



Committente 	Progettista 	COMMESSA	UNITA' 001
	Località RAVENNA	Riferimento Committente 000-ZX-E-17213	
	Progetto / Impianto FSRU e opere connesse	Pag. 1 di 69	Rev. 0

Riferimento TPIDL: 201064C-055-RT-3303-205

EMERGENZA GAS
INCREMENTO DI CAPACITÀ DI RIGASSIFICAZIONE (DL 17.05.2022, n. 50)
FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti

STUDIO SPECIALISTICO DI IDRAULICA MARITTIMA
Studio delle onde di maremoto

CUP ASSEGNATO AL PROGETTO → E63F22000090007

0	Emissione per permessi	P.De Girolamo	L.Nardi	P. Russo	Dicembre 2023
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato Autorizzato	Data

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 2 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

INDICE

1	INTRODUZIONE	7
1.1	Obiettivi.	7
2	LOCALIZZAZIONE DELLA ZONA DI INTERESSE	9
3	INQUADRAMENTO, OBIETTIVI E METODOLOGIA DI LAVORO	12
4	ANALISI PROBABILISTICA E DEFINIZIONE DEGLI SCENARI DI PERICOLOSITA'	17
4.1	Introduzione	17
4.2	Metodologia di scelta dei "POIs" per la definizione della MIH_d	18
4.3	Calcolo della Pericolosità nell'area di ormeggio della FSRU e della diga di protezione in base alla direttiva SiAM	19
5	DEFINIZIONE METODOLOGICA DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO "OFF-SHORE" PER ESEGUIRE LO STUDIO DI INONDAZIONE	22
5.1	Caratteristiche generali delle onde di maremoto oggetto di indagine	22
5.2	Formulazione Teorica di Fenton (1998)	27
5.3	Formulazione Teorica delle N-Waves di Tadepalli e Synolakis (1996)	33
6	DEFINIZIONE DEI SEGNALI DI MAREMOTO ALLA -50 m CON MIH_d CONGRUENTE AL SIAM	35
6.1	DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO E DEI SEGNALI DI LIVELLO PER LO STUDIO DI INONDAZIONE	35
6.2	METODOLOGIA PER LA PROPAGAZIONE DEGLI SCENARI DALLA -50 m FINO IN PROSSIMITA' DELLA DIGA	36
7	RISULTATI SIMULAZIONI DI PROPAGAZIONE ED INONDAZIONE DEGLI SCENARI DI MAREMOTO CONSIDERATI	39
7.1	Descrizione metodologia e modello di calcolo SWASH	39
7.2	Risultati propagazione ed inondazione da onde di maremoto	41
8	SINTESI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI	67
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	68

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 3 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1-1 - Planimetria del nuovo terminale LNG.	8
Figura 1-2 - Sezione corrente della nuova diga a parete verticale di tipo composto.....	8
Figura 2-1 - Inquadramento geografico della FSRU Ravenna.	10
Figura 2-2 - Stato attuale del Pontile Offshore Petra (Pontile PIR) esistente.	10
Figura 2-3 - Planimetria del Pontile Offshore Petra (Pontile PIR) esistente.....	11
Figura 3-1 Mappe di inondazione di allerta rossa definite da ISPRA per il Porto di Ravenna e l'area circostante con segnalata la zona di ormeggio e diga a protezione della FSRU.	14
Figura 4-1 Definizione della massima altezza di inondazione (MIH) in corrispondenza di un Punto di Interesse (POI) posto alla profondità di -50,0 m sul l.m.m.....	18
Figura 4-2 Area di riferimento per Ravenna per la scelta dei POIs sulla base dei quali definire la MIH _d	19
Figura 4-3 Curve di pericolosità all' 84° percentile per i punti presi in esame ottenute assumendo V _n = 50 anni. La linea rossa rappresenta la P _{vr} =0.02	21
Figura 5-1 - Caratteristiche di un'onda di maremoto e del fondale sul quale si propaga ad una profondità di -50 m.	23
Figura 5-2 Grafico di Le Méhauté e definizione delle teorie d'onda appropriate da applicare per un set di parametri H,T e h.	25
Figura 5-3 - La regione in cui verificano onde stazionarie di forma costante, che mostra le onde teoriche più alte (Williams), le più alte onde lunghe sperimentali (Nelson) e la linea di demarcazione proposta da Hedge tra le regioni di applicabilità delle teorie di Stokes e cnoidale.	26
Figura 6-1 Curve batimetriche della zona compresa tra la batimetrica -50 m e la costa con evidenziato il transetto preso in esame nel processo di propagazione per la determinazione dei segnali d'onda da applicare alle simulazioni di dettaglio.	37
Figura 6-2 Batimetrie del transetto analizzato per le simulazioni di propagazione dalla -50 m fino in prossimità della diga.....	38
Figura 7-1 Griglia di calcolo.	40
Figura 7-2 Stralcio della griglia di calcolo nelle vicinanze dell'ormeggio della FSRU e della diga di protezione.	41
Figura 7-3 Propagazione dello Scenario 1 nell'intera griglia a t = 4 min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.	42
Figura 7-4 Propagazione dello Scenario 1 con ingrandimento nelle vicinanze della diga a t = 5.5 min con mostrato il contorno della FSRU.....	43
Figura 7-5 Propagazione dello Scenario 1 nell'intera griglia a t = 7 min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.....	44
Figura 7-6 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 1 nei punti P1, P2, P3.....	45
Figura 7-7 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 1 nei punti P1i, P2i, P3i.	46
Figura 7-8 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 1 nei punti P _{prua} , P _{FSRU} e P _{poppa}	47

