

## PROGETTO DEFINITIVO MARINA DI MARSALA FUTURO PIANO REGOLATORE PORTUALE



Tav.

Stato Progetto **DEFINITIVO**

Rev.

Data **Apr. 2014**

Scala

# MM

Descrizione

**Studio del moto ondoso sotto costa (configurazione di progetto)**

# R.01

Committente

**M.Y.R. Marsala Yachting Resort S.r.l.**  
Via Favara 452/c bis- T. +39 0923 722319

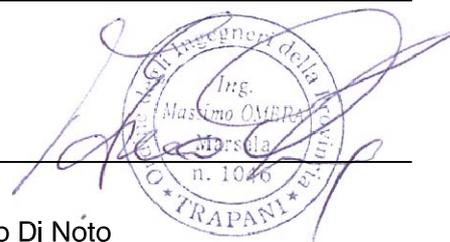
**myR**  
Marsala Yachting Resort

Capo Progetto e Marina Designer

**Ing. Massimo Ombra**

Ordine degli Ing. della Provincia di Trapani n°1046

Timbro e Firma



Progettisti

Coordinamento gruppo di progettazione:

Ing. Francesco Di Noto

Progettazione Architettonica:

Arch. Stefania Bacci

Progettazione Architettonica:

Itineralab Srl - Architetti Nuzzo

Ingegneria marittima / civile e studi ambientali:

Ing. Antonio D'Arrigo

Collaborazioni

Opere marittime:

Ing. Agostino La Rosa

Analisi strutturali e geotecniche:

Ing. Nicola Rustica

Impianti idrici:

Ing. Giovanni Berbiglia

Impianti elettrici e di illuminazione:

Ing. Pietro Inferrera / Ing. Massimo Brancatelli

Aspetti ambientali:

Ing. Domenico Mangano

Studi geologici e geotecnici:

Dott. Piero Merk Ricordi

**REGIONE SICILIANA**



**COMUNE DI MARSALA**

*Provincia di Trapani*



\*\*\*\*\*

**PROGETTO DEFINITIVO MARINA DI MARSALA  
FUTURO PIANO REGOLATORE PORTUALE**

\*\*\*\*\*

**Committente: M.Y.R. Marsala Yachting Resort S.r.l**

\*\*\*\*\*

**STUDIO DEL MOTO ONDOSI SOTTO COSTA  
CONFIGURAZIONE PROGETTO MARINA**

\*\*\*\*\*

# INDICE

<b>1. GENERALITÀ .....</b>	<b>1</b>
1.1.    PREMESSA .....	1
<b>2. SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI NELLO STUDIO IDRAULICO MARITTIMO.....</b>	<b>2</b>
2.1.    ANALISI DELLE CONDIZIONI METEOMARINE .....	2
2.2.    PREVISIONE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO.....	3
2.3.    DETERMINAZIONE DELL'ONDA DI PROGETTO .....	5
2.4.    OPERE MARITTIME PREVISTE NEL SEGUENTE PROGETTO .....	7
2.5.    MODELLI NUMERICI UTILIZZATI PER LO STUDIO DEL MOTO ONDOSO SOTTO COSTA.....	11
<b>3. STUDIO DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA CON MODELLI NUMERICI.....</b>	<b>12</b>
3.1.    PREMESSA .....	12
3.2.    STUDIO DEL MOTO ONDOSO SOTTO COSTA .....	13
3.2.1. <i>MODELLO SW</i> .....	16
3.3.    ALTEZZE D'ONDA IN CORRISPONDENZA DELLE OPERE.....	44

# 1. GENERALITÀ

## 1.1. PREMESSA

La presente relazione si riferisce allo studio del moto ondoso sotto costa nell'ambito del ***“Progetto Definitivo Marina di Marsala futuro Piano Regolatore Portuale”***.

In particolare nella relazione seguente vengono trattati il seguente tema:

- *regime del moto ondoso* - la conoscenza del clima ondoso sotto costa costituisce la base per la verifica delle eventuali opere di difesa costiera previste che per le opere strutturali dei moli. La determinazione del moto ondoso è eseguita mediante modelli che permettono la determinazione del moto ondoso partendo da dati di vento o da dati di onda rilevati da boe ondometriche se presenti e se i dati relativi sono significativi rispetto al paraggio preso in esame come già visto nello Studio Idraulico Marittimo. Conosciuto il moto ondoso al largo, quello sotto costa è determinato utilizzando modelli matematici che sono in grado di tenere conto dei fenomeni di *shoaling* e rifrazione applicando tali modelli alla batimetria rilevata dai rilievi eseguiti per la fascia costiera e dalle cartografie disponibili per le zone più a largo. Il clima ondoso in questa relazione è definito in funzione di tempi di ritorno adeguati alle opere previste;
- *onde di progetto* – una volta determinato il clima ondoso sotto costa si passerà alla determinazione delle varie onde di progetto distinte per opere e per tempo di ritorno.

## 2. SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI NELLO STUDIO IDRAULICO MARITTIMO

### 2.1. ANALISI DELLE CONDIZIONI METEOMARINE

Facendo riferimento allo Studio Idraulico Marittimo (cfr. AP R.02) il tratto di costa oggetto di studio si trova nel territorio di Marsala lungo la fascia litoranea, individuabile approssimativamente nei dintorni delle coordinate lat.  $37^{\circ}47'0.00''$  N – lon.  $12^{\circ}26'0.00''$  E.

In primo luogo si è individuato il paraggio interessato dal tratto di costa in esame e si è verificato che tale paraggio si estende da  $160^{\circ}$  N a  $340^{\circ}$  N. lo stesso è limitato a Nord dall'estrema punta occidentale dell'isola denominato Capo Lilibeo, e a Sud-Sud-Est da Torre Scibiliana nel comune di Petrosino.

L'ampiezza complessiva del paraggio è pari a  $180^{\circ}$ . Nella Figura 1 sono riportati i fetches geografici relativi alla corografia del paraggio, determinati ad intervalli di  $5^{\circ}$  rispetto al Nord ed espressi numericamente in km.

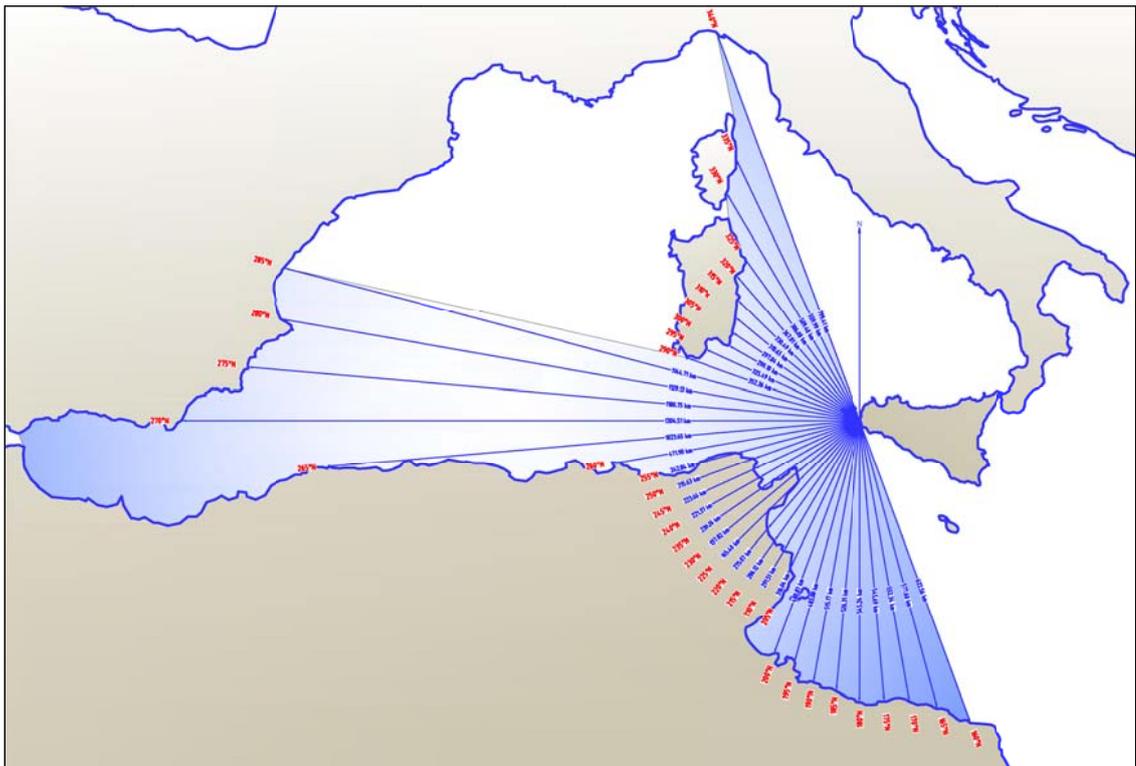


Figura 1 – Fetches geografici relativi al paraggio di Marsala

Il fetch geografico relativo al paraggio in esame fa capire la notevole esposizione del sito oggetto di studio, proprio per la sua particolare orografia. Infatti la posizione prossima a Capo Lilibeo, estrema punta occidentale della Sicilia, fa sì che il sito abbia

un'esposizione che va da Genova fino alla cittadina di Al-Khums in Libia, anticamente Leptis Magna, passando per la costa del Sole e Gibilterra.

Nello Studio Idraulico Marittimo si sono studiati i venti che soffiano all'interno della zona di generazione del moto ondoso. A questo scopo si sono utilizzati i dati riportati nel *Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea* – Aprile 2004.

In particolare si è fatto riferimento ai dati MedAtlas corrispondenti alla stazione identificata dalle coordinate 38°N, 12°E. In particolare si evince che i venti dominanti provengono con maggiore frequenza da Ponente e da Libeccio e con minore frequenza da Nord e Ostro. I venti con alta frequenza, ma non classificabili regnanti, risultano provenire da tutto il paraggio interessato con picchi in corrispondenza di Ponente e Mezzogiorno Libeccio.

La seconda via adottata per il calcolo del moto ondoso al largo relativo al paraggio in esame ha fatto riferimento ai dati di moto ondoso desunti dallo stesso atlante MedAtlas, rilevando che il moto ondoso con maggiore frequenza ma con una bassa altezza d'onda proviene da Ponente e da Scirocco. Le onde di altezza  $H_s$  superiore a 3,00 m provengono da NN-O, S e SS-E.

Inoltre si sono analizzati i valori degli eventi di moto ondoso rilevati dall'APAT (Boa RON Mazara del Vallo LAT. 37°31'05"N LON. 12°32'E). Anche qui, in accordo con le elaborazioni descritte sopra, la direzione di provenienza del moto ondoso di maggiore frequenza e bassa intensità risulta da Ponente e da Libeccio mentre il moto ondoso di maggiore intensità superiore a 3 m di altezza d'onda proviene da Maestrale-Ponente e da Libeccio-Mezzogiorno.

## **2.2. PREVISIONE DEL MOTO ONDOSO AL LARGO**

L'individuazione del settore geografico di traversia che sottende il paraggio in esame è stato eseguito sulle carte dell'Istituto Idrografico della Marina ed esso risulta compreso nelle direzioni 160° N e 340° N. Si sono ricavate quindi le distanze di mare libero per le varie direzioni suddividendo il settore geografico di traversia in angoli di 5°.

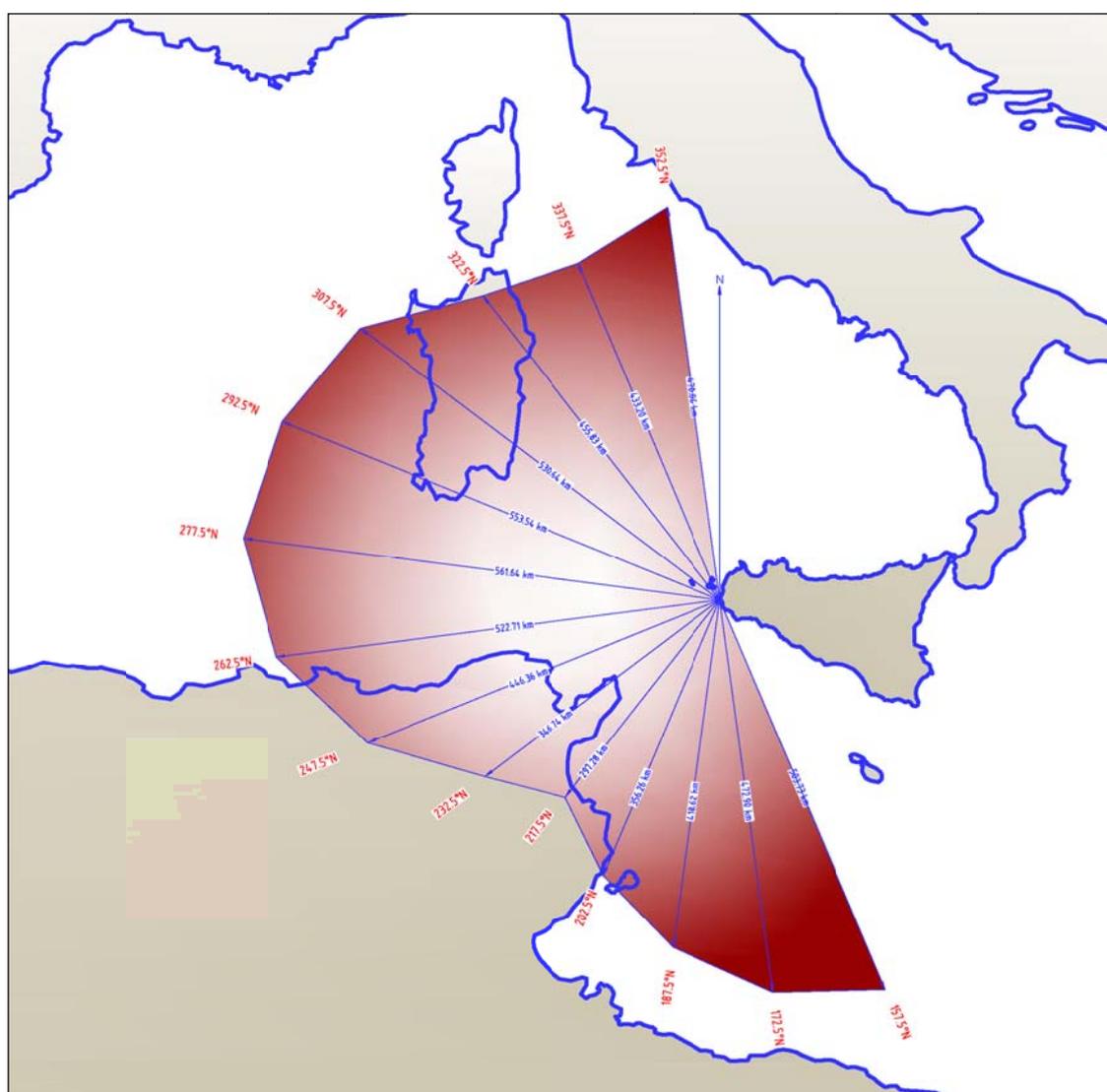
Per la previsione del moto ondoso al largo si è utilizzato il metodo di Sverdrup-Munch e Bretshneider (SMB) con il quale è stato possibile ricavare l'altezza  $H_s$  e il periodo di picco  $T_p$  per ogni valore del fetch  $F$ , della velocità del vento  $V$ , della durata  $t$  in funzione del tempo di ritorno  $T_r$ .

Si sono considerati i settori compresi tra l'11 e il 23 e per ognuno di essi si sono considerate le velocità del vento in funzione ai tempi di ritorno  $T_r = 5, 10, 50, 100, 120$  anni.

Per definire il clima ondoso nelle condizioni estreme si sono verificate tutte le fonti di dati reperibili per la zona in esame.

Sono dunque stati presi in considerazione innanzitutto i dati di vento e di onda riportati nel *Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea* – Aprile 2004 per ogni zona del Mediterraneo. I dati di interesse si riferiscono al punto di rilevamento individuato da 38° di latitudine Nord e 12° di longitudine Est.

Sono stati inoltre presi in considerazione i dati di onda provenienti dalla stazione RON di Mazara del Vallo, individuata dalle coordinate 37°31'05"N e 12°32'00"E (dati ISPRA), situata anch'essa in un'area piuttosto prossima a quella oggetto dell'intervento e quindi idonea a descriverne con buona accuratezza la previsione di moto ondoso.



**Figura 2 - Fetches efficaci relativi al paraggio**

Una volta ottenute le onde rispettivamente dai dati MEDATLAS ed APAT, è stata eseguita la opportuna “trasposizione” geografica.

È importante notare come i coefficienti di trasposizione dell'onda e del periodo, sia per Medatlas che per Apat, sono prossimi all'unità, il che comporta una forte compatibilità tra le stazioni di misura scelte e il sito oggetto di studio.

Come onde di progetto, per quello detto sopra e soprattutto per quanto riportato in maniera esaustiva nello studio idraulico marittimo, si prendono i valori massimi tra le diverse elaborazioni per ogni settore e per ogni tempo di ritorno. Le onde di progetto a largo sono riportate nell'ultimo riquadro della Tabella 1.

RIEPILOGO ELABORAZIONI SUI DATI DI VENTO E DI MARE																					
Sett.	Fattori distrib.	SMB - DATI MEDATLAS					DATI DI ONDA MEDATLAS					DATI DI ONDA APAT					ONDE DI PROGETTO				
		Tr = 5	Tr = 10	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 120	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 120	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 120	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 50	Tr = 100	Tr = 120
11	Hs (ml)	3,40	3,78	4,80	5,35	5,57	3,43	3,86	4,91	5,39	5,52	4,34	4,81	5,95	6,46	6,60	4,34	4,81	5,95	6,46	6,60
	T (s)	6,64	6,88	7,51	7,85	7,99	7,56	8,03	9,09	9,53	9,65	8,48	8,94	9,98	10,41	10,52	8,48	8,94	9,98	10,41	10,52
12	Hs (ml)	3,44	4,02	4,91	5,36	5,58	3,54	3,96	5,02	5,49	5,62	4,79	5,40	6,89	7,56	7,74	4,79	5,40	6,89	7,56	7,74
	T (s)	6,78	7,24	7,74	7,97	8,13	7,67	8,13	9,18	9,61	9,72	8,97	9,54	10,81	11,34	11,47	8,97	9,54	10,81	11,34	11,47
13	Hs (ml)	3,52	4,08	4,92	5,60	5,59	3,52	3,97	5,06	5,56	5,69	4,77	5,38	6,86	7,53	7,71	4,77	5,38	6,86	7,53	7,71
	T (s)	6,93	7,35	7,78	8,21	8,16	7,73	8,22	9,32	9,77	9,89	9,01	9,58	10,85	11,38	11,52	9,01	9,58	10,85	11,38	11,52
14	Hs (ml)	2,58	2,82	3,64	3,96	4,07	2,53	2,86	3,67	4,04	4,13	4,71	5,30	6,74	7,39	7,57	4,71	5,30	6,74	7,39	7,57
	T (s)	5,99	6,13	6,72	6,90	6,98	6,57	7,00	7,95	8,35	8,46	8,99	9,55	10,81	11,33	11,47	8,99	9,55	10,81	11,33	11,47
15	Hs (ml)	2,52	2,87	3,70	4,10	4,29	2,50	2,86	3,75	4,15	4,26	4,69	5,29	6,74	7,40	7,57	4,69	5,29	6,74	7,40	7,57
	T (s)	6,01	6,29	6,87	7,15	7,30	6,51	6,98	8,01	8,45	8,56	8,98	9,55	10,82	11,35	11,48	8,98	9,55	10,82	11,35	11,48
16	Hs (ml)	2,43	2,84	3,68	4,07	4,19	2,48	2,83	3,71	4,11	4,22	4,99	5,62	7,17	7,86	8,05	4,99	5,62	7,17	7,86	8,05
	T (s)	5,80	6,16	6,77	7,04	7,11	6,43	6,89	7,91	8,34	8,45	9,30	9,88	11,19	11,74	11,88	9,30	9,88	11,19	11,74	11,88
17	Hs (ml)	3,37	4,02	5,16	5,76	5,86	3,48	3,98	5,23	5,79	5,94	5,04	5,67	7,21	7,90	8,08	5,04	5,67	7,21	7,90	8,08
	T (s)	6,81	7,34	8,03	8,39	8,43	7,64	8,18	9,41	9,92	10,05	9,31	9,89	11,19	11,73	11,87	9,31	9,89	11,19	11,73	11,87
18	Hs (ml)	5,94	6,64	8,46	9,28	9,51	5,95	6,69	8,49	9,31	9,53	5,00	5,54	6,86	7,45	7,61	5,95	6,69	8,49	9,31	9,53
	T (s)	9,20	9,57	10,45	10,82	10,92	10,06	10,69	12,08	12,66	12,81	9,25	9,75	10,89	11,36	11,48	10,06	10,69	12,08	12,66	12,81
19	Hs (ml)	6,89	7,74	9,80	10,54	10,80	7,05	7,85	9,81	10,68	10,92	6,30	6,89	8,31	8,94	9,11	7,05	7,85	9,81	10,68	10,92
	T (s)	9,85	10,29	11,23	11,49	11,63	11,01	11,64	13,04	13,63	13,78	10,40	10,88	11,98	12,44	12,56	11,01	11,64	13,04	13,63	13,78
20	Hs (ml)	7,06	7,92	9,93	10,69	11,02	7,11	7,94	9,96	10,87	11,12	6,14	6,70	8,05	8,65	8,82	7,11	7,94	9,96	10,87	11,12
	T (s)	9,89	10,33	11,22	11,48	11,64	11,10	11,75	13,20	13,80	13,96	10,23	10,70	11,76	12,20	12,32	11,10	11,75	13,20	13,80	13,96
21	Hs (ml)	6,20	6,98	8,90	9,68	9,99	6,21	7,00	8,96	9,84	10,07	5,36	5,91	7,22	7,81	7,97	6,21	7,00	8,96	9,84	10,07
	T (s)	9,32	9,74	10,67	11,00	11,15	10,42	11,08	12,57	13,19	13,35	9,58	10,07	11,16	11,62	11,74	10,42	11,08	12,57	13,19	13,35
22	Hs (ml)	5,62	6,49	8,34	9,22	9,52	5,73	6,52	8,46	9,33	9,57	5,12	5,73	7,22	7,89	8,06	5,73	6,52	8,46	9,33	9,57
	T (s)	8,93	9,46	10,40	10,56	10,96	10,04	10,72	12,26	12,89	13,06	9,50	10,06	11,32	11,85	11,99	10,04	10,72	12,26	12,89	13,06
23	Hs (ml)	5,37	6,14	7,92	8,89	9,19	5,40	6,17	8,06	8,92	9,15	5,75	6,55	8,49	9,37	9,61	5,75	6,55	8,49	9,37	9,61
	T (s)	8,70	9,16	10,08	10,56	10,72	9,73	10,41	11,94	12,58	12,74	10,38	11,09	12,68	13,33	13,50	10,38	11,09	12,68	13,33	13,50

Tabella 1 – Confronto dei valori di Hs e Ts e onde di progetto

### 2.3. DETERMINAZIONE DELL'ONDA DI PROGETTO

Per la progettazione delle opere occorre determinare la durata della vita presunta in relazione al progetto e alle sue caratteristiche funzionali.

Si deve valutare quindi il livello di rischio o probabilità di superamento dell'onda di progetto, tenuto conto dei danni che tali onde possono arrecare all'opera e alla possibilità di ripristinare la normale funzionalità con operazioni di manutenzione.

La determinazione dell'onda di progetto è eseguita in funzione di un fissato tempo di ritorno  $T_{rp}$  determinato in accordo con quanto riportato nelle *Istruzioni Tecniche per la progettazione delle dighe marittime* redatte dal *Ministero dei Lavori Pubblici*.

Per infrastrutture di uso generale si intendono opere di difesa di complessi civili, commerciali o industriali, che non siano destinati ad un specifico scopo e per i quali non è chiaramente identificabile il termine della vita funzionale dell'opera. Per

infrastrutture ad uso specifico si intendono le opere di difesa di singole installazioni industriali, di porti industriali, di depositi o piattaforme di carico e scarico, di piattaforme petrolifere, ecc.

Tipo dell'opera	Livello di sicurezza richiesto		
	1	2	3
	Vita di progetto (anni)		
Infrastrutture di uso generale	25	50	100
Infrastrutture ad uso specifico	15	25	50

**Tabella 2 – Durata minima di vita per opere o strutture di carattere definitivo ( $T_v$ )**

Il livello di sicurezza 1 si riferisce ad opere o installazioni di interesse locale ed ausiliario, comportanti un rischio minimo di perdita di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso della stessa (difese costiere, opere in porti minori o marina, scarichi a mare, strade litoranee, ecc...).

Il livello di sicurezza 2 si riferisce ad opere ed installazioni di interesse generale, comportanti un moderato rischio di perdite di vite umane o di danni ambientali in caso di collasso dell'opera (opere di grandi porti, scarichi a mare di grandi città ecc...).

Il livello di sicurezza 3 si riferisce ad opere o installazioni per la protezione dall'inondazione, opere di interesse sopranazionale, comportanti un alto rischio di perdita di vite umane o di danno ambientale in caso di collasso della stessa (difese di centri urbani o industriali ecc...).

Nel caso in esame l'infrastruttura può essere classificata come **Infrastruttura di uso generale** ed essendo l'opera in progetto un "marina" che comporta un rischio minimo di perdita di vite umane in un'opera di interesse locale si assume il **livello di sicurezza 1**.

**La durata minima di vita per opere o strutture a carattere definitivo è pari a  $T_v = 25$  anni.**

Si assumeranno le probabilità corrispondenti al danneggiamento incipiente o alla distruzione totale in relazione alle deformazioni-modificazioni subite dall'opera in caso di danneggiamento ed alla difficoltà di riparare il danno subito.

Per strutture rigide (dighe a parete verticale), per le quali è estremamente difficile riparare il danno, si assume la probabilità di distruzione totale. Per le strutture flessibili o comunque per opere riparabili si assume la probabilità corrispondente al danneggiamento incipiente.

