



Il Commissario Straordinario del Governo  
per il recupero e la valorizzazione dell'ex carcere borbonico  
dell'isola di Santo Stefano - Ventotene

MINISTERO DELL'AMBIENTE  
E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE

Ministero  
dei beni e delle  
attività culturali  
e del turismo



Comune di Ventotene  
REGIONE LAZIO

CONTRATTO ISTITUZIONALE DI SVILUPPO

RECUPERO E RIFUNZIONALIZZAZIONE EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI SANTO STEFANO VENTOTENE

Intervento n. 3 'Realizzazione/adequamento degli approdi all'isola di Santo Stefano'



STAZIONE APPALTANTE



Agenzia nazionale per l'attrazione  
degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA

Funzione Servizi di Ingegneria

ATTIVITA' TECNICHE  
Beni Culturali e Architettura  
Arch. Rosa di NUZZO

INVITALIA S.p.a.: Soggetto Attuatore in ottemperanza agli artt. 3 e 8 del Contratto Istituzionale di Sviluppo  
"Recupero e rifunionalizzazione ex carcere borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene"

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: Dott. Ing. ENRICO FUSCO

COORDINAMENTO PROGETTAZIONE: Dott. Arch. Rosa di NUZZO

PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA  
Dott. Arch. Massimo BARAGLI

PROGETTAZIONE STRUTTURALE  
Dott. Ing. Letterio SONNESSA

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME  
Dott. Ing. Daniele BENOTTI

RELAZIONE GEOLOGICA  
Dott. Geol. Vincenzo GUIDO

PROGETTAZIONE IMPIANTI  
Dott. Ing. Pierluigi ROSATI  
Dott. Ing. Osvaldo PITORRI

PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA  
Dott. Ing. Nunzio LAURO

PROGETTAZIONE AMBIENTALE e PROCEDURE VIA-Vinca  
Dott. Luca DI NARDO

COMPUTI E STIME  
Geom. Luigino D'ANGELANTONIO

GRUPPO DI LAVORO INTERNO

PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA:  
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR  
Dott. Arch. Lucia PACITTO

PROGETTAZIONE STRUTTURALE:  
Dott. Ing. Mario D'AMATO  
Dott. Ing. Francesco DI LAURO

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:  
Dott. Ing. Leonardo GUALCO

PROGETTAZIONE IMPIANTI:  
Sig. Ennio REGNICOLI

RILIEVI E RESTITUZIONE GRAFICA:  
Geom. Gennaro DI MARTINO  
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

SUPPORTO TECNICO OPERATIVO

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:  
3TI Progetti Italia - Ingegneria Integrata SpA  
Dott. Ing. Stefano Luca POSSATI

PROGETTAZIONE AMBIENTALE e  
PROCEDURE VIA-Vinca:  
SETIN Servizi tecnici Infrastrutture s.r.l.  
Dott. Alessandro PIAZZI

PROGETTAZIONE GEOTECNICA:  
STUDIO TECNICO ASSOCIATO - SINTESI  
Dott. Ing. Germano GUIDUCCI

RELAZIONE ARCHEOLOGICA: ASPSP Servizi Archeologici snc, Dott.ssa Laura SANNA e Francesco TIBONI

INDAGINI GEOGNOSTICHE :  
Geodes Laboratori  
Dott.ssa M. Gabriella BEVILACQUA

INDAGINI E RILEVAZIONI AMBIENTALI,  
ARCHEOLOGICHE E STRUMENTALI A MARE :  
Enviroconsult srl - Dott. Ing. Roberto SAGGIOMO

INDAGINI SULLE STRUTTURE :  
ICS Centro Sperimentale di Ingegneria Srl  
Dott. Ing. Giuseppe MONTELLA

PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO		DATA	NOME	FIRMA
Opere Marittime Studio idraulico marittimo		REDATTO	05-03-2021	3TI
		VERIFICATO	05-03-2021	BENOTTI
		APPROVATO	05-03-2021	Rosa di NUZZO
		DATA	05-03-2021	CODICE BREVE
		SCALA	- -	
REVISIONE	DATA	AGGIORNAMENTI		CODICE ELABORATO 2017E037INV-02-D-OM-RT0002
Rev. 1				
Rev. 2				
Rev. 3				
		CODICE FILE		2017E037INV-02-D-OM-RT0002.dwg

OM-RT0002

**Contratto Istituzionale di Sviluppo per il recupero e la rifunzionalizzazione dell'“Ex carcere borbonico dell'isola di Santo Stefano – Ventotene” - Delibera CIPE n. 3 del 1° maggio 2016, pubblicata nella G.U.R.I. del 13 agosto 2016, n. 139, “Fondo sviluppo e coesione 2014-2020: Piano stralcio - Cultura e Turismo – (articolo 1, comma 703, lettera d) legge n. 190/2014”**



***Accordo Operativo tra il Ministero per i beni e le Attività Culturali e per il Turismo e l'Agenzia Nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA per la realizzazione delle attività di soggetto attuatore del CIS per il RECUPERO E LA RIFUNZIONALIZZAZIONE DELL'“EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI S. STEFANO-VENTOTENE”***

**RIF. ALLEGATO A – PROGRAMMA DEGLI INTERVENTI**

**Intervento n. 3 – Realizzazione/adequamento degli approdi all'Isola di Santo Stefano**

## SOMMARIO

<b>1</b>	<b>PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA.....</b>	<b>3</b>
1.1	<i>Clima meteomarinò sottocosta .....</i>	13
1.2	<i>Agitazione ondosa nei pressi dell'opera da realizzare .....</i>	21
1.3	<i>Clima meteomarinò equivalente (onde morfologiche).....</i>	27
1.4	<i>Flusso energetico del moto ondoso sottocosta .....</i>	29
1.5	<i>Profondità di chiusura di spiaggia.....</i>	35
1.6	<i>Capacità teorica giornaliera.....</i>	37

## 1 PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

La corretta descrizione delle trasformazioni che le onde subiscono in prossimità della costa risulta essere di estrema importanza per la comprensione dei processi di idrodinamica e morfodinamica costiera e per l'eventuale progettazione o verifica di opere marittime a difesa dei litorali. L'onda, nella sua propagazione da largo verso riva, subisce modifiche di forma, altezza, direzione e celerità. Le caratteristiche delle onde variano a causa di fenomeni quali lo shoaling, la rifrazione, la diffrazione, la riflessione e il frangimento, associati a fenomeni non-lineari dovuti alle interazioni fra le stesse onde e tra le onde e le correnti. Il trasporto di massa liquida legato al frangimento genera inoltre delle correnti che possono avere intensità notevoli e che influiscono in maniera importante sull'evoluzione dei litorali.

La propagazione del clima ondoso da largo verso riva in corrispondenza del paraggio dell'Isola di Santo Stefano dai dati ERA5 è stata effettuata con il modello numerico SWAN, acronimo di Simulating WAVes Nearshore, la cui implementazione è stata sviluppata dal Dipartimento di Meccanica dei Fluidi dell'Università di Delft (Paesi Bassi). Lo SWAN permette di ottenere stime reali dei parametri d'onda in aree costiere, laghi ed estuari, una volta note le condizioni del fondo, del vento e delle correnti. In particolare, il modello simula lo sviluppo degli spettri d'onda che viaggiano da acque profonde verso acque poco profonde, come nel caso del moto ondoso che si propaga verso riva.

Nel modello SWAN sono rappresentati i seguenti processi di propagazione d'onda:

- Propagazione lungo lo spazio geografico;
- Rifrazione dovuta a variazioni del fondale marino e della corrente;
- Shoaling dovuto a variazioni del fondale marino e della corrente;
- Bloccaggio e riflessione da parte di correnti in direzione opposta;
- Trasmissione, bloccaggio o riflessione da parte di ostacoli.

Inoltre, nello SWAN vengono rappresentati i seguenti processi di generazione e dissipazione d'onda:

- Generazione dovuta al vento;
- Dissipazione dovuta alla rottura in cresta (whitecapping);
- Dissipazione dovuta alla rottura d'onda indotta dalla profondità;
- Dissipazione dovuta all'attrito sul fondo;
- Interazioni onda-onda (quadruple e triple);
- Diffrazione a tergo di ostacoli.

Infine, per tenere conto della struttura da realizzare il modello SWAN permette di utilizzare il comando OBSTACLE, dove si può inserire l'ubicazione dell'ostacolo, indicando le coordinate degli estremi che lo

costituiscono, e i coefficienti di trasmissione e riflessione.

Tale modello può essere utilizzato in condizioni sia stazionarie sia non stazionarie, considerando coordinate sia cartesiane (nel caso di piccole scale) sia sferiche (nel caso di piccole e grandi scale).

Nel modello SWAN le onde sono descritte attraverso la densità d'azione spettrale dell'onda bidimensionale anche quando sono presenti fenomeni non lineari (a esempio nella zona dei frangenti). La ragione fondamentale per l'utilizzo dello spettro anche in condizioni fortemente non lineari è che, anche in tali condizioni, è possibile definire con buona accuratezza la distribuzione spettrale del momento del secondo ordine delle onde (sebbene esso non sia sufficiente per descrivere le onde da un punto di vista statistico). Lo spettro utilizzato in SWAN è la densità d'azione spettrale  $N(\sigma, \theta)$  anziché la densità di energia spettrale  $E(\sigma, \theta)$  poiché, in presenza di correnti, la densità d'azione spettrale viene conservata mentre non lo è la densità d'energia.

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa  $\sigma$  e la direzione d'onda  $\theta$  (la direzione normale alla cresta dell'onda di ogni componente spettrale). La densità d'azione è funzione della densità d'energia e della frequenza relativa:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Nella presente modellazione, l'evoluzione dello spettro d'onda è descritta attraverso la seguente equazione del bilancio d'azione spettrale valida per coordinate cartesiane, che rappresenta l'equazione fondamentale di tutta la teoria dello SWAN:

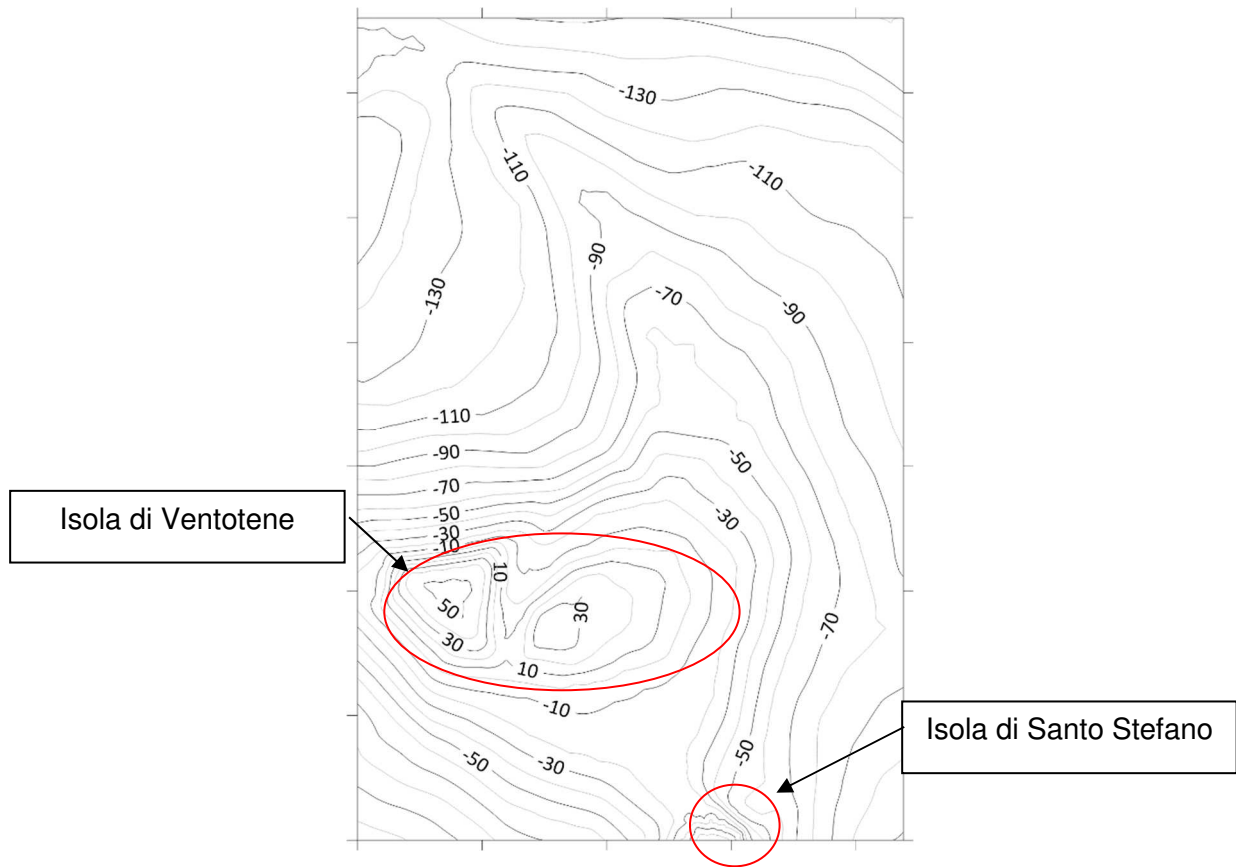
$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial z} c_z N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

In tale equazione il primo termine di sinistra rappresenta la variazione della densità d'azione spettrale rispetto al tempo; il secondo, il terzo e il quarto termine rappresentano la propagazione dell'azione nello spazio geografico (con le velocità di propagazione  $c_x$ ,  $c_y$  e  $c_z$  riferite, rispettivamente, alle direzioni  $x$ ,  $y$  e  $z$ ); il quinto termine rappresenta la variazione della frequenza relativa dovuta alle variazioni di profondità e delle correnti (con la velocità di propagazione  $c_\sigma$  riferita allo spazio delle frequenze  $\sigma$ ); il sesto termine, l'ultimo dei termini di sinistra dell'equazione, rappresenta la rifrazione indotta dalla profondità e dalla corrente (con la velocità di propagazione  $c_\theta$  riferita allo spazio delle direzioni d'onda  $\theta$ ). Le espressioni per

descrivere tali velocità di propagazione sono date dalla teoria dell'onda lineare di Stokes al 1° ordine. Il termine  $S$ , che è comunque funzione della frequenza e delle direzioni d'onda ( $S = f(\sigma, \theta)$ ), presente nei termini a destra dell'equazione del bilancio d'azione spettrale, rappresenta il termine sorgente rispetto agli effetti della generazione, della dissipazione e delle interazioni non lineari onda-onda.

Il primo passo nello studio di propagazione del clima ondoso da largo verso riva con il modello SWAN ha riguardato la preparazione di una griglia di calcolo innestata sulla batimetria in corrispondenza del paraggio dell'Isola di Santo Stefano. La modellazione del fondale marino è stata realizzata sulla base dei rilievi batimetrici della Carta Batimetrica Generale degli Oceani (GEBCO - General Bathymetric Chart of the Ocean, [www.gebco.net](http://www.gebco.net)) aggiornata al 2019 e relativa al tratto di costa dell'Isola di Santo Stefano, effettuando in seguito un'interpolazione per triangolazione sulle batimetriche rilevate per avere tutti i valori di tutte le profondità nella griglia di calcolo considerata. Occorre osservare che tale rappresentazione batimetrica degli oceani e dei mari del mondo è attualmente operante sotto gli auspici dell'Organizzazione idrografica internazionale e della Commissione oceanografica intergovernativa dell'UNESCO, e nacque con lo scopo di preparare una serie di carte geografiche, a copertura globale, rappresentanti l'andamento del fondale marino, soprattutto ad uso scientifico. Le mappe edite dalla GEBCO, nel corso degli anni, sono diventate le carte di riferimento della batimetria degli oceani a livello globale.

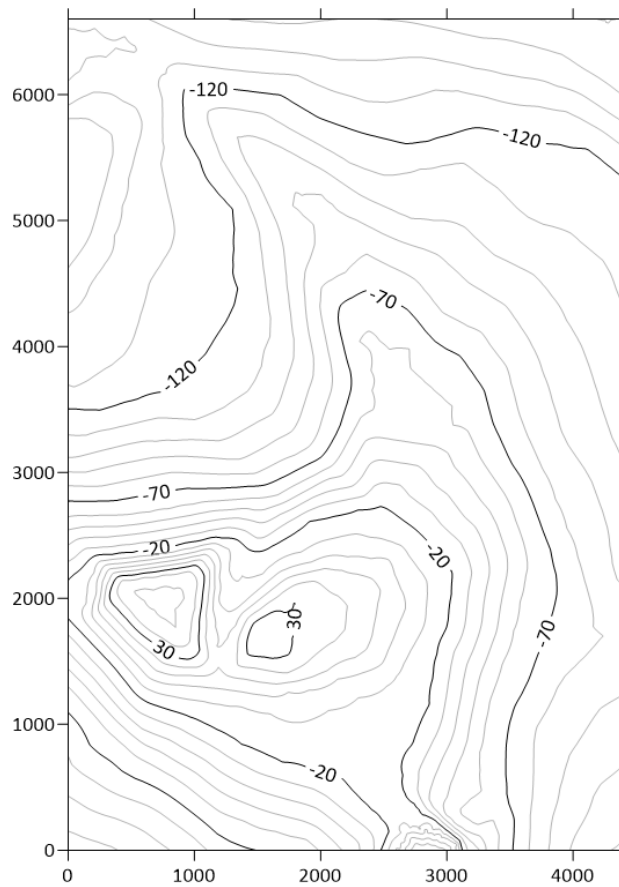
Al fine di coprire in maniera significativa tutta l'area interessata allo studio meteomarinario, è stata utilizzata una griglia di calcolo rettangolare avente dimensioni 4380 m in lunghezza e di 6600 m in altezza, avente un numero pari rispettivamente a 219 celle (220 nodi) e 330 celle (331 nodi), aventi ciascuna dimensioni 20 m x 20 m ( $\Delta x = \Delta y = 20$  m), che si estendono a partire da profondità di circa 160 m, nella condizione di acque profonde ( $d/L > 0.5$ ) per tutti gli attacchi ondosi, fino alla terraferma. In Figura 1 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale in corrispondenza del litorale dell'Isola di Santo Stefano; la cartografia utilizzata è stata ruotata di 42° in senso orario, in modo da avere il paraggio oggetto di studio nel lato sud della griglia utilizzata.



**Figura 1: Evidenziazione della griglia di calcolo generale, delle principali batimetriche e del punto sottocosta considerato**

Sui limiti della griglia di calcolo lato mare (Nord, Ovest ed Est) sono state effettuate le propagazioni del moto ondoso da largo a sottocosta, con particolare attenzione al clima ondoso in corrispondenza del punto sottocosta rappresentativo del tratto costiero oggetto di studio, posti circa alla batimetrica -8.5 m. Le onde propagate con lo SWAN vengono definite da un valore di altezza d'onda,  $H_s$ , di periodo di picco,  $T_p$ , e di direzione di provenienza rispetto al Nord Cartografico ricadenti nel settore di traversia del paraggio dell'Isola di Santo Stefano. Nelle propagazioni effettuate con lo SWAN è stato utilizzato un classico spettro di tipo Jonswap con  $\gamma$  (coefficiente di picco dello spettro) = 3.3, assumendo un range di direzioni spettrali pari a  $180^\circ$ , una frequenza minima dello spettro,  $f_1 = 0.01$  Hz, e una frequenza massima,  $f_2 = 0.5$  Hz. Il frangimento del moto ondoso per raggiunto limite di profondità è stato definito nell'input del programma in base al rapporto limite  $H_s/d = 0.78$ , in cui  $d$  è la profondità.

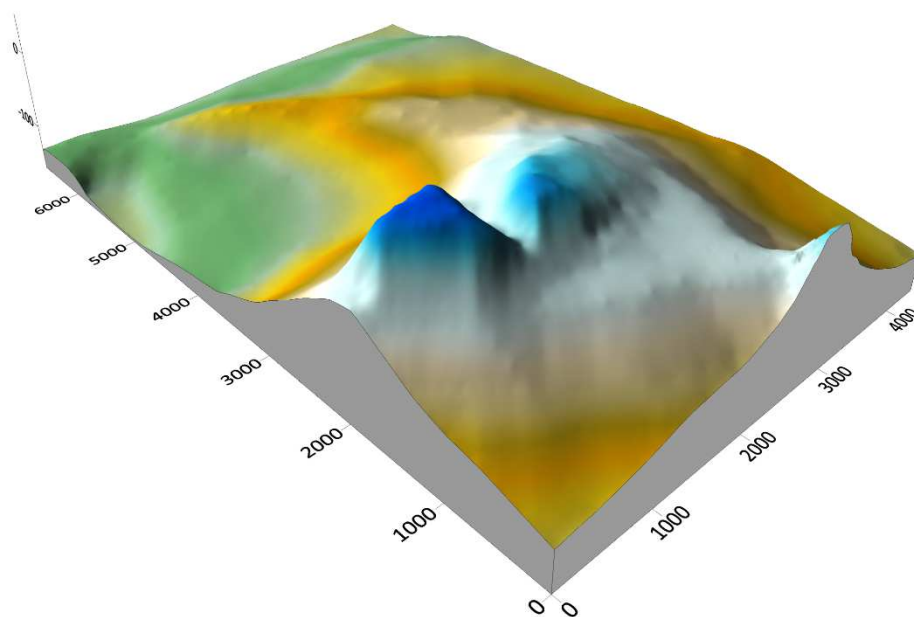
In Figura 2 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale ( $x = 4380$  m e  $y = 6600$  m), posizionata in corrispondenza di un'ampia fascia del litorale dell'Isola di Santo Stefano. Sono inoltre evidenziate le principali linee batimetriche determinate attraverso l'analisi della cartografia GEBCO.



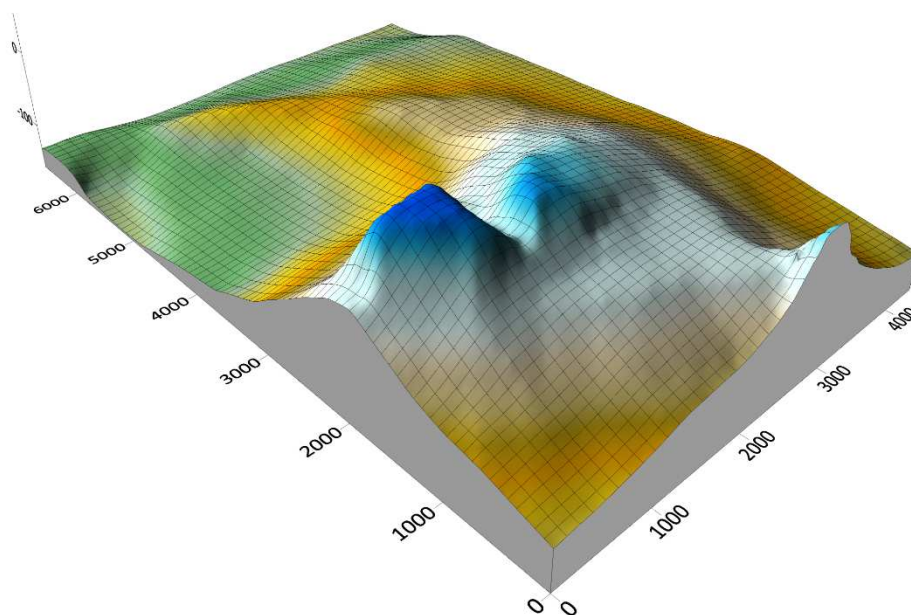
**Figura 2: Visualizzazione bidimensionale delle principali batimetriche  
all'interno della griglia di calcolo**

Nella seguente Figura 3 è mostrata una visualizzazione 3D della batimetria del fondale marino, situata all'interno della griglia di calcolo. La successiva Figura 4 mostra invece una visualizzazione 3D della batimetria del fondale marino, con evidenziazione dell'ampiezza delle mesh quadrate adottate (20 m x 20 m).





**Figura 3: Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale**



**Figura 4: Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale, con evidenziazione delle mesh adottate**

Nelle successive Figure sono riportati, a scopo esemplificativo, una serie di grafici relativi ai risultati delle simulazioni effettuate con il modello di propagazione del moto ondoso SWAN da largo a riva nel dominio

di calcolo considerato. In particolare, è stato selezionato l'evento ondoso estremo del settore omnidirezionale, con T (tempo di ritorno) = 50 anni (vedi paragrafo relativo alla determinazione degli eventi estremi). Esso è caratterizzato al largo, nella condizione indisturbata di acque profonde ( $d/L > 0.5$ ), dai seguenti valori:

- $H_s = 5.95$  m,  $T_p = 11.69$  s e  $Dir = 240^\circ N$ ;

Gli output grafici delle simulazioni effettuate sulla griglia generale, avente dimensione 4380 m \* 6600 m, fanno riferimento al sistema di coordinate cartesiano  $xy$ , dove  $x$  rappresenta la coordinata diretta verso la costa,  $y$  la coordinata ortogonale ad essa, e  $z$  la coordinata verticale, diretta lungo la profondità.

In particolare, per l'attacco ondoso considerato i grafici fanno riferimento a:

- profondità del fondale, con indicazione delle linee batimetriche principali (segnalate ogni 5 m a partire circa dalla -150 m) e della linea di riva, comprendente i raggi d'onda, rappresentati come linee di flusso, relativi alla direzione di propagazione del moto ondoso, al fine di evidenziare gli effetti rifrattivi del moto ondoso nella sua propagazione verso riva (Figura 5); in particolare, il valore della direzione del moto ondoso,  $Dir$  ( $^\circ N$ ), che risulta ortogonale alle creste d'onda, viene calcolata nello SWAN secondo la relazione (Kuyt et al., 1988):

$$Dir = \arctan \left[ \frac{\int \sin(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right]$$

dove  $E(\sigma, \theta)$  rappresenta la densità spettrale.

- distribuzione spaziale tridimensionale su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m), nel sistema di coordinate  $xyz$ , al fine di comprendere il fenomeno di abbattimento dell'altezza d'onda per effetto di shoaling e rifrazione a causa della progressiva diminuzione di profondità (Figura 6) il valore di  $H_s$  viene determinato dal modello attraverso la relazione:

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

dove  $E(\omega, \theta)$  rappresenta la varianza della densità spettrale e  $\omega$  la frequenza angolare.

- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m) (Figura 7);

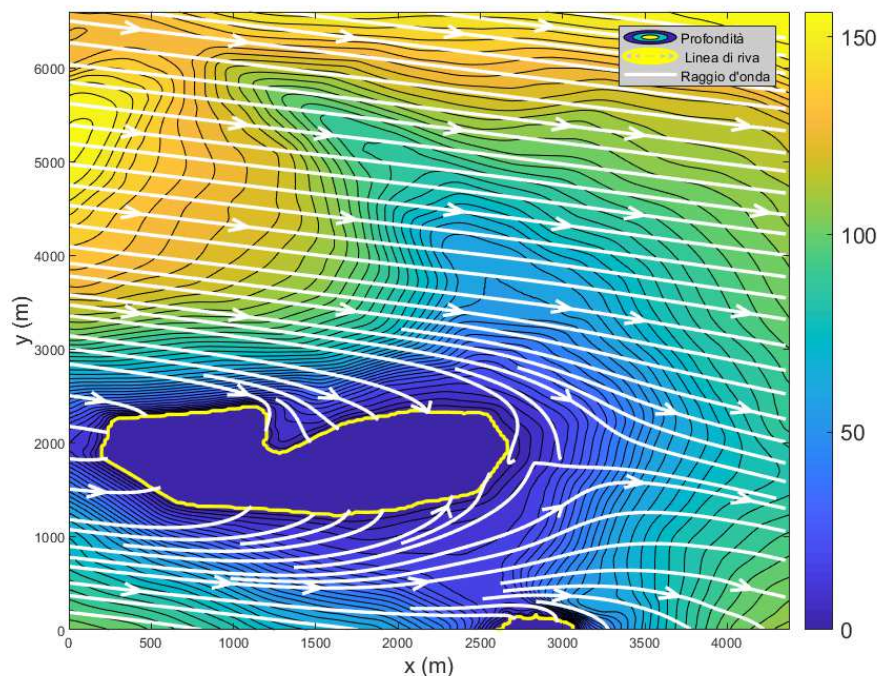
- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo del periodo medio dell'onda,  $T_m$  (s) (Figura 8), determinato secondo la relazione:

$$T_m = 2\pi \frac{\iint \omega^{-1} E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