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 4 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Figura 7-9 Propagazione dello Scenario 2 nell'intera griglia a $t = 4$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.	48
Figura 7-10 Propagazione dello Scenario 2 con ingrandimento nelle vicinanze della diga a $t = 6$ min con mostrato il contorno della FSRU.....	49
Figura 7-11 Propagazione dello Scenario 2 nell'intera griglia a $t = 6.5$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.....	50
Figura 7-12 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 2 nei punti P1, P2, P3.....	51
Figura 7-13 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 2 nei punti P1i, P2i, P3i.	52
Figura 7-14 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 2 nei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa}	53
Figura 7-15 Propagazione dello Scenario 3 nell'intera griglia a $t = 2$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.	54
Figura 7-16 Propagazione dello Scenario 4 con ingrandimento nelle vicinanze della diga a $t = 4$ min con mostrato il contorno della FSRU.....	55
Figura 7-17 Propagazione dello Scenario 3 nell'intera griglia a $t = 5$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.	56
Figura 7-18 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 3 nei punti P1, P2, P3.....	57
Figura 7-19 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 3 nei punti P1i, P2i, P3i.	58
Figura 7-20 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 3 nei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa}	59
Figura 7-21 Propagazione dello Scenario 4 nell'intera griglia a $t = 2$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.	61
Figura 7-22 Propagazione dello Scenario 4 con ingrandimento nelle vicinanze della diga a $t = 4$ min con mostrato il contorno della FSRU.....	62
Figura 7-23 Propagazione dello Scenario 4 nell'intera griglia a $t = 4$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.	63
Figura 7-24 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 4 nei punti P1, P2, P3.....	64
Figura 7-25 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 4 nei punti P1i, P2i, P3i.	65

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 5 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Figura 7-26 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 4 nei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} 66

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 6 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 4-1 Definizione delle coordinate dei vari POIs presi in esame.....	19
Tabella 4-2 Valori di MIH_d di progetto calcolati in base alla direttiva SiAM ($P_{vr} = 2\%$).....	21
Tabella 6-1 Caratteristiche dei 4 scenari di maremoto caratterizzati dalla $MIH_d = 0.46$ m assunti a largo dell'ormeggio della FSRU in corrispondenza della profondità -50,0 m sul l.m.m.	36
Tabella 6-2 Coordinate del punto iniziale del transetto in corrispondenza del POI 1 alla profondità di circa - 50 m in WGS84 / UTM zone 33N.	37
Tabella 7-1 Valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi e minimi della superficie libera ottenuti per lo Scenario 1 in corrispondenza dei punti Pprua, P_{FSRU} e Ppopa posti in corrispondenza della FSRU.....	47
Tabella 7-2 Valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi e minimi della superficie libera ottenuti per lo Scenario 2 in corrispondenza dei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{popa} posti in corrispondenza della FSRU.....	53
Tabella 7-3 Valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi e minimi della superficie libera ottenuti per lo Scenario 3 in corrispondenza dei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{popa} posti in corrispondenza della FSRU.....	59
Tabella 7-4 Valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi della superficie libera ottenuti per lo Scenario 4 in corrispondenza dei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{popa} posti in corrispondenza della FSRU.....	66
Tabella 8-1 Sintesi dei valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi e minimi della superficie libera ottenuti per i quattro scenari simulati in corrispondenza dei punti Pprua, P_{FSRU} e Ppopa posti in corrispondenza della FSRU.	67

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 7 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

1 INTRODUZIONE

Il presente rapporto descrive lo studio delle onde di maremoto finalizzato a verificare il loro impatto sia sulla nuova diga foranea posta a protezione dell'ormeggio della FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) sia sulle condizioni di ormeggio della stessa nave.