*Danneggiamento incipiente*

Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Elevato
Bassa	0.50	0.30
Media	0.30	0.20
Alta	0.25	0.15

*Distruzione totale*

Ripercussione economica	Rischio per la vita umana	
	Limitato	Elevato
Bassa	0.20	0.15
Media	0.15	0.10
Alta	0.10	0.05

**Tabella 3 – Massima probabilità di danneggiamento ammissibile nel periodo di vita operativo dell’opera (Pf)**

Fissato un *rischio di perdita di vita umana* limitato e una *ripercussione economica* bassa in quanto si stima che il rapporto tra i costi diretti del danneggiamento sommati a quelli indiretti dovuti alla perdita di funzionalità delle opere protette ed il costo totale per la realizzazione dell’opera è minore di 20 essendo nel caso in esame estremamente elevato il costo dell’opera. Con tali valori si fissa  $P_f = 0.20$ . La combinazione del tempo di vita dell’opera  $T_v$  e della probabilità di danneggiamento  $P_f$  determina il tempo di ritorno dell’evento di progetto  $T_{rp}$  dato da

$$T_{rp} = \frac{T_v}{[-\ln(1 - P_f)]}$$

per cui si ottiene  $T_{rp} = 112$  anni. I calcoli relativi alle opere foranee saranno quindi eseguiti con valori ottenuti per un  $T_{rp} = 120$  anni, in accordo con il paragrafo 12.1 dello Studio Idraulico Marittimo del Progetto Preliminare I02 [1].

Per le scogliere che sono opere flessibili e comunque riparabili si assume la probabilità di danneggiamento incipiente inteso come livello di danneggiamento predefinito in relazione al tipo di struttura al di sopra del quale il danno è apprezzabile e risulta necessario intervenire con lavori di manutenzione. In questo caso per rischio di vita umana limitata e per ripercussione economica bassa si ha un valore  $P_f = 0.50$  per cui si ottiene  $T_{rp} = 36$  anni per cui si assume **un  $T_{rp} = 50$  anni**. I tempi di ritorno scelti sono ampiamente cautelativi rispetto alle opere oggetto di studio.

#### **2.4. OPERE MARITTIME PREVISTE NEL SEGUENTE PROGETTO**

Il porto presenta allo stato attuale una significativa esposizione rispetto alle onde con direzione di provenienza Nord, come evidenziato dalla seguente figura 3.



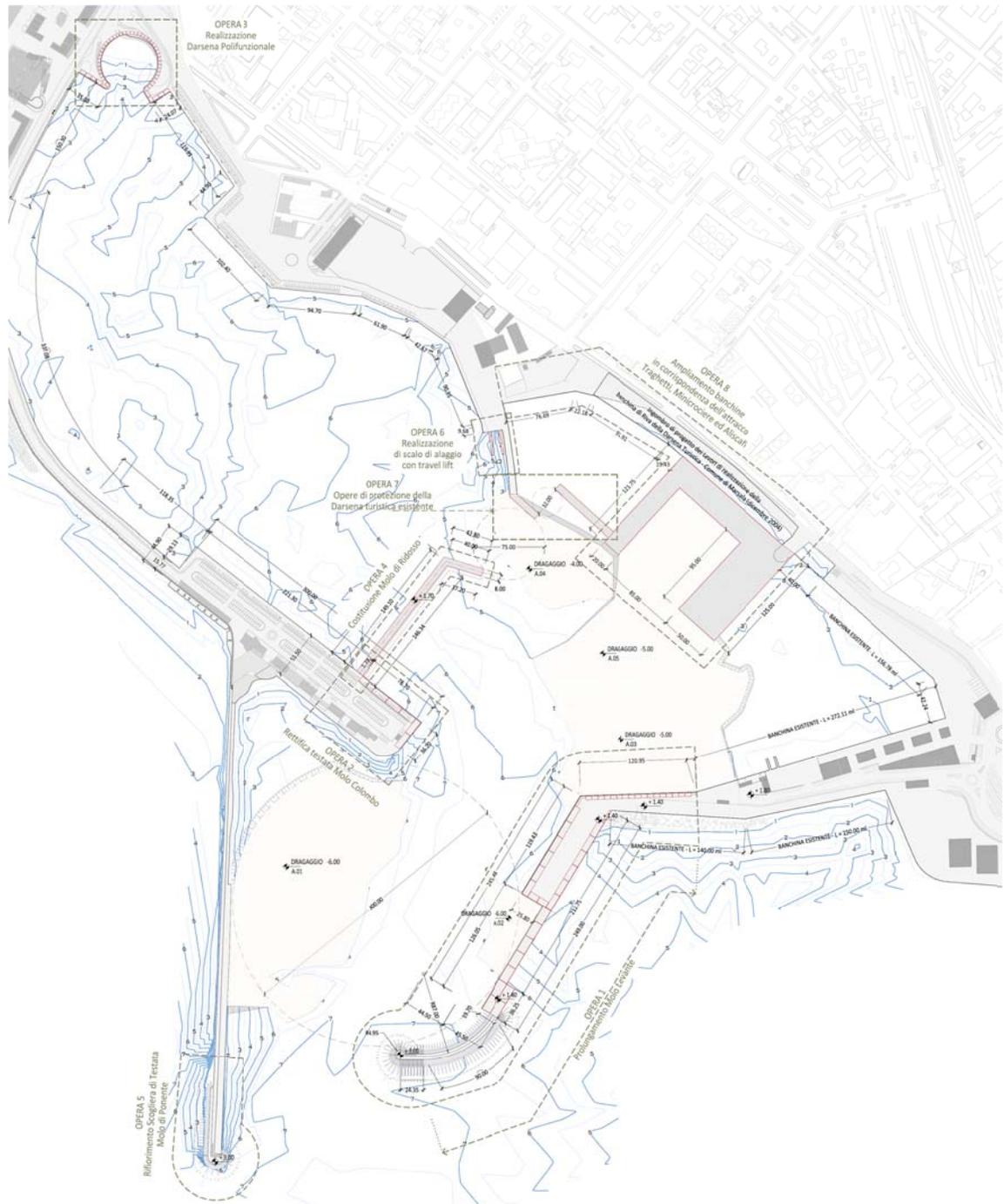
**Figura 3 - Planimetria del porto di Marsala allo stato attuale.**

Al fine di ridurre il grado di agitazione interna ed aumentare conseguentemente la fruibilità del porto, sono state ipotizzate diverse tipologie di modifica al layout esistente fino a giungere alla configurazione finale di PRP.

In particolare si sono previste le seguenti opere:

- realizzazione di una diga di sottoflutto radicata sulla testata dell'esistente Molo di Levante, con direzione NE-SO;
- banchinamento del tratto terminale del Molo di Levante e realizzazione di un dente per l'accosto delle navi Ro-Ro;
- banchinamento della testata del Molo Cristoforo Colombo;
- creazione di una darsena banchinata per i tender alla radice del Molo Cristoforo Colombo;
- realizzazione di un molo su pali per l'accosto di grandi *yachts*;

- rifiorimento della testata del molo di Ponente;
- prolungamento del molo in corrispondenza della darsena turistica esistente;
- realizzazione dei moli per attracco dei traghetti;
- realizzazione banchine a giorno per allargamento strada come da progetto già esistente presso il Comune di Marsala;
- dragaggi per la correzione dei fondali portuali e del canale di accesso.



**Figura 4 - Planimetria del porto di Marsala – futuro PRP.**

In seguito all'esito della procedura preliminare e agli studi del progetto definitivo si è

potuto definire il layout portuale, in particolare la M.Y.R. s.r.l. dovrà eseguire le seguenti opere:

- realizzazione di una diga di sottoflutto radicata sulla testata dell'esistente Molo di Levante, con direzione NE-SO;



**Figura 5 - Planimetria del porto di Marsala – Intervento della M.Y.R. s.r.l.**

- banchinamento del tratto terminale del Molo di Levante e realizzazione di un dente per l'accosto delle navi Ro-Ro;
- banchinamento della testata del Molo Cristoforo Colombo;
- creazione di una darsena banchinata per i tender alla radice del Molo Cristoforo Colombo;

- realizzazione di un molo su pali per l'accosto di grandi *yachts*;
- rifiorimento della testata del molo di Ponente;
- dragaggi per la correzione dei fondali portuali e del canale di accesso.

## 2.5. MODELLI NUMERICI UTILIZZATI PER LO STUDIO DEL MOTO ONDOSO SOTTO COSTA

Per le analisi che seguono si è utilizzato il codice di calcolo MIKE 21, che 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. Il numero "21" che contraddistingue il codice, indica 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.

Il MIKE 21 opera in modo diverso in base alla schematizzazione geometrica adottata che può essere una *SINGLE GRID* (Griglia singola) in cui 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) in cui il sistema 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 e *FLEXIBLE MESH* (Griglia flessibile), in cui lo 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. Inoltre nel modello la discretizzazione geometrica può essere *CURVILINEAR* (Griglia curvilinea) griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

L'utilizzazione in campo marittimo costiero, dove risulta più efficace l'utilizzo della versione FM, 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).

### 3. STUDIO DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA CON MODELLI NUMERICI

#### 3.1. PREMESSA

Per definire il moto ondoso in condizioni estreme nell'area interessata dall'intervento si utilizzano i modelli matematici descritti in precedenza. I valori in input da assegnare al modello sono, oltre la batimetria della zona di propagazione del moto ondoso, le caratteristiche dell'onda al contorno dell'area in esame, il campo di vento nella zona in esame e il campo di corrente. Nella Figura 6 si riporta la carta nautica della zona.



Figura 6 – Carta nautica da Marsala a Sciacca

Per definire il moto ondoso in prossimità delle opere occorre predisporre i seguenti dati:

- *dati relativi alla batimetria del sito*; si riferiscono sia ai rilievi di dettaglio del fondo marino sottocosta fino all'isobata -10.00, sia a profondità maggiori, di minor dettaglio ottenibili da carte nautiche.
- *dati relativi al moto ondoso*; si riferiscono al clima ondoso al largo nel sito in esame e sono stati ottenuti dai dati di mare APAT e MEDATLAS nonché dai dati di vento MEDATLAS come meglio specificato nel paragrafo precedente.

Per definire le caratteristiche del moto ondoso sotto costa partendo dal clima ondoso al largo si fa riferimento al modello SW che permette la trasposizione del clima ondoso comprendendo le trasformazioni dell'onda per *shoaling*, rifrazione, attrito sul fondo ed eventualmente vento locale.

Le analisi bidimensionali del moto ondoso sottocosta vengono effettuate tramite un modello SW di maggiore dettaglio per tenere in conto anche i fenomeni di diffrazione dell'onda tipici della presenza di strutture costiere quali pennelli trasversali, scogliere longitudinali sommerse o soffolte e moli.

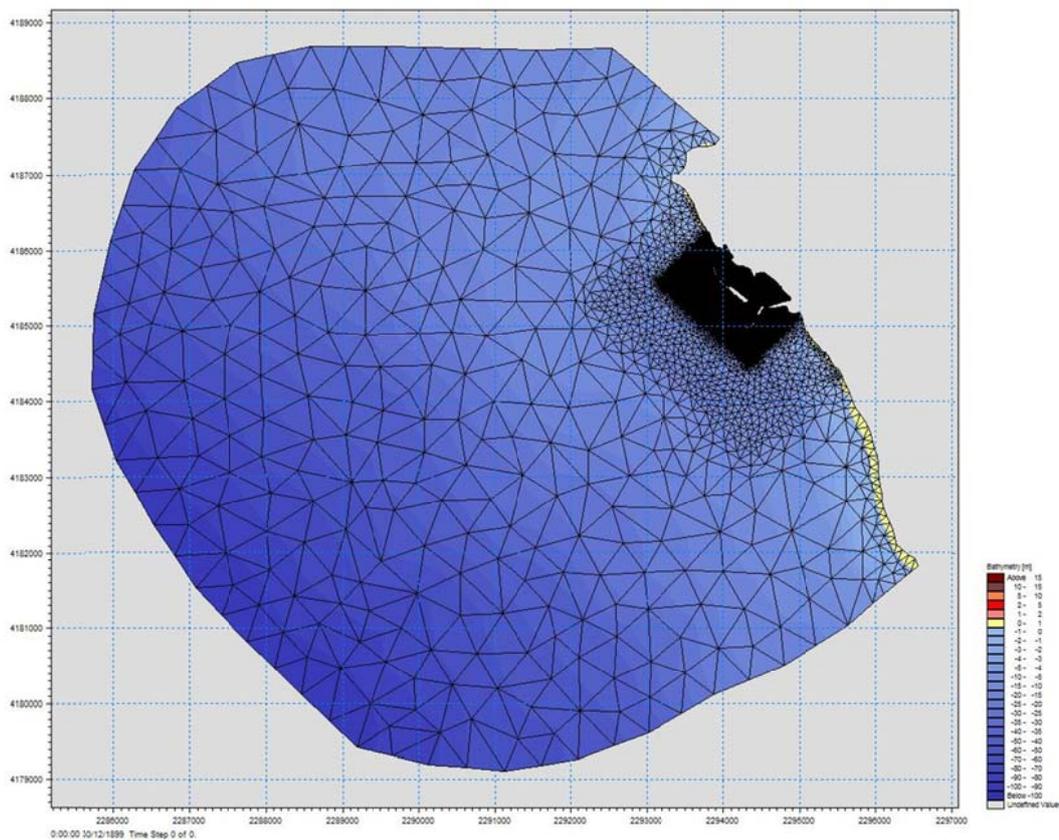
### **3.2. STUDIO DEL MOTO ONDOSO SOTTO COSTA**

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

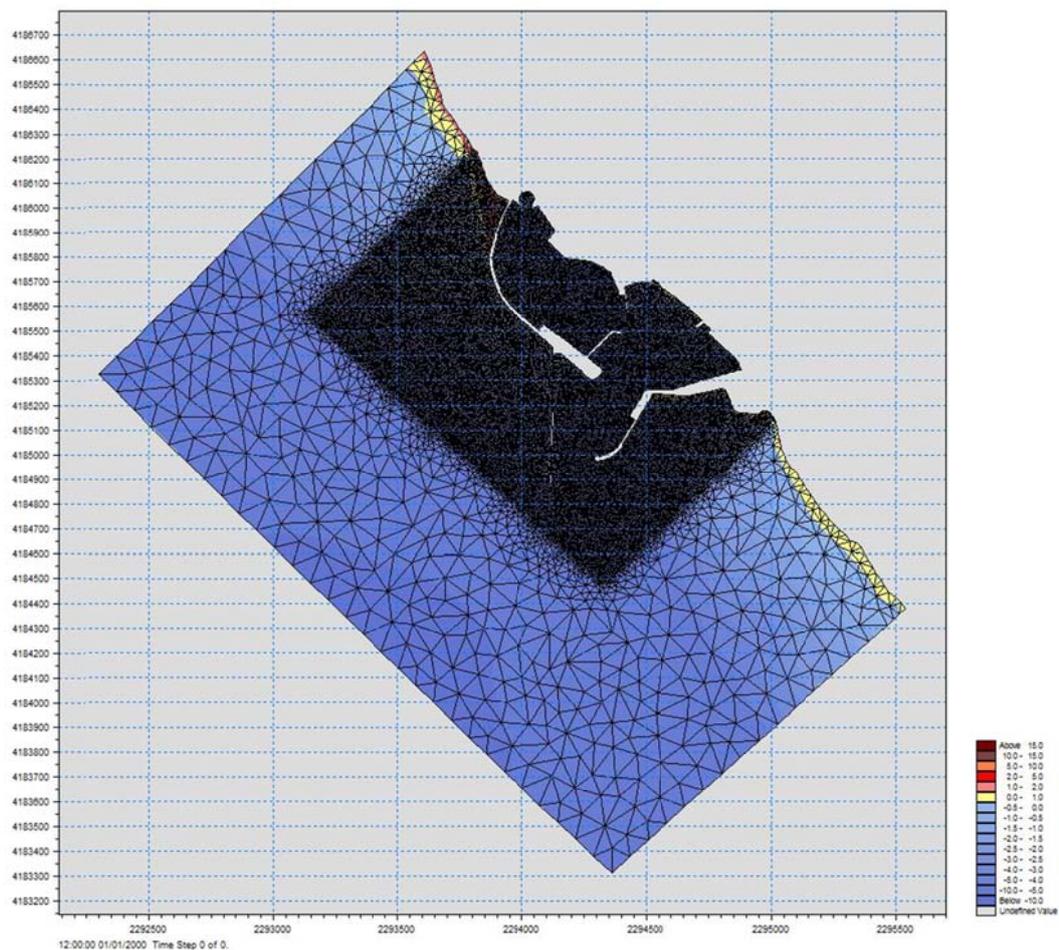
Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto e in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. Ai fini dell'applicazione dei modelli è stata costruita una batimetria che per la parte più vicina alla linea di costa è una batimetria di dettaglio ricavata da un rilievo, mentre per la parte più a largo è stata ricavata dalle carte nautiche della zona.

Il dominio di calcolo è definito attraverso il MIKE Zero Mesh Generator che carica le informazioni riguardanti i punti della batimetria nelle tre coordinate cartesiane-

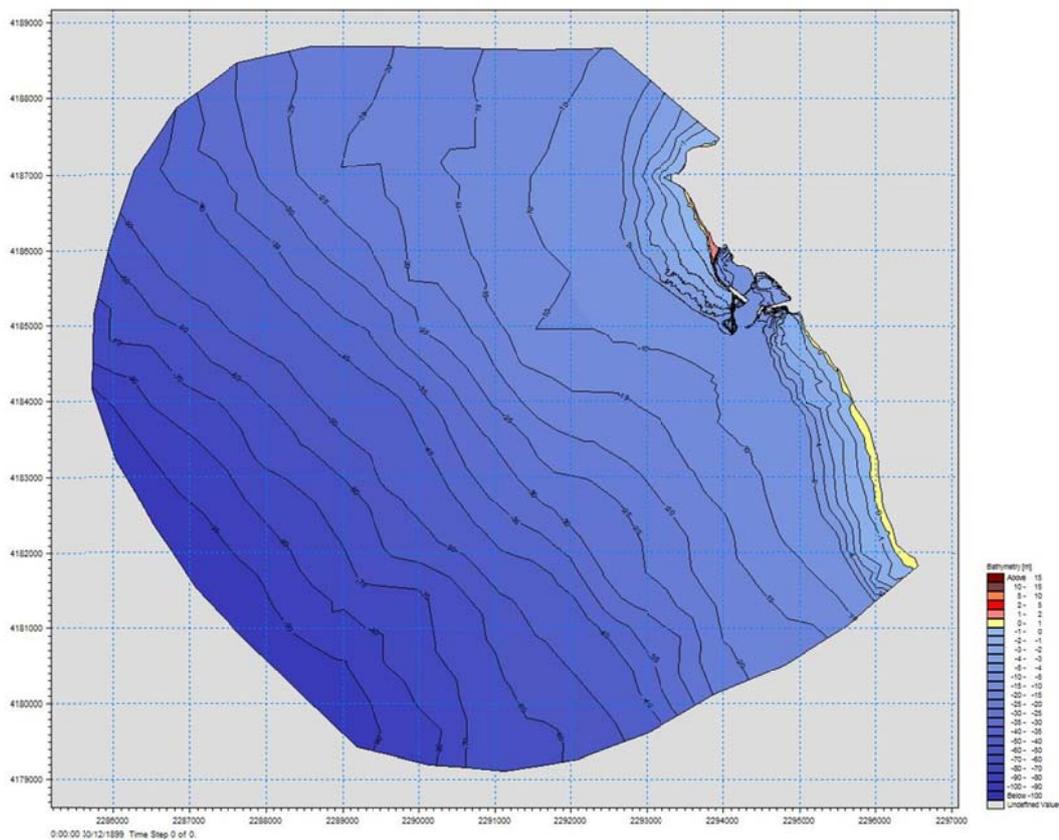
E' quindi necessario impostare una griglia che includa l'area che deve essere modellata, definire i contorni del dominio di calcolo e definire un codice per il riconoscimento delle condizioni a contorno. Nelle figure seguenti sono rappresentate le mesh di calcolo e le batimetrie utilizzate in input per i modelli bidimensionali.



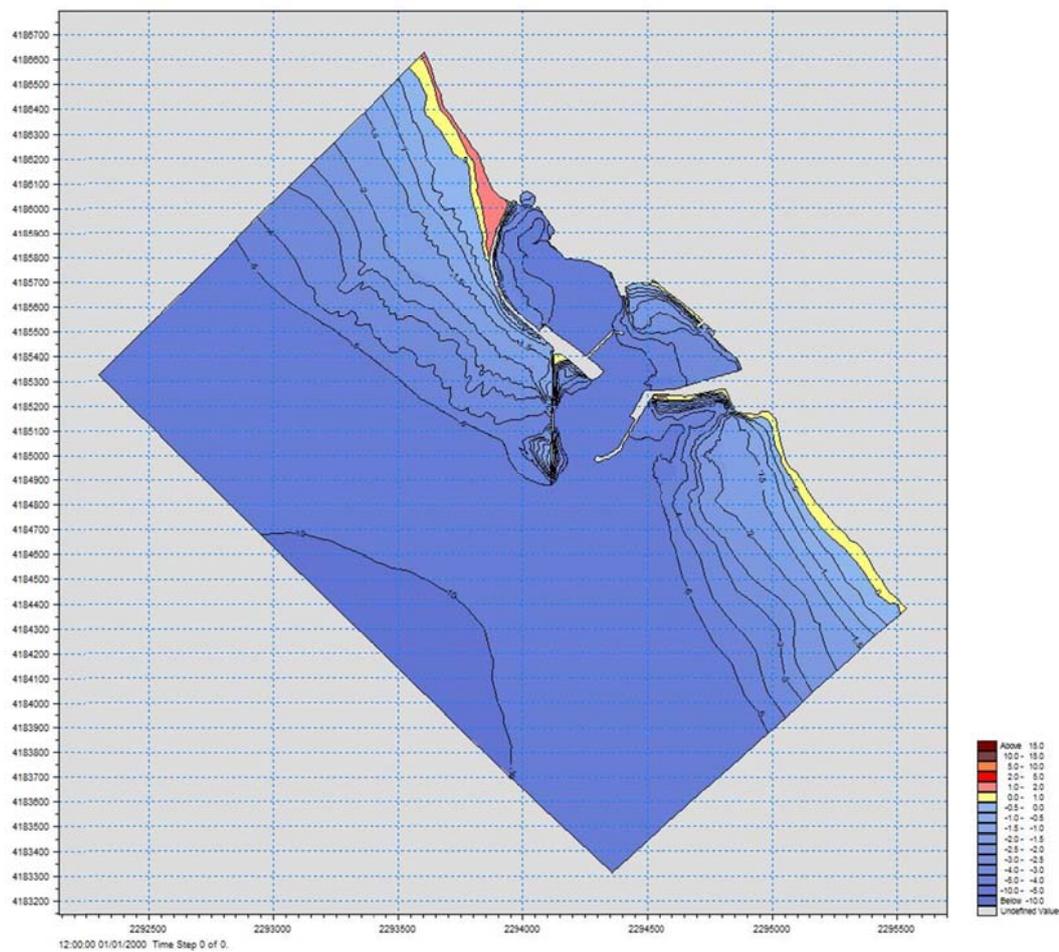
**Figura 7 – Mesh modello di largo - progetto**



**Figura 8 – Mesh modello di dettaglio - progetto**



**Figura 9 – Batimetria modello di largo**



**Figura 10 – Batimetria modello di dettaglio**

### 3.2.1. MODELLO SW

Per simulare il clima ondoso a largo e sotto costa si è utilizzato il modulo d'onda MIKE 21 SW che 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. In particolare il MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

- *fully spectral formulation*
- *directional decoupled parametric formulation*

La prima formulazione 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 fenomeni fisici di seguito elencati:

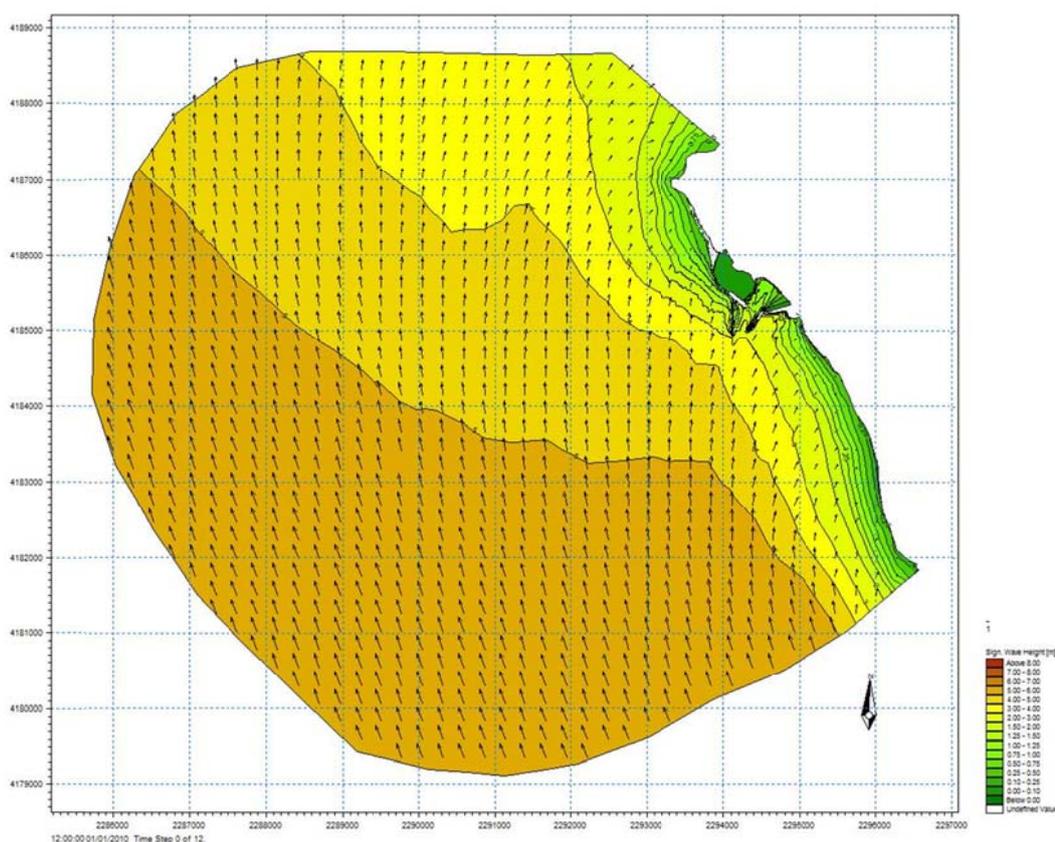
- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al *white capping*;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e *shoaling* dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni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

Il 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 ondamiche o modelli a larga scala) individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.

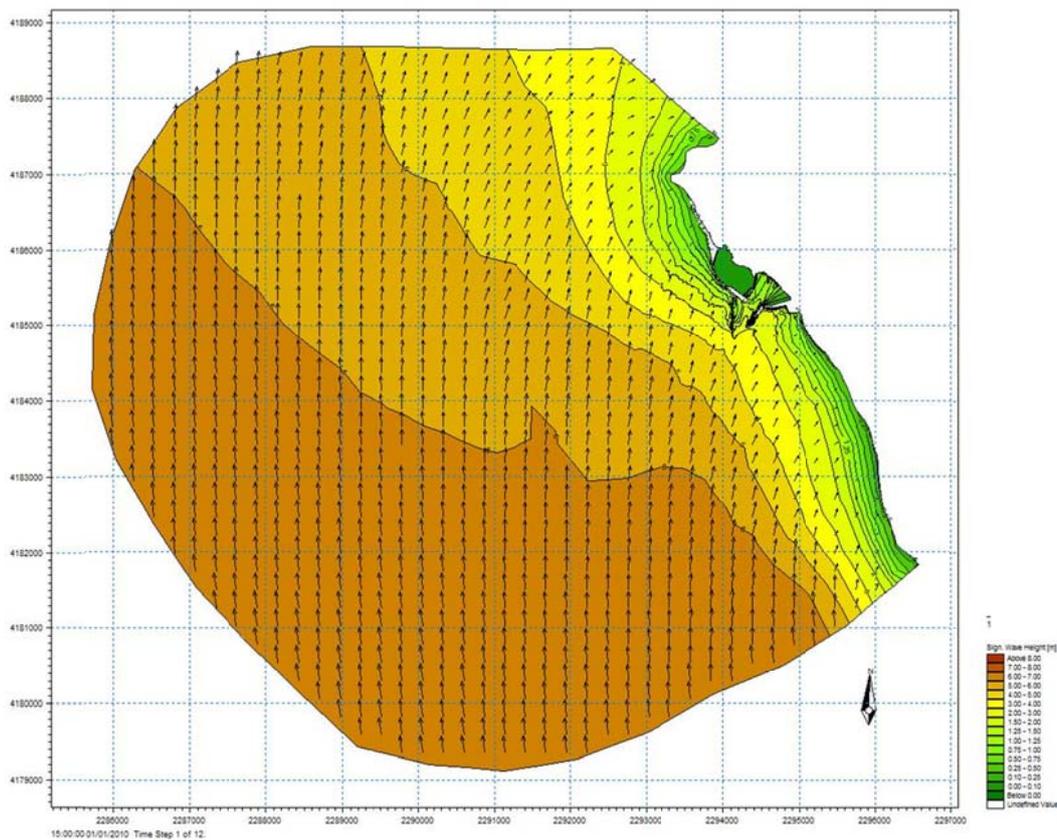
Il MIKE 21 SW è inoltre utilizzato, sempre a supporto della progettazione di un'opera costiera, come strumento di base del calcolo sia delle correnti sia del trasporto solido litoraneo indotti dall'azione del moto ondoso.

I campi di corrente e di trasporto sono infatti determinati, a partire dai campi di *radiation stresses* forniti in output da MIKE 21 SW, mediante l'utilizzo di altri moduli aggiuntivi del pacchetto MIKE21.

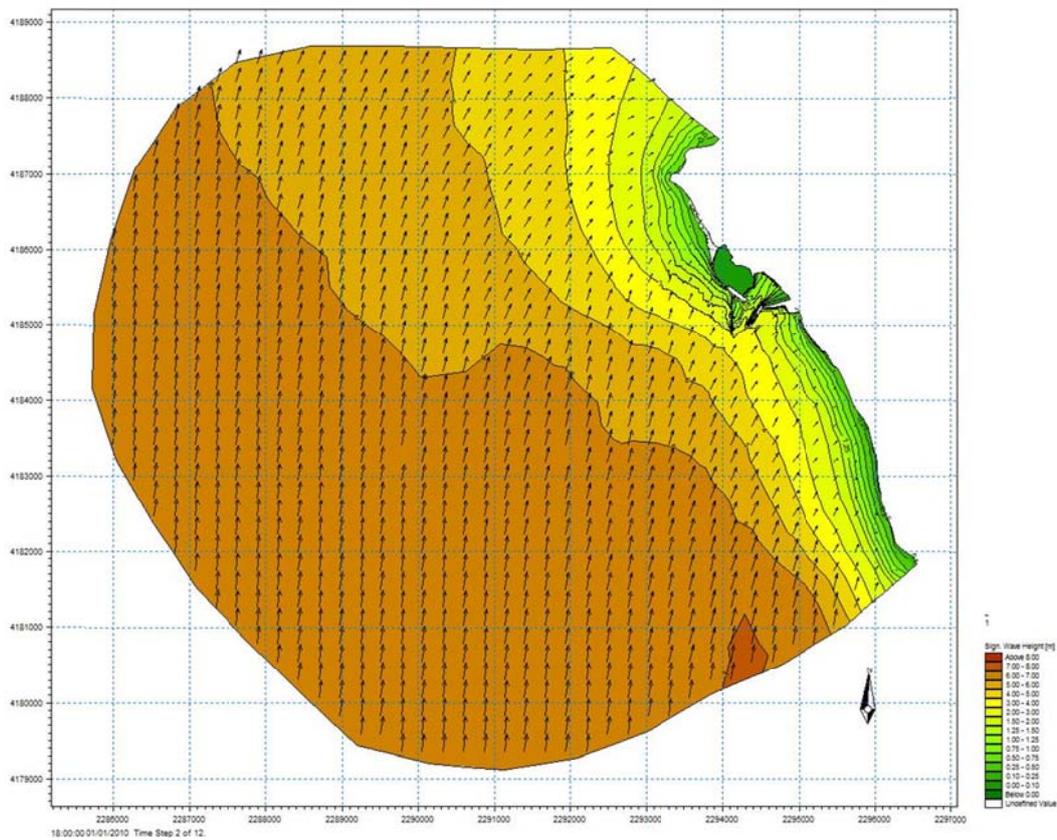
Dallo studio condotto in precedenza si rileva che le onde che influenzano il sito in esame sono quelle provenienti dai settori dal 11 al 23, di seguito si riportano in dettaglio le elaborazioni per i suddetti settori, per tempi di ritorno di 50 e 120 anni, sia per il modello di largo che di dettaglio.



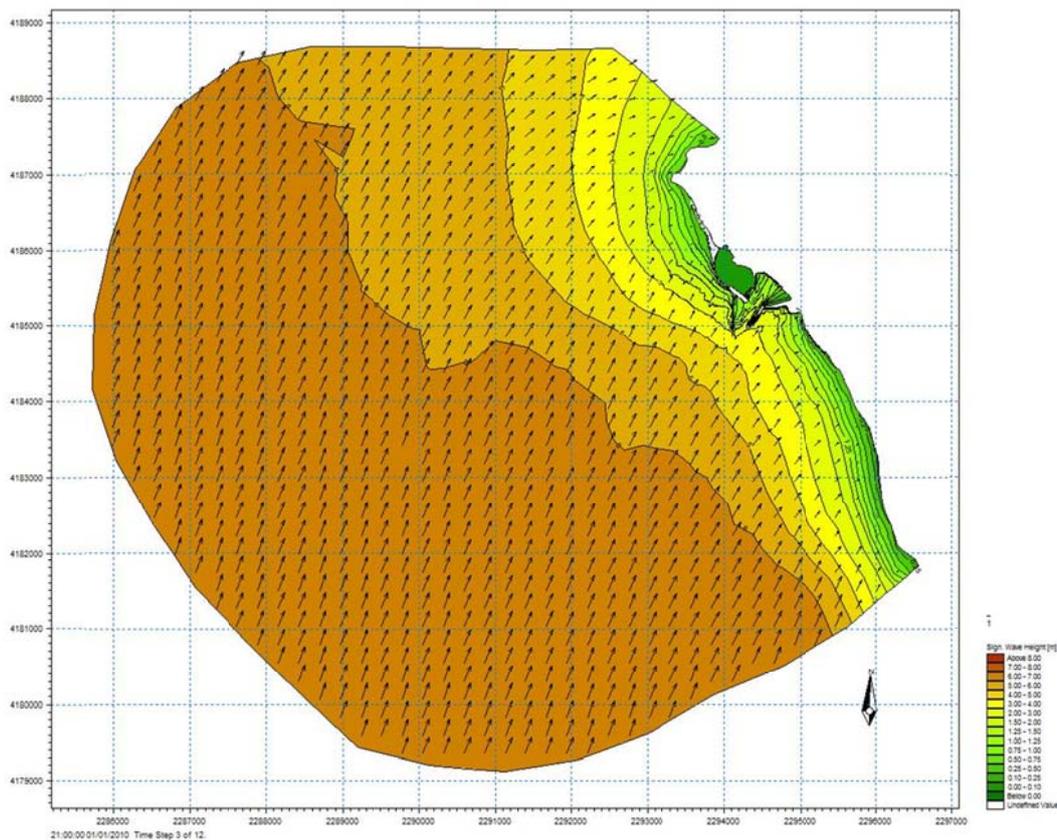
**Figura 11 a - Andamento dell'onda dal settore 11 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



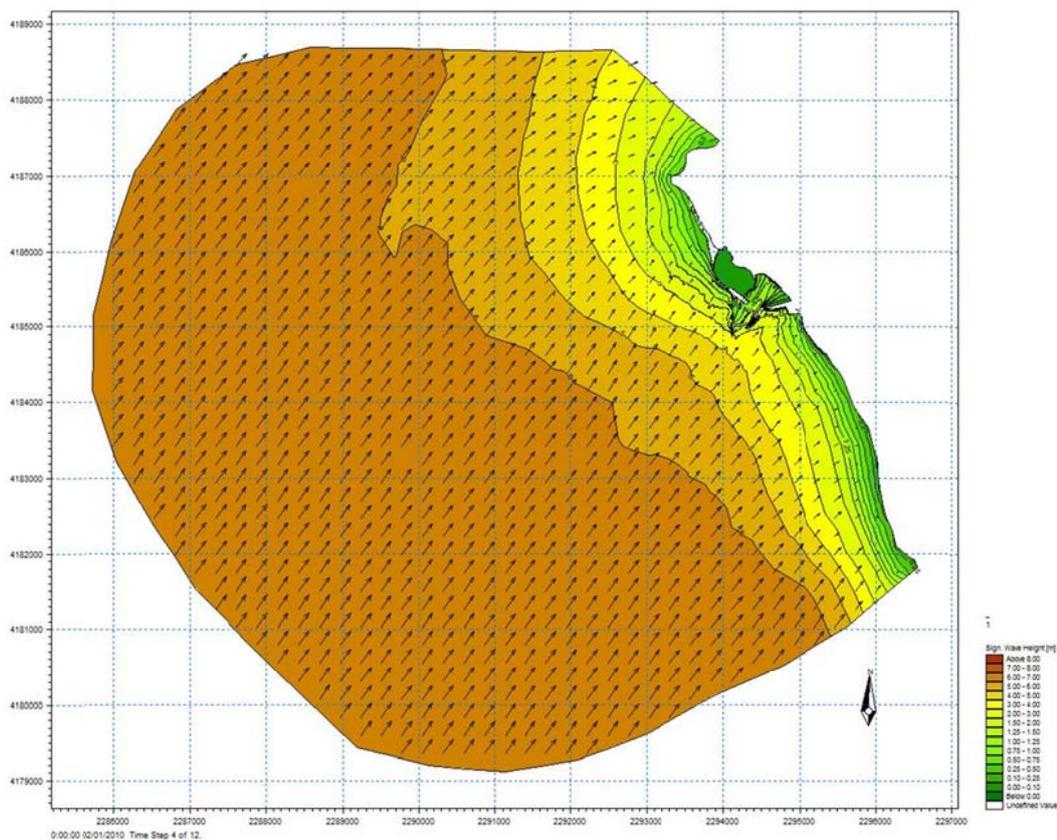
**Figura 11 b - Andamento dell'onda dal settore 12 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



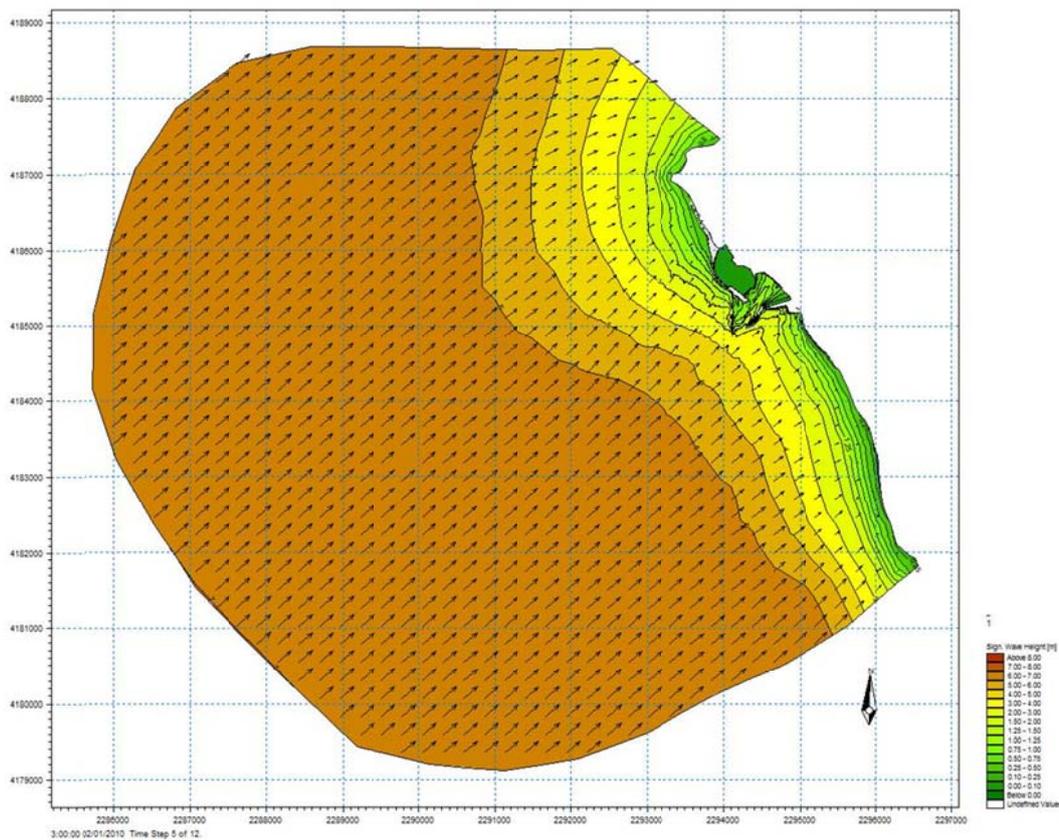
**Figura 11 c - Andamento dell'onda dal settore 13 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



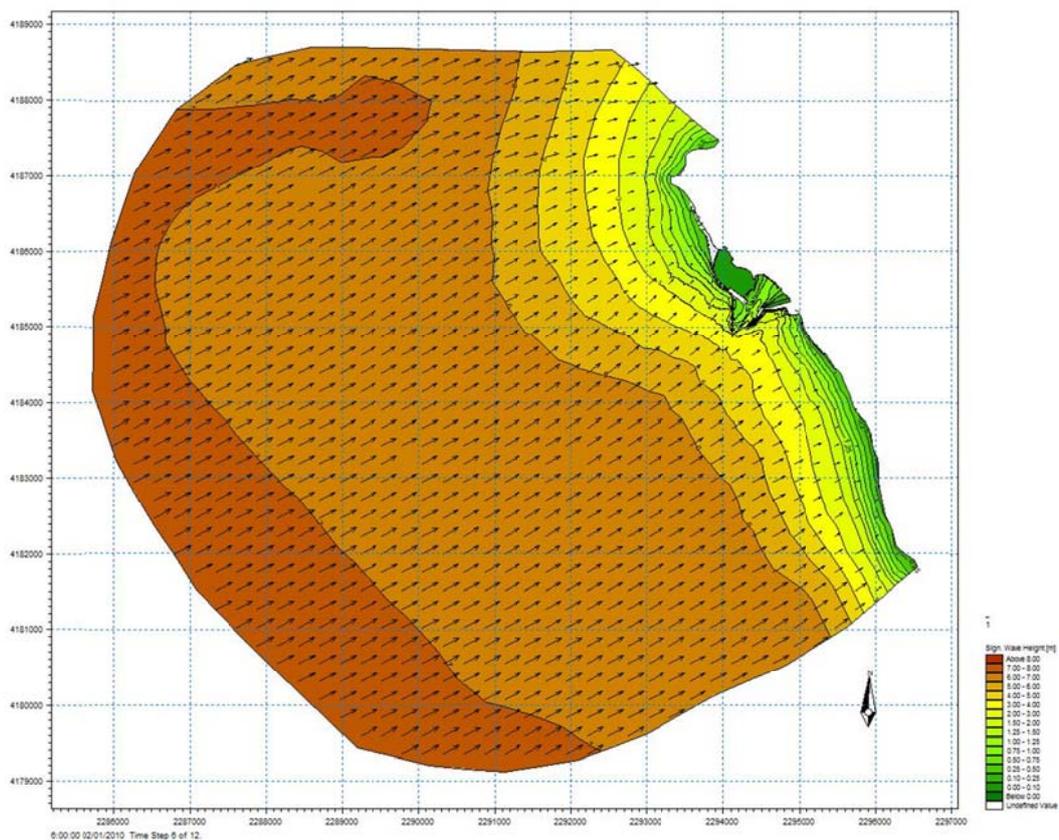
**Figura 11 d - Andamento dell'onda dal settore 14 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



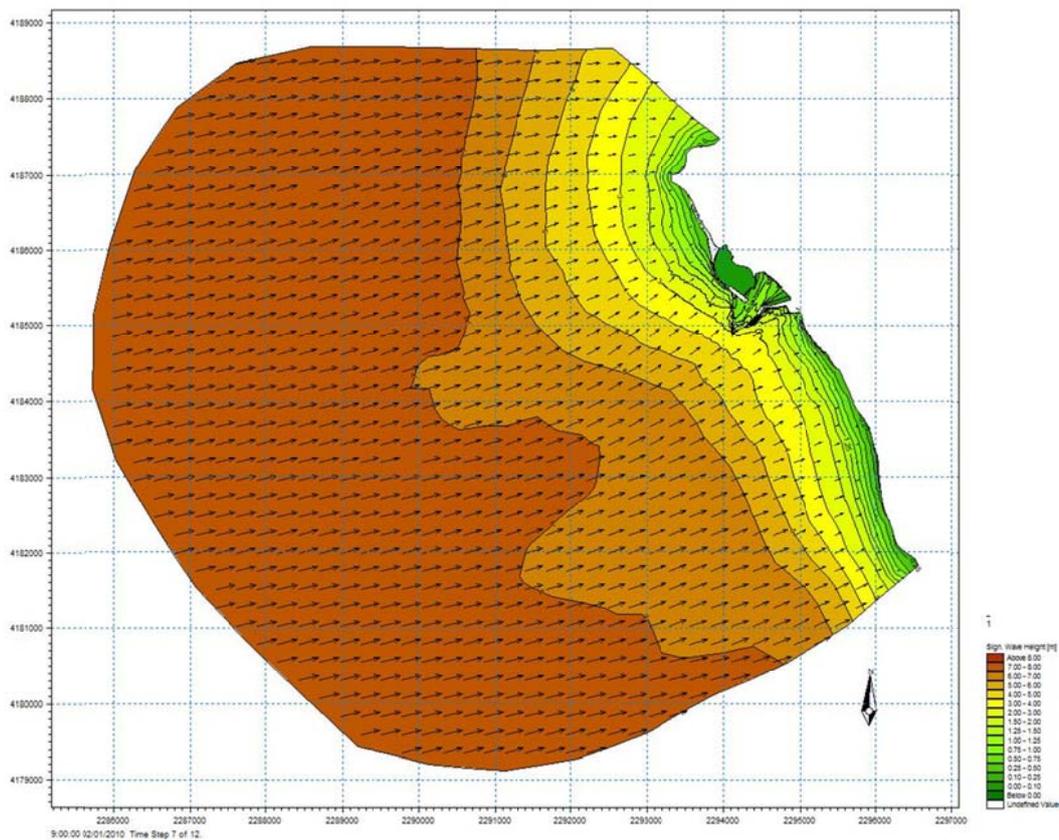
**Figura 11 e - Andamento dell'onda dal settore 15 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



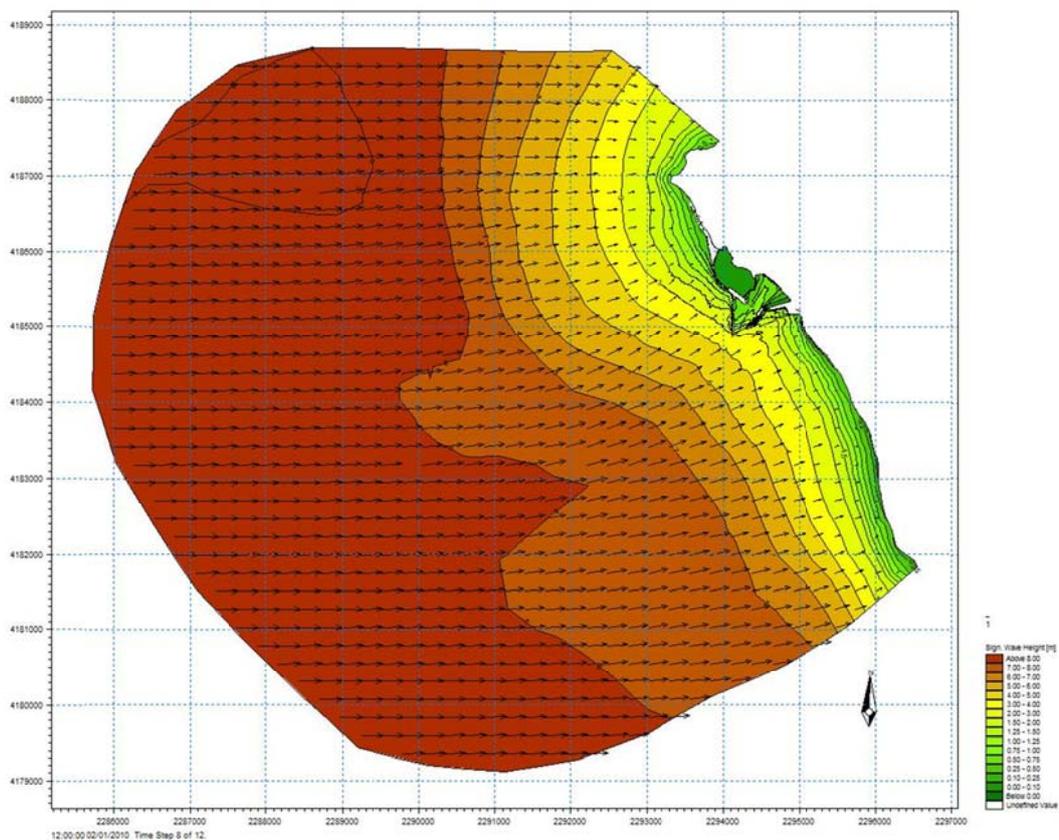
**Figura 11 f - Andamento dell'onda dal settore 16 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



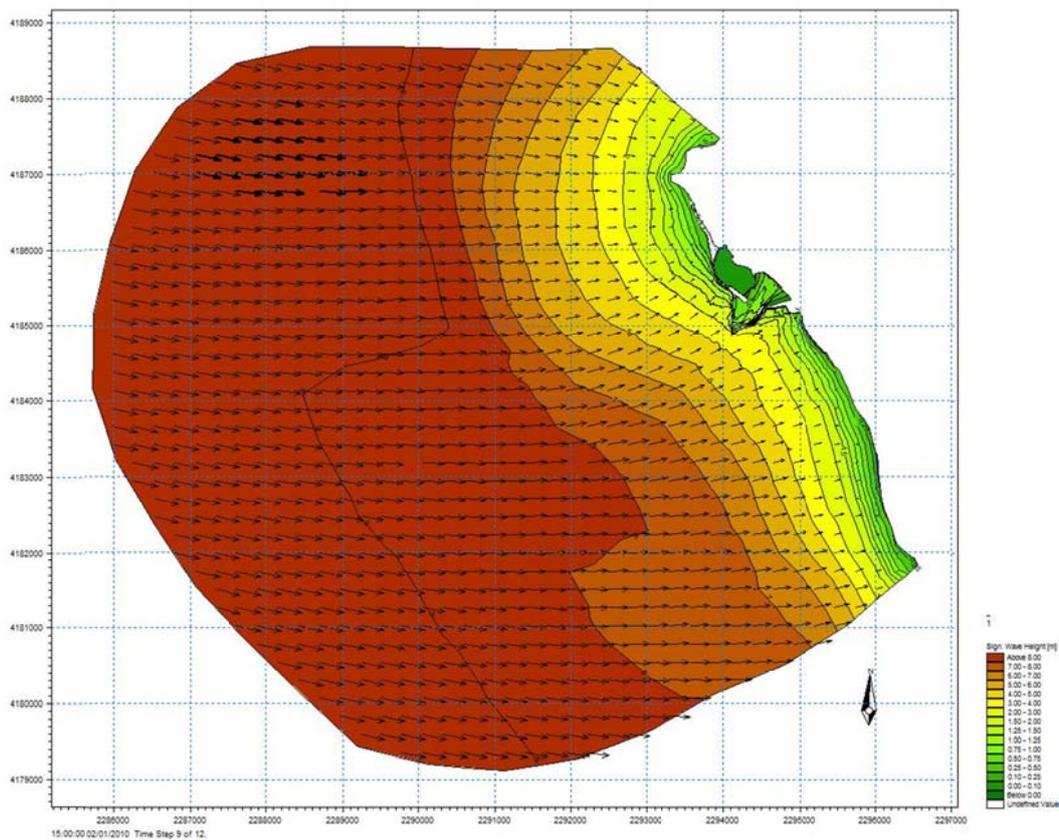
**Figura 11 g - Andamento dell'onda dal settore 17 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



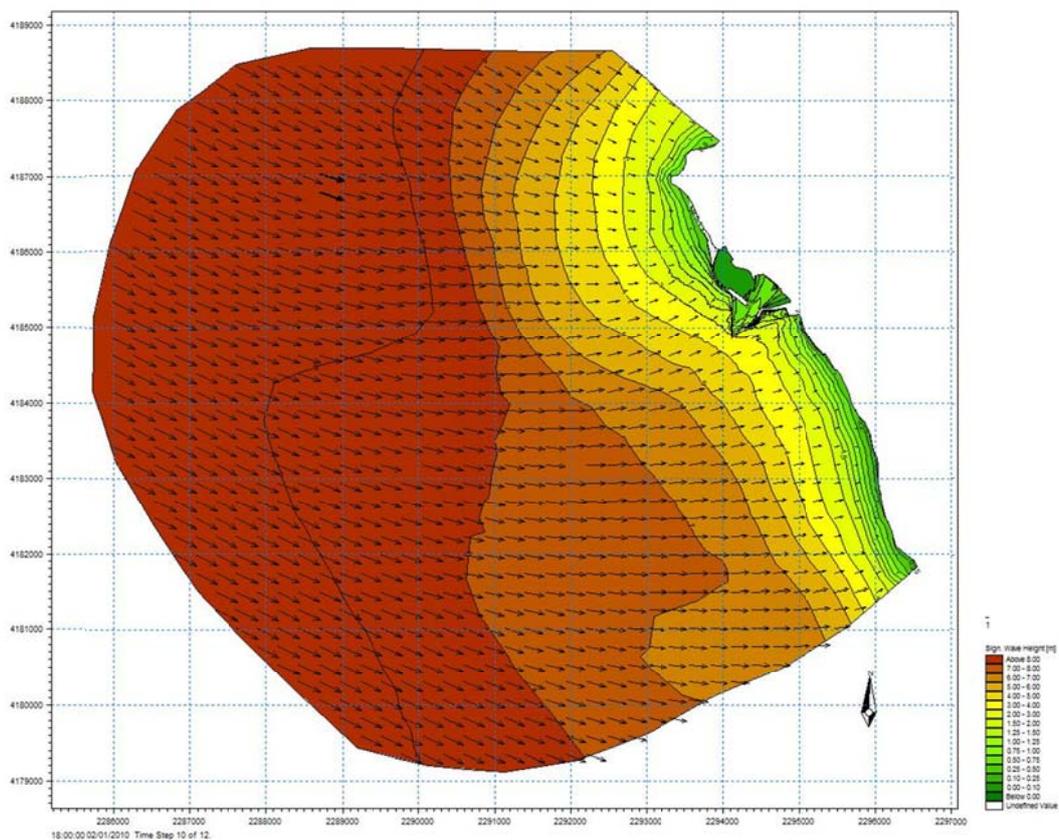
**Figura 11 h - Andamento dell'onda dal settore 18 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



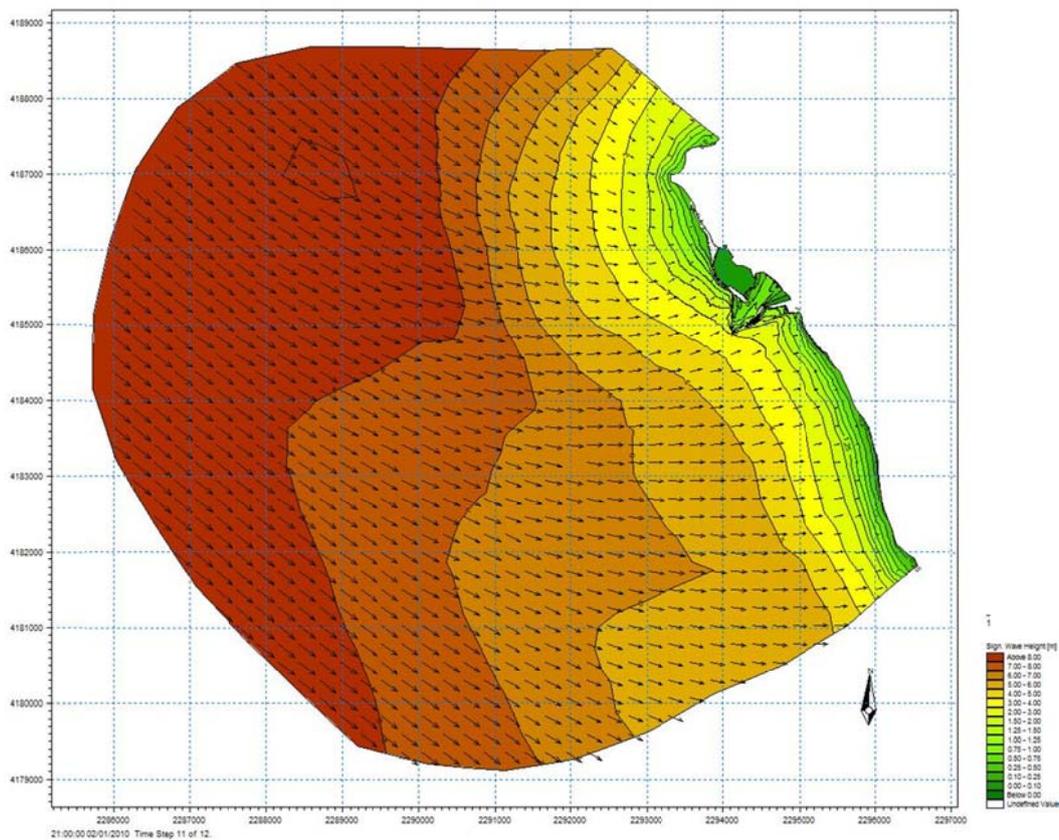
**Figura 11 i - Andamento dell'onda dal settore 19 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



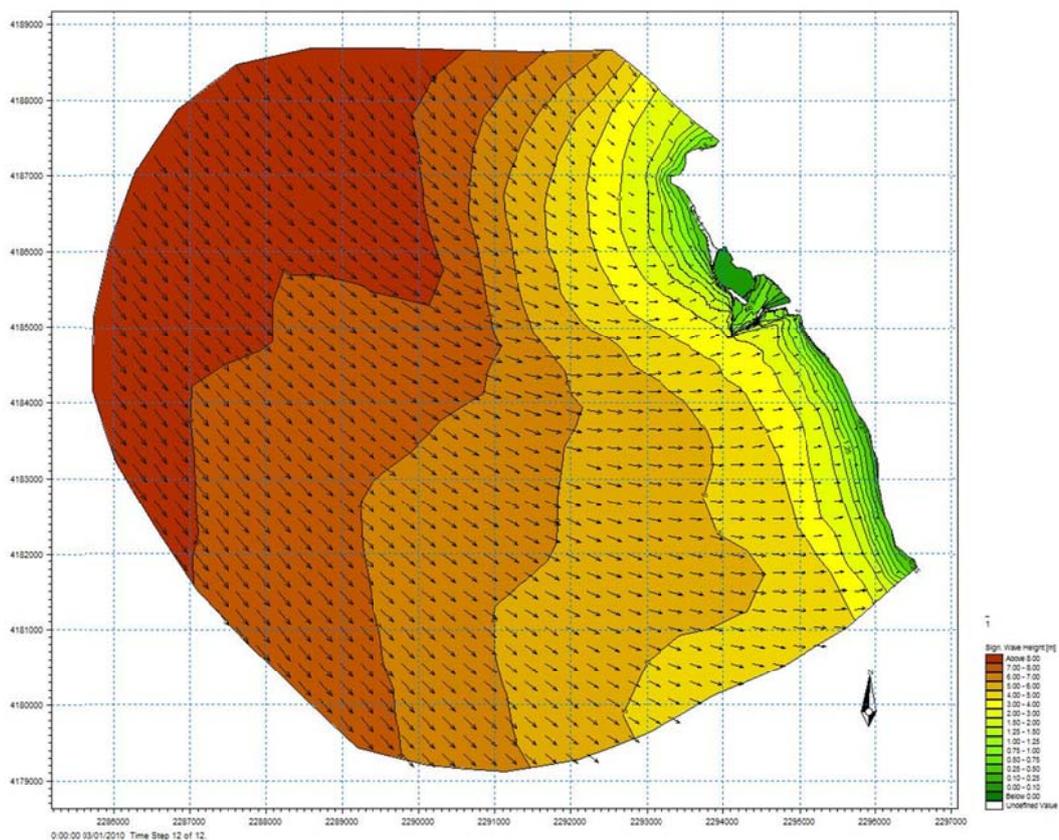
**Figura 11 l - Andamento dell'onda dal settore 20 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



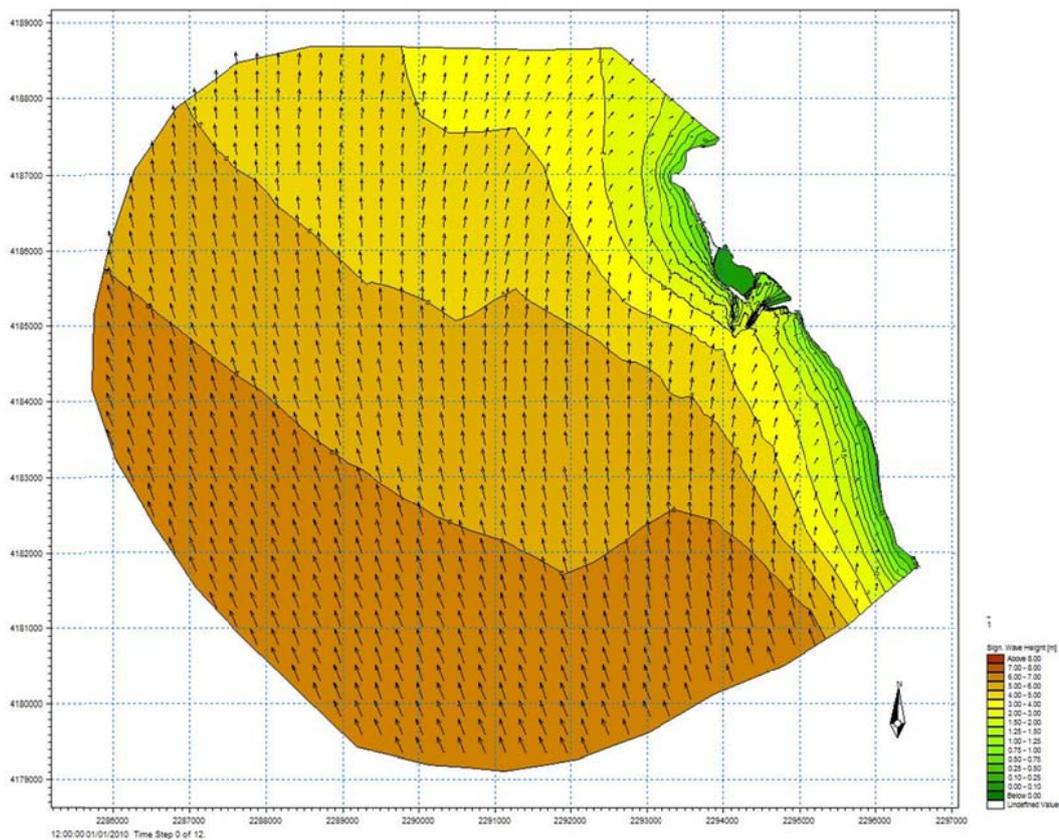
**Figura 11 m - Andamento dell'onda dal settore 21 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



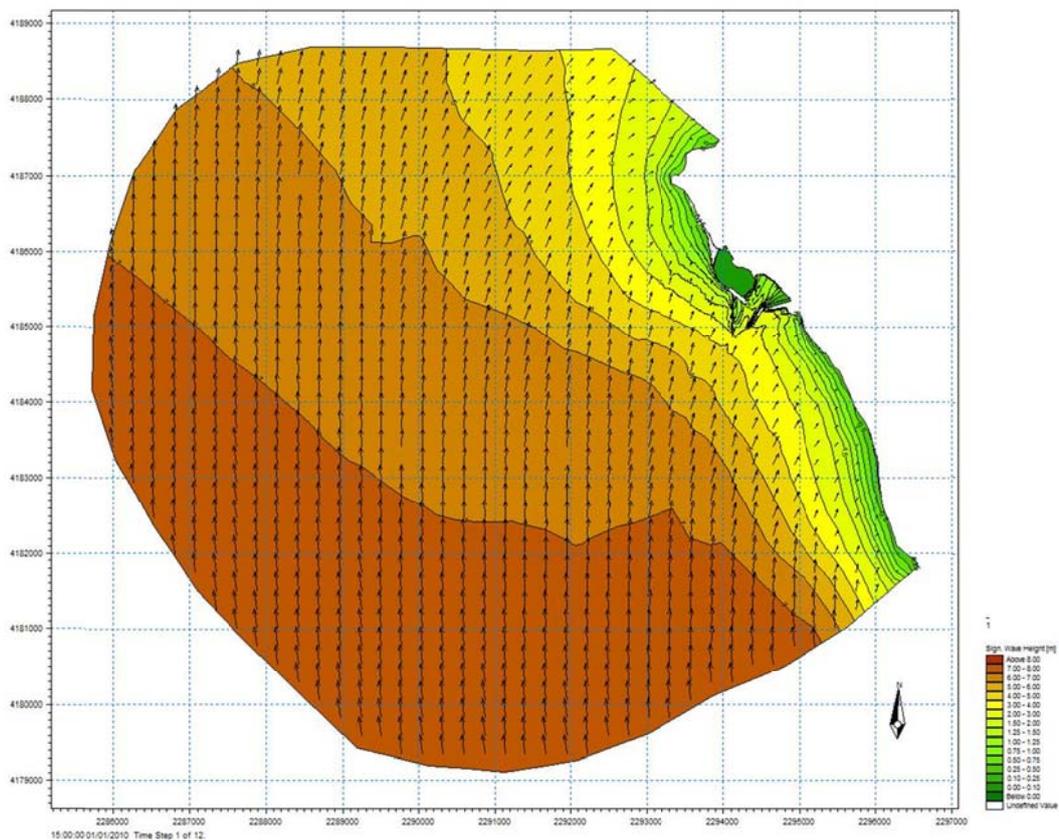
**Figura 11 n - Andamento dell'onda dal settore 22 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



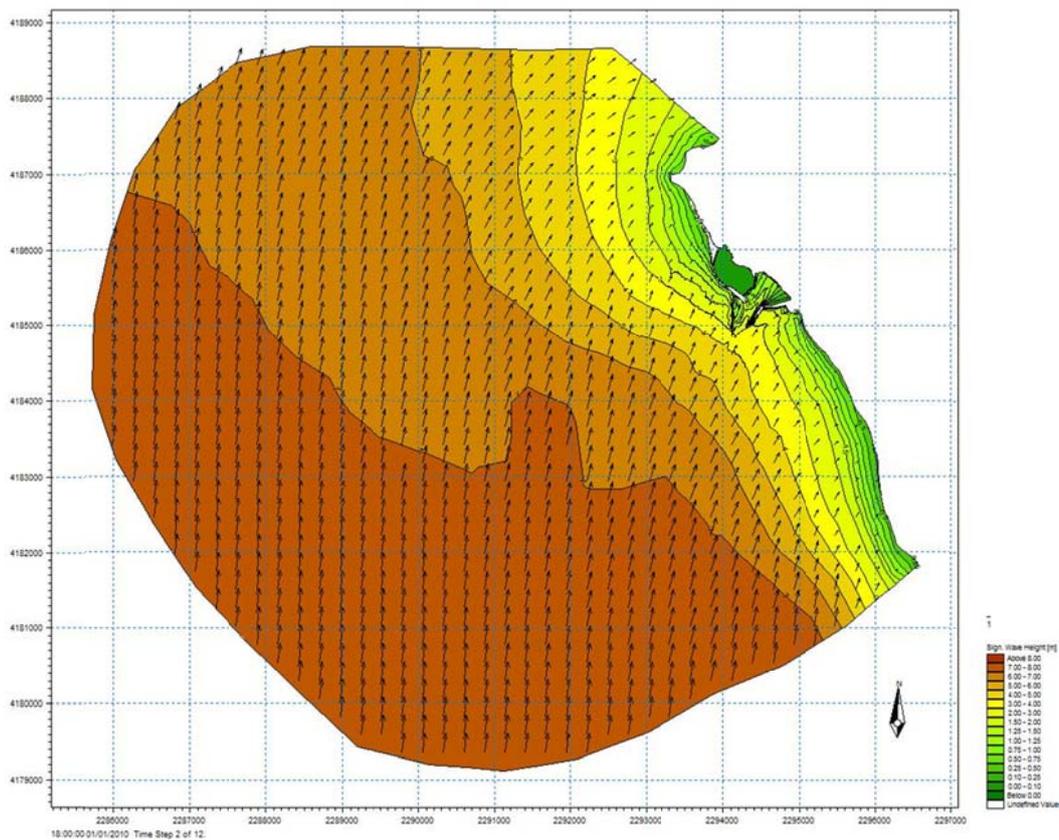
**Figura 11 o - Andamento dell'onda dal settore 23 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto –  
Modello di largo**



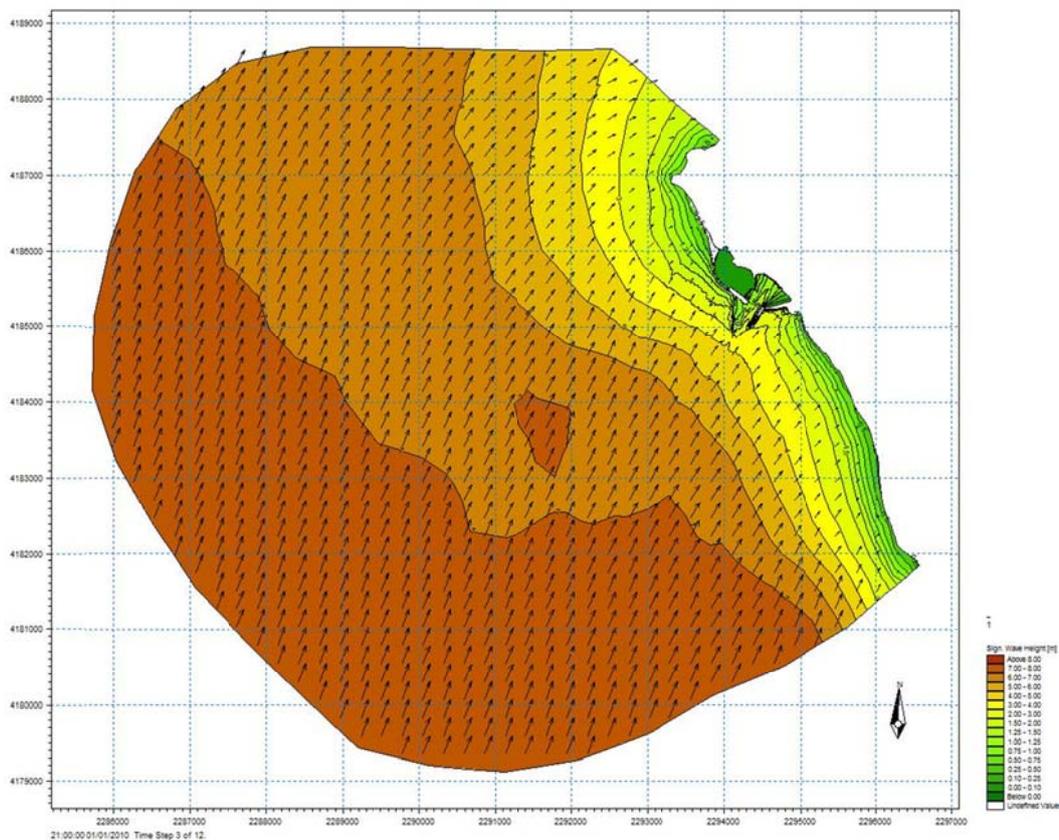
**Figura 12 a – Andamento dell’onda dal settore 11 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



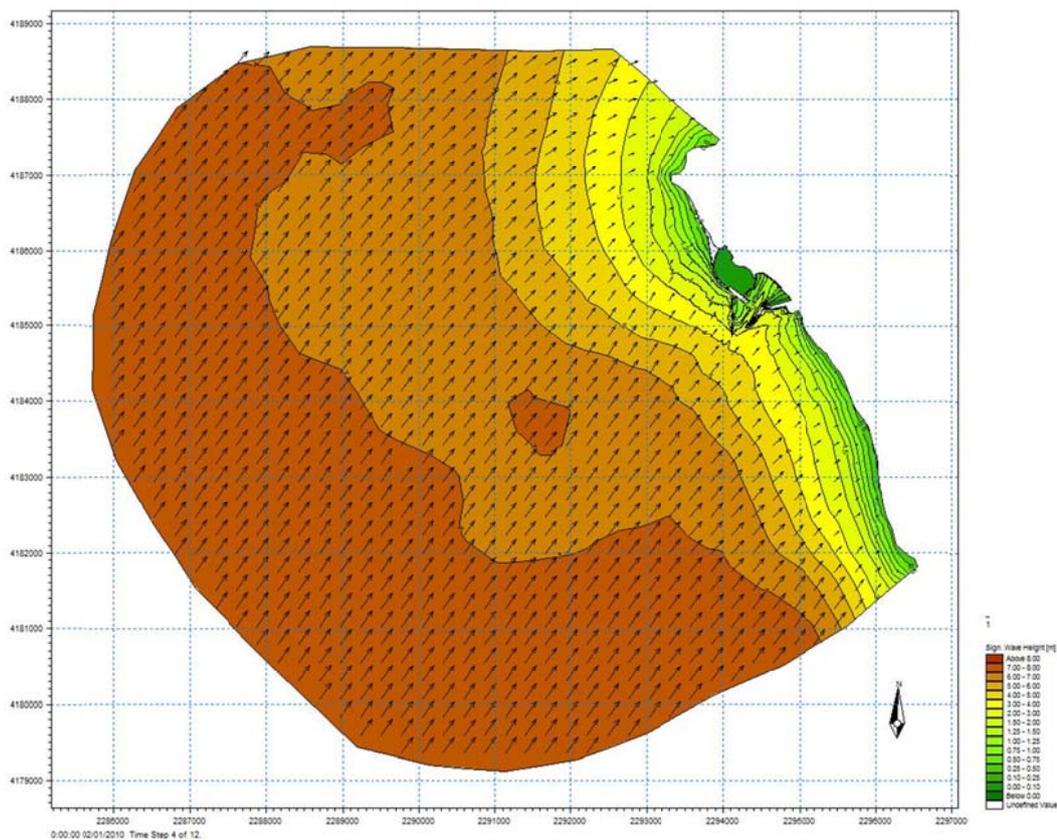
**Figura 12 b – Andamento dell’onda dal settore 12 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



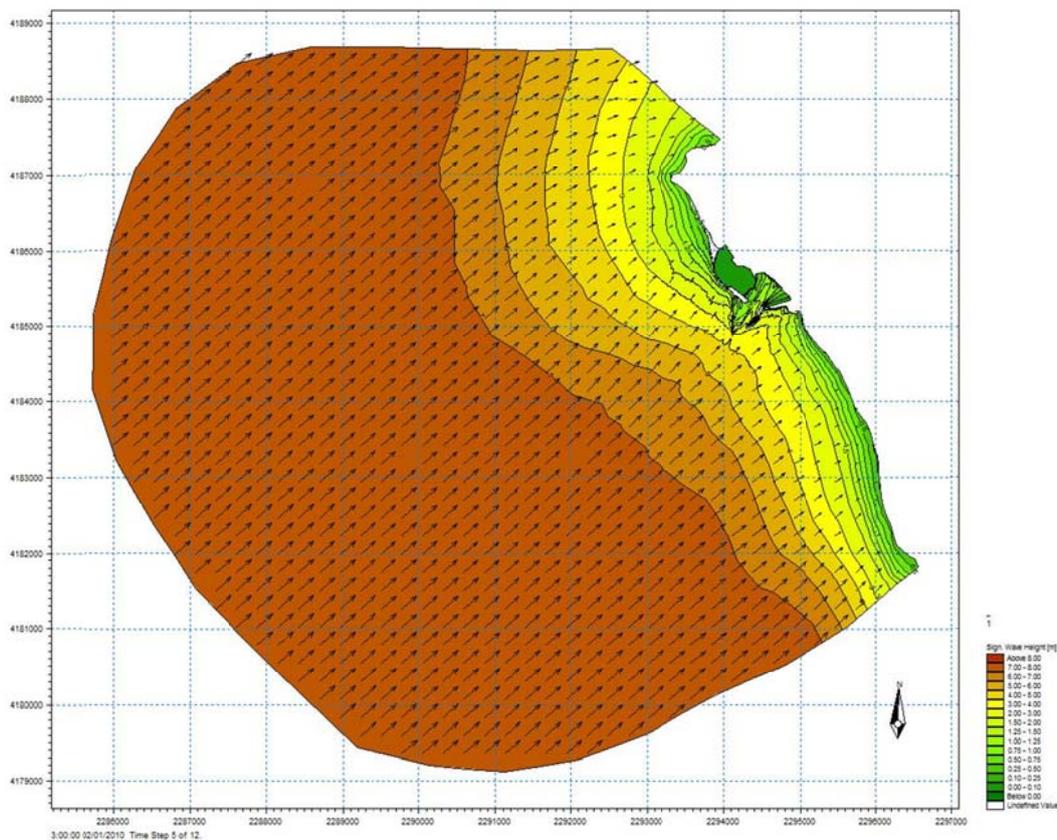
**Figura 12 c – Andamento dell’onda dal settore 13 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



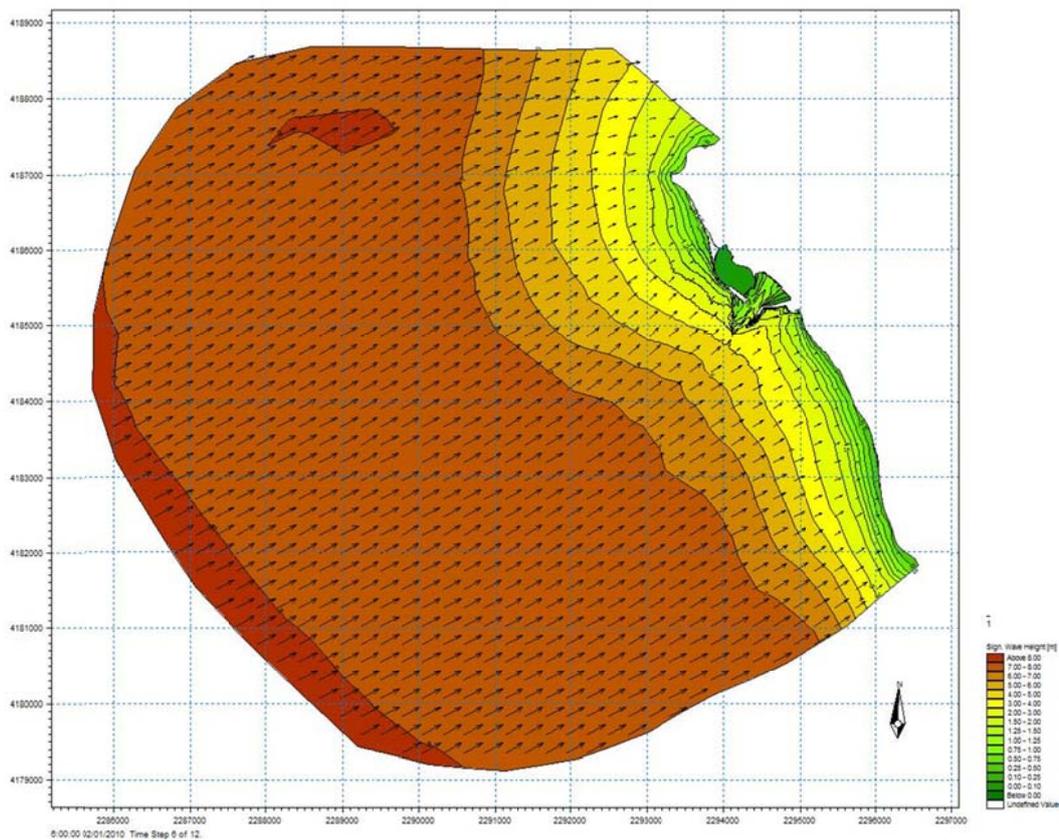
**Figura 12 d – Andamento dell’onda dal settore 14 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