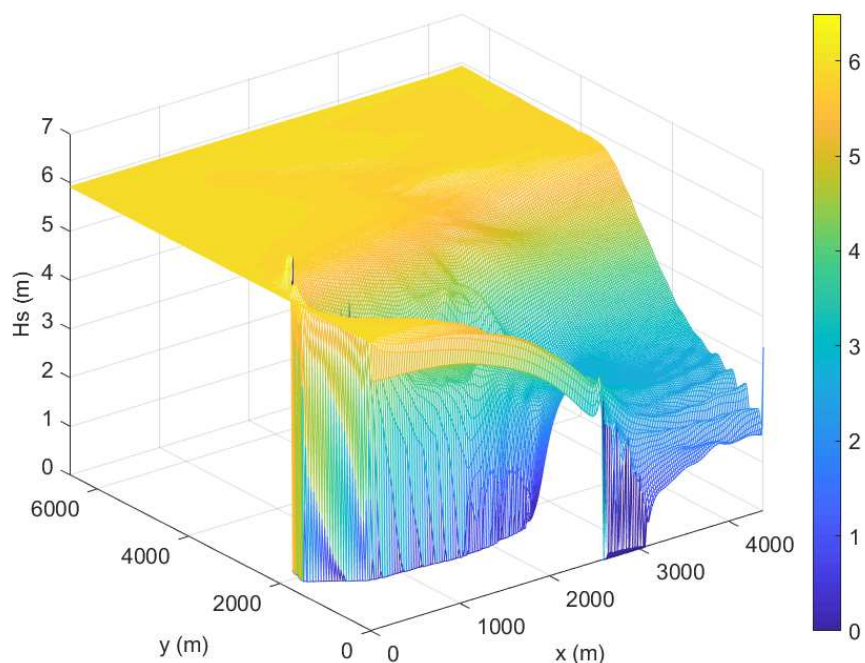
- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo della lunghezza d'onda,  $L$  (m) (Figura 9); essa viene valutata secondo la seguente relazione:

$$L = 2\pi \left( \frac{\iint k^p E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint k^{p-1} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right)^{-1}$$

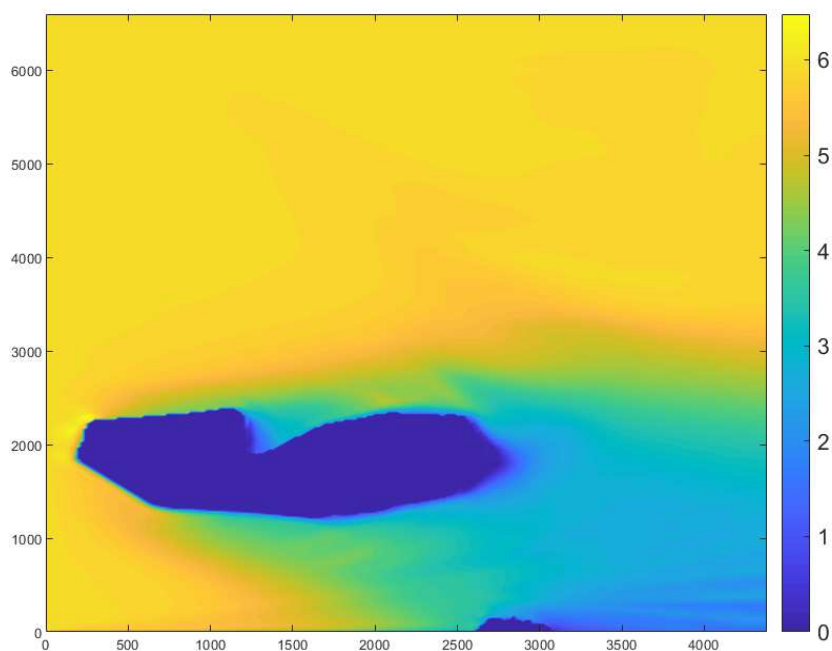
dove il coefficiente  $p$  è posto pari a 1.



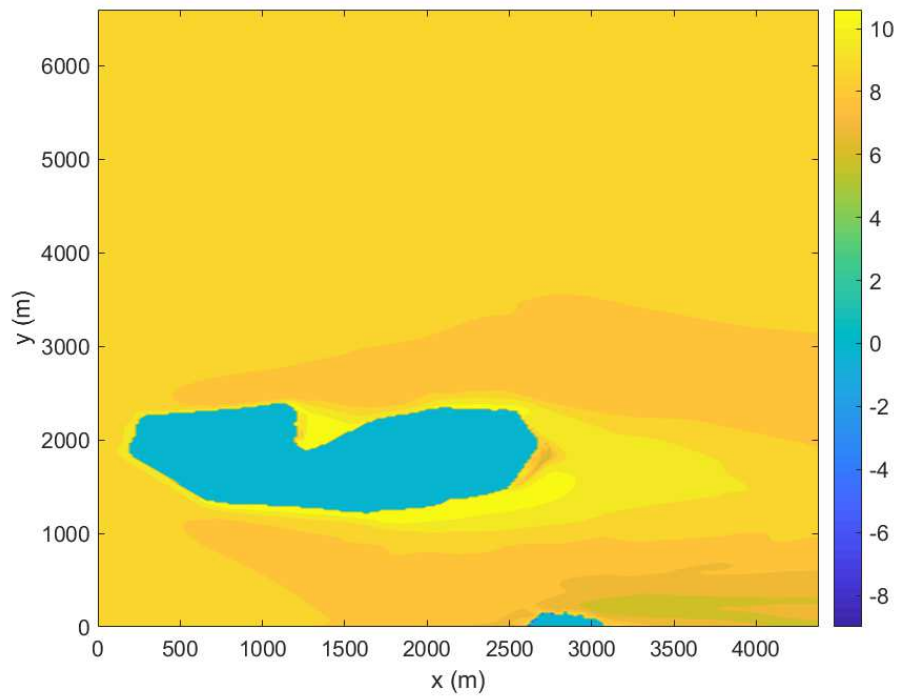
**Figura 5: Profondità del fondale e raggi d'onda relativi alla propagazione del moto ondoso su tutto il dominio di calcolo (onda di progetto con T = 50 anni).**



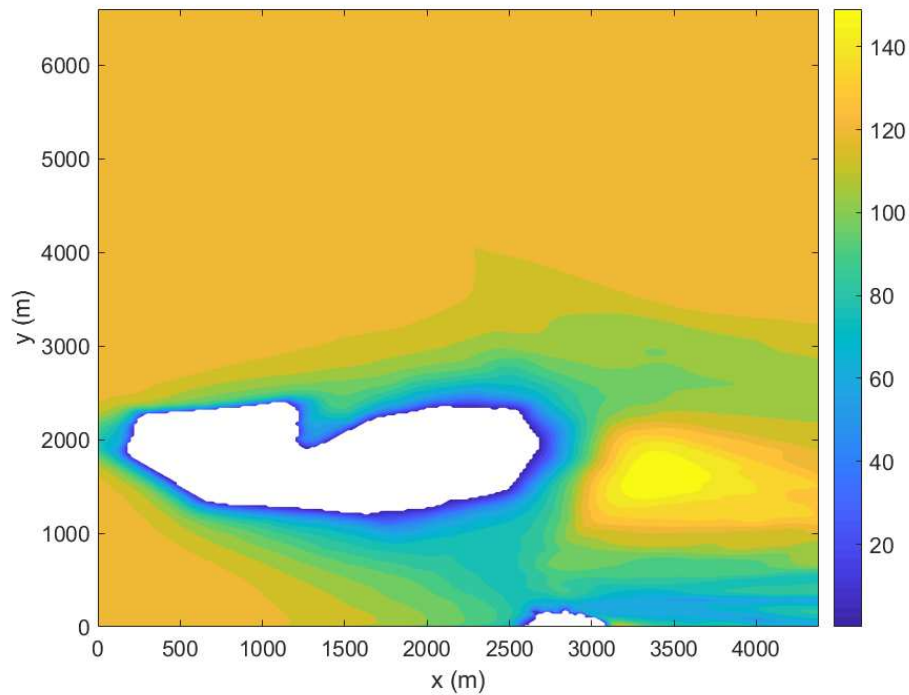
**Figura 6: Distribuzione spaziale 3D su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m) (onda di progetto con  $T = 50$  anni)**



**Figura 7: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m) (onda di progetto con  $T = 50$  anni)**



**Figura 8: Distribuzione spaziale bidimensionale del periodo medio dell'onda,  $T_m$  (s) (onda di progetto con  $T = 50$  anni)**



**Figura 9: Distribuzione spaziale bidimensionale della lunghezza d'onda,  $L$  (m) (onda di progetto con  $T = 50$  anni)**

Nei diversi grafici mostrati nelle precedenti Figure, le grandezze d'onda in esame (direzione, altezza d'onda significativa, periodo medio e lunghezza) evidenziano le seguenti caratteristiche:

- Progressiva rotazione delle direzioni di propagazione del moto ondoso, i cui raggi d'onda tendono a disporsi ortogonalmente alla linea di riva per effetto della rifrazione;
- Progressiva diminuzione dell'altezza d'onda significativa, dalla condizione di acque profonde al limite della condizione di acque intermedie ( $0.04 < d/L < 0.5$ ), e successivo lieve innalzamento dell'altezza d'onda significativa, dalla condizione di acque basse ( $d/L < 0.04$ ) fino al limite di frangimento delle onde per raggiunto limite di profondità;
- Variabilità minima del periodo medio dell'onda da largo verso riva sul dominio di calcolo;
- Progressiva diminuzione da largo verso riva della lunghezza d'onda e, di conseguenza, progressivo rallentamento del moto ondoso, descritto dall'abbattimento dei valori della celerità dell'onda.

Occorre infine osservare che il periodo di picco,  $T_p$ , risulta una grandezza invariante del moto ondoso nella sua propagazione da largo fino al frangimento per raggiunto limite di profondità. La dissipazione energetica associata all'onda fa sì che esso risulti variabile nella cosiddetta surf zone (fascia costiera compresa fra la profondità di frangimento e la linea di riva).

### 1.1 Clima meteomarinico sottocosta

Sulla base delle simulazioni numeriche effettuate con il modello SWAN viene mostrato il clima meteomarinico ricavato sottocosta. Nella Tabella 1 sono mostrati, oltre ai nuovi valori di direzione, altezza e periodo, anche il valore di  $\Delta\alpha$ , che rappresenta l'entità della rotazione angolare prodotta dai raggi d'onda nella loro propagazione da largo a sottocosta, e il valore di  $\Delta H_s$ , espresso in %, che rappresenta l'entità dell'abbattimento o, in rari casi, di innalzamento dell'altezza d'onda significativa nella sua propagazione da largo verso riva.

CLIMA ONDOSO AL LARGO				CLIMA ONDOSO SOTTOCOSTA (punto A, -8.5 m)					
Dir (°N)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>m</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)	Dir (°)	Dir (°N)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>m</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)	ΔH <sub>s</sub> (%)
5	0.5	4.22	4.86	2.38	2.62	0.48	3.45	4.86	0.04
5	1	5.22	6.00	4.74	0.26	0.92	4.28	6.00	0.08
5	1.5	5.91	6.79	6.25	358.75	1.37	4.89	6.79	0.09
5	2	6.45	7.41	7.26	357.74	1.84	5.41	7.41	0.08
5	2.5	6.90	7.92	7.81	357.20	2.26	5.78	7.92	0.10
15	0.5	4.22	4.86	3.03	11.97	0.48	3.45	4.86	0.04

15	1	5.22	6.00	6.11	8.90	0.92	4.27	6.00	0.08
15	1.5	5.91	6.79	8.20	6.80	1.36	4.89	6.79	0.09
15	2	6.45	7.41	9.74	5.26	1.84	5.42	7.41	0.08
25	0.5	4.22	4.86	4.01	20.99	0.47	3.44	4.86	0.05
25	1	5.22	6.00	7.68	17.32	0.90	4.26	6.00	0.10
25	1.5	5.91	6.79	10.28	14.72	1.34	4.87	6.79	0.11
25	2	6.45	7.41	12.26	12.74	1.81	5.40	7.41	0.10
25	2.5	6.90	7.92	13.53	11.47	2.22	5.77	7.92	0.11
25	3	7.30	8.37	14.72	10.28	2.71	6.18	8.37	0.10
35	0.5	4.22	4.86	6.02	28.98	0.46	3.43	4.86	0.09
35	1	5.22	6.00	10.17	24.83	0.87	4.25	6.00	0.13
35	1.5	5.91	6.79	13.19	21.81	1.29	4.86	6.79	0.14
35	2	6.45	7.41	15.49	19.51	1.73	5.38	7.41	0.14
35	2.5	6.90	7.92	17.03	17.97	2.13	5.75	7.92	0.15
35	3	7.30	8.37	18.49	16.51	2.59	6.17	8.37	0.14
45	0.5	4.22	4.86	9.97	35.03	0.41	3.40	4.86	0.19
45	1	5.22	6.00	14.60	30.40	0.77	4.21	6.00	0.23
45	1.5	5.91	6.79	17.90	27.10	1.14	4.82	6.79	0.24
45	2	6.45	7.41	20.44	24.56	1.54	5.35	7.41	0.23
55	0.5	4.22	4.86	15.24	39.76	0.33	3.37	4.86	0.35
55	1	5.22	6.00	20.23	34.77	0.62	4.16	6.00	0.38
55	1.5	5.91	6.79	23.80	31.20	0.91	4.77	6.79	0.39
55	2	6.45	7.41	26.55	28.45	1.23	5.30	7.41	0.39
65	0.5	4.22	4.86	21.38	43.62	0.24	3.32	4.86	0.53
65	1	5.22	6.00	26.62	38.38	0.44	4.09	6.00	0.56
65	1.5	5.91	6.79	30.41	34.59	0.65	4.69	6.79	0.57
65	2	6.45	7.41	33.33	31.67	0.87	5.23	7.41	0.56
225	0.5	4.22	4.86	14.70	239.70	0.29	3.23	4.86	0.41
225	1	5.22	6.00	18.24	243.24	0.52	3.86	6.00	0.48
225	1.5	5.91	6.79	20.02	245.02	0.72	4.30	6.79	0.52
225	2	6.45	7.41	21.23	246.23	0.92	4.67	7.41	0.54
225	2.5	6.90	7.92	21.79	246.79	1.08	4.90	7.92	0.57
225	3	7.30	8.37	22.36	247.36	1.26	5.17	8.37	0.58

225	3.5	7.65	8.78	22.68	247.68	1.41	5.34	8.78	0.60
225	4	7.97	9.14	22.97	247.97	1.56	5.52	9.14	0.61
235	0.5	4.22	4.86	7.66	242.66	0.35	3.25	4.86	0.30
235	1	5.22	6.00	10.81	245.81	0.61	3.87	6.00	0.39
235	1.5	5.91	6.79	12.41	247.41	0.84	4.29	6.79	0.44
235	2	6.45	7.41	13.48	248.48	1.07	4.65	7.41	0.46
235	2.5	6.90	7.92	13.87	248.87	1.26	4.87	7.92	0.50
235	3	7.30	8.37	14.25	249.25	1.46	5.13	8.37	0.51
235	3.5	7.65	8.78	14.46	249.46	1.63	5.30	8.78	0.53
235	4	7.97	9.14	14.64	249.64	1.81	5.48	9.14	0.55
245	0.5	4.22	4.86	0.92	245.92	0.36	3.30	4.86	0.29
245	1	5.22	6.00	3.39	248.39	0.62	3.89	6.00	0.38
245	1.5	5.91	6.79	4.98	249.98	0.85	4.30	6.79	0.43
245	2	6.45	7.41	6.36	251.36	1.08	4.66	7.41	0.46
245	2.5	6.90	7.92	6.94	251.94	1.27	4.89	7.92	0.49
245	3	7.30	8.37	7.49	252.49	1.49	5.15	8.37	0.50
245	3.5	7.65	8.78	7.70	252.70	1.66	5.33	8.78	0.53
245	4	7.97	9.14	7.84	252.84	1.84	5.52	9.14	0.54
245	4.5	8.26	9.47	8.00	253.00	2.04	5.72	9.47	0.55
255	0.5	4.22	4.86	5.61	249.39	0.31	3.30	4.86	0.37
255	1	5.22	6.00	3.44	251.57	0.53	3.83	6.00	0.47
255	1.5	5.91	6.79	1.99	253.01	0.72	4.23	6.79	0.52
255	2	6.45	7.41	0.17	254.83	0.92	4.59	7.41	0.54
255	2.5	6.90	7.92	0.94	255.95	1.10	4.84	7.92	0.56
255	3	7.30	8.37	2.10	257.10	1.29	5.12	8.37	0.57
255	3.5	7.65	8.78	2.84	257.84	1.45	5.33	8.78	0.59
255	4	7.97	9.14	3.59	258.59	1.62	5.55	9.14	0.59
255	4.5	8.26	9.47	4.32	259.32	1.82	5.79	9.47	0.60
255	5	8.53	9.78	4.81	259.81	1.99	5.97	9.78	0.60
255	5.5	8.78	10.07	5.23	260.23	2.14	6.13	10.07	0.61
315	0.5	4.22	4.86	11.92	326.92	0.31	3.25	4.86	0.39
315	1	5.22	6.00	13.24	328.24	0.54	3.89	6.00	0.46
315	1.5	5.91	6.79	14.09	329.09	0.76	4.36	6.79	0.49



315	2	6.45	7.41	15.13	330.13	0.97	4.73	7.41	0.52
315	2.5	6.90	7.92	16.08	331.08	1.15	4.99	7.92	0.54
325	0.5	4.22	4.86	6.43	331.43	0.39	3.34	4.86	0.22
325	1	5.22	6.00	7.47	332.47	0.70	4.00	6.00	0.30
325	1.5	5.91	6.79	8.11	333.11	0.99	4.49	6.79	0.34
325	2	6.45	7.41	8.92	333.92	1.27	4.88	7.41	0.37
325	2.5	6.90	7.92	9.67	334.67	1.51	5.14	7.92	0.40
335	0.5	4.22	4.86	2.35	337.35	0.45	3.40	4.86	0.11
335	1	5.22	6.00	2.73	337.73	0.82	4.13	6.00	0.18
335	1.5	5.91	6.79	3.04	338.04	1.18	4.65	6.79	0.21
335	2	6.45	7.41	3.55	338.55	1.53	5.08	7.41	0.23
335	2.5	6.90	7.92	4.09	339.09	1.83	5.37	7.92	0.27
335	3	7.30	8.37	4.68	339.68	2.18	5.70	8.37	0.27
345	0.5	4.22	4.86	0.22	344.78	0.47	3.43	4.86	0.06
345	1	5.22	6.00	0.77	344.23	0.89	4.22	6.00	0.11
345	1.5	5.91	6.79	0.98	344.02	1.30	4.79	6.79	0.13
345	2	6.45	7.41	0.90	344.10	1.71	5.26	7.41	0.14
345	2.5	6.90	7.92	0.64	344.36	2.07	5.58	7.92	0.17
355	0.5	4.22	4.86	1.60	353.40	0.48	3.45	4.86	0.04
355	1	5.22	6.00	3.12	351.88	0.92	4.27	6.00	0.08
355	1.5	5.91	6.79	3.98	351.02	1.35	4.86	6.79	0.10
355	2	6.45	7.41	4.43	350.57	1.81	5.37	7.41	0.10

**Tabella 1: Clima ondoso al largo e sottocosta (-8.5 m) per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano**

**(punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 2820 m, y = 200 m)**

In Tabella 10 e in Tabella 11 sono mostrati in corrispondenza del paraggio dell'Isola di Santo Stefano i numeri di apparizione e le percentuali di apparizione del moto ondoso alla profondità di circa -10 m nel punto avente coordinate x = 2820 m e y = 200 m nel dominio di calcolo relativo alla propagazione ondosa. In forma di istogramma nella Figura 31 e sotto forma di diagramma polare (escludendo gli eventi di calma con  $H_s < 0.25$  m) in Figura 32 vengono mostrate le percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta. Gli eventi di moto ondoso che caratterizzano il clima ondoso sottocosta sono suddivisi ogni 10° all'interno del settore angolare. Gli eventi risultano ricadere prevalentemente nei settori direzionali 240°-250°N (53.08 %) e 250-260°N (14.62 %). Si sottolinea che le onde provenienti dal settore secondario nonostante

possiedano una percentuale di apparizione molto bassa presentano un valore di altezza d'onda sottocosta particolarmente alto, nello specifico per i settori 10°-20° N e 350°-360° N il valore di altezza d'onda è compreso tra 2.25-2.75 m. Questo è dovuto principalmente al basso coefficiente di abbattimento degli stati di mare provenienti da questi settori.

Dir (°N)		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)						TOTALE
		calme	0.25- 0.75	0.75- 1.25	1.25- 1.75	1.75- 2.25	2.25- 2.75	
0	10	189	472	240	25	7	0	933
10	20	154	440	145	38	15	4	796
20	30	166	1170	269	53	0	0	1658
30	40	163	1496	284	0	0	0	1943
40	50	691	0	0	0	0	0	691
50	60	148	0	0	0	0	0	148
60	70	128	0	0	0	0	0	128
220	230	4909	0	0	0	0	0	4909
230	240	5622	8003	0	0	0	0	13625
240	250	4791	40512	4847	661	11	0	50822
250	260	5788	5837	1792	560	23	0	14000
260	270	0	0	0	0	1	0	1
270	280	0	0	0	0	0	0	0
280	290	0	0	0	0	0	0	0
290	300	0	0	0	0	0	0	0
300	310	0	0	0	0	0	0	0
310	320	334	0	0	0	0	0	334
320	330	283	1418	95	0	0	0	1796
330	340	78	1541	207	24	3	0	1853
340	350	171	659	199	85	2	0	1116
350	360	208	543	133	88	18	1	991
TOTALE		23823	62091	8211	1534	80	5	95744

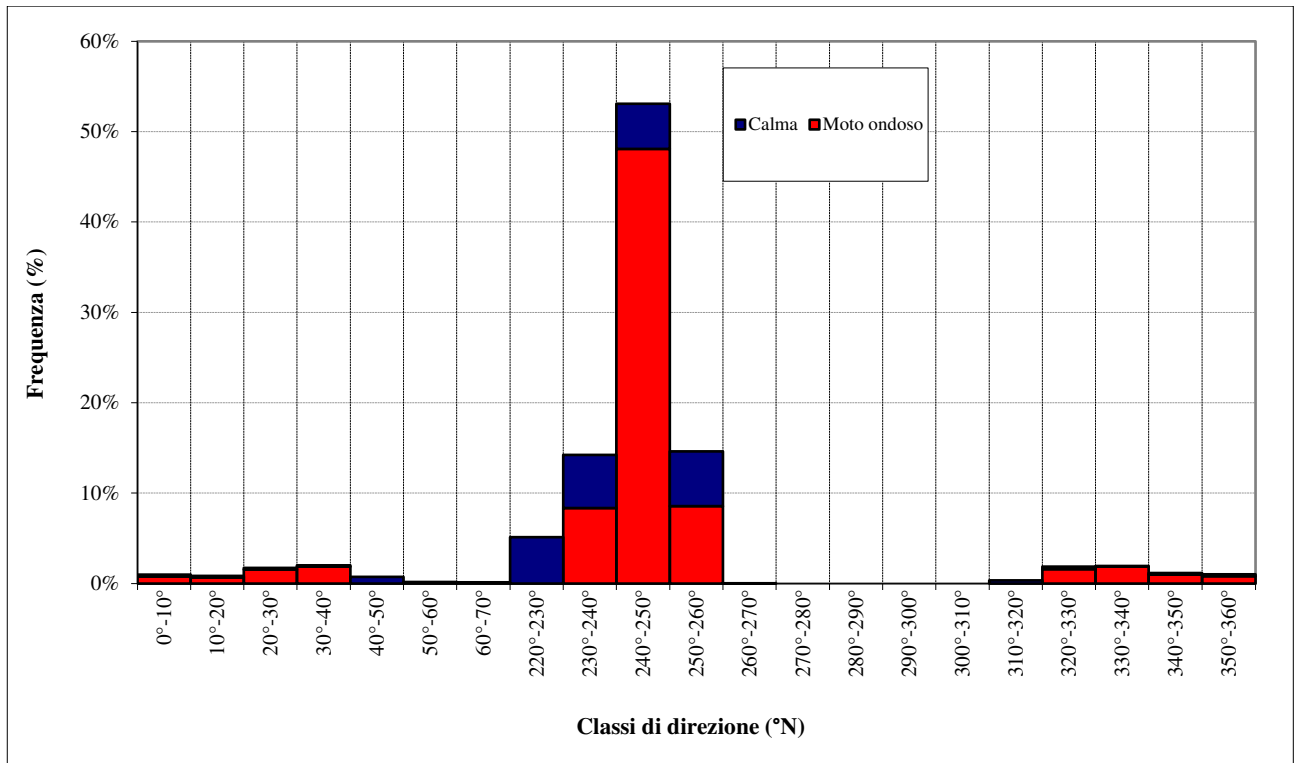
**Tabella 2: Numero di apparizioni del moto ondoso nel punto sottocosta per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano**

**(punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 2820 m, y = 200 m)**

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)						TOTALE
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	
Dir (°N)								
0	10	0.197%	0.493%	0.251%	0.026%	0.007%	0.000%	0.974%
10	20	0.161%	0.460%	0.151%	0.040%	0.016%	0.004%	0.831%
20	30	0.173%	1.222%	0.281%	0.055%	0.000%	0.000%	1.732%
30	40	0.170%	1.563%	0.297%	0.000%	0.000%	0.000%	2.029%
40	50	0.722%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.722%
50	60	0.155%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.155%
60	70	0.134%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.134%
220	230	5.127%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	5.127%
230	240	5.872%	8.359%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	14.231%
240	250	5.004%	42.313%	5.062%	0.690%	0.011%	0.000%	53.081%
250	260	6.045%	6.096%	1.872%	0.585%	0.024%	0.000%	14.622%
260	270	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.000%	0.001%
270	280	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
280	290	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
290	300	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
300	310	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%
310	320	0.349%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.349%
320	330	0.296%	1.481%	0.099%	0.000%	0.000%	0.000%	1.876%
330	340	0.081%	1.610%	0.216%	0.025%	0.003%	0.000%	1.935%
340	350	0.179%	0.688%	0.208%	0.089%	0.002%	0.000%	1.166%
350	360	0.217%	0.567%	0.139%	0.092%	0.019%	0.001%	1.035%
TOTALE		24.882%	64.851%	8.576%	1.602%	0.084%	0.005%	100.000%

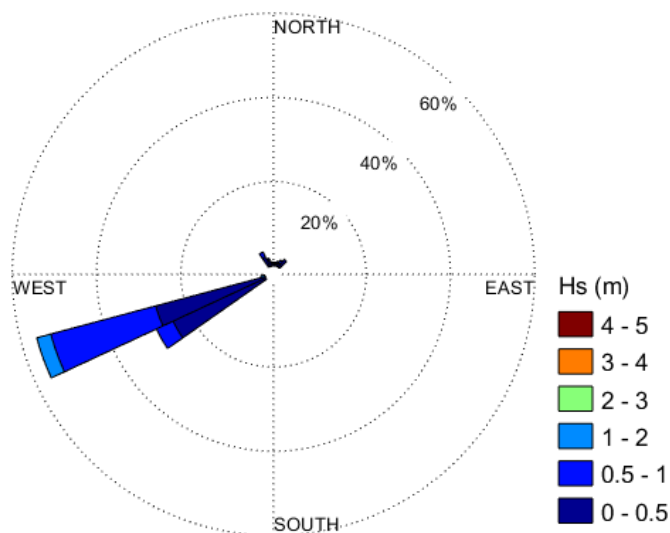
**Tabella 3: Percentuali di apparizione del moto ondoso nel punto sottocosta per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano**

**(punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 2820 m, y = 200 m)**



**Figura 10: Istogramma relativo alle percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta per Isola di Santo Stefano**

(punto di coordinate nel dominio di calcolo:  $x = 2820$  m,  $y = 200$  m)



**Figura 11: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso sottocosta per Isola di Santo Stefano (punto di coordinate nel dominio di calcolo:  $x = 2820$  m,  $y = 200$  m)**

Oltre alla propagazione del clima ondoso da largo verso riva, comprendente le diverse classi di altezza d'onda significativa suddivise per differenti settori direzionali, è stata effettuata attraverso il modello SWAN la propagazione degli eventi estremi di moto ondoso associati ai periodi di ritorni più significativi ( $T = 10, 25, 50, 100, 150$  e  $200$  anni). Ciò risulta utile nel dimensionamento e nella verifica delle strutture di difesa costiera dall'erosione, in cui sono necessari i valori delle onde di progetto che possono direttamente incidere su di esse.

La Tabella 4 illustra i risultati della propagazione effettuata con il modello numerico SWAN per gli eventi estremi direzionali di moto ondoso associati ai periodi di ritorno più significativi per il punto sottocosta in esame. Dall'analisi dei risultati si osserva un progressivo abbattimento delle altezze d'onda significative estreme da largo a sottocosta all'aumentare del tempo di ritorno. Infine viene anche riportata la lunghezza d'onda determinata con la relazione di dispersione lineare risolta in maniera iterativa in funzione del periodo d'onda  $T$  e della profondità  $d$ .

T (anni)	ONDE DI PROGETTO AL LARGO				ONDE DI PROGETTO SOTTOCOSTA (punto A, -8.5 m)						
	Dir (°N)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>m</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)	Δα (°)	Dir (°N)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>m</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)	ΔH <sub>s</sub> (%)	L (m)
10	240	5.27	8.67	11.56	11.08	251.08	2.21	6.89	11.56	0.58	59.58
25	240	5.66	8.86	11.63	11.09	251.09	2.36	6.95	11.63	0.58	60.34
50	240	5.95	9.00	11.69	11.11	251.11	2.48	7.00	11.69	0.58	60.99
100	240	6.25	9.13	11.74	11.12	251.12	2.59	7.06	11.74	0.59	61.77
150	240	6.42	9.21	11.77	11.13	251.13	2.66	7.09	11.77	0.59	62.16
200	240	6.54	9.26	11.79	11.14	251.14	2.71	7.12	11.79	0.59	62.55

**Tabella 4: Eventi estremi direzionali di moto ondoso sottocosta con  $T = 10, 25, 50, 100, 150$  e  $200$  anni (-8.5 m) (punto di coordinate nel dominio di calcolo:  $x = 2820$  m,  $y = 200$  m)**

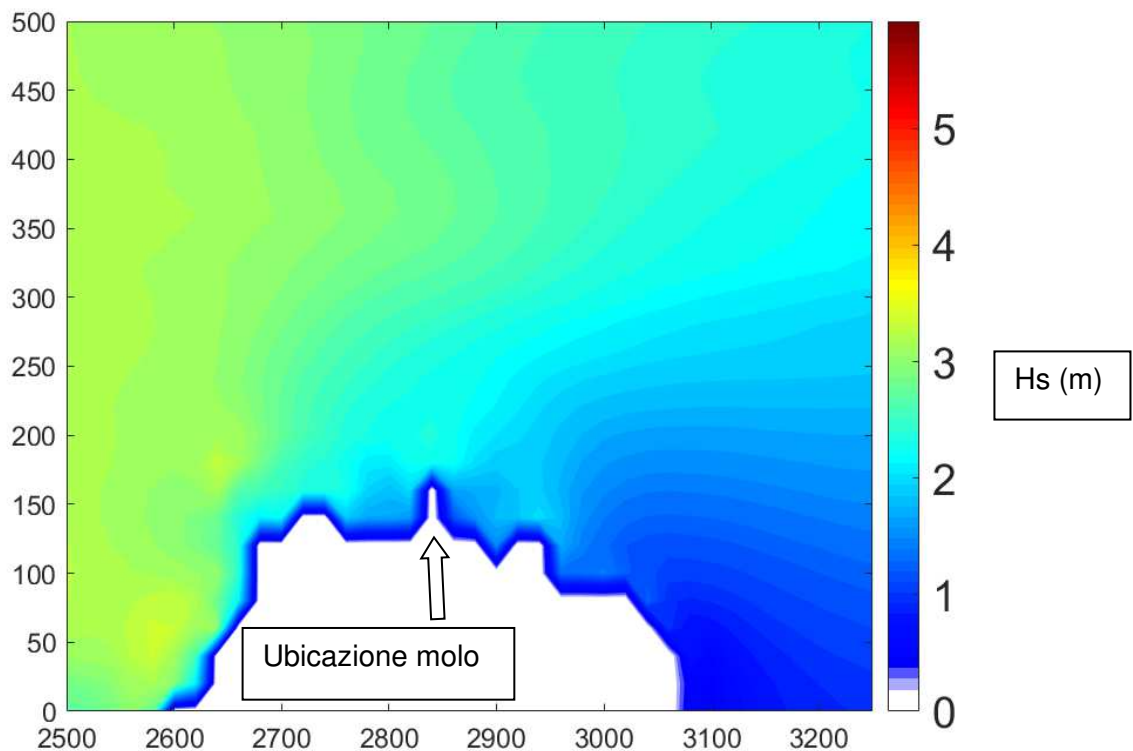
## 1.2 Agitazione ondosa nei pressi dell'opera da realizzare

Nel paragrafo 1 abbiamo indicato come il modello SWAN può tenere conto della struttura da realizzare. Infatti, grazie al comando OBSTACLE si è potuto inserire la posizione esatta all'interno del dominio di calcolo. Pertanto, si è potuto stimare l'influenza dell'opera sull'altezza dell'onda significativa.

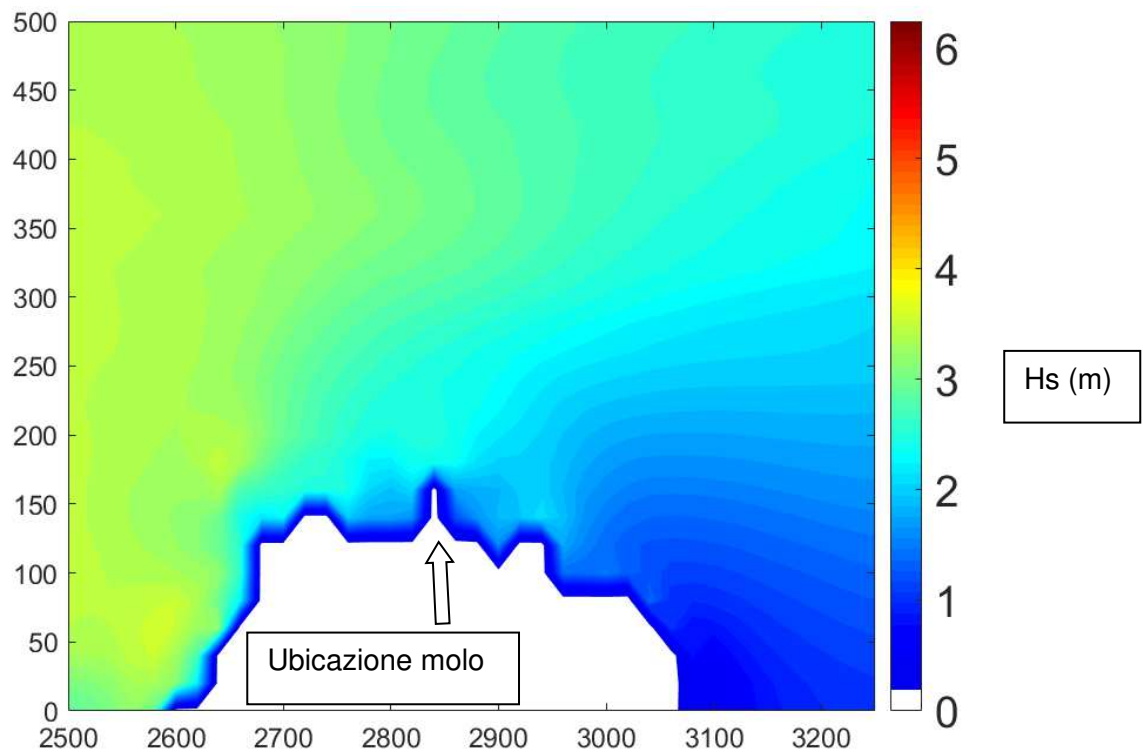
La definizione delle onde di riferimento per le simulazioni viene condotta nell'ottica di verificare, con il modello numerico, la rispondenza della soluzione progettuale ai diversi stati di mare trasposti sottocosta, sia in termini di eventi estremi sia in termini di clima ondoso ordinario.

Nello specifico vengono simulati gli eventi estremi sottocosta, provenienti dal settore principale di provenienza e gli stati di mare provenienti dal settore secondario con frequenza di apparizione maggiore, in particolare gli stati di mare provenienti dal settore 30°-40° N (2.029%) e gli stati di mare provenienti dal settore 330°-340° N (1.935%)

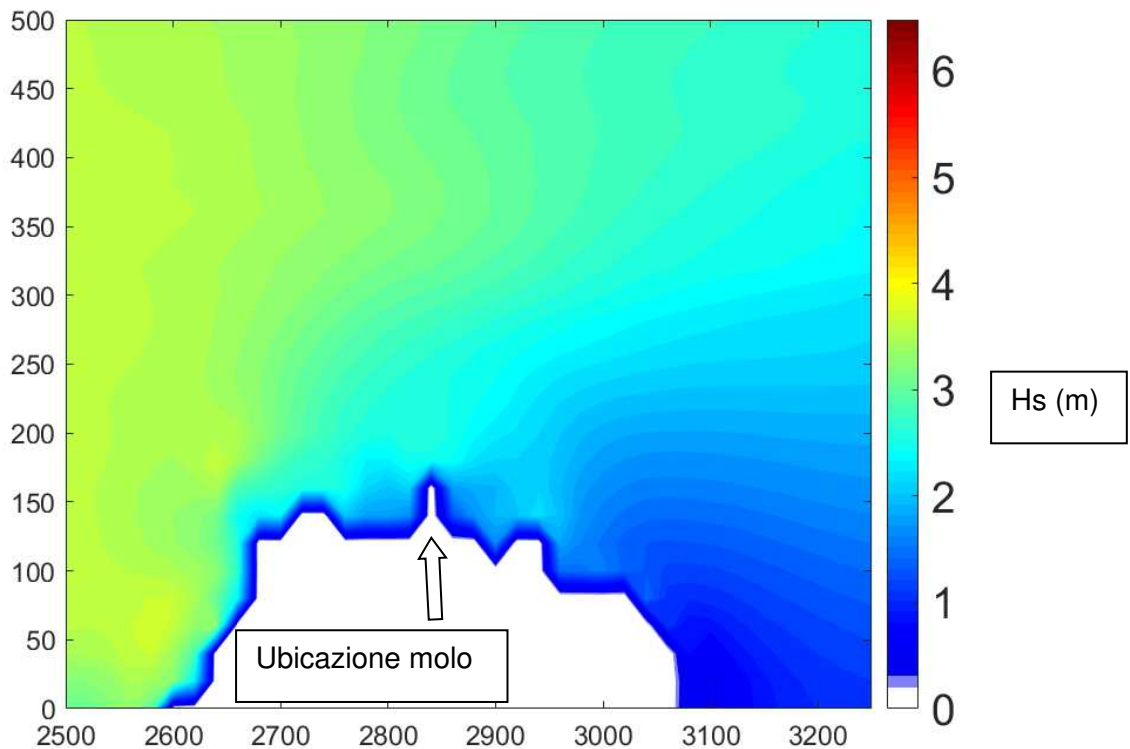
Nelle successive figure vengono illustrati per gli eventi estremi considerati il campo di moto nell'intorno dell'opera.



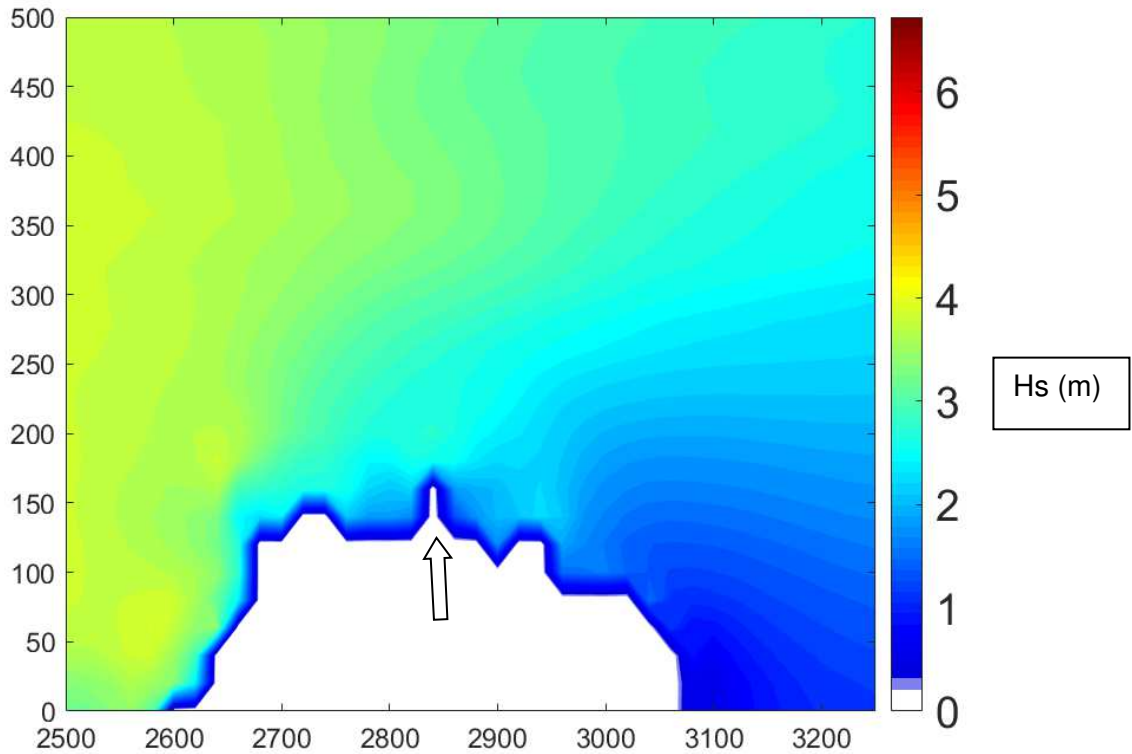
**Figura 12: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, Hs (m)  
(onda di progetto con T = 10 anni)**



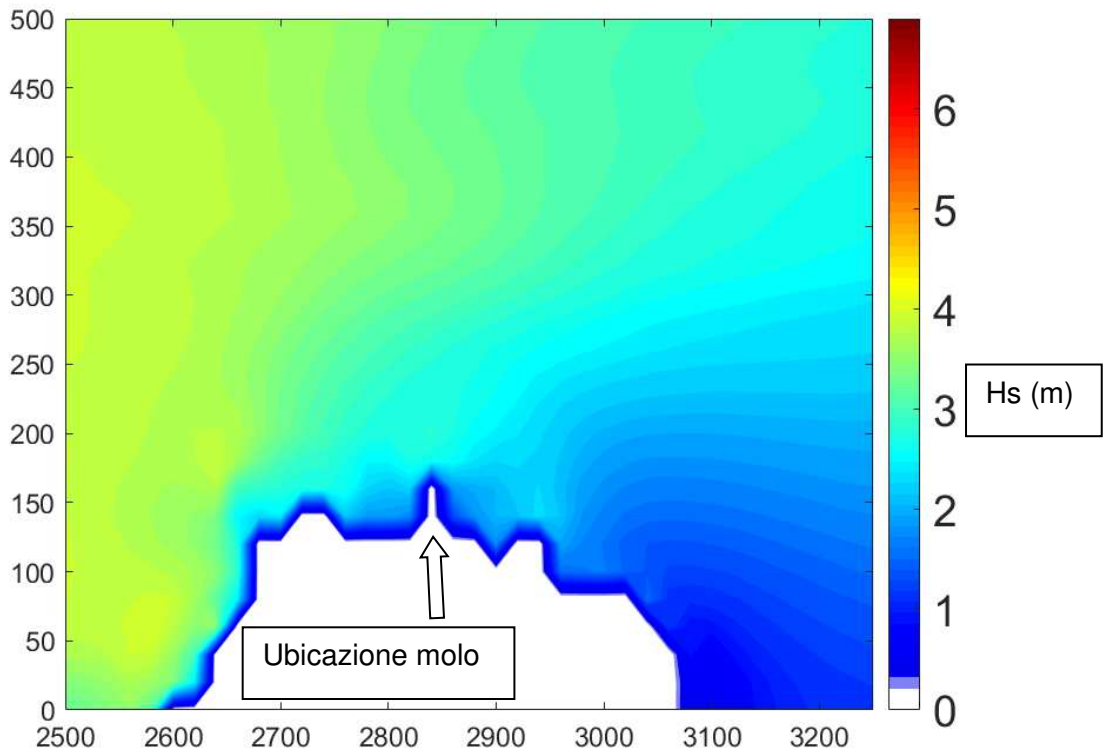
**Figura 13: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, Hs (m) (onda di progetto con T = 25 anni)**



**Figura 14: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, Hs (m) (onda di progetto con T = 50 anni)**

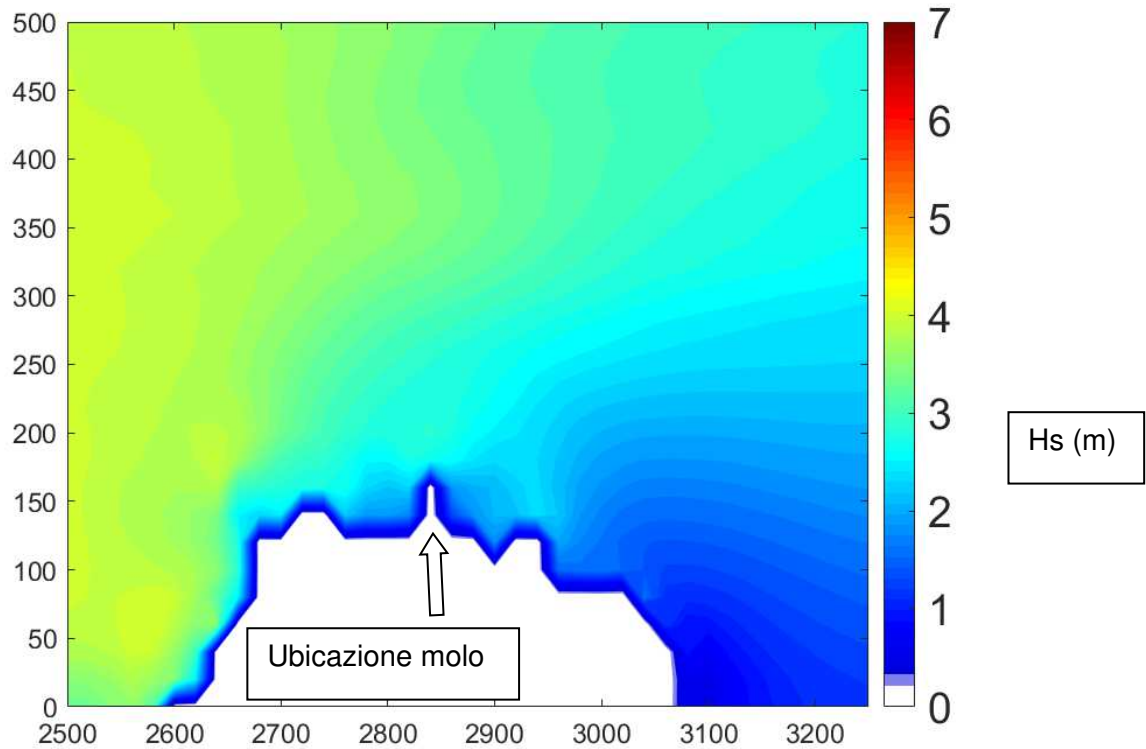


**Figura 15: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m) (onda di progetto con  $T = 100$  anni)**



**Figura 16: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m) (onda di progetto con  $T = 150$  anni)**

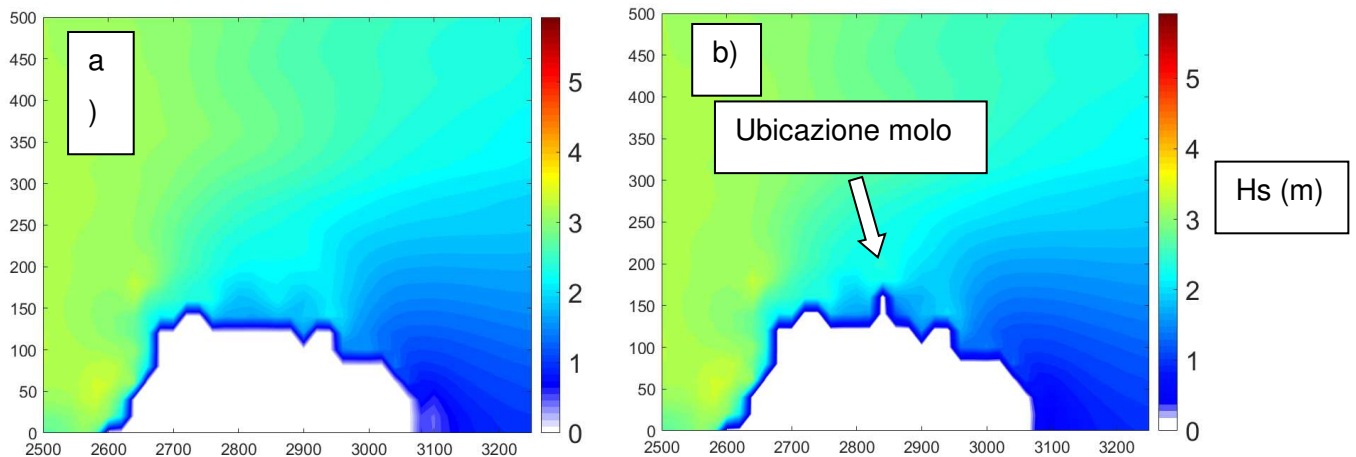




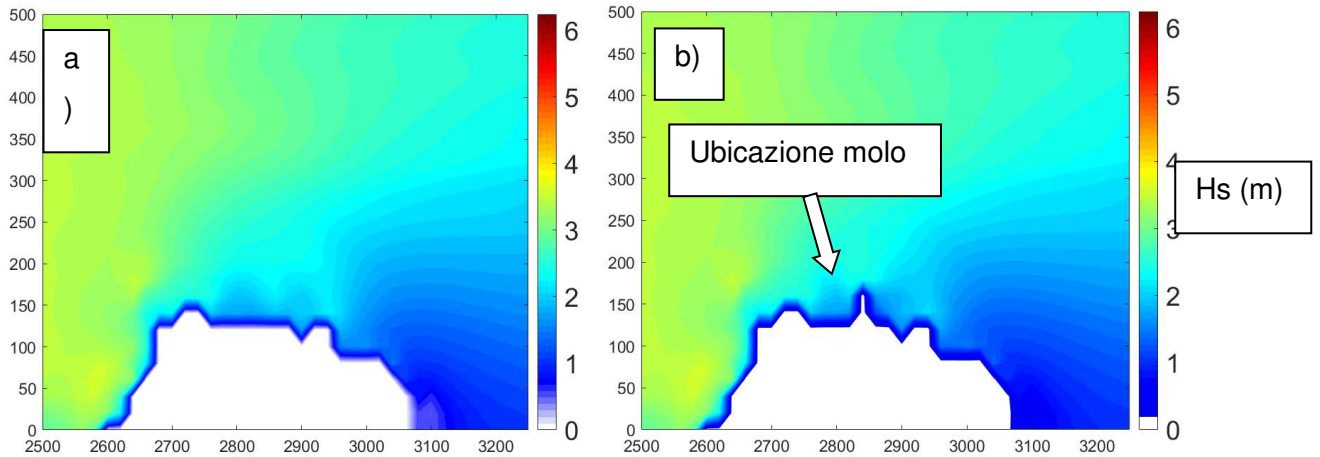
**Figura 17: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, Hs (m) (onda di progetto con T = 200 anni)**

Per tenere conto dell'influenza dell'opera sull'altezza dell'onda significativa sono state condotte delle simulazioni sia nello stato attuale, ovvero senza nessuna opera, e sia con la presenza del molo.

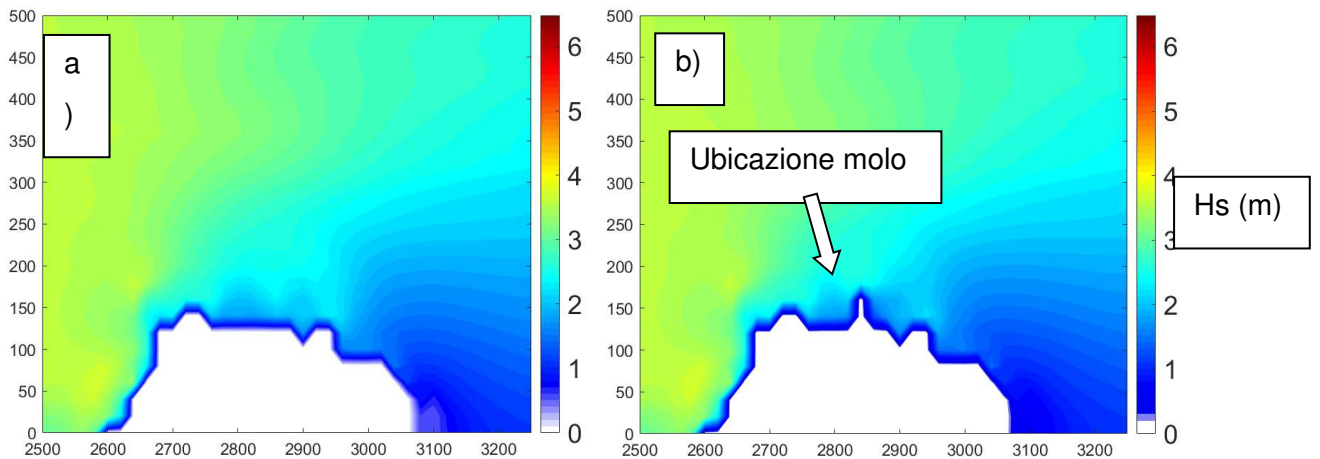
Nelle successive figure vengono illustrati per gli eventi estremi considerati il campo di moto nell'intorno dell'area dove sarà realizzato il molo.



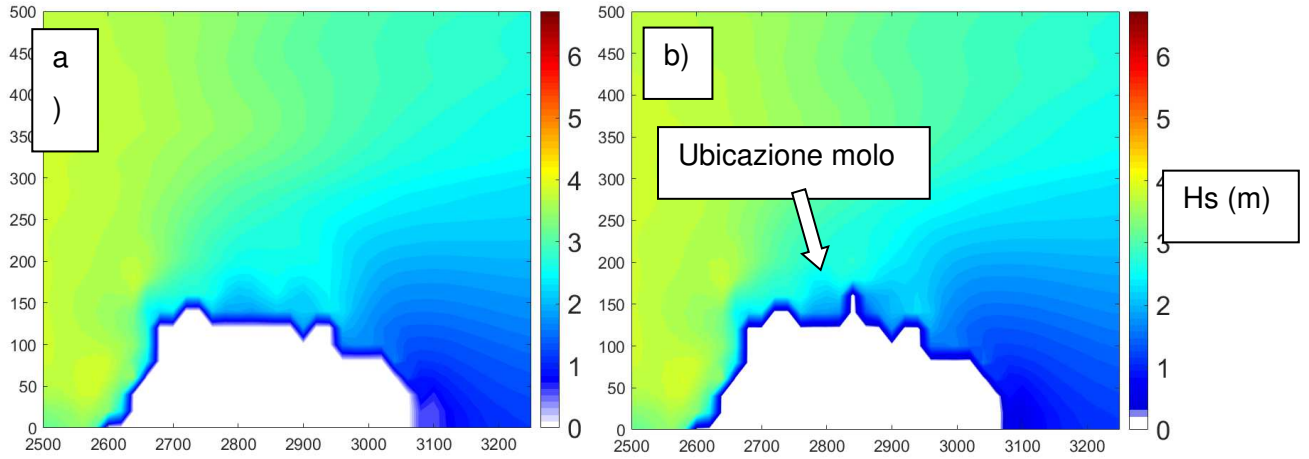
**Figura 18: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m)  
(onda di progetto con  $T = 10$  anni): a) senza molo b) con il molo**



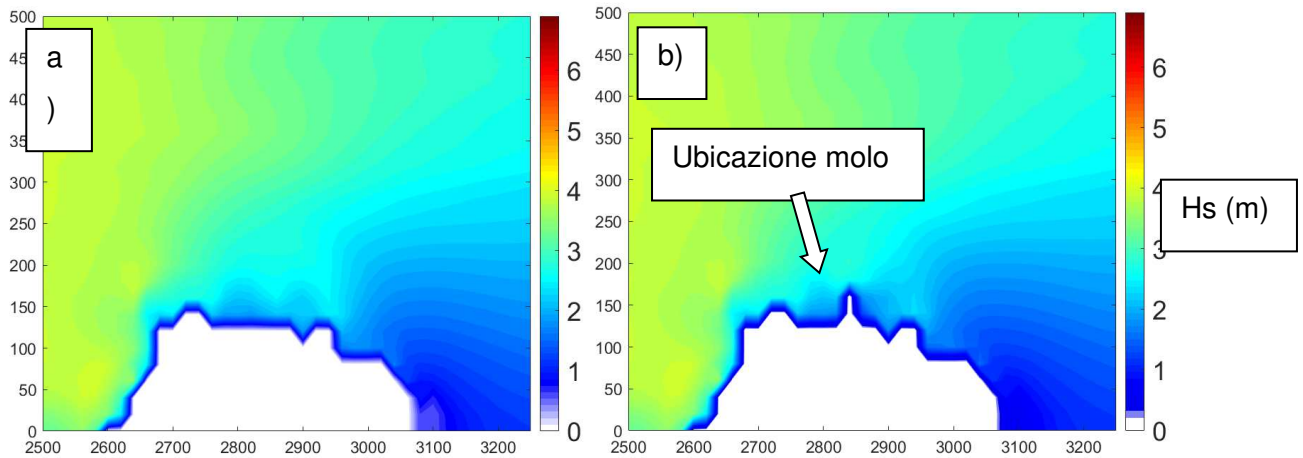
**Figura 19: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m)  
(onda di progetto con  $T = 25$  anni) : a) senza molo b) con il molo**



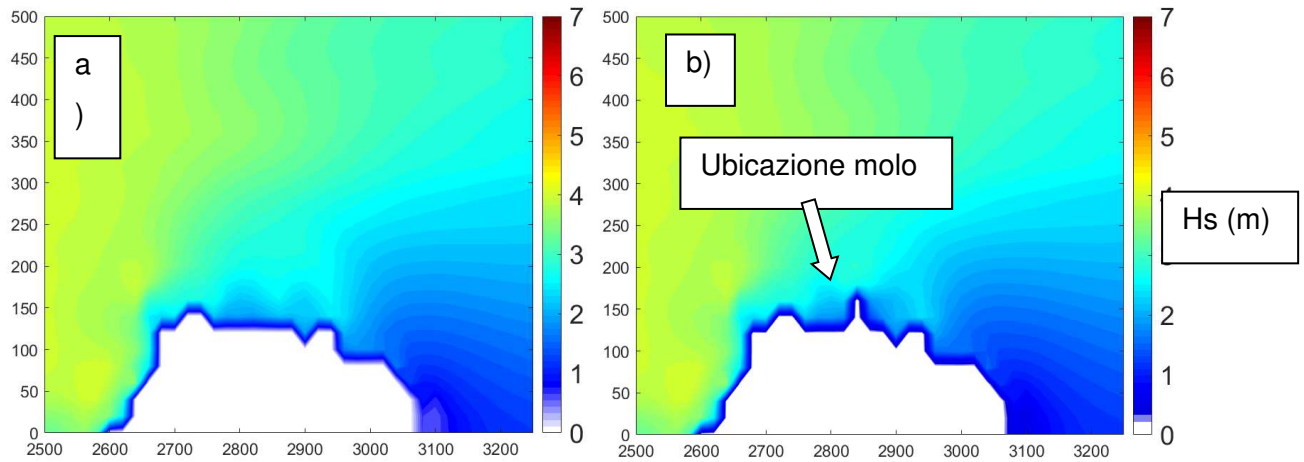
**Figura 20: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m)  
(onda di progetto con  $T = 50$  anni) : a) senza molo b) con il molo**



**Figura 21: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, Hs (m) (onda di progetto con T = 100 anni) : a) senza molo b) con il molo**



**Figura 22: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, Hs (m) (onda di progetto con T = 150 anni) : a) senza molo b) con il molo**



**Figura 23: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa,  $H_s$  (m)  
(onda di progetto con  $T = 200$  anni)**

Come mostrato nelle figure precedenti il campo di moto nei dintorni dell'opera non subisce variazioni rispetto allo stato attuale. Infatti, i valori dell'altezza d'onda significativa tra i casi a) e b) sono del tutto comparabili, questo è dovuto dalla limitata lunghezza dell'intervento in progetto che non riesce ad attenuare i fenomeni diffrattivi.

### 1.3 Clima meteomarinario equivalente (onde morfologiche)

Oltre alla modellazione del clima meteomarinario al largo e sottocosta del paraggio dell'Isola di Santo Stefano, risulta utile conoscere, ai fini della caratterizzazione della dinamica del litorale in esame, in corrispondenza del punto sottocosta, il clima meteomarinario equivalente annuale, ovvero le cosiddette onde di modellazione o morfologiche. Le analisi sono state effettuate a partire dall'analisi al largo delle serie di storiche del moto ondoso ottenute dalla trasposizione geografica dei dati ERA5 e dalla propagazione del clima meteomarinario alla batimetrica - 10 m, in cui tutte le onde propagate con il modello SWAN non sono ancora frante per raggiunto limite di profondità.

L'onda di modellazione è caratterizzata da un'altezza d'onda,  $H_e$ , e da un periodo d'onda,  $T_e$ , rappresentative del contenuto energetico per il settore considerato. Tale onda è in grado di indurre effetti sul litorale equivalenti a quelli indotti da tutte le onde sulla base delle quali è stata calcolata. Inoltre, in dipendenza dagli eventi selezionati per il calcolo, è possibile determinare l'onda di modellazione dell'anno statistico medio, attraverso una risultante annuale.

Derivando dalle serie di misure al largo e sottocosta dei paraggi di studio le coppie dei valori  $H_{si}$  e  $T_{pi}$

relative all'*i*-esimo tra gli *N* eventi di moto ondoso compresi in un dato settore di provenienza, l'onda di modellazione può essere determinata risolvendo il seguente sistema di due equazioni (Noli e Franco, 1989; De Girolamo e Di Risio, 2002):

$$\vec{F} = \left( \overline{H_e^2 \cdot T_e} \right) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{H_{si}^2 \cdot T_{pi}}$$

$$R = \frac{H_e}{T_e^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{H_{si}}{T_{pi}^2}$$

dove  $\vec{F}$  è la risultante del vettore del flusso di energia e *R* è la ripidità media delle onde.

In particolare, sulla base delle due precedenti equazioni, l'onda di modellazione è definita da un'altezza e da un periodo forniti dalle seguenti espressioni:

$$H_e = \left( |F|^2 \cdot R \right)^{\frac{1}{5}} = \left[ \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{si}^2 \cdot T_{pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{H_{si}}{T_{pi}^2} \right]^{\frac{1}{5}}$$

$$T_e = \frac{|F|}{H_e^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{si}^2 \cdot T_{pi}}{\left[ \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{si}^2 \cdot T_{pi} \right)^2 \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{H_{si}}{T_{pi}^2} \right]^{\frac{2}{5}}}$$

dove il modulo del flusso energetico totale,  $|F| = \sqrt{F_E^2 + F_N^2}$ , essendo *F<sub>E</sub>* e *F<sub>N</sub>*, rispettivamente, le componenti del vettore del flusso energetico totale lungo la direzione O-E (Ovest-Est) e lungo la direzione S-N (Sud-Nord).

In particolare, i valori delle componenti *F<sub>E</sub>* e *F<sub>N</sub>* risultano:

$$F_E = F \sin(\alpha) \quad \text{e} \quad F_N = F \cos(\alpha)$$

essendo  $\alpha$  la direzione di propagazione del singolo stato di mare registrato.

Per ciò che riguarda la direzione di provenienza dell'onda di modellazione annuale e direzionale,  $\theta$ , pari a quella del vettore del flusso di energia, è stata applicata la seguente relazione, tenendo conto dei quadranti di esposizione del moto ondoso:

$$\theta = \arctan\left(\frac{F_E}{F_N}\right)$$

La durata delle onde di modellazione può essere calcolata facendo riferimento al numero di eventi  $N$  estratti dalla serie storica, tenendo conto che i dati di partenza ERA5 in esame sono a carattere orario. Si evidenzia inoltre che nei calcoli delle onde di modellazione è possibile escludere gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda significativa,  $H_s$ , inferiore a 0.5 m, in quanto dal punto di vista energetico, e quindi della capacità di "modellare" la spiaggia, si possono ritenere trascurabili.

In Tabella 5 sono mostrati i risultati relativi alle onde di modellazione annuali nel punto sottocosta in esame (-8.5 m).

Dall'analisi dei risultati ottenuti, l'onda di modellazione del paraggio in corrispondenza del punto sottocosta presenta:

	$H_e$ (m)	$T_e$ (s)	Dir ( $^{\circ}$ N)
Paraggio	0.73	6.22	257.60

**Tabella 5: Onda di modellazione**

#### 1.4 Flusso energetico del moto ondoso sottocosta

L'energia totale,  $E$ , posseduta da un sistema di onde progressive può essere suddivisa in una componente di energia potenziale,  $E_p$ , e in una componente di energia cinetica,  $E_c$ . L'energia è generalmente espressa come media temporale per unità di superficie valutata su un'intera lunghezza d'onda. In base alla teoria di Stokes al 1° ordine, si ottiene che la densità media dell'energia totale del moto ondoso, espressa in N/m, è pari a:

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{16} \rho g H^2 + \frac{1}{16} \rho g H^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

dove:

$\gamma$  (peso specifico dell'acqua salata)  $\approx 10104 \text{ N/m}^3$ ;

H è l'altezza d'onda.

Si definisce flusso di energia, P, espresso in W/m, di un'onda progressiva per unità di lunghezza di fronte d'onda, il prodotto dell'energia totale, E, per la celerità di gruppo dell'onda:

$$P = Ec_g = Enc$$

essendo:

$c_g$  la celerità di gruppo;

$$n \text{ (funzione di dispersione)} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right);$$

k (numero d'onda) =  $2\pi/L$ ;

d (profondità del fondale marino);

c (celerità di propagazione del moto ondoso) =  $L/T$ .

Spesso, nella caratterizzazione del clima meteomarinario di un paraggio, si ricorre al concetto di flusso di energia introdotto in precedenza. Pertanto, a partire dalla determinazione dei dati d'onda sottocosta del paraggio dell'Isola di Santo Stefano, è possibile calcolare il flusso energetico ondoso, P, per unità di lunghezza di fronte d'onda. Per ogni settore angolare di provenienza del moto ondoso, viene determinato il valore medio annuo del flusso d'energia ondosa,  $P_{mj}$ , degli stati di mare ricadenti nel settore di traversia del paraggio in esame, attraverso l'espressione:

$$P_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{N}$$

dove:

$P_i$  è il flusso di energia del singolo stato di mare ricostruito;

n è il numero di eventi totali ricostruiti per la singola classe di direzione e provenienza delle onde;

N (numero di anni di ricostruzione del moto ondoso) = 41 anni.

La direzione risultante del flusso energetico del moto ondoso sottocosta lungo un litorale è utile per le considerazioni sul regime della dinamica litoranea. Infatti, la componente longitudinale del trasporto solido può essere correlata alla componente longitudinale del flusso di energia del moto ondoso al frangimento. Poiché il coefficiente di correlazione tra le due quantità risulta essere funzione di alcuni parametri che possono essere individuati solo sulla base della conoscenza storica dell'evoluzione

planimetrica del litorale e delle caratteristiche dei sedimenti effettivamente presenti, quando ci si riferisce al solo flusso di energia del moto ondoso frangente, cioè in assenza degli elementi che consentono di calibrare la dipendenza funzionale tra le due quantità, si è soliti fare riferimento al trasporto solido potenziale.

In pratica, la conoscenza della componente longitudinale del flusso di energia del moto ondoso frangente implica la conoscenza del “motore” dei sedimenti (trasporto potenziale); l’effettivo trasporto solido ovviamente dipende sia dalla disponibilità dei sedimenti, sia dalle caratteristiche che ne determinano la mobilità. Pertanto, la conoscenza di una adeguata serie storica relativa alla componente longitudinale del flusso di energia delle onde al frangimento (trasporto potenziale) consente di determinare in modo accurato il verso del trasporto solido medio annuo, mentre fornisce solo una stima della sua effettiva quantità. Tuttavia, tale stima risulta di fondamentale importanza in quanto consente di eseguire numerose considerazioni di interesse applicativo e gestionale.

A tal fine risulta preliminarmente necessario ricostruire il clima ondoso poco oltre la linea di frangenti lungo una serie di punti considerati rappresentativi del litorale in esame.

Per ciascun punto è così possibile determinare, per ogni stato di mare ricostruito, il flusso di energia  $P$  del moto ondoso per unità di fronte d’onda. Successivamente, per ogni direzione di provenienza, è possibile determinare il valore medio del flusso energetico del moto ondoso,  $P_{mj}$ , degli stati di mare ricadenti nel settore di traversia.

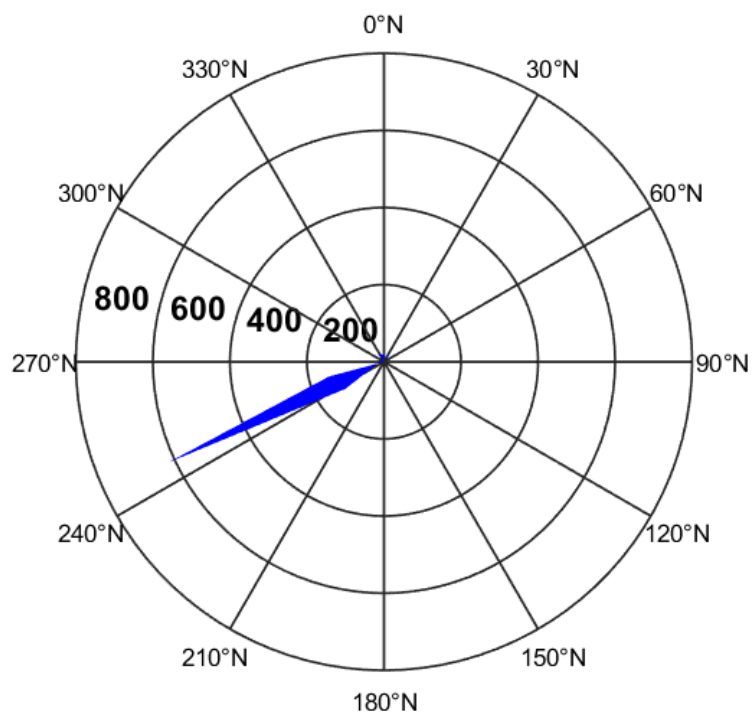
Nel calcolo, in genere, si escludono gli eventi caratterizzati da un’altezza significativa inferiore a 0.5 m, in quanto dal punto di vista energetico e quindi della capacità di modellazione della spiaggia si possono ritenere trascurabili. In Tabella 6 sono mostrati i valori del flusso energetico totale,  $P$ , e medio annuo,  $P_m$ , per il punto di riferimento sottocosta per il tratto litoraneo. Nella Figura 24 e Figura 25 sono mostrati i diagrammi polari del flusso energetico totale e medio annuo sottocosta.