Lo studio è stato curato dal punto di vista tecnico-scientifico dal Prof. Ing. Paolo De Girolamo con Modimar Project s.r.l., che si sono avvalsi della collaborazione dell'ing. Gioele Ruffini e della ing. Myrta Castellino entrambi PhD.

1.1 Obiettivi.

Il nuovo terminale marittimo funzionale ad accogliere la nave FSRU sarà localizzato a Sud-Est del Porto di Ravenna dove attualmente è situato l'esistente terminale offshore per prodotti liquidi costituito da un pontile su pali denominato Petra (società del gruppo PIR).

Con riferimento alla Figura 1-1e alla Figura 1-2, il nuovo terminale LNG si compone di una nuova diga foranea a parete verticale di tipo composto a cassoni e di un nuovo pontile su pali per l'ormeggio della FSRU e delle navi "carrier" che riforniranno con l'LNG la stessa RFU. La funzione della diga foranea sarà quella di proteggere dal moto ondoso incidente di maggiore intensità, proveniente dal I° e dal II° quadrante, la zona di ormeggio delle navi e di consentire l'ormeggio dei rimorchiatori a supporto delle navi.

In questo contesto, l'obiettivo del presente studio è stato quello di definire nell'area in esame le massime escursioni del livello idrico e le massime velocità della corrente indotte dalla propagazione di onde di maremoto generate da sismi tenendo conto della presenza delle nuove opere e in particolare della nuova diga foranea.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 9 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

2 LOCALIZZAZIONE DELLA ZONA DI INTERESSE

Con riferimento alla Figura 2-1, la zona dove si prevede di ormeggiare la FSRU Ravenna è localizzata a Sud-Est dell'imboccatura del porto di Ravenna a circa 7,4 km (circa 4 miglia nautiche) di distanza dalla stessa imboccatura e a circa 8,5 km dalla costa (Punta Marina).

La zona di ormeggio ricade nell'area attualmente occupata dal pontile offshore denominato Piattaforma Petra (vedi Figura 2-2 e Figura 2-3) indicato anche pontile PIR.

Con riferimento alla Figura 2-3, l'asse longitudinale del pontile presenta, rispetto al Nord geografico, un angolo ruotato verso Est di pochi gradi (circa 11° N) in modo tale da trapiandare verso Nord Punta della Maestra (vedi Figura 2-1) che costituisce il punto posto più ad Est del Delta del Po.

Dal punto di vista geografico il Pontile PIR è schermato a Nord dal delta del Po, la cui propaggine più orientale è costituita da Punta della Maestra, e a Sud-Est dal promontorio del Conero, dove sorge il Porto di Ancona.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 10 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

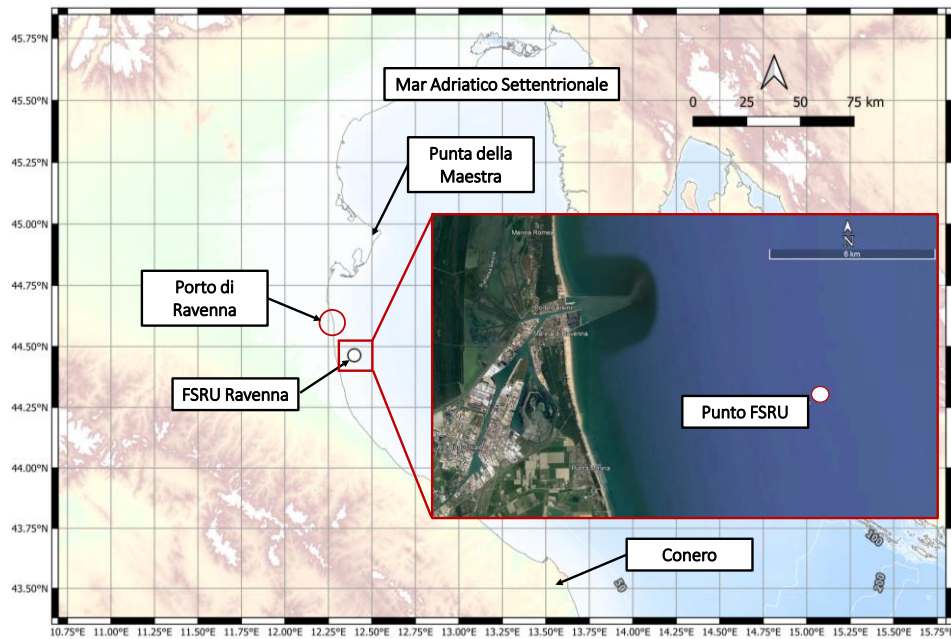


Figura 2-1 - Inquadramento geografico della FSRU Ravenna.



