



Autorità di Sistema Portuale  
del Mar Tirreno Centro Settentrionale

PORTI DI ROMA E DEL LAZIO - CIVITAVECCHIA - FIUMICINO - GAETA

# Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centro Settentrionale



## NUOVO PORTO COMMERCIALE DI FIUMICINO

### PROGETTO ESECUTIVO I LOTTO FUNZIONALE I STRALCIO "Darsena Pescherecci e viabilità di accesso al cantiere"

Committente:

Il presidente  
AVV. Francesco Maria Di Majo

Il responsabile del procedimento  
Dott. Ing. Maurizio Marini

Il coordinatore generale  
Dott. Ing. Giuseppe Solinas

Progettazione:

ACQUA  
TECNO

Ing. Renato Marconi  
Ing. Paolo Turbolente  
Ing. Barbara Doronzo



Titolo elaborato

Elaborato

A.2202.12 | PE | R

# SPO

Scala

## STUDIO DI PROPAGAZIONE ONDOSA

Data	Preparato	Controllato	Approvato
Novembre 2020	Ing. Daniele Belotti	Ing. Paolo Turbolente	Ing. Renato Marconi
Revisione	Data		
01	Giugno 2021		
02	Febbraio 2022		

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>1</b>
<b>2. STUDIO DEL TRASFERIMENTO DELL'ONDA DA LARGO A RIVA.....</b>	<b>1</b>
2.1.    Modello di calcolo utilizzato: MIKE 21 SW (Spectral Wave).....	1
2.2.    Variazione del livello marino (maree e sovralti) .....	2
2.3.    Condizioni ondose simulate .....	4
2.4.    Griglia di calcolo .....	4
2.5.    Risultati .....	6
<b>3. CONCLUSIONI .....</b>	<b>11</b>
<b>4. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>13</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE .....</b>	<b>14</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE .....</b>	<b>14</b>

## 1. PREMESSA

Il presente elaborato costituisce lo studio di propagazione a riva, ovvero in corrispondenza delle opere di progetto, del clima ondoso individuato a largo di Fiumicino (si rimanda all'elaborato *SM – Studio Meteomarino*); lo studio è finalizzato alla determinazione delle caratteristiche dell'onda di progetto incidente sulla diga di sopraflutto e di sottoflutto della futura Darsena Pescherecci per poter dimensionare correttamente le opere in progetto e stimare i parametri ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta_m$ ) delle onde da utilizzare per lo studio specialistico idraulico-marittimo relativo alla penetrazione ondosa. Tale documento costituisce la relazione illustrativa della metodologia seguita, dei codici di calcolo utilizzati e dei risultati ottenuti.

## 2. STUDIO DEL TRASFERIMENTO DELL'ONDA DA LARGO A RIVA

A valle dei risultati ottenuti dallo studio meteomarino, è stato effettuato uno studio sul trasferimento dell'onda dal largo alla riva, al fine di valutare l'onda di progetto per il corretto dimensionamento dell'opera.

Per la simulazione numerica bidimensionale è stato utilizzato il modello matematico MIKE 21, sviluppato dal DHI (Danish Hydraulic Institute). Esso è basato sulla risoluzione alle differenze finite su griglia strutturata o flessibile, ed è costituito da differenti moduli che implementano le numerose equazioni che governano gran parte dei fenomeni idraulici riscontrabili in un determinato sistema marino.

Nel caso in esame è stato utilizzato il modello SW (Spectral Wave), che consente di simulare la propagazione ondosa dal punto di estrazione dei dati ondosi fino a sotto costa tenendo conto di vari fenomeni quali shoaling, diffrazione e rifrazione.

### 2.1. Modello di calcolo utilizzato: MIKE 21 SW (Spectral Wave)

Il modello Spectral Wave (SW) del codice MIKE 21 viene utilizzato per valutare le trasformazioni del moto ondoso in aree costiere ed off-shore sia per hindcast che per forecast. Il modello è in grado di simulare:

- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra le onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;

- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alla morfologia batimetrica;
- diffrazione;
- riflessione semplice.

Il modello MIKE 21 SW è basato sulla risoluzione numerica nel dominio e nel tempo dell'equazione di bilancio dell'azione delle onde:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla_x \cdot (c_g A) + \nabla_\theta \cdot (c_\theta A) + \nabla_\sigma \cdot (c_g A) = S$$

Il modello utilizza una formulazione parametrica direzionalmente disaccoppiata ed una formulazione completamente spettrale. La prima si basa su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'azione ondosa. La parametrizzazione viene effettuata nel dominio delle frequenze introducendo lo zero, ed il primo momento dello spettro delle onde come variabili dipendenti. La formulazione completamente spettrale invece si basa sull'equazione di conservazione dell'onda come descritto da Komen et al. (1994) e Young (1999), in cui lo spettro di frequenza direzionale dell'azione dell'onda è la variabile dipendente. Il modulo SW comprende anche due formulazioni per il tempo. Una formulazione quasi stazionaria ed una non stazionaria, in quella quasi stazionaria la variabile tempo viene rimossa come variabile indipendente e viene associata una soluzione stazionaria ad ogni passo temporale. Quando viene utilizzata la soluzione stazionaria non è possibile inserire il vento come forzante. L'immissione delle onde all'interno del dominio di calcolo può essere effettuata utilizzando dei contorni aperti dove poter inserire il moto ondoso di interesse, oppure inserendo dei contorni chiusi ed immettendo la forzante del vento. L'output principale di MIKE 21 SW è il campo d'onda residua all'interno della zona di studio.