DIR (°N)	H <sub>s</sub> (m)	P (W/m)	P <sub>m</sub> (W/m)
5	0.5	7.22	0.18
5	1	19.85	0.48
5	1.5	5.54	0.14
5	2	3.12	0.08
15	0.5	6.73	0.16
15	1	11.91	0.29
15	1.5	8.16	0.20
15	2	6.23	0.15

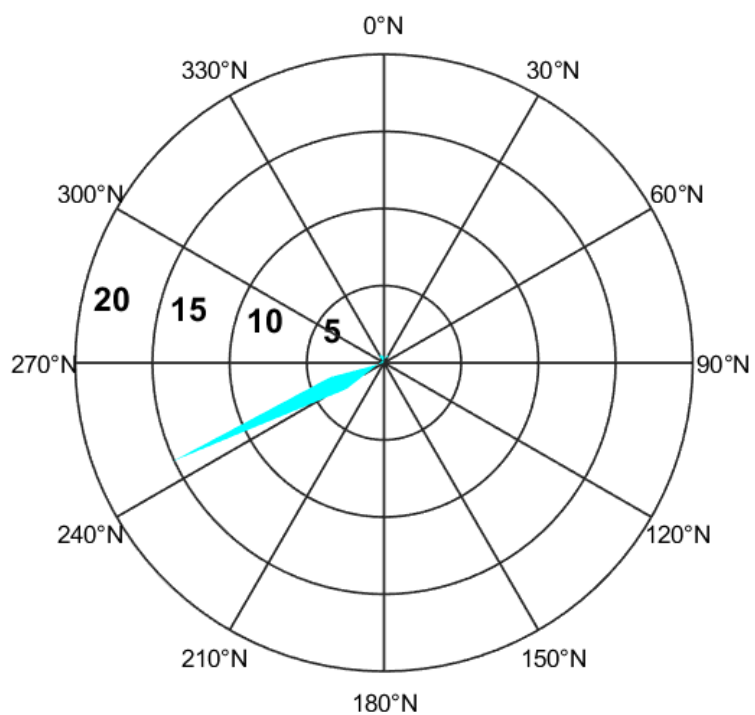



15	2.5	2.73	0.07
25	0.5	17.90	0.44
25	1	22.25	0.54
25	1.5	11.75	0.29
35	0.5	22.84	0.56
35	1	22.76	0.56
235	0.5	122.21	2.98
245	1	619.82	15.12
245	1.5	400.97	9.78
245	2	146.54	3.57
245	2.5	4.90	0.12
255	0.5	89.30	2.18
255	1	148.24	3.62
255	1.5	124.15	3.03
255	2	10.24	0.25
265	2	0.42	0.01
325	0.5	21.65	0.53
325	1	7.62	0.19
335	0.5	23.58	0.58
335	1	17.12	0.42
335	1.5	5.32	0.13
335	2	1.34	0.03
345	0.5	10.08	0.25
345	1	16.46	0.40
345	1.5	18.84	0.46
345	2	0.89	0.02
355	0.5	8.31	0.20
355	1	10.92	0.27
355.00	1.50	18.90	0.46
355.00	2.00	7.47	0.18
355.00	2.50	0.68	0.02

**Tabella 6: Flusso d'energia ondosa totale e medio annuo sottocosta**



**Figura 24: Flusso d'energia ondosa totale sottocosta**



 Agenzia nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA	2017E037INV-02-D-OM-RT0002
	Rev. 0
	Pag. 34 di 38

### Figura 25: Flusso d'energia medio annuale sottocosta

Il flusso di energia per unità di lunghezza di spiaggia,  $P_s$ , espresso in W/m, è esprimibile mediante la seguente espressione:

$$P_s = Enc \cos \alpha$$

dove:

$\alpha$  è l'angolo di inclinazione delle onde rispetto alla normale alla linea di costa.

$c_g$  la celerità di gruppo;

$$n \text{ (funzione di dispersione)} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right);$$

$k$  (numero d'onda) =  $2\pi/L$ ;

$d$  (profondità del fondale marino);

$c$  (celerità di propagazione del moto ondoso) =  $L/T$ .

La componente longitudinale del vettore del flusso di energia per unità di larghezza di spiaggia,  $Pls$ , espressa in W/m, viene espressa attraverso l'equazione:

$$Pls = \frac{1}{2} Enc \sin(2\alpha) = \frac{1}{2} P \sin(2\alpha)$$

L'angolo medio della normale,  $\alpha_{norm}$  (°), al litorale rispetto al Nord Cartografico, risulta pari a 325°N.

Si considera, per convenzione, positivo il valore del flusso longshore diretto da Sud a Nord. La direzione,  $\alpha_{energia} = 257.60^\circ N$  è coincidente con la risultante dei flussi energetici sottocosta caratterizzata dalla direzione dall'onda di modellazione annuale. Pertanto, ne conseguono dei valori di  $\alpha$  (angolo di inclinazione delle onde rispetto alla normale alla linea di costa), molto simili fra loro, pari a:

$$\alpha = \alpha_{norm} - \alpha_{energia} = 67.40^\circ N$$

I risultati mostrano un valore del flusso longshore netto medio annuo diretto da Ovest a Est per il punto sottocosta, negativo per convenzione e pari a:

$$Pls = 17.35 \text{ W/m}$$

### 1.5 Profondità di chiusura di spiaggia

La profondità di chiusura di una spiaggia risulta la massima profondità del fondale in cui un'onda fa sentire i suoi effetti ai fini del trasporto solido litoraneo.

Il calcolo del suo valore può avvenire tramite la comparazione dei rilievi batimetrici delle medesime sezioni effettuate in anni diversi. In mancanza di queste informazioni, come nel caso del paraggio in esame, si può usare una delle relazioni semi-empiriche riconosciute in letteratura.

In particolare, per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano si è fatto riferimento alla relazione di Hellermeier, secondo cui:

$$h_c = 1.6H_{0,12}$$

dove:

$h_c$  è la profondità di chiusura;

$H_{0,12}$  è l'altezza d'onda a largo che compare per 12 ore l'anno, nel settore di traversia considerato per il paraggio oggetto di studio.

Il valore di  $H_{0,12}$  si ricava dall'analisi statistica effettuata sui dati d'onda disponibili al largo dell'Isola di Santo Stefano (dedotti dal nodo ERA5), calcolando preliminarmente la percentuale di apparizione delle onde relative a tutti gli eventi registrati,  $n$ :

$$n = \frac{NT}{n_{H\alpha}} = 0.202$$

dove NT (numero totale di stati di mare individuati al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano, esclusi gli eventi di calma) = 72438, ed  $n_{H\alpha}$  rappresenta il numero di apparizioni che compete all'onda di altezza  $H_s$  e direzione  $\alpha$  nei 41 anni di osservazione derivanti dalle registrazioni del nodo ERA5, pari a 359160, dato da  $41 \cdot 24 \cdot 365$ .

Noto il valore di  $n$ , si ricava il tempo  $t_{H\alpha}$ :

$$t_{H\alpha} = n_{oreanno} \cdot n = 1766.8 \text{ ore}$$

essendo  $n_{oreanno}$  (numero di ore in un anno) = 8760 ore.

Quindi, si contano tutte le classi d'altezza d'onda significativa determinate al largo dell'Isola di Santo Stefano, prescindendo dalla direzione e si sommano per tutte le direzioni considerate, determinando il

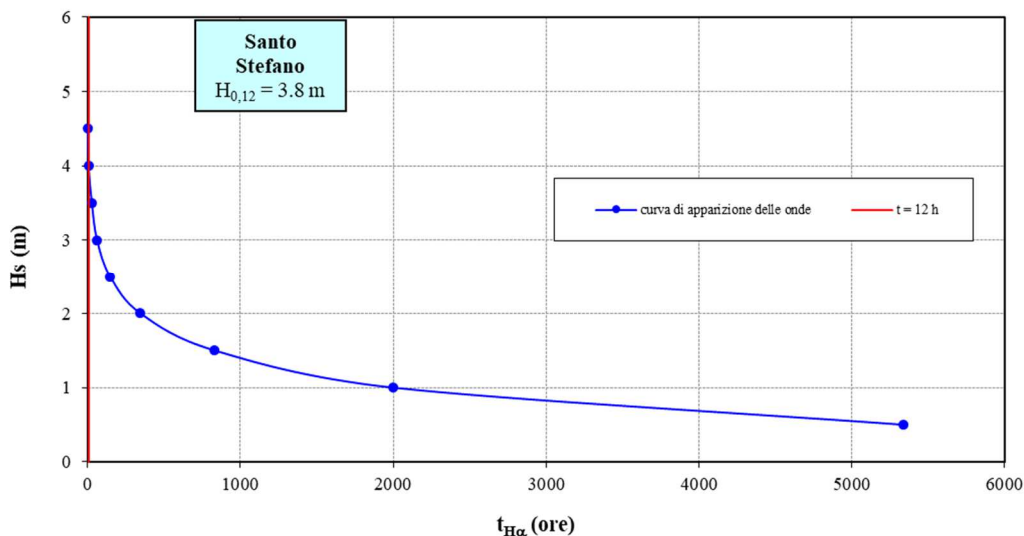
tempo di apparizione totale della singola onda per tutto il settore di traversia,  $t_H$ :

$$t_H = \sum_{\alpha=\alpha_1}^{\alpha_2} t_{H\alpha}$$

dove  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  sono le direzioni estreme del settore di traversia.

Noto il valore di  $t_H$  è possibile ricavare una relazione fra  $H_s$  e  $t_H$  costruendo una curva che restituisce i tempi di apparizione di ogni singola onda.

Il valore di  $H_{0,12}$  è immediatamente determinato intersecando la curva di apparizione con la retta parallela all'asse delle ascisse e passante per il punto di ordinata  $t = 12$  h. In Figura 26 è mostrata la curva di apparizione delle onde per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano. Dall'intersezione fra la curva di apparizione e la retta, si ricava  $H_{0,12} = 3.80$  m (vedi Figura 27) e si determina, attraverso la succitata relazione di Hallermeier, il corrispondente valore della profondità di chiusura,  $h_c = 6.10$  m.



**Figura 26: Curva di apparizione delle onde (paraggio dell'Isola di Santo Stefano)**

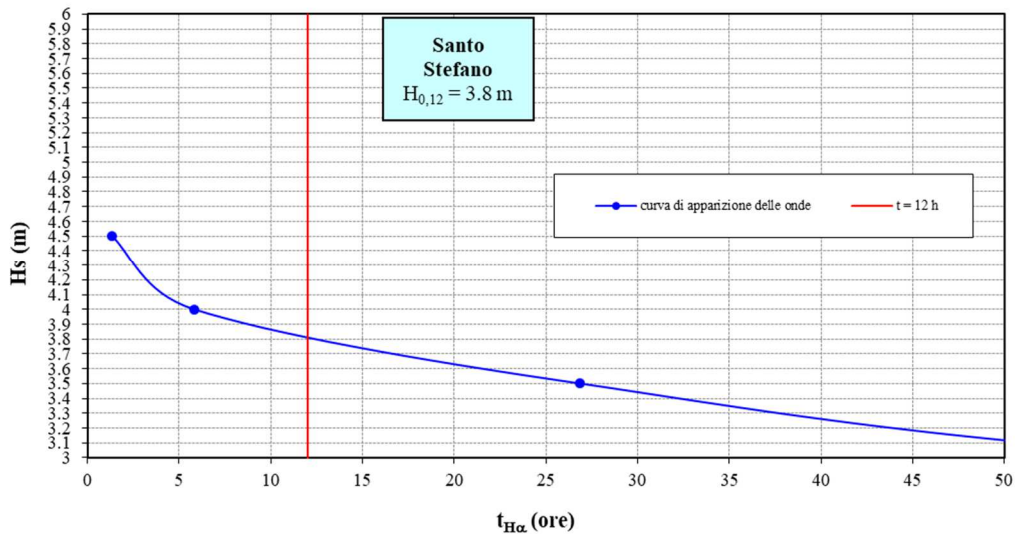


Figura 27: Particolare della curva di apparizione delle onde (paraggio dell'Isola di Santo Stefano)

### 1.6 Capacità teorica giornaliera

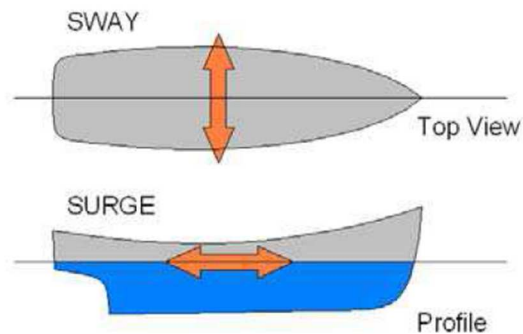
Per la stima del numero dei giorni in un anno che si potrà utilizzare il molo basterà confrontare il clima medio propagato sottocosta, in prossimità del molo, con il limite di altezza d'onda ammissibile.

I limiti da considerare per l'approdo al molo sono di due tipi e vengono riportati nella seguente tabella.

Tipologia di operazione	Altezza d'onda significativa (m)	
	Dir. Trasversale (Sway)	Dir. Longitudinale (Surge)
Ormeggio	0.3	0.5

Tabella 7: Limiti di altezza d'onda

Come mostra la Tabella 7 i due limiti da rispettare dipendono dal tipo di ormeggio, ovvero se viene effettuato in direzione trasversale o in direzione longitudinale.



**Figura 28: Tipologia di ormeggio**

Pertanto, considerando il clima meteomarinico medio sottocosta (v. Tabella 3 e Tabella 4) si può effettuare un confronto e verificare il numero di giorni disponibili in un anno per l'ormeggio.

Pertanto, si può notare che, per il caso  $H_{s\_limite} = 0.3$  m si avrà circa il 33% di giorni disponibili per l'approdo (somma delle percentuali di accadimento degli eventi aventi  $H_s \leq 0.3$  m), mentre per  $H_{s\_limite} = 0.5$  m, si avrà circa il 71%.

Classe di altezza d'onda $H_s$ per ormeggio in sicurezza	$m$	0 - 0.5	0 - 0.3
Percentuale di apparizione	%	70.7	~33
Giorni disponibili	gg/anno	258	~120