



AM3 SPIN-OFF
ADVANCED MODELS AND METHODS
IN MARITIME ENGINEERING



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
SPIN-OFF PARTECIPATO



COMUNE DI
CASTIGLIONE DELLA PESCAIA

STUDIO METEOMARINO PROPEDEUTICO
ALLA REALIZZAZIONE DI INTERVENTI
STRUTTURALI PER LA RIDUZIONE DEI
FENOMENI DI INSABBIAMENTO
INTERESSANTI L'AREA DI ACCESSO AL
PORTO CANALE

AM3 SPIN-OFF s.r.l.
SPIN-OFF PARTECIPATO
DALL'UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI FIRENZE

am3.unifi.spinoff@gmail.com
www.am3spinoff.com

Via Madonna del Piano, 6
50019 Sesto Fiorentino (FI)
P. IVA / C.F. 06375900484

Firenze, Febbraio 2018

AM3 Spin-off s.r.l.
Advanced Models and Methods in Maritime Engineering
Via Madonna del Piano, 6
50019 Sesto Fiorentino (FI)
P. IVA 06375900484 REA FI 623251

INDICE

PREMESSA	5
1. PRESENTAZIONE DI AM3 SPIN-OFF	6
2. STUDIO METEOMARINO.....	7
2.1. <i>SETTORI DI TRAVERSA PER IL PARAGGIO IN ESAME</i>	7
2.2. <i>DATI UTILIZZATI</i>	8
2.2.1. DATI BATIMETRICI	8
2.2.2. DATI DEL LIVELLO DEL MARE.....	8
2.2.3. STATISTICA DEGLI ESTREMI.....	13
2.2.4. DATI DI MOTO ONDOSI.....	14
2.3. <i>STATISTICA DELLE ONDE ESTREME</i>	16
2.4. <i>SCelta DELLE ONDE DI PROGETTO</i>	20
3. PROPAGAZIONE A COSTA.....	21
3.1. <i>SIMULAZIONI NUMERICHE</i>	21
3.1.1. MODELLO A GRANDE SCALA	21
3.1.2. MODELLO DI DETTAGLIO.....	23
3.2. <i>ANALISI DEI RISULTATI</i>	27
4. MODELLO IDRODINAMICO	33
4.1. <i>SCelta DELLE ONDE E DEI MODELLI PER LE SIMULAZIONI</i>	33
4.2. <i>IMPOSTAZIONE DEL MODELLO</i>	35
4.3. <i>ANALISI DEI RISULTATI</i>	36
5. CONCLUSIONI	40
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	41

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1- Area di studio ed esposizione del paraggio.....	7
Figura 2- Localizzazione stazioni della R.M.N. utilizzate, elementi quadrati celesti, e dell’area di studio, cerchio rosso (fonte: www.mareografico.it)	8
Figura 3- Stazione Livorno: andamento livelli dal 01/01/2010 al 31/12/2015 (fonte: www.mareografico.it)	10
Figura 4- Stazione Civitavecchia: andamento livelli dal 01/01/2010 al 31/12/2015 (fonte: www.mareografico.it) ..	10
Figura 5- Stazione Marina di Campo: andamento livelli dal 21/07/2011 al 31/12/2015 (fonte: www.mareografico.it)	12
Figura 6- Livelli al variare dei tempi di ritorno secondo la distribuzione di Gumbel.....	14
Figura 7- Coordinate dati WWA (punto in rosso) rispetto a Castiglione della Pescaia (punto in blu)	14
Figura 8- Rosa del mare a largo per il punto WWA 42.5°N -10.5°E	15
Figura 9- Esempio di individuazione dei picchi di altezza d’onda oltre la soglia di 1.5m (punto WWA 42.5°N 10.5°E)	17
Figura 10 - Altezze d’onda significative a largo in funzione dell’orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento: a) settore 150°N-200°N, b) settore 200°N-260°N	19
Figura 11 – Griglie di calcolo dei due modelli a grande scala e dei due modelli di dettaglio per la propagazione a costa	22
Figura 12 – Batimetria griglia 201°N	24
Figura 13 – Batimetria griglia 238°N	24
Figura 14 – Onde da 201°N: strati assorbenti (evidenziati in blu)	25
Figura 15 – Onde da 238°N: strati assorbenti (evidenziati in blu)	25
Figura 16 – Onde da 201°N: localizzazione delle zone a differente riflessione (in celeste la spiaggia, in arancione le scogliere alla profondità di 1m, in rosso le scogliere a profondità 3m, in blu i moli)	26
Figura 17 – Onde da 238°N: localizzazione delle zone a differente riflessione (in celeste la spiaggia, in arancione le scogliere alla profondità di 1m, in rosso le scogliere a profondità 3m, in blu i moli)	27
Figura 18 – Risultati propagazione moto ondoso per l’ONDA 1 (Hrms=3.5m, Tp=9.3s, Dir=201°N)	28
Figura 19 – Risultati propagazione moto ondoso per l’ONDA 2 (Hrms=3.8m, Tp=9.4s, Dir=201°N)	28
Figura 20 – Risultati propagazione moto ondoso per l’ONDA 3 (Hrms=2.8m, Tp=9.2s, Dir=238°N)	29
Figura 21 – Risultati propagazione moto ondoso per l’ONDA 4 (Hrms=3.1m, Tp=9.3s, Dir=238°N)	29
Figura 22 – Profilo di estrazione dei risultati (linea nera)	30
Figura 23 – Profilo Hm0 ONDA 1 (in blu) e profondità (in marrone)	30
Figura 24 – Profilo Hm0 ONDA 2 (in blu) e profondità (in marrone)	31
Figura 25 – Profilo Hm0 ONDA 3 (in blu) e profondità (in marrone)	31

Figura 26 – Profilo Hm0 ONDA 4 (in blu) e profondità (in marrone)	31
Figura 27 – Andamento della superficie del mare per l'ONDA 2 in prossimità dell'imboccatura	32
Figura 28 – Andamento della superficie del mare per l'ONDA 4 in prossimità dell'imboccatura.....	32
Figura 29 – Area di studio.	33
Figura 30 – Batimetria dello stato attuale: a) modello nord, b) modello sud.....	35
Figura 31 – Correnti simulate nell'area di studio: a) Onda proveniente da 160°N, b) Onda proveniente da 220°N ..	37
Figura 32 – Dettagli del campo di correnti e di trasporto solido nell'intorno del porto di Castiglione della Pescaia.	38

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Stazione Livorno: andamento livelli dal 01/01/1989 al 31/12/2015.....	9
Tabella 2 - Stazione Civitavecchia: andamento livelli dal 01/01/1989 al 31/12/2015.....	11
Tabella 3 - Stazione Marina di Campo: andamento livelli dal 21/07/2011 al 31/12/2015	12
Tabella 4 – Livelli per differenti tempi di ritorno.	14
Tabella 5 - Clima ondoso meteomarinò a largo punto WWA 42.5°N 10.5°E,	16
Tabella 6 - Parametri dell'analisi statistica.....	18
Tabella 7 - Altezze d'onda per diversi tempi di ritorno.....	19
Tabella 8 - Altezze d'onda per diversi livelli di rischio.....	19
Tabella 9 - Determinazione parametri della regressione lineare.....	20
Tabella 10 - Parametri caratteristici delle onde scelte.....	20
Tabella 11 – Caratteristiche geometriche griglie di calcolo	22
Tabella 12 – Parametri caratteristici delle onde incidenti: valori estratti dalle simulazioni numeriche e relativi ai fondali di 20m.....	23
Tabella 13 – Coefficienti di frizione	26
Tabella 14. Parametri caratteristici delle onde scelte.....	34

PREMESSA

Con lettera del 12/07/2016 il Comune di Castiglione della Pescaia ha incaricato la società AM3 Spin-off s.r.l. (nel seguito detta AM3) della realizzazione dello studio meteomarinario propedeutico alla realizzazione di interventi strutturali per la riduzione dei fenomeni di insabbiamento interessanti l'area di accesso al Porto Canale del Capoluogo, avente, nello specifico i seguenti obiettivi:

- studio del moto ondoso al largo e sotto costa per la definizione del moto ondoso incidente sul molo di sottoflutto del porto;
- indicazioni progettuali fornite dallo studio dei risultati ottenuti per la realizzazione di un intervento di prolungamento del molo di sottoflutto;
- interpretazione e sintesi delle analisi e dei rilievi per valutare l'efficacia delle opere progettate.

La metodologia di lavoro può essere idealmente suddivisa nelle fasi seguenti:

- raccolta dei dati necessari: dati batimetrici, dati onda metrici, rilievi e/o dati progettuali inerenti le opere attuali e rilievi che permettano di stimare il trend evolutivo della spiaggia a nord del porto, in particolare i dati relativi ai rilievi di dettaglio eseguiti nel Porto Canale;
- scelta delle caratteristiche delle onde al largo dalla direzione più sfavorevole;
- implementazione del modello di simulazione numerica per il trasferimento a costa delle condizioni al largo scelte come eventi più significativi;
- analisi dei dati sull'evoluzione della linea di riva e dei fondali nelle condizioni attuali, sulla base dei rilievi disponibili, ed indicazioni sulla tipologia e dimensioni delle opere sperimentali di prolungamento del molo;
- analisi dei dati e scrittura del rapporto dello studio numerico.

Tutte le fasi saranno concertate di continuo con il Comune.



1. PRESENTAZIONE DI AM3 SPIN-OFF

AM3 Spin-off s.r.l. (www.am3spinoff.com) è una società partecipata dall'Università degli Studi di Firenze, fondata nel Luglio 2013 grazie all'attività di scouting e del successivo percorso di pre-incubazione dell'Ateneo fiorentino.

Il team di AM3 Spin-off è composto dai ricercatori del Laboratorio di Ingegneria Marittima LABIMA (www.labima.unifi.it), che vanta un'esperienza trentennale di attività.

La mission di AM3 Spin-off è il trasferimento tecnologico dei risultati delle ricerche condotte dal suo team, nella modellazione fisica e nella modellazione numerica, con lo scopo di offrire servizi di consulenza esclusivi in grado di accompagnare il cliente nella progettazione e nella gestione di grandi opere e/o dispositivi marittimi, ottimizzando il rapporto costi/benefici.

2. STUDIO METEOMARINO

2.1. SETTORI DI TRAVERSIA PER IL PARAGGIO IN ESAME

Il porto-canale di Castiglione della Pescaia si trova sulla foce del fiume Bruna ed è esposto alle onde provenienti dal settore di traversia compreso fra Punta Calamita dell'Isola dell'Elba e la costa di Monte Argentario. Il settore di traversia va da 150°N a 260°N (Figura 1). Questo settore si può suddividere in due sotto settori: uno principale compreso fra 150°N e 200°N , con fetches superiori a 500km, e uno secondario compreso fra 200°N e 260°N , con fetches inferiori a 400km, limitati dalle coste della Corsica e della Sardegna.

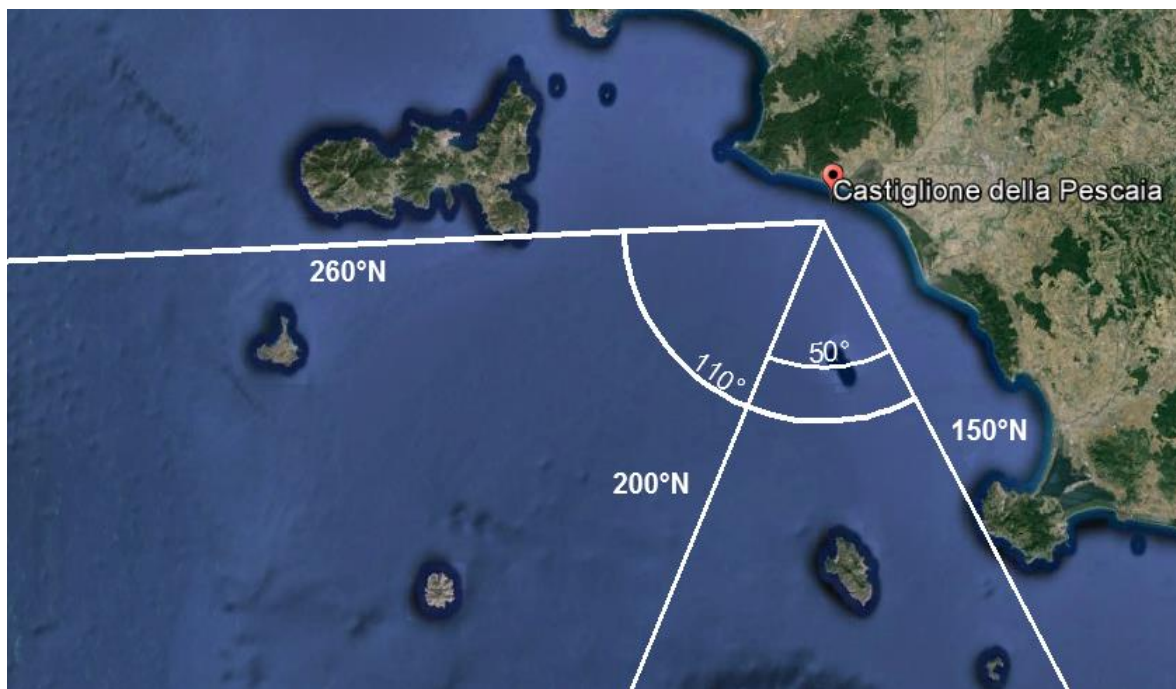


Figura 1- Area di studio ed esposizione del paraggio.

2.2. DATI UTILIZZATI

2.2.1. Dati batimetrici

Per la costruzione dei modelli digitali dei fondali, da utilizzarsi per la modellistica numerica, i dati sono stati reperiti dalla carta nautica dell'I.I.M. "Dal Canale di Piombino al Promontorio Argentario e Scoglio Africa", mentre le batimetrie di dettaglio nell'intorno del porto sono state estratte dal rilievo del 1998 eseguito tra Punta delle Rocchette e Cala Rossa e dal rilievo di dettaglio nell'intorno del molo eseguito nel 2016.

2.2.2. Dati del livello del mare

Per l'analisi dell'andamento dei livelli marini è stato fatto riferimento ai dati della Rete Mareografica Nazionale (Figura 2), ottenuti dal sito www.idromare.it per le stazioni di Livorno e Civitavecchia per il periodo 01/01/1989 – 31/12/2009 e dal sito www.mareografico.it per le stazioni di Livorno e Civitavecchia per il periodo 01/01/2010 – 31/12/2015 e per la stazione di Marina di Campo per il periodo 21/07/2011 – 31/12/2015. L'intervallo di acquisizione è pari a 1h dal 1989 al 2010 e pari a 10min dal 2011 al 2015.



Figura 2- Localizzazione stazioni della R.M.N. utilizzate, elementi quadrati celesti, e dell'area di studio, cerchio rosso (fonte: www.mareografico.it)

Tabella 1 - Stazione Livorno: andamento livelli dal 01/01/1989 al 31/12/2015

LIVELLI Stazione LIVORNO 1989-2015			
Anno	Dati	Massimo	Minimo
1989	8758	0.39	0
1990	8758	0.68	0
1991	8076	0.48	0
1992			
1993	8757	0.9	-0.08
1994	3032	0.77	-0.15
1995	7245	0.87	-0.23
1996	6005	0.87	-0.03
1997	7568	0.84	-0.07
1998	8758	0.75	-0.35
1999	8759	0.38	-0.44
2000	8783	0.47	-0.44
2001	8759	0.4	-0.38
2002	8748	0.49	-0.45
2003	8752	0.44	-0.5
2004	8774	0.43	-0.4
2005	8752	0.46	-0.53
2006	8760	0.4	-0.41
2007	8517	0.38	-0.52
2008	8783	0.54	-0.47
2009	8736	0.59	-0.36
2010	8613	0.67	-0.28
2011	39182	0.51	-0.33
2012	52350	0.65	-0.36
2013	52358	0.55	-0.29
2014	52559	0.51	-0.78
2015	49923	0.54	-0.41
Media		0.58	-0.31
Massimo		0.9	-0.78

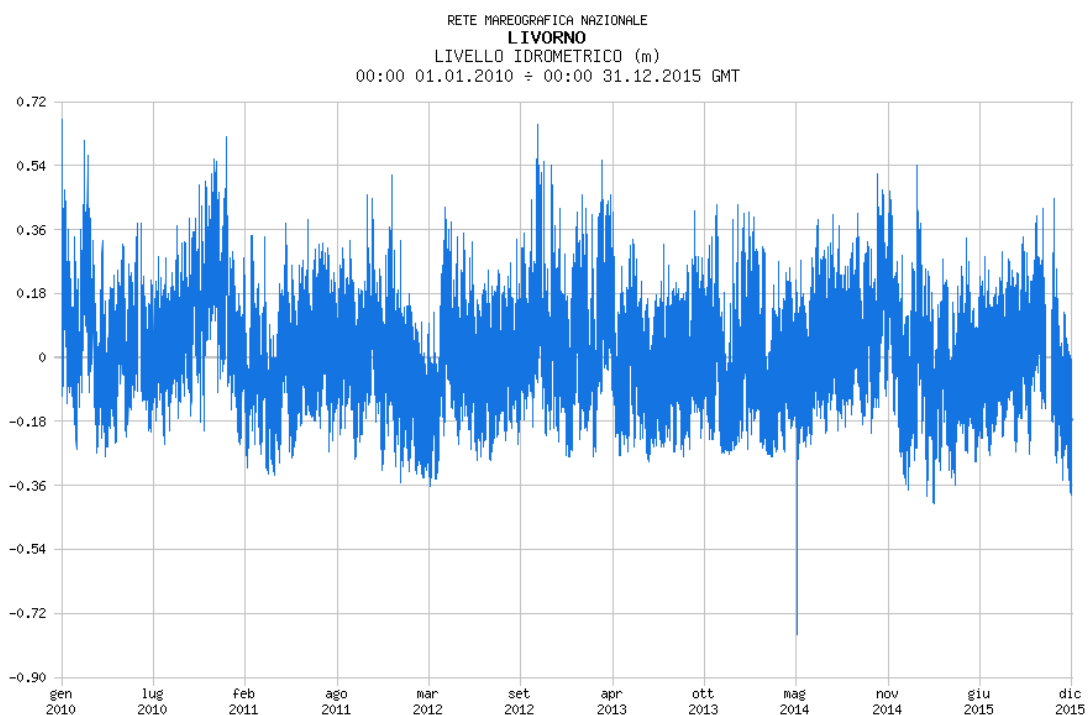


Figura 3- Stazione Livorno: andamento livelli dal 01/01/2010 al 31/12/2015
(fonte: www.mareografico.it)

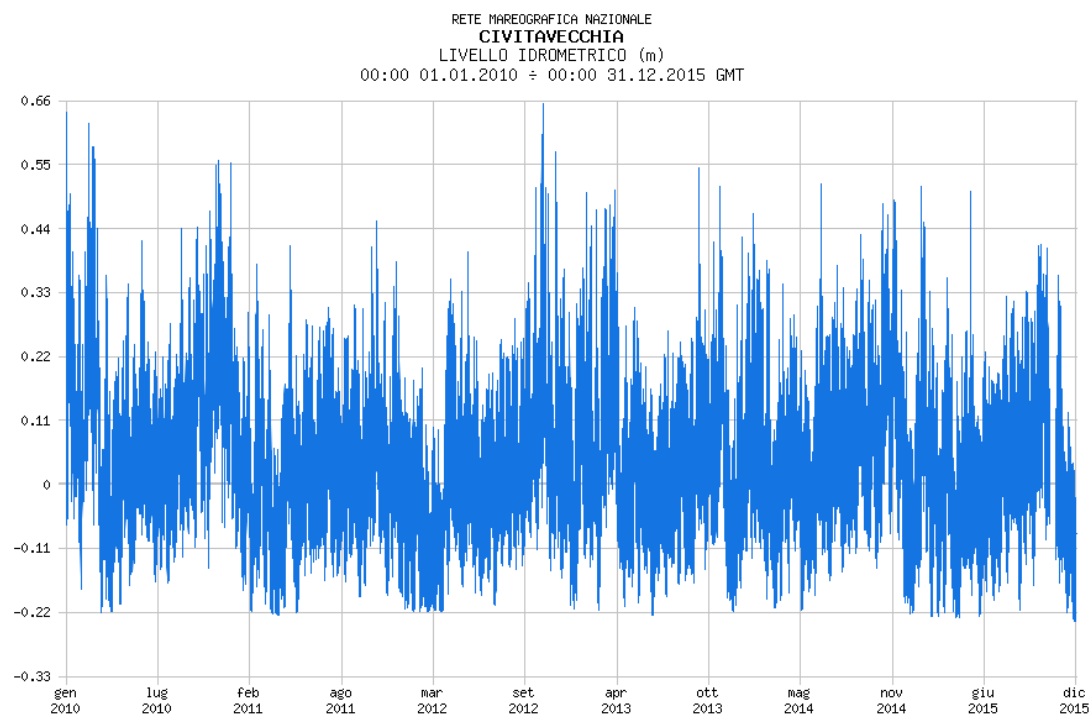


Figura 4- Stazione Civitavecchia: andamento livelli dal 01/01/2010 al 31/12/2015
(fonte: www.mareografico.it)

Tabella 2 - Stazione Civitavecchia: andamento livelli dal 01/01/1989 al 31/12/2015

LIVELLI Stazione CIVITAVECCHIA 1989-2015			
Anno	Dati	Massimo	Minimo
1989	8758	0.17	-0.74
1990	4797	0.36	-0.68
1991			
1992	5075	0.44	-0.48
1993	8758	0.51	-0.52
1994	804	0.38	-0.53
1995	2927	0.37	-0.43
1996	1637	0.54	-0.29
1997	1161	0.53	-0.43
1998	8014	0.37	-0.36
1999	8759	0.37	-0.38
2000	8783	0.41	-0.48
2001	8759	0.36	-0.45
2002	8747	0.4	-0.47
2003	8756	0.37	-0.5
2004	8771	0.39	-0.25
2005	8758	0.41	-0.33
2006	8760	0.33	-0.3
2007	8517	0.33	-0.3
2008	8783	0.46	-0.31
2009	8713	0.58	-0.28
2010	8667	0.64	-0.22
2011	39189	0.45	-0.22
2012	52355	0.65	-0.21
2013	52386	0.54	-0.22
2014	52560	0.51	-0.21
2015	49953	0.51	-0.23
Media		0.44	-0.38
Massimo		0.65	-0.74

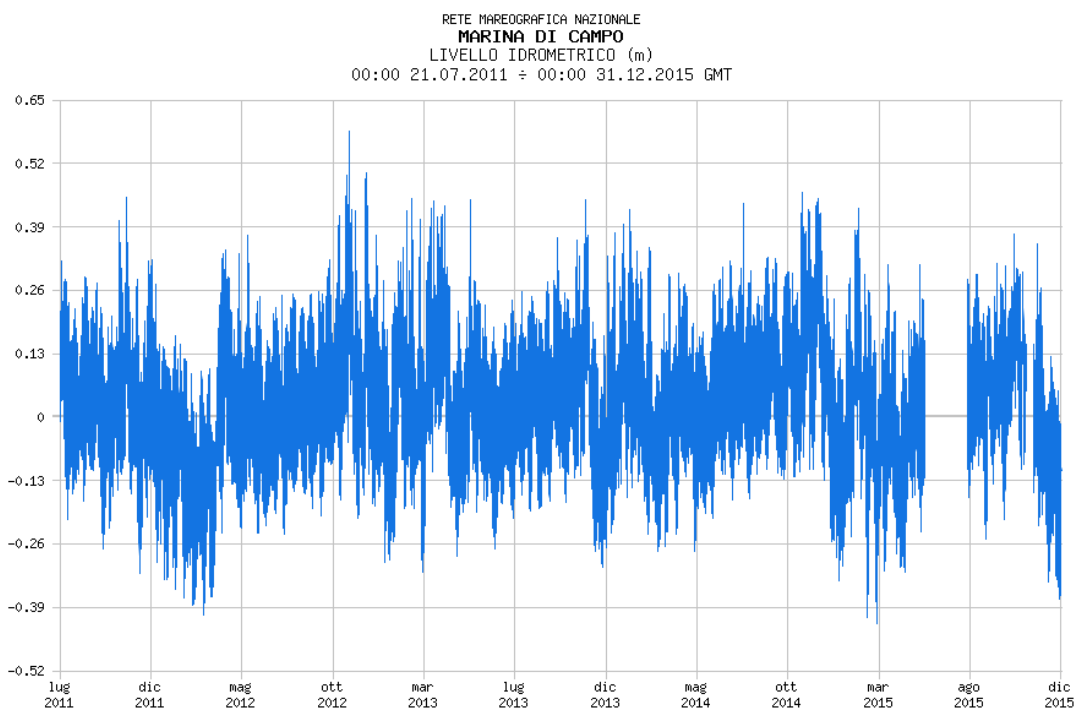


Figura 5- Stazione Marina di Campo: andamento livelli dal 21/07/2011 al 31/12/2015 (fonte: www.mareografico.it)

Tabella 3 - Stazione Marina di Campo: andamento livelli dal 21/07/2011 al 31/12/2015

LIVELLI Stazione MARINA DI CAMPO 2011-2015			
Anno	Dati	Massimo	Minimo
2011	23276	0.45	-0.32
2012	51885	0.58	-0.4
2013	52023	0.44	-0.31
2014	52203	0.46	-0.28
2015	32885	0.42	-0.42
Media		0.47	-0.33
Massimo		0.58	-0.42

2.2.3. Statistica degli estremi

L'analisi degli eventi estremi, in termini dei massimi annuali, è stata condotta solo sul mareografo di Livorno poiché considerato maggiormente rappresentativo sia per la lunga serie di dati disponibili che per la vicinanza all'area in esame. Come funzione di distribuzione degli eventi estremi è stata utilizzata la funzione di Gumbel:

$$P(\text{livello} < Liv) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{Liv - \gamma}{\beta}\right)\right)$$

La funzione $P(\text{livello} < Liv)$ rappresenta la probabilità di non superamento di un dato livello Liv , mentre γ e β sono i parametri che permettono di adattare la funzione ai dati campionari.

Per prima cosa è necessario stimare la probabilità P sulla base dei dati campionari. La variabile stimata viene indicata con il simbolo P^* . Per la sua stima i dati di livello vengono ordinati in senso decrescente e per ogni valore la probabilità P^* è calcolata con la plotting position di Gringorten ($a=0.44$, $b=0.12$):

$$P^* = 1 - \frac{m - a}{Nt + b}$$

dove $m=1,2,\dots,m$ è la posizione del dato nella serie ordinata ($m=1$ rappresenta il valore più grande) e Nt il numero dei dati considerati. Applicando due volte la funzione logaritmo alla distribuzione di Gumbel, si dimostra che, la variabile ridotta

$$y = -\ln[-\ln(P)]$$

è in relazione lineare con i livelli come segue:

$$Liv = \beta \cdot y + \gamma$$

Calcolando i valori della variabile ridotta, y , mediante le probabilità stimate, P^* , si ricavano i parametri di scala e posizione γ e β mediante una regressione lineare ai minimi quadrati. Stimati questi due parametri è ora possibile calcolare i valori di livello con assegnato tempo di ritorno Tr , previo calcolo della variabile ridotta associata a tale tempo di ritorno con la relazione seguente

$$y_{Tr} = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{\lambda Tr}\right)\right]$$

per poi sostituire questo valore nella relazione lineare.

I risultati sono riportati in Tabella 4 e Figura 6. Si può quindi concludere che mediamente ogni 10 anni si raggiunge un livello massimo di circa 0.8m.

Tabella 4 – Livelli per differenti tempi di ritorno.

Tr [anni]	Livello [m]
2	0.55
5	0.70
10	0.80
20	0.89
30	0.95
40	0.99
50	1.02

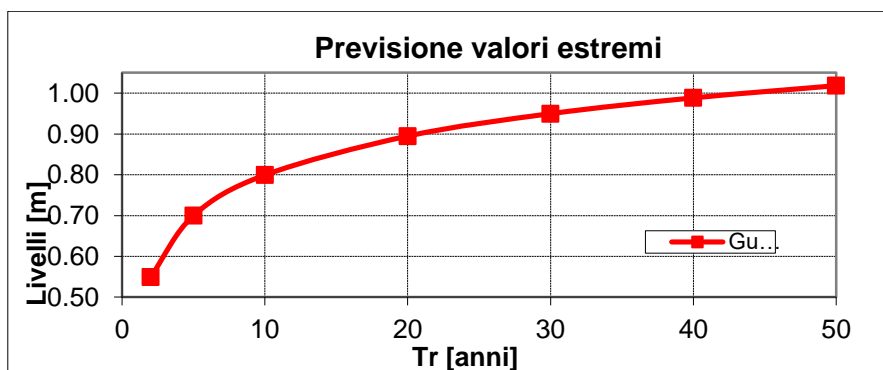


Figura 6- Livelli al variare dei tempi di ritorno secondo la distribuzione di Gumbel.

2.2.4. Dati di moto ondoso

Per l'analisi dei moti ondosi al largo è stato fatto riferimento ai dati World Wave Atlas (nel seguito denominato WWA) per il punto di coordinate geografiche 42°30' N - 10°30'E (Figura 7).

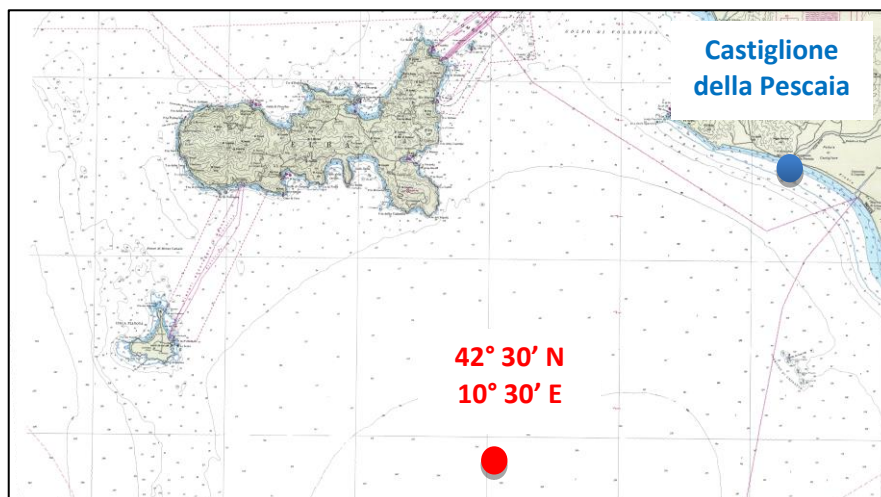


Figura 7- Coordinate dati WWA (punto in rosso) rispetto a Castiglione della Pescaia (punto in blu).

Tali dati derivano da simulazioni numeriche, condotte tramite il modello spettrale WAM, utilizzando in input i campi di vento simulati dall'ECMWF e sono validati mediante il confronto con i dati altimetrici rilevati dal satellite Topex. I parametri caratteristici del moto ondoso (H_{m0} , Dir, T_p) sono forniti ogni 6 ore dal 01/07/1992 al 31/12/2004, per un totale di 18268 dati.

In Figura 8 viene riportata la rosa delle onde omnidirezionale per il punto WWA 42.5°N e 10.5°E, e in Tabella 5 la distribuzione delle frequenze in % delle altezze d'onda per il settore di traversia 150°N - 260°N.

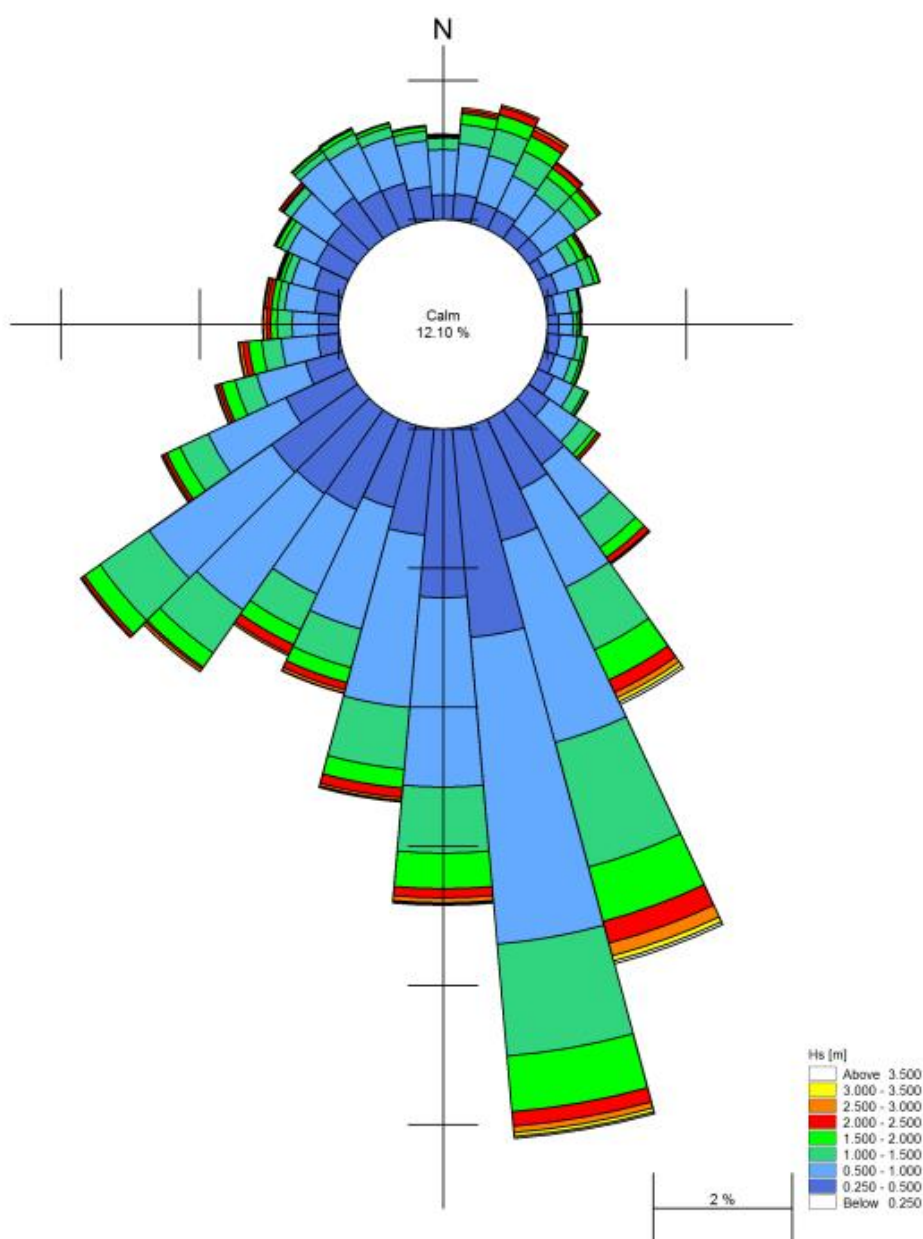


Figura 8- Rosa del mare a largo per il punto WWA 42.5°N -10.5°E.

Tabella 5 - Clima ondoso meteomarinò a largo punto WWA 42.5°N 10.5°E, settore di traversia 150°N – 260°N

PUNTO WWA 42.5°N 10.5°E (%)											
Dir (°N)	H_{mo} (m)										
	0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.0	4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-6.0
150-160	1.86	2.16	1.40	0.70	0.24	0.15	0.07	0.04	0.01	0.01	0
160-170	3.28	4.35	1.95	0.83	0.33	0.17	0.07	0.03	0.01	0	0
170-180	4.17	3.51	1.17	0.65	0.15	0.06	0.03	0	0	0	0
180-190	2.64	2.20	0.94	0.38	0.13	0.04	0.02	0.02	0	0	0
190-200	2.10	2.40	0.69	0.27	0.14	0.05	0	0.01	0.01	0	0
200-210	2.05	1.43	0.58	0.17	0.10	0.05	0.01	0.01	0	0	0
210-220	1.88	1.58	0.64	0.25	0.08	0.02	0	0	0	0	0
220-230	2.33	2.35	0.83	0.29	0.06	0.03	0.01	0.01	0	0	0
230-240	2.04	1.68	0.64	0.25	0.04	0.01	0.01	0	0	0	0
240-250	1.09	0.82	0.38	0.20	0.05	0.05	0	0	0	0	0.01
250-260	0.88	0.72	0.33	0.19	0.08	0.02	0.01	0	0	0.01	0

2.3. STATISTICA DELLE ONDE ESTREME

L'analisi statistica delle onde estreme è stata eseguita con il metodo detto POT (*Peak Over Threshold*) secondo il quale le altezze d'onda utilizzate nell'analisi statistica sono individuate come i picchi sopra un valore soglia, al fine di non correlare i vari eventi (vedi come esempio la Figura 9).

Il metodo *POT* è una variante di quello già descritto per la stima dei livelli estremi. In questo caso, piuttosto che basare l'analisi solo sui massimi annuali si è optato per selezionare i dati campionari come picchi sopra. In questo modo è stato possibile aumentare la numerosità del campione d'analisi che altrimenti, se avessimo utilizzato solo i massimi annuali, si sarebbe ridotto a soli 12 valori.

Con la serie di picchi ottenuta è stato determinato il numero di eventi estremi che ricadono in classi di altezza d'onda dell'ampiezza di 0.25m e per ogni classe è stata stimata la probabilità di non superamento, P^* , come rapporto fra il numero di picchi contenuti e il numero totale di picchi utilizzati nell'analisi più uno; tale valore rappresenta la probabilità che ha l'altezza d'onda significativa massima, durante una mareggiata, di essere contenuta nell'intervallo considerato.

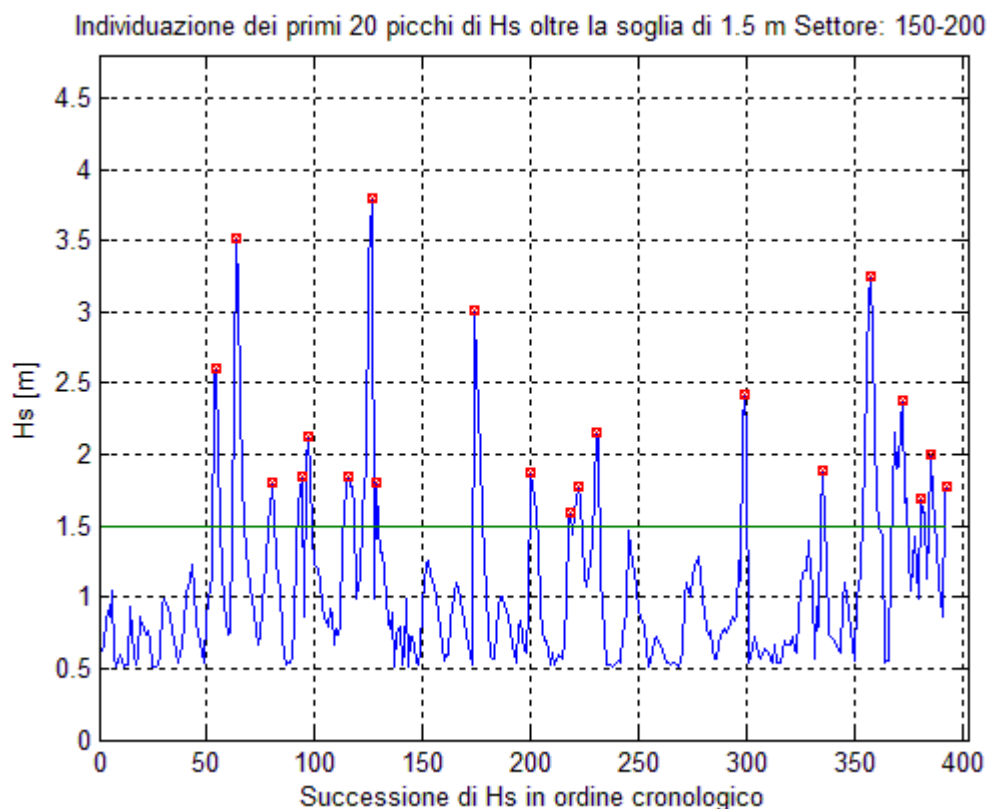


Figura 9- Esempio di individuazione dei picchi di altezza d’onda oltre la soglia di 1.5m (punto WWA 42.5°N 10.5°E)

In seguito, come funzione interpolante degli eventi estremi è stata utilizzata la distribuzione di Gumbel seguente:

$$P = \exp\left(-\exp\left(-\frac{H-\gamma}{\beta}\right)\right)$$

I coefficienti β e γ sono stati determinati mediante regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d’onda e probabilità stimate, (P^*, H) .

Nota la distribuzione di Gumbel, sono state calcolate le altezze d’onda per fissati tempi di ritorno e per fissati livelli di rischio e di orizzonte temporale del progetto.

Il tempo di ritorno è il valor medio dell’intervallo di tempo che intercorre fra due superamenti successivi di un valore di altezza d’onda fissato ed è legato alla probabilità P dalla relazione:

$$P = 1 - \frac{1}{\lambda T_R}$$

dove il coefficiente λ è il numero medio di eventi estremi in un anno (i.e. il numero di mareggiate, con altezza maggiore del valore soglia, che mediamente si sono presentate in un anno) su cui si basa l'analisi statistica.

Dato il legame tra P e H fornito dalla distribuzione di Gumbel, è determinata la relazione che fornisce il valore di altezza d'onda per un assegnato tempo di ritorno:

$$H_{T_R} = \gamma - \beta \ln(-\ln P) = \gamma - \beta \ln\left(\ln\left(1 - \frac{1}{\lambda T_R}\right)\right)$$

Nel progetto di un'opera, l'altezza d'onda di progetto viene comunemente scelta sulla base di un tempo di ritorno ritenuto accettabile e tuttavia è necessario fornire anche una misura del rischio che negli anni a seguire tale valore possa essere superato e l'opera vada incontro a conseguenti danneggiamenti. E' possibile dare una quantificazione statistica del rischio intendendolo come la probabilità che una certa altezza d'onda venga superata entro un prefissato orizzonte temporale (n) esprimendo il legame fra la probabilità (P) ed il rischio (R) come:

$$R = 1 - P^{\lambda \cdot n}$$

Dalla definizione della probabilità secondo la distribuzione di Gumbel si ottiene l'altezza d'onda in funzione dell'orizzonte di progetto e del rischio di superamento come:

$$H_R = \gamma - \beta \ln(-\ln P) = \gamma - \beta \ln\left(-\ln\left(1 - \sqrt[n]{R}\right)\right)$$

L'analisi statistica è stata eseguita sull'intero set di dati disponibili del punto WWA di coordinate 42.5°N-10.5°E, relativamente ad un settore di apertura di 50° compreso tra 150°N e 200°N (settore di traversia principale) e sul settore di apertura di 60° compreso fra 200°N e 260°N (settore di traversia secondario).

Gli eventi estremi di altezza d'onda utilizzati nell'analisi sono individuati come i picchi sopra un valore soglia, che è stato assunto pari a 1.5m.

I coefficienti β e γ , determinati mediante regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P^* , H) sono riportati in Tabella 6.

Tabella 6 - Parametri dell'analisi statistica

SETTORE	Soglia (m)	β	γ	λ
WWA 42.5°N-10.5°E 150°N-200°N	1.5	0.7	1.9	18.7
WWA 42.5°N-10.5°E 200°N-260°N	1.5	0.7	1.4	12.4

Le altezze d’onda sono relative a tempi di ritorno pari a 2, 5, 10, 20, 30, 50 anni sono riportate in Tabella 7.

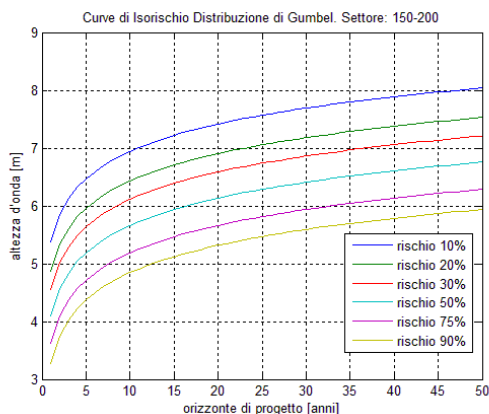
Tabella 7 - Altezze d’onda per diversi tempi di ritorno

	TEMPO DI RITORNO (anni)]					
	2	5	10	20	30	50
ALTEZZE D’ONDA (m) WWA 42.5°N-10.5°E Settore 150°N-200°N	4.3	4.9	5.4	5.9	6.1	6.5
ALTEZZE D’ONDA (m) WWA 42.5°N-10.5°E Settore 200°N-260°N	3.6	4.3	4.8	5.3	5.6	5.9

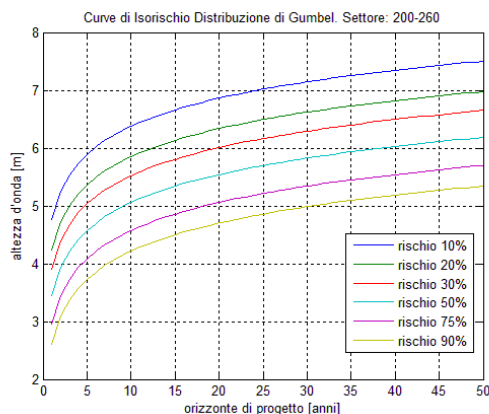
In Tabella 8 sono riportati i valori calcolati delle altezze d’onda in funzione del rischio per assegnati orizzonti temporali di progetto, per tutti e due i settori considerati e in Figura 10, sono riportate le curve di rischio.

Tabella 8 - Altezze d’onda per diversi livelli di rischio

Rischio	Orizzonte di progetto (anni)			
	Settore 150°N-200°N		Settore 200°N-260°N	
	Orizzonte di 5 anni	Orizzonte di 50 anni	Orizzonte di 5 anni	Orizzonte di 50 anni
10%	6.5	8.0	5.9	7.5
20%	5.9	7.5	5.4	7.0
30%	5.6	7.2	5.0	6.6
50%	5.2	6.7	4.6	6.2
75%	4.7	6.3	4.1	5.7
90%	4.4	5.9	3.7	5.3



a)



b)

Figura 10 - Altezze d’onda significative a largo in funzione dell’orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento: a) settore 150°N-200°N, b) settore 200°N-260°N

2.4. SCELTA DELLE ONDE DI PROGETTO

Le onde di progetto scelte per la propagazione a costa (Tabella 10) sono quelle aventi tempo di ritorno pari a 20 e 50 anni, le cui caratteristiche sono state ricavate sulla base della precedente analisi statistica degli eventi ondosi a largo (vedi Paragrafo 1.3). La relazione tra i valori di altezza d'onda significativa (H_s) e periodo di picco (T_p) è stata calcolata utilizzando una formula del tipo:

$$T_p = a \cdot H_s^b$$

dove i parametri a e b sono stati ricavati tramite regressione lineare, suddivisa per classi di altezza d'onda omogenee, su tutta la serie storica (Tabella 9).

Tabella 9 - Determinazione parametri della regressione lineare

	a	B
0m< H_s <=2m	6.13	0.33
2m< H_s <=4m	6.56	0.17
H_s >4m	7.81	0.10

Il periodo di picco è stato calcolato tramite le relazioni descritte in precedenza, mentre il periodo medio è stato ricavato come periodo di picco diviso un fattore pari a 1.2, secondo la relazione comunemente utilizzata in letteratura.

La direzione associata alle onde estreme è la 200°N, per il settore principale e 250°N, per quello secondario. Tale scelta è la più cautelativa poiché queste onde subiscono minore rifrazione nella propagazione a costa.

In Tabella 10, sono riportate le onde selezionate per lo studio di agitazione da propagare a costa.

Tabella 10 - Parametri caratteristici delle onde scelte

	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dir [°N]
ONDA 1 Tr=20 anni Settore 150°-200°N	5.9	9.3	7.8	200
ONDA 2 Tr=50 anni Settore 150°-200°N	6.5	9.4	7.8	200
ONDA 3 Tr=20 anni Settore 200°-260°N	5.3	9.2	7.7	250
ONDA 4 Tr=50 anni Settore 200°-260°N	5.9	9.3	7.8	250

3. PROPAGAZIONE A COSTA

Durante il fenomeno di propagazione dell'onda da acque alte a costa i parametri che contraddistinguono l'onda subiscono delle variazioni, principalmente a seguito di fenomeni rifrattivi e diffrattivi. Quindi, al fine di definire il moto ondoso incidente nell'area antistante al molo di sottoflutto del porto le onde individuate in Tabella 10, sono state propagate a costa mediante simulazione numerica ed estratte alla profondità di 20m. Queste sono state a loro volta propagate a costa con un modello di dettaglio che tiene conto della presenza del porto.

3.1. SIMULAZIONI NUMERICHE

3.1.1. Modello a grande scala

Per le simulazioni numeriche a grande scala è stato utilizzato il modello ONDA3.0 sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile Dell'Università di Firenze (Cappietti, 2003).

Noto il moto ondoso a largo (altezza, direzione e periodo), il modello permette di ricostruire le altezze d'onda su un'assegnata batimetria, simulando i processi combinati di rifrazione-diffrazione, abbattimento dell'altezza d'onda per effetto del frangimento e dell'attrito al fondo.

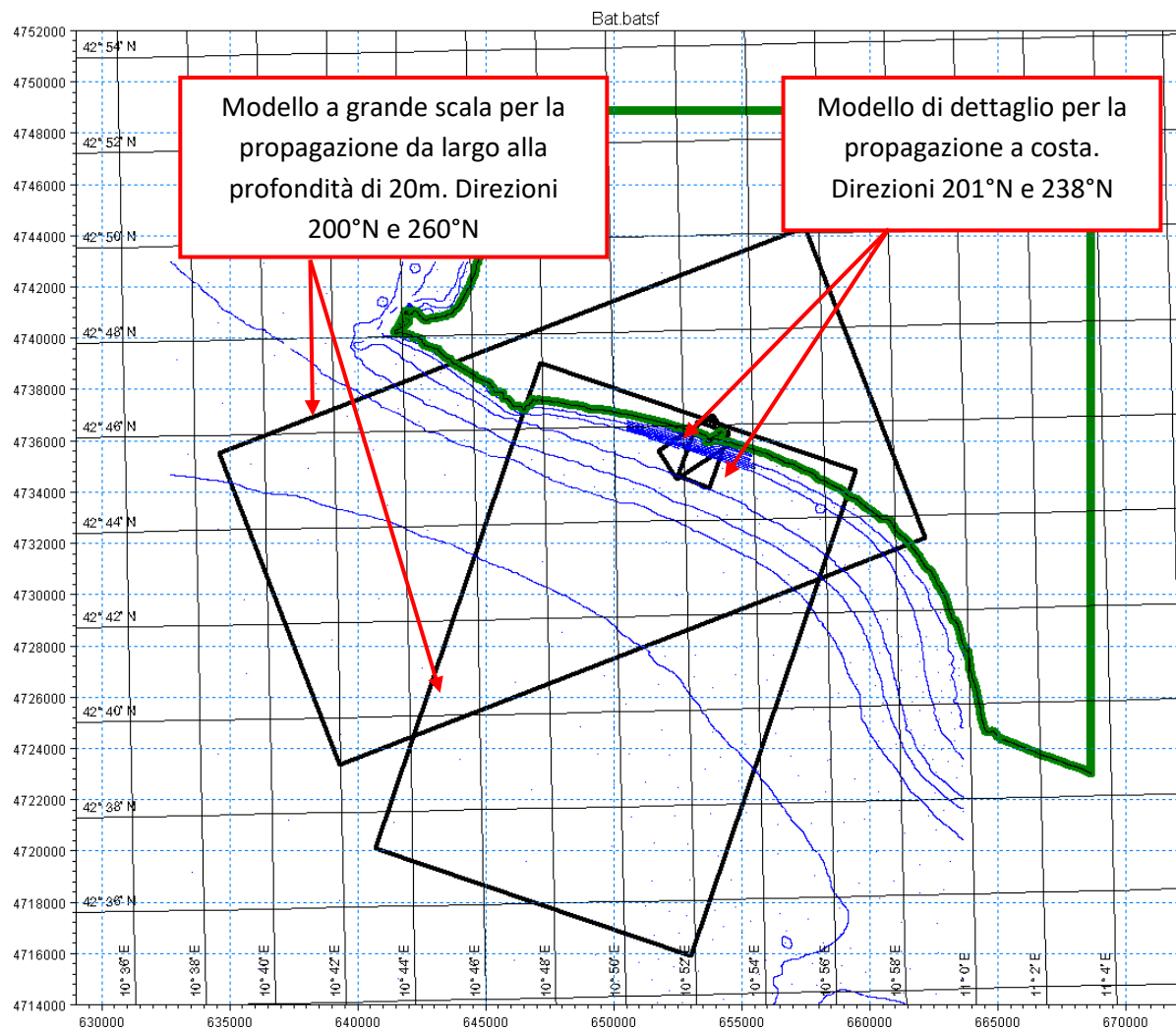
Il modello si basa sull'integrazione numerica dell'equazione proposta da Kirby nel 1986, che deriva da un'approssimazione parabolica (Radder, 1979) dell'equazione ellittica detta Mild Slope Equation, ricavata da Berkhoff nel 1972. Il frangimento è valutato con il criterio di Battjes & Janssen, 1978, mentre l'attrito al fondo con la relazione di Putnam & Jonsson, 1949, in cui il coefficiente di attrito al fondo per il moto ondoso è calcolato con il modello di Swart, 1974. L'equazione è risolta per via numerica con metodo alle differenze finite noto come Crank-Nicolson (Hirsch, 1991).

3.1.1.1. IMPOSTAZIONI DEL MODELLO E RISULTATI

Le caratteristiche geometriche delle griglie di calcolo adottate per le simulazioni a grande scala in Figura 11, sono riportate in Tabella 11.

Tabella 11 – Caratteristiche geometriche griglie di calcolo

n.	Onda	Scala	Dimensioni [m]		Passo [m]	
			Lx	Ly	Dx	Dy
1	ONDA 1 e 2 [200°N]	A grande scala	20000	13000	10	10
2	ONDA 3 e 4 [250°N]	A grande scala	24500	13000	10	10
3	ONDA 1 e 2 [201°N]	Dettaglio per modulo ellittico	2280	1300	2	2
4	ONDA 3 e 4 [238°N]	Dettaglio per modulo ellittico	2540	1300	2	2


Figura 11 – Griglie di calcolo dei due modelli a grande scala e dei due modelli di dettaglio per la propagazione a costa

Al fine di migliorare la precisione numerica dei risultati la griglia del dominio di calcolo è stata allineata secondo la direzione di propagazione dei moti ondosi al largo. In ogni caso il bordo offshore del dominio numerico si trova su un fondale che verifica la condizione di acque profonde per tutti i moti ondosi simulati.

Per la determinazione dei moti ondosi da utilizzare per il modello di propagazione di dettaglio (vedi Paragrafo 3.1.2) sono stati estratti i valori numerici inerenti al fondale di -20m e i risultati sono sintetizzati in Tabella 12.

Possiamo osservare dai risultati di Tabella 12 con le caratteristiche delle onde a largo di Tabella 10, che nella propagazione a costa del modello a grande scala si ha una riduzione di circa il 15% del valore di altezza d'onda per le onde 1 e 2 con direzione 200°N, che sale a circa il 25% per le onde 3 e 4 con direzione 250°N. Anche la direzione dell'onda è ruotata dai 200°N ai 201°N e dai 250°N ai 238°N.

Tabella 12 – Parametri caratteristici delle onde incidenti: valori estratti dalle simulazioni numeriche e relativi ai fondali di 20m

	Hs [m]	Tp [s]	Dir [°N]
ONDA 1 Tr=20 anni Settore 150°-200°N	5.0	9.3	201
ONDA 2 Tr=50 anni Settore 150°-200°N	5.4	9.4	201
ONDA 3 Tr=20 anni Settore 200°-260°N	4.0	9.2	238
ONDA 4 Tr=50 anni Settore 200°-260°N	4.4	9.3	238

3.1.2. Modello di dettaglio

Come modulo d'onda per lo studio di dettaglio, data la presenza del porto, è stato utilizzato il modulo EMS (Elliptic Mild-Slope) del codice di calcolo MIKE 21, che consente di riprodurre tutta la fenomenologia delle trasformazioni ondose (rifrazione, shoaling, frangimento, diffrazione, riflessione e attrito al fondo).

Le onde propagate sono quelle riportate in Tabella 12.

3.1.2.1. IMPOSTAZIONI DEL MODELLO

Dai file CAD delle opere portuali e dei rilievi forniti dal committente, sono stati estratti i file delle coordinate xyz dei punti batimetrici, che rappresentano i dati in input, necessari per la costruzione del modello digitale dei fondali.

Le caratteristiche geometriche delle griglie di calcolo adottate per le simulazioni finali, sono riportate in Figura 11 e Tabella 11. La batimetria ottenuta è riportata in Figura 12 per la direzione 201°N e in Figura 13 per la direzione 238°N.

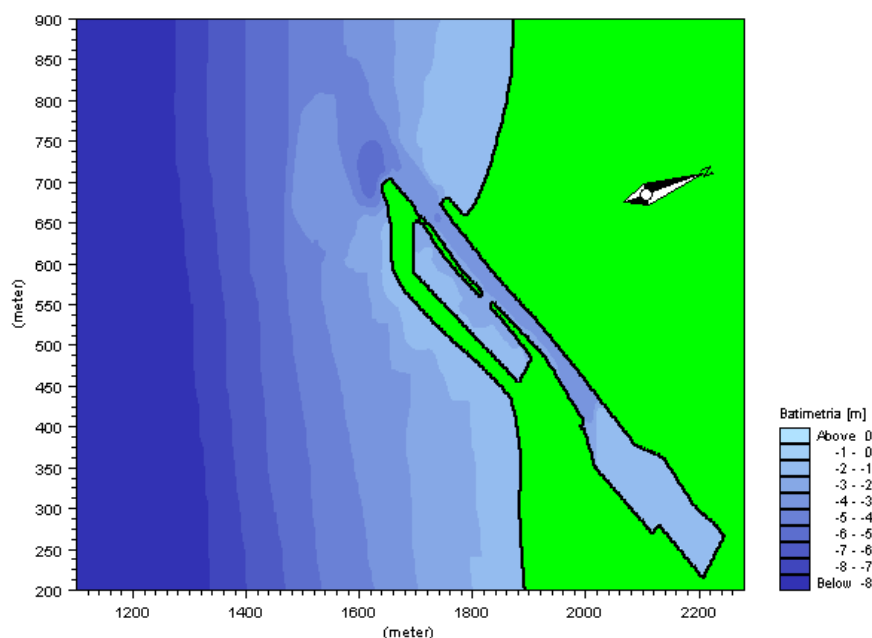


Figura 12 – Batimetria griglia 201°N

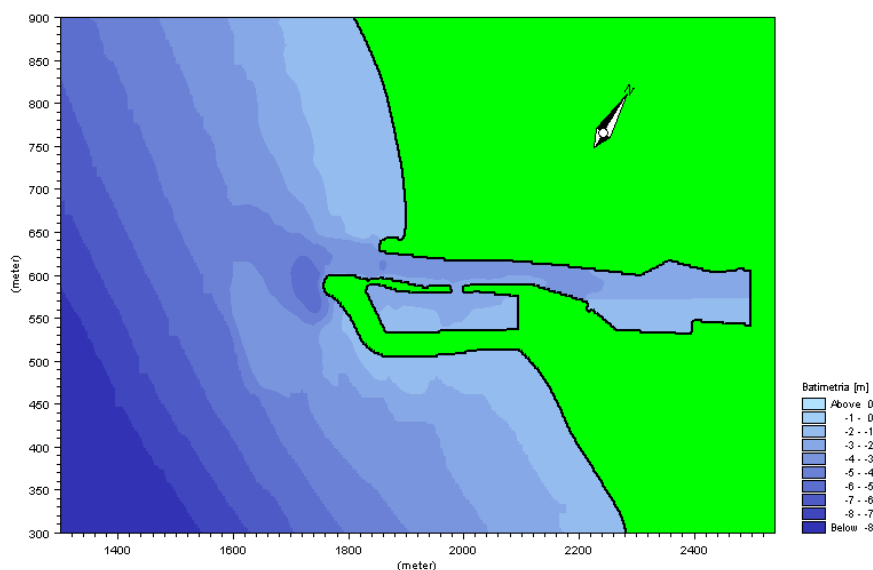


Figura 13 – Batimetria griglia 238°N

In corrispondenza dei confini del dominio di calcolo sono stati introdotti opportuni strati assorbenti, evidenziati in Figura 14, per le onde da 201°N, e in Figura 15, per le onde da 238°N, con il colore blu, che assorbono l'energia delle onde che si propagano verso l'esterno del dominio stesso, rappresentando quindi una condizione di mare aperto.

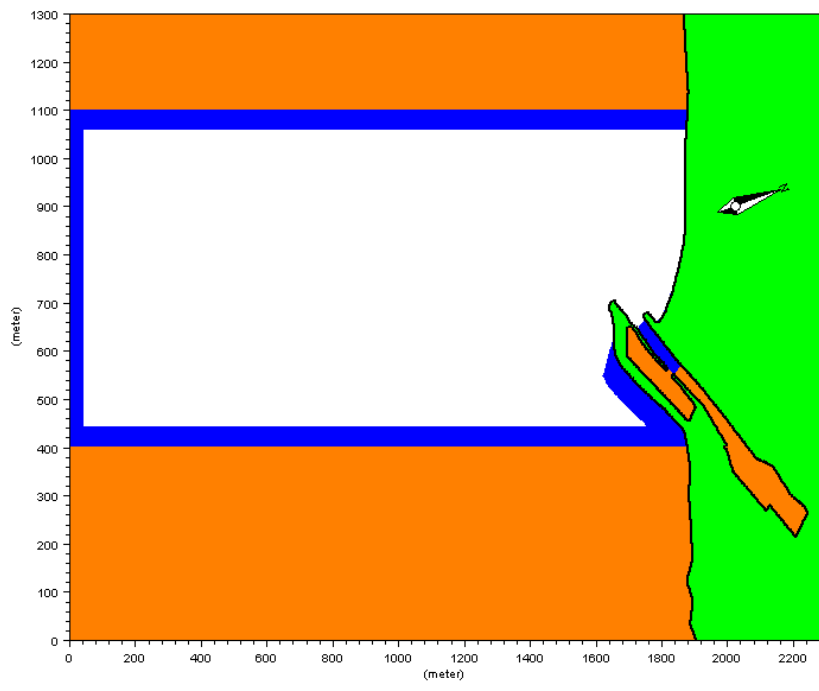


Figura 14 – Onde da 201°N: strati assorbenti (evidenziati in blu)

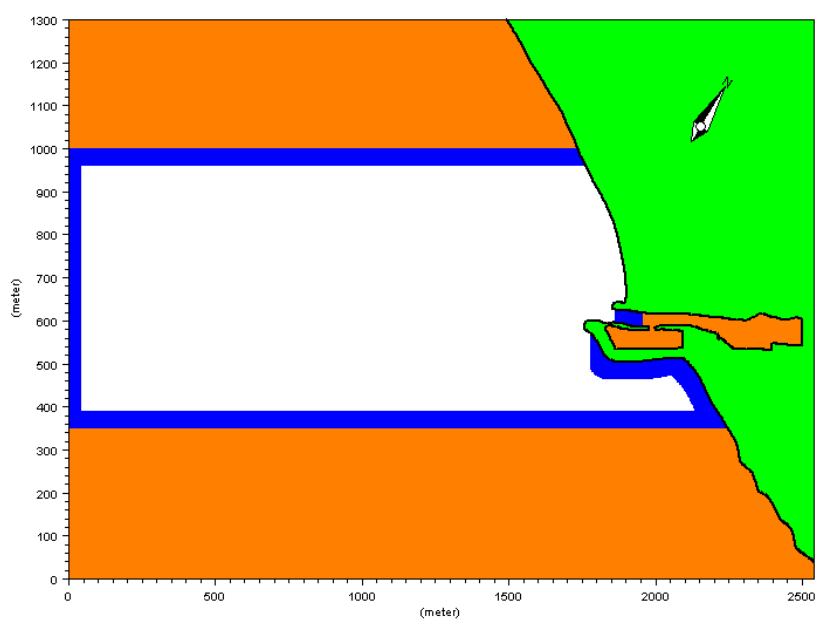


Figura 15 – Onde da 238°N: strati assorbenti (evidenziati in blu)

I valori dei coefficienti di frizione utilizzati per simulare la parziale riflessione dell’onda, a causa dei manufatti e delle spiagge realmente presenti nel golfo (localizzazione delle zone a differente riflessione in Figura 16 per le onde da 201°N e in Figura 17 per le onde da 238°N), sono riportati in Tabella 10.

Tali valori, sono stati ottenuti mediante un tool del codice di calcolo MIKE21, che richiede in ingresso i valori di altezza d’onda, periodo di picco e profondità al piede all’opera. Selezionato il valore di riflessione desiderato (evidenziato come percentuale in Tabella 10 con K_r) si ottiene il corrispondente coefficiente di frizione.

Tabella 13 – Coefficienti di frizione

Manufatti/Spiagge	Coefficiente di frizione			
	ONDA 1	ONDA 2	ONDA 3	ONDA 4
Spiaggia $K_r=15\%$	0.8	0.8	0.8	0.8
Scogliere $K_r=30\%$ Profondità 1m	1.45	1.45	1.45	1.45
Scogliere $K_r=30\%$ Profondità 3m	1.95	2.0	1.95	1.95
Molo $k_r=90\%$	150	150	150	150

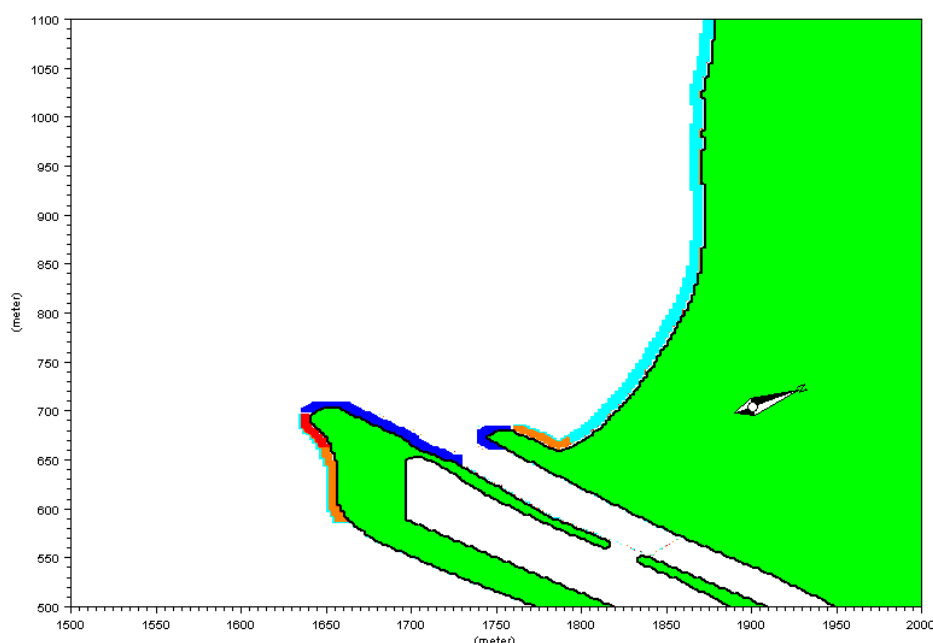


Figura 16 – Onde da 201°N: localizzazione delle zone a differente riflessione (in celeste la spiaggia, in arancione le scogliere alla profondità di 1m, in rosso le scogliere a profondità 3m, in blu i moli)

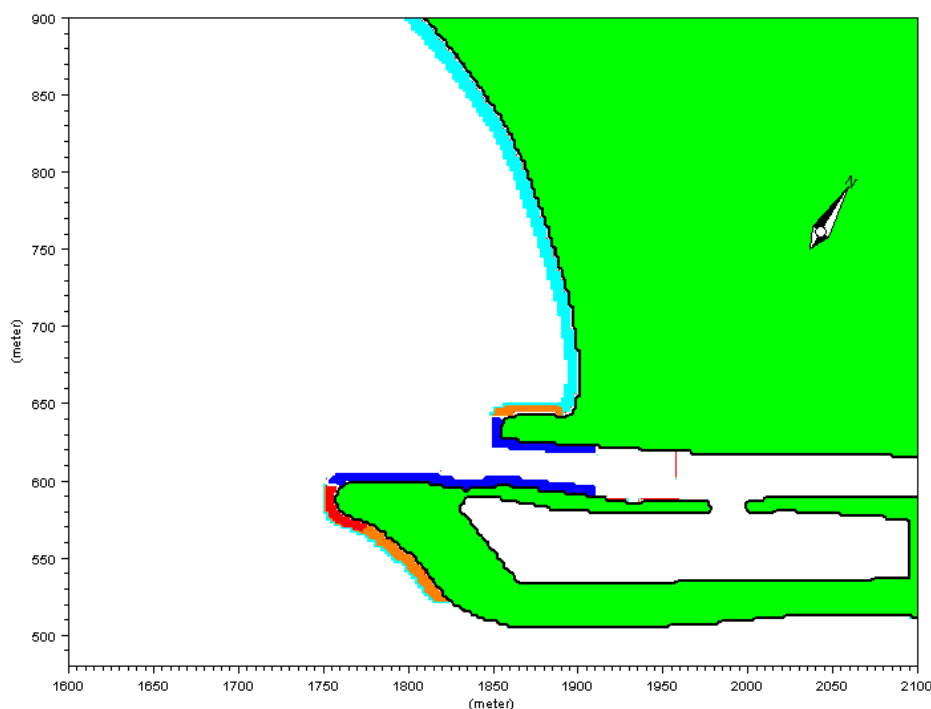


Figura 17 – Onde da 238°N: localizzazione delle zone a differente riflessione (in celeste la spiaggia, in arancione le scogliere alla profondità di 1m, in rosso le scogliere a profondità 3m, in blu i moli)

3.2. ANALISI DEI RISULTATI

I risultati ottenuti dalle simulazioni della propagazione del moto ondoso per l'onda 1, onda 2, onda 3 e onda 4, sono riportati in termini di altezza d'onda quadratica media (H_{rms}) rispettivamente in Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21.

Le onde da 201°N (onda 1 e onda 2) presentano in generale valori di H_{rms} maggiori rispetto alle onde da 238°N (onda 3 e onda 4). In tutti i casi analizzati, il molo di sopraflutto dissipa il moto ondoso a tal punto che, nella zona antistante al porto, i valori di H_{rms} sono notevolmente ridotti e non variano molto tra di loro.

Al fine di determinare i valori di altezza d'onda, utili per la progettazione di una struttura di prolungamento del molo di sottoflutto con l'obiettivo di ridurre i problemi di insabbiamento dell'imboccatura, sono state estratte le profondità e i valori di H_{rms} di tutte e quattro i moto ondosi lungo un profilo che va dalla base del molo di sottoflutto fino alla batimetrica dei 4m (vedi linea nera in Figura 22).

Per fini progettuali i valori di H_{rms} sono stati trasformati in H_{m0} (altezza d'onda significativa spettrale) invertendo la seguente formula tratta dal Rock Manual (2012).

$$H_{rms} = [0.6725 + 0.2025(H_{m0}/h)]H_{m0}$$

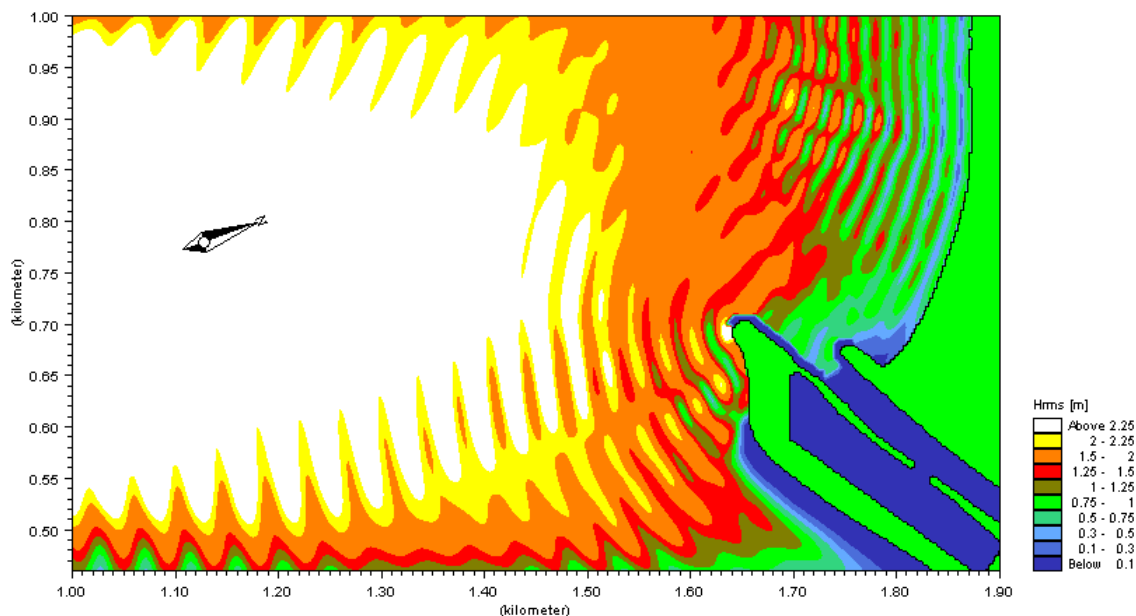


Figura 18 – Risultati propagazione moto ondoso per l’ONDA 1 ($H_{rms}=3.5m$, $T_p=9.3s$, $Dir=201^\circ N$)

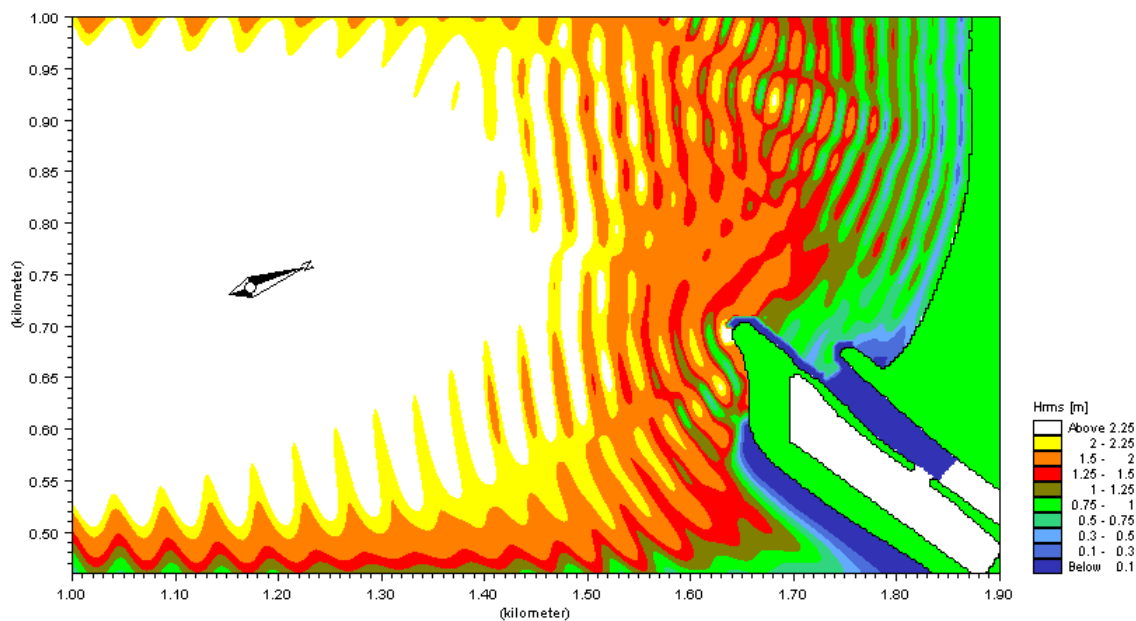


Figura 19 – Risultati propagazione moto ondoso per l’ONDA 2 ($H_{rms}=3.8m$, $T_p=9.4s$, $Dir=201^\circ N$)

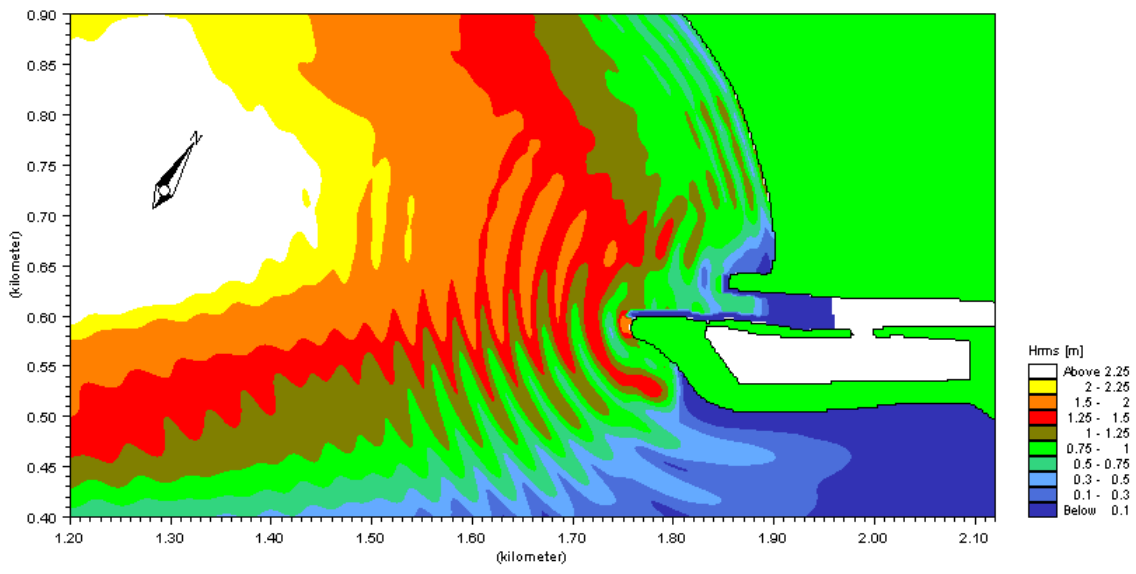


Figura 20 – Risultati propagazione moto ondoso per l'ONDA 3 ($H_{rms}=2.8m$, $T_p=9.2s$, $Dir=238^\circ N$)

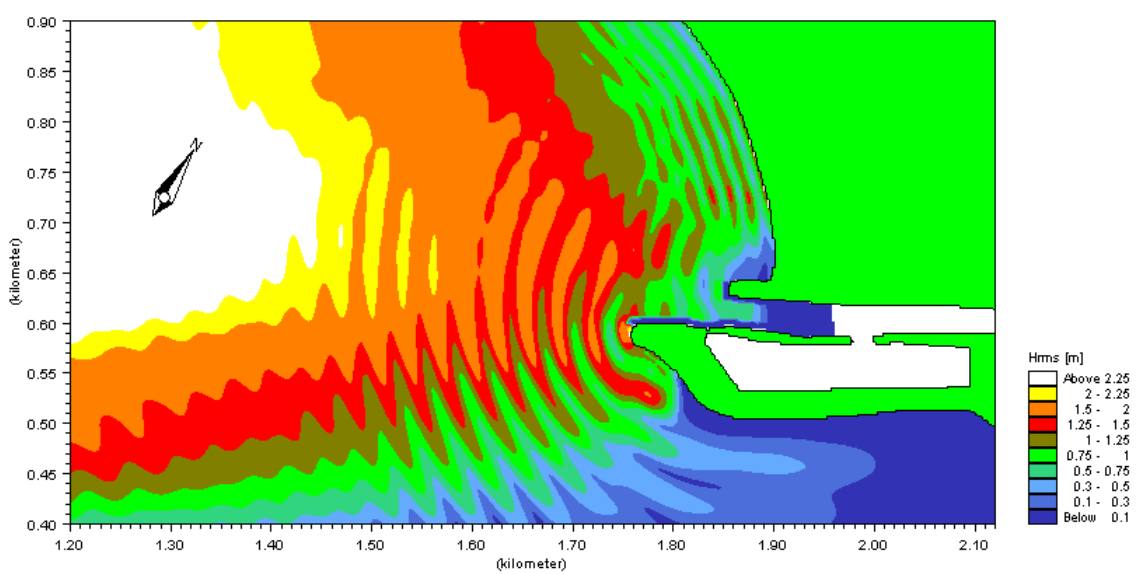


Figura 21 – Risultati propagazione moto ondoso per l'ONDA 4 ($H_{rms}=3.1m$, $T_p=9.3s$, $Dir=238^\circ N$)

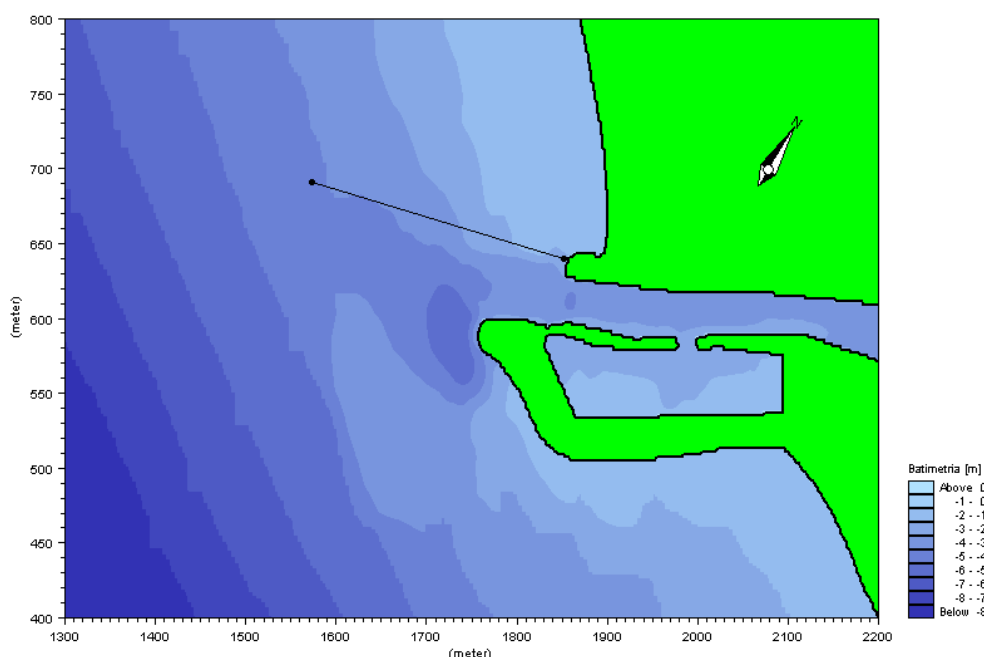


Figura 22 – Profilo di estrazione dei risultati (linea nera)

I profili di altezza d’onda H_{m0} dei quattro moti ondosi simulati sono stati riportati sul profilo del fondo, determinato lungo l’asse della struttura del prolungamento del molo. I profili sono riportati dalla Figura 23 alla Figura 26.

È evidente che, indipendentemente dalla direzione sulle basse profondità, l’altezza d’onda è molto simile in tutti e quattro i profili, poiché sostanzialmente condizionata dal fenomeno del frangimento e quindi dalla sola profondità del fondale. Per profondità maggiori, che sono state analizzate fino a 4m, si ha che per le onde 1, 3 e 4, le altezze d’onda si mantengono fra 2m e 2.4m, mentre l’onda 2 presenta un massimo di 2.7m.

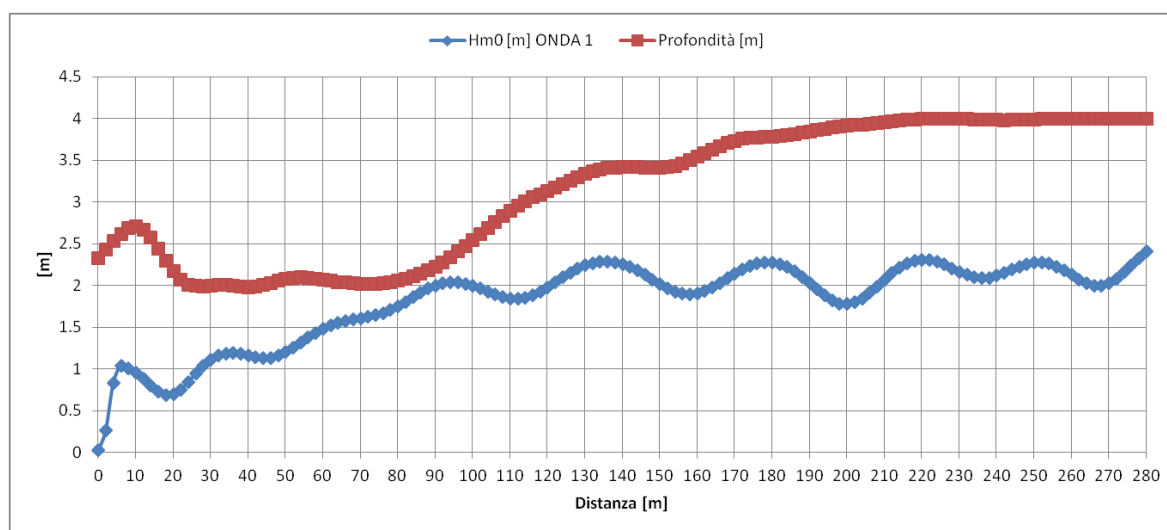


Figura 23 – Profilo H_{m0} ONDA 1 (in blu) e profondità (in marrone)

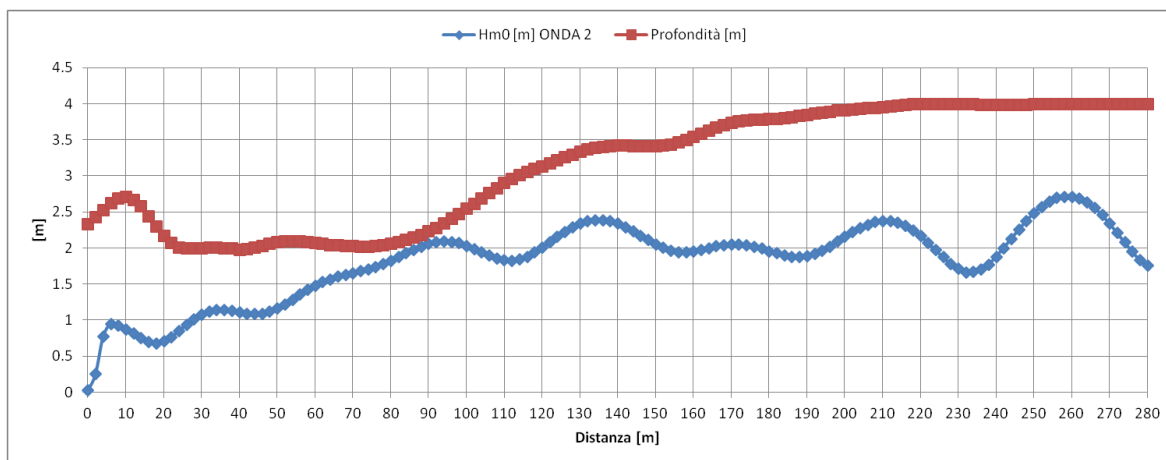


Figura 24 – Profilo H_{m0} ONDA 2 (in blu) e profondità (in marrone)

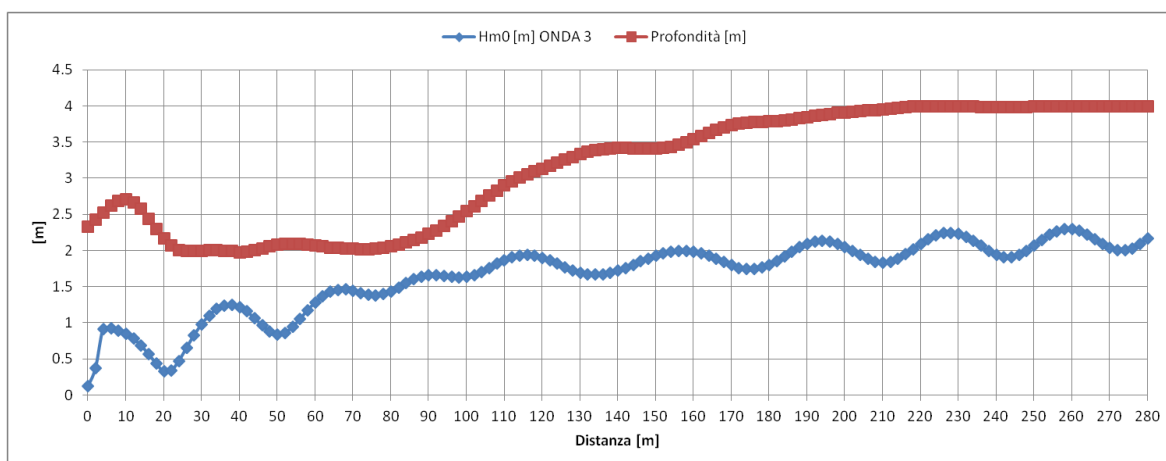


Figura 25 – Profilo H_{m0} ONDA 3 (in blu) e profondità (in marrone)

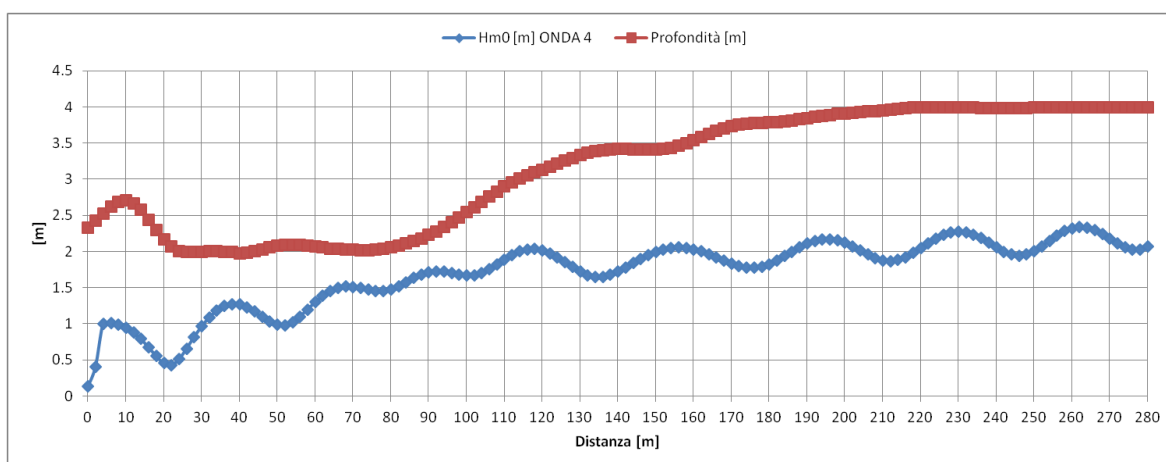


Figura 26 – Profilo H_{m0} ONDA 4 (in blu) e profondità (in marrone)

Inoltre è stata analizzata in dettaglio la direzione dell'onda in prossimità dell'asse della struttura di prolungamento da progettare nel caso dell'onda 2 e dell'onda 4, poiché sono le onde più alte registrate per ciascuna direzione.

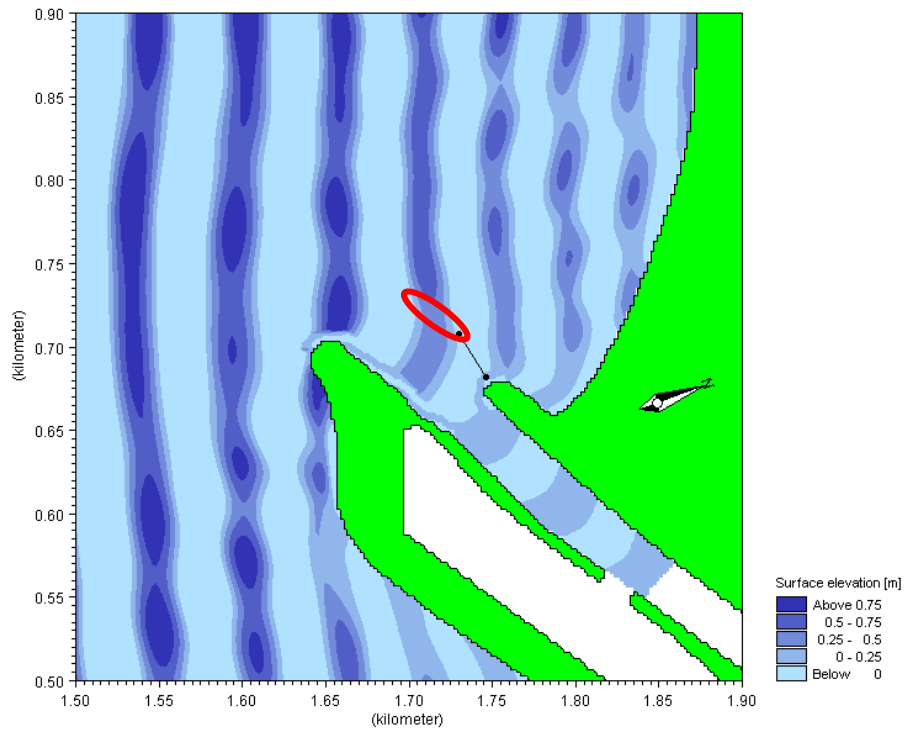


Figura 27 – Andamento della superficie del mare per l'ONDA 2 in prossimità dell'imboccatura

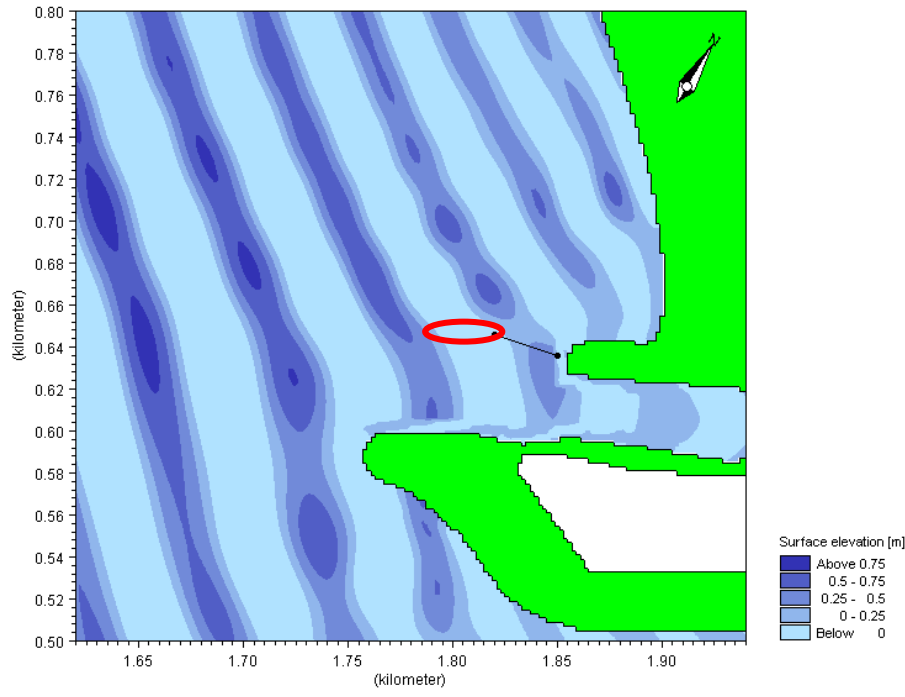


Figura 28 – Andamento della superficie del mare per l'ONDA 4 in prossimità dell'imboccatura

In Figura 27 e in Figura 28 è riportato l'andamento della superficie del mare come planimetria delle creste delle onde in prossimità dell'imboccatura rispettivamente per l'onda 2 e l'onda 4.

Confrontando la direzione dell'asse della struttura di prolungamento, con la direzione delle creste d'onda, si può determinare l'angolo d'incidenza delle onde sulla struttura stessa.

In corrispondenza della posizione della testata della scogliera da progettare, nel caso di lunghezza pari a 90m, indicata in rosso nelle figure precedenti, l'altezza d'onda massima per le 4 condizioni simulate raggiunge un valore di 2,2 m.

4. MODELLO IDRODINAMICO

Allo scopo di stimare gli effetti delle opere portuali esistenti e delle eventuali variazioni previste sulla dinamica costiera, vengono sintetizzati in questo paragrafo i risultati di uno studio idrodinamico sul litorale di Castiglione della Pescaia eseguito da AM3, per conto della Regione Toscana nel 2015.

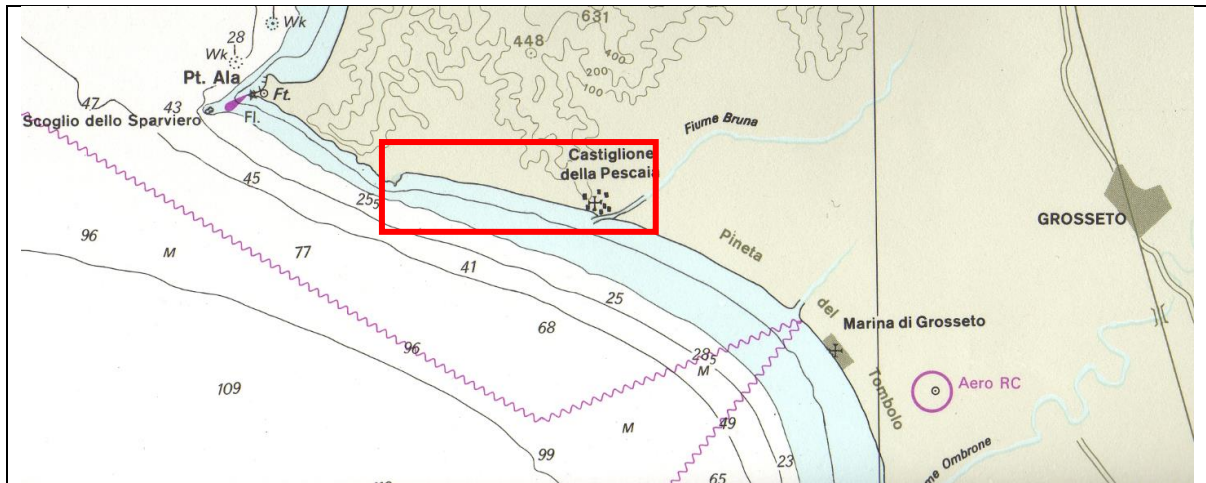


Figura 29 – Area di studio.

4.1. SCELTA DELLE ONDE E DEI MODELLI PER LE SIMULAZIONI

In base alle analisi sul clima ondoso, sono state scelte come onde significative per le successive simulazioni, un'onda proveniente dal settore meridionale rappresentativa delle condizioni prevalenti di trasporto litoraneo diretto verso nord-ovest, ed una rappresentativa delle condizioni ad energia minore, che origina un trasporto litoraneo diretto nel senso opposto.

Le due onde individuate hanno (alla profondità di 20m) $H_{m0}=2.5m$, $T_p=7.2s$ e direzioni $160^\circ N$ e $220^\circ N$. Il periodo di picco è stato calcolato tramite le relazioni

descritte nel paragrafo 1.4, mentre il periodo medio è stato ricavato come periodo di picco diviso un fattore pari a 1.2, secondo la relazione comunemente utilizzata in letteratura.

Tabella 14. Parametri caratteristici delle onde scelte

	Dir	H_{m0}	T_p	T_m
onda 1	160°N	2.5m	7.2s	6.0s
onda 2	220°N	2.5m	7.2s	6.0s

Come modulo di propagazione d'onda per lo studio di dettaglio, data la conformazione della costa intorno a Punta delle Rocchette e la presenza delle opere portuali, è stato utilizzato il modulo EMS (Elliptic Mild-Slope) del codice di calcolo MIKE21, che consente di riprodurre tutta la fenomenologia delle trasformazioni ondose (rifrazione, shoaling, frangimento, diffrazione, riflessione e attrito al fondo).

Il campo d'onda ottenuto è stato poi utilizzato per il calcolo delle correnti mediante il modulo idrodinamico HD (HydroDynamic) del codice di calcolo MIKE 21, che permette il calcolo del campo delle correnti, generato dai radiation stress trasmessi dalle onde e della sua interazione con le strutture esistenti.

Per la stima dell'intensità del trasporto di sedimenti incoerenti del fondo dovuto agli effetti combinati di onde e flusso di correnti è stato utilizzato il modulo ST (Sediment Transport) dello stesso codice di calcolo utilizzato in precedenza.

Il calcolo dell'intensità di trasporto dei sedimenti è stato condotto su una griglia di calcolo quadrata (2m X 2m), che definisce la geometria dell'area di interesse e comprende le opere portuali.

Il modello è stato completato inserendo le caratteristiche granulometriche dei sedimenti del fondo, come segue:

- diametro medio pari a 0.1mm a profondità inferiori a 5m;
- diametro medio pari a 0.2mm a profondità comprese fra 5m e 2m;
- diametro medio pari a 0.4mm fra la profondità di 2m e la spiaggia emersa.

Nel presente rapporto sono descritti i risultati della modellazione numerica per evidenziare il campo di correnti indotte dalle mareggiate rappresentative delle due prevalenti condizioni di trasporto solido litoraneo sul tratto di costa dove appare significativa l'influenza del porto.

4.2. IMPOSTAZIONE DEL MODELLO

Il tratto di litorale compreso fra il Porto di Castiglione della Pescaia e Punta delle Rocchette è stato studiato prima a grande scala con griglie di calcolo, le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Tabella 5, e poi a scala di dettaglio.

Per lo studio a scala di dettaglio, il tratto è stato suddiviso in due parti per motivi computazionali.

Di seguito la parte che comprende la zona che si estende da Punta delle Rocchette al Fosso Tonfone, sarà chiamata "modello nord" e la parte dal Fosso Tonfone al Porto di Castiglione della Pescaia, "modello sud" (Figura 30).

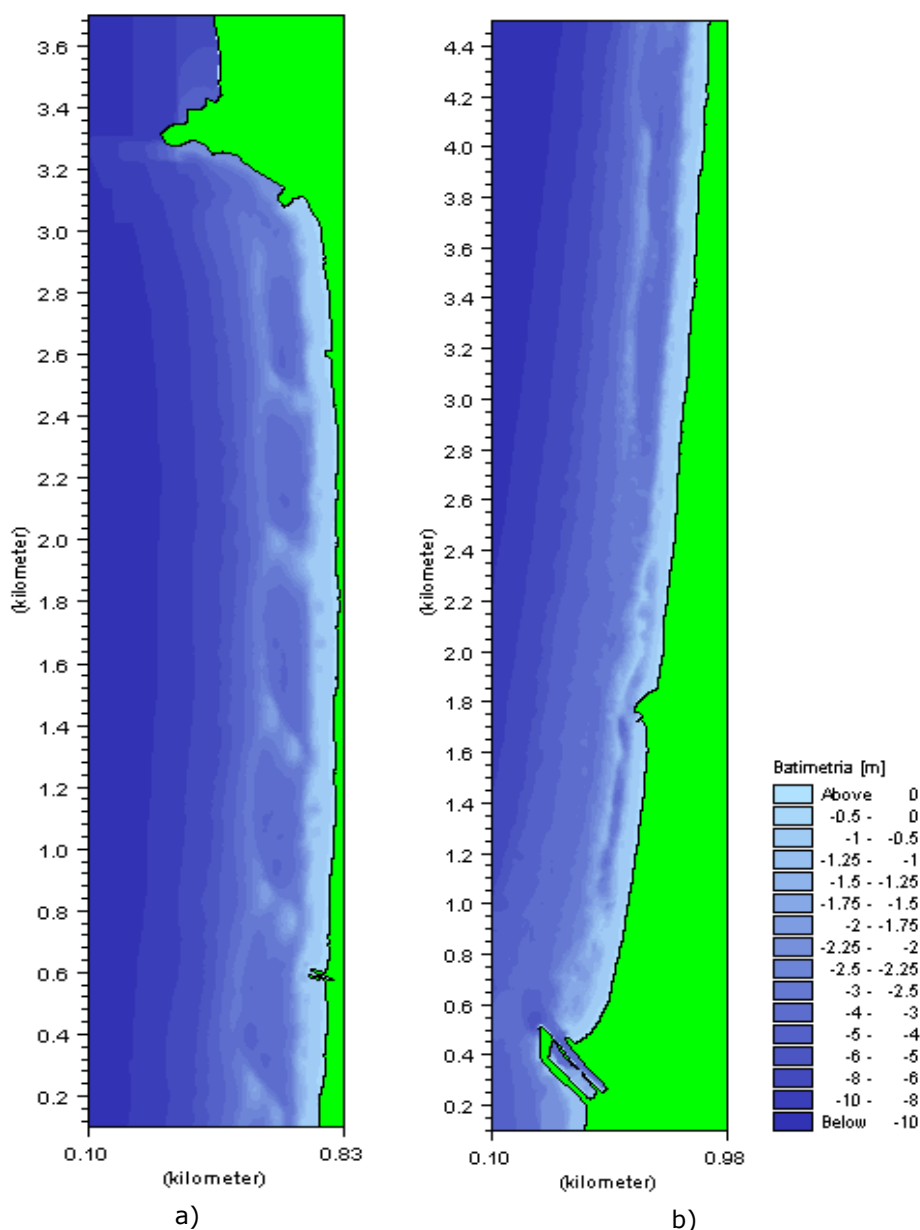


Figura 30 – Batimetria dello stato attuale: a) modello nord, b) modello sud

Il tratto d'interesse è interamente compreso nel modello sud. Il modello del fondo ha riprodotto in dettaglio le barre di sabbia presenti su gran parte delle spiagge del comune.

In ingresso al modulo idrodinamico (HD) è stata inserita la mappa dei coefficienti di scabrezza di Manning al fine di considerare anche l'interazione con i fondali:

- nel caso di sabbia fine il coefficiente è stato assunto pari a 40;
- nel caso di sabbia media, cioè dalla batimetrica dei 10m a riva, il coefficiente è stato impostato pari a 32;
- davanti la costa alta sulla mantellata della diga di Castiglione sono stati inseriti coefficienti di scabrezza pari a 24, per simulare l'effetto di attrito lungo la scogliera.

4.3. ANALISI DEI RISULTATI

I risultati ottenuti dalle simulazioni delle correnti sotto costa sono riportati di seguito nelle Figure 31 e 32.

Le mareggiate provenienti dal settore meridionale rappresentano la condizione dominante in termine di frequenza ed intensità ed il trasporto solido prevalente è associato a questi stati di mare.

Le onde provenienti dalla direzione di 160°N rappresentano bene questa situazione.

Inoltre è possibile osservare che le correnti litoranee che trasportato sulle spiagge oltre il porto, la sabbia proveniente dall'Ombrone, subiscono una deviazione a causa delle opere portuali, ma riprendono dopo qualche centinaio di metri l'andamento parallelo alla costa, mantenendo la loro capacità di trasporto.

L'evoluzione morfologica della costa osservata negli ultimi 40 anni, dopo la costruzione della nuova darsena, che ha prolungano sensibilmente i due moli preesistenti, è in accordo con i risultati delle simulazioni idrodinamiche; infatti le nuove opere non hanno causato accumuli progressivi di sabbia sopraflutto e non si sono verificate erosioni sottoflutto.

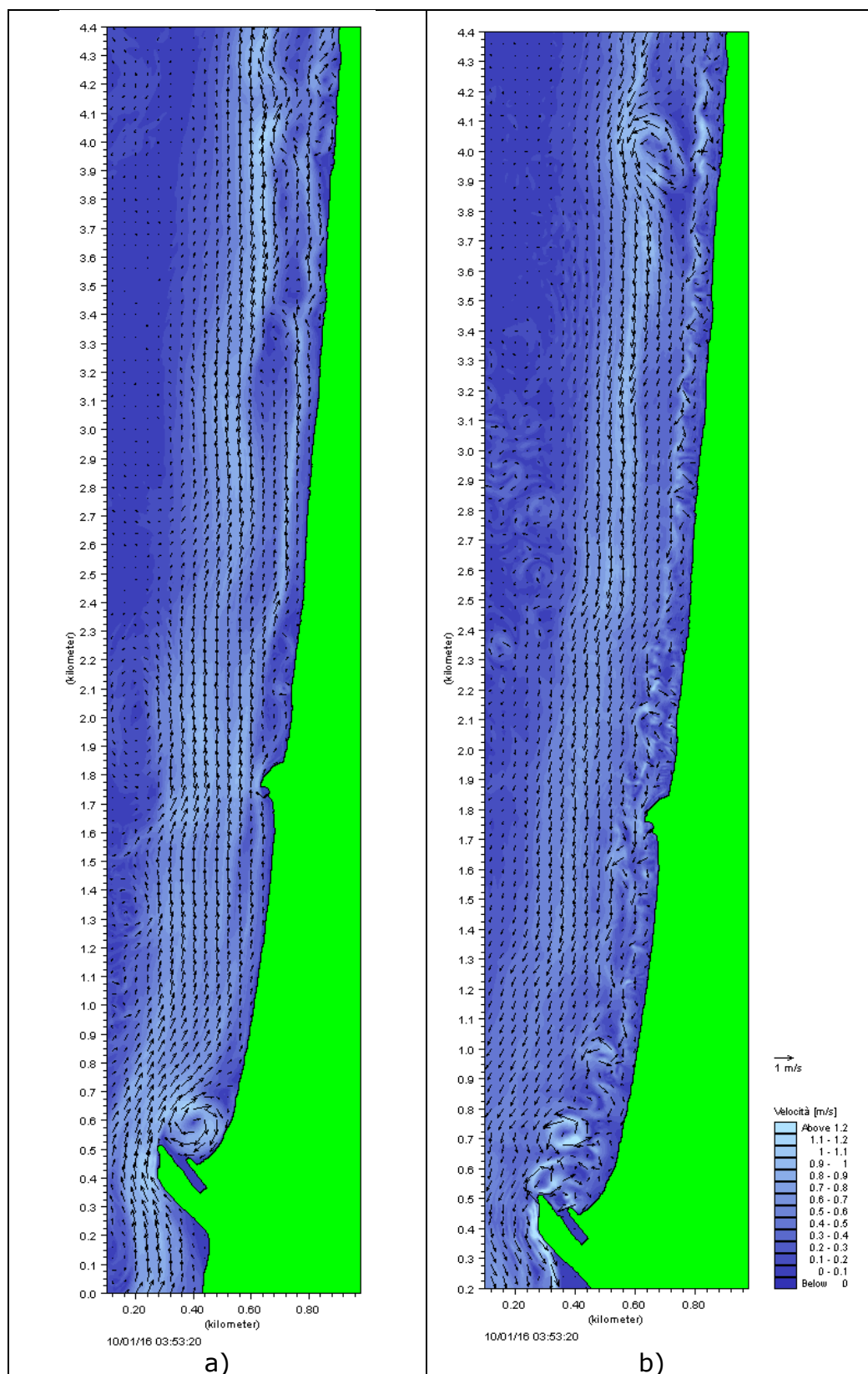


Figura 31 – Correnti simulate nell’area di studio: a) Onda proveniente da 160°N, b) Onda proveniente da 220°N

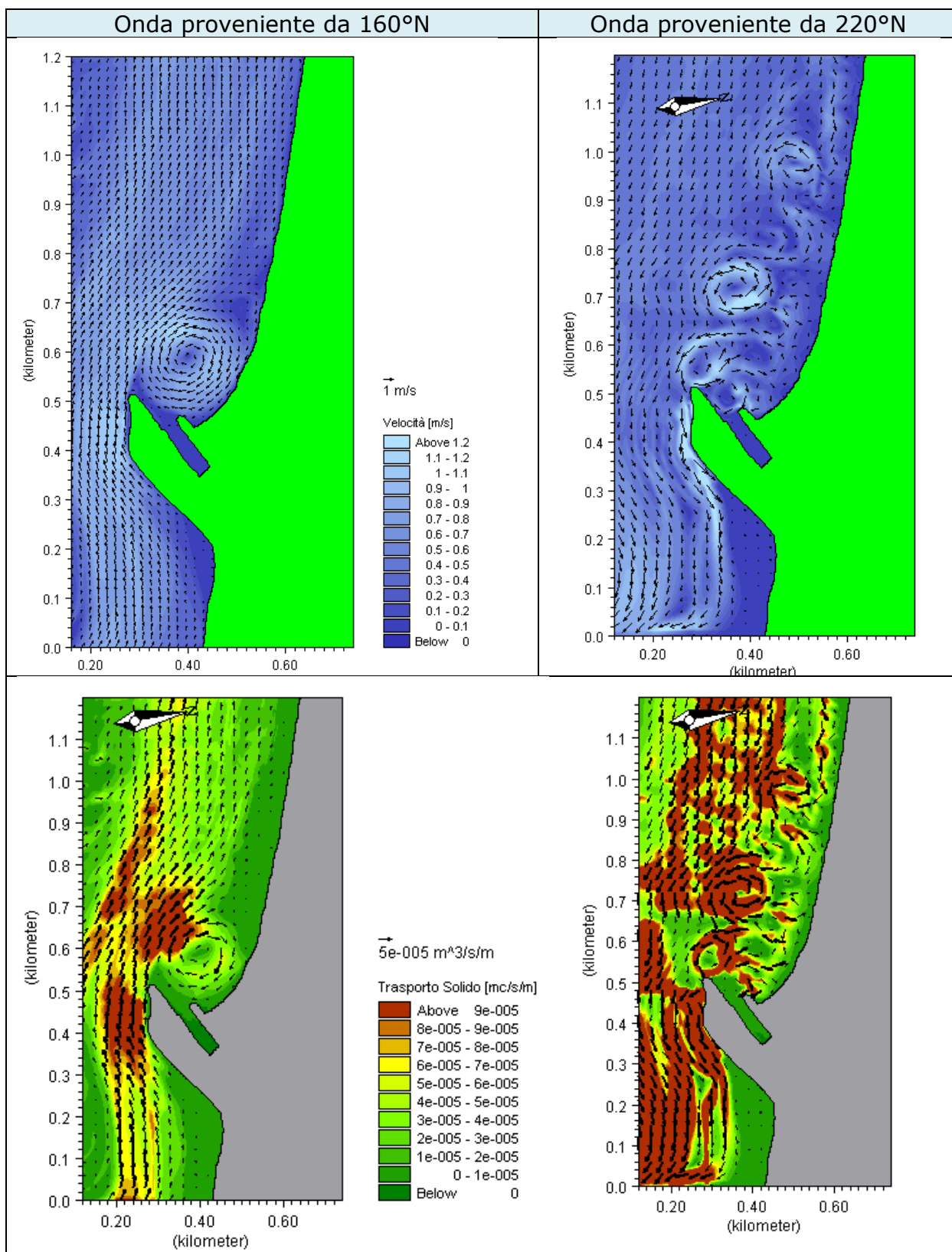


Figura 32 – Dettagli del campo di correnti e di trasporto solido nell'intorno del porto di Castiglione della Pescaia.

Analizzando il dettaglio riportato in Figura 32, si osserva la formazione di una corrente secondaria vorticoso, che è in grado di trasportare sabbia lungo riva, in direzione opposta alla corrente principale, che è responsabile dei fenomeni di insabbiamento dell'imboccatura

Il modello evidenzia che la capacità di trasporto di questa corrente è almeno 5 volte inferiore alla corrente principale che passa oltre la diga ed interessa una sezione almeno 6 volte inferiore. Conseguentemente, la portata solida che si muove verso l'imboccatura può essere stimata in circa 1/30 (3,3%) della portata solida che passa oltre la diga.

Il modello evidenzia inoltre che, una nuova struttura meno sporgente a mare rispetto a quella esistente, non interferisce con la corrente principale responsabile del mantenimento dell'equilibrio del litorale di Castiglione.

Le correnti di direzione opposta, oltre ad essere molto meno energetiche e meno frequenti, spiegano la formazione di barre molto mobili e con frequenti interruzioni, che si osservano nella morfologia dei fondali.

Le correnti più vorticoso e disordinate inducono spostamenti di sabbia meno regolari di quelli dovuti alle correnti principali. Anche in queste condizioni si evidenziano correnti secondarie che trasportano sabbia verso l'imboccatura. In tutti i casi si osservano bassi valori di trasporto vicino a riva che indicano una sostanziale stabilità delle spiagge nell'intorno del porto.

5. CONCLUSIONI

Lo studio descritto in questa relazione è stato condotto con l'obiettivo di determinare le sollecitazioni dovute al moto ondoso su una struttura di prolungamento del molo di sottoflutto del Porto Canale del Comune di Castiglione della Pescaia, da eseguire allo scopo di ridurre i problemi di insabbiamento presenti all'imboccatura.

Inoltre il presente studio è stato condotto con lo scopo di fornire la stima della massima lunghezza del prolungamento del molo, tale da non apportare modifiche al campo idrodinamico e di trasporto solido nell'intorno del porto.

Lo studio è stato suddiviso nelle fasi seguenti:

1. studio meteomarinario e analisi statistica delle onde a largo;
2. studio della propagazione del moto ondoso da largo fino alla profondità di 20m;
3. studio con il modello di dettaglio che riproduce tutta la fenomenologia delle trasformazioni ondose (rifrazione, shoaling, frangimento, diffrazione, riflessione e attrito al fondo) nell'area antistante l'imboccatura;
4. definizione delle caratteristiche del moto ondoso incidente sulla struttura necessarie per la progettazione.
5. Analisi del campo di correnti indotte nell'intorno del porto, da mareggiate caratterizzanti il clima ondoso.

I valori di altezza d'onda, necessari per la progettazione, sono stati ricavati per mareggiate eccezionali, calcolate con tempo di ritorno pari a 50 anni, incidenti sulla struttura di prolungamento del molo di sottoflutto, ipotizzandone una lunghezza fino a 90m.

I dettagli del campo idrodinamico evidenziano che una struttura che non sporga oltre le opere esistenti, non induce variazioni al trasporto dei sedimenti sui fondali esterni alla diga principale.

A tale scopo, per evitare ogni possibile riduzione di apporti di sabbia alle spiagge a nord del porto, il prolungamento del molo esistente non dovrebbe superare i 100m.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Articoli e testi scientifici utilizzati per lo studio

Battjes J. A. e Janssen J.P.F.M. (1978) – Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., Hamburg, ASCE ed., 1, pp. 569-587.

Berkhoff J.W.C. (1972) – Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng., Vancouver, ASCE ed., pp. 471-490.

Cappiotti, L. (2003) - Interazione onda-corrente. PhD thesis, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Firenze, pp. 140.

Hirsch C. (1991) – Numerical Computation of Internal and External Flows. John Wiley and Sons, New York.

Kirby J.T. (1986) – Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. Coastal Eng., 10: 355-378.

Kirby J.T. e Dalrymple R.A. (1986) – A parabolic equation for for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. J. Fluid Mech., 136: 453-466.

Putnam J.A. e Johnson J.W. (1949) – The dissipation of wave energy by bottom friction. Trans. Am. Geoph. Union, 30: 67-74.

Radder A.C. (1979) – On the parabolic equation method for water wave propagation. J. Fluid Mech., 95: 159-176.

Swart, D.H. (1974) – Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. Delft Hydraulics Laboratory, Publication 131.

Kofoed-Hansen H., Kerper D.R., Sørensen O.R. e Kirkegaard J. (2005) – Simulation of long wave agitation in ports and harbours using a time-domain Boussinesq model. Proc. 5th Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, Madrid, Spain.

Kofoed-Hansen H., Sloth P., Sørensen O.R. e Fuchs J. (2000)- Combined numerical and physical modeling of seiching in exposed new marina. Proc. 27th International Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia.

CIRIA, CUR, CETMEF (2007) - The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. Publisher CIRIA, London.