

# REGIONE ABRUZZO

COMUNE DI PESCARA



"DEVIAZIONE DEL PORTO CANALE DI PESCARA" (CUP D24B16000260001)  
"COMPLETAMENTO DEI NUOVI MOLI GUARDIANI" (CUP D21C18000210001)  
FASE A: REALIZZAZIONE DEL MOLO NORD

FASE B: INTERVENTI DI DEVIAZIONE DEL PORTO CANALE (CUP J24E21001210006)

FASE C: INTERVENTI DI COMPLETAMENTO

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

Titolo elaborato :

### STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSO NELLA ZONA DI INTERESSE

Progettazione:

Dott. Ing. Giuseppe Nicola BERNABEO  
Dott. Geol. Mattia IPPOLITO  
Dott. Arch. Lorenzo DI GIROLAMO

Supporto alla progettazione:

**AGiS** Ingegneria  
Via Sabotino, 46  
00195 ROMA

**MODIM**  
Via Monte Zebio 40  
00195 ROMA

Studi specialistici Idraulico-Marittimo:

Prof. Ing. Paolo DE GIROLAMO  
Prof. Ing. Marcello DI RISIO (UNIVAQ – UNIVERSITÀ DELL'AQUILA)

Responsabile Unico Del Procedimento:

Dott. Ing. Tommaso IMPICCIATORE

Scala:

Dimensioni foglio:

Elaborato:

MC-17-213-A

Data	Rev.	DESCRIZIONE	Disegnato:	Controllato:	Validato:
Maggio 2024	0	EMISSIONE			



**INTERVENTO MASTERPLAN ABRUZZO**

**“DEVIAZIONE DEL PORTO CANALE DI PESCARA” (PSRA/07)**

**STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO  
ONDOSO NELLA ZONA DI INTERESSE**

**Roma, giugno 2017**

**Prof. Ing. Paolo De Girolamo**



## **Indice**

1. PREMESSE, OBIETTIVI, DATI DI BASE METODOLOGIA DI LAVORO E SINTESI DEI RISULTATI	4
1.1 Premesse	4
1.2 Obiettivi	4
1.3 Dati di base	5
1.4 Metodologia di lavoro	5
1.5 Sintesi dei risultati	6
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	8
2.1 Inquadramento dell'area oggetto di studio	8
2.2 Informazioni batimetriche	11
2.3 Fonte dei dati meteo marini utilizzati per la redazione dello studio	12
3. SIMULAZIONI NUMERICHE: SWASH	14
3.1 Descrizione del modello	14
3.2 Definizione delle griglie di calcolo	14
3.3 Scenari simulati	22
4. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI	24
4.1 Simulazioni idrodinamiche: scenario S1	27
• Zona Z1	28
• Zona Z2	28
• Zona Z3	28
• Zona Z4	29
4.2 Simulazioni idrodinamiche: scenario S2	30
• Zona Z2	31
• Zona Z3	31
• Zona Z4	32
4.3 Simulazioni idrodinamiche: scenario S3	33
• Zona Z2	34
• Zona Z3	34
• Zona Z4	35
4.4 Simulazioni idrodinamiche: scenario S4	36
• Zona Z1	37

•	Zona Z2	37
•	Zona Z3	37
•	Zona Z4	38
4.5	Simulazioni idrodinamiche: scenario S5	39
•	Zona Z2	40
•	Zona Z3	40
•	Zona Z4	41
4.6	Simulazioni idrodinamiche: scenario S6	42
•	Zona Z2	43
•	Zona Z3	43
•	Zona Z4	44
4.7	Simulazioni idrodinamiche: scenario S7	45
•	Zona Z1	46
•	Zona Z2	46
•	Zona Z3	46
•	Zona Z4	47
4.8	Simulazioni idrodinamiche: scenario S8	48
•	Zona Z2	49
•	Zona Z3	49
•	Zona Z4	50
4.9	Simulazioni idrodinamiche: scenario S9	51
•	Zona Z2	52
•	Zona Z3	52
•	Zona Z4	53
4.10	Simulazioni idrodinamiche: scenario S10	54
5.	CONCLUSIONI	57

## **1. PREMESSE, OBIETTIVI, DATI DI BASE METODOLOGIA DI LAVORO E SINTESI DEI RISULTATI**

### **1.1 Premesse**

Con riferimento all'Intervento Masterplan Abruzzo "Deviazione del porto canale di Pescara" l'Azienda Regionale Attività Produttive (ARAP) della Regione Abruzzo, con lettera di trasmissione prot. n. 1030 del 3/4/2017, ha dato incarico al Prof. Ing. Paolo De Girolamo di redigere una serie di analisi e studi - definiti in dettaglio nell'offerta del professionista del 27/03/2017 protocollata dall'ARAP al n. 932 - a supporto delle attività di progettazione inerenti le opere necessarie per la deviazione del tratto terminale del fiume Pescara, secondo quanto previsto dal nuovo Piano Regolatore del Porto di Pescara (PRP 2008) approvato dalla Giunta Regionale in data 25/10/2016.

La presente relazione costituisce lo "Studio della penetrazione del moto ondoso nella zona di interesse" redatto a supporto delle attività di progettazione.

Per la realizzazione del presente studio il Prof. Paolo De Girolamo si è avvalso della collaborazione dell'Ing. Alessandro Romano.

### **1.2 Obiettivi**

Coerentemente alle specifiche di incarico e alle necessità delle attività di progettazione la finalità del presente studio è stata quella di definire l'influenza delle caratteristiche relative alle opere di delimitazione interna del canale deviato in relazione ai fenomeni di penetrazione del moto ondoso nella zona di interesse tenendo anche conto dell'influenza della corrente fluviale sulla penetrazione delle onde.

I risultati dello studio sono propedeutici per il dimensionamento strutturale e funzionale delle opere in progetto.

Rispetto agli studi sviluppati a supporto del PRP 2008, il presente studio ha preso in esame la geometria delle sole opere previste per l'attuazione della prima fase del PRP 2008 che riguarda la sola deviazione del tratto terminale del fiume Pescara. Tale deviazione risulta indispensabile per separare il fiume dal porto commerciale e di conseguenza per ridurre drasticamente i fenomeni di insabbiamento che nell'ultimo decennio hanno fortemente limitato l'utilizzo dello stesso porto. Inoltre la deviazione del fiume consentirà di portare la sua foce su fondali maggiori rispetto a quelli attuali, ottenendo il duplice beneficio di garantire un netto miglioramento delle capacità di deflusso delle acque a ragione della attesa riduzione dei fenomeni di insabbiamento della sua foce e di ottenere una migliore diluizione delle acque fluviali che sfociano a mare garantendo di conseguenza un rilevante miglioramento della qualità delle acque marine lungo i litorali posti ad Est ed a Ovest del porto canale come dimostrato dagli studi eseguiti a supporto del PRP 2008.

La configurazione delle opere esaminata risulta coerente con la geometria prevista dal PRP 2008 ad eccezione del tratto di deviazione del fiume posto in corrispondenza dell'attuale Ponte del Mare di recente realizzazione che consente il collegamento ciclo-pedonale tra le sponde Est ed Ovest del fiume.

In corrispondenza al ponte si è reso necessario mantenere l'attuale larghezza del fiume a causa della presenza dei due blocchi di fondazione dei piloni del ponte stesso che ha indotto i progettisti a evitare l'interferenza tra il nuovo assetto fluviale e tali fondazioni. Per tale aspetto si rimanda alla relazione di progetto.

### 1.3 Dati di base

I dati di base per la redazione del presente lavoro sono costituiti dagli stati di mare di progetto ottenuti nell'ambito dello Studio Metomarino e riportati nella Tabella 8-3 dello stesso studio.

Per quanto riguarda le batimetrie si è fatto riferimento a quelle rilevate dall'ARAP nel mese di maggio 2017 che sono state integrate nell'area esterna alle opere foranee con le batimetrie desunte dalle carte nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina CN 34, CN35 e CN 211.

### 1.4 Metodologia di lavoro

Le simulazioni numeriche sono state effettuate con il codice SWASH (Simulating Waves till Shore, Zijlema et al., 2011 e di Smit et al., 2013). SWASH è un modello numerico "multi-purpose" che permette di simulare moti a superficie libera in condizioni idrostatiche o non idrostatiche in una, due o tre dimensioni, e, tramite la risoluzione delle equazioni non lineari delle onde in acqua bassa (Non Linear Shallow Water Equations, NLSWE) comprensive dei termini non idrostatici della pressione, permette di simulare una vasta gamma di fenomeni fisici connessi alla modellazione delle aree costiere, fluviali, lagunari e deltizie.

Per il caso oggetto di studio, data la complessità dei fenomeni fisici in gioco si è utilizzato un approccio numerico basato sulla rotazione delle griglie in funzione dell'angolo di attacco del moto ondoso. Si sono pertanto individuate tre direzioni principali di attacco del moto ondoso largo (N, NE, E) reputate, in sede di modellazione numerica, di interesse per la valutazione della risposta alle forzanti ondose dell'area oggetto di studio.

La configurazione delle opere esaminate è quella prevista nella prima fase del nuovo piano regolatore portuale (PRP 2008) del Porto di Pescara che prevede la deviazione del tratto terminale del fiume fino a raggiungere e ad oltrepassare l'attuale diga foranea.

Le simulazioni numeriche hanno riguardato dieci diversi scenari (denominati S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 e S10) ritenuti rappresentativi delle condizioni di maggior interesse per le simulazioni numeriche volte a valutare le prestazioni idrodinamiche della soluzione di progetto.

Come accennato in precedenza, gli scenari identificati sono stati dedotti dallo Studio Meteomarino allegato al presente progetto e hanno riguardato condizioni di moto ondoso estreme caratterizzate dai tempi di ritorno di 2, 10 e 50 anni di interesse sia ai fini dell'operatività portuale sia ai fini del dimensionamento strutturale delle opere marittime. Tempi di ritorno superiori a 50 anni non sono stati presi in esame poiché per tali condizioni il frangimento del moto ondoso limita le massime altezze d'onda in grado di interessare le opere.

I dieci scenari analizzati sono caratterizzati dai seguenti parametri relativi al moto ondoso incidente e al sovrizzo di tempesta:

- **S1:**  $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.46$  m,  $T_p = 7.21$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;
- **S2:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.81$  m,  $T_p = 7.38$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;
- **S3:**  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.05$  m,  $T_p = 6.84$  s,  $\theta = 68^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;
- **S4:**  $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.09$  m,  $T_p = 8.11$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.80$  m;
- **S5:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.28$  m,  $T_p = 8.32$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.80$  m;
- **S6:**  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.04$  m,  $T_p = 7.80$  s,  $\theta = 68^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.80$  m;
- **S7:**  $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.34$  m,  $T_p = 8.82$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.95$  m;
- **S8:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.52$  m,  $T_p = 9.11$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.95$  m;
- **S9:**  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.41$  m,  $T_p = 8.58$  s,  $\theta = 68^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.95$  m;
- **S10:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.46$  m,  $T_p = 7.21$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m,  
 $Q = 49.22$  m<sup>3</sup>/s;

dove:

- $\theta_0$  è la direzione di provenienza del moto ondoso a largo (acqua profonda);
- $\theta$  è la direzione del moto ondoso propagato in costa su un fondale di circa 10.0 m;
- $T_R$  è il tempo di ritorno dello stato di mare esaminato;
- $H_{m0}$  e  $T_p$  sono rispettivamente l'altezza d'onda significativa e il periodo di picco spettrale imposte lungo il contorno di largo utilizzato per le simulazioni numeriche;
- $S$  è il valore del sovrizzo del livello medio marino utilizzato;
- $Q$  è la portata media annuale del fiume Pescara che è stata posta sulla base degli studi idraulici eseguiti a supporto del presente progetto pari a  $Q = 49.22$  m<sup>3</sup>/s .

Con riferimento agli scenari sopra indicati, per ogni tempo di ritorno si sono esaminate tre direzioni di attacco del moto ondoso a largo ( $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$  e  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ) provenienti dall'intero settore di traversia. Le corrispondenti direzioni in prossimità della costa  $\theta$  che hanno costituito le condizioni al contorno per lo studio di penetrazione del moto ondoso, sono state determinate mediante l'analisi della propagazione del moto ondoso da largo a riva eseguito nell'ambito dello Studio Meteomarina con il modello SWAN.

Si evidenzia che lo studio dell'interazione tra moto ondoso e portata fluviale è stato limitato al solo scenario S10 in quanto si è riscontrato che l'effetto della portata fluviale è quello di ridurre la capacità di penetrazione delle onde all'interno dell'alveo fluviale e di conseguenza si è ritenuto cautelativo per le finalità della progettazione trascurare nelle altre simulazioni questo effetto.

Poichè il modello integra nel tempo le equazioni differenziali che regolano il fenomeno, la durata temporale delle simulazioni svolge un ruolo importante dal punto di vista applicativo. Tale durata è stata scelta in modo opportuno al fine di portare il campo idrodinamico in condizioni stazionarie.

## 1.5 Sintesi dei risultati

Si riportano di seguito le principali conclusioni che possono essere tratte dallo studio svolto.

Le simulazioni mostrano che lungo il tratto terminale del fiume deviato si verifica una veloce attenuazione del moto ondoso incidente anche con onde provenienti da direzioni prossime a quelle dell'asse della foce fluviale che presentano quindi una potenziale capacità di penetrazione lungo il fiume. L'attenuazione del moto ondoso è tale da non dar luogo per alcuna condizione

esaminata alla risalita del moto ondoso nel porto canale dove è assicurata una assoluta tranquillità.

Questi risultati si sono ottenuti in assenza di corrente fluviale, la quale deve essere considerata cautelativa rispetto alla penetrazione delle onde nel fiume. Infatti si è verificato che la presenza della corrente fluviale riduce ulteriormente la capacità di penetrazione delle onde. A tal riguardo si evidenzia che il fiume Pescara presenta mediamente durante tutto l'anno una portata fluviale e quindi una corrente abbastanza sostenuta.

La capacità di attenuazione rispetto al moto ondoso incidente è da imputare alle seguenti ragioni:

- la forma planimetrica del canale deviato caratterizzata da una giacitura curvilinea;
- la presenza del pennello posto in sinistra fluviale;
- la soluzione costruttiva delle opere di deviazione che nel loro tratto terminale sono previste dal PRP del tipo a gettata e quindi in grado di assorbire le onde incidenti.

Si evidenzia infine che dal punto di vista costruttivo non è necessario realizzare lungo i muri di sponda del canale deviato, previsti in palancole, dispositivi particolari per l'attenuazione del moto ondoso.

Questo risultato risulta di estrema importanza. Infatti la storia del porto mostra che una delle ragioni che spinse a realizzare l'antemurale, era costituita dalla necessità di ridurre la penetrazione del moto ondoso all'interno dello stesso porto canale che è caratterizzato da una giacitura rettilinea e privo di pareti in grado di assorbire le onde che risalgono la foce fluviale.

Pertanto, uno dei timori che c'era nel deviare il fiume portando la sua foce oltre l'antemurale era quello relativo alla possibilità di incrementare, rispetto alla situazione attuale, la capacità delle onde di risalire il tratto terminale del fiume. I presenti risultati confermano che questo problema è stato superato dalle soluzioni individuate con il nuovo Piano Regolatore Portuale.

I risultati dello studio sono inoltre propedeutici alla progettazione delle opere oggetto della prima fase di attuazione del PRP.

La struttura della relazione è la seguente. Nel capitolo seguente viene fornita una breve descrizione dell'inquadratura geografica e delle condizioni batimetriche dell'area oggetto di studio ( si rimanda allo Studio Meteomarine per i necessari approfondimenti). Successivamente vengono proposti i capitoli che descrivono le condizioni al contorno utilizzate per le simulazioni e i risultati delle simulazioni idrodinamiche.

## 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

### 2.1 Inquadramento dell'area oggetto di studio

Il Porto di Pescara (PE), ubicato presso la foce dell'omonimo fiume, si affaccia sul Mar Adriatico. In Figura 1, Figura 2 e Figura 3 vengono riportati rispettivamente l'inquadramento geografico a larga scala, la vista aerea del Porto di Pescara e dell'area prospiciente il porto che rappresenta l'area di interesse ai fini del presente studio.



Figura 1. Inquadramento geografico a grande scala.



Figura 2. Inquadramento geografico a media scala: Porto di Pescara



Figura 3. Dettaglio dell'area oggetto di studio

Le immagini di Figura 2 e Figura 3 mostrano la foce fluviale e il porto canale nella configurazione attuale. Oggi una parte del porto si sviluppa all'interno del tratto terminale fiume (porto canale) dove, nella darsena posta in asse al canale, trovano ricovero i pescherecci e la nautica minore. Il porto commerciale è localizzato sul terrapieno di levante posto all'esterno della foce fluviale. Il porto commerciale e l'imboccatura del porto canale sono protetti dall'antemurale che è costituito da una diga frangiflutti a gettata armata in tetrapodi distaccata dalla costa con giacitura ad S. Le opere relative al porto canale e a quello commerciale vennero progettate dal Genio Civile per le OO.MM. di Ancona il quale curò il precedente Piano Regolatore Portuale che risale agli anni '80 del secolo scorso. Ad Est del porto canale, idraulicamente separato dal fiume, è localizzato il porto turistico di Pescara.

Nella Figura 4 è riportata la configurazione delle opere di prima fase prevista dal nuovo PRP 2008 la quale è stata utilizzata per la redazione del presente studio. Sostanzialmente le opere marittime previste realizzano la deviazione del tratto terminale del fiume mediante una doppia curva, spostando la foce fluviale oltre l'antemurale esistente. In questo modo il porto commerciale viene idraulicamente separato dal fiume evitando completamente i fenomeni di sedimentazione attualmente causati sia dal trasporto solido costiero che da quello fluviale. Lo spostamento della foce fluviale su fondali superiori agli 8,0÷ 9,0 m consentirà inoltre di ridurre drasticamente rispetto alla situazione attuale i fenomeni di insabbiamento della foce fluviale. Inoltre si otterrà il beneficio di aumentare la capacità di diluizione delle acque fluviali attualmente inquinate dagli scarichi urbani migliorando la qualità delle acque costiere.

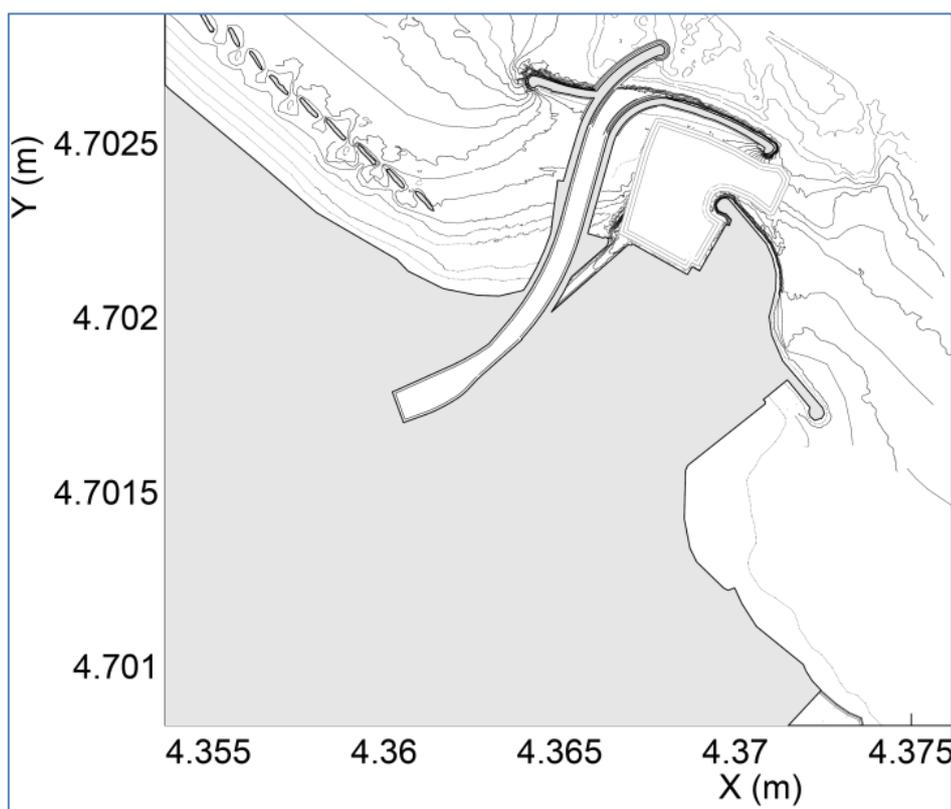


Figura 4 - Deviazione del tratto terminale del fiume Pescara prevista dal PRP 2008.

## 2.2 Informazioni batimetriche

Le informazioni batimetriche, necessarie per le simulazioni idrodinamiche, sono state ricavate da diverse fonti. In primo luogo si sono utilizzati i dati digitalizzati della carta nautica in scala 1:100.000 che mostra il tratto di costa che va da Ortona alla foce del Tronto. Le informazioni batimetriche delle carte nautiche sono state utilizzate per ricostruire la batimetria a grande scala del paraggio costiero. I dati batimetrici di maggiore dettaglio sono invece stati ricavati utilizzando il rilievo batimetrico eseguito nel maggio 2017 dall'ARAP. In Figura 5 e in Figura 6 vengono riportati i rilievi batimetrici e la batimetria di dettaglio dell'area oggetto di studio.

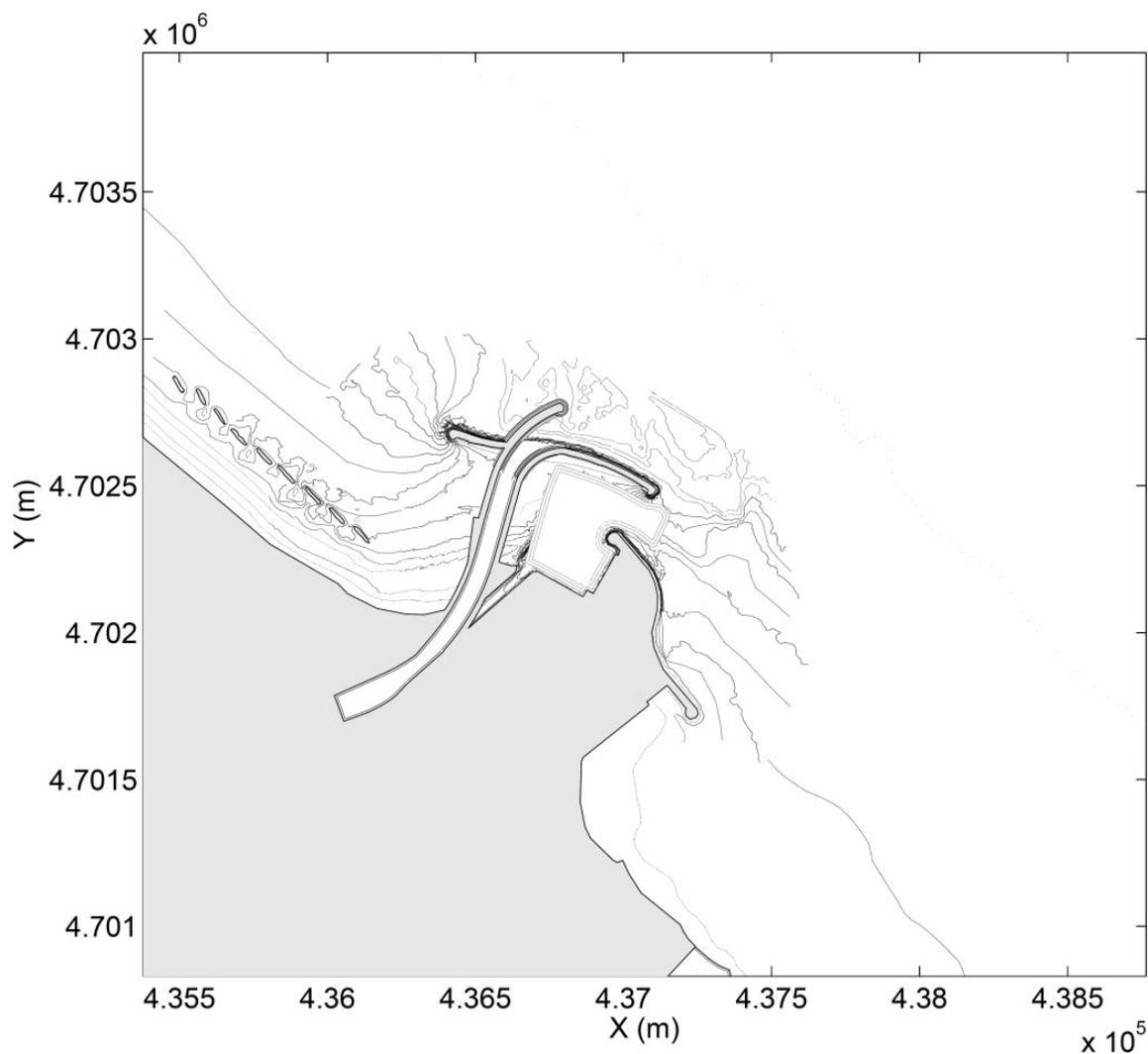


Figura 5. Rilievi batimetrici dell'area oggetto di studio.

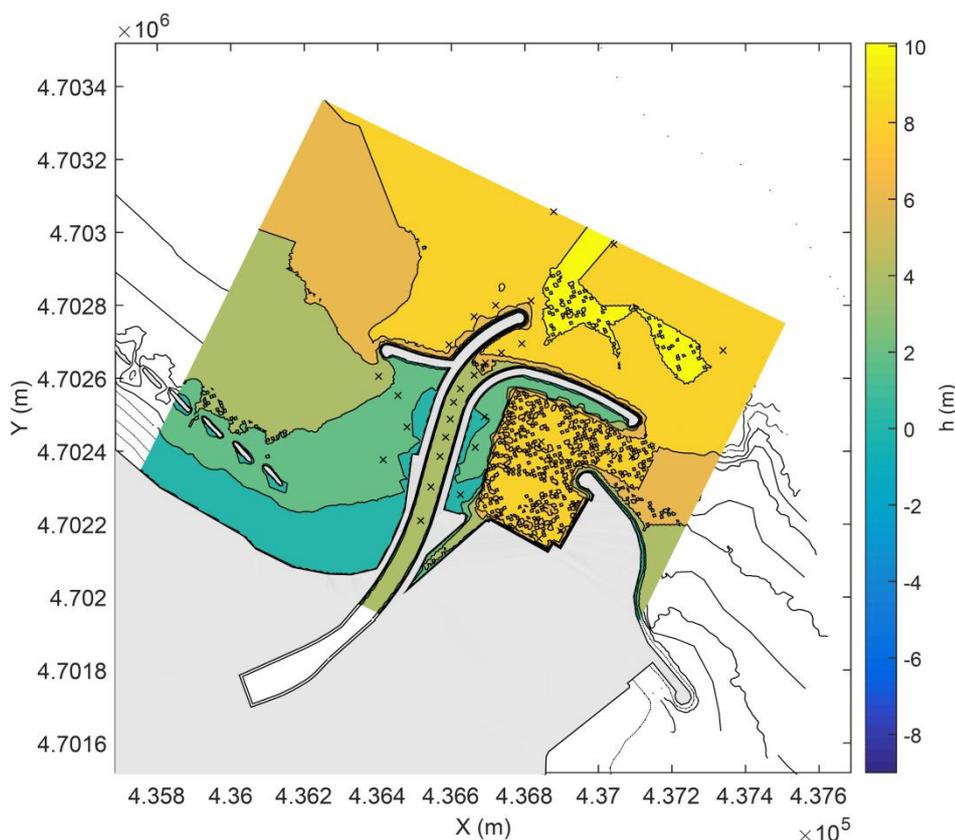


Figura 6. Rilievi batimetrici dell'area oggetto di studio e batimetria nel dominio di calcolo.

### 2.3 Fonte dei dati meteo marini utilizzati per la redazione dello studio

Le simulazioni numeriche eseguite per il presente studio hanno riguardato la penetrazione del moto ondoso in relazione alla configurazione planimetrica di prima fase del PRP 2008 indicata nella Figura 4 e nella Figura 6.

Data la complessità del punto di vista computazionale del codice utilizzato, le simulazioni hanno riguardato l'area prospiciente le opere foranee, il tratto terminale del fiume deviato, il porto commerciale e la costa posta ad Ovest della foce. Si è esclusa dalle simulazioni la zona del porto turistico localizzata ad Est del porto canale perché non di interesse ai fini del presente lavoro.

Gli scenari analizzati in termini di forzanti idrauliche (moto ondoso e livelli) sono stati desunti dallo Studio Meteomarinò allegato al presente progetto ed in particolare dalla Tabella 8-3 dello stesso studio riportata nella seguente Tabella 1. La tabella riporta le onde di progetto per un punto posto a largo dell'antemurale su un fondale dell'ordine dei 10,0 m. Tali onde sono state definite dallo studio meteomarinò propagando a riva con il codice SWAN le onde di progetto definite a largo in condizioni di acqua profonda.

TR 2 anni														
Event	Tr	SWL [m]	Hs0 [m]	Tp0 [s]	Dir0	Uw [m/s]	Dirw	Hmo [m]	RTP [s]	Tm01 [s]	Tm10 [s]	Dir	Depth [m]	Setup [m]
00101	2	0.65	4.9	9.3	0	17.1	345	4.46	8.98	7.21	8.18	26.06	10.13	-0.02
00102	2	0.65	4.9	9.3	30	17.1	20	4.81	8.98	7.38	8.3	39.71	10.14	-0.01
00201	2	0.65	4.1	8.8	45	15.1	35	4.31	8.98	6.83	7.71	46.89	10.13	-0.02
00202	2	0.65	4.1	8.8	75	15.1	80	4.28	8.98	6.89	7.76	62.27	10.14	-0.01
00203	2	0.65	4.1	8.8	90	15.1	100	4.05	8.98	6.84	7.74	68.64	10.14	-0.01
00204	2	0.65	4.1	8.8	115	15.1	145	3.16	8.98	6.52	7.63	77.24	10.15	0
TR 10 anni														
Event	Tr	SWL [m]	Hs0 [m]	Tp0 [s]	Dir0	Uw [m/s]	Dirw	Hmo [m]	RTP [s]	Tm01 [s]	Tm10 [s]	Dir	Depth [m]	Setup [m]
10101	10	0.80	6.3	10.1	0	20.5	345	5.09	9.87	8.11	9.2	28.21	10.3	0
10102	10	0.80	6.3	10.1	30	20.5	20	5.28	9.87	8.32	9.36	41.06	10.33	0.03
10201	10	0.80	5.4	9.6	45	18.3	35	5.16	9.87	7.86	8.78	47.51	10.31	0.01
10202	10	0.80	5.4	9.6	75	18.3	80	5.14	9.87	7.9	8.82	61.48	10.32	0.02
10203	10	0.80	5.4	9.6	90	18.3	100	5.04	9.87	7.8	8.77	67.31	10.32	0.02
10204	10	0.80	5.4	9.6	115	18.3	145	4.26	9.87	7.44	8.58	75.42	10.3	0
TR 50 anni														
Event	Tr	SWL [m]	Hs0 [m]	Tp0 [s]	Dir0	Uw [m/s]	Dirw	Hmo [m]	RTP [s]	Tm01 [s]	Tm10 [s]	Dir	Depth [m]	Setup [m]
20101	50	0.95	7.7	10.9	0	24	345	5.34	10.86	8.82	10.09	29.69	10.49	0.04
20102	50	0.95	7.7	10.9	30	24	20	5.52	10.86	9.11	10.27	42.36	10.52	0.07
20201	50	0.95	6.6	10.2	45	21.3	35	5.45	9.87	8.54	9.58	47.69	10.51	0.06
20202	50	0.95	6.6	10.2	75	21.3	80	5.5	9.87	8.73	9.66	60.88	10.52	0.07
20203	50	0.95	6.6	10.2	90	21.3	100	5.41	10.86	8.58	9.59	66.26	10.52	0.07
20204	50	0.95	6.6	10.2	115	21.3	145	5.01	9.87	8.23	9.36	74.26	10.47	0.02

Tabella 1 - Condizioni di moto ondoso estreme nel punto sottocosta P0 ottenute con il modello SWAN (vedi Studio Meteomarina).

### 3. SIMULAZIONI NUMERICHE: SWASH

#### 3.1 Descrizione del modello

Il modello numerico utilizzato per le simulazioni numeriche è SWASH (Simulating Waves till Shore). Il codice numerico, sviluppato dall'Università TU Delft (<http://swash.sourceforge.net/>) è descritto in numerose memorie scientifiche pubblicate su riviste internazionali (si vedano ad esempio i lavori di Zijlema et al., 2011 e di Smit et al., 2013).

SWASH è un modello numerico “multi-purpose” che permette di simulare moti a superficie libera in condizioni idrostatiche o non idrostatiche in una, due o tre dimensioni. Le equazioni risolte dal codice sono le equazioni non lineari delle acque basse (Non Linear Shallow Water Equations, NLSWE) comprensive dei termini non idrostatici della pressione. Il modello permette inoltre di simulare i principali fenomeni fisici connessi alla modellazione delle aree costiere, fluviali, lagunari e deltizie. La versatilità e la robustezza del codice numerico permettono agevolmente di impiegare il codice stesso in una vasta gamma di applicazioni legate all'ingegneria idraulica e marittima, come ad esempio:

- propagazione del moto ondoso su spiagge;
- penetrazione ondosa nei porti;
- simulazione di onde di piena in ambito fluviale;
- intrusione salina in un estuario;
- moti oceanici a grande scala;
- propagazione di onde e di marea e simulazione di “storm surge”.

Con particolare riferimento alle applicazioni legate all'ingegneria costiera e alle costruzioni marittime è opportuno sottolineare che SWASH risulta essere particolarmente utile e versatile per la simulazione dei seguenti fenomeni fisici:

- propagazione del moto ondoso (dispersione in frequenza, shoaling, rifrazione e diffrazione);
- interazioni non lineari tra onde (wave-wave interactions);
- frangimento del moto ondoso;
- wave run-up e run-down;
- interazione tra moto ondoso e strutture (riflessione indotta dalle strutture);
- interazione onda-corrente;
- correnti indotte dal moto ondoso.

Si evidenzia che nel caso in esame risulta di interesse studiare anche l'interazione tra moto ondoso e corrente fluviale ai fini di valutare la capacità di penetrazione delle onde all'interno del tratto fluviale deviato. Questo aspetto è di interesse ai fini navigazionali della foce fluviale e per l'ormeggio delle imbarcazioni lungo le sponde del porto canale.

#### 3.2 Definizione delle griglie di calcolo

Per l'applicazione del modello, ovvero per la risoluzione delle equazioni differenziali alle derivate spaziali che regolano i processi fisici da simulare, è necessario utilizzare una discretizzazione spaziale tale da essere in grado di risolvere nello spazio la fase delle onde nella loro evoluzione e di riprodurre la geometria delle opere marittime da simulare incluso il loro coefficiente di riflessione. Per conseguire tali obiettivi l'ordine di grandezza della risoluzione spaziale da

utilizzare è di alcuni metri. Ovviamente all'aumentare della porzione di mare da simulare aumenta, a parità di discretizzazione spaziale, il numero di nodi della griglia di calcolo e quindi la complessità computazionale del problema (tempi di calcolo).

Per raggiungere un giusto compromesso tra queste contrapposte esigenze l'approccio che comunemente si segue è quello di porre il contorno di largo della griglia di calcolo su profondità intermedie in una zona in cui la batimetria risulta abbastanza regolare. Allo stesso tempo la griglia di calcolo, di forma rettangolare, si orienta in modo tale che il contorno di largo della stessa griglia risulti ortogonale alla direzione delle onde da simulare. Sostanzialmente quindi per ogni direzione da simulare si deve progettare una griglia di calcolo apposita.

Pertanto nel progettare l'applicazione numerica il primo passo è quello di definire le direzioni del moto ondoso da simulare e quindi per ciascuna direzione l'orientamento della griglia di calcolo.

Con riferimento alla Figura 6 ai fini della penetrazione del moto ondoso le aree di interesse sono tre, ovvero l'area posta ad Ovest del canale dragato, l'area posta ad Est del canale dragato (darsena commerciale), e la nuova foce fluviale. Ovviamente in relazione a ciascuna area è associata una particolare direzione del moto ondoso che è in grado di causare la massima penetrazione delle onde.

In conclusione quindi si è deciso di impostare tre griglie di calcolo.

Le direzioni del moto ondoso incidente da associare a ciascuna griglia di calcolo sono state definite utilizzando la Tabella 1.

Nella Tabella 1 sono riportate per ciascun tempo di ritorno sei direzioni del moto ondoso incidente da largo comprese tra  $0^\circ$  e  $115^\circ$  N, ovvero in grado di coprire l'intero settore di traversia a largo. Tale settore tende a restringersi avvicinando a riva ad opera dei processi di rifrazione subiti dalle onde. Allo stesso tempo le onde che presentano a largo una maggiore inclinazione rispetto alla costa tendono a ridurre la propria altezza propagandosi a riva.

Con riferimento alla Tabella 1 e al  $TR = 2$  anni, per quanto riguarda la zona posta ad Ovest della foce fluviale, le onde che presentano una maggiore capacità di penetrazione sono quelle provenienti a largo da Nord ( $0^\circ$  N) alle quali risulta associata su fondali di circa 10,0 m, assimilabili a quelli in corrispondenza dei quali le onde verranno generate, una direzione di circa  $26^\circ$  N. Questa direzione aumenta solo di pochi gradi all'aumentare del tempo di ritorno. In conclusione si è deciso, utilizzando un approccio cautelativo, di utilizzare la direzione  $26^\circ$  N per studiare la massima penetrazione delle onde nella zona posta ad Ovest del canale deviato.

Applicando lo stesso ragionamento per la zona posta ad Est del canale dragato si è scelta la direzione a largo pari a  $90^\circ$  N alla quale corrisponde sui fondali oggetto della generazione delle onde la direzione  $68^\circ$  N. Si evidenzia che alla direzione  $115^\circ$  N che potrebbe dar luogo ad una penetrazione del moto ondoso nella darsena commerciale maggiore rispetto a quella prodotta dalla  $90^\circ$  N risulta associata una sensibile riduzione di altezza d'onda e di conseguenza si è preferito esaminare la direzione  $68^\circ$  N la quale peraltro risulta di interesse anche al fine di studiare la penetrazione del moto ondoso all'interno della foce fluviale.

Per quanto riguarda le azioni esercitate dal moto ondoso sulla testata del pennello Nord di delimitazione della nuova foce fluviale, la direzione di attacco peggiore del moto ondoso risulta di circa  $68^\circ$  N. A tale direzione corrisponde la direzione a largo di circa  $30^\circ$  N.

In conclusione quindi si è deciso di generare tre griglie computazionali ciascuna denominata GC1, GC2 e GC3 alle quali risultano associate le seguenti direzioni a largo e in costa:

- **GC1** -  $00^{\circ}$  N a largo –  $26^{\circ}$  N in costa;
- **GC1** -  $30^{\circ}$  N a largo –  $39^{\circ}$  N in costa;
- **GC1** -  $90^{\circ}$  N a largo –  $68^{\circ}$  N in costa.

I corrispondenti angoli di rotazione delle griglie sono i seguenti:

- **GC1** = Griglia Computazionale 1, angolo di rotazione  $\alpha = 116^{\circ}$ N;
- **GC2** = Griglia Computazionale 2, angolo di rotazione  $\alpha = 129^{\circ}$ N;
- **GC3** = Griglia Computazionale 3, angolo di rotazione  $\alpha = 158^{\circ}$ N;

Si noti che, secondo la convenzione adottata, l'angolo di rotazione  $\alpha$  è da intendersi come l'angolo formato tra il lato inferiore della griglia (che per  $\alpha = 90^{\circ}$ N avrebbe giacitura parallela alla congiungente Est-Ovest) e il Nord geografico.

Le tre griglie di calcolo sono rappresentate nella Figura 7, GC1, nella Figura 8, GC2 e nella Figura 9 GC3.

Si precisa che le 3 griglie sono esattamente identiche sia per quanto concerne l'estensione (lunghezza e larghezza) che per quanto riguarda la risoluzione spaziale (passo di griglia o di maglia). Le griglie sono composte da  $280 \times 240$  maglie e hanno un'estensione di  $1400 \text{ m} \times 1200 \text{ m}$ . Pertanto il passo di maglia scelto è rispettivamente pari a  $dx = 5.0 \text{ m}$ ,  $dy = 5.0$ . Si noti che l'approccio basato sulle griglie ruotate permette di disporre la giacitura del lato lungo della griglia quanto più possibile parallela ai fronti d'onda incidenti. Tale aspetto offre l'indubbio vantaggio di minimizzare gli errori numerici sul contorno di generazione.

In ogni griglia la generazione del moto ondoso viene effettuata imponendo lungo il contorno di generazione (vedi Figura 7, Figura 8, e Figura 9) la serie temporale di elevazione della superficie libera  $\eta(t)$  desiderata.

Lungo i 3 bordi restanti (Sud, Ovest, Est del riferimento locale) sono stati realizzati degli opportuni strati di assorbimento, o "sponge layer", aventi larghezza pari a  $200 \text{ m}$ , predisposti in modo tale da assorbire il moto ondoso incidente senza generare onde riflesse. In tal modo vengono riprodotte le condizioni di radiazione delle onde incidenti.

Per quanto riguarda la discretizzazione temporale del modello si è utilizzato un intervallo temporale di integrazione ( $dt$ ) pari a  $0.01 \text{ s}$ . La scelta dell'intervallo di discretizzazione temporale è particolarmente importante per assicurare la stabilità numerica del modello e quindi l'accuratezza dei risultati che è espressa come noto dal numero di Courant.

Il modello numerico è in grado di simulare differenti coefficienti di riflessione per le opere marittime da simulare mediante l'utilizzo di cosiddetti strati porosi o "porous layers". I coefficienti utilizzati sono riportati nella Figura 10.

Infine vengono riportati in Figura 11, in Figura 12 e in Figura 13 gli andamenti della batimetria all'interno delle tre griglie computazionali utilizzate (GC1, GC2 e GC3).

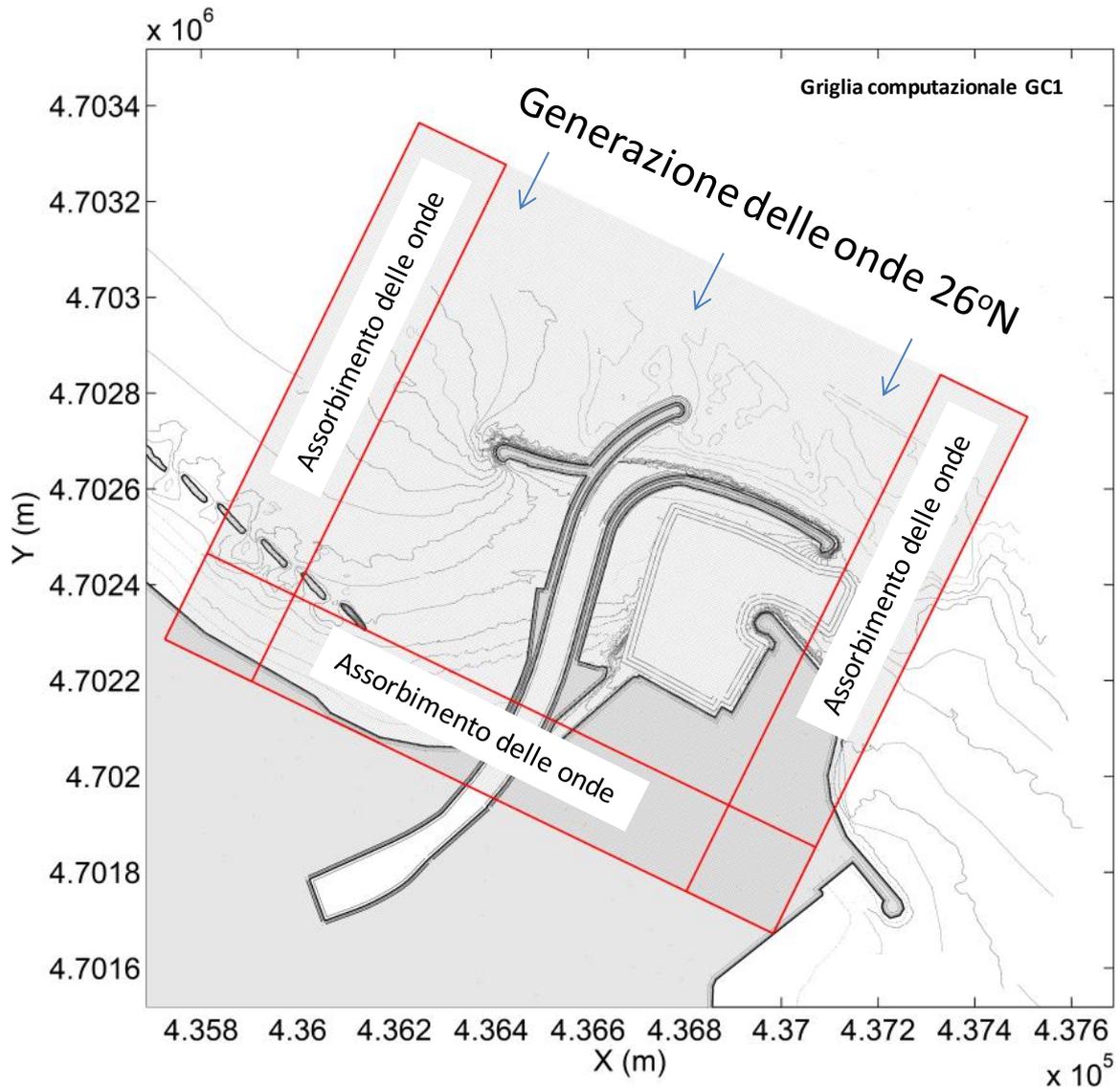


Figura 7. Schema di definizione della griglia di calcolo GC1  $dx = dy = 5.0$  m. Nota: le linee in rosso identificano l'ubicazione degli sponge layers.

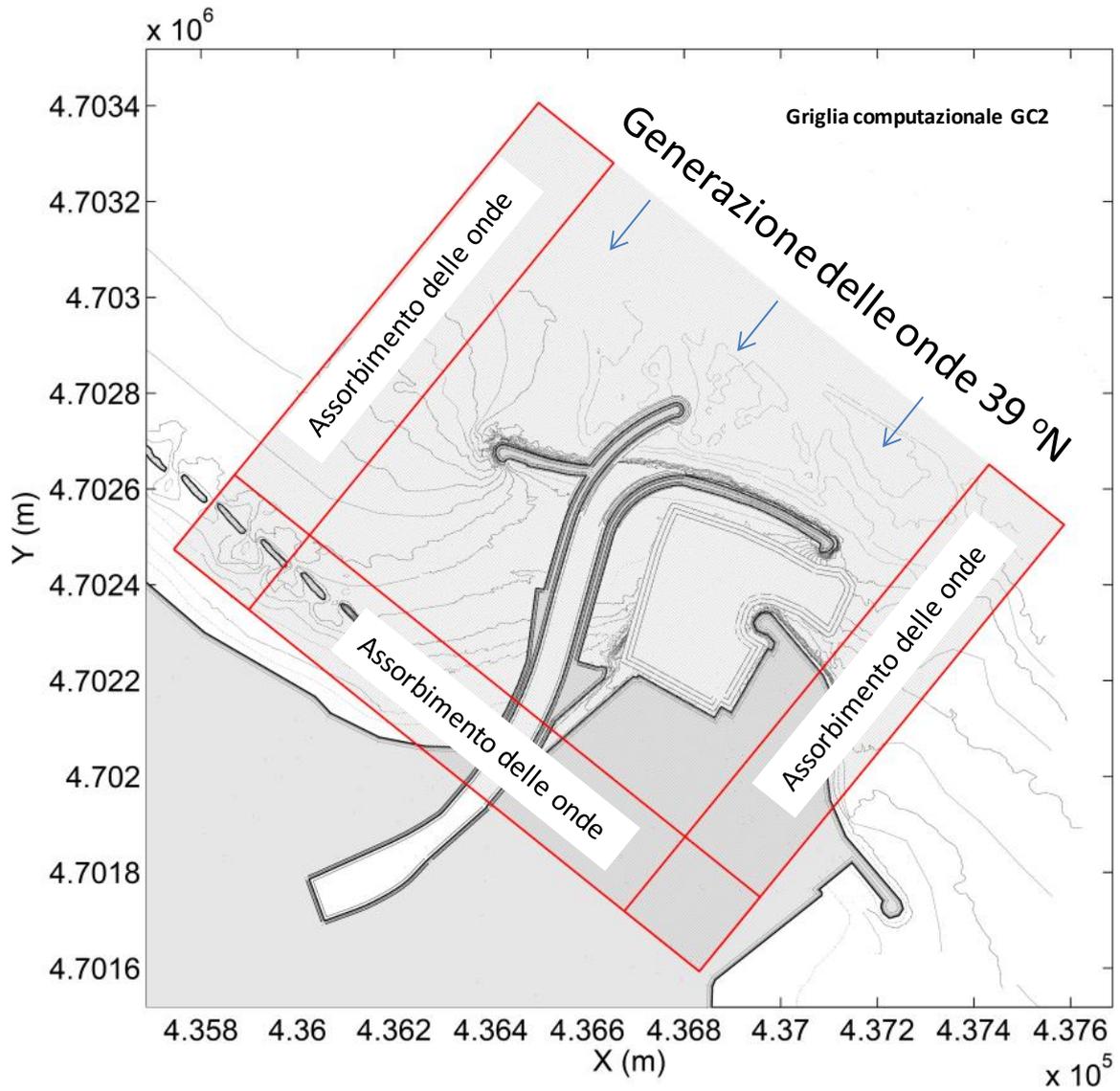


Figura 8. Schema di definizione della griglia di calcolo GC2  $dx = dy = 5.0$  m. Nota: le linee in rosso identificano l'ubicazione degli sponge layers.

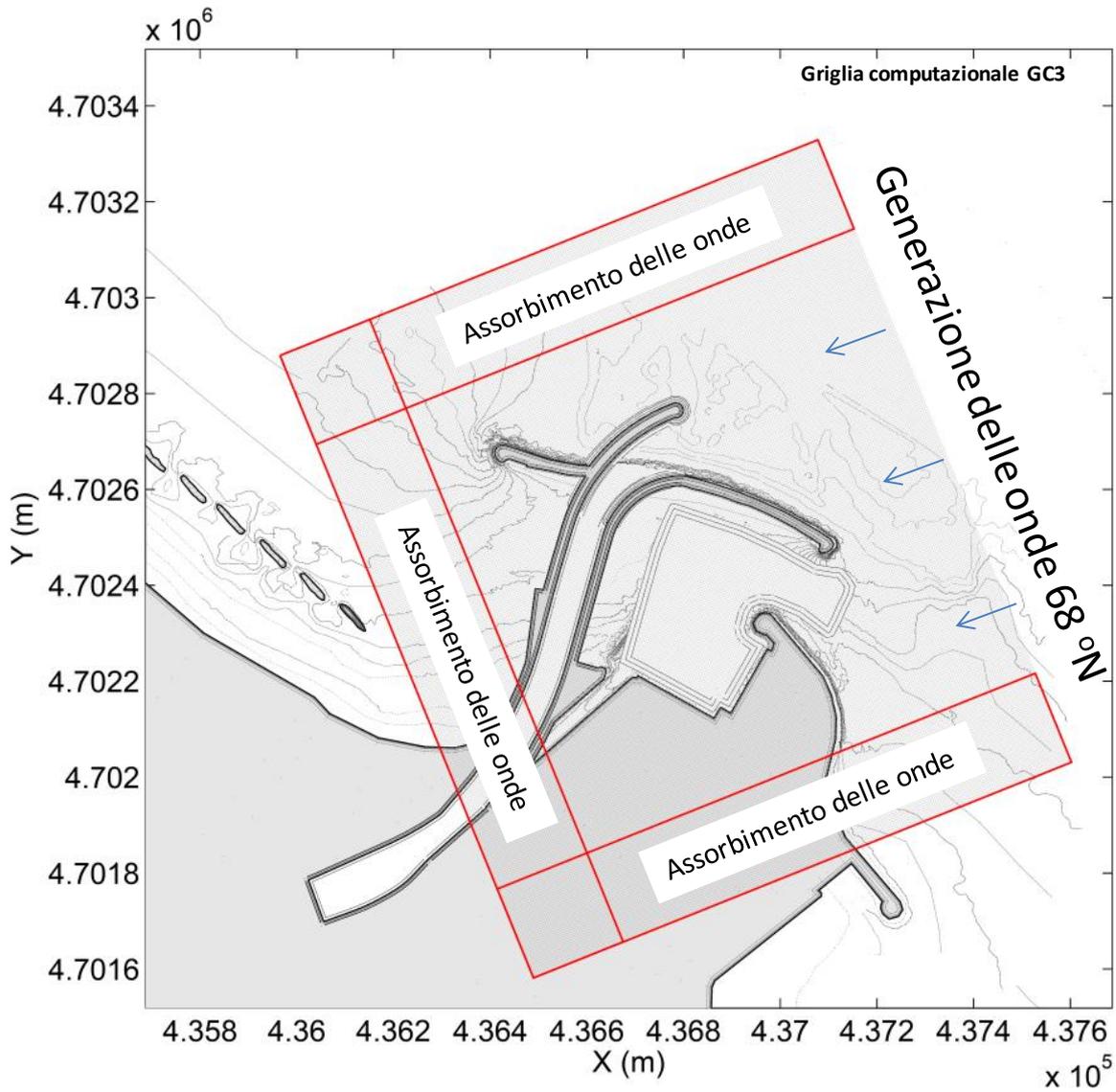
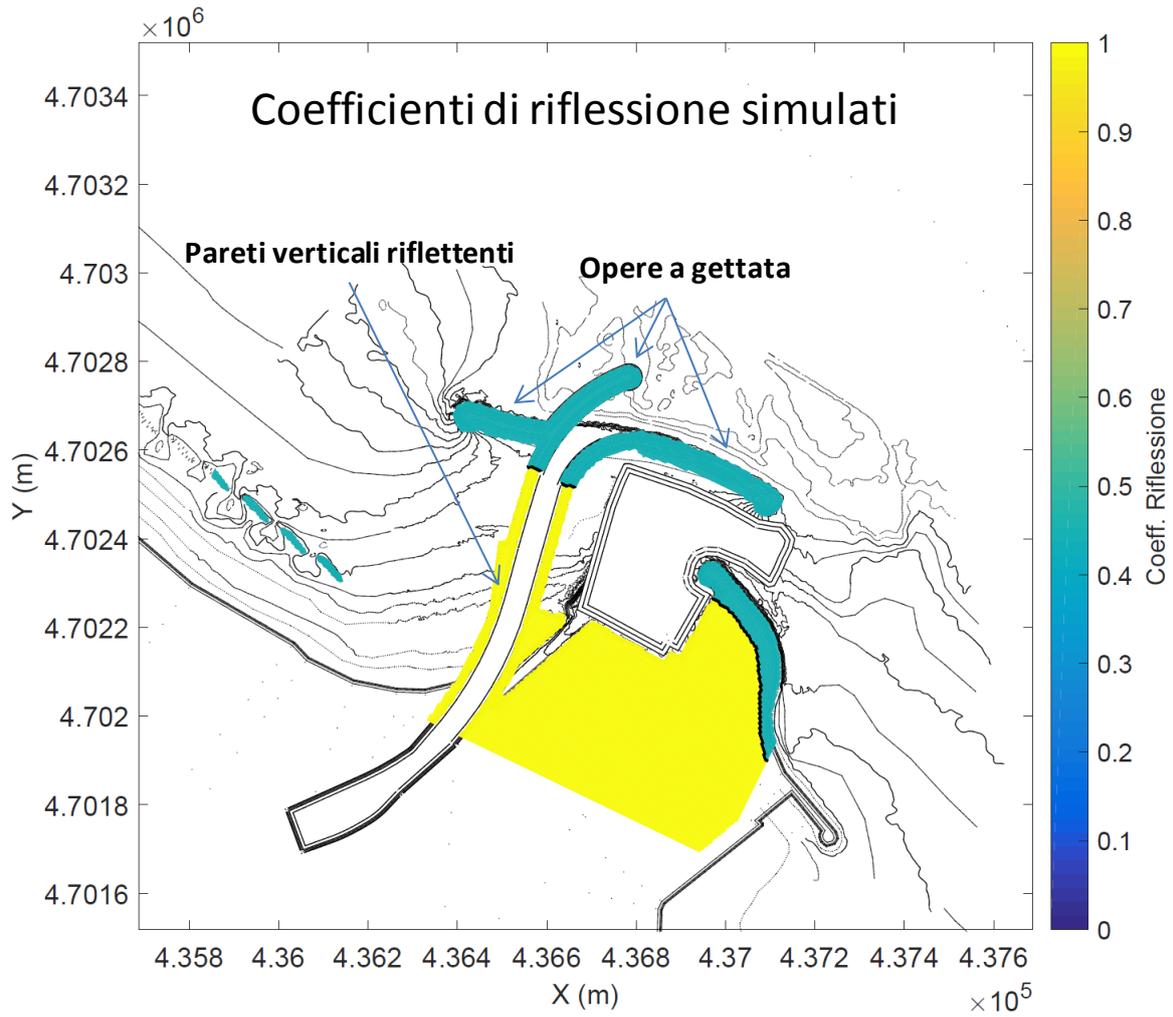


Figura 9. Schema di definizione della griglia di calcolo GC3  $dx = dy = 5.0$  m. Nota: le linee in rosso identificano l'ubicazione degli sponge layers.



**Figura 10 - Coefficienti di riflessione attribuiti alle opere marittime**

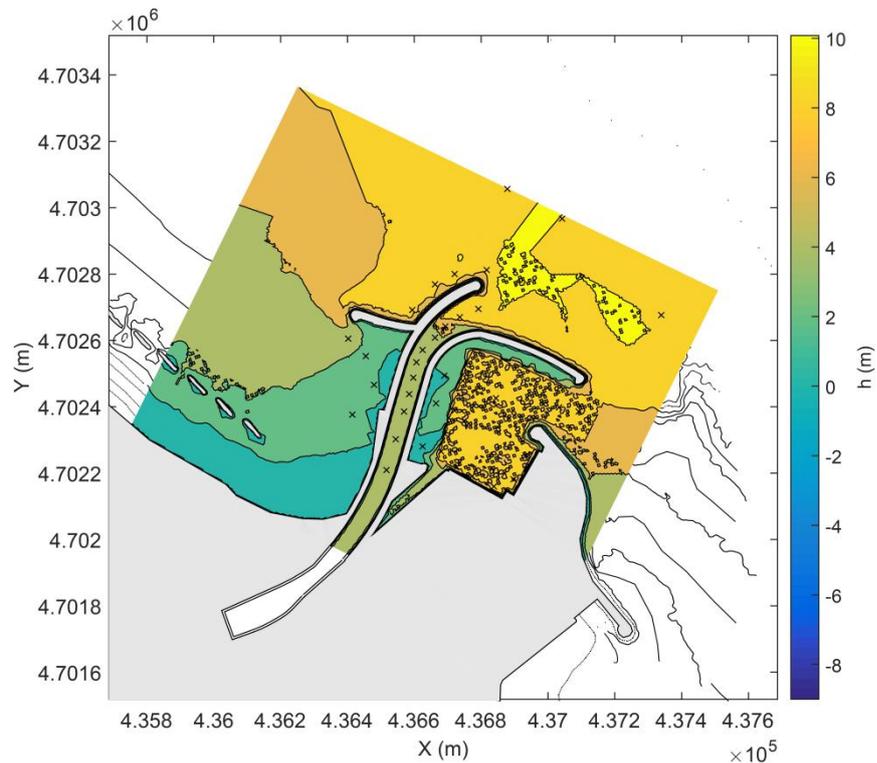


Figura 11. Definizione della batimetria all'interno della griglia di calcolo GC1  $dx = dy = 5.0$  m.

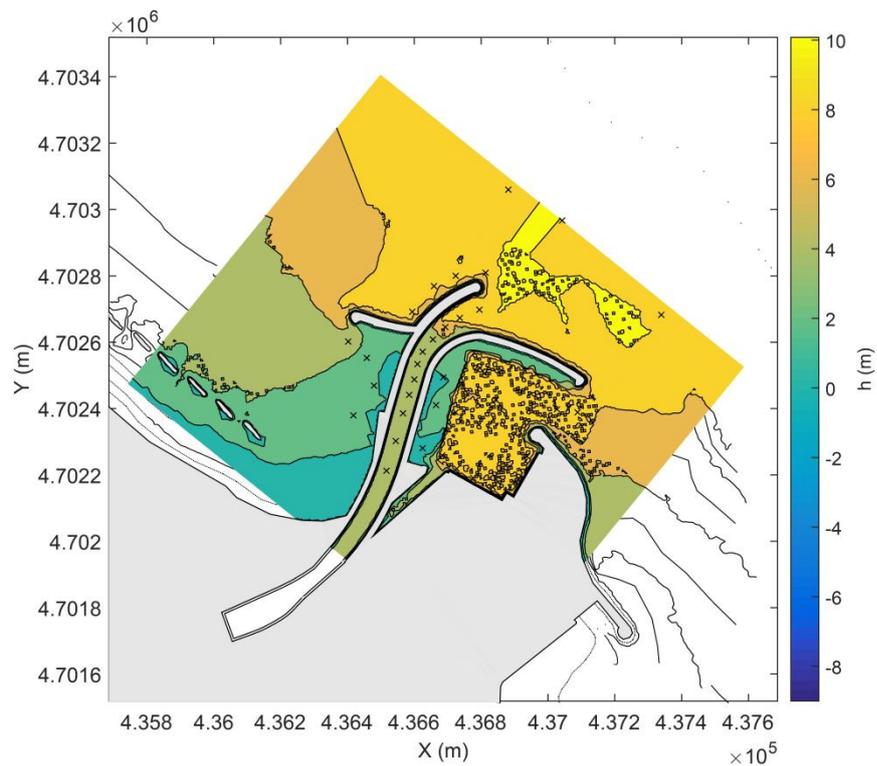


Figura 12. Definizione della batimetria all'interno della griglia di calcolo GC2  $dx = dy = 5.0$  m.

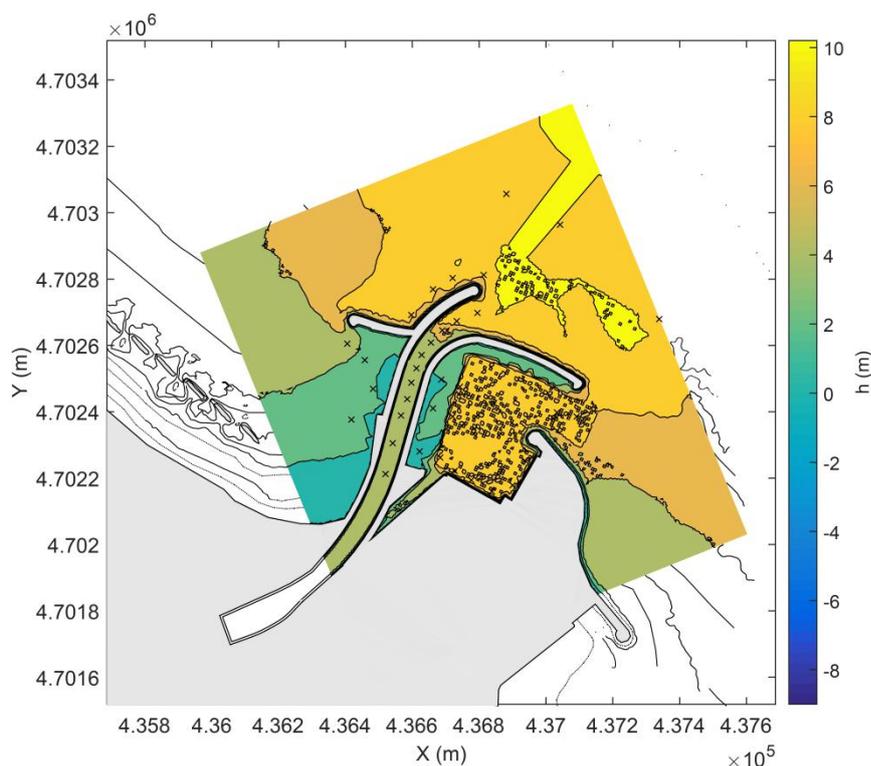


Figura 13. Definizione della batimetria all'interno della griglia di calcolo GC3  $dx = dy = 5.0$  m.

### 3.3 Scenari simulati

Le variabili che caratterizzano ciascun scenario simulato sono costituite dalle informazioni batimetriche, dalla geometria della costa e dai valori delle forzanti idrodinamiche (livelli e moto ondoso).

Gli scenari simulati sono stati desunti come già accennato dallo Studio Meteomarinò che ha consentito di propagare il moto ondoso da largo in prossimità delle opere.

I dieci scenari analizzati sono stati caratterizzati dalle seguenti caratteristiche del moto ondoso incidente e di sovrizzo di tempesta:

- **S1:**  $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.46$  m,  $T_p = 7.21$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;
- **S2:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.81$  m,  $T_p = 7.38$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;
- **S3:**  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.05$  m,  $T_p = 6.84$  s,  $\theta = 68^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;
- **S4:**  $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.09$  m,  $T_p = 8.11$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.80$  m;
- **S5:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.28$  m,  $T_p = 8.32$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.80$  m;
- **S6:**  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.04$  m,  $T_p = 7.80$  s,  $\theta = 68^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.80$  m;
- **S7:**  $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.34$  m,  $T_p = 8.82$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.95$  m;
- **S8:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.52$  m,  $T_p = 9.11$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.95$  m;
- **S9:**  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.41$  m,  $T_p = 8.58$  s,  $\theta = 68^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.95$  m;
- **S10:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.46$  m,  $T_p = 7.21$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m,  $Q = 49.22$  m<sup>3</sup>/s;

dove:

- $\theta_0$  è la direzione di provenienza del moto ondoso lungo il contorno di largo (acqua profonda);
- $\theta$  è la direzione del moto ondoso in costa (profondità intermedia);
- $T_R$  è il tempo di ritorno dello stato di mare esaminato;

- $H_{m0}$  e  $T_p$  sono rispettivamente l'altezza d'onda significativa e il periodo di picco spettrale imposte lungo il contorno di largo utilizzato per le simulazioni numeriche;
- $S$  è il valore del sovrizzo del livello medio marino utilizzato;
- $Q$  è la portata media annuale del fiume Pescara che è stata posta sulla base degli studi idraulici eseguiti a supporto del presente progetto pari a  $Q = 49.22 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Con riferimento agli scenari sopra indicati e alla Tabella 1, per ogni tempo di ritorno si sono esaminate tre direzioni di attacco del moto ondoso a largo ( $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$  e  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ) provenienti dall'intero settore di traversia. Le corrispondenti direzioni in prossimità della costa  $\theta$  sono state determinate mediante l'analisi della propagazione del moto ondoso da largo a riva eseguito nell'ambito dello Studio Meteomarino con il modello SWAN.

Si evidenzia che lo studio dell'interazione tra moto ondoso e portata fluviale è stato limitato al solo scenario S10 in quanto si è riscontrato che l'effetto della portata fluviale è quello di ridurre la capacità di penetrazione delle onde all'interno dell'alveo fluviale e di conseguenza si è ritenuto cautelativo per le finalità della progettazione trascurare nelle altre simulazioni questo effetto.

Il moto ondoso è stato simulato utilizzando onde regolari non lineari aventi altezza d'onda  $H$  pari a  $H_{m0}$  e periodo  $T$  pari a  $T_p$ .

La durata temporale delle simulazioni è stata scelta in modo tale da consentire il raggiungimento di condizioni stazionarie.

#### 4. PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

I risultati prodotti dal modello numerico SWASH sono del tutto simili a quelli che possono essere forniti da un modello fisico dove le caratteristiche del moto ondoso vengono misurate in una vasca marittima mediante un certo numero di sonde di livello che registrano, con un opportuno tempo di campionamento, la variazione dei livelli idrici nel tempo. In un modello fisico le sonde di livello vengono opportunamente distribuite nell'area allo scopo di definire, limitatamente ai punti di interesse, le caratteristiche del moto ondoso.

Nel presente caso le sonde che si hanno potenzialmente a disposizione sono, in numero, molto superiori rispetto a quelle impiegabili nei modelli fisici. Infatti ogni nodo della griglia di calcolo rappresenta una "sonda virtuale" dove possono essere memorizzate le serie temporali dei livelli e dei parametri idrodinamici ottenuti durante la prova con un tempo di acquisizione pari all'intervallo temporale utilizzato per l'integrazione nel tempo delle equazioni.

Ovviamente la quantità di dati che vengono generati dal codice di calcolo durante le simulazioni è estremamente elevata.

I risultati numerici prodotti durante le simulazioni sono stati salvati ed archiviati seguendo due diverse modalità, ovvero:

- andamento nello spazio e nel tempo delle grandezze di interesse all'interno del dominio di calcolo;
- andamento nel tempo (i.e. serie temporali) delle grandezze di interesse in alcuni punti di specifici.

La prima modalità è di ausilio principalmente per l'interpretazione qualitativa dell'andamento nel tempo del campo idrodinamico generato all'interno dell'intero dominio di calcolo. Tale modalità consente di verificare, ad esempio realizzando dei filmati, l'andamento dei livelli nel tempo in tutta l'area simulata allo scopo di verificare se effettivamente la generazione delle onde e i contorni assorbenti o parzialmente riflettenti si comportano come desiderato.

Generalmente questa tipologia di risultati è molto utile nella fase di messa a punto del modello numerico.

Nella fase interpretativa dei risultati, ovvero al fine di definire in modo quantitativo i risultati ottenuti per le conseguenti applicazioni di ingegneria, risulta importante posizionare nell'area simulata un certo numero di sonde numeriche in corrispondenza delle quali vengono memorizzati gli andamenti nel tempo dei parametri idrodinamici. Il posizionamento delle sonde numeriche è ovviamente legato agli aspetti progettuali di interesse.

Nella Figura 14 sono rappresentate in planimetria le posizioni delle sonde numeriche che sono state utilizzate per registrare ed analizzare i risultati in termini di variazioni nel tempo della superficie libera. I risultati quantitativi di interesse per le attività di progettazione (caratteristiche del moto ondoso) sono stati calcolati in corrispondenza di tali sonde.

Con riferimento alla Figura 14 il dominio di calcolo è stato suddiviso in 4 zone, rispettivamente indicate: Z1 (area in rosso), Z2 (area in magenta), Z3 (area in blu) e Z4 (area in nero).

In ciascuna delle 4 zone sono state identificate due diverse tipologie di "stazioni di misura", volte ad altrettante tipologie di analisi dei dati.

Nello specifico, le due tipologie di stazioni di misura e le relative tecniche di analisi dati utilizzate, sono rispettivamente le seguenti:

- **Stazioni di misura del tipo  $Z_{iRGj}$  (ogni stazione di misura è composta da 3 sonde di misura):** sonde utilizzate per le analisi di riflessione (e.g. Mansard and Funke, 1980) per la valutazione dell'altezza d'onda incidente.
- **Stazioni di misura del tipo  $\eta_k$  (ogni stazione di misura è composta da 1 sonda di misura):** sonde utilizzate per le analisi zero-crossing nel dominio del tempo per la valutazione dell'altezza d'onda totale.

Le stazioni di misura del primo tipo ( $Z_{iRGj}$ ), ciascuna composta da tre sonde di misura, consentono di fornire per la stazione in esame le *caratteristiche del moto ondoso incidente*. In generale in corrispondenza di un punto del dominio di calcolo l'andamento dei livelli idrici e quindi le caratteristiche del moto ondoso sono prodotte dall'interferenza di due sistemi di onde: le onde incidenti, generate lungo il contorno di largo, e le onde "scatterate" dal campo, ovvero quelle riflesse in corrispondenza delle variazioni del fondale e delle strutture emergenti dal livello del mare. La conoscenza della sola componente incidente risulta di estrema importanza per due scopi:

- per verificare le caratteristiche delle onde effettivamente generate dal modello;
- per calcolare le onde incidenti in corrispondenza di strutture che vengono dimensionate in funzione della sola componente incidente del moto ondoso.

Per separare nel punto del campo di interesse le onde incidenti da quelle riflesse è necessario disporre di tre sonde di livello poste a breve distanza l'una dall'altra (la distanza tra le sonde deve essere inferiore alla lunghezza delle onde incidenti). Per tale ragione questa tipologia di stazione di misura è composta da tre sonde.

Le stazioni di misura del tipo  $Z_{iRGj}$  sono state posizionate in prossimità dei contorni di generazione delle onde per le tre griglie esaminate. In particolare:

- la stazione di misura  $Z_{1RG1}$  è stata utilizzata per verificare le onde generate relative alla griglia computazionale GC1 dove le onde provengono da 26°N;
- la stazione di misura  $Z_{3RG1}$  è stata utilizzata per verificare le onde generate relative alla griglia computazionale GC2 dove le onde provengono da 39°N;
- la stazione di misura  $Z_{4RG1}$  è stata utilizzata per verificare le onde generate relative alla griglia computazionale GC3 dove le onde provengono da 68°N.

In corrispondenza del pennello, posto a protezione della sponda idraulica sinistra della foce fluviale, sono state poste altre due stazioni di misura del tipo  $Z_{iRGj}$ , ovvero le stazioni  $Z_{1RG2}$  e  $Z_{1RG3}$ . La funzione di queste due stazioni è stata quella di misurare le caratteristiche del moto ondoso incidente in corrispondenza della sezione corrente del pennello e in corrispondenza della sua testata.

Infine è stata posta una ultima stazione di questo tipo in corrispondenza dell'imboccatura della darsena commerciale per valutare le onde in ingresso nella stessa darsena.

Le stazioni di misura del secondo tipo ( $\eta_k$ ) composte da una sola sonda consentono di calcolare mediante l'analisi "zero-crossing" delle onde apparenti l'altezza d'onda complessiva registrata, ovvero quella incidente e quella riflessa. Volendo in tali stazioni si potrebbe esguire anche l'analisi spettrale del segnale di livello.

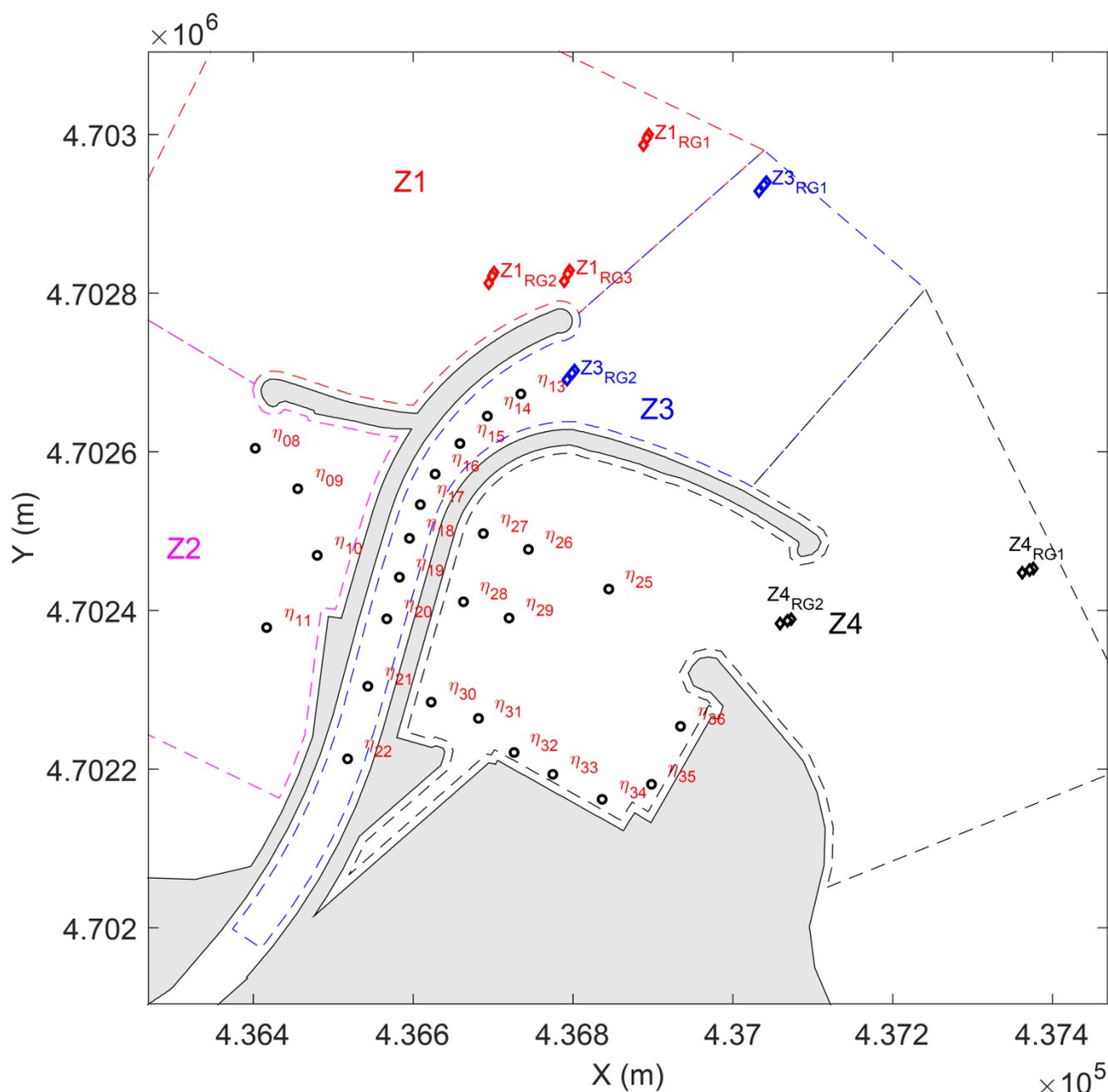


Figura 14. Schema chiave per la definizione planimetrica delle posizioni delle "stazioni di misura".

Con riferimento alla Figura 14 una prima serie di stazioni di misura di questo tipo sono state poste in asse al tratto di fiume deviato allo scopo di calcolare l'andamento dell'altezza d'onda. Tale informazione è molto importante per valutare la capacità di penetrazione delle onde nella foce fluviale sia in relazione alla navigabilità del fiume sia in relazione alla capacità del tratto terminale del fiume di schermare dal moto ondosso incidente le zone interne destinate all'ormeggio delle imbarcazioni.

Altre sonde di questo tipo sono state poste ad Ovest del tratto deviato e ad Est di esso nella darsena commerciale.

Nei prossimi paragrafi vengono presentati i risultati delle simulazioni per i vari scenari esaminati.

### 4.1 Simulazioni idrodinamiche: scenario S1

**S1:**  $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.46$  m,  $T_p = 7.21$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S1. La Figura 15 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.

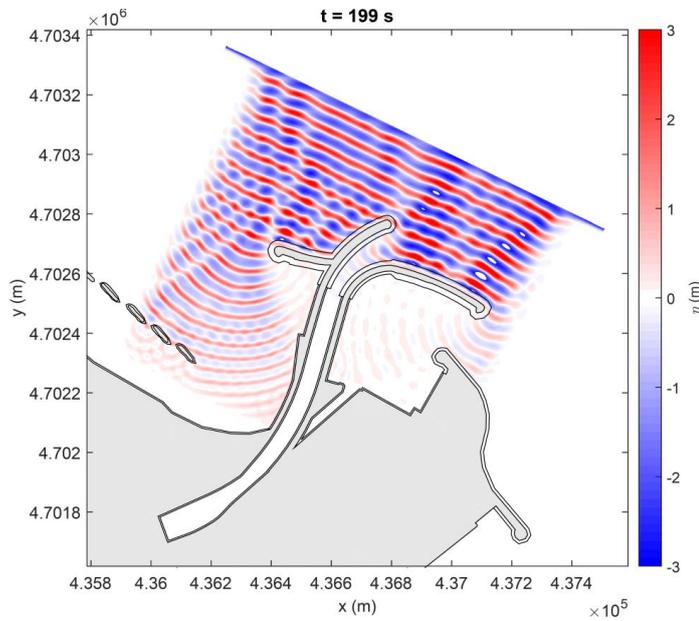
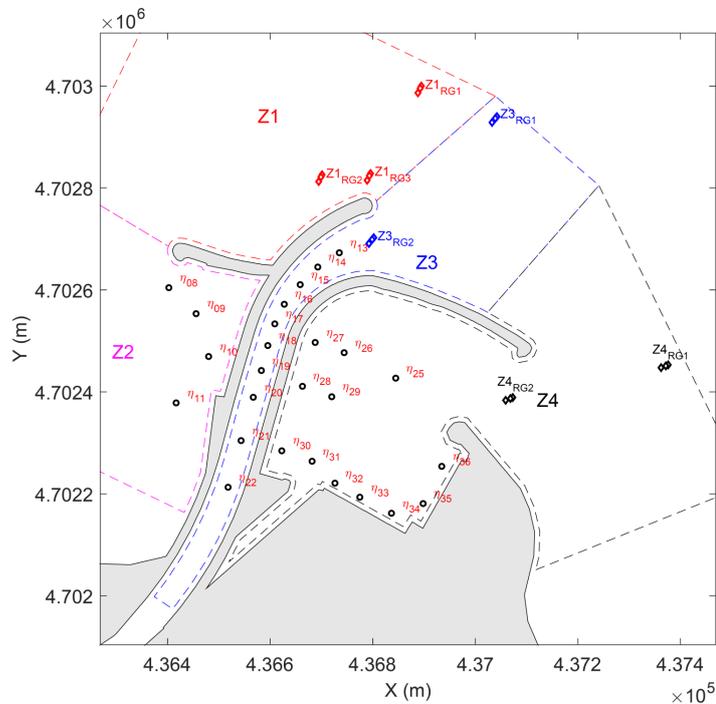


Figura 15. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.



Pianta chiave sonde

- Zona Z1**

**Tabella 2. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 3 punti di interesse per la zona Z1**

$H_{Z1-RG1}$ (m)	$H_{Z1-RG2}$ (m)	$H_{Z1-RG3}$ (m)
4.34	3.53	3.39

Il valore  $H_{Z1-RG1}$  mostrano che le onde generate hanno una buona corrispondenza con quelle imposte in generazione. In corrispondenza del pennello le onde incidenti risultano attenuate dal frangimento rispetto a quelle generate.

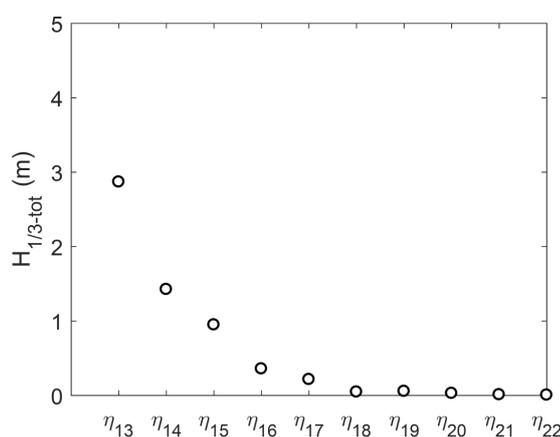
- Zona Z2**

**Tabella 3. Altezze d'onda totali calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2**

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	0.78
9	0.47
10	1.34
11	1.87

Il moto ondoso totale (incidente + riflesso) ad Ovest della deviazione è sensibilmente attenuato.

- Zona Z3**



**Figura 16. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.**

Lungo l'asse del fiume si verifica un rapido decadimento dell'altezza d'onda complessiva che si annulla molto velocemente risalendo la foce fluviale. La penetrazione delle onde nel porto canale è nulla.

Tabella 4. Altezze d'onda totali calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3

Z3	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
13	2.87
14	1.43
15	0.95
16	0.36
17	0.21
18	0.05
19	0.06
20	0.03
21	0.01
22	0.01

- Zona Z4**

Tabella 5. Altezze d'onda totali calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4

Z4	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
25	0.18
26	0.08
27	0.12
28	0.26
29	0.14
30	0.19
31	0.20
32	0.10
33	0.04
34	0.09
35	0.05
36	0.07

L'agitazione nella darsena commerciale è pressoché nulla.

### 4.2 Simulazioni idrodinamiche: scenario S2

- **S2:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.81$  m,  $T_p = 7.38$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S2. La Figura 17 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.

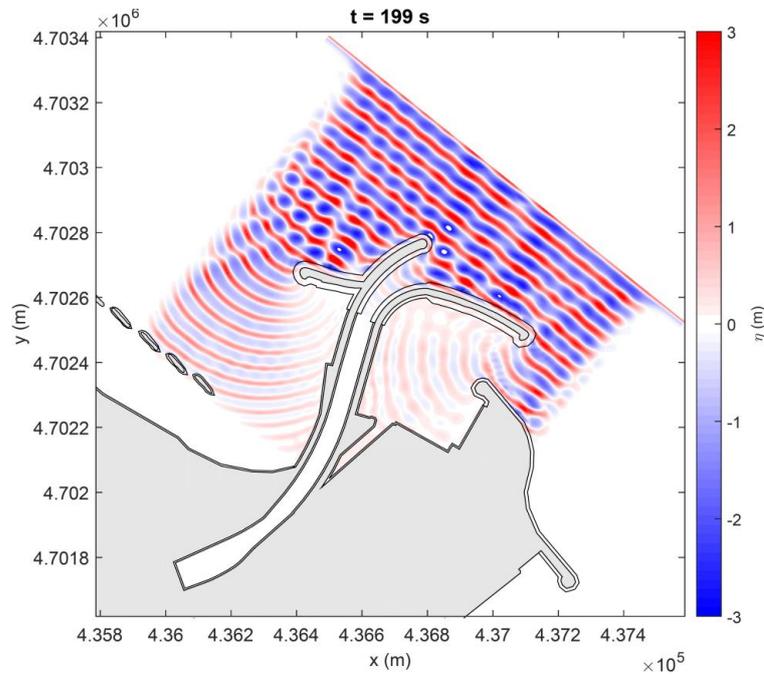
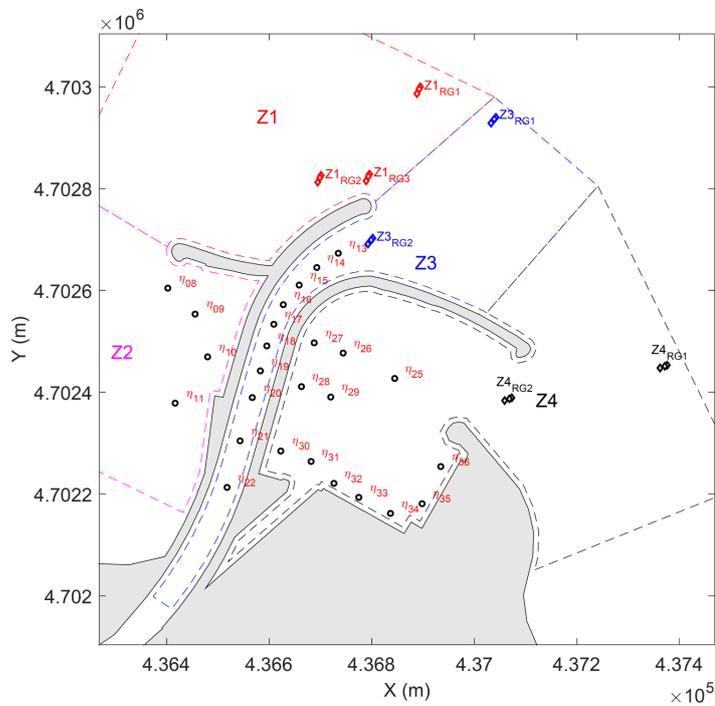


Figura 17. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.



Pianta chiave sonde

- **Zona Z2**

**Tabella 6. Altezze d'onda totali calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2**

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	0.52
9	0.25
10	0.23
11	0.72

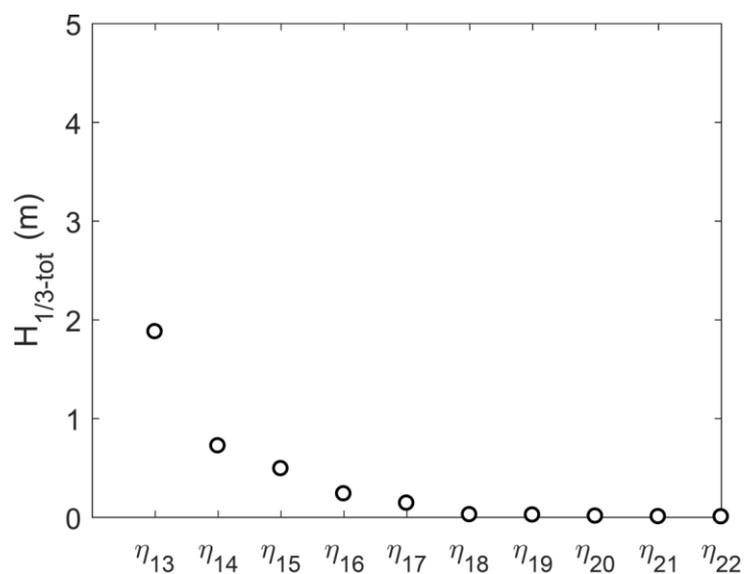
In questa zona le onde sono molto attenuate.

- **Zona Z3**

**Tabella 7. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 2 punti di interesse per la zona Z3**

$H_{Z3-RG1}$ (m)	$H_{Z3-RG2}$ (m)
4.57	1.34

Il valore  $H_{Z3-RG1}$  mostra che le onde generate hanno una buona corrispondenza con quelle imposte in generazione. In corrispondenza dell'imboccatura fluviale le onde incidenti risultano sensibilmente attenuate dal frangimento rispetto a quelle generate.



**Figura 18. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.**

Tabella 8. Altezze d'onda totali calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3

Z3	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
13	1.88
14	0.72
15	0.49
16	0.24
17	0.14
18	0.03
19	0.02
20	0.01
21	0.01
22	0.00

Le onde lungo la foce fluviale si attenuano molto rapidamente.

- **Zona Z4**

Tabella 9. Altezze d'onda totali calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4

Z4	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
25	0.80
26	0.43
27	0.43
28	0.60
29	0.62
30	0.40
31	0.43
32	0.18
33	0.23
34	0.20
35	0.15
36	0.23

L'agitazione ondosa nella darsena commerciale è molto contenuta.

### 4.3 Simulazioni idrodinamiche: scenario S3

- **S3:**  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.05$  m,  $T_p = 6.84$  s,  $\theta = 68^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S3. La Figura 19 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.

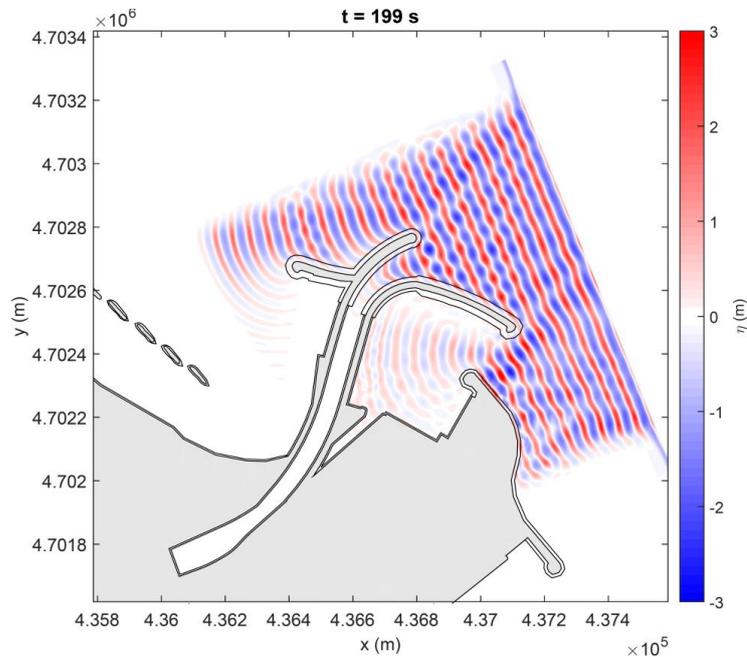
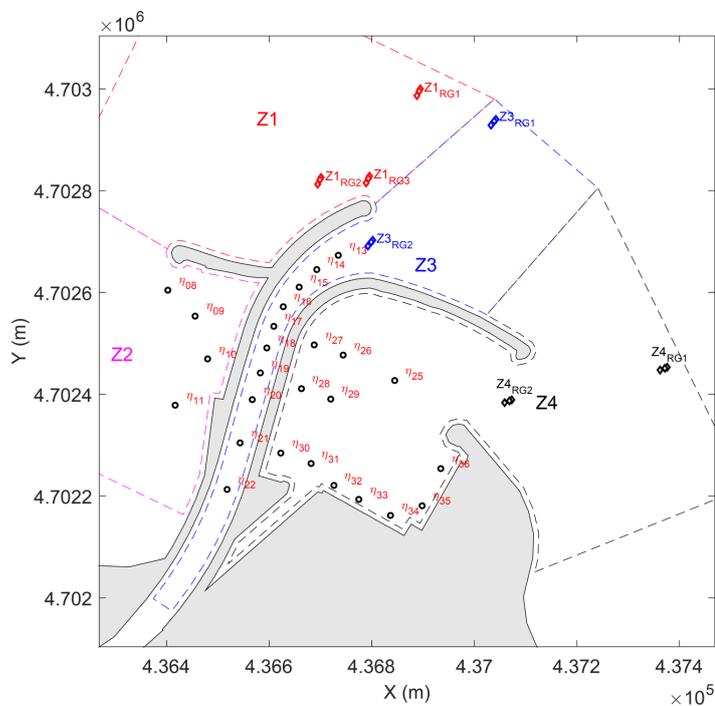


Figura 19. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.



Pianta chiave sonde

- Zona Z2**

Tabella 10. Altezze d'onda totali calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	0.14
9	0.11
10	0.07
11	0.10

L'agitazione ondosa è molto contenuta.

- Zona Z3**

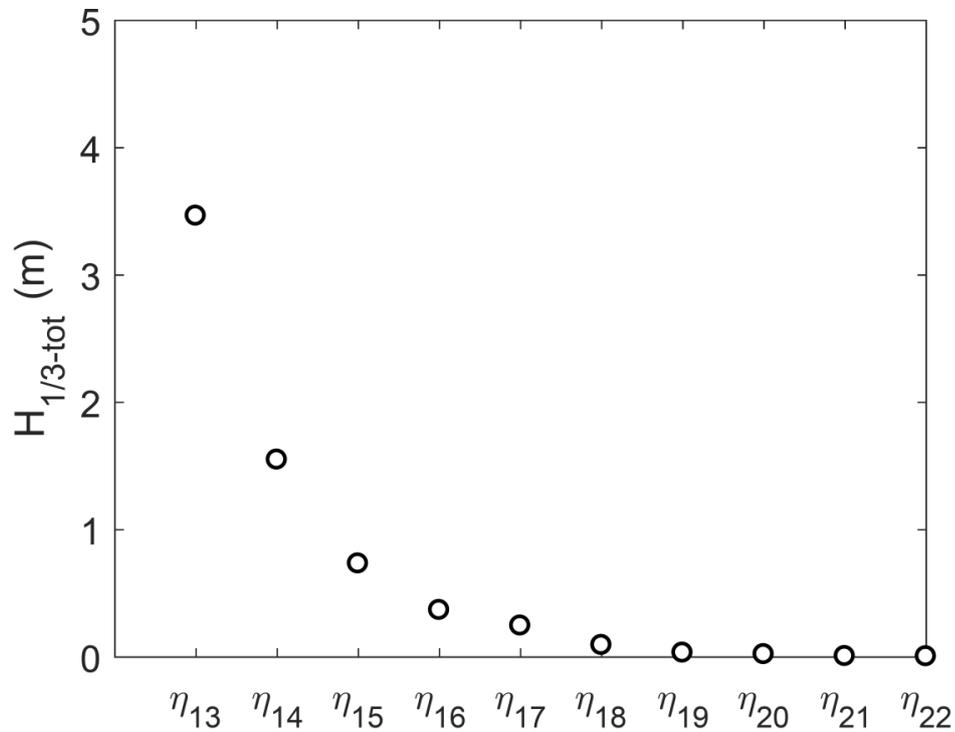


Figura 20. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.

Nonostante che questa sia la direzione peggiore per la penetrazione del moto ondoso nella foce fluviale, le onde si attenuano molto velocemente nel tratto deviato.

**Tabella 11. Altezze d'onda totali calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3**

Z3	
WG	H <sub>1/3-tot</sub>
( )	(m)
13	3.46
14	1.55
15	0.73
16	0.37
17	0.24
18	0.09
19	0.03
20	0.02
21	0.01
22	0.00

- Zona Z4**

**Tabella 12. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 2 punti di interesse per la zona Z4**

H <sub>Z4-RG1</sub> (m)	H <sub>Z4-RG2</sub> (m)
3.37	2.77

Le onde tendono a frangere in generazione e risultano attenuate all'imboccatura della darsena commerciale. Questa è la direzione peggiore anche per la darsena commerciale, tuttavia luno le due attuali banchine il moto ondoso è estremamente contenuto.

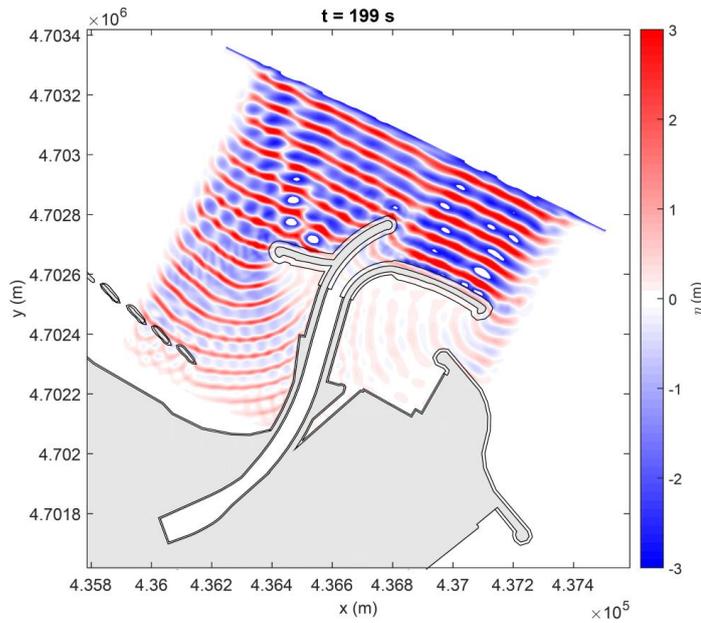
**Tabella 13. Altezze d'onda totali calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4**

Z4	
WG	H <sub>1/3-tot</sub>
( )	(m)
25	1.83
26	2.03
27	0.93
28	1.06
29	0.67
30	0.37
31	0.43
32	0.27
33	0.23
34	0.26
35	0.16
36	0.25

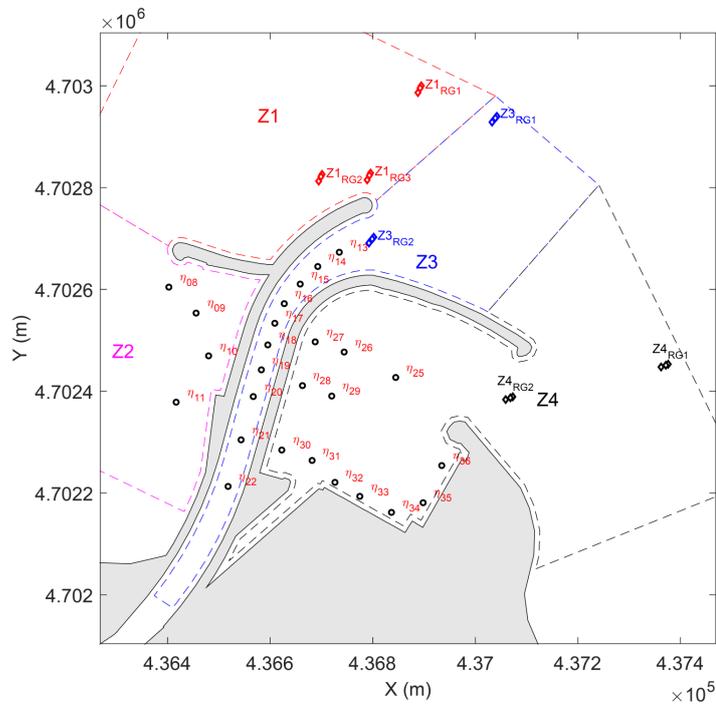
**4.4 Simulazioni idrodinamiche: scenario S4**

- **S4:**  $\theta_0 = 0^\circ N$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.09$  m,  $T_p = 8.11$  s,  $\theta = 26^\circ N$ ,  $S = 0.80$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S4. La Figura 21 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.



**Figura 21. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.**



**Pianta chiave sonde**

- **Zona Z1**

Tabella 14. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 3 punti di interesse per la zona Z1

$H_{Z1-RG1}$ (m)	$H_{Z1-RG2}$ (m)	$H_{Z1-RG3}$ (m)
5.35	6.55	5.68

- **Zona Z2**

Tabella 15. Altezze d'onda totali calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	1.39
9	0.76
10	1.61
11	2.67

- **Zona Z3**

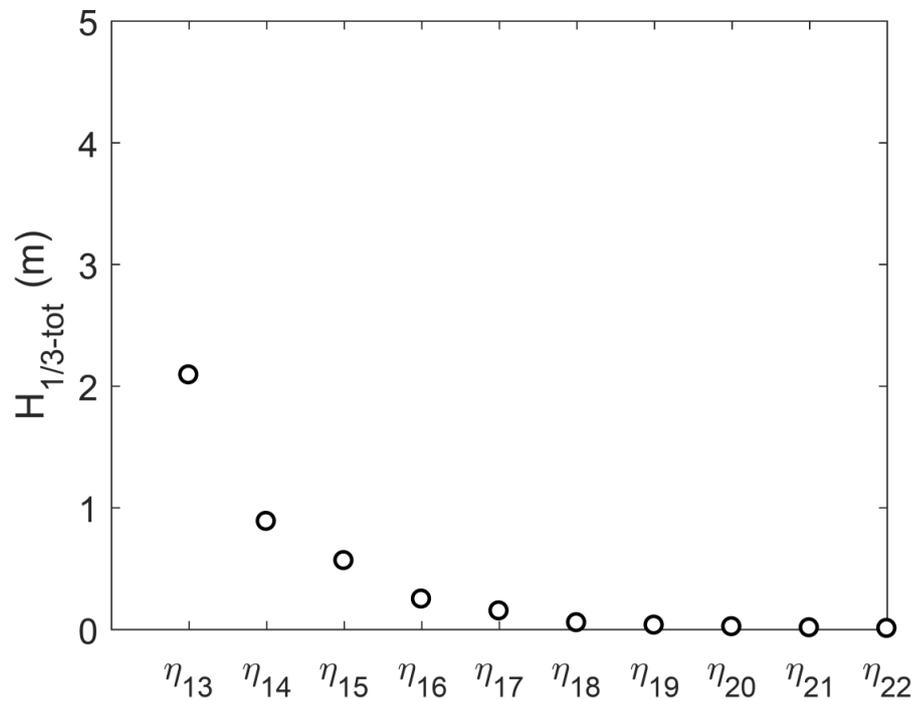


Figura 22. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.

Tabella 16. Altezze d'onda totali calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3

Z3	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
13	2.09
14	0.89
15	0.56
16	0.25
17	0.15
18	0.05
19	0.03
20	0.02
21	0.01
22	0.01

- Zona Z4**

Tabella 17. Altezze d'onda totali calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4

Z4	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
25	0.25
26	0.12
27	0.20
28	0.19
29	0.27
30	0.08
31	0.27
32	0.17
33	0.07
34	0.05
35	0.07
36	0.04

### 4.5 Simulazioni idrodinamiche: scenario S5

- **S5:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.28$  m,  $T_p = 8.32$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.80$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S5. La Figura 23 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.

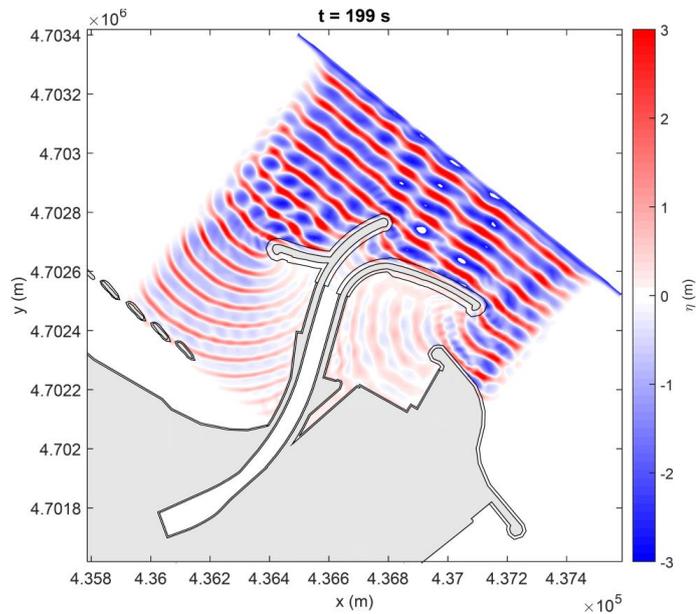
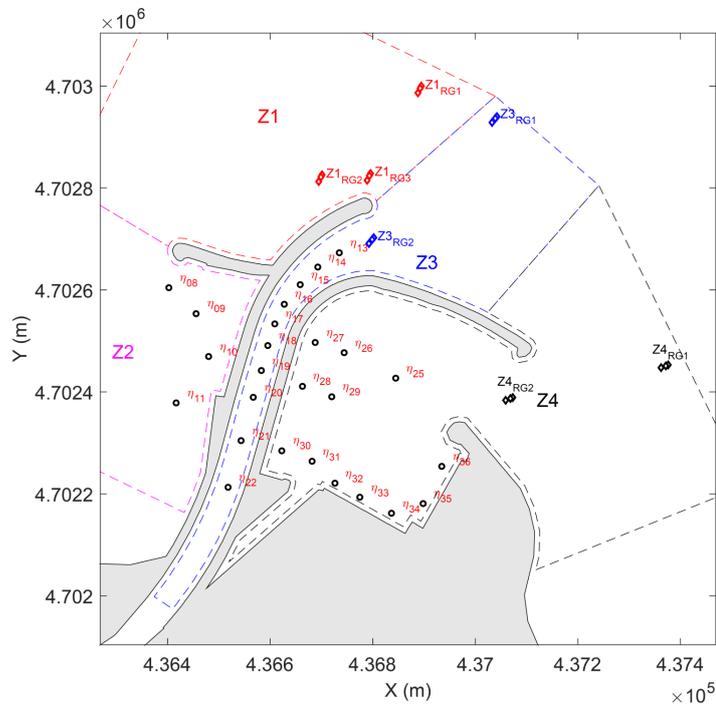


Figura 23. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.



Pianta chiave sonde

- Zona Z2**

Tabella 18. Altezze d'onda totali calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	0.93
9	0.42
10	0.47
11	1.14

- Zona Z3**

Tabella 19. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 2 punti di interesse per la zona Z3

$H_{Z3-RG1}$ (m)	$H_{Z3-RG2}$ (m)
4.38	3.23

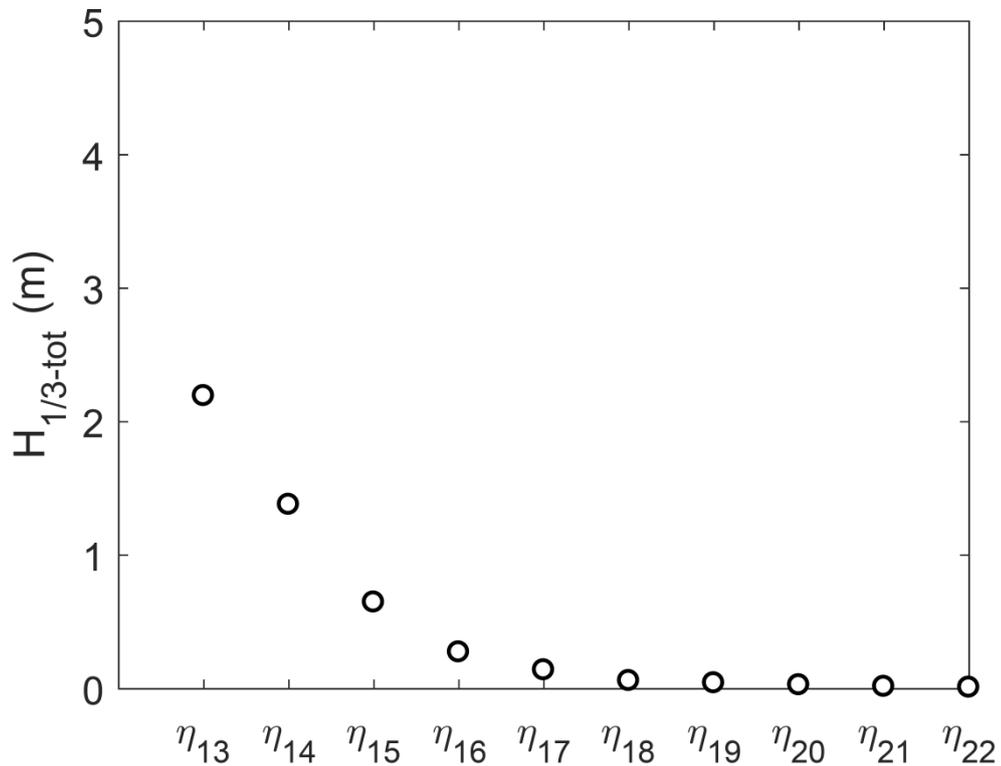


Figura 24. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.

**Tabella 20. Altezze d'onda totali calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3**

Z3	
WG	H <sub>1/3-tot</sub>
( )	(m)
13	2.19
14	1.38
15	0.65
16	0.27
17	0.14
18	0.06
19	0.04
20	0.03
21	0.02
22	0.01

- Zona Z4**

**Tabella 21. Altezze d'onda totali calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4**

Z4	
WG	H <sub>1/3-tot</sub>
( )	(m)
25	1.05
26	0.73
27	0.48
28	0.73
29	0.68
30	0.75
31	0.72
32	0.23
33	0.13
34	0.13
35	0.11
36	0.29

#### 4.6 Simulazioni idrodinamiche: scenario S6

- **S6:**  $\theta_0 = 90^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 10$  anni,  $H_{m0} = 5.04$  m,  $T_p = 7.80$  s,  $\theta = 68^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.80$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S6. La Figura 25 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.

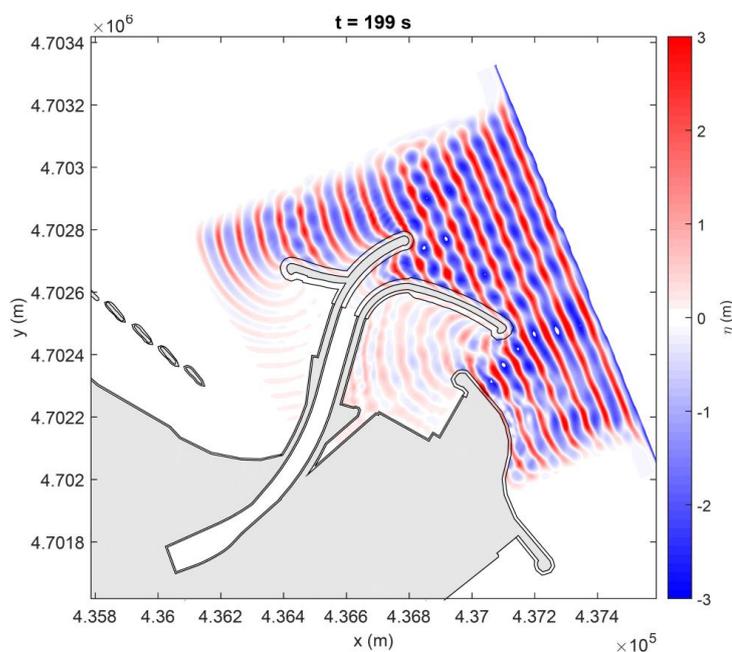
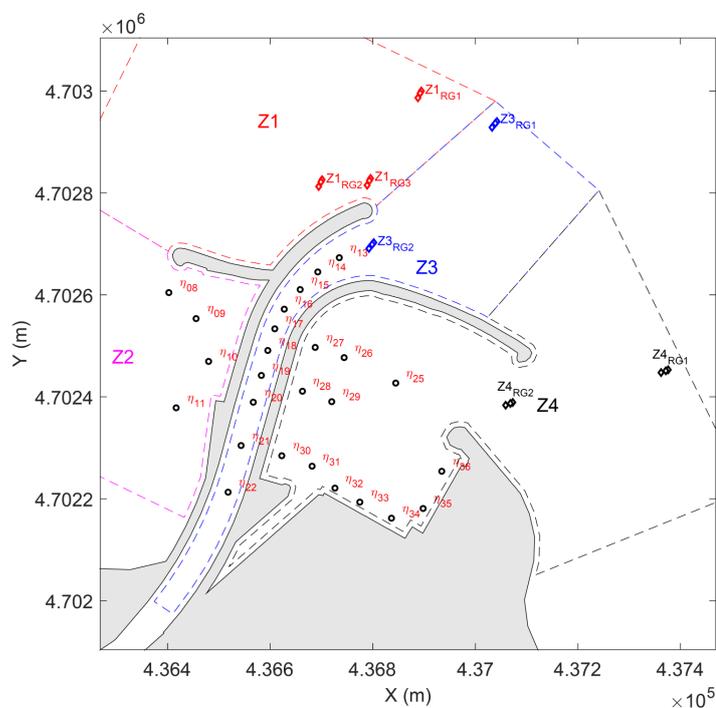


Figura 25. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.



Pianta chiave sonde

- **Zona Z2**

Tabella 22. Altezze d'onda totali calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	0.23
9	0.14
10	0.09
11	0.15

- **Zona Z3**

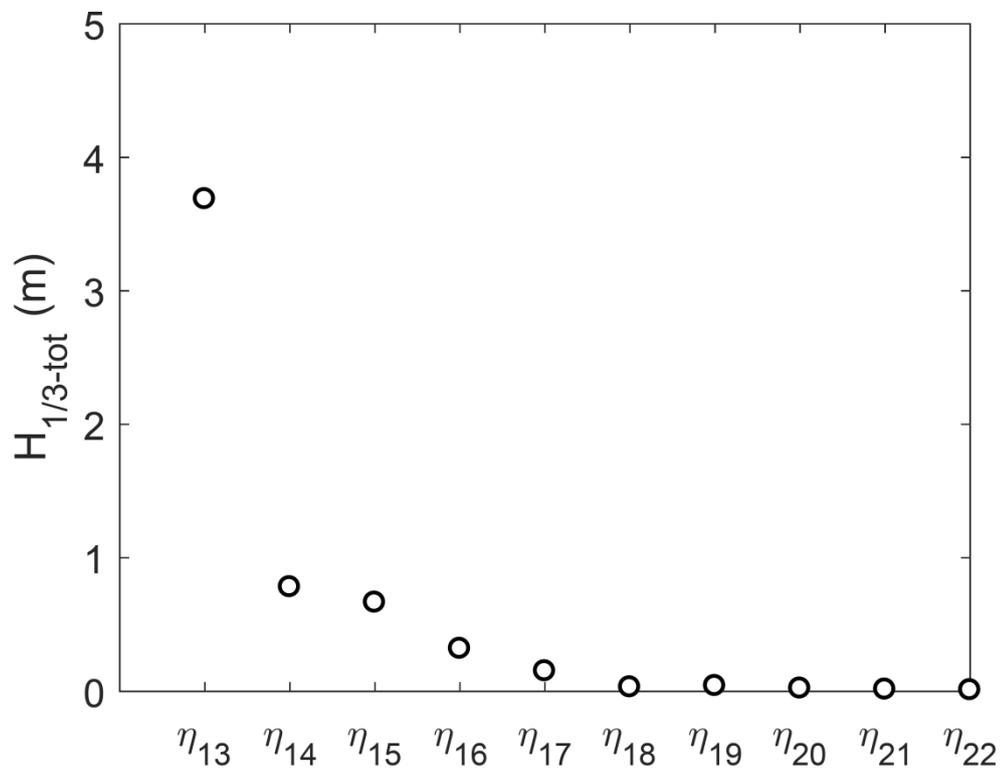


Figura 26. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.

**Tabella 23. Altezze d'onda totali calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3**

Z3	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
13	3.69
14	0.78
15	0.66
16	0.32
17	0.15
18	0.03
19	0.04
20	0.02
21	0.01
22	0.01

- Zona Z4**

**Tabella 24. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4**

$H_{Z4-RG1}$ (m)	$H_{Z4-RG2}$ (m)
4.33	1.93

**Tabella 25. Altezze d'onda totali calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4**

Z4	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
25	1.47
26	1.78
27	1.56
28	0.89
29	1.23
30	0.74
31	1.10
32	0.38
33	0.22
34	0.20
35	0.16
36	0.27

### 4.7 Simulazioni idrodinamiche: scenario S7

- **S7:**  $\theta_0 = 0^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.34$  m,  $T_p = 8.82$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.95$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S7. La Figura 27 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.

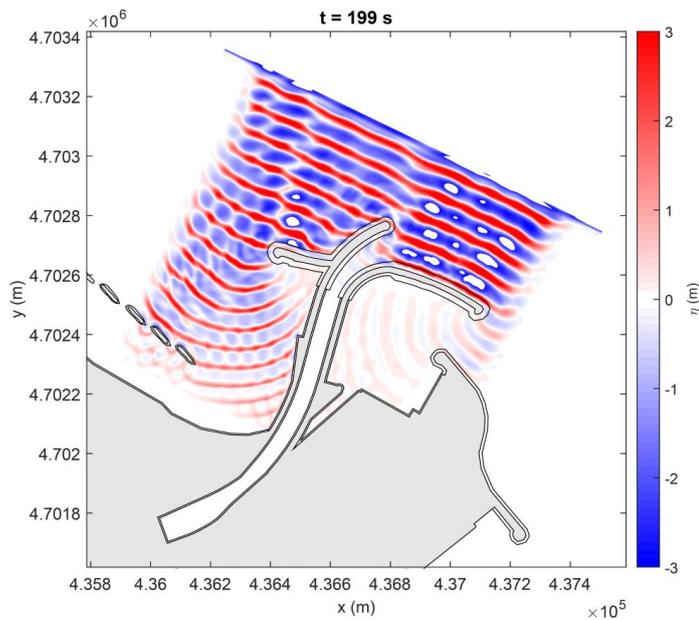
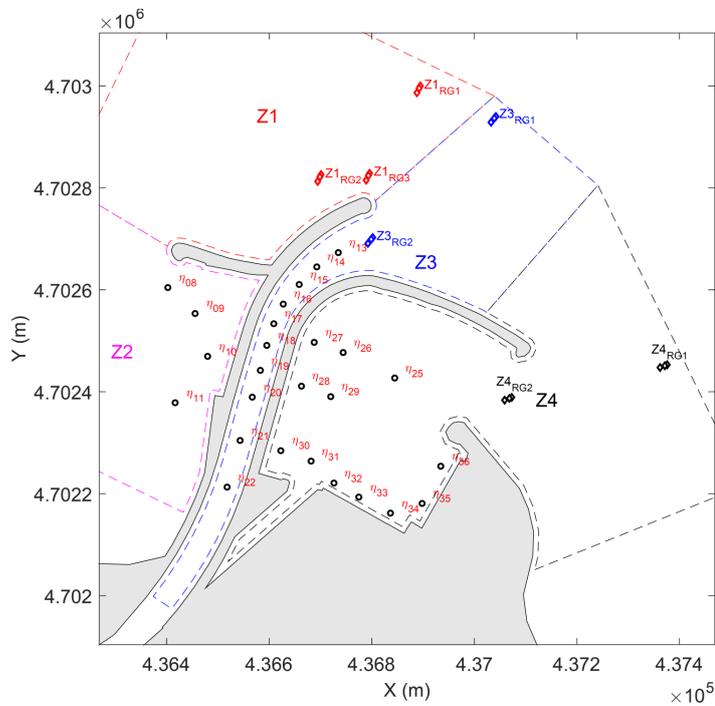


Figura 27. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.



Pianta chiave sonde

- Zona Z1**

Tabella 26. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 3 punti di interesse per la zona Z1

$H_{Z1-RG1}$ (m)	$H_{Z1-RG2}$ (m)	$H_{Z1-RG3}$ (m)
4.75	6.14	5.31

- Zona Z2**

Tabella 27. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	1.62
9	0.82
10	2.18
11	3.30

- Zona Z3**

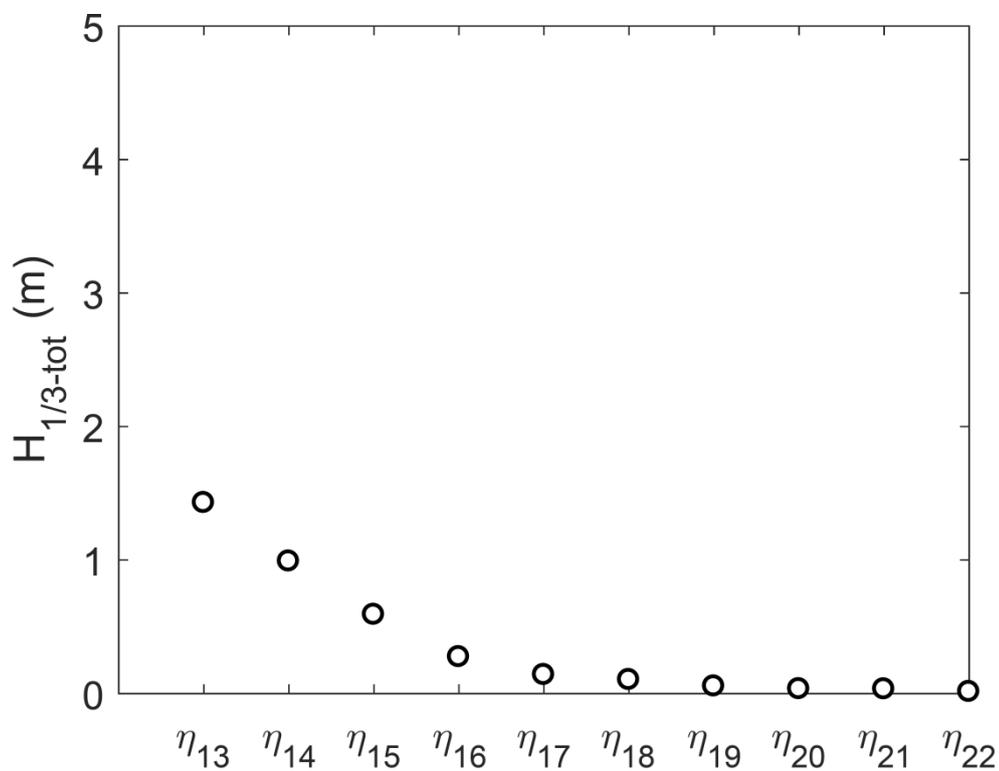


Figura 28. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.

Tabella 28. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3

Z3	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
13	1.43
14	0.99
15	0.59
16	0.27
17	0.14
18	0.10
19	0.05
20	0.03
21	0.03
22	0.01

- **Zona Z4**

Tabella 29. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4

Z4	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
25	0.24
26	0.25
27	0.15
28	0.19
29	0.20
30	0.25
31	0.13
32	0.11
33	0.12
34	0.04
35	0.08
36	0.07

### 4.8 Simulazioni idrodinamiche: scenario S8

- **S8:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.52$  m,  $T_p = 9.11$  s,  $\theta = 39^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.95$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S8. La Figura 29 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.

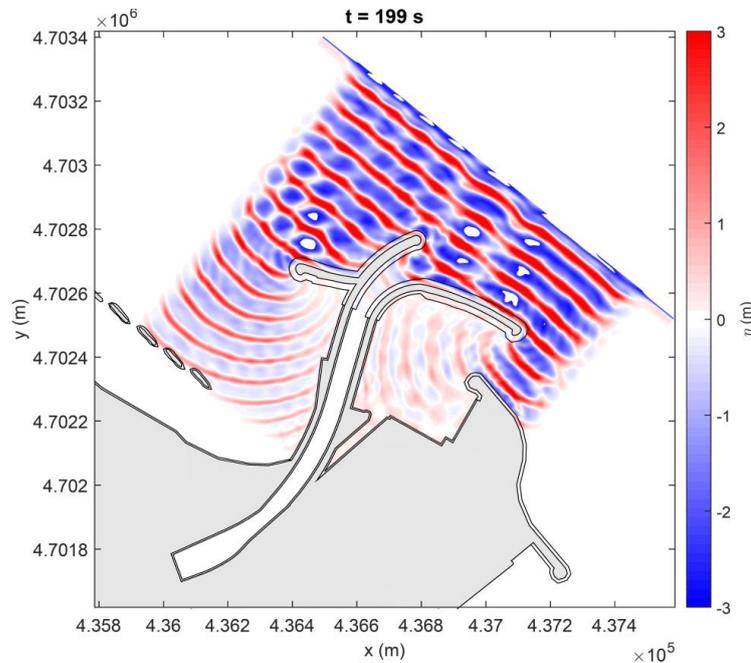
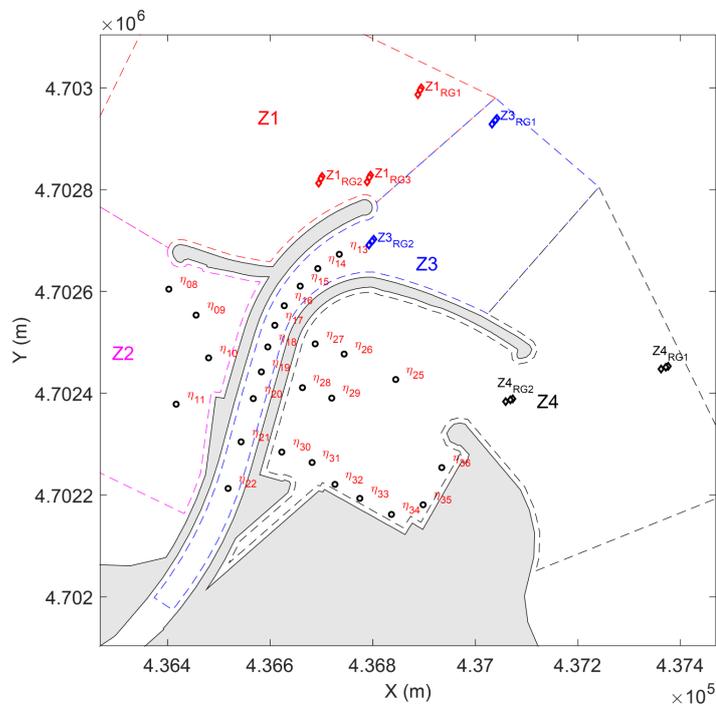


Figura 29. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.



Pianta chiave sonde

- **Zona Z2**

Tabella 30. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	1.23
9	0.63
10	0.84
11	1.49

- **Zona Z3**

Tabella 31. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 2 punti di interesse per la zona Z3

$H_{Z3-RG1}$ (m)	$H_{Z3-RG2}$ (m)
4.54	4.25

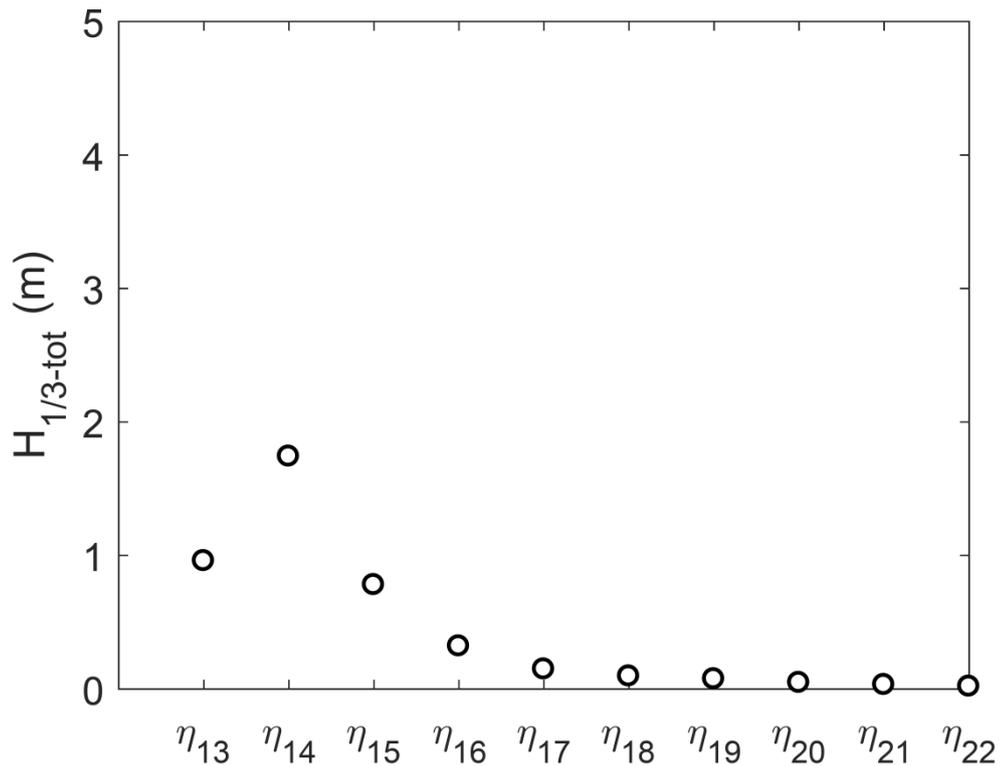


Figura 30. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.

Tabella 32. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3

Z3	
WG	H <sub>1/3-tot</sub>
( )	(m)
13	0.96
14	1.74
15	0.78
16	0.32
17	0.15
18	0.09
19	0.07
20	0.05
21	0.03
22	0.02

- **Zona Z4**

Tabella 33. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4

Z4	
WG	H <sub>1/3-tot</sub>
( )	(m)
25	1.23
26	0.62
27	0.71
28	1.05
29	0.92
30	1.03
31	0.66
32	0.54
33	0.51
34	0.23
35	0.10
36	0.12

### 4.9 Simulazioni idrodinamiche: scenario S9

- **S9:**  $\theta_0 = 90^\circ N$ ,  $T_R = 50$  anni,  $H_{m0} = 5.41$  m,  $T_p = 8.58$  s,  $\theta = 68^\circ N$ ,  $S = 0.95$  m;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S9. La Figura 31 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie.

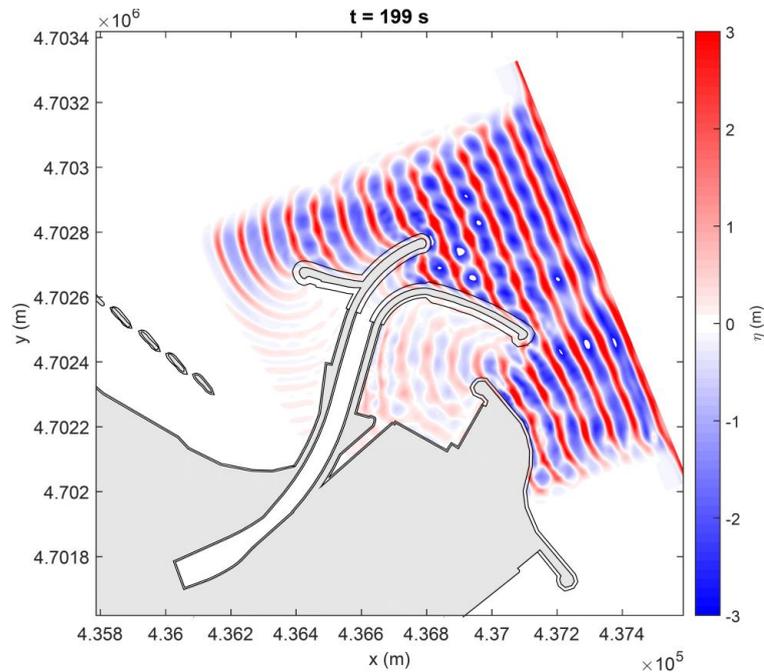
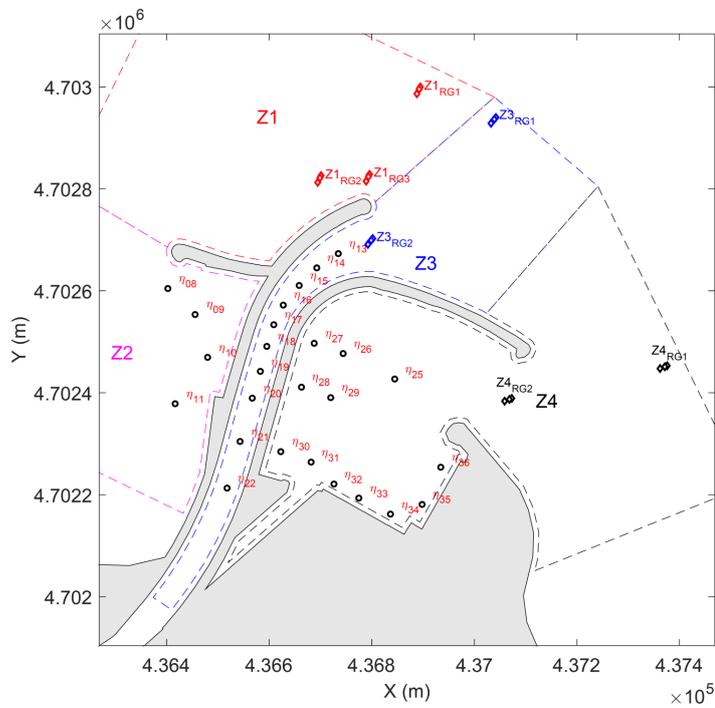


Figura 31. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.



Pianta chiave sonde

- Zona Z2**

Tabella 34. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 4 punti di interesse per la zona Z2

Z2	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
8	0.29
9	0.16
10	0.16
11	0.19

- Zona Z3**

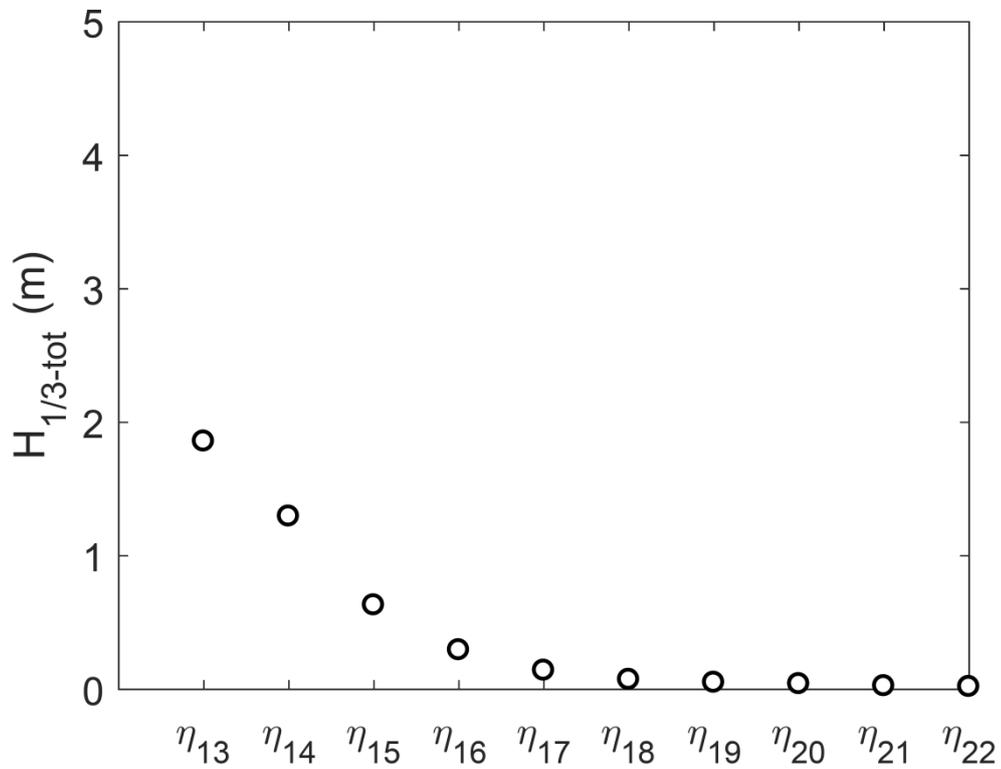


Figura 32. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume.

Tabella 35. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3

Z3	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
13	1.86
14	1.30
15	0.63
16	0.29
17	0.14
18	0.07
19	0.05
20	0.04
21	0.02
22	0.02

- Zona Z4**

Tabella 36. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 2 punti di interesse per la zona Z4

$H_{Z4-RG1}$ (m)	$H_{Z4-RG2}$ (m)
4.74	3.35

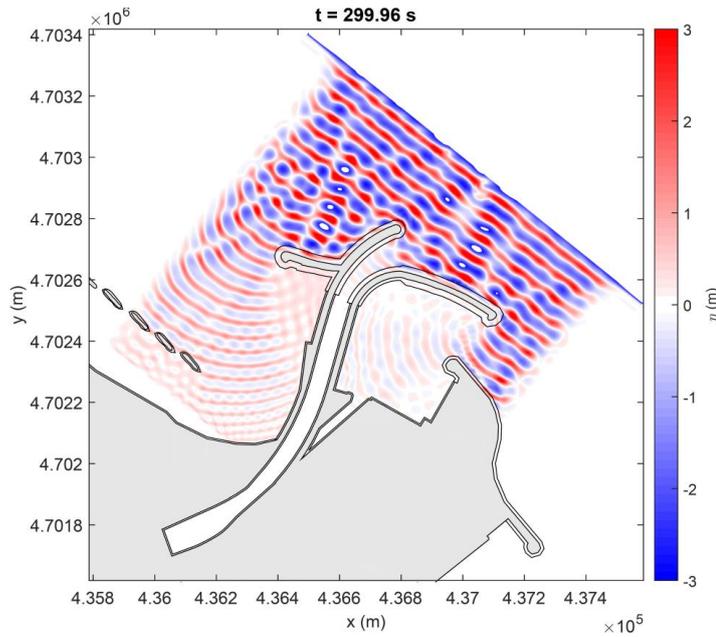
Tabella 37. Altezze d'onda incidenti calcolate nei 12 punti di interesse per la zona Z4

Z4	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
25	1.33
26	1.29
27	1.17
28	1.14
29	1.02
30	1.03
31	0.77
32	0.41
33	0.32
34	0.21
35	0.20
36	0.47

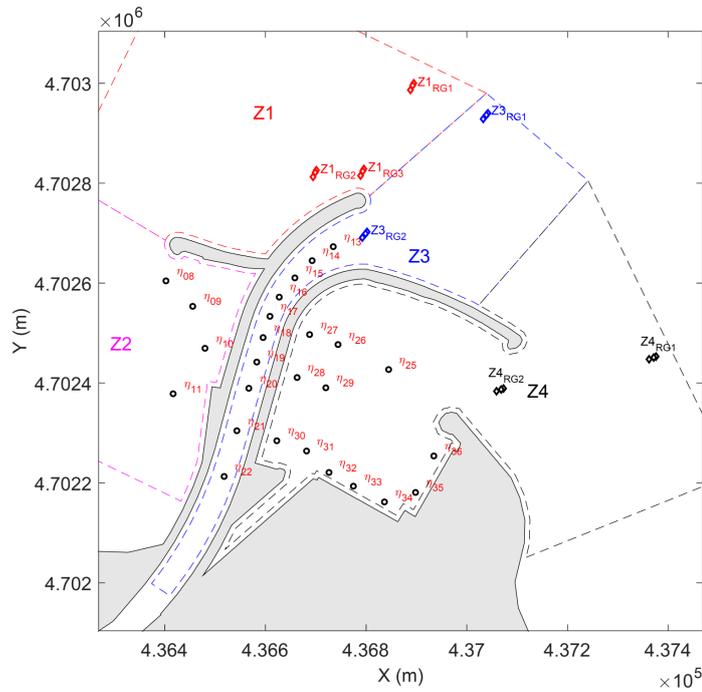
**4.10 Simulazioni idrodinamiche: scenario S10**

- **S10:**  $\theta_0 = 30^\circ\text{N}$ ,  $T_R = 2$  anni,  $H_{m0} = 4.46$  m,  $T_p = 7.21$  s,  $\theta = 26^\circ\text{N}$ ,  $S = 0.65$  m,  $Q = 49.22$  m<sup>3</sup>/s;

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche relative alla configurazione di progetto in presenza dello scenario S10. La Figura 33 mostra l'andamento dell'altezza d'onda nel campo in condizioni stazionarie. In questa simulazione è stata riprodotta la corrente fluviale corrispondente alla portata media annuale. La simulazione va confrontata con quella relativa allo scenario S1.



**Figura 33. Andamento spaziale dell'elevazione della superficie libera ad un fissato istante di tempo.**



**Pianta chiave sonde**

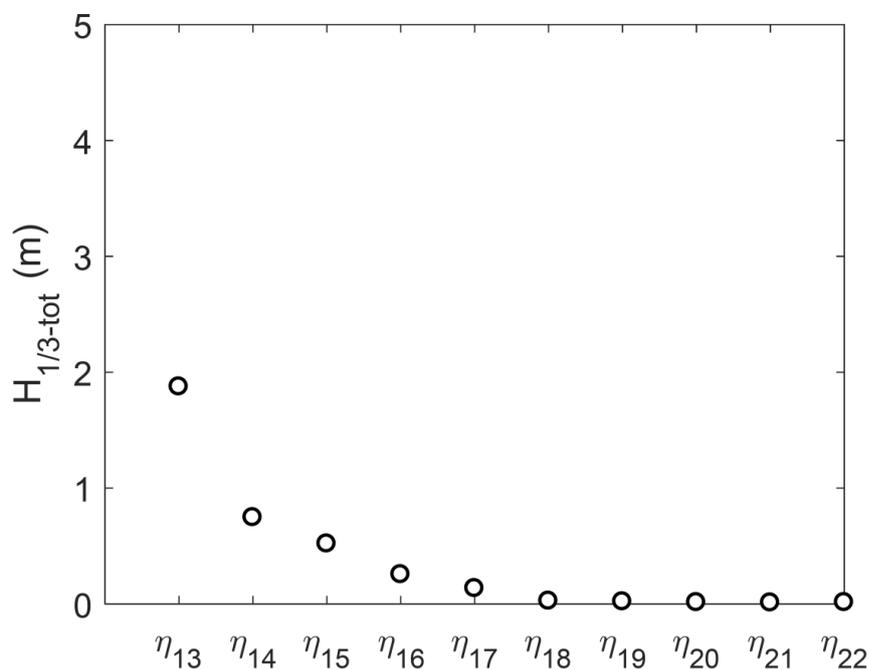


Figura 34. Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume con portata fluviale.

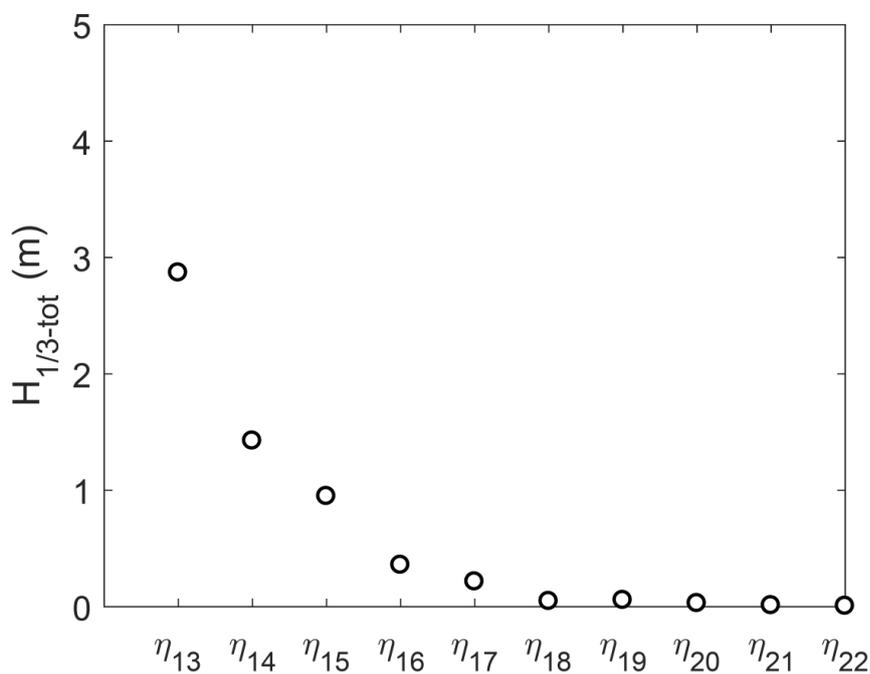


Figura 35 - Andamento dell'altezza d'onda totale lungo l'asse del fiume senza portata fluviale (S1).

Il confronto tra la Figura 34 e la Figura 35 mostra che l'effetto della portata fluviale riduce sensibilmente l'altezza delle onde che riescono a penetrare nel fiume. Pertanto i risultati delle simulazioni effettuate (S1 – S9) devono essere considerati a favore di sicurezza.

Tabella 38. Altezze d'onda totali calcolate nei 10 punti di interesse per la zona Z3

Z3	
WG	$H_{1/3-tot}$
( )	(m)
13	1.88
14	0.75
15	0.52
16	0.25
17	0.13
18	0.03
19	0.02
20	0.01
21	0.01
22	0.01

## 5. CONCLUSIONI

Si riportano di seguito le principali conclusioni che possono essere tratte dallo studio svolto.

Le simulazioni mostrano che lungo il tratto terminale del fiume deviato si verifica una veloce attenuazione del moto ondoso incidente anche con onde provenienti da direzioni prossime a quelle dell'asse della foce fluviale che presentano quindi una potenziale capacità di penetrazione lungo il fiume. L'attenuazione del moto ondoso è tale da non dar luogo per alcuna condizione esaminata alla risalita del moto ondoso nel porto canale dove è assicurata una assoluta tranquillità.

Questi risultati si sono ottenuti in assenza di corrente fluviale, la quale deve essere considerata cautelativa rispetto alla penetrazione delle onde nel fiume. Infatti si è verificato che la presenza della corrente fluviale riduce ulteriormente la capacità di penetrazione delle onde. A tal riguardo si evidenzia che il fiume Pescara presenta mediamente durante tutto l'anno una portata fluviale e quindi una corrente abbastanza sostenuta.

La capacità di attenuazione rispetto al moto ondoso incidente è da imputare alle seguenti ragioni:

- la forma planimetrica del canale deviato caratterizzata da una giacitura curvilinea;
- la presenza del pennello posto in sinistra fluviale;
- la soluzione costruttiva delle opere di deviazione che nel loro tratto terminale sono previste dal PRP del tipo a gettata e quindi in grado di assorbire le onde incidenti.

Si evidenzia infine che dal punto di vista costruttivo non è necessario realizzare lungo i muri di sponda del canale deviato, previsti in palancole, dispositivi particolari per l'attenuazione del moto ondoso.

Questo risultato risulta di estrema importanza. Infatti la storia del porto mostra che una delle ragioni che spinse a realizzare l'antemurale, era costituita dalla necessità di ridurre la penetrazione del moto ondoso all'interno dello stesso porto canale che è caratterizzato da una giacitura rettilinea e privo di pareti in grado di assorbire le onde che risalgono la foce fluviale.

Pertanto, uno dei timori che c'era nel deviare il fiume portando la sua foce oltre l'antemurale era quello relativo alla possibilità di incrementare, rispetto alla situazione attuale, la capacità delle onde di risalire il tratto terminale del fiume. I presenti risultati confermano che questo problema è stato superato dalle soluzioni individuate con il nuovo Piano Regolatore Portuale.

I risultati dello studio sono inoltre propedeutici alla progettazione delle opere oggetto della prima fase di attuazione del PRP.

## Bibliografia

1. Mansard, E.P., Funke, E., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method, in: Coastal Engineering 1980, pp. 154-172.
2. Smit, P., Zijlema, M. and Stelling, G., 2013. Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model. Coast. Eng., 76, 1-16.
3. Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., 2011. SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. Coast. Eng., 58, 992-1012.

Per quanto riguarda la foce fluviale si evidenzia che l'obiettivo delle simulazioni è stato quello di valutare la capacità del moto ondoso di penetrare all'interno del fiume la quale risulta maggiore quando le onde presentano una direzione di propagazione grossomodo coincidente con l'asse della foce fluviale.

La valutazione della penetrazione delle onde lungo l'asta fluviale risulta di estrema importanza in relazione a due aspetti:

- (i) agli aspetti navigazionali;
- (ii) al dimensionamento delle opere.

A tal riguardo si evidenzia che la capacità di penetrazione delle onde all'interno della foce fluviale dipende sia dalla geometria dell'asta fluviale (forme ad S sono ovviamente da preferire rispetto ad andamenti rettilinei) sia dalle caratteristiche dissipative delle opere di delimitazione spondale utilizzate.

in relazione alle stesse onde della tipologia di opere

Per quanto riguarda gli aspetti navigazionali si evidenzia che la capacità del moto ondoso di penetrare all'interno del fiume dipende