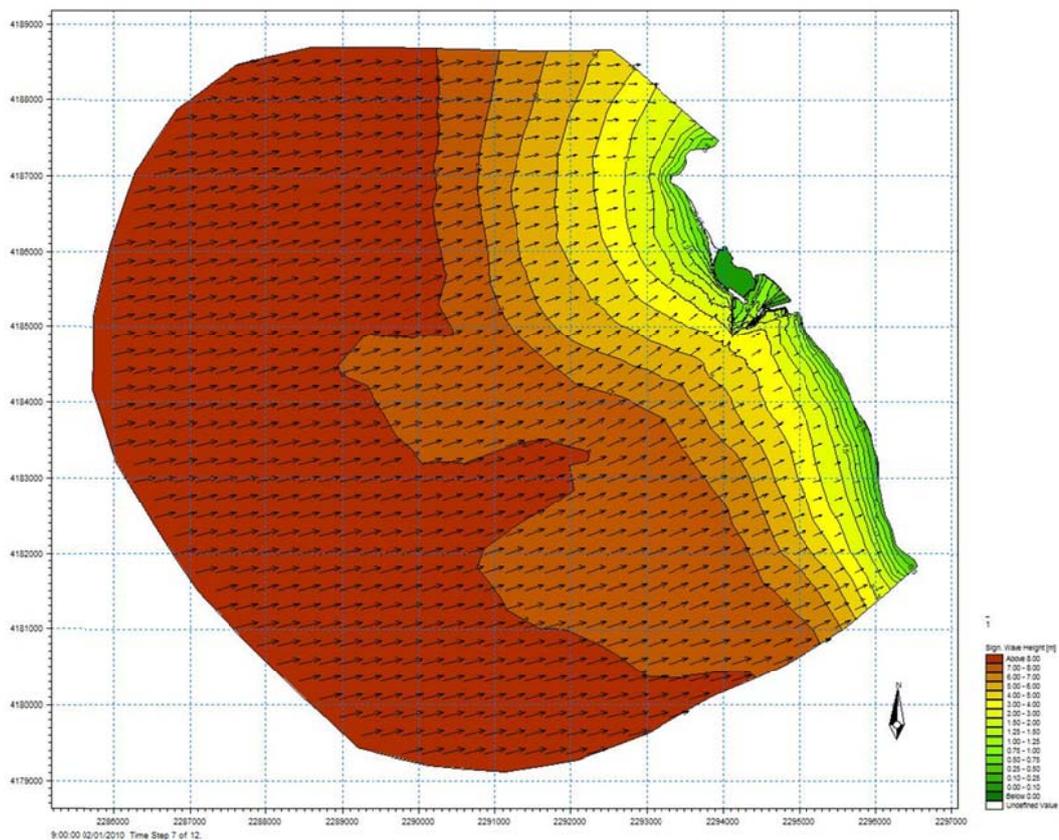
**Figura 12 e – Andamento dell’onda dal settore 15 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



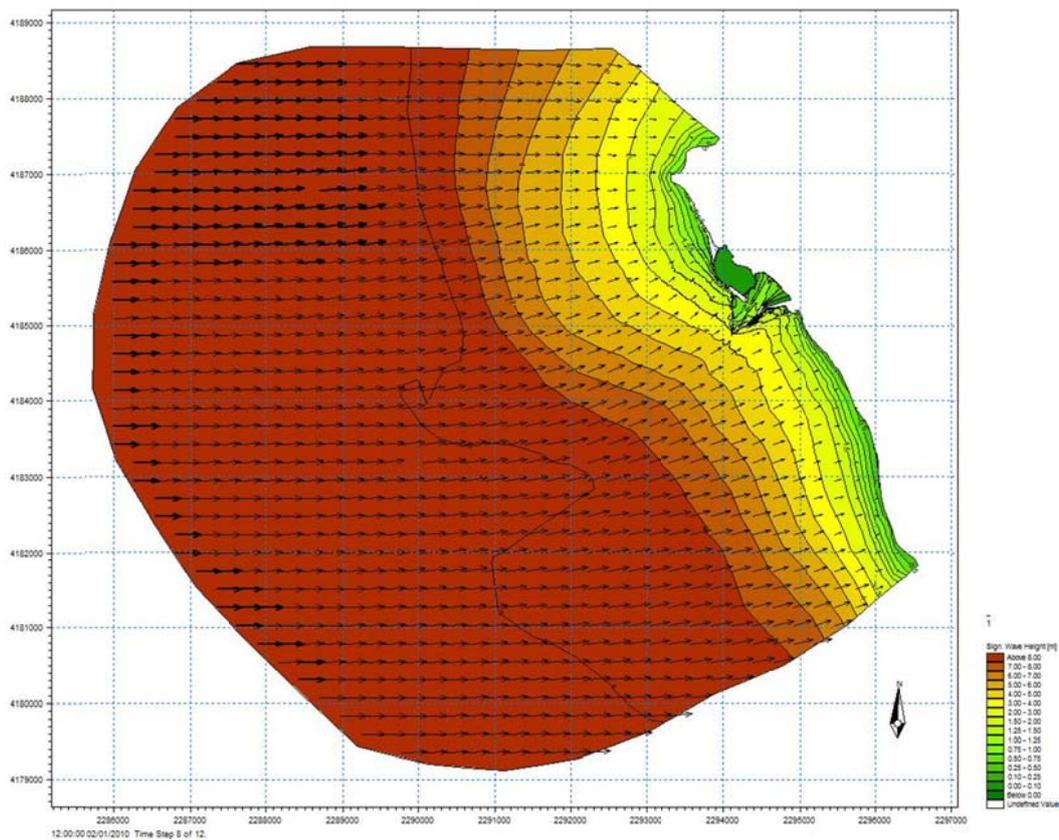
**Figura 12 f – Andamento dell’onda dal settore 16 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



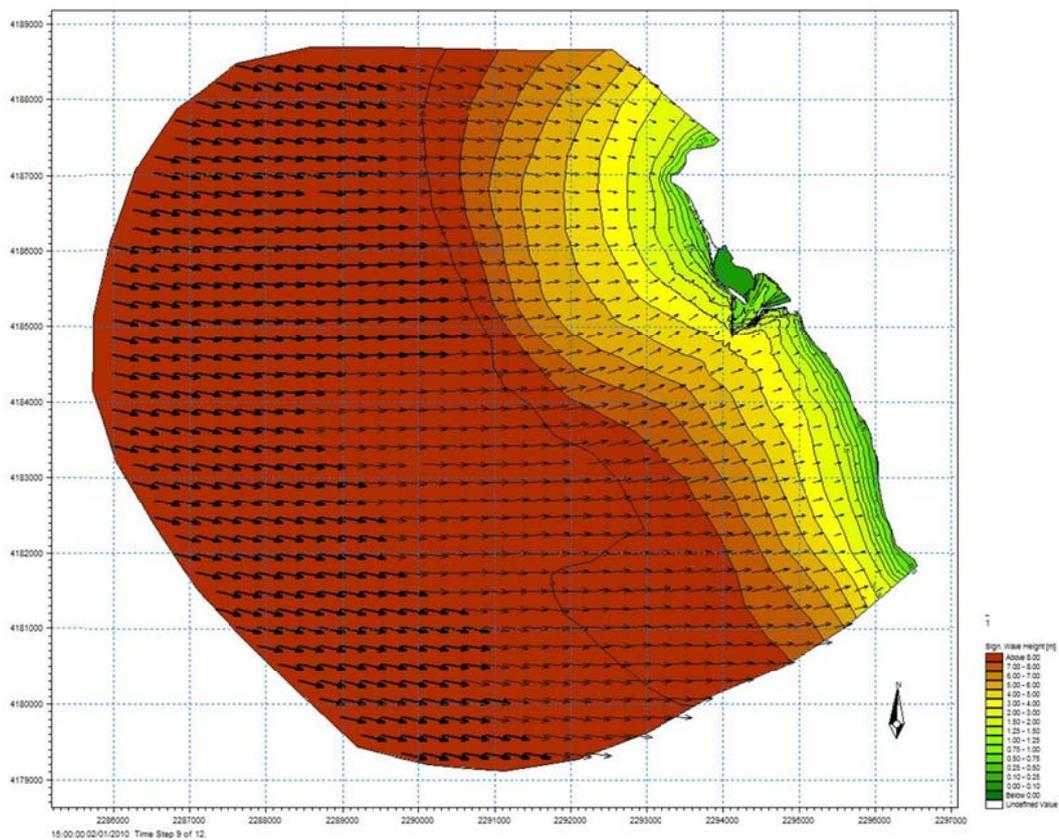
**Figura 12 g – Andamento dell’onda dal settore 17 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



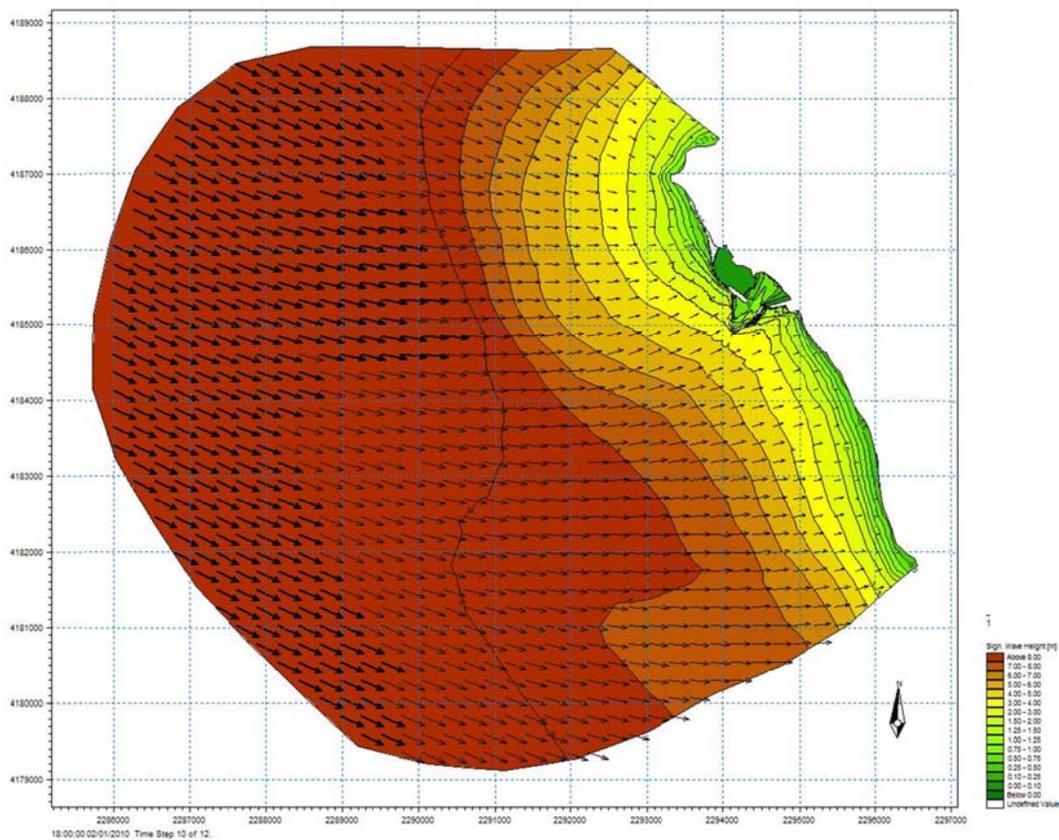
**Figura 12 h – Andamento dell’onda dal settore 18 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



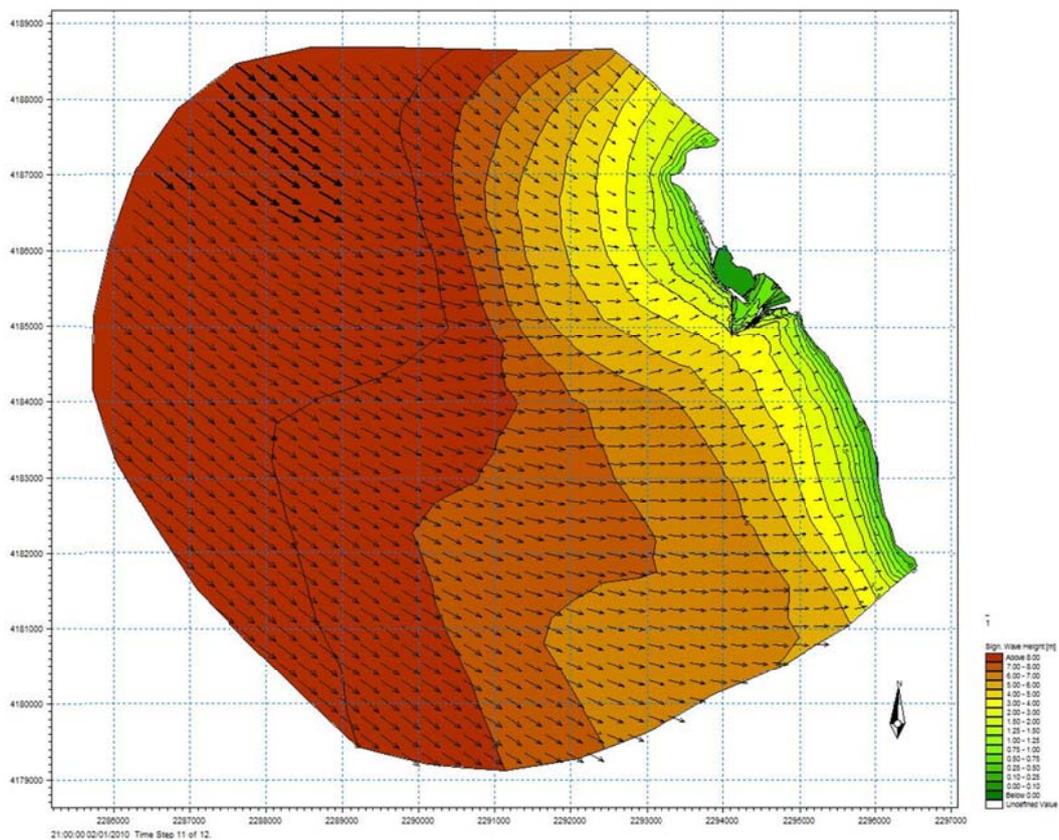
**Figura 12 i – Andamento dell'onda dal settore 19 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



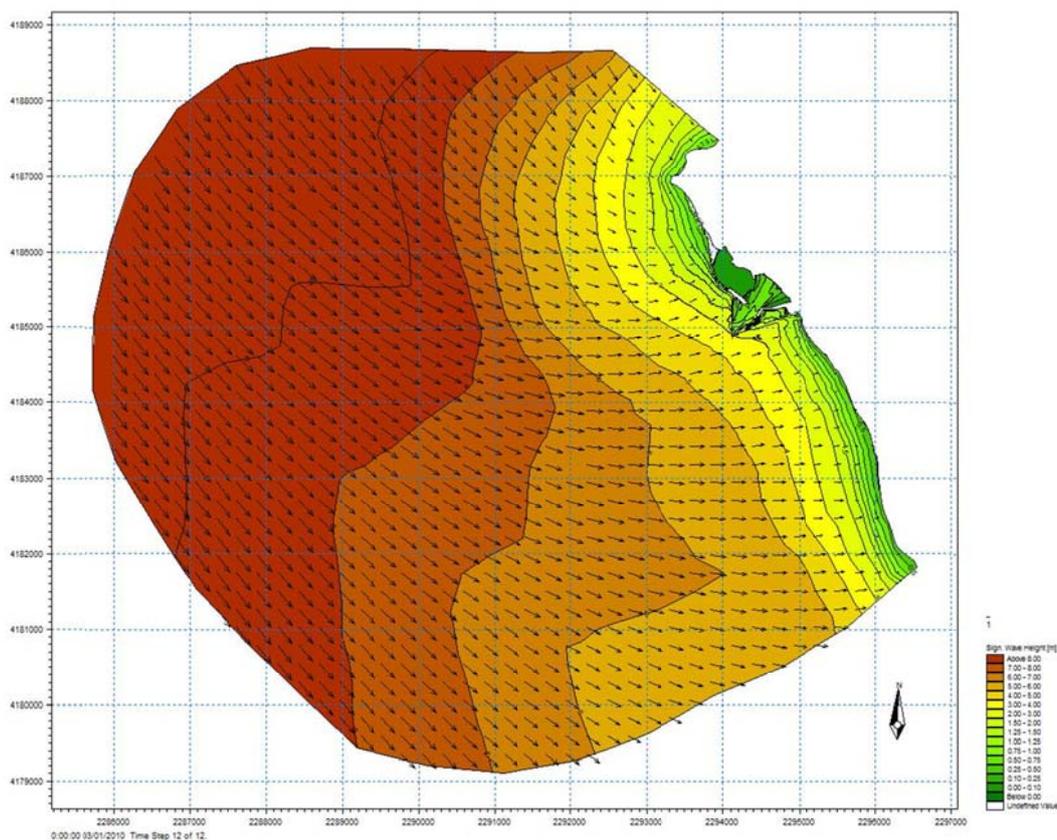
**Figura 12 l – Andamento dell'onda dal settore 20 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



**Figura 12 m – Andamento dell’onda dal settore 21 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



**Figura 12 n – Andamento dell’onda dal settore 22 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**



**Figura 12 o – Andamento dell’onda dal settore 23 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto –  
Modello di largo**

Una volta studiato il clima ondoso a largo si è “estratto” il clima ondoso sotto costa nel punto di coordinate UTM 4184295,5N 273833,5E. Nelle tabelle seguenti si riportano le onde estratte poste come input del modello di dettaglio.

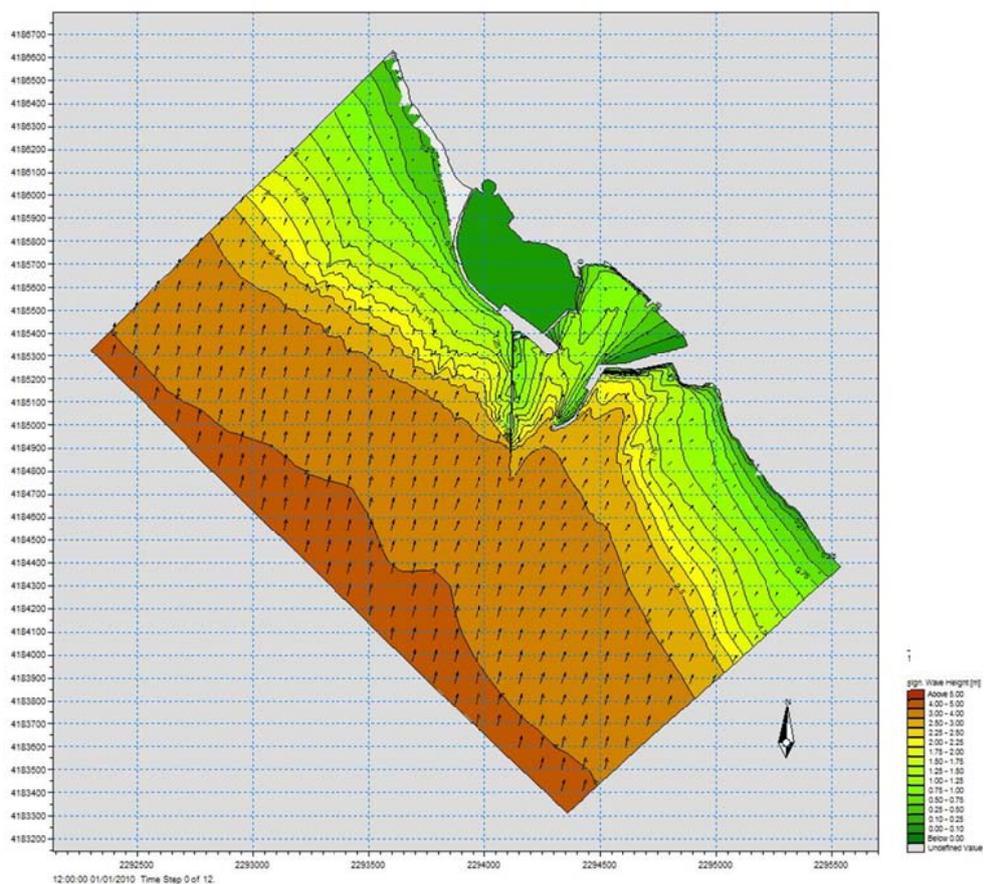
Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	4.17934	9.36185	191.169
12	4.56741	10.149	198.769
13	4.65072	10.3721	204.794
14	4.67173	10.4537	211.319
15	4.68657	10.5099	218.676
16	4.74127	10.7143	226.328
17	4.73989	10.8005	233.34
18	4.76368	11.076	238.991
19	4.81776	11.694	242.905
20	4.81733	12.0956	246.113
21	4.71434	11.8557	249.945
22	4.47566	11.1132	255.053
23	4.23834	10.5905	259.546

**Tabella 4 – Valori di Hs e Tp per Tr 50 anni**

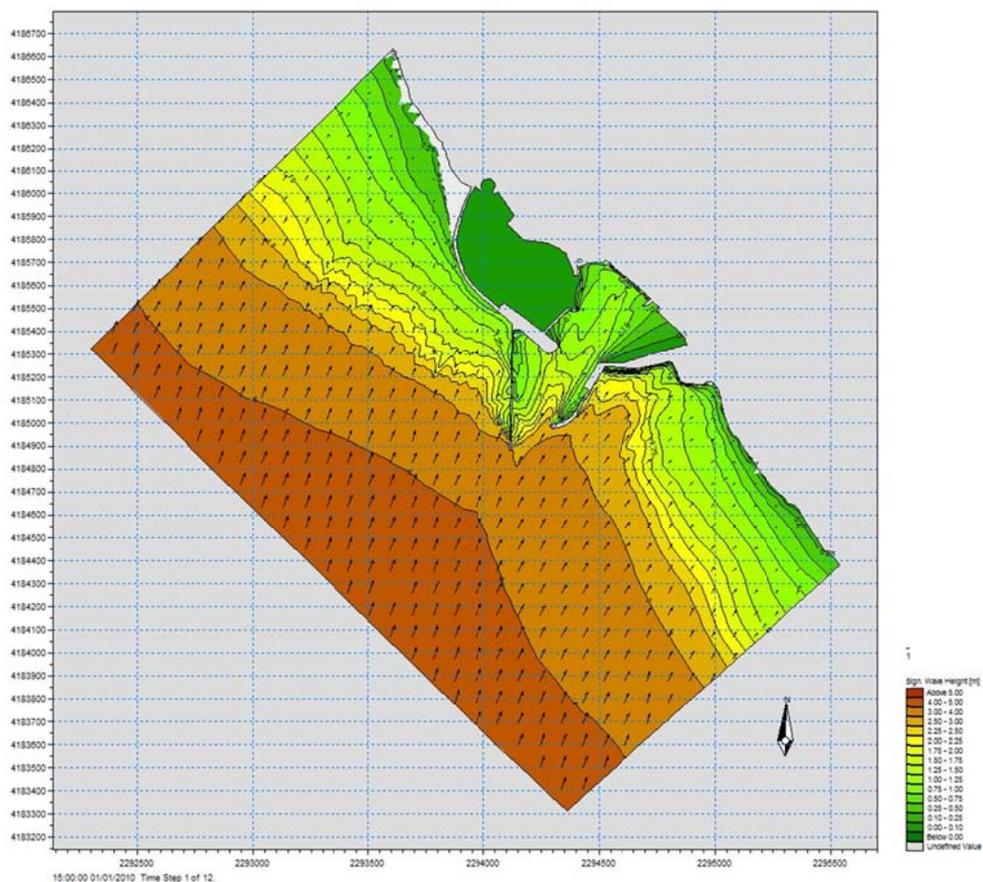
Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	4.4703	9.85324	192.319
12	4.80515	10.7487	199.878
13	4.88321	10.9765	205.653
14	4.90944	11.0472	211.861
15	4.93061	11.1049	218.919
16	4.97368	11.3276	226.311
17	4.96268	11.4192	233.114
18	4.96927	11.7129	238.541
19	5.00865	12.3635	242.346
20	5.00647	12.7833	245.499
21	4.92192	12.5693	249.005
22	4.73113	11.8564	253.491
23	4.52891	11.3614	257.505

**Tabella 5 – Valori di Hs e Tp per Tr 120 anni**

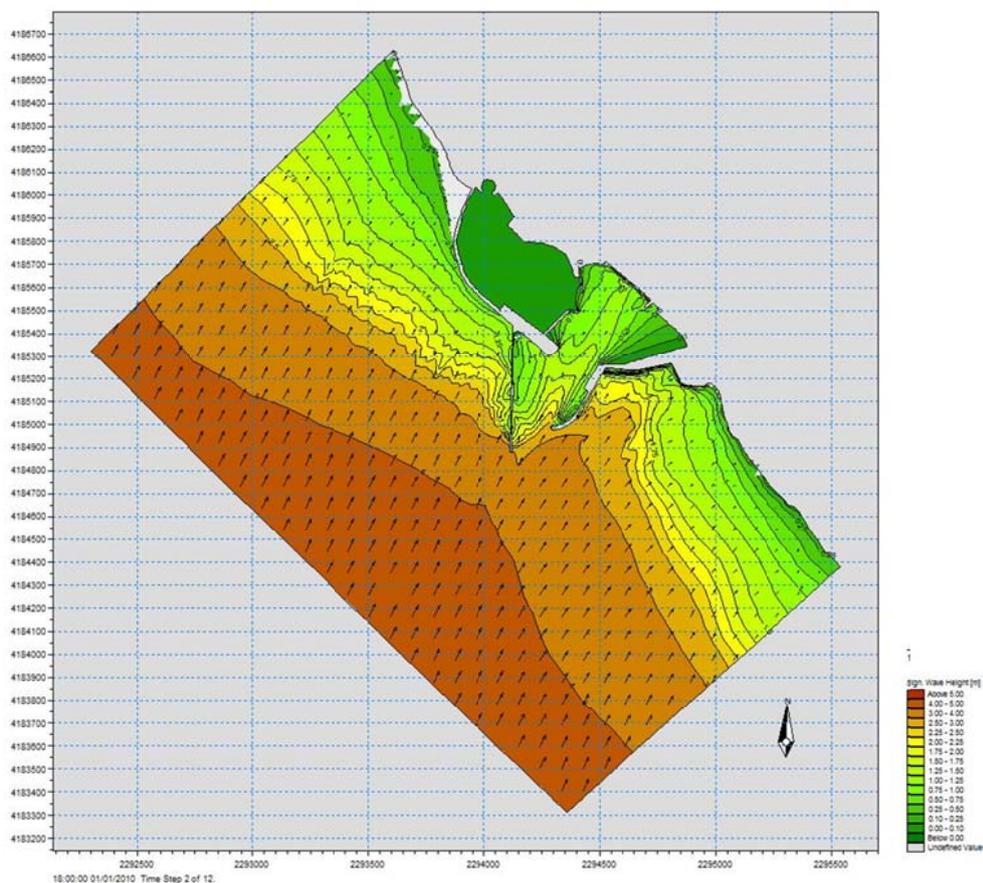
Nelle figure seguenti sono riportati i risultati del modello di dettaglio.



**Figura 13 a – Andamento dell'onda dal settore 11 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 13 b – Andamento dell’onda dal settore 12 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 13 c – Andamento dell’onda dal settore 13 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio**

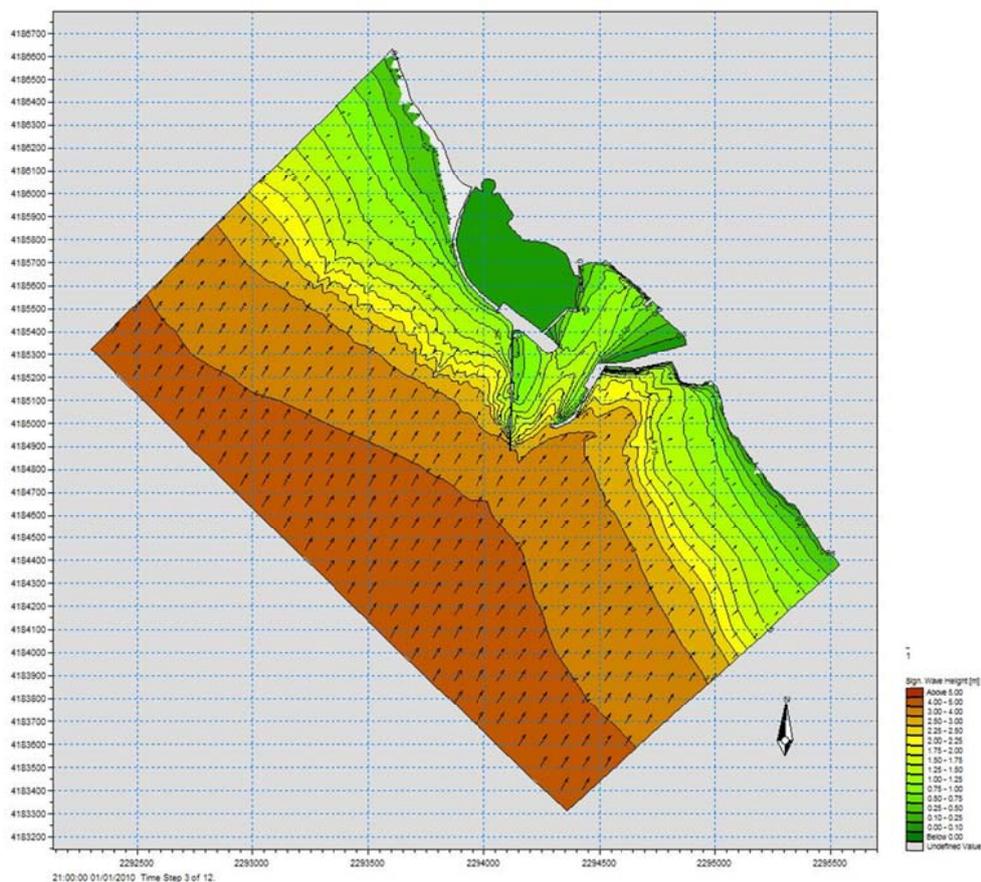


Figura 13 d – Andamento dell’onda dal settore 14 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio

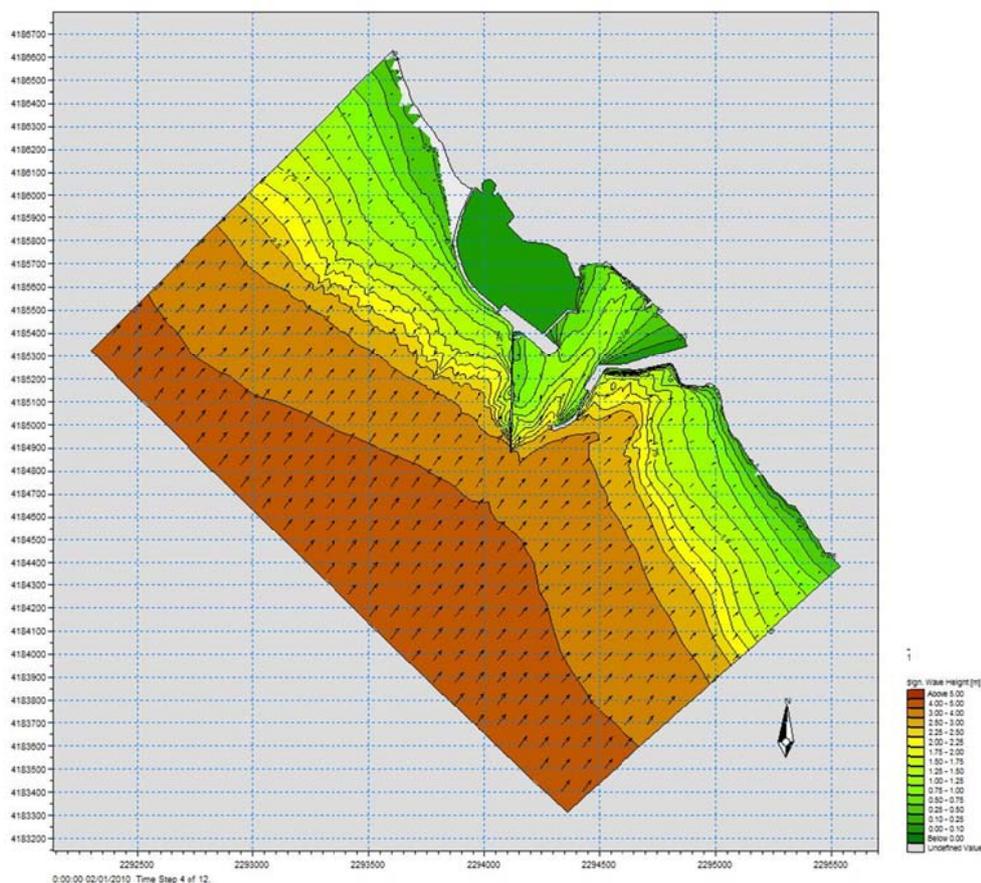


Figura 13 e – Andamento dell’onda dal settore 15 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio

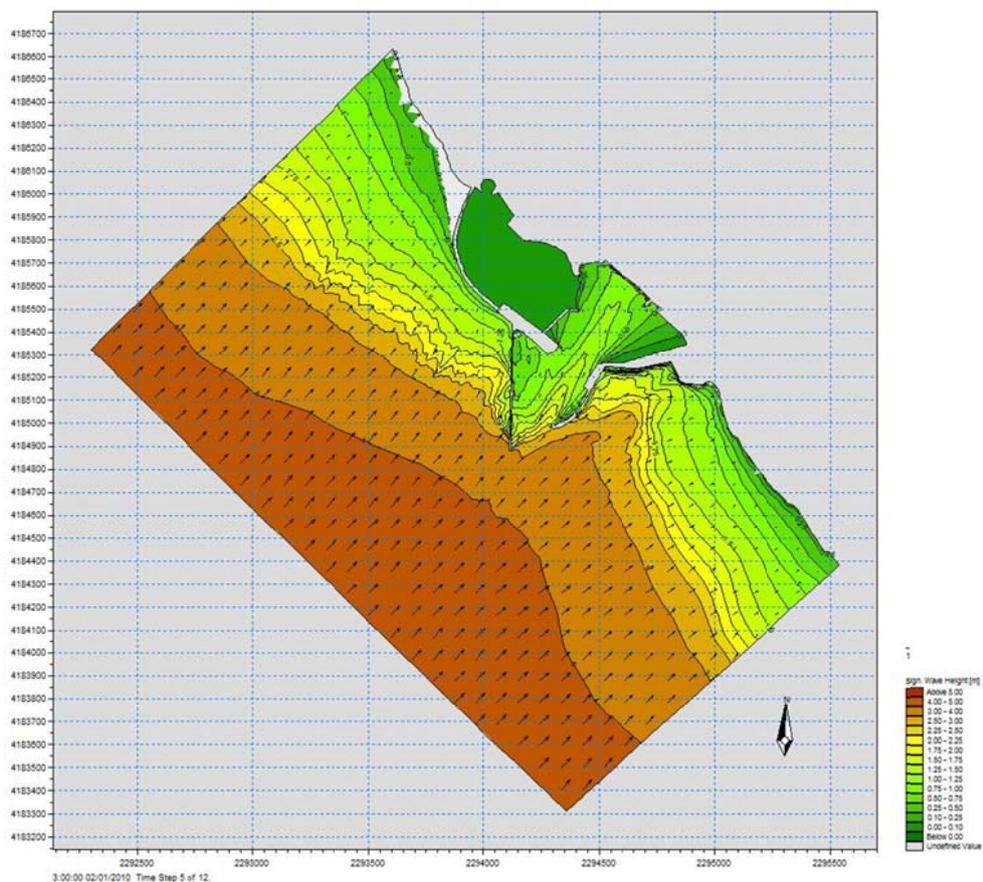


Figura 13 f – Andamento dell’onda dal settore 16 – modello SW -  $T_r = 50$  anni – Progetto – Modello di dettaglio

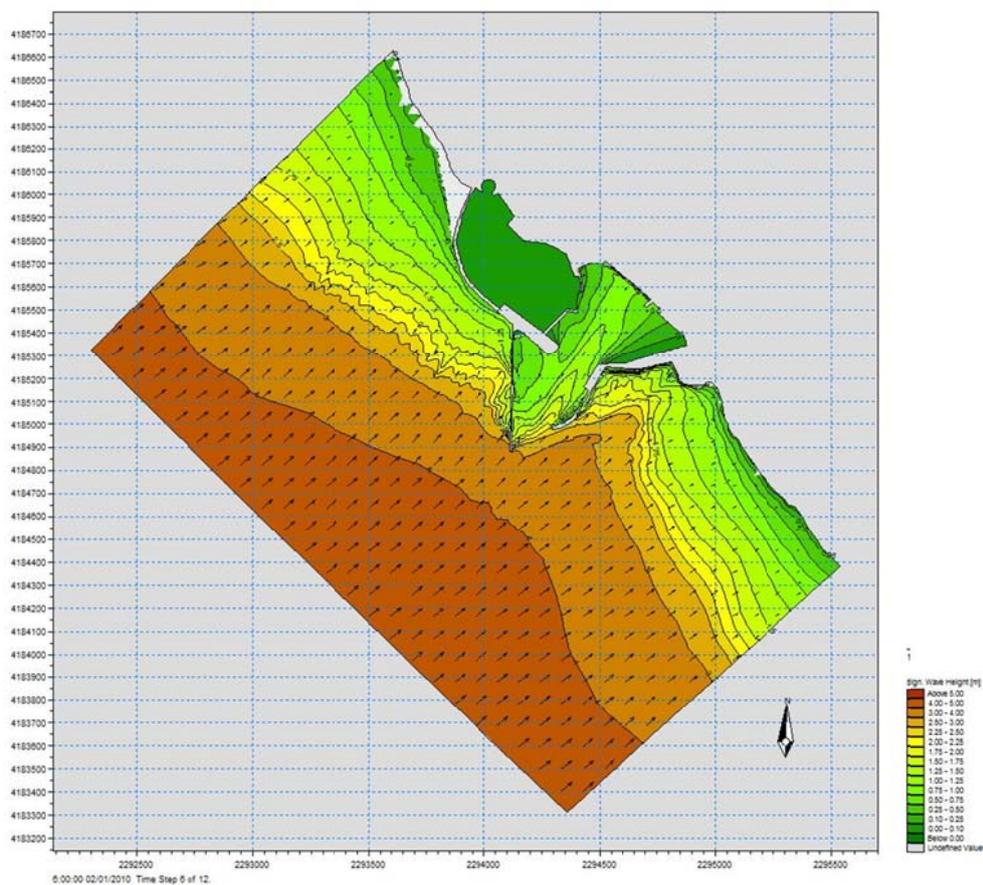
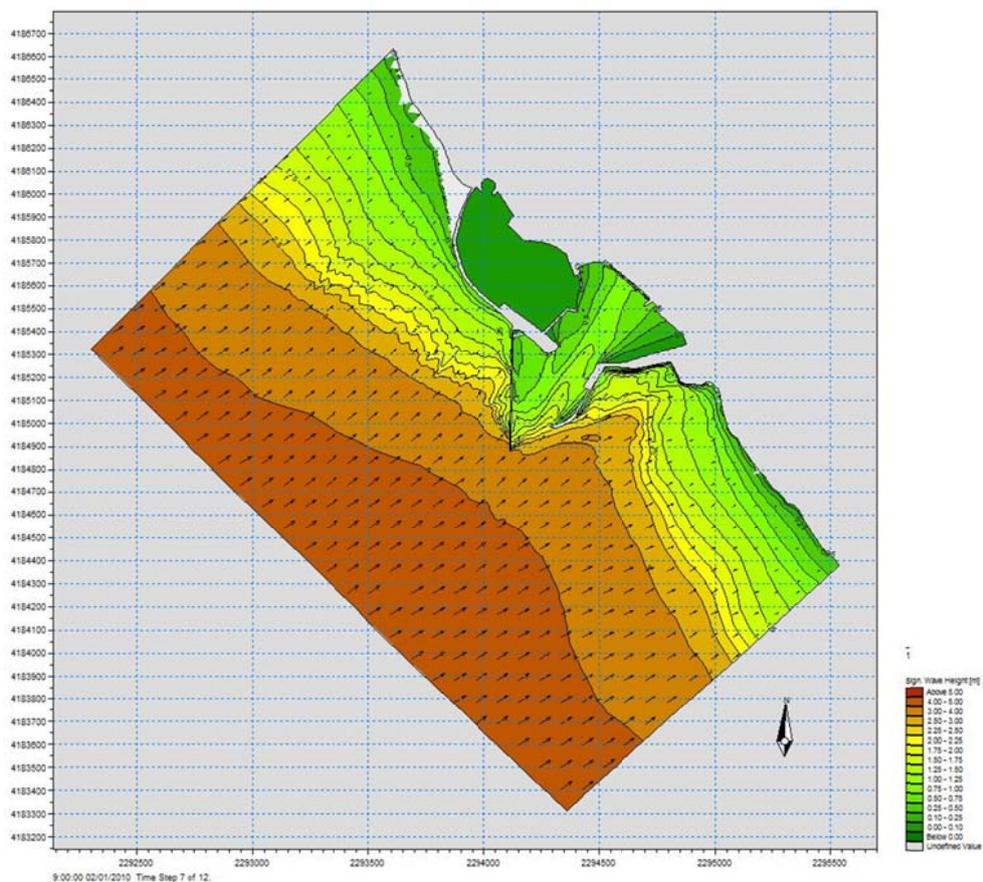
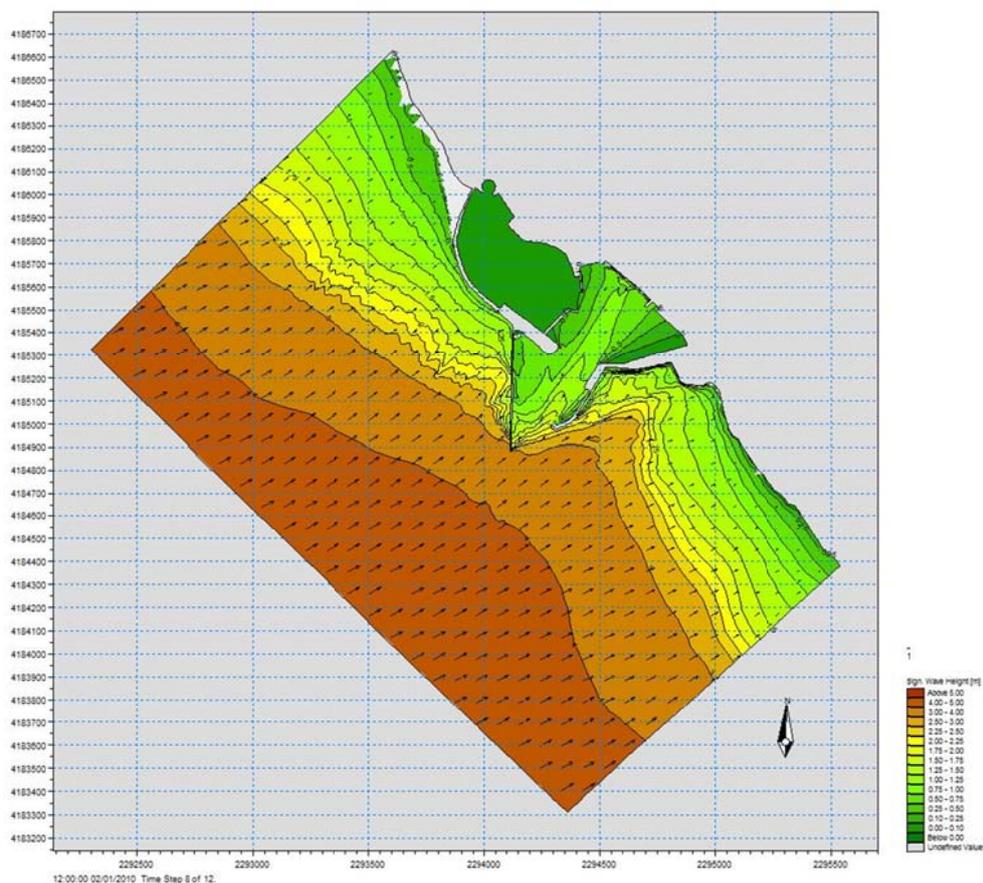


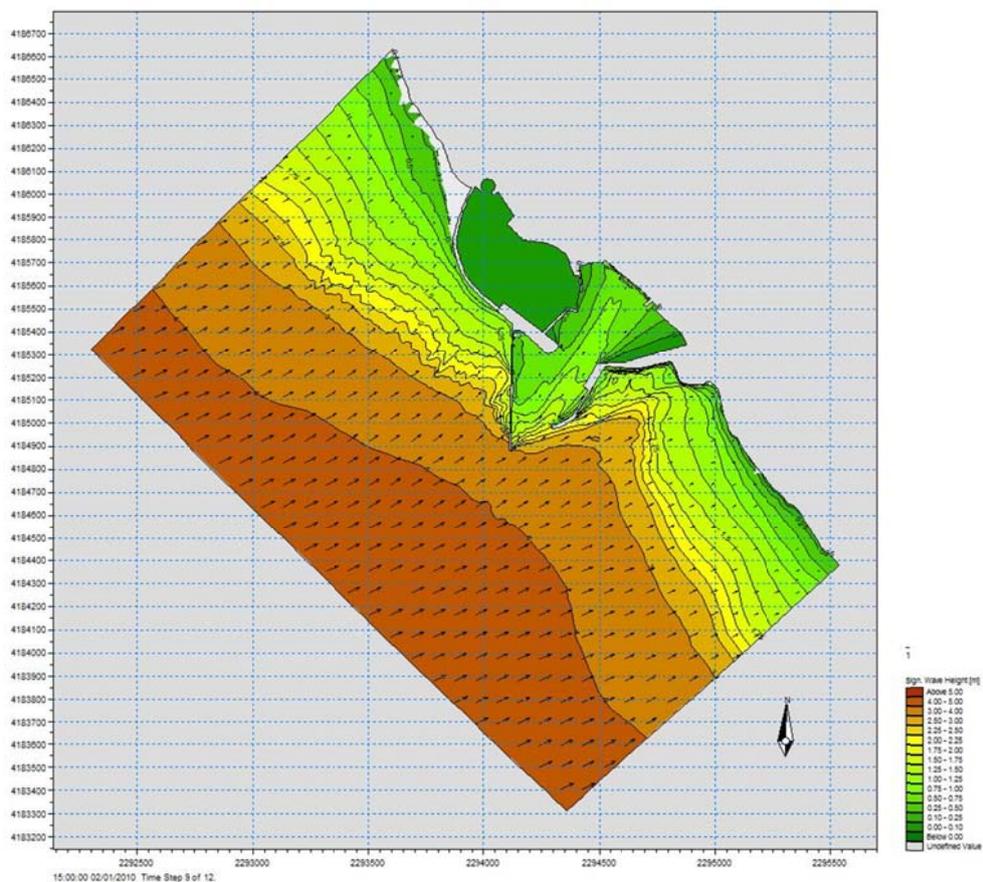
Figura 13 g – Andamento dell’onda dal settore 17 – modello SW -  $T_r = 50$  anni – Progetto – Modello di dettaglio



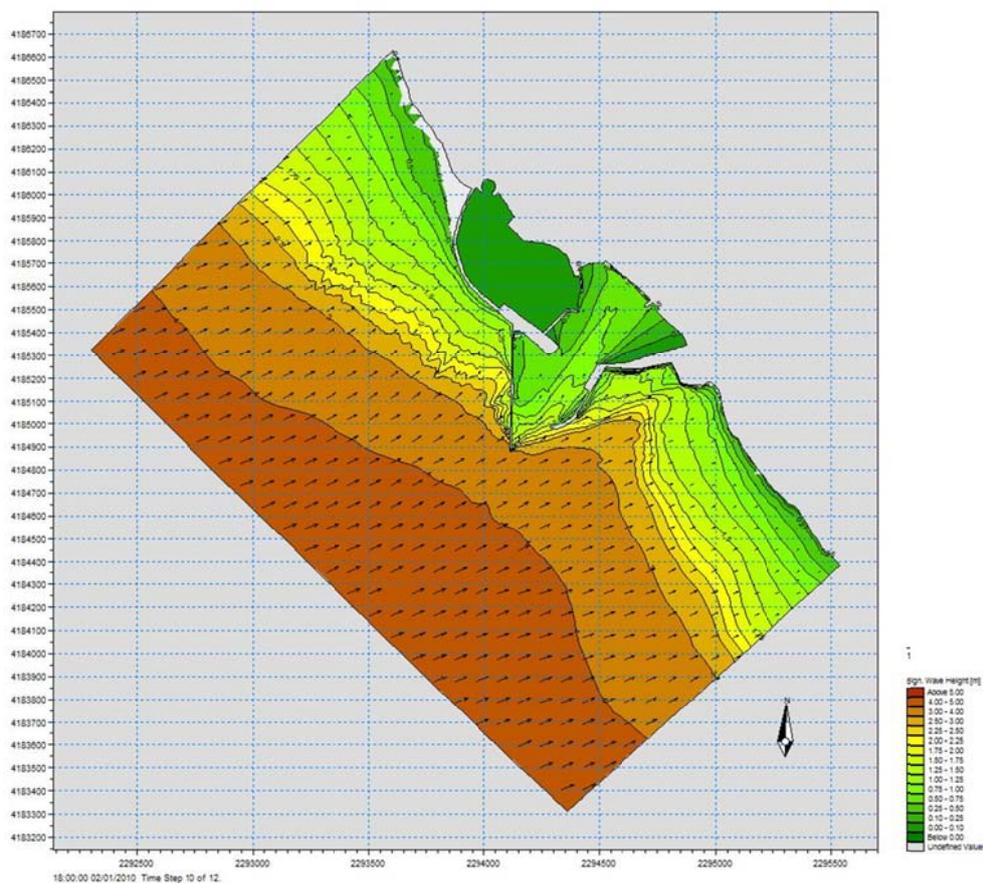
**Figura 13 h – Andamento dell’onda dal settore 18 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 13 i – Andamento dell’onda dal settore 19 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 13 l – Andamento dell’onda dal settore 20 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 13 m – Andamento dell’onda dal settore 21 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio**

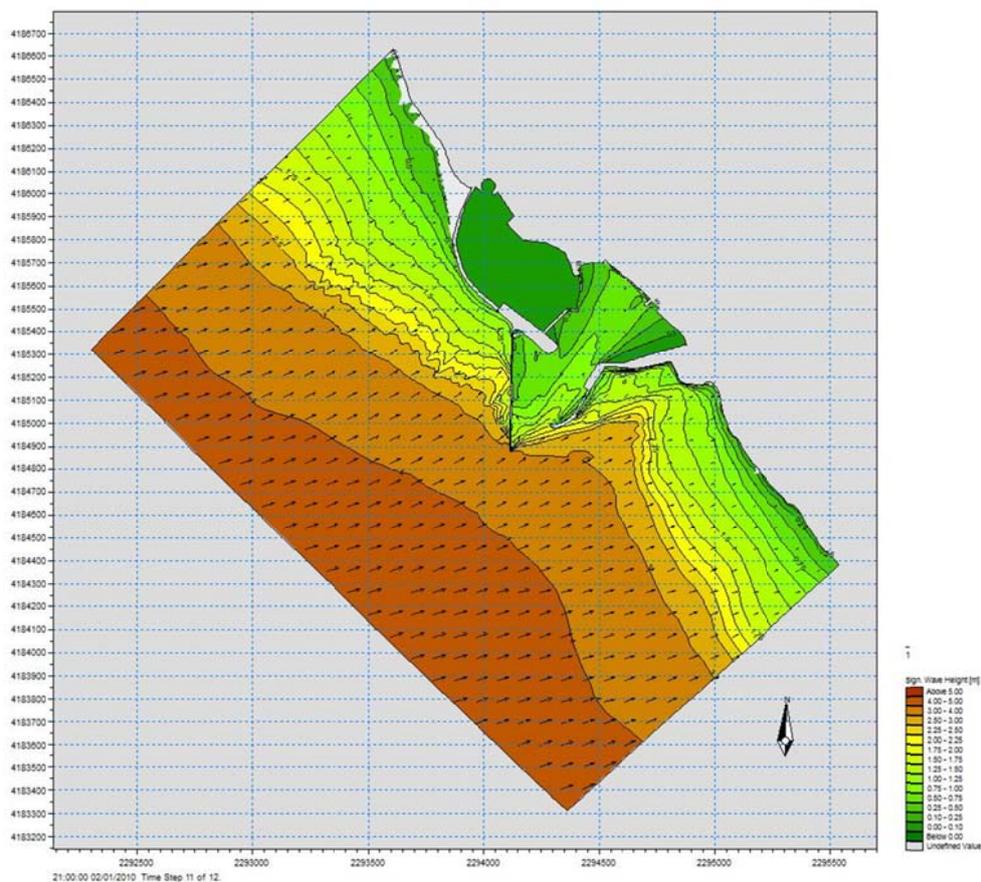


Figura 13 n – Andamento dell’onda dal settore 22 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio

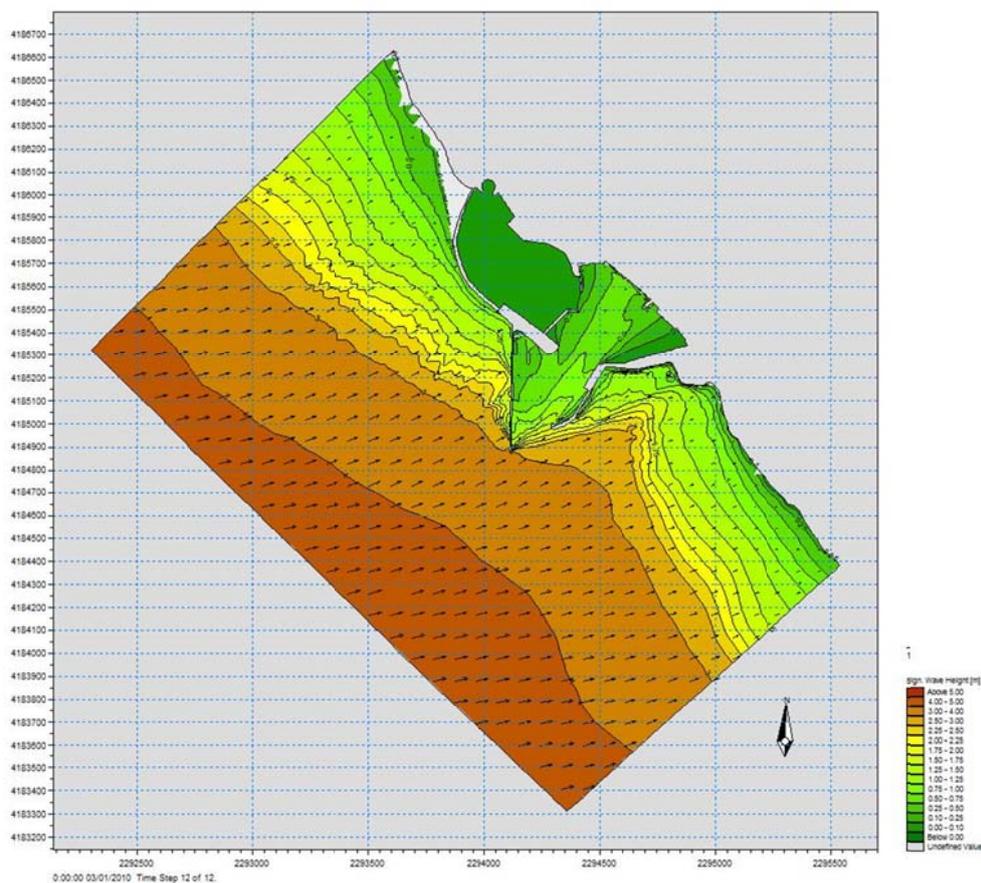
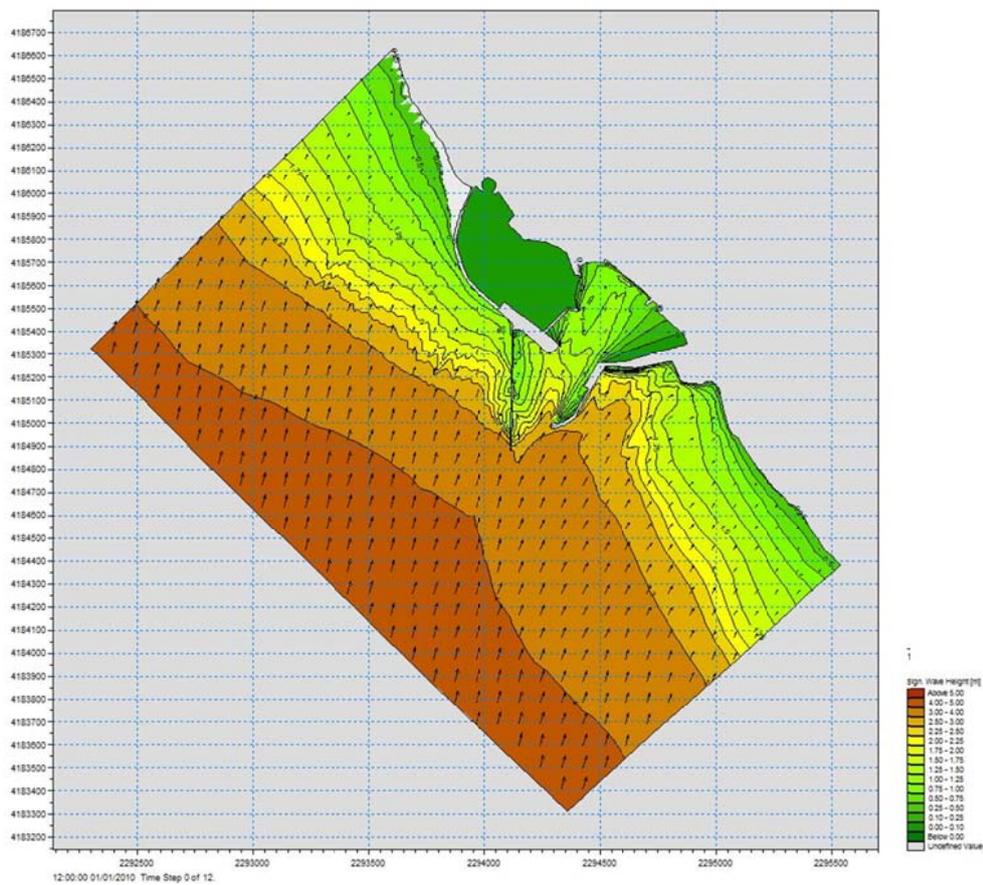
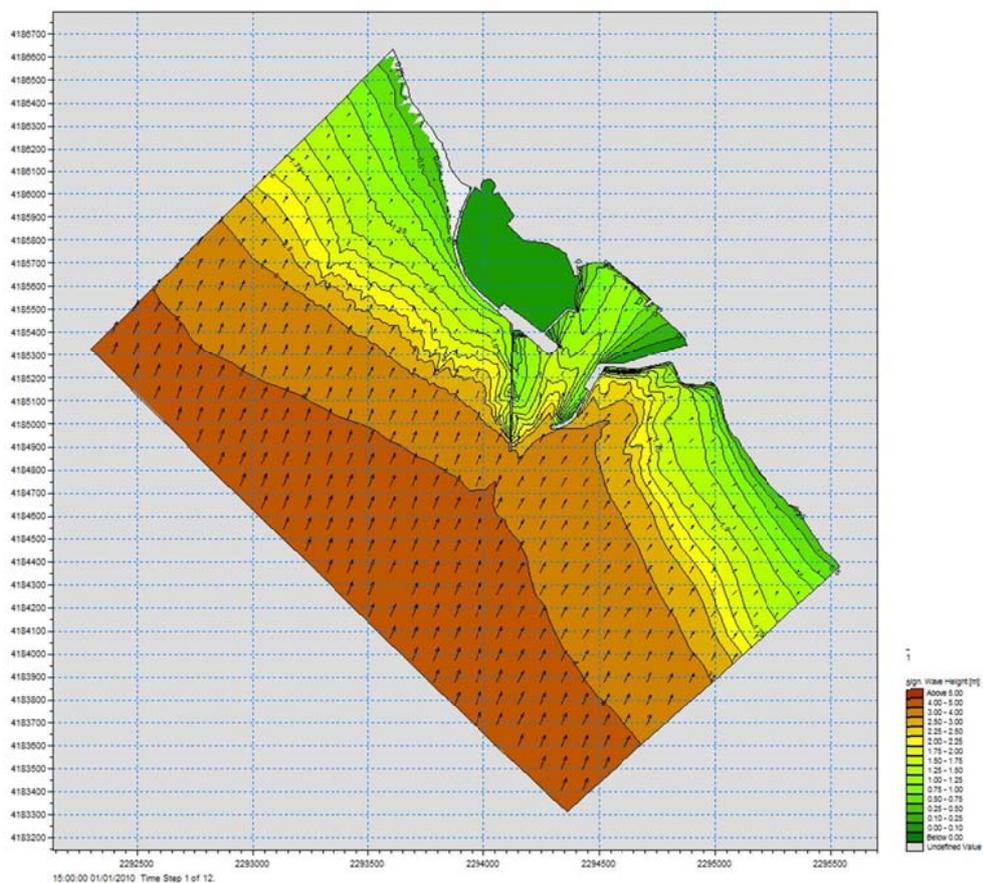


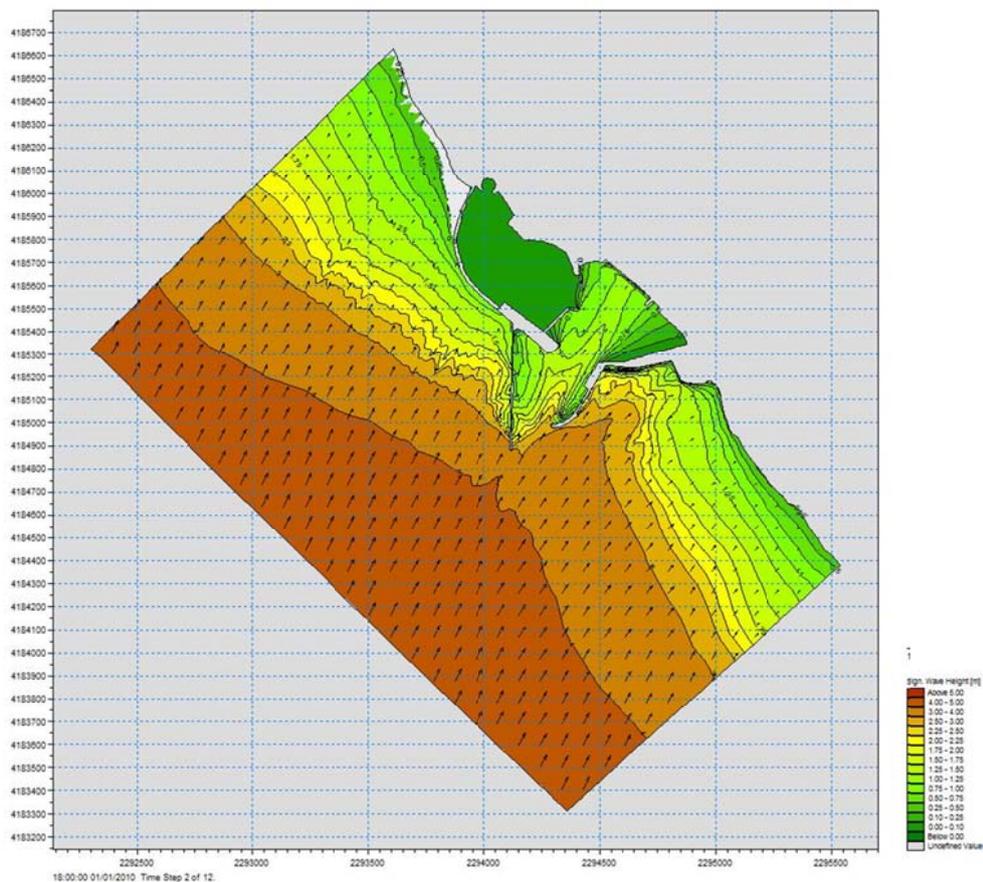
Figura 13 o – Andamento dell’onda dal settore 23 – modello SW - Tr = 50 anni – Progetto – Modello di dettaglio



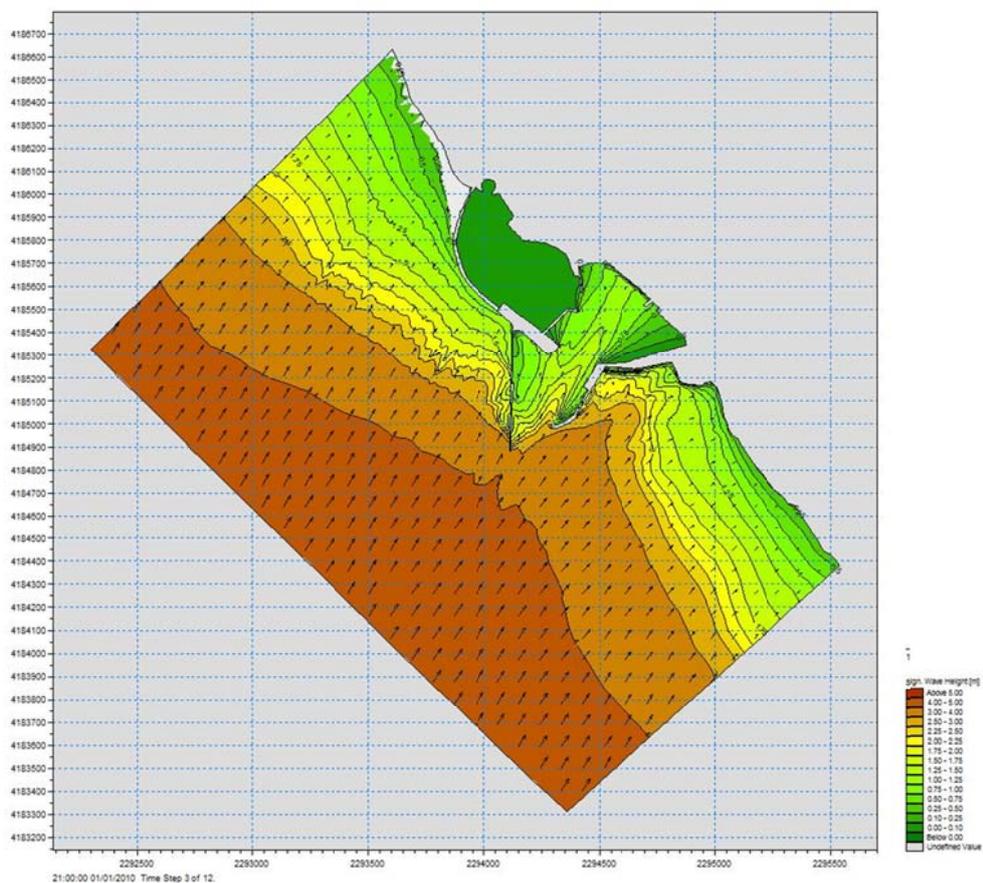
**Figura 14 a – Andamento dell’onda dal settore 11 – modello SW -  $Tr = 120$  anni – Progetto – Modello di dettaglio**



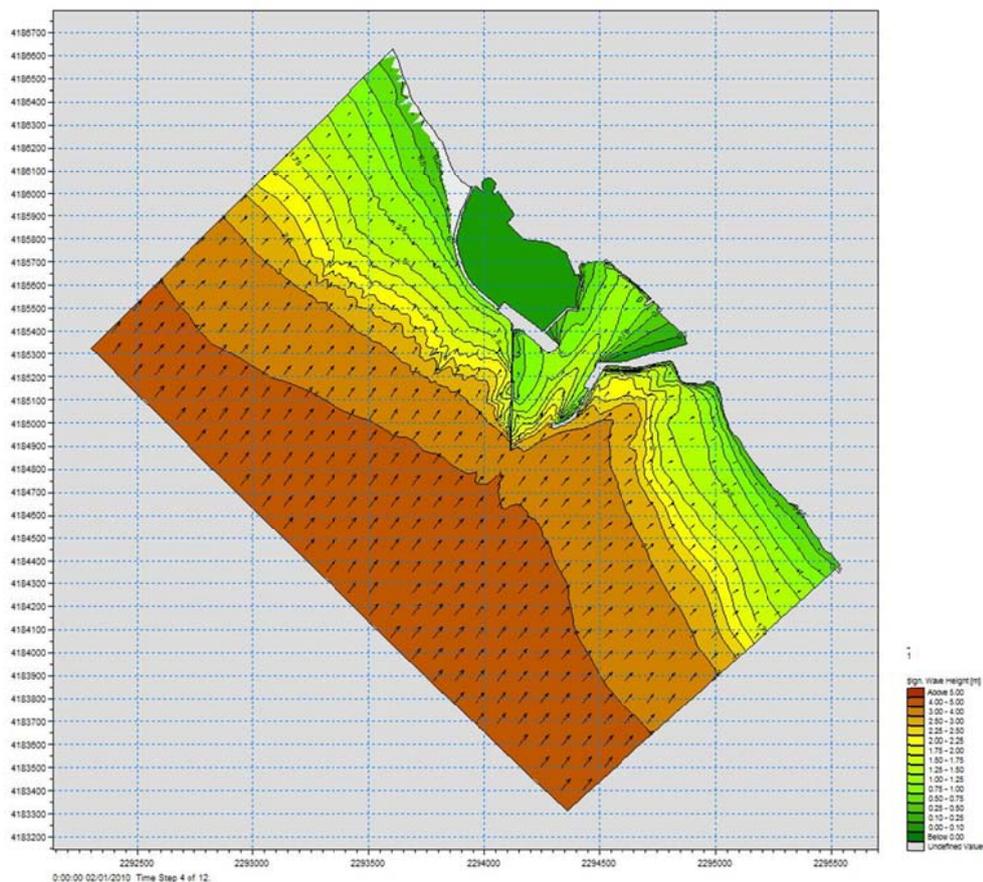
**Figura 14 b – Andamento dell’onda dal settore 12 – modello SW -  $Tr = 120$  anni – Progetto – Modello di dettaglio**



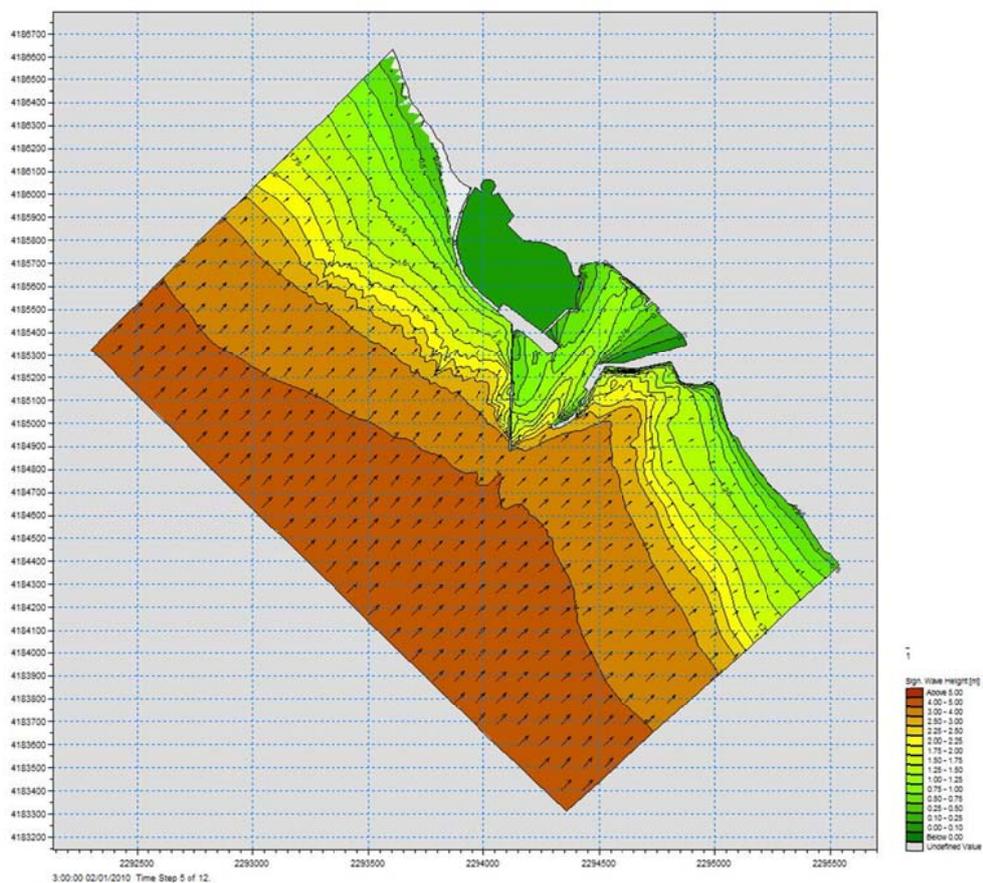
**Figura 14 c – Andamento dell’onda dal settore 13 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 14 d – Andamento dell’onda dal settore 14 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 14e – Andamento dell’onda dal settore 15 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 14 f – Andamento dell’onda dal settore 16 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio**

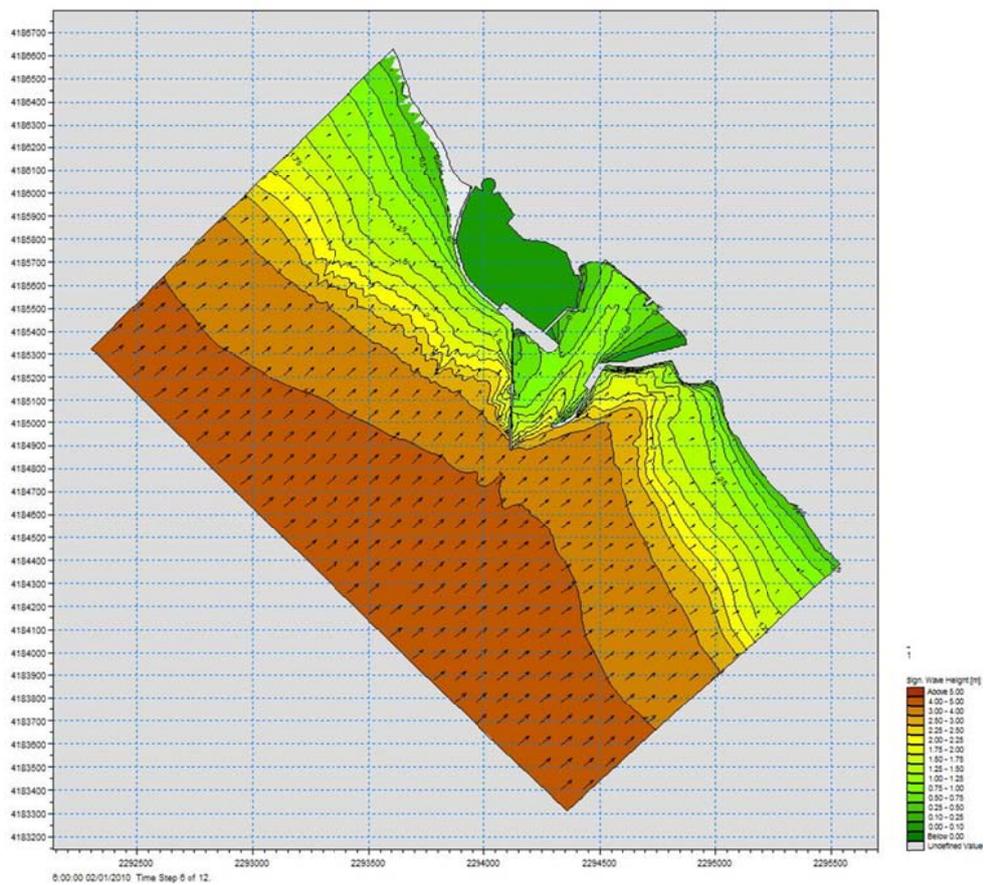


Figura 14 g – Andamento dell’onda dal settore 17 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio

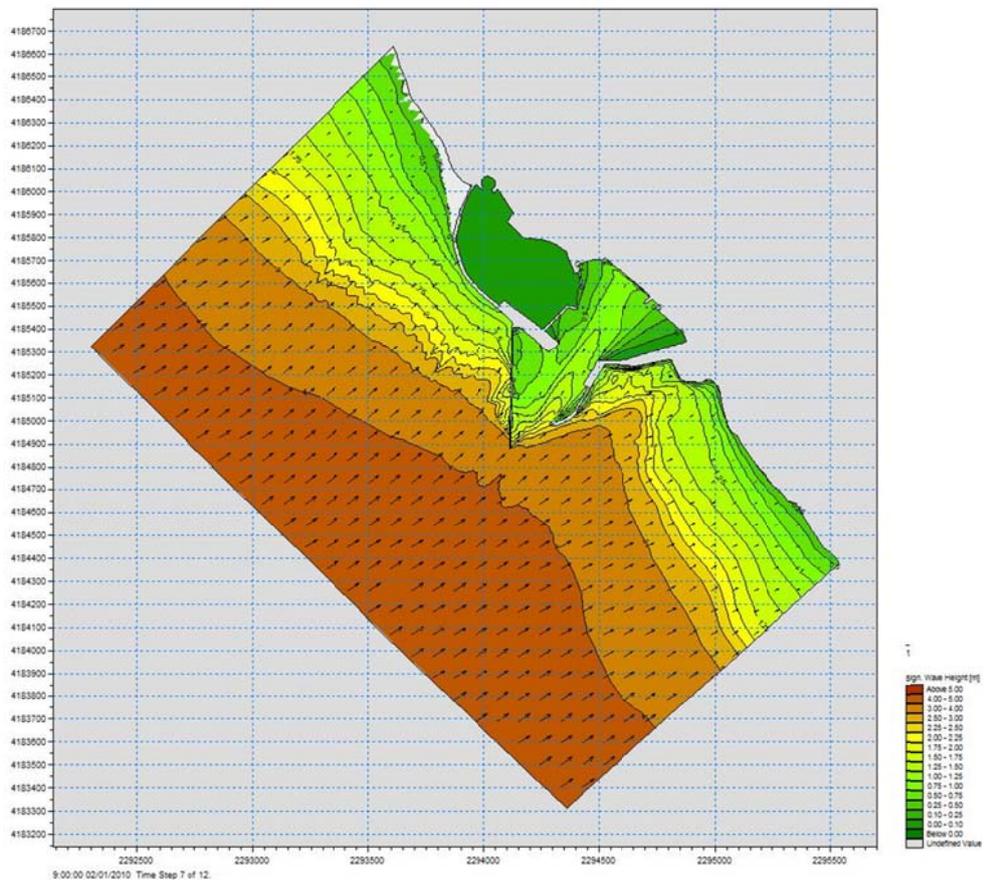
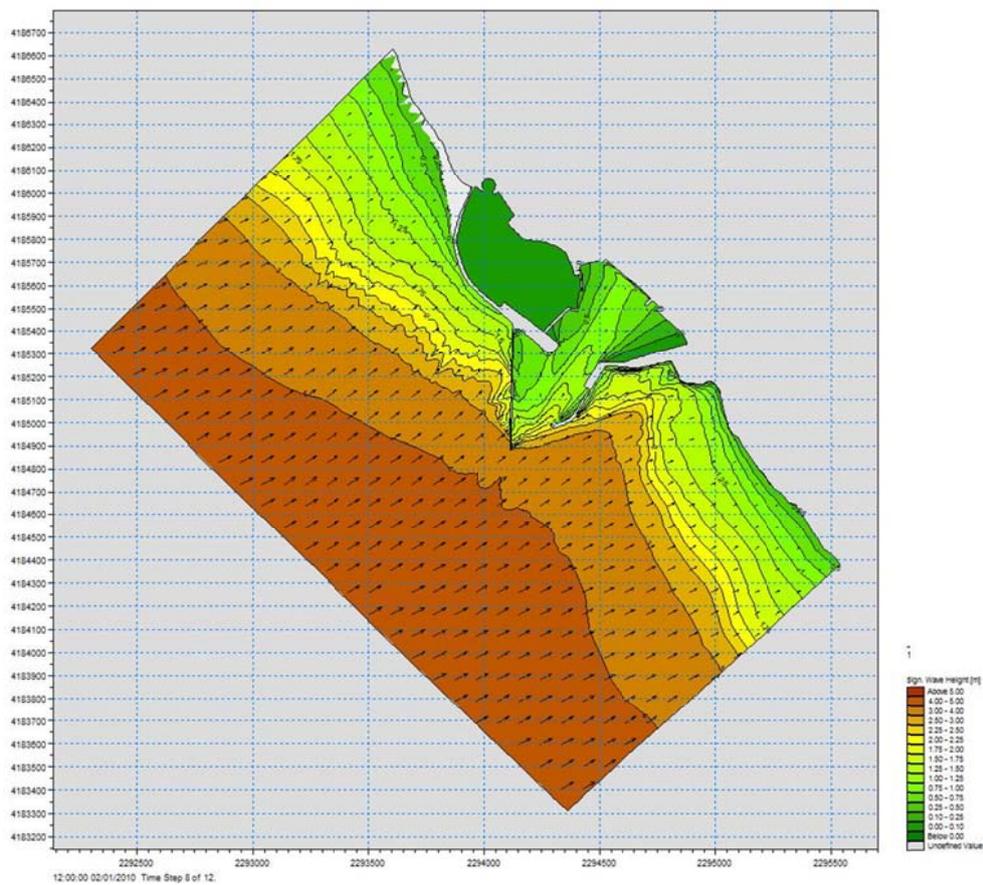
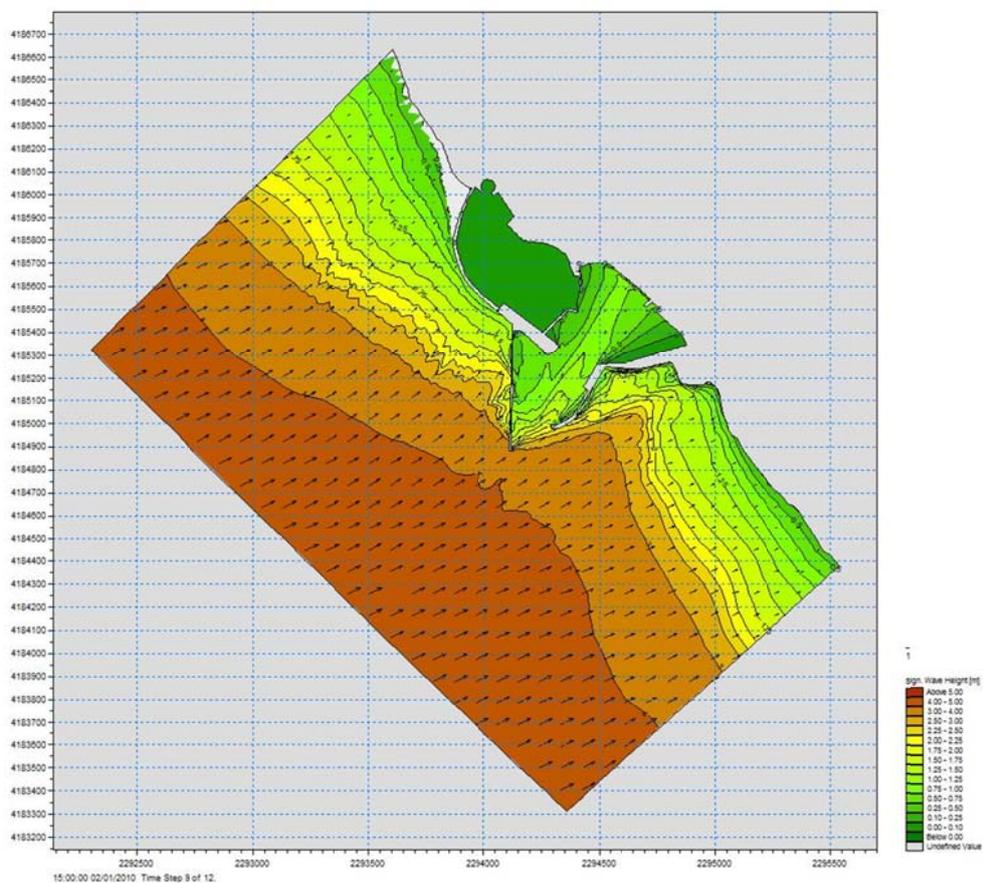


Figura 14 h – Andamento dell’onda dal settore 18 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio



**Figura 14 i – Andamento dell’onda dal settore 19 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio**



**Figura 14 l – Andamento dell’onda dal settore 20 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio**

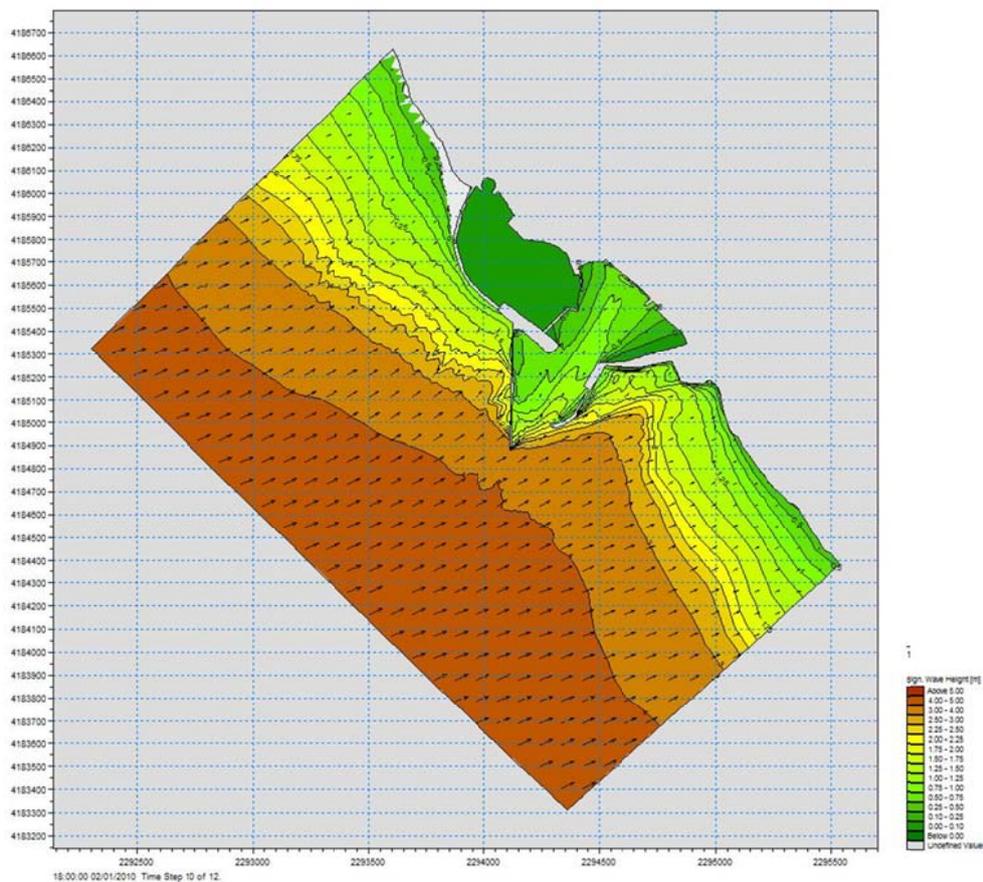


Figura 14 m – Andamento dell’onda dal settore 21 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio

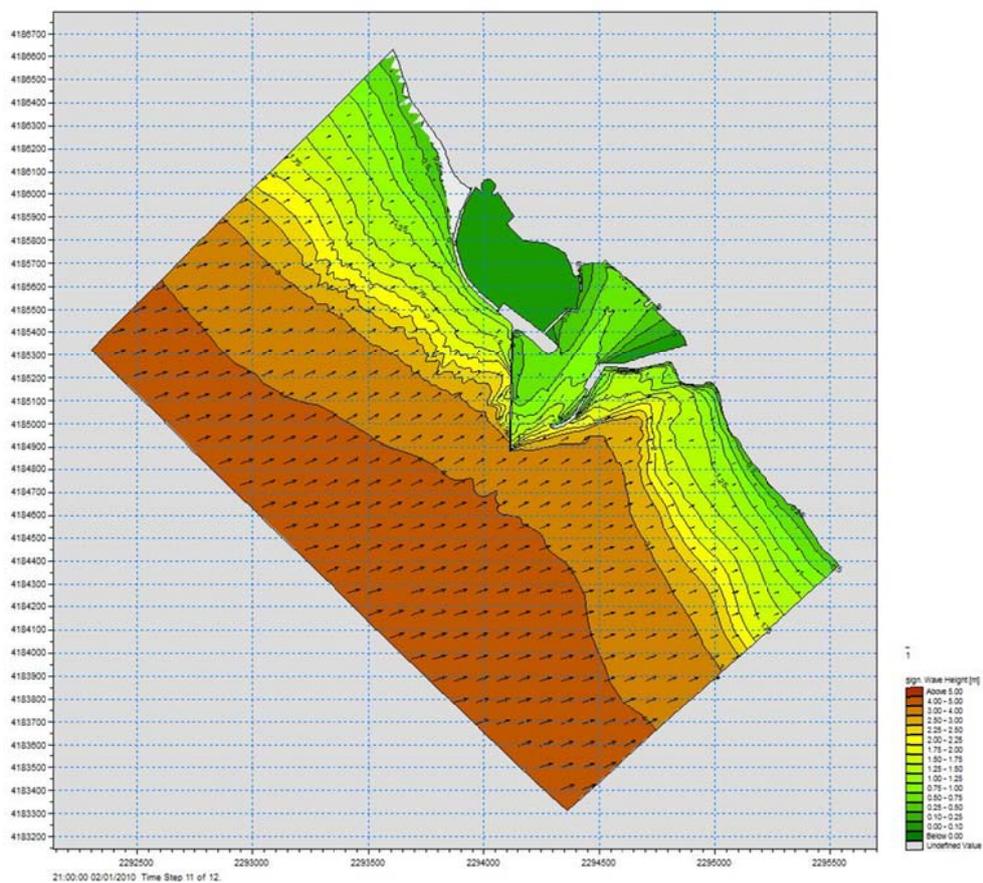
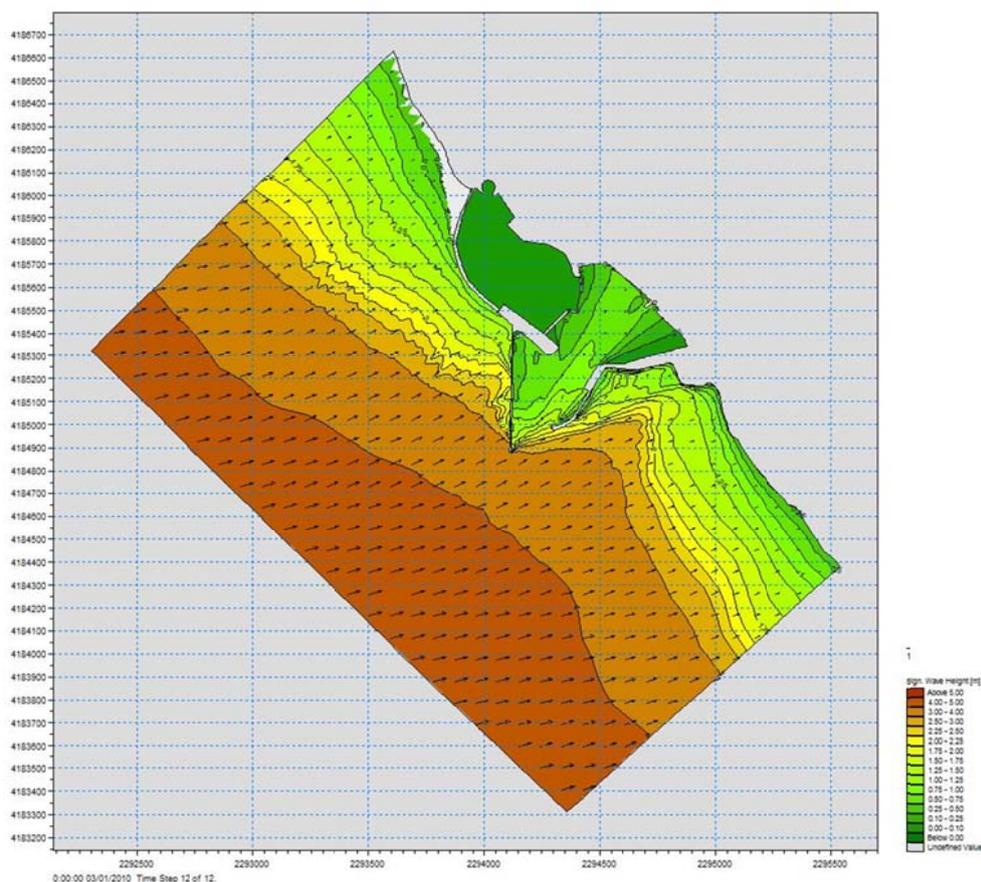


Figura 14 n – Andamento dell’onda dal settore 22 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio



**Figura 14 o – Andamento dell’onda dal settore 23 – modello SW - Tr = 120 anni – Progetto – Modello di dettaglio**

### 3.3. ALTEZZE D’ONDA IN CORRISPONDENZA DELLE OPERE

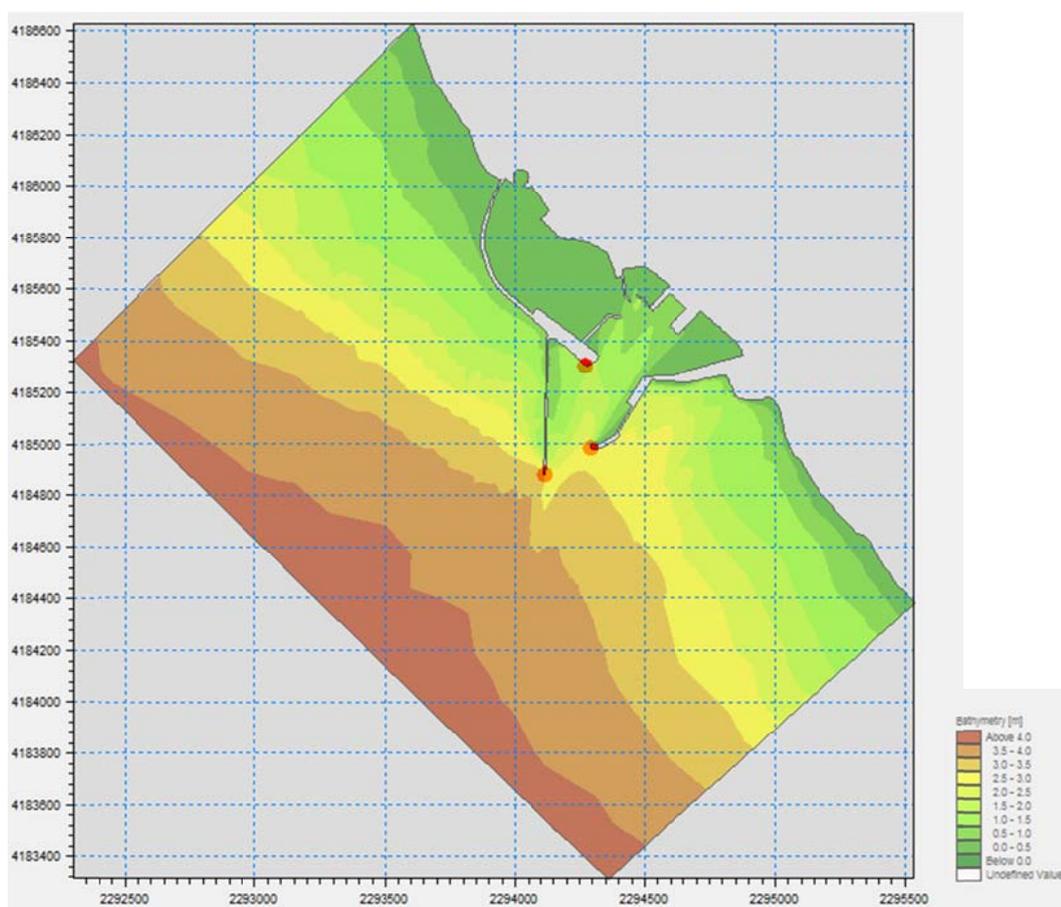
Per la definizione del progetto delle opere occorre conoscere il moto ondoso in corrispondenza delle stesse per cui, per ogni settore e con il modello SW si sono determinate le altezze d’onda massime per i tempi di ritorno di 50 e 120 anni in punti prestabiliti del modello ed in particolare:

Tempo di Ritorno (anni)	Posizione	Coordinate Gauss Boaga (E – N)	
		50	Testata molo di Levante
50	Mantellata molo Colombo	2294271	4185305
50	Testata molo di Ponente	2294114	4184882

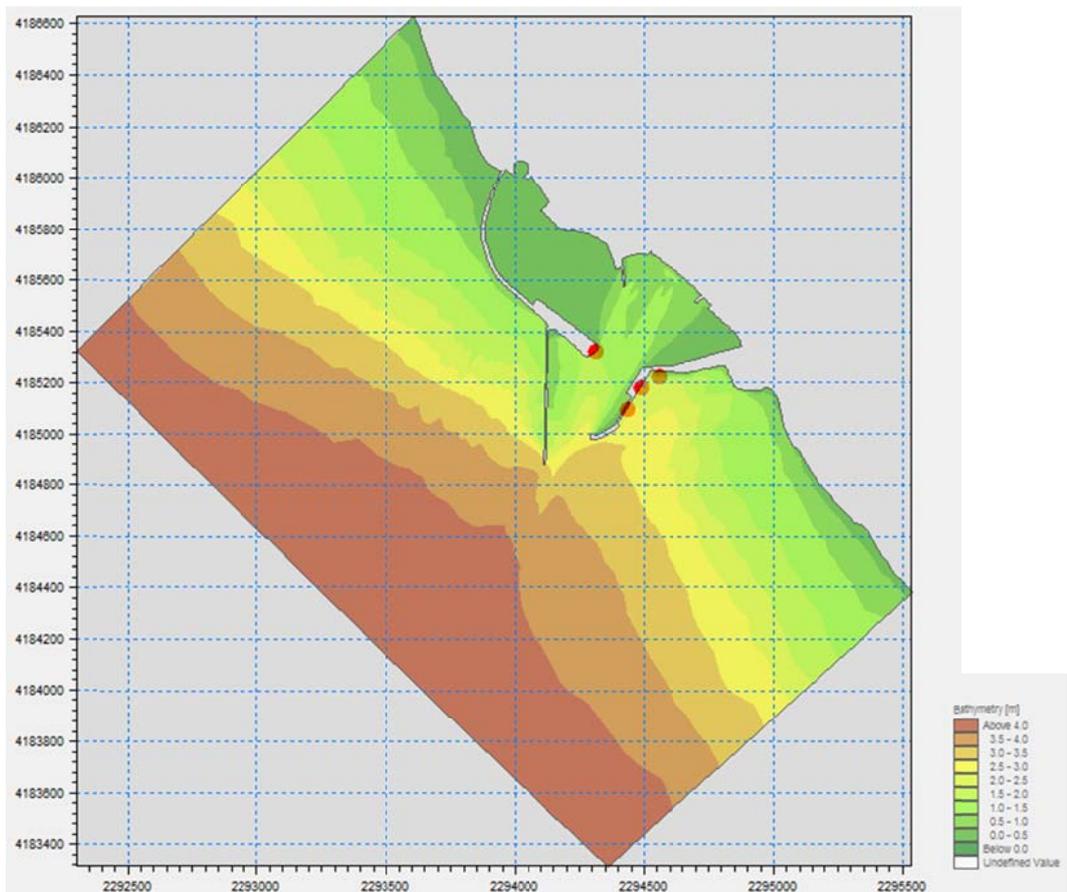
**Tabella 6 – Individuazione delle coordinate dei punti in cui effettuare le verifiche per Tr 50 anni**

Tempo di Ritorno (anni)	Posizione	Coordinate Gauss Boaga (E – N)	
		E	N
120	Tratto iniziale molo di Levante	2294438	4185095
120	Tratto intermedio molo di Levante	2294490	4185182
120	Radice molo di Levante	2294558	4185224
120	Banchina molo Colombo	2294314	4185322

**Tabella 7 – Individuazione delle coordinate dei punti in cui effettuare le verifiche per Tr 120 anni**



**Figura 15 - Individuazione dei punti in cui effettuare le verifiche per Tr 50 anni**



**Figura 16 - Individuazione dei punti in cui effettuare le verifiche per Tr 120 anni**

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	2.74	8.06	202
12	2.76	8.69	206
13	2.72	8.93	208
14	2.65	9.04	211
15	2.55	9.10	214
16	2.41	9.24	217
17	2.27	9.34	219
18	2.15	9.47	221
19	2.06	9.79	223
20	2.00	10.20	224
21	1.94	10.38	225
22	1.85	10.12	226
23	1.73	9.55	227

**Tabella 8 a – Altezze d’onda sotto costa per Tr = 50 anni – MOLO DI LEVANTE – TESTATA**

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	1.50	7.66	174
12	1.40	8.27	174
13	1.29	8.51	174
14	1.17	8.63	175
15	1.04	8.72	176
16	0.92	8.87	177
17	0.82	8.99	177
18	0.76	9.14	178
19	0.72	9.45	178
20	0.70	9.86	178
21	0.67	10.04	178
22	0.63	9.80	178
23	0.58	9.25	178

**Tabella 8 b – Altezze d’onda sotto costa per Tr = 50 anni – MOLO COLOMBO – MANTELLATA**

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	3.04	8.27	192
12	3.20	8.90	195
13	3.28	9.12	198
14	3.33	9.21	201
15	3.35	9.27	205
16	3.37	9.39	208
17	3.34	9.50	212
18	3.30	9.63	215
19	3.27	9.95	217
20	3.25	10.37	219
21	3.21	10.55	221
22	3.11	10.28	223
23	2.97	9.68	226

**Tabella 8 c – Altezze d’onda sotto costa per Tr = 50 anni – MOLO DI PONENTE – TESTATA**

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	2.23	8.15	203
12	2.15	8.86	205
13	2.03	9.11	206
14	1.87	9.22	207
15	1.67	9.31	209
16	1.44	9.47	210
17	1.20	9.62	211
18	1.00	9.79	212
19	0.85	10.15	213
20	0.75	10.60	214
21	0.66	10.82	215
22	0.59	10.59	215
23	0.52	10.06	216

**Tabella 8 d – Altezze d’onda sotto costa per Tr = 120 anni – MOLO LEVANTE – TRATTO INIZIALE**

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	2.14	7.90	200
12	2.09	8.59	201
13	2.00	8.84	201
14	1.88	8.95	201
15	1.72	9.04	202
16	1.51	9.21	201
17	1.28	9.36	201
18	1.09	9.54	201
19	0.94	9.90	200
20	0.85	10.35	200
21	0.77	10.56	199
22	0.69	10.34	199
23	0.61	9.83	199

**Tabella 8 e – Altezze d’onda sotto costa per Tr = 120 anni – MOLO LEVANTE – TRATTO INTERMEDIO**

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	1.32	7.34	203
12	1.34	7.99	204
13	1.34	8.23	205
14	1.33	8.35	205
15	1.32	8.44	206
16	1.29	8.60	206
17	1.26	8.75	206
18	1.22	8.93	205
19	1.18	9.27	205
20	1.16	9.70	205
21	1.12	9.91	204
22	1.07	9.71	204
23	1.00	9.23	204

**Tabella 8 f – Altezze d’onda sotto costa per Tr = 120 anni – MOLO LEVANTE – RADICE**

Settori	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)
11	1.61	8.19	184
12	1.53	8.86	184
13	1.41	9.10	184
14	1.28	9.20	185
15	1.12	9.29	185
16	0.97	9.45	185
17	0.85	9.58	186
18	0.77	9.74	186
19	0.72	10.08	186
20	0.69	10.52	186
21	0.66	10.72	186
22	0.62	10.49	186
23	0.58	9.96	186

**Tabella 8 g – Altezze d’onda sotto costa per Tr = 120 anni – MOLO COLOMBO – BANCHINA**