## 2.2. Variazione del livello marino (maree e sovralti)

Il presente paragrafo riprende quanto già espressamente trattato nell'elaborato del Progetto Definitivo *SPM 03 – Studio della penetrazione del moto ondoso all'interno del Porto e meteomarina del PRP* (Ottobre 2014) e di cui, per completezza, si riporta il contenuto.

La conoscenza delle massime variazioni quasi-statiche del livello marino, dovute a cause diverse (principalmente marea astronomica e "meteorologica"), è necessaria per molteplici scopi quali: la corretta progettazione delle quote da assegnare alle opere di progetto; l'analisi del grado di ricircolo naturale dello specchio liquido portuale. In generale per quanto riguarda le variazioni a breve termine,

periodiche e non, occorre distinguere gli effetti della marea astronomica da quelli della marea "meteorologica" (indotta essenzialmente dall'azione del vento e dalle variazioni di pressione atmosferica). Nella zona del Mar Tirreno ove ricade il paraggio costiero di Fiumicino le escursioni del livello del mare sono di fatto modeste; per la stima della componente oscillatoria della marea astronomica le ampiezze ed i tempi di marea sono prevedibili per alcuni porti principali italiani in funzione delle "Tavole di Marea" pubblicate annualmente dall'Ufficio Idrografico della Marina Militare; per il caso in esame si possono utilizzare i dati forniti per il porto di Civitavecchia.

L'andamento temporale risultante è di tipo semidiurno (periodo 12 ore e 30 minuti) con due alte maree e due basse maree al giorno di ampiezza diversa (marea di tipo sinodico-declinazionale). Le escursioni di marea astronomica sono contraddistinte da una periodicità bisettimanale distinta nelle fasi di sizigie (luna piena e nuova) e di quadratura. Nei periodi sizigiali si verificano i massimi dislivelli positivi e negativi che raggiungono valori di circa  $\pm 0.25$  m rispetto al livello medio marino (massimo dislivello pari a circa 0,40 m).

Per la definizione della marea meteorologica si distinguono:

- sovrалzo ed abbassamento barico (legati al passaggio dei cicloni ed anticicloni): considerata una condizione di minimo barico pari a 978 mb rispetto ad una condizione media di 1013 mb ne consegue un effetto di sovrалzo marino massimo pari a 0.35 m; considerando che il massimo barico pluriennale osservato è di 1040 mb, si ha un abbassamento locale del livello marino di circa 27 cm.
- sovrалzo di vento: l'effetto di innalzamento dei livelli sottocosta indotto dall'azione di venti foranei spiranti verso la costa laziale è definito in funzione dell'estensione della piattaforma continentale (l'isobata -100 si trova al massimo a 9.5 km dalla linea di riva). Il calcolo del sovrалzo di vento può essere effettuato con la nota relazione implicita:

$$S = \frac{K_p L_p U^2}{g(D - d - S)} \ln\left(\frac{D}{d + S}\right)$$

Questa fornisce un valore di 0.030 m alla profondità di 10 m (d), essendo D=100 m profondità limite assunta per la piattaforma continentale; Lp=9500 m estensione della piattaforma continentale; g=9.81 m/s<sup>2</sup>; kp=3x10<sup>-6</sup>; U=20 m/s velocità del vento. Eseguendo il calcolo anche per profondità inferiori si osserva che il sovrалzo segue una legge esponenziale con un massimo lungo la linea di riva (d=0) pari a S=0.08 m. Infine, si devono considerare le variazioni a lungo termine dovute a fenomeni di

eustatismo: le attuali proiezioni prevedono un progressivo innalzamento del livello marino dovuto all'incremento della temperatura terrestre (effetto serra) stimabile in circa 30 cm nei prossimi 50 anni. Valutazioni meno pessimistiche considerano possibili incrementi di livello di poco superiori a quelli registrati nell'ultimo millennio (dell'ordine di 10 cm al secolo). In definitiva è possibile calcolare il massimo sovrizzo lungo riva sommando tutti i diversi contributi di oscillazione del livello marino ma considerando che in generale non si verifica la piena concomitanza per i sovrizzi di carattere meteorologico ed astronomico. Si può cautelativamente assumere una riduzione del 75% per il sovrizzo massimo di carattere meteorologico ed astronomico; in definitiva, a fronte di un sovrizzo massimo assoluto pari a circa 0.65 m (0.25 + 0.35 + 0.10); **il massimo livello marino da assumere per la progettazione delle opere può essere posto pari a + 0.50 m sopra il medio mare.** Il minimo abbassamento del livello marino è pari alla somma dell'oscillazione di marea (20 cm) e dell'abbassamento barico (27 cm), ed è uguale a circa 47 cm; anche in questo caso si può ammettere un abbattimento del 25% dell'oscillazione massima, pertanto **il minimo livello da assumere per la progettazione delle opere è pari a 0.36 m sotto il medio mare** ( $0.47 \times 0.75 = 0.36$  m).

### 2.3. Condizioni ondose simulate

Al fine di valutare l'altezza d'onda di progetto al piede della struttura, sono state propagate, da largo verso riva, quattro tipi d'onda con differenti altezze e periodi. Quest'ultime ricavate dall'analisi statistica effettuata sui dati meteomarini acquisiti, di cui all'elaborato *SM – Studio Meteomarina*.

Onde	Tr (anni)	Hs di largo (m)	Tp di largo (s)	Direzione (°N)
<b>Onda 1</b>	5	5,90	11,95	250
<b>Onda 2</b>	50	7,06	12,45	250
<b>Onda 3</b>	70	7,23	12,50	250
<b>Onda 4</b>	140	7,57	12,70	250

Tabella 1 - Onde propagate per la scelta dei parametri di progetto.

### 2.4. Griglia di calcolo

Al fine di simulare correttamente la propagazione dell'onda di progetto e allo stesso tempo ottimizzare i tempi di calcolo il dominio di calcolo è stato suddiviso in due aree aventi diverse risoluzioni spaziali.

L'area più esterna è infatti caratterizzata da un passo di integrazione spaziale pari a 300 m, quella rappresentante l'area in prossimità della costa ha una risoluzione spaziale pari a 100 m. Il bordo esterno della griglia di calcolo è posto ad una profondità di circa 30 m, in corrispondenza dell'ubicazione del punto da cui sono stati estratti i dati ondosi (Figura 1, Figura 2).

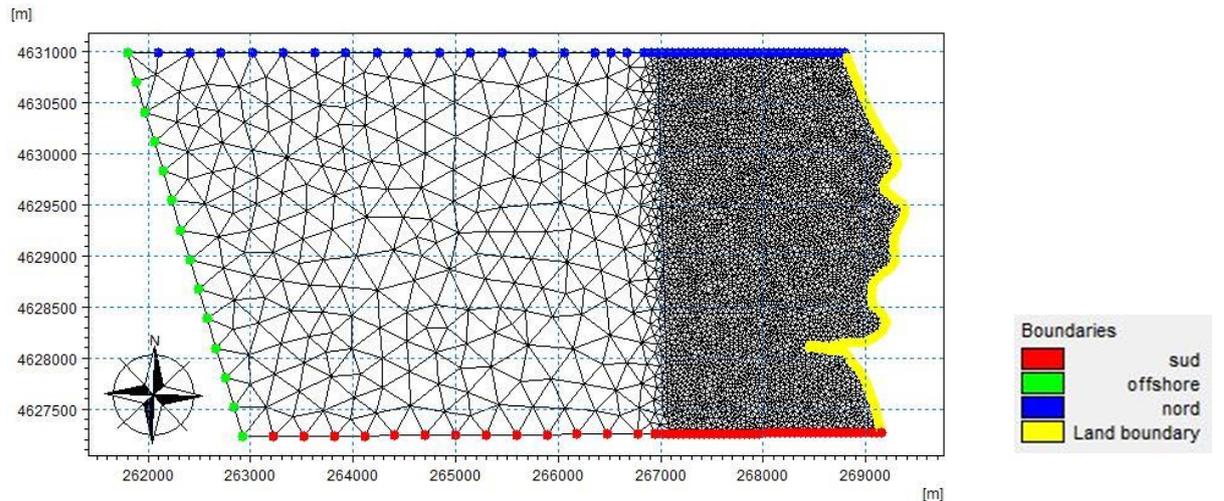


Figura 1 - Griglia di calcolo

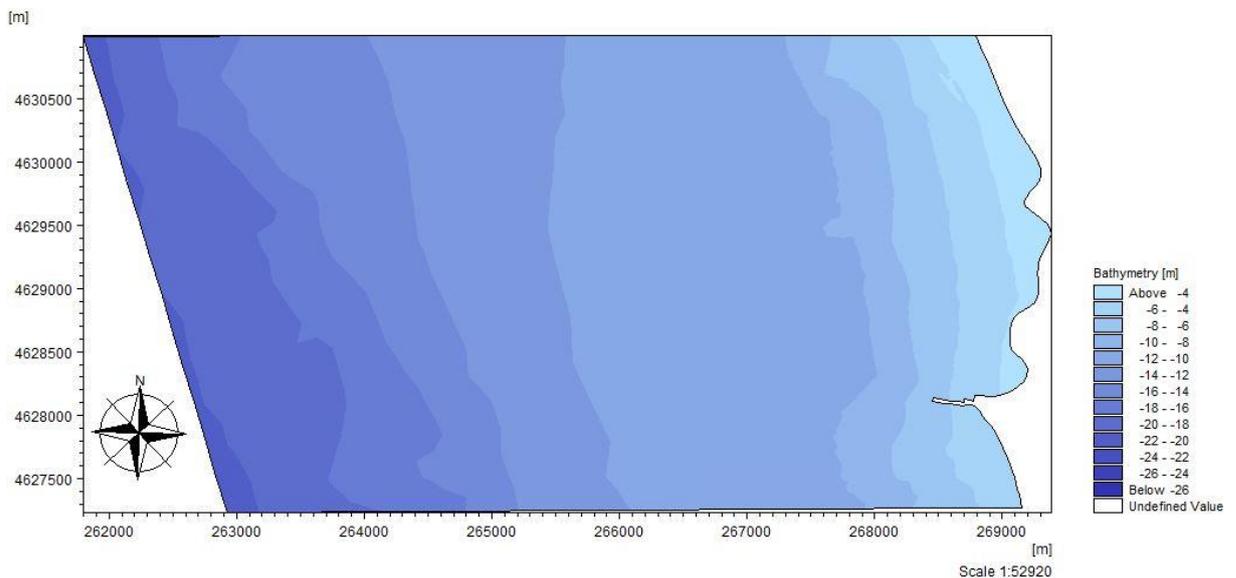


Figura 2 - Batimetria del paraggio

## 2.5. Risultati

Nelle figure che seguono sono rappresentati i risultati in termini di altezza d'onda significativa e periodo di picco relativi al trasferimento largo-riva delle Onde 1, 2, 3 e 4. **I risultati ottenuti sono stati propagati tenendo conto della condizione estrema di alta marea a favore di sicurezza, con un sovranzo di +0.50 m sopra il medio mare.**

### Onda 1

In Figura 4 è rappresentato il campo di altezza d'onda significativa su tutto il dominio di calcolo, in cui è chiaramente visibile la direzione di propagazione di input pari a 250°N.  $H_s$  ricade nell'intervallo 3.6 – 4.0 m, sul tronco diga. La zona dove verrà realizzata l'opera di difesa è evidenziata in rosso.

La Figura 5 rappresenta i valori di periodo di picco, che rispetto al  $T_p = 11.95$  s di input, si riduce fino a un valore di  $T_p = 8.6$  s in prossimità della diga.

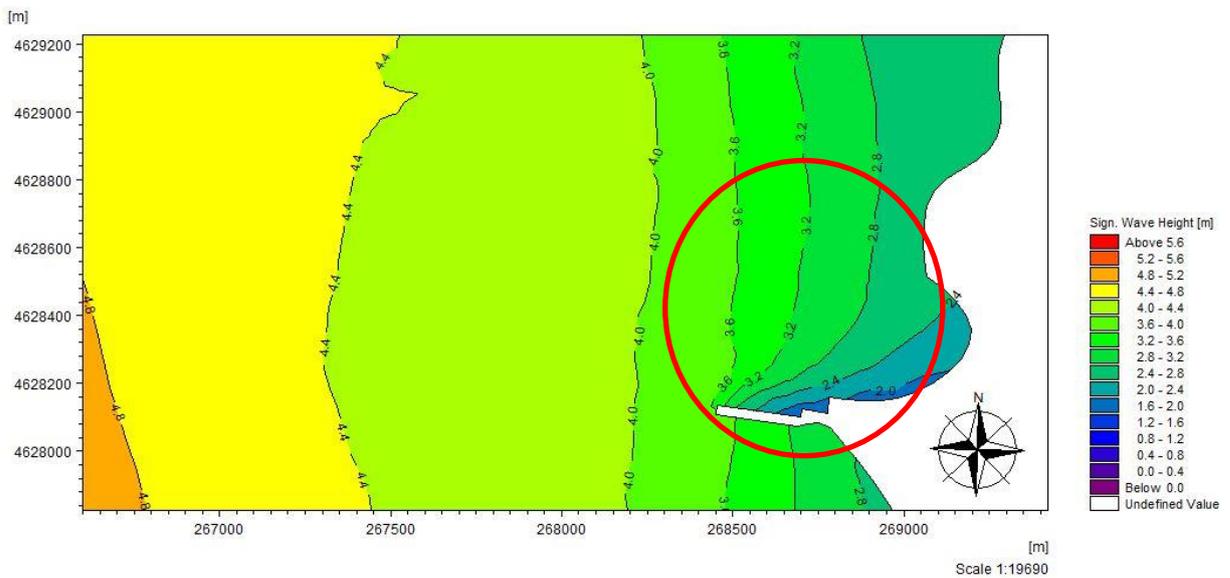


Figura 3 – Onda simulata:  $T_r = 5$  anni;  $H_s = 5,9$  m;  $T_p = 11,95$  s;  $Dir = 250$  °N – Altezze d'onda significative.

Studio di propagazione ondosa

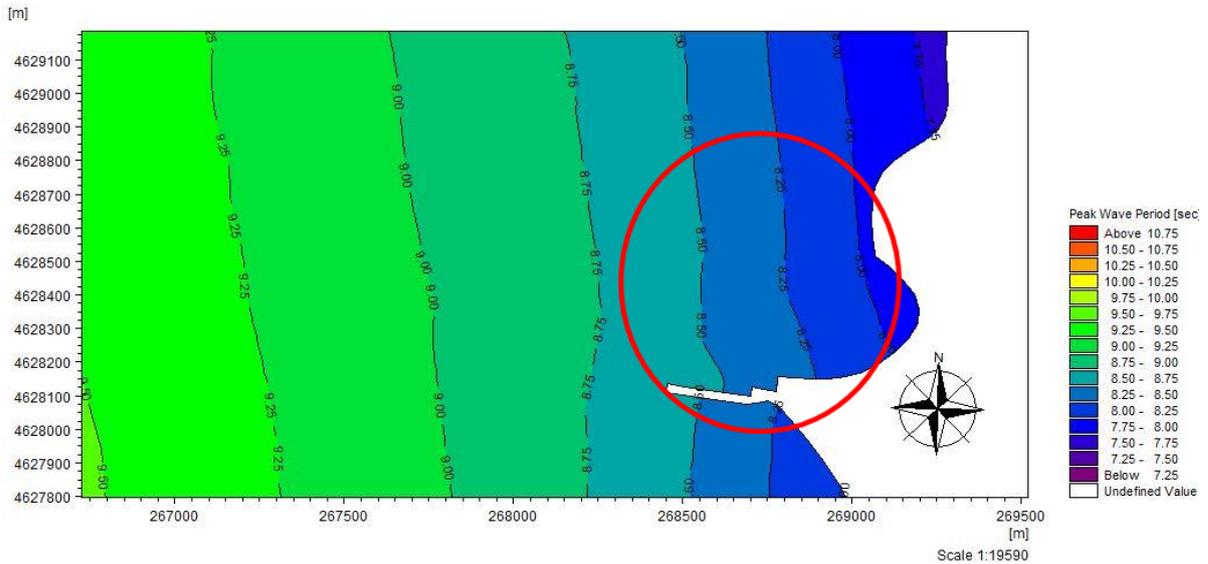


Figura 4 - Onda simulata:  $T_r = 5$  anni;  $H_s = 5,9$  m;  $T_p = 11,95$  s;  $Dir = 250^\circ N$  – Periodi di picco.

Onda 2

In Figura 6 è rappresentato il campo di altezza d'onda significativa su tutto il dominio di calcolo, in cui è chiaramente visibile la direzione di propagazione di input pari a  $250^\circ N$ .  $H_s$  ricade nell'intervallo 3.6 – 4.0 m, sul tronco diga. La zona dove verrà realizzata l'opera di difesa è evidenziata in rosso.

La Figura 7 infine rappresenta i valori di periodo di picco, che rispetto al  $T_p = 11.95$  s di input, si riduce fino a un valore di  $T_p = 9.1$  s in prossimità della diga.

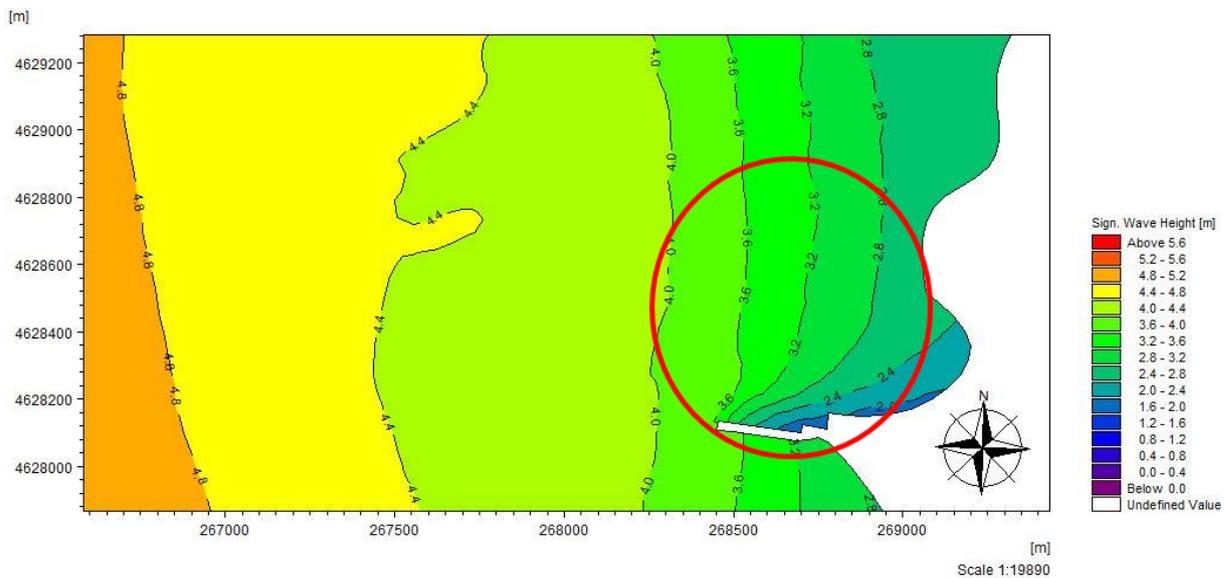


Figura 5 - Onda simulata:  $T_r = 50$  anni;  $H_s = 7,06$  m;  $T_p = 12,45$  s;  $Dir = 250^\circ N$  – Altezze d'onda significative.

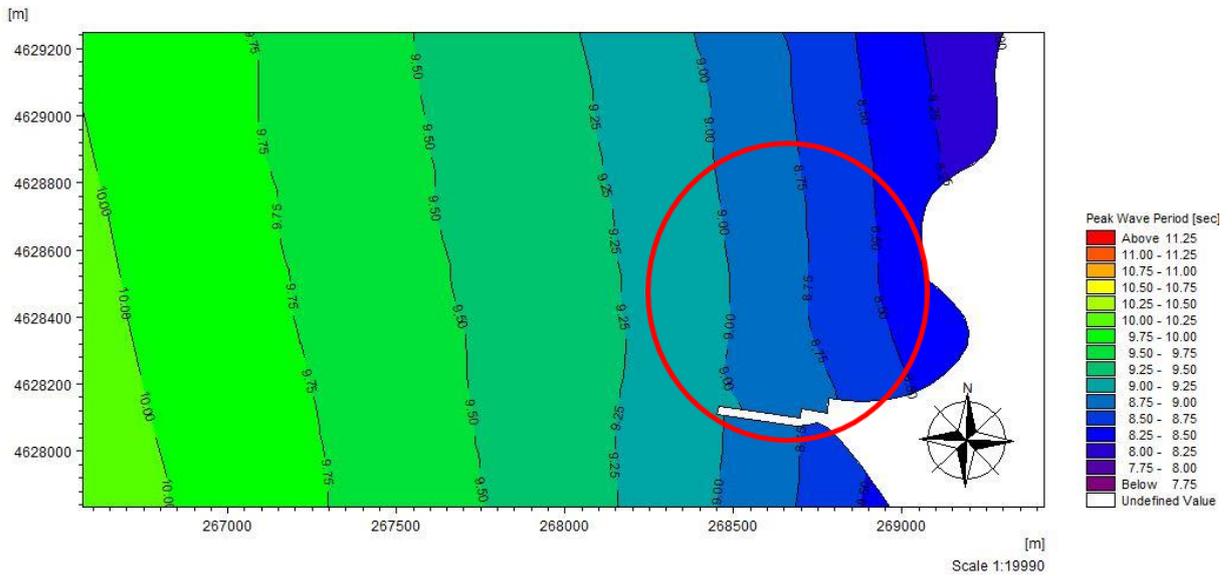


Figura 6 - Onda simulata:  $T_r = 50$  anni;  $H_s = 7,06$  m;  $T_p = 12,45$  s;  $Dir = 250^\circ N$  – Periodi di picco.

### Onda 3

In Figura 8 è rappresentato il campo di altezza d'onda significativa su tutto il dominio di calcolo, in cui è chiaramente visibile la direzione di propagazione di input pari a  $250^\circ N$ .  $H_s$  ricade nell'intervallo 3.6 – 4.0 m, sul tronco diga. La zona dove verrà realizzata l'opera di difesa è evidenziata in rosso.

La Figura 9 infine rappresenta i valori di periodo di picco, che rispetto al  $T_p = 12.50$  s di input, si riduce fino a un valore di  $T_p = 9.1$  s in prossimità della diga.

Studio di propagazione ondosa

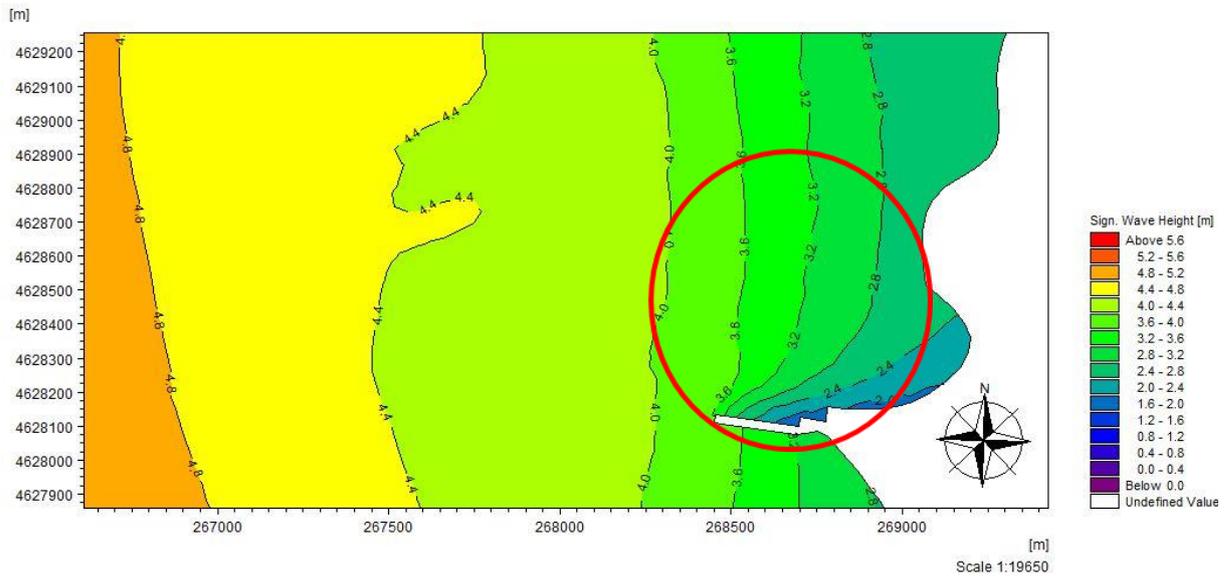


Figura 7 - Onda simulata:  $T_r = 70$  anni;  $H_s = 7,23$  m;  $T_p = 12,50$  s;  $Dir = 250^\circ N$  – Altezze d'onda significative.

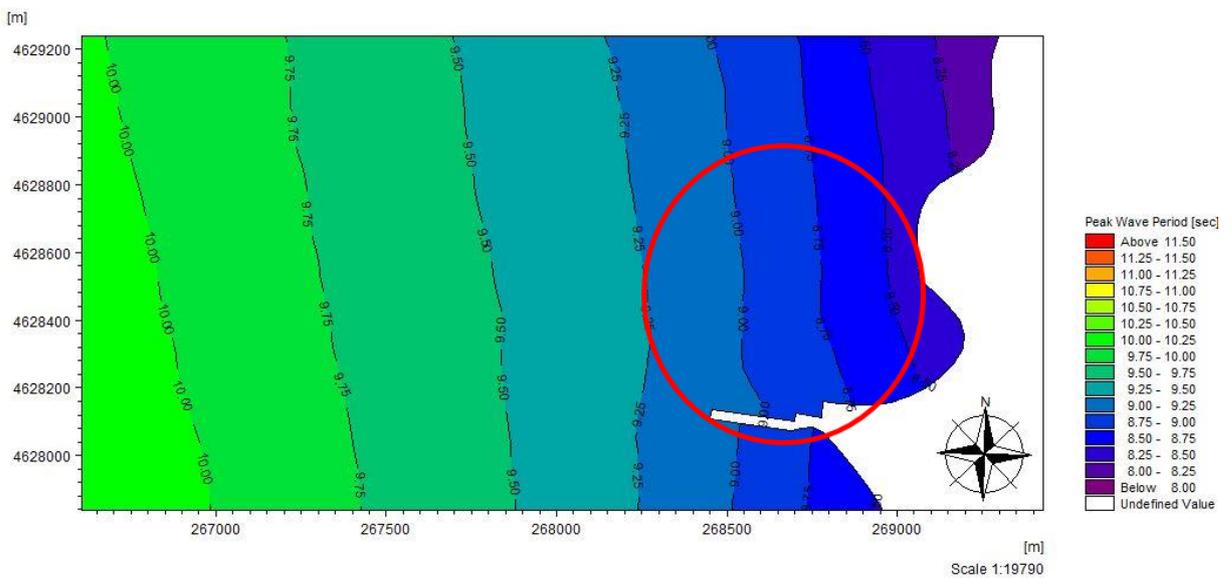


Figura 8 - Onda simulata:  $T_r = 70$  anni;  $H_s = 7,23$  m;  $T_p = 12,50$  s;  $Dir = 250^\circ N$  – Periodi di picco.