Figura 2-2 - Stato attuale del Pontile Offshore Petra (Pontile PIR) esistente.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 11 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

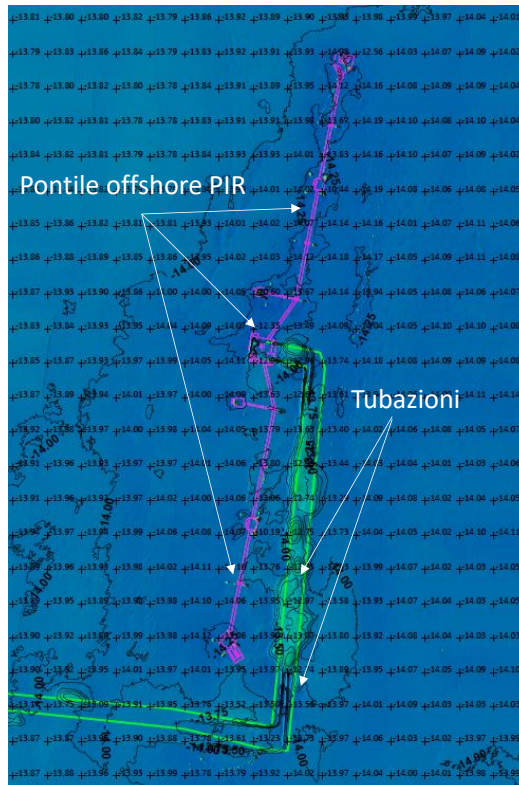


Figura 2-3 - Planimetria del Pontile Offshore Petra (Pontile PIR) esistente.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 12 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

3 INQUADRAMENTO, OBIETTIVI E METODOLOGIA DI LAVORO

Come accennato in precedenza, l'obiettivo del presente studio è stato quello di definire gli scenari di pericolosità indotti dalle onde di maremoto generate da sismi per la zona di ormeggio della FSRU e per la diga di protezione in progetto.

Per conseguire questo obiettivo si sono definite le opportune condizioni al contorno in funzione delle quali è stato effettuato lo studio numerico relativo alla propagazione delle onde di maremoto e alla loro interazione con la nuova diga marittima. Il codice di calcolo utilizzato è in grado di riprodurre anche eventuali fenomeni di inondazione costiera e di tracimazione di opere marittime come la nuova diga foranea.

Allo stato attuale in Italia non esistono norme o leggi di tipo prescrittivo che richiedano in modo esplicito di tenere conto delle onde di maremoto per la progettazione di opere marittime e di infrastrutture costiere.

Tuttavia, recentemente, nel 2017, è stato creato per fini di Protezione Civile il Sistema di Allertamento Nazionale Maremoti (SiAM) (vedi Direttiva PCM pubblicata sulla GU n.128 5/6/2017), nell'ambito del quale è stato sviluppato un metodo di previsione di tipo probabilistico delle onde di maremoto generate da sisma applicabile a tutte le coste italiane. Per lo sviluppo del presente lavoro si è deciso di fare riferimento a tale metodo.

Si espongono di seguito sinteticamente le attività e la struttura del SiAM al fine di contestualizzare il metodo di previsione probabilistico utilizzato per lo sviluppo del presente studio.

Il SiAM esplica le seguenti attività:

- analizza in tempo reale i dati di osservazione provenienti dalle stazioni delle reti sismiche nazionali e internazionali, per l'immediata individuazione e caratterizzazione degli eventi sismici con epicentro in mare o nelle immediate vicinanze e che sono quindi potenzialmente in grado di generare maremoti nella zona di competenza del Centro Allerta Tsunami;
- valuta la possibilità che in conseguenza ad un terremoto possa avvenire un maremoto e di quale entità;
- diffonde la messaggistica d'allerta.

Il SiAM è composto:

- dall'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), che opera attraverso il Centro Allerta Tsunami (CAT) ed elabora i messaggi di allerta;
- dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), che fornisce i dati registrati dalla Rete Mareografica Nazionale al CAT;
- dal Dipartimento della protezione civile (DPC), che distribuisce i messaggi di allerta.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 13 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Nel 2018 il DPC (GU n.266 1_11_2018) ha pubblicato le *“Indicazioni alle Componenti ed alle Strutture operative del Servizio nazionale di protezione civile per l’aggiornamento delle pianificazioni di protezione civile per il rischio maremoto”*, dove sono descritte:

- le zone di allertamento e le mappe di pericolosità da maremoti indotti da sismi sviluppate dall'ISPRA;
- la strategia di allