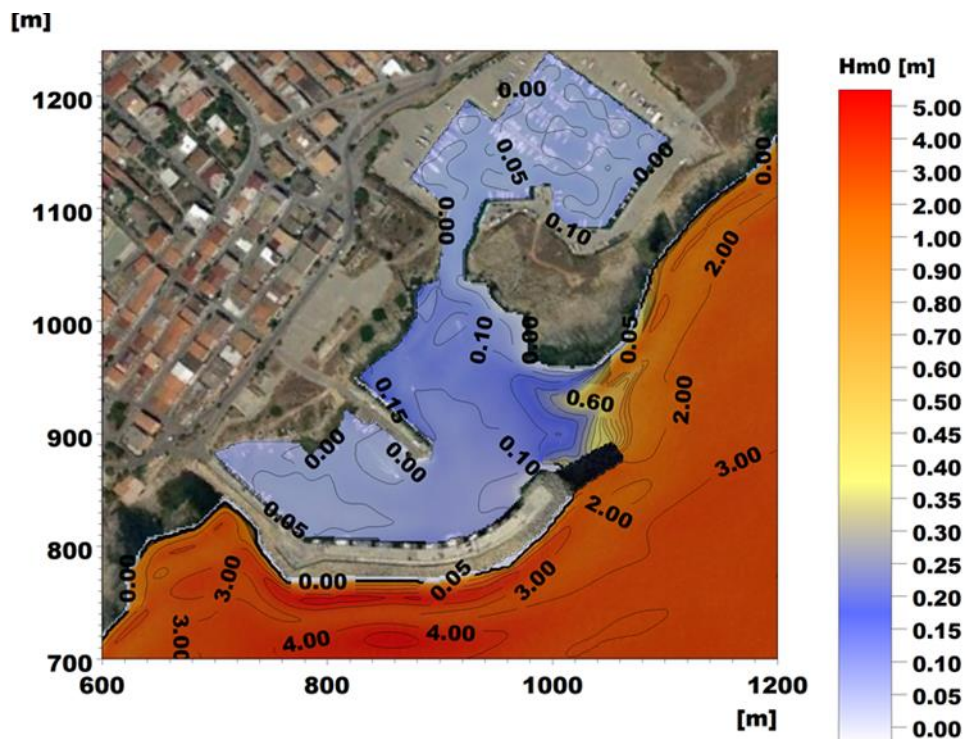


Figura 9-47 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 11 per la verifica della condizione di sicurezza

Tabella 9-11 Stato di progetto: verifica delle condizioni di sicurezza. In rosso le condizioni non verificate

Zona di riferimento	Valori massimi di Hs			
	Settore 120°-140°	Settore 140°-160°	Settore 160°-180°	Settore 180°-200°
	Onda 8	Onda 9	Onda 10	Onda 11
Area 1	0.10	0.15	0.10	0.05
Area 2	0.17	0.40	0.25	0.15
Area 3	0.07	0.25	0.10	0.05
Area 4	0.07	0.25	0.15	0.05

RELAZIONE GENERALE

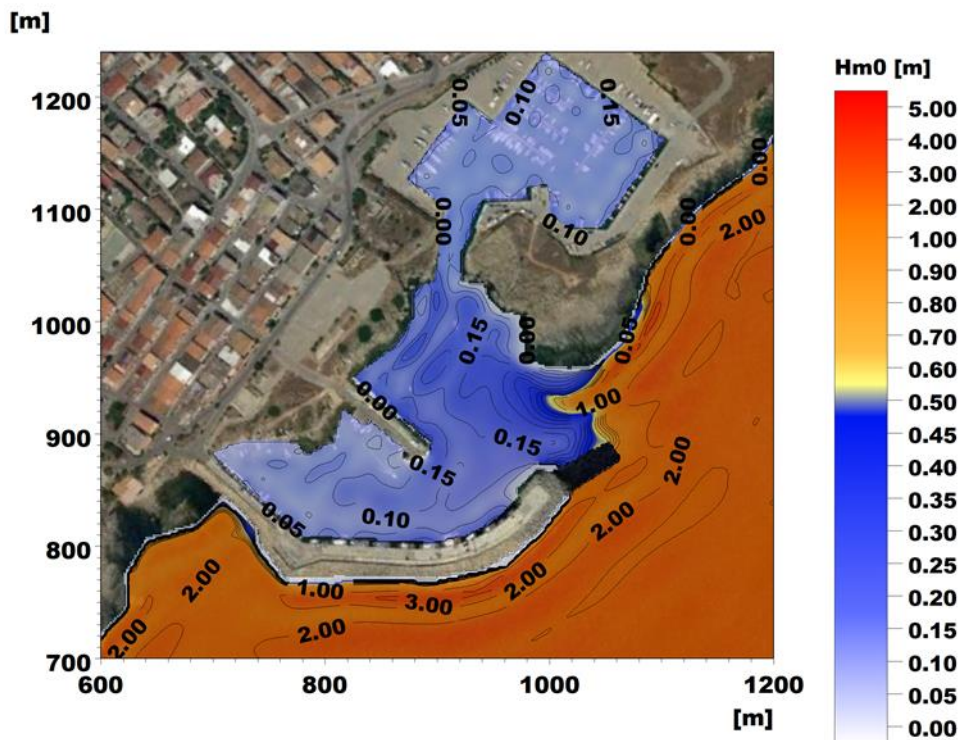


Figura 9-48 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 12 per la verifica della condizione limite

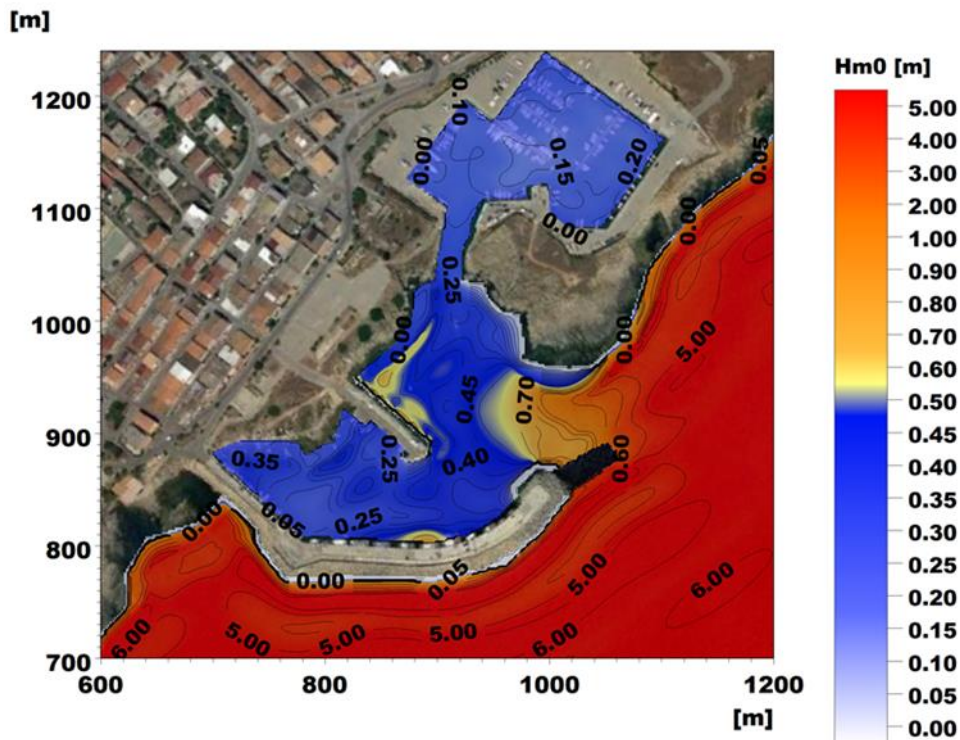


Figura 9-49 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 13 per la verifica della condizione limite

RELAZIONE GENERALE

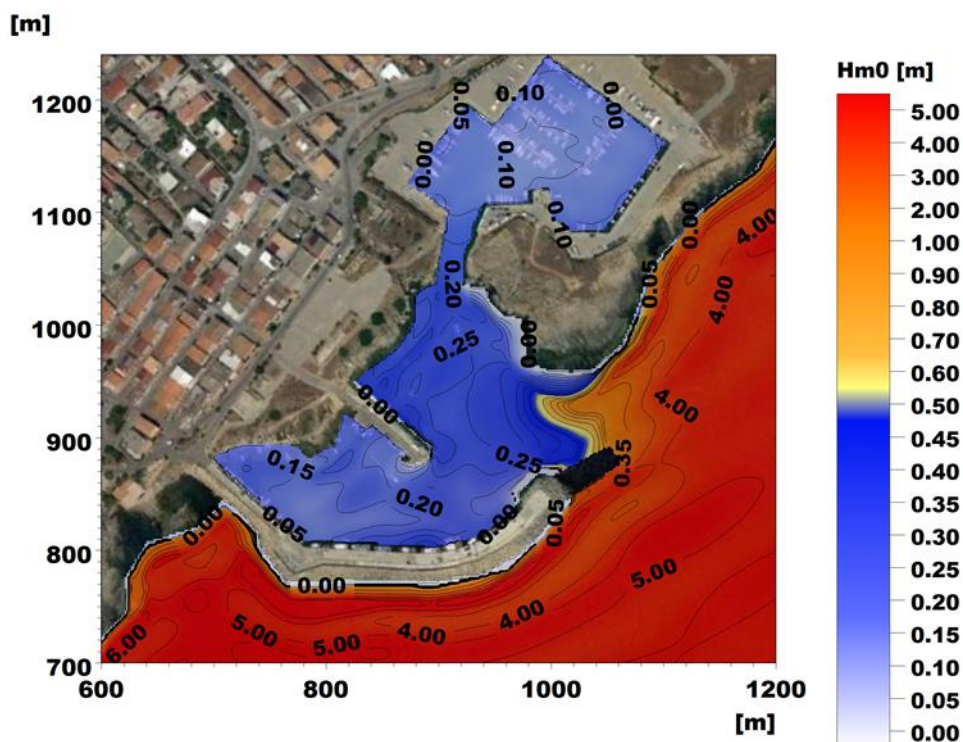


Figura 9-50 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 14 per la verifica della condizione limite

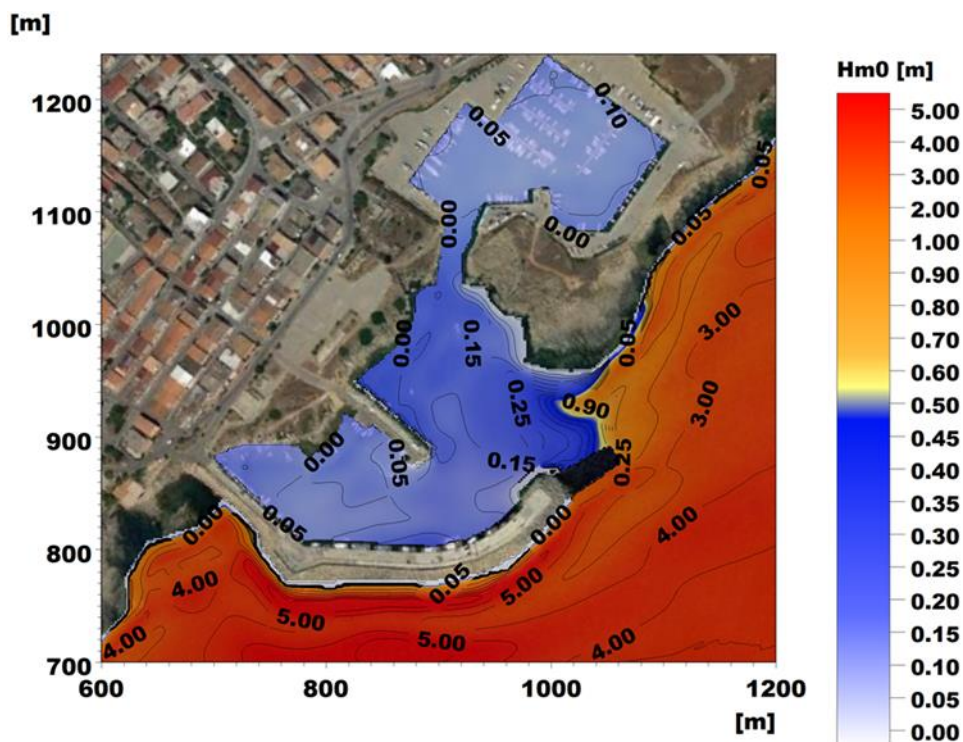


Figura 9-51 Stato di progetto: distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per l'onda 15 per la verifica della condizione limite

RELAZIONE GENERALE

Tabella 9-12 Stato di progetto: verifica delle condizioni limite. In rosso le condizioni non verificate

Zona di riferimento	Valori massimi di Hs			
	Settore 120°-140°	Settore 140°-160°	Settore 160°-180°	Settore 180°-200°
	Onda 12	Onda 13	Onda 14	Onda 15
Area 1	0.10	0.22	0.15	0.10
Area 2	0.21	0.60	0.32	0.25
Area 4	0.07	0.30	0.16	0.13
Area 5	0.14	0.45	0.20	0.12

9.9 Risultati del modello di agitazione ondosa – stato di progetto - stagione estiva

Come già anticipato in sezione 9.7, la configurazione progettuale risulta soddisfare i valori soglia PIANC con riferimento alla stagione estiva, sia per la condizione di sicurezza che per la condizione limite.

A completamento dell'analisi si riportano a seguire le caratteristiche delle onde e le mappe di distribuzione dell'altezza d'onda residua all'interno del bacino portuale per la verifica delle condizioni di comfort, con riferimento al periodo da aprile a settembre.

L'analisi della condizione di "comfort" è stata condotta selezionando 4 onde a partire dal clima ondoso ordinario sottocosta, con una frequenza pari a 1–2 giorni nella stagione estiva, una per ogni settore direzionale di 20° individuato. Per la definizione della direzione media di propagazione si è fatto riferimento alla direzione centrale del settore mentre per il periodo di picco T_p è stata ricavata dalla relazione empirica costruita sulla base degli eventi di ciascun settore (Tabella 9-13).

Tabella 9-13 Onde di riferimento per la verifica delle condizioni di comfort – stagione estiva

ONDA	Hs [m]	T_p [s]	MWD [°N]
E11	0.5	5.7	130°
E12	1.25	7.2	150°
E13	1.0	6.3	170°
E14	1.0	5.8	190°

RELAZIONE GENERALE

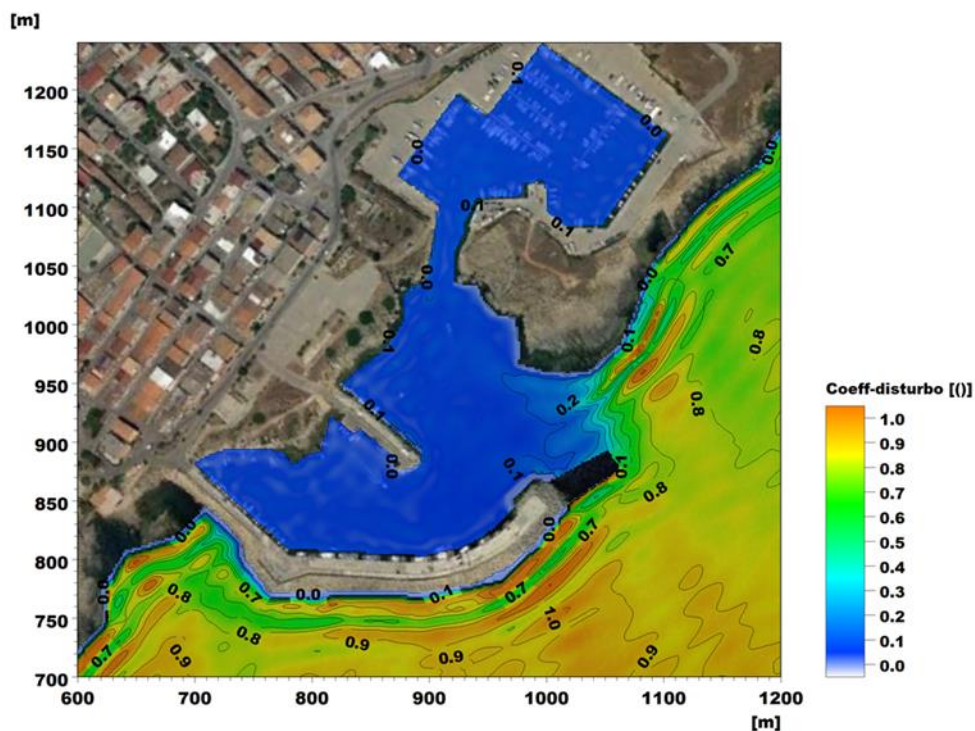


Figura 9-52 Stato di progetto – stagione estiva: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l’onda E11, onda proveniente dal settore 120°N-140°N

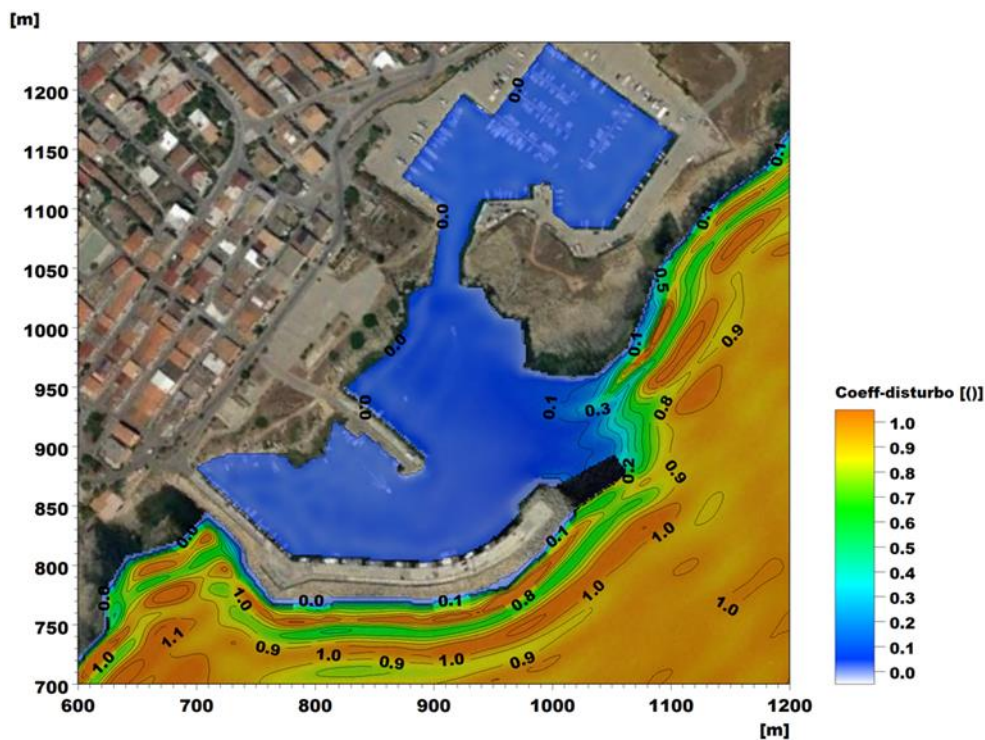


Figura 9-53 Stato di progetto – stagione estiva: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l’onda E12, onda proveniente dal settore 140°N-160°N

RELAZIONE GENERALE

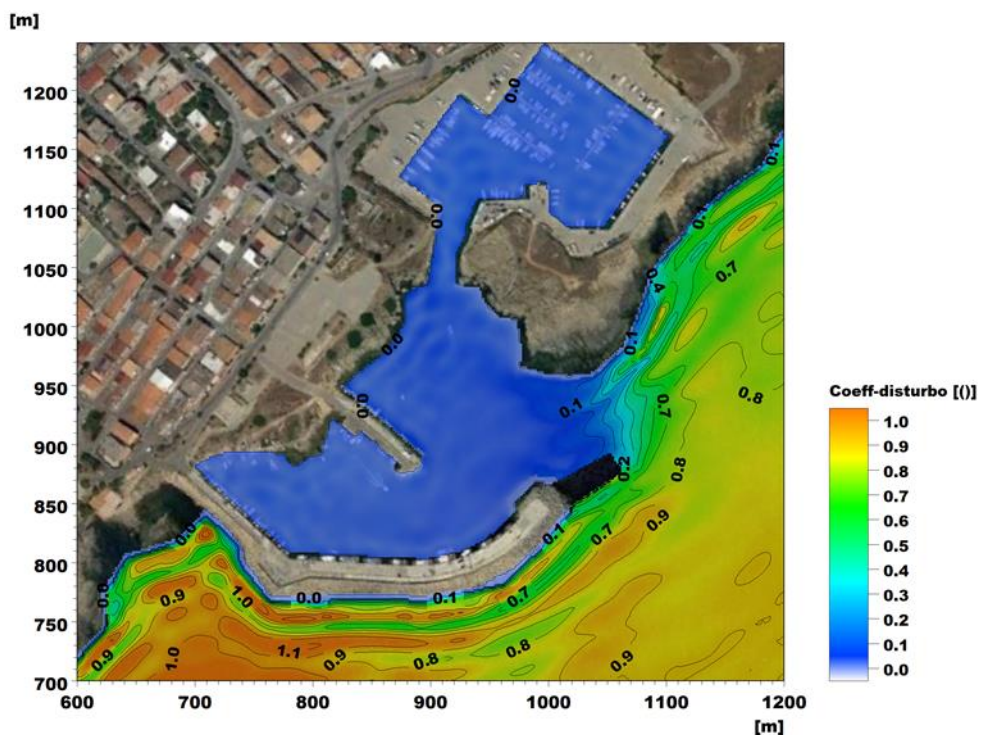


Figura 9-54 Stato di progetto – stagione estiva: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l’onda E13, onda proveniente dal settore 160°N-180°N

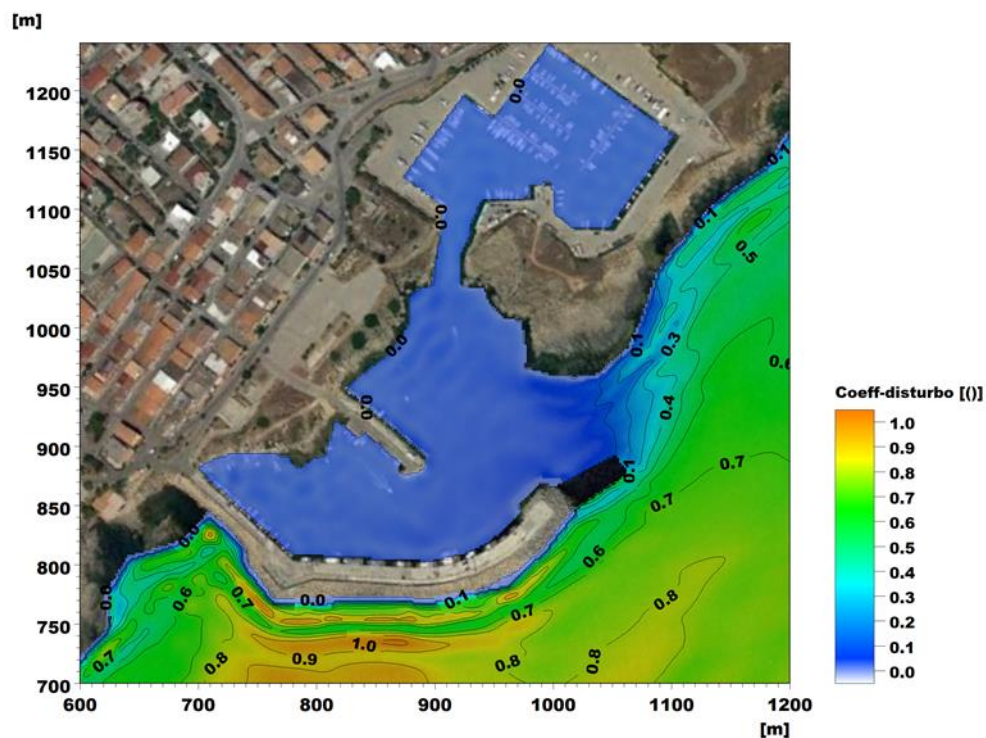


Figura 9-55 Stato di progetto – stagione estiva: distribuzione del coefficiente di disturbo per il bacino portuale per l’onda E14, onda proveniente dal settore 180°N-200°N

RELAZIONE GENERALE

La Tabella 9-14 presenta, per ciascuna area individuata, per lo stato di progetto con riferimento al periodo estivo, il numero totale di giorni per cui risulta superato il valore soglia indicato dal PIANC.

Tabella 9-14 Stato Progetto-stagione estiva: numero giorni/anno di superamento del valore soglia di 0.15 m.

Zona di riferimento	Numero giorni di superamento [gg]				TOTALE
	Onda E11	Onda E12	Onda E13	Onda E14	
	Settore 120°-140°	Settore 140°-160°	Settore 160°-180°	Settore 180°-200°	
Area 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Area 2	0.0	0.09	0.01	0.0	0.1
Area 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Area 4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Nel periodo estivo risultano verificate, per tutte le zone di riferimento del bacino portuale di Le Castella, anche le condizioni di comfort.

9.10 Ricambio idrico all'interno dei bacini portuali

La qualità delle acque interne ai bacini portuali è strettamente collegata alla circolazione idrica all'interno dei bacini stessi: una buona circolazione, indotta dalla marea o da particolari condizioni meteomarine, favorisce il ricambio delle acque, disperdendo rapidamente eventuali inquinanti presenti all'interno del porto e limitando fenomeni di riduzione dell'ossigeno disciolto.

Come evidenziato dai risultati modellistici dell'agitazione interna al bacino portuale di Le Castella (rif. capitolo 9, relazione idraulico-marittima "C.01"), l'azione penetrativa del moto ondoso, in particolare per le direzioni di provenienza comprese tra 140°N e 160°N (settore dominante sottocosta), risulta particolarmente intensa tanto da condizionare l'operatività di alcune aree alla sola stagione estiva. Oltre alla darsena turistica, già provvista di un sistema di collegamento con il mare aperto per il ricambio idrico, si escludono quindi analoghe problematiche nelle aree limitrofe all'imboccatura, soggette ad una frequente naturale miscelazione dei volumi.

Per la valutazione dell'idrodinamismo nell'area più interna del bacino portuale, in prossimità della radice del molo sopraflutto, si è provveduto invece a simulare alcune onde di altezza variabile, provenienti dai settori 120°N-140°N e 140°N-160°N, con l'utilizzo del modello di dettaglio accoppiato onda-corrente (rif. capitolo 8, relazione idraulico-marittima "C.01"). Dalle mappe di intensità di corrente si evince la contestuale formazione di un flusso a tergo della diga sopraflutto che corre adiacente alla struttura sino alla radice del molo stesso, ove tende poi ad invorticarsi in una debole corrente con direzione oraria. Per l'evento di onda caratterizzato da $H_s=2\text{m}$ e $MWD=130^\circ\text{N}$ (Figura 1) tale flusso raggiunge velocità dell'ordine dei 8-15 cm/s.

Nella piena funzione di protezione del moto ondoso, la configurazione progettuale non preclude quindi un debole circolazione interna.

RELAZIONE GENERALE

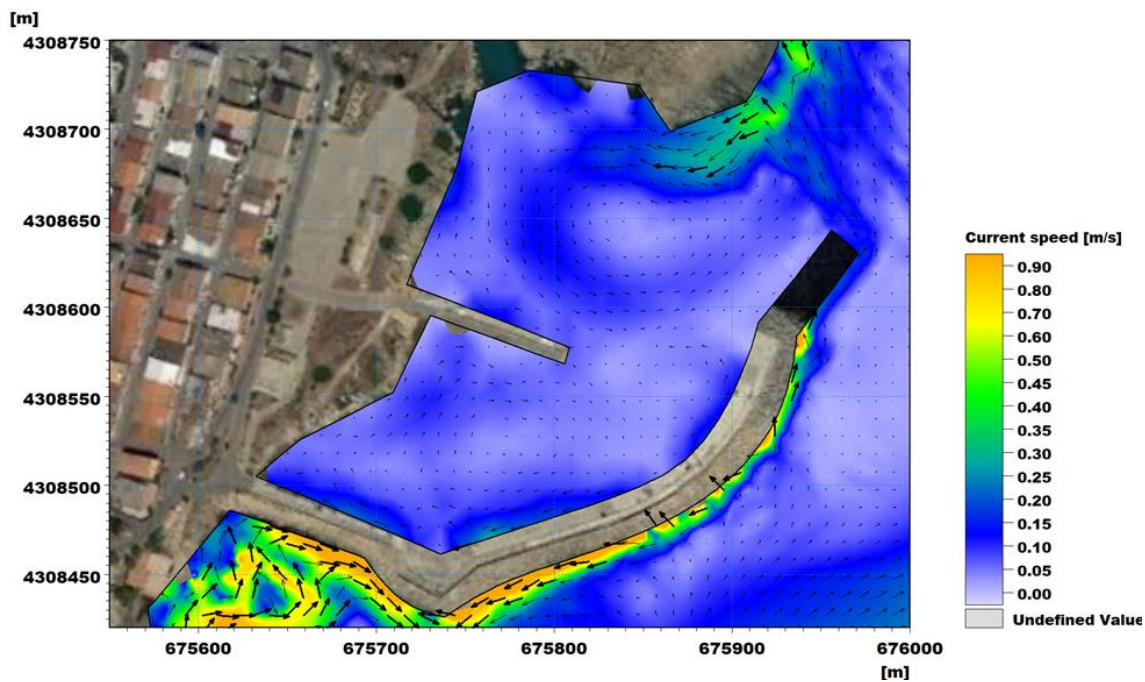


Figura 1 – Mappa della distribuzione delle intensità di correnti all'interno del bacino portuale di Le Castella nella configurazione di progetto per un evento con $H_s=2\text{m}$ e $MWD=130^\circ\text{N}$

10 SINTESI E COMMENTI

Il presente elaborato riporta tutte le attività di modellazione numerica svolte a supporto del Progetto Definitivo dei lavori di "Potenziamento infrastrutturale del Porto Regionale di Le Castella".

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

In assenza di serie storiche multi-decadali di dati osservati sulle quali basare una affidabile analisi statistica del moto ondoso al largo, si è fatto riferimento ad un dataset di ricostruzione modellistica (wind-wave hindcast), utilizzando a tale scopo il Mediterranean Wind Wave Model (MWM), dataset di vento e onda ad alta risoluzione, robusto e validato, prodotto da DHI e HyMOLab (Università di Trieste) che mette a disposizione dati orari per 40 anni (1979-2018) ad una risoluzione spaziale di alcuni km.

La serie storica quarantennale di onda al largo è stata quindi propagata verso costa attraverso la predisposizione del modello d'onda bidimensionale MIKE 21 SW (Spectral Waves) permettendo la caratterizzazione del clima ondoso in prossimità dell'area portuale oggetto di studio

Nel punto al largo è stata inoltre predisposta un'analisi statistica direzionale delle altezze d'onda per assegnato tempo di ritorno, che ha permesso di definire una serie di condizioni d'onda oggetto di ulteriore modellazione finalizzata a supportare il dimensionamento delle nuove opere (in particolare l'allungamento del molo sopraflutto) in riferimento alle caratteristiche dell'onda di progetto e al livello marino di riferimento.

Si è quindi proceduto con l'analisi del moto ondoso all'interno del porto mediante l'utilizzo del modulo BW (Boussinesq Waves) di MIKE 21, per verificare il comportamento del layout portuale (attuale e di progetto) in termini di protezione dall'agitazione ondosa interna, in riferimento a diverse condizioni selezionate prendendo a riferimento le indicazioni presenti nel documento "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici", AIPCN-PIANC.

La modellazione numerica ha permesso una significativa ottimizzazione delle opere previste dal progetto posto a base di gara, con particolare riferimento alla loro efficacia: in particolare, la nuova scogliera emersa prevista in prossimità dell'imboccatura portuale, anche in considerazione dell'impatto paesaggistico e di ulteriori vincoli autorizzativi, è stata oggetto di attenta e dedicata analisi al fine di quantificare l'effettivo livello di protezione dell'opera sulla penetrazione del moto ondoso all'interno dello specchio acqueo portuale. L'approfondimento modellistico ha sancito l'opportunità di non prevedere tale scogliera nel nuovo layout portuale.

Complessivamente, l'intervento in progetto si dimostra efficace e fortemente migliorativo in riferimento alle criticità di agitazione ondosa interna oggi presenti, sia in riferimento alle condizioni di comfort, sia a quelle di sicurezza e limite indicate dal PIANC. Alcuni superamenti dei valori soglia si osservano ancora per il bacino più prossimo all'imboccatura, per il quale si suggerisce di limitare l'operatività al solo periodo estivo (Aprile-Settembre).

11 RIFERIMENTI

- Progetto Preliminare del *Potenziamento infrastrutturale del Porto Le Castella*, Marzo 2017
- Contento, G., Donatini, L., Lupieri, G., Pedroncini, A. and Cusati, L. *MWM: A 35 years wind & wave high resolution hindcast dataset and an operational forecast service for the Mediterranean Sea*. Proceedings of 18th International Conference on Ships and Shipping Research NAV'2015, pp. 116-125, ISBN 978-88-940557-1-9.
- MIKE by DHI 2020. *MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark.
- MIKE by DHI 2020. *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Sand Transport Module. Scientific documentation*. DHI, Hørsholm, Denmark.
- CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - www.jeppesen.com/marine/commercial/professional/
- Geonautics S.r.l., "*Rilievo topo-batimetrico mediante sistema apr e multibeam echo sounder del porto, delle aree costiere limitrofe e dei fondali circostanti*", elaborato MD7540-RTC_P1492_Dinamica_CiroMarina_Rev0, agosto 2019
- AIPCN-PIANC, *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*

MWM: Mediterranean Wind Wave Model

General description of the models' chain

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

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

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

CFSR Dataset

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

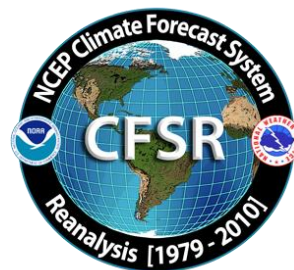


Figure A.1

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

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

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

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

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

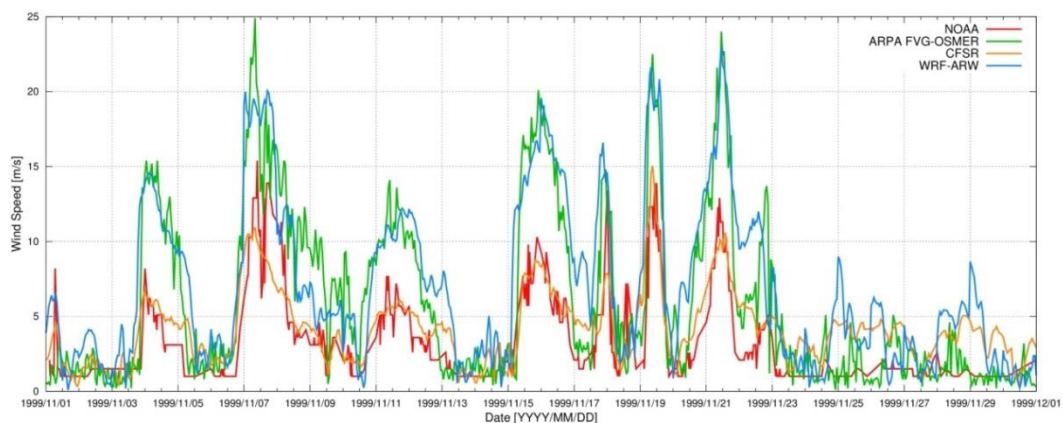


Figure A.2 Comparison between measured wind speed at two ground neighbor (few meters from each other) stations in Trieste (Italy - Northern Adriatic Sea) from the database of NOAA

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

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

WRF-ARW meteorological model

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

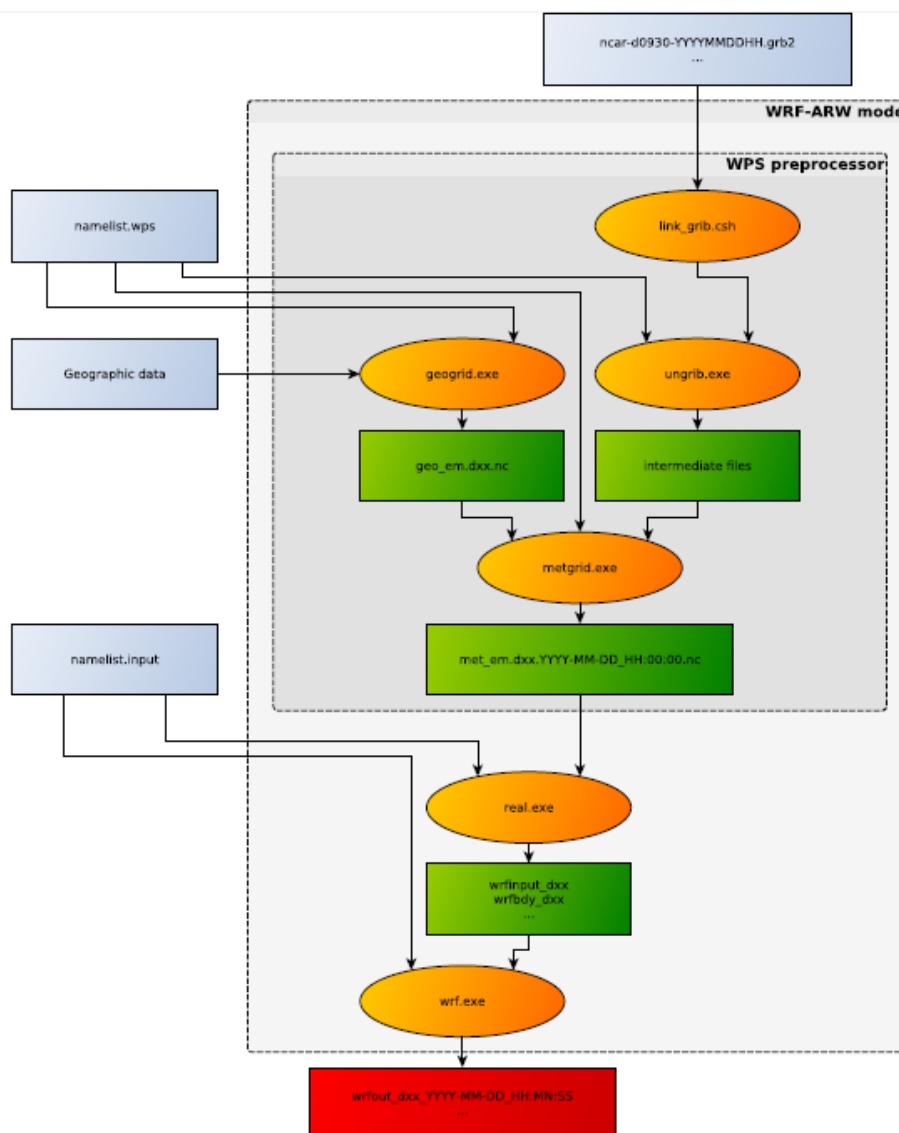


Figure A.3 Working scheme of the WRF-ARW model.

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

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

The two-steps set-up started with the meteorological model *WRF-ARW*, adopting different configurations (domain size, resolution, run length, spin-up time) and comparing the wind speed and direction with observational data from ground stations. Since the *CFRS* (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).

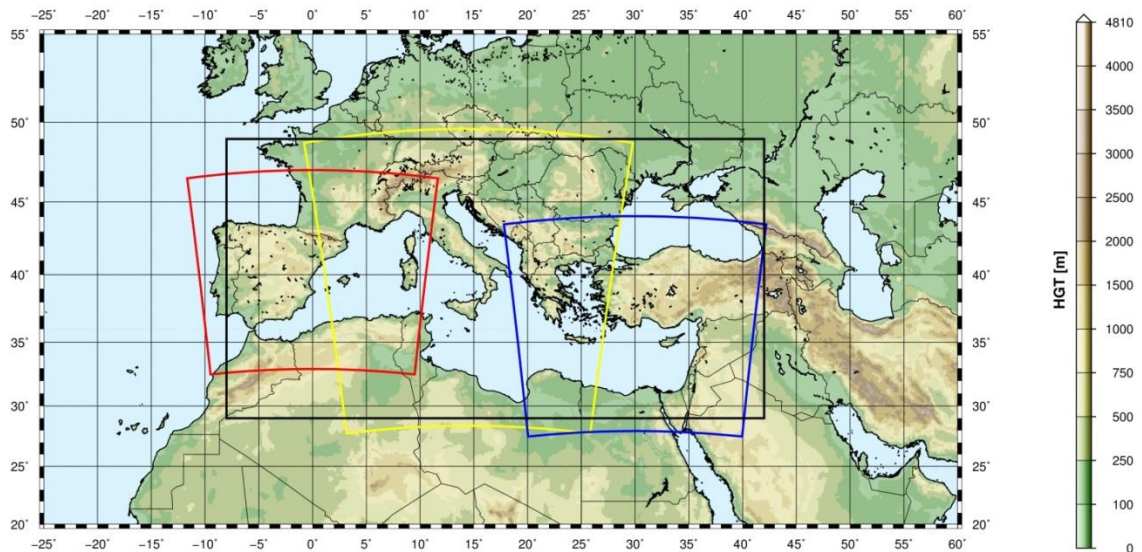


Figure A.4 WRF-ARW domains (red=domain MEW, yellow=domain MEC, blue=domain MEE) and interpolation/blending domain (black line).

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.

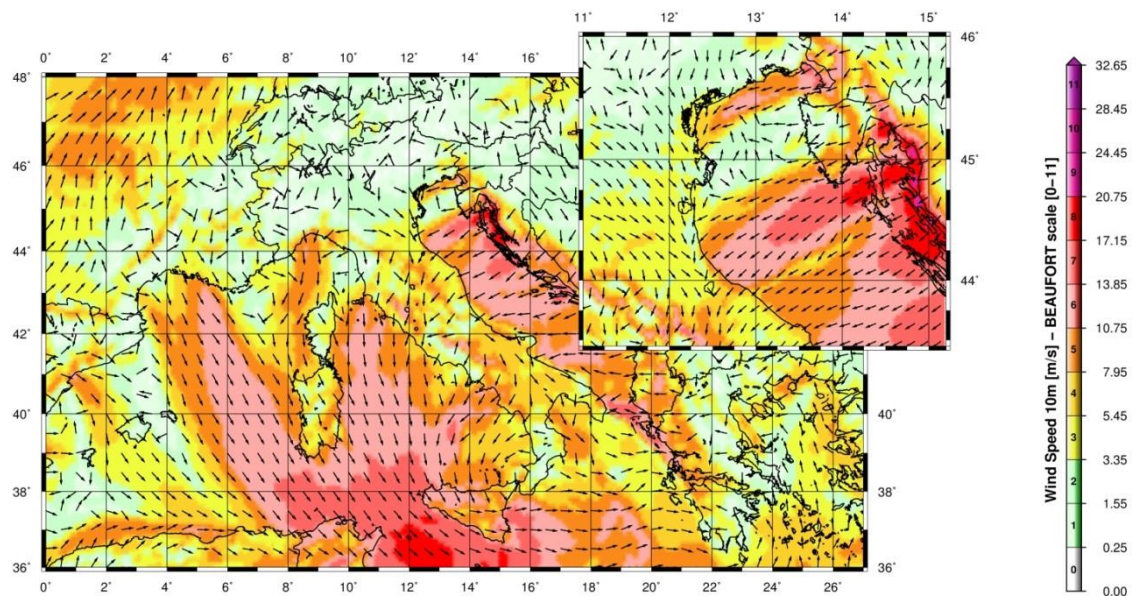


Figure A.5 A typical winter wind pattern over the Mediterranean Sea (from the present simulations, 5 December 2009). The well-known 3 major narrow gates of the “Bora” wind over the Adriatic Sea are well captured by the model, i.e. Trieste (Italy), Rijeka and Sibenik (Croatia). The upper-right figure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

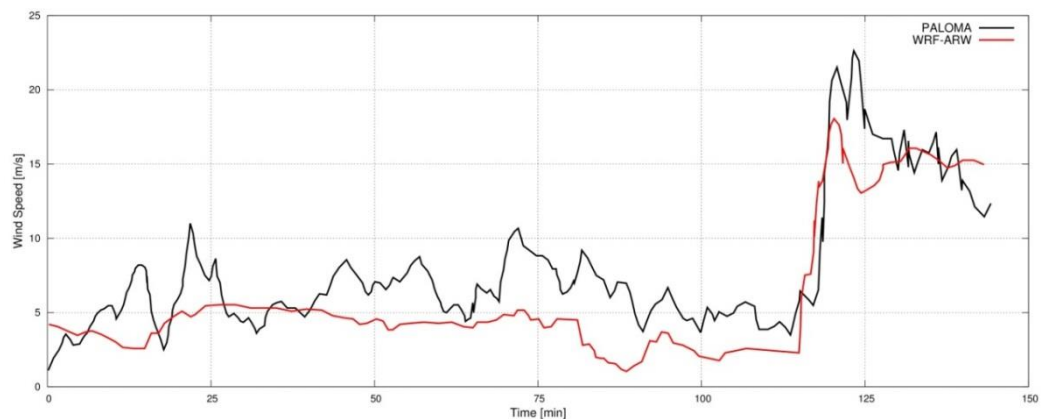


Figure A.6 Time series of the wind speed during a squall event occurred on August 2008 in the Gulf of Trieste. The squall lasts about 10 min reaching over 20 m/s from an almost calm situation. The red line corresponds to the results of the operational forecast meteorological model *WRF-ARW*. The black 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° , when approaching the coast the spatial resolution increases up to around 0.03° .

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.

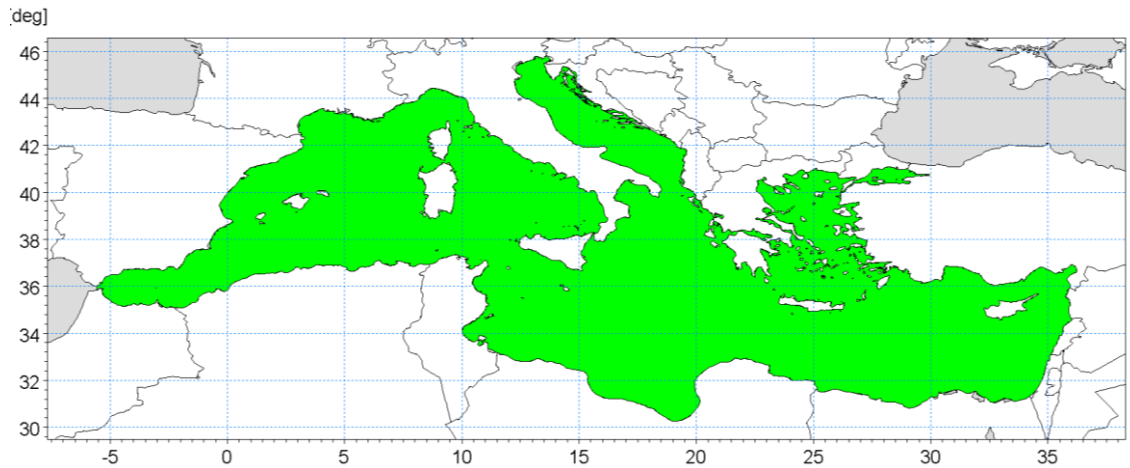


Figure A.7 Wave model domain filled in green

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° (about 10 Km) is used for offshore areas;
- a finer resolution of 0.03° (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.

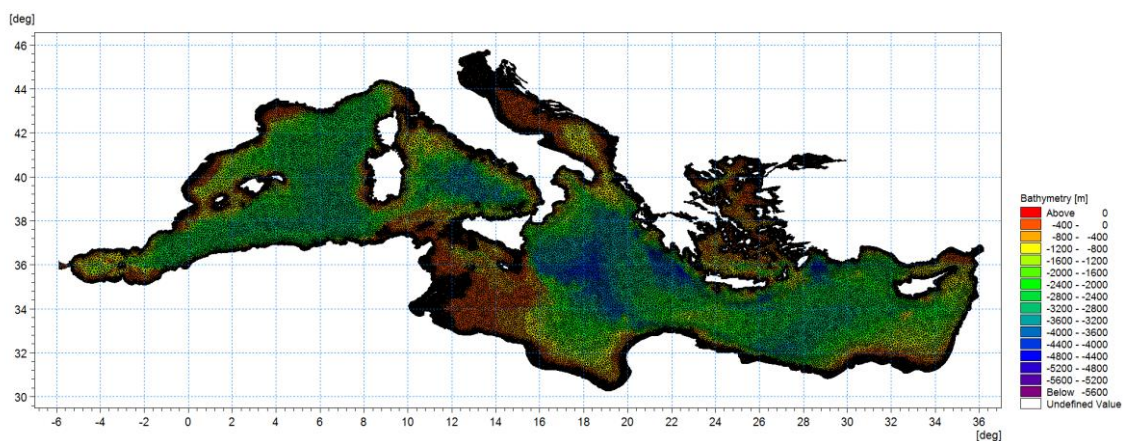


Figure A.8 - Mediterranean wave model computational mesh

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

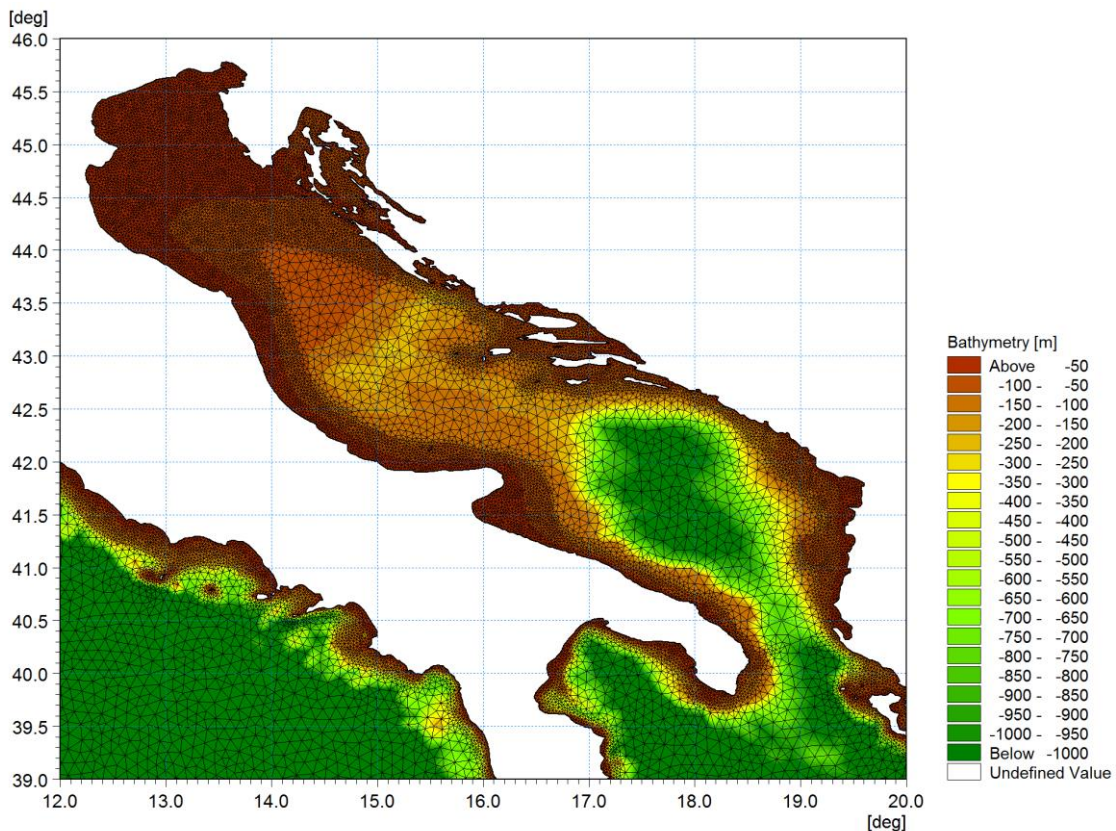


Figure A.9 - Detail of the mesh – Adriatic Sea

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.

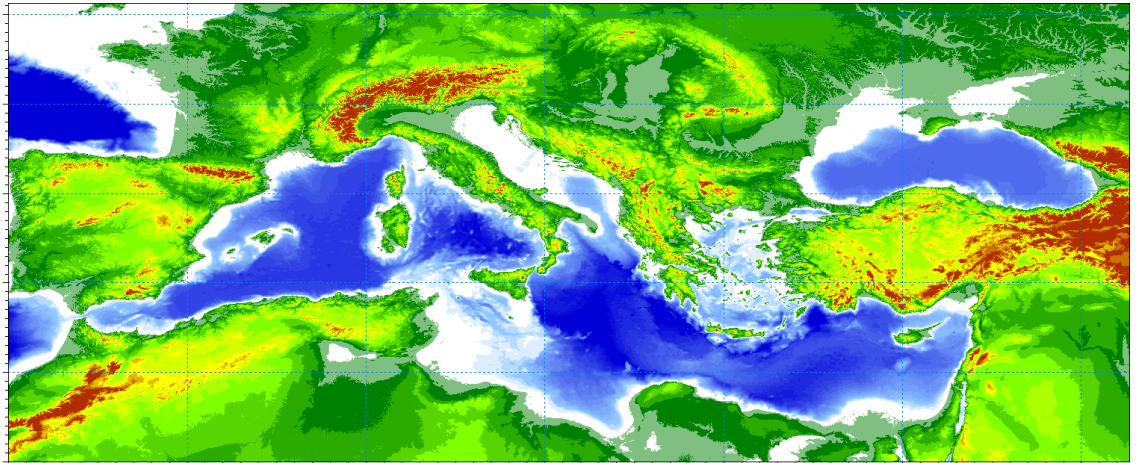


Figure A.10 - Scatter bathymetry data derived from GEBCO_08 database

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

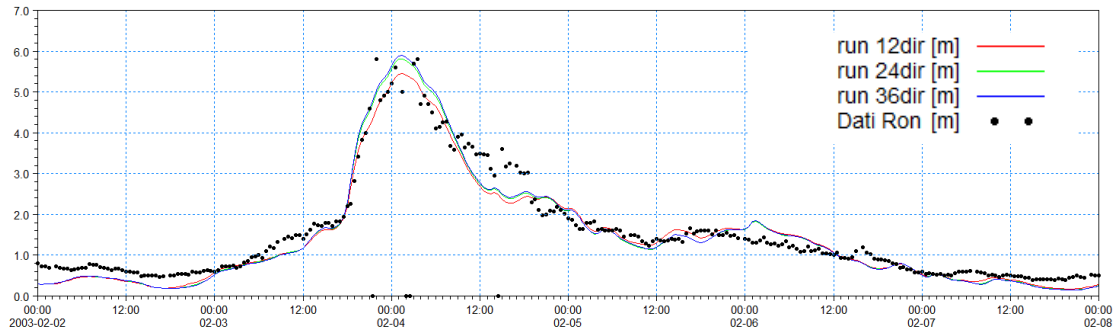


Figure A.11 - Time series of wave height at La Spezia buoy location for 3 different numbers of discrete directions

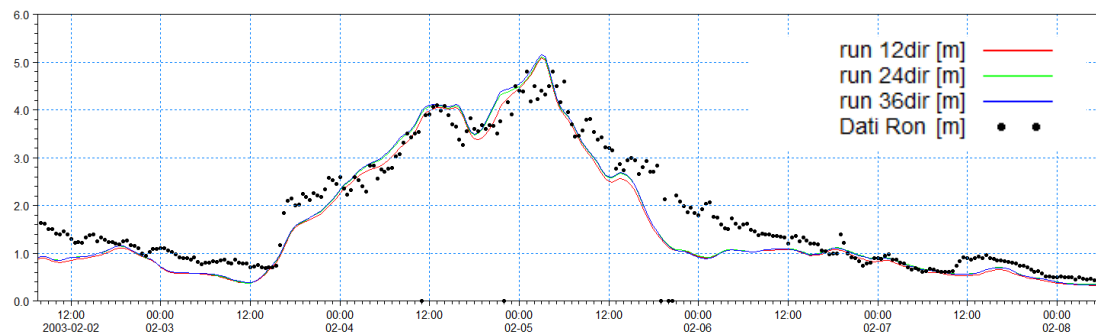


Figure A.12 - Time series of wave height at Ponza buoy location for 3 different numbers of discrete directions

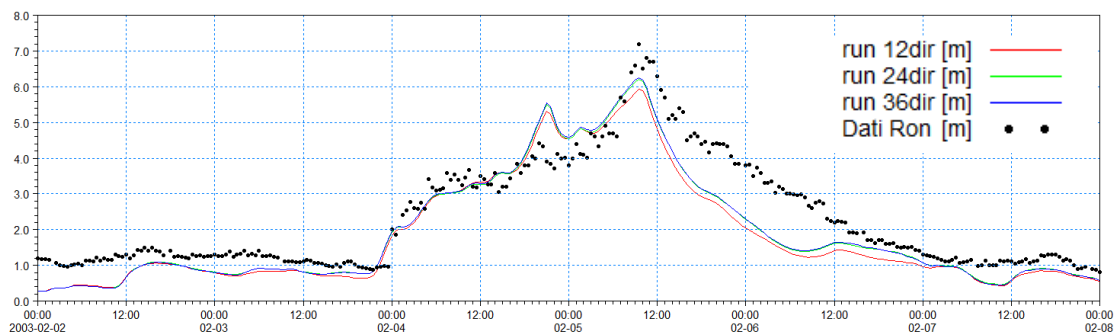


Figure A.13 - Time series of wave height at Cetraro buoy location for 3 different numbers of discrete directions

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° .

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.

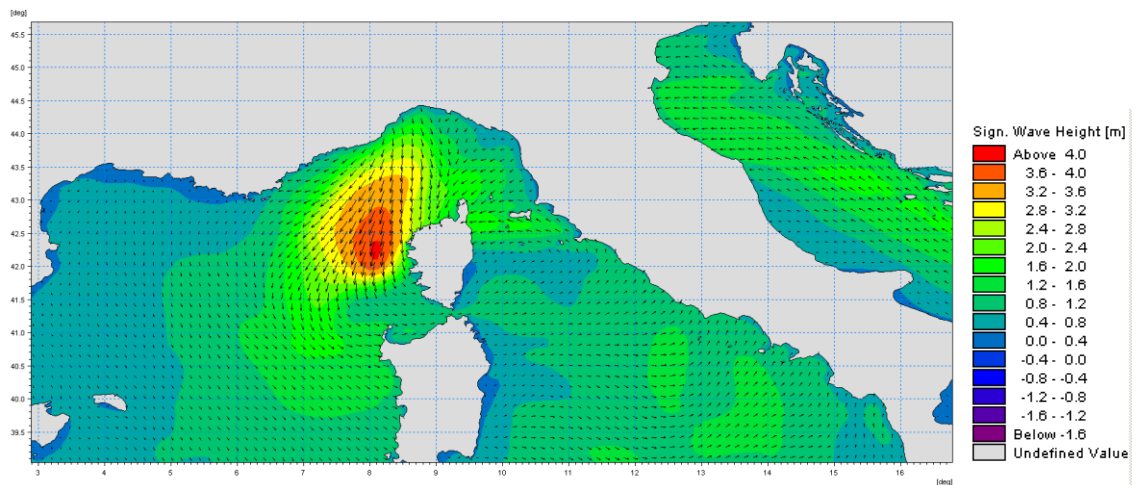


Figure A.14 Phase averaged results: Field of significant wave height and direction

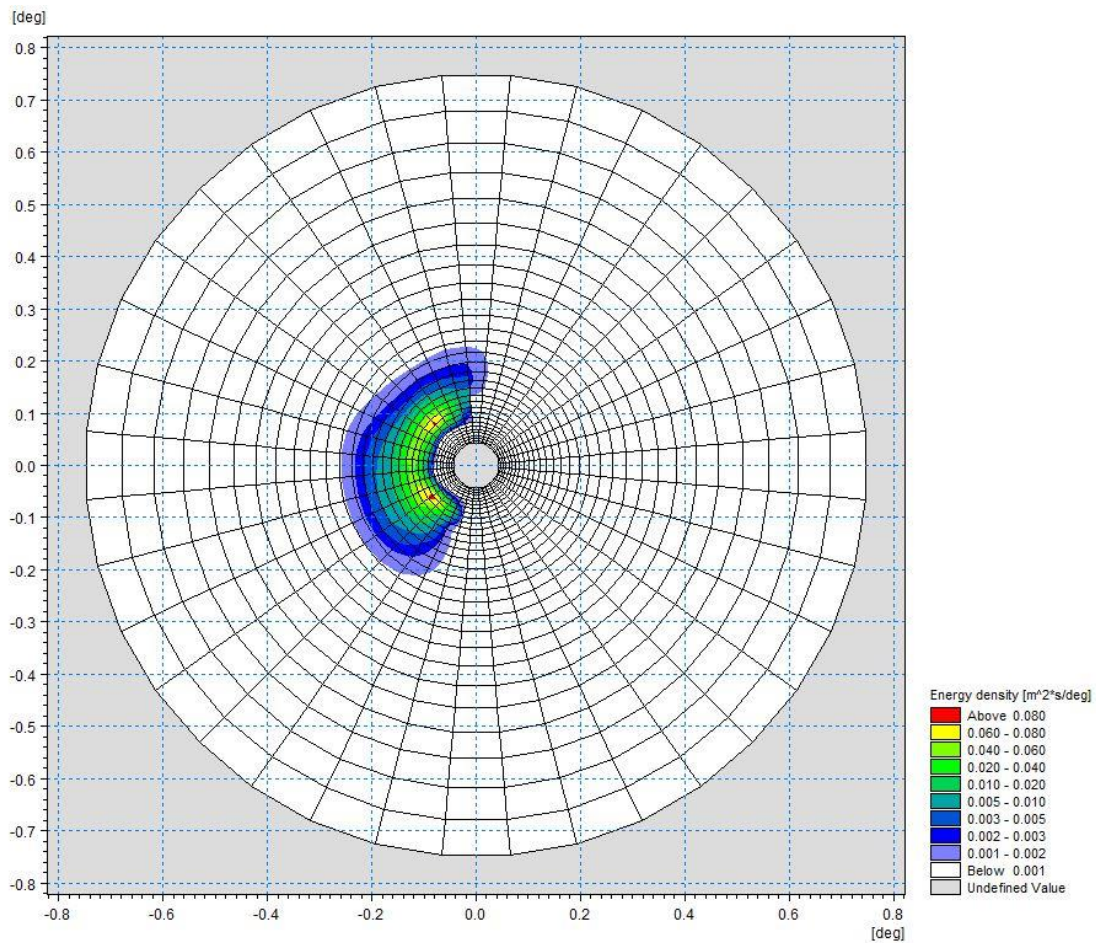


Figure A.15 Polar plot of spectral results. Wave energy density (coloured contours) as a function of directions (angular coordinate) and frequencies (radial coordinate)

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, 16th 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 21th 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.

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 9th 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 11th 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/), 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

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

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

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

Sorensen, O.R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M. and Sorensen, L.S., 2004: A Third Generation Spectral Wave Model Using an Unstructured Finite Volume Technique. In Proceedings of the 29th 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

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 29th 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

CM-93 Edition 3.0, CM-93/3 - 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>

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:

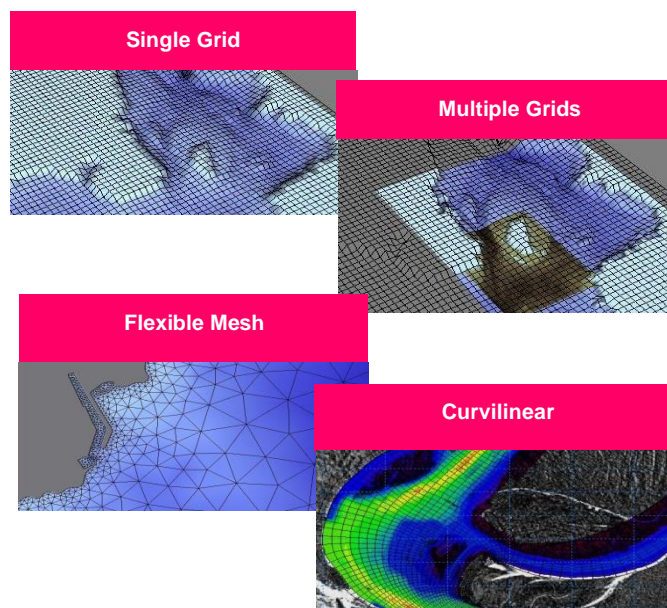
- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi,
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo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

Breve descrizione dei moduli MIKE 21	
Modulo	Descrizione
PP (Pre and Post Processing)	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.
HD (Hydrodynamics)	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.
AD (Advection – Dispersion)	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.
ST (Sand Transport)	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.
MT (Mud Transport)	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.
SM (Shoreline Morphology)	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.
OS (Oil Spill)	Simula la dispersione ed il trasporto di sostanze oleose in corpi idrici, considerandone i processi di trasformazione e decadimento.
PA/PT (Particle Tracking)	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.
SW (Spectral Waves)	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.
BW (Boussinesq Wave)	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.
MA (Mooring Analysis)	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.
ECOLab (Ecological Modelling)	Modulo avanzato per lo studio della qualità delle acque ed idro - ecologia in presenza di reazioni, decadimenti complessi, eutrofizzazione e trasporto di metalli pesanti.
ABMLab	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:

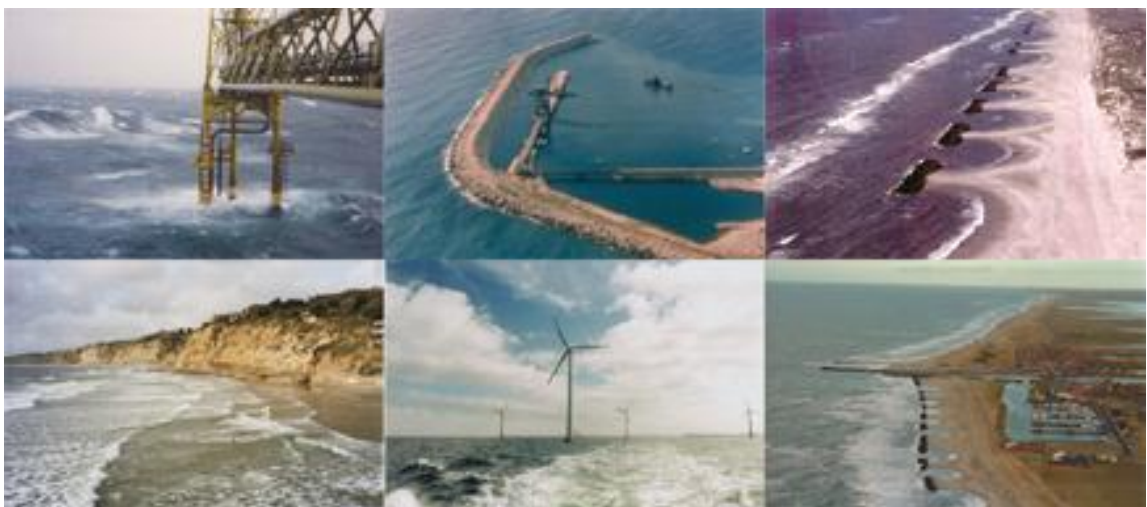
- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

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.

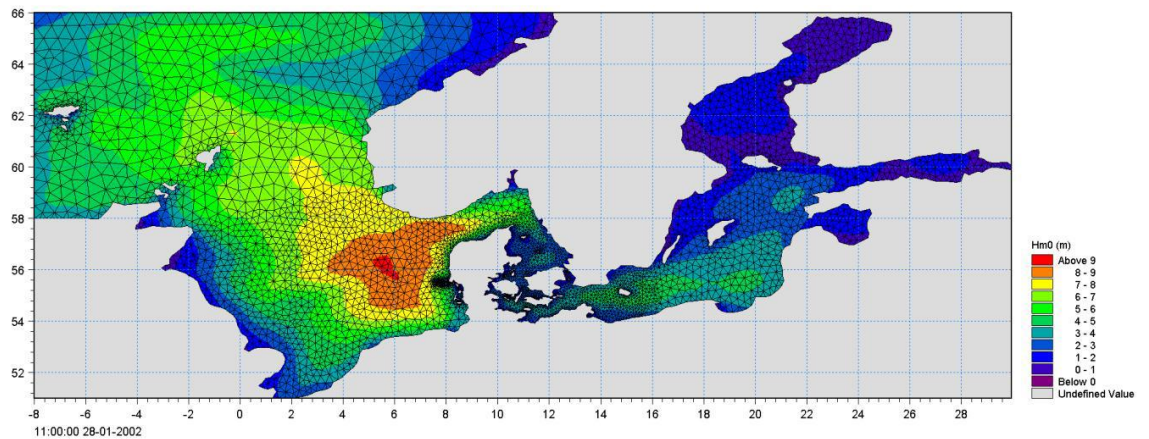
Il modello, nella formulazione “fully spectral”, include i seguenti fenomeni fisici:

- 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, θ, σ) . 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 θ , 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:

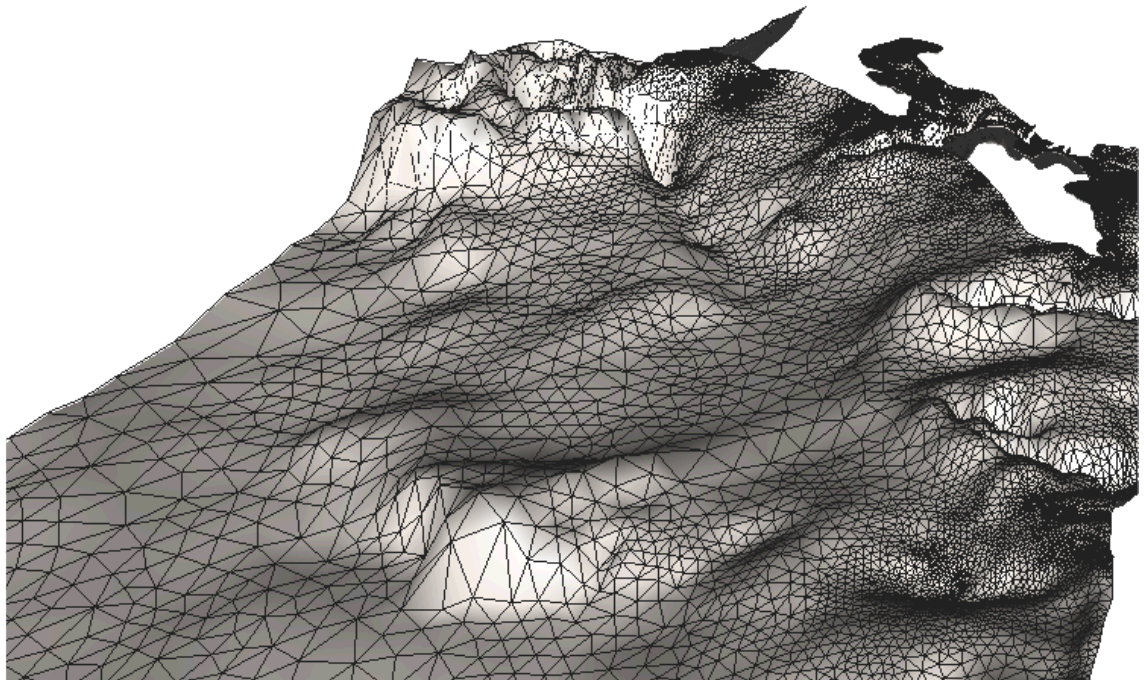
$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^{\infty} \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

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.

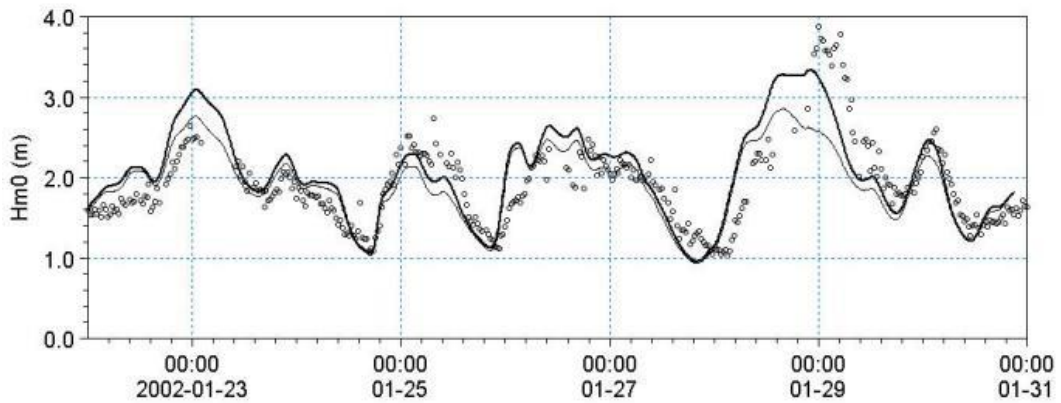
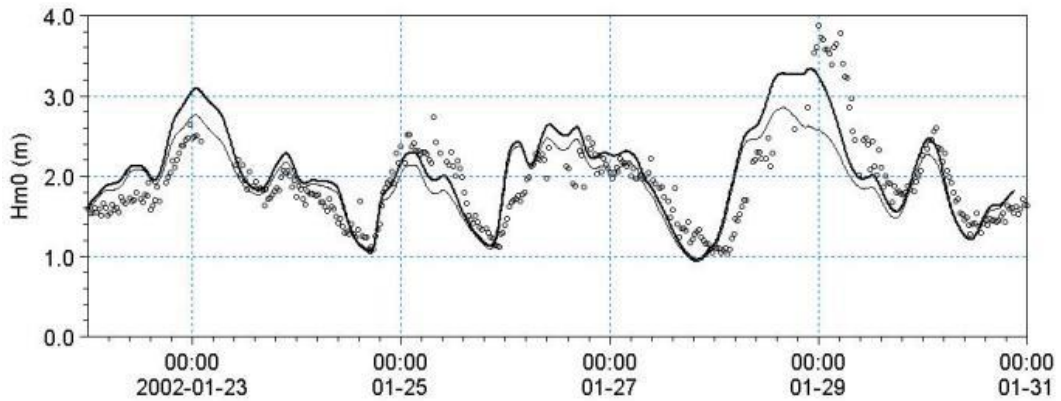
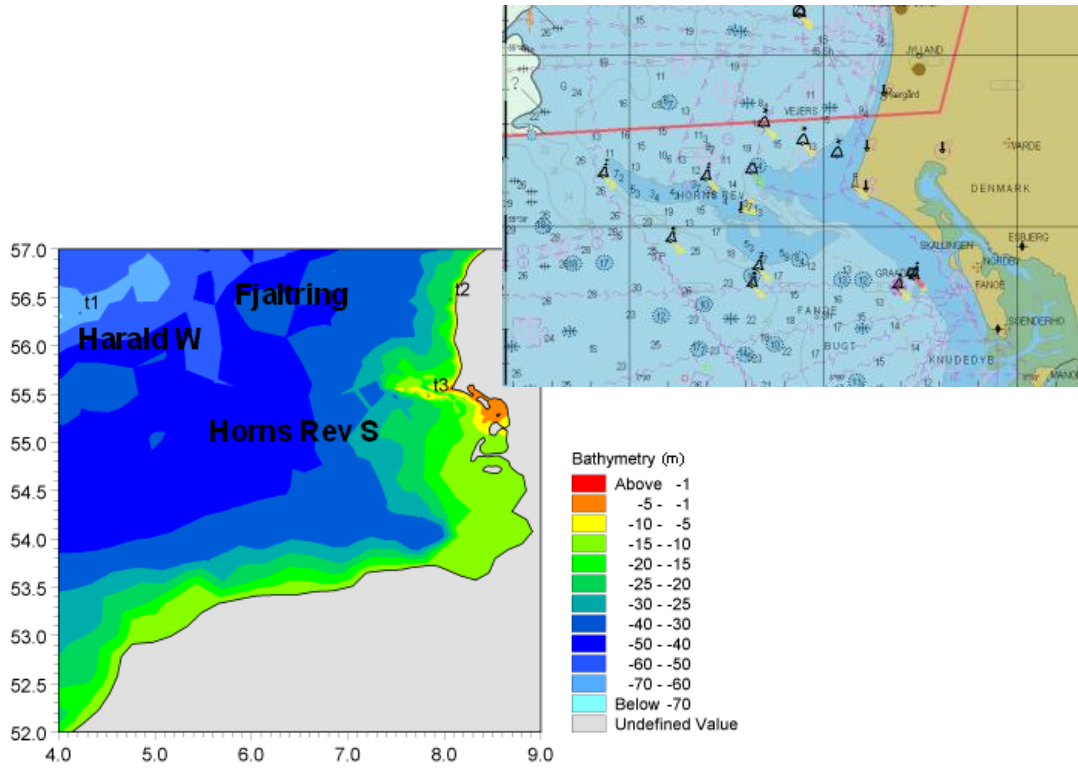
La discretizzazione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della "wave action" è fatta attraverso un metodo esplicito in multi frequenza.



INPUT AL MODELLO

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

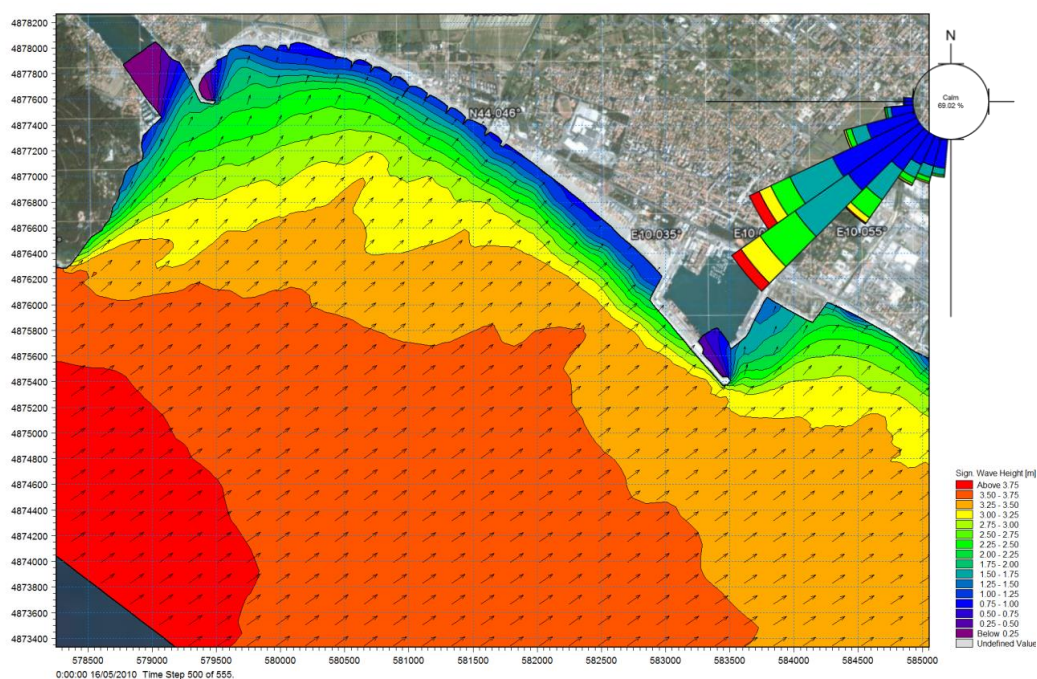
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);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



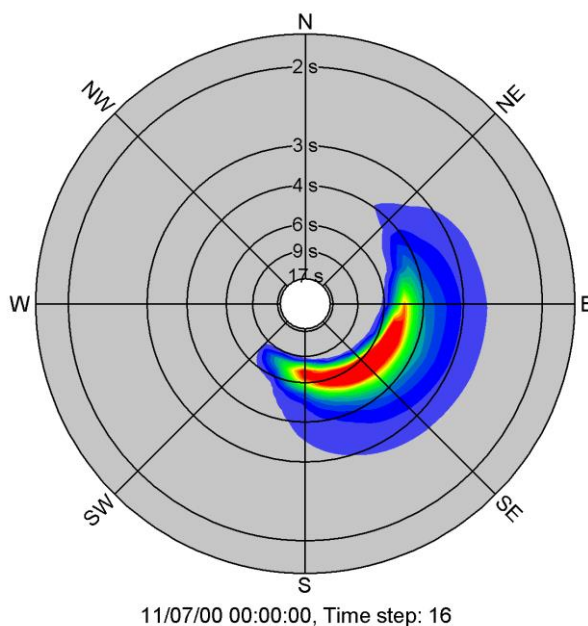
OUTPUT DEL MODELLO

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 σ , 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:

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

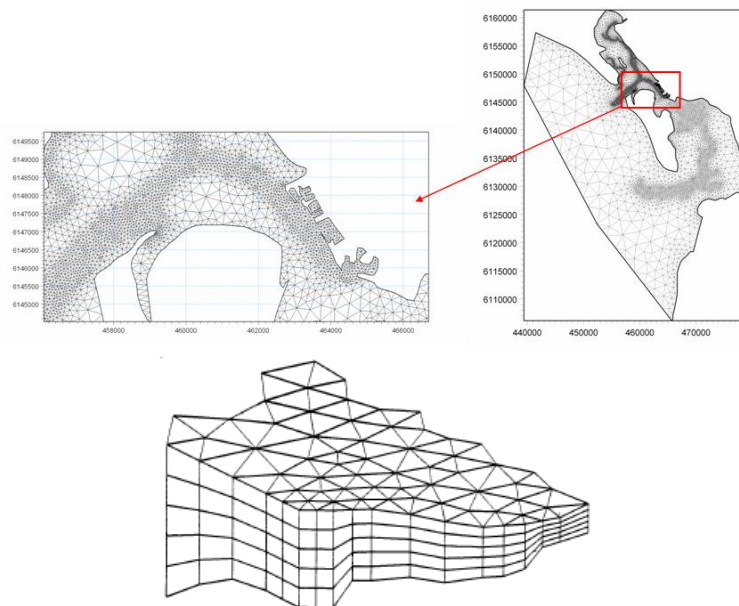
Le equazioni per l'idrodinamica bidimensionale sono ottenute integrando le equazioni lungo la verticale. Possono essere considerati anche gli scambi termici con l'atmosfera.

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.

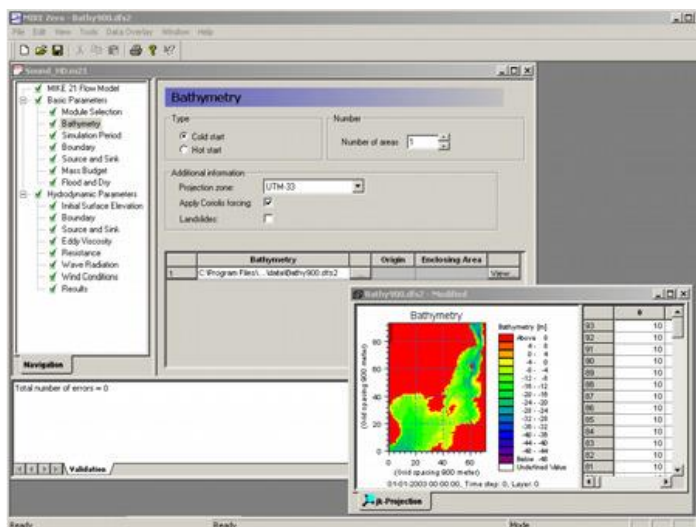


Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri.

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).

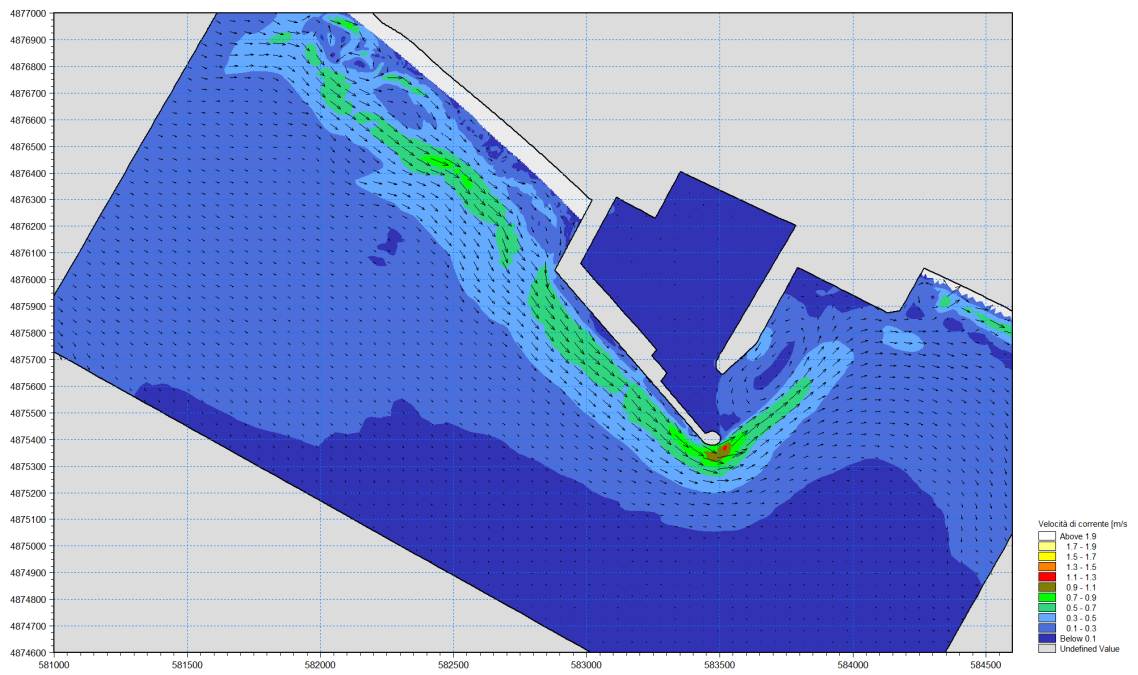


OUTPUT DEL MODELLO

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.

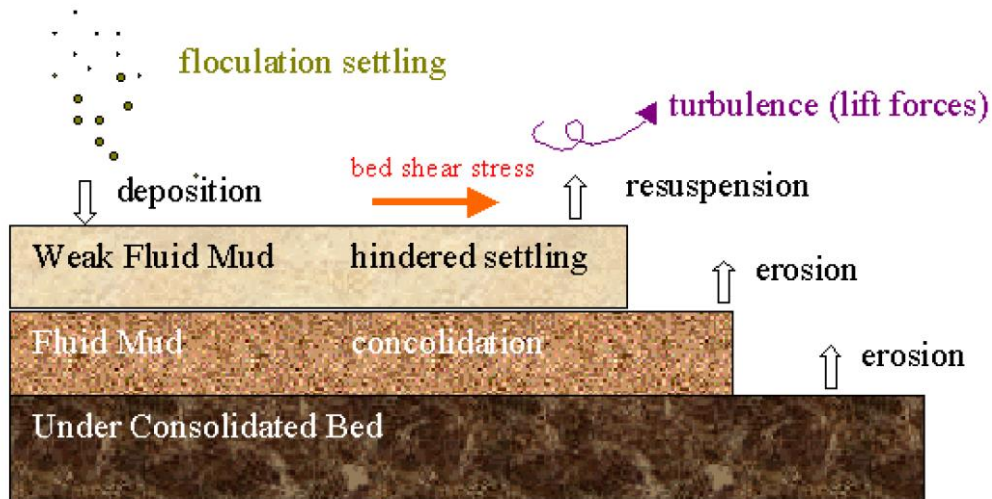
Il modulo MT calcola il trasporto solido sulla base delle simulazioni idrodinamiche effettuate con il modulo HD ed eventualmente delle simulazioni di moto ondoso effettuate con SW. Per effettuare simulazioni a fondo mobile è possibile includere il feedback degli effetti dell'idrodinamica sulla batimetria 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*):

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

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 i'th scalar component (defined as the mass concentration)</i>
w_s^i :	<i>fall velocity</i>
σ_{Tx}^i :	<i>turbulent Schmidt number</i>
ν_{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 γ 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, τ_b è il "bed shear stress" mentre τ_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.

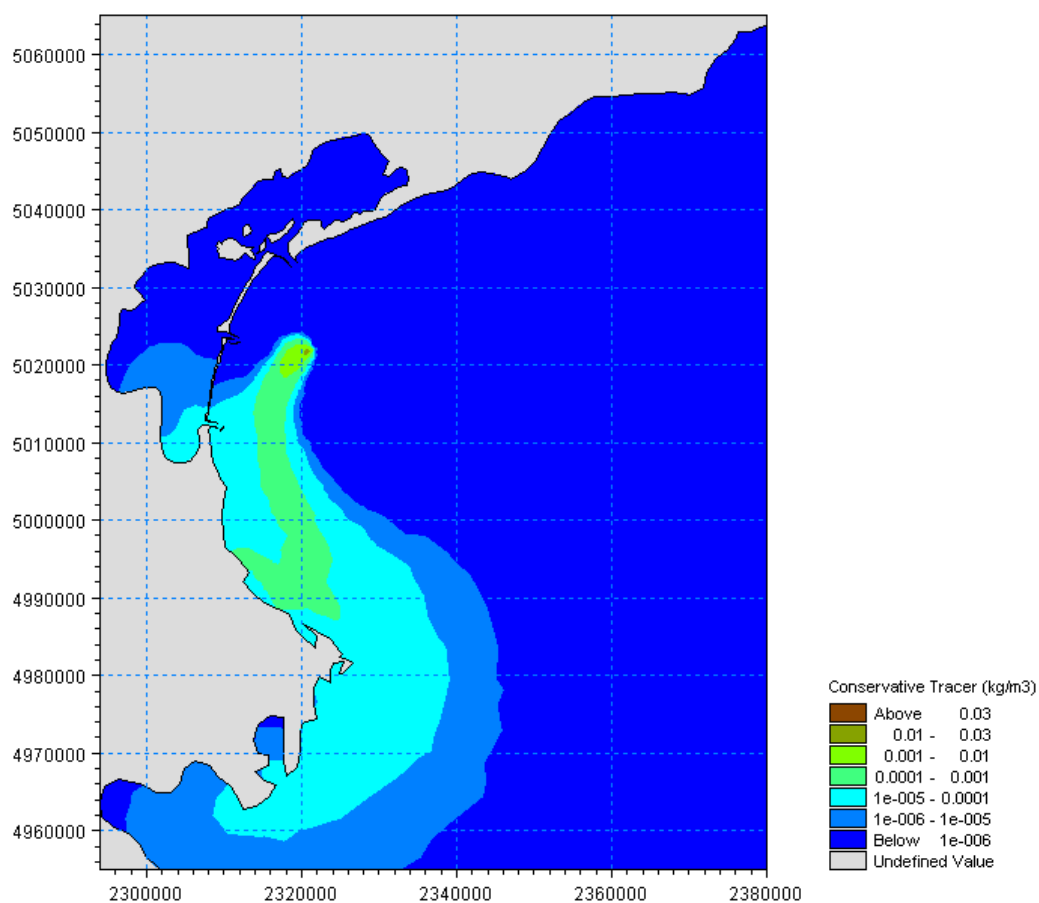
INPUT AL MODELLO

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)

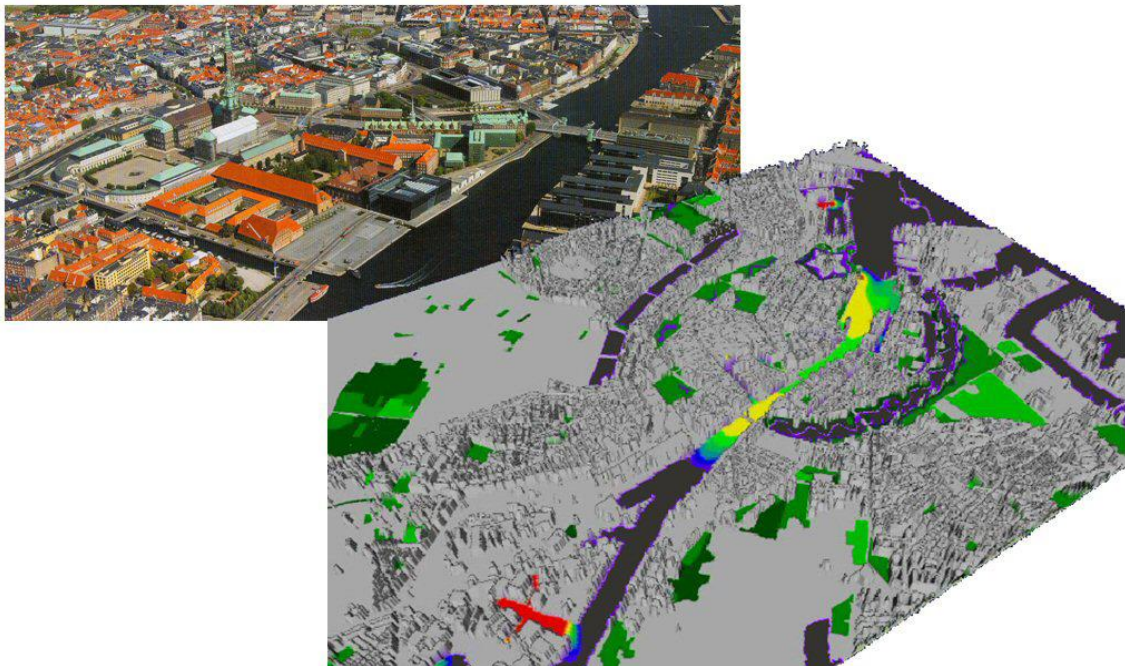
Il Modulo TR di MIKE 21 simula il comportamento di sostanze in sospensione o disciolte in acqua per effetto del flusso idrodinamico (avvezione) e dei processi di dispersione. Le sostanze possono essere conservative o non-conservative, organiche o inorganiche. Le reazioni di sostanze non-conservative 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.

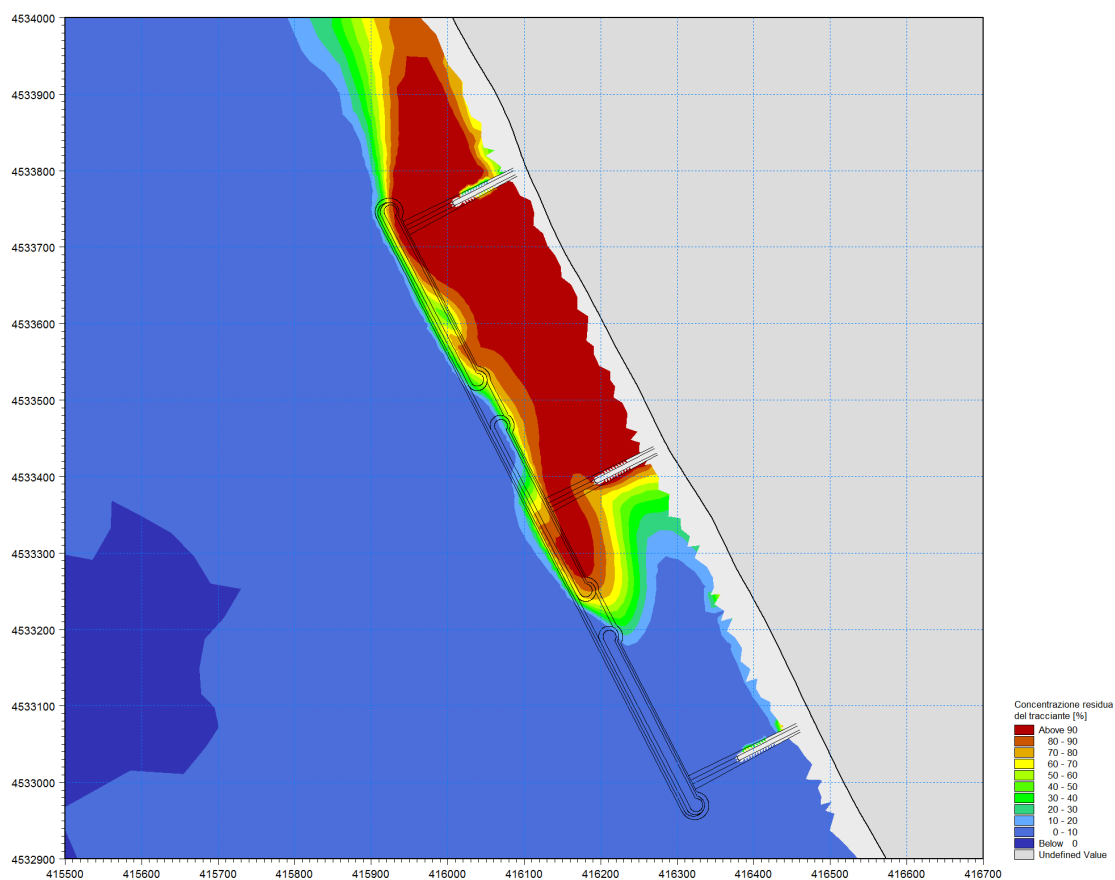
Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangolari o quadrilateri. L'integrazione temporale è effettuata utilizzando uno schema esplicito.

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 ξ 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 ψ_1 e ψ_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

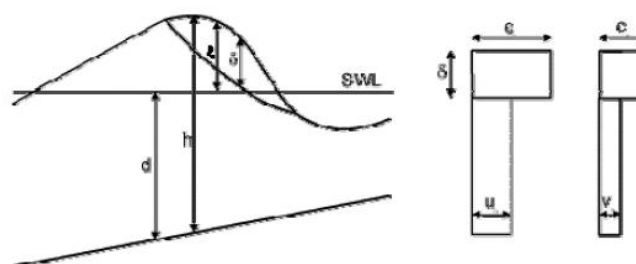
<i>P</i>	<i>flux density in the x-direction (m³/m/s)</i>
<i>Q</i>	<i>flux density in the y-direction (m³/m/s)</i>
<i>B</i>	<i>Boussinesq dispersion coefficient (-)</i>
<i>x, y</i>	<i>Cartesian co-ordinates (m)</i>
<i>t</i>	<i>time (s)</i>
<i>h</i>	<i>total water depth (=d+ξ)</i>
<i>d</i>	<i>still water depth (m)</i>
<i>g</i>	<i>gravitational acceleration (= 9.81 m/s²)</i>
<i>n</i>	<i>porosity (-)</i>
<i>C</i>	<i>Chezy resistance number (m^{0.5}/s)</i>
<i>α</i>	<i>resistance coefficient for laminar flow in porous media (-)</i>
<i>β</i>	<i>resistance coefficient for turbulent flow in porous media (-)</i>
<i>ξ</i>	<i>water surface elevation above datum (m)</i>

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:

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

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

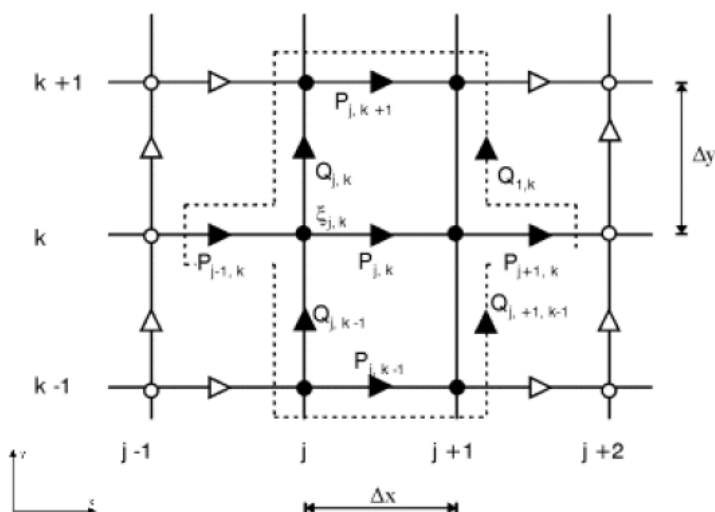
$$R_{yy} = \frac{\delta}{1 - \delta/h} \left(c_y - \frac{Q}{h} \right)^2$$



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.



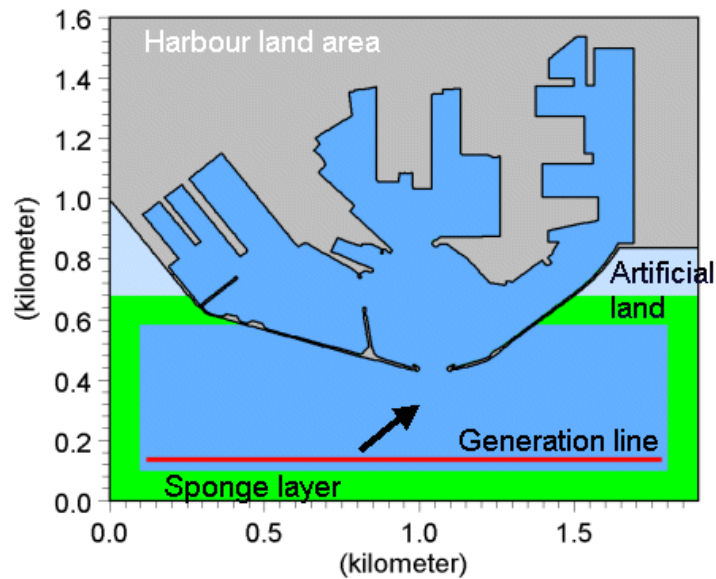
L'approssimazione alle differenze finite è effettuata direttamente a centro-cella, eccetto per i termini convettivi (Madsen and Sørensen 1992 e Madsen et al. 1997a). L'integrazione temporale è fatta utilizzando uno schema implicito non iterativo.

INPUT AL MODELLO

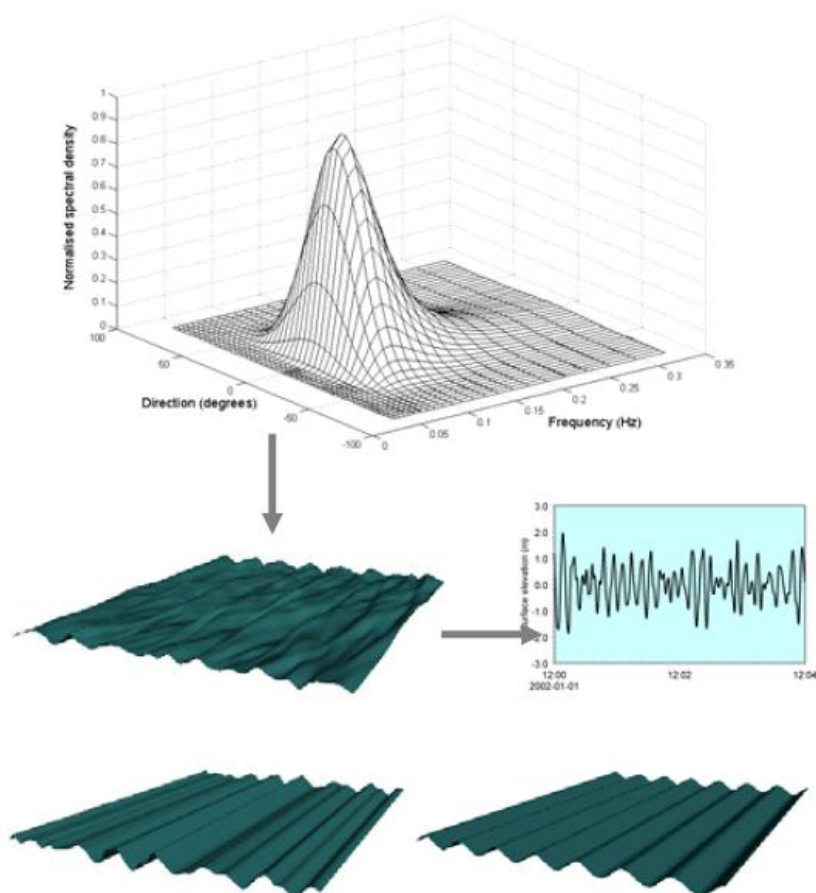
I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- 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.

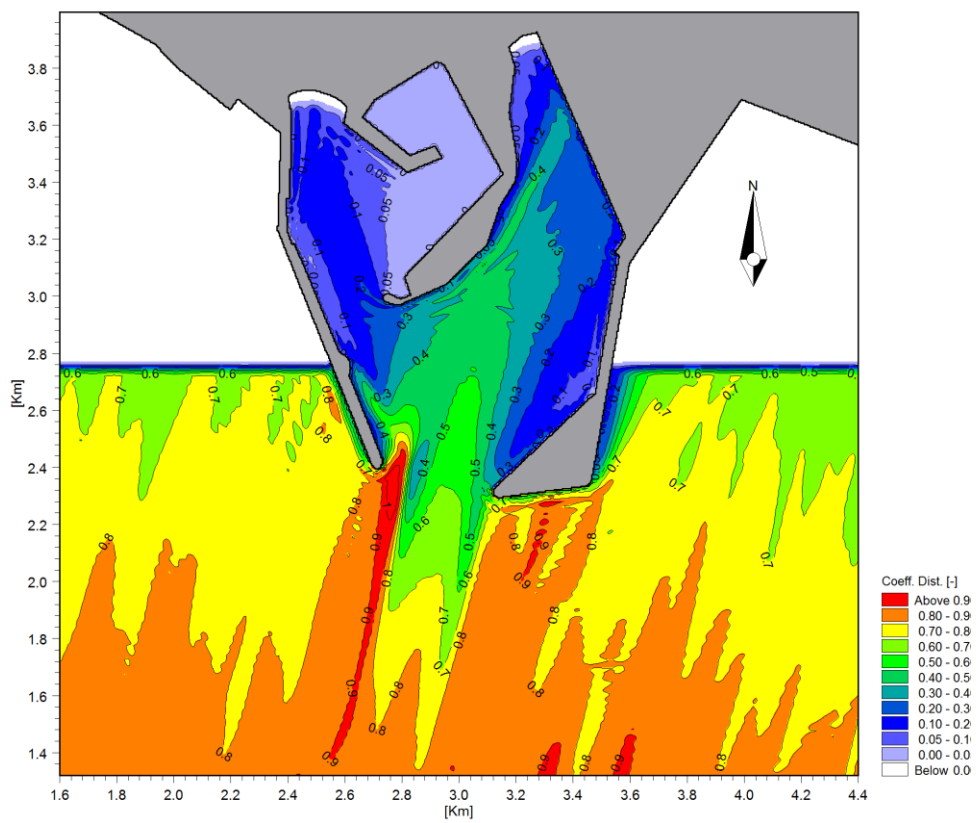
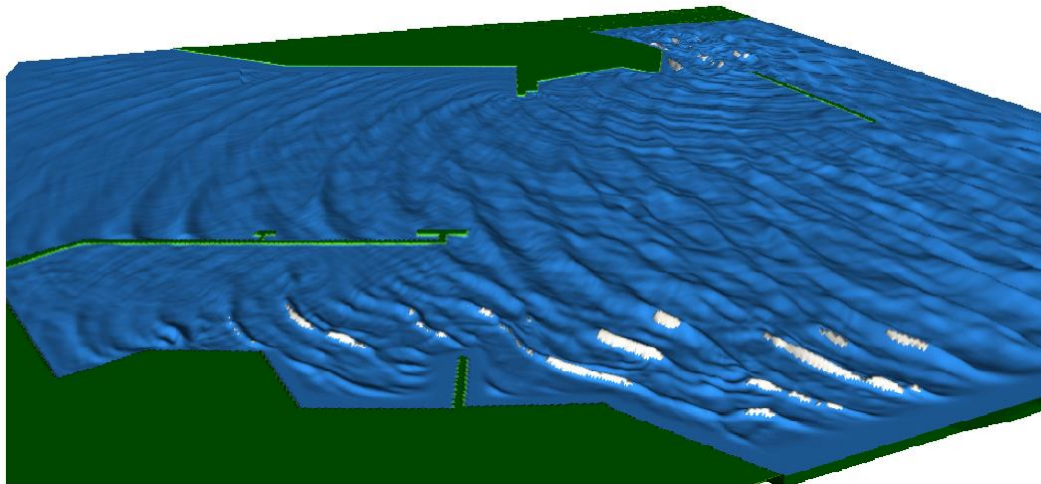


Le onde incidenti, in termini di variazione di superficie libera e flusso in ingresso, possono essere introdotte in due modi: attraverso i contorni aperti oppure mediante l'introduzione di linee di generazione interne. Le onde, monodirezionali regolari e irregolari, possono essere generate mediante uno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

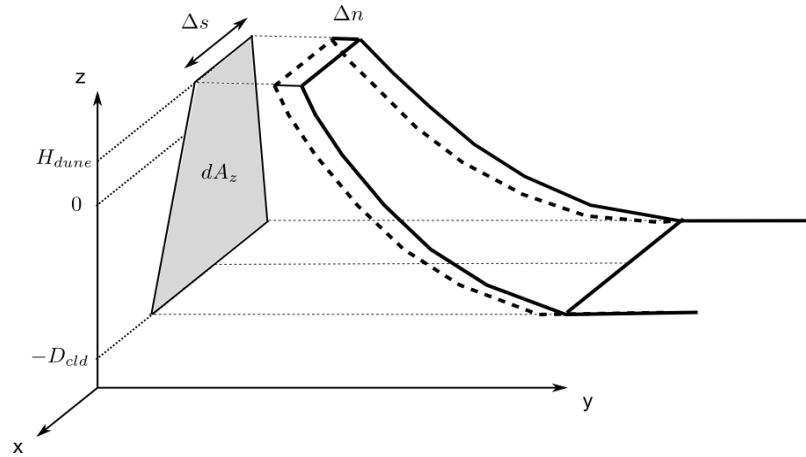


Figura 8-1 Schema della one-line modified equation

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.

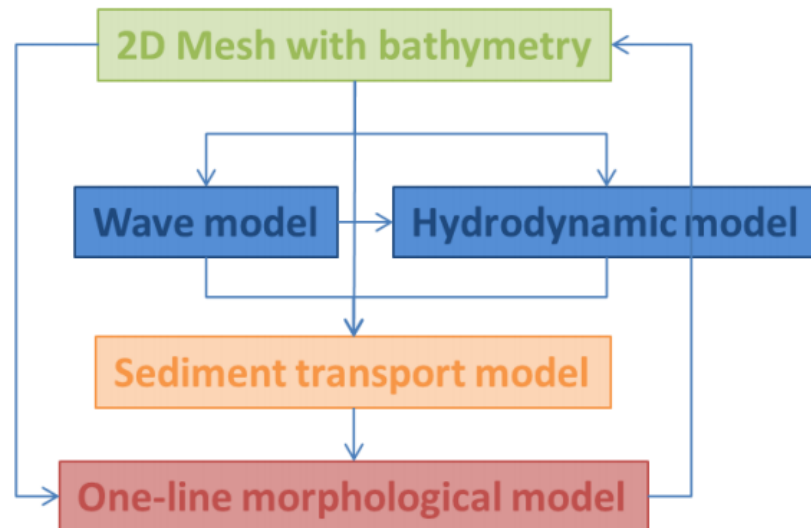


Figura 8-2 Schema funzionale del MIKE 21 Shoreline Morphology Model