#### Onda 4

In Figura 10 è rappresentato il campo di altezza d'onda significativa su tutto il dominio di calcolo, in cui è chiaramente visibile la direzione di propagazione di input pari a  $250^\circ N$ .  $H_s$  ricade nell'intervallo 3.6 – 4.0 m, sul tronco diga. La zona dove verrà realizzata l'opera di difesa è evidenziata in rosso.

La Figura 11 infine rappresenta i valori di periodo di picco, che rispetto al  $T_p = 12.70$  s di input, si riduce fino a un valore di  $T_p = 9.8$  s in prossimità della diga.

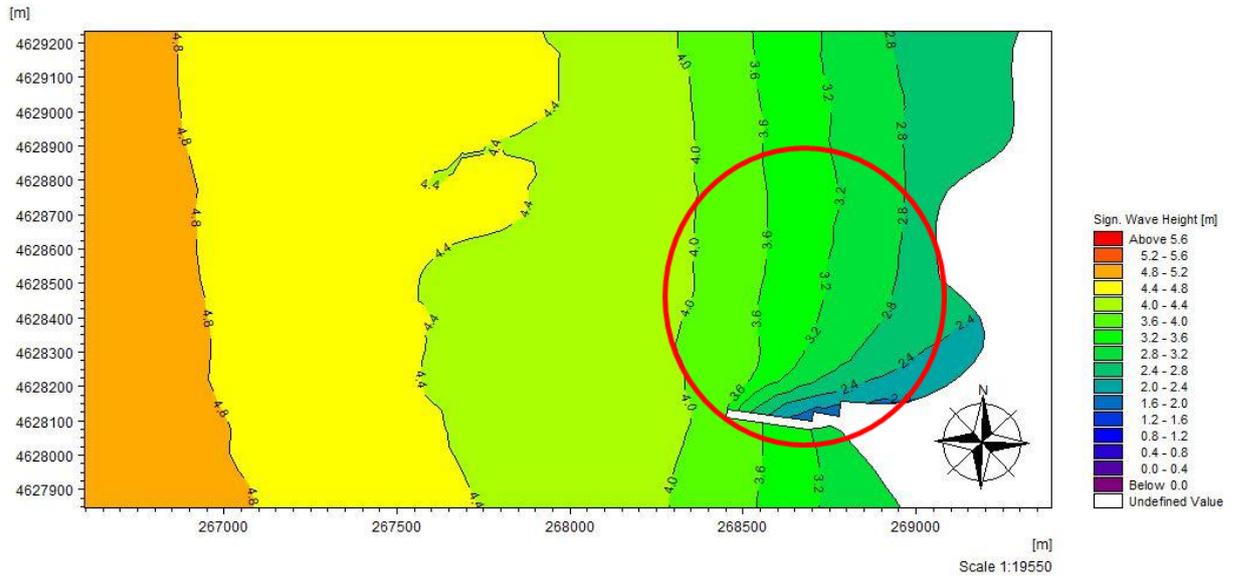


Figura 9 - Onda simulata:  $T_r = 140$  anni;  $H_s = 7,57$  m;  $T_p = 12,70$  s;  $Dir = 250^\circ N$  – Altezze d'onda significative.

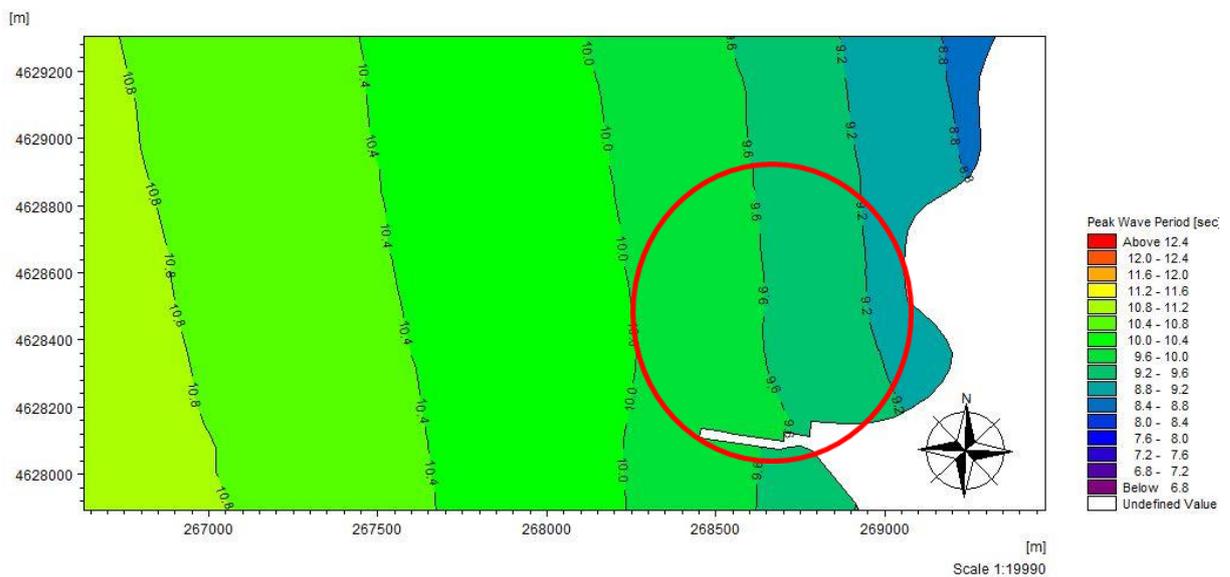


Figura 10 - Onda simulata:  $T_r = 140$  anni;  $H_s = 7,57$  m;  $T_p = 12,70$  s;  $Dir = 250^\circ N$  – Periodi di picco.

### 3. CONCLUSIONI

Il presente studio di propagazione ondosa da largo verso riva è stato sviluppato per determinare le caratteristiche dell'onda di progetto incidente sulla diga di sopraflutto e di sottoflutto e poter così dimensionare correttamente le opere in progetto.

Le onde propagate, ottenute mediante un'analisi statistica di una serie tronca di dati registrati negli ultimi 20 anni, sono riassunte nella tabella che segue (Tabella 2):

Onde	Tr (anni)	Hs di largo (m)	Tp di largo (s)	Direzione (°N)
Onda 1	5	5,90	11,95	250
Onda 2	50	7,06	12,45	250
Onda 3	70	7,23	12,50	250
Onda 4	140	7,57	12,70	250

Tabella 2 - Onde di largo propagate.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per le onde propagate da largo verso riva fino a:

- l'imboccatura del porto in corrispondenza della testata e del tronco della Diga di Sopraflutto (Tabella 3);

Zona di estrazione	Tr (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
Testata Diga Sopraflutto	5	3,6	8,5	250
	50	3,6	9	250
	70	3,6	9	250
	140	3,65	9,7	250
Tronco Diga Sopraflutto	5	3,8	8,6	250
	50	3,8	9,1	250
	70	3,8	9,1	250
	140	3,9	9,8	250

Tabella 3 - Risultati ottenuti dalla propagazione delle onde verso riva in corrispondenza della Diga di Sopraflutto

- l'imboccatura del porto in corrispondenza della testata e del tronco della Diga di Sottoflutto (Tabella 4) ;

Zona di estrazione	Tr (anni)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)
Testata Diga Sottoflutto	5	3,3	8,5	250
	50	3,4	8,9	250
	70	3,4	9	250
	140	3,4	9,6	250
Tronco Diga Sottoflutto	5	2,6	8,4	250
	50	2,8	8,8	250
	70	2,8	9	250
	140	2,9	9,4	250

Tabella 4 - Risultati ottenuti dalla propagazione delle onde verso riva in corrispondenza della Diga di Sottoflutto

Visti i risultati del modello e facendo riferimento al tempo di ritorno ricavato dai valori consigliati dalle *Istruzioni Tecniche Italiane per la Progettazione delle dighe marittime* (1996) del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ovvero 140 anni, si è scelta come onda di progetto a largo da propagare l'Onda 4. Le caratteristiche delle onde utilizzate per il dimensionamento delle opere foranee sono riportate in Tabella 3 e in Tabella 4.

#### **4. BIBLIOGRAFIA**

- Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime - Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Roma 1996.
- DHI. Mike 21 – Spectral Wave and Boussinesq Wave modelling. Mike 21 waves, 2016.
- DHI. Mike 21 – Spectral Wave module. Mike 21 Spectral Waves, 2017.

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Griglia di calcolo .....	5
Figura 2 - Batimetria del paraggio .....	5
Figura 3 – Onda simulata: $T_r = 5$ anni; $H_s = 5,9$ m; $T_p = 11,95$ s; $Dir = 250^\circ N$ – Altezze d’onda significative.....	6
Figura 4 - Onda simulata: $T_r = 5$ anni; $H_s = 5,9$ m; $T_p = 11,95$ s; $Dir = 250^\circ N$ – Periodi di picco. ....	7
Figura 5 - Onda simulata: $T_r = 50$ anni; $H_s = 7,06$ m; $T_p = 12,45$ s; $Dir = 250^\circ N$ – Altezze d’onda significative.....	7
Figura 6 - Onda simulata: $T_r = 50$ anni; $H_s = 7,06$ m; $T_p = 12,45$ s; $Dir = 250^\circ N$ – Periodi di picco. .	8
Figura 7 - Onda simulata: $T_r = 70$ anni; $H_s = 7,23$ m; $T_p = 12,50$ s; $Dir = 250^\circ N$ – Altezze d’onda significative.....	9
Figura 8 - Onda simulata: $T_r = 70$ anni; $H_s = 7,23$ m; $T_p = 12,50$ s; $Dir = 250^\circ N$ – Periodi di picco. .	9
Figura 9 - Onda simulata: $T_r = 140$ anni; $H_s = 7,57$ m; $T_p = 12,70$ s; $Dir = 250^\circ N$ – Altezze d’onda significative.....	10
Figura 10 - Onda simulata: $T_r = 140$ anni; $H_s = 7,57$ m; $T_p = 12,70$ s; $Dir = 250^\circ N$ – Periodi di picco. ....	10

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Onde propagate per la scelta dei parametri di progetto.....	4
Tabella 2 - Onde di largo propagate.....	11
Tabella 3 - Risultati ottenuti dalla propagazione delle onde verso riva in corrispondenza della Diga di Sopraflutto.....	11
Tabella 4 - Risultati ottenuti dalla propagazione delle onde verso riva in corrispondenza della Diga di Sottoflutto.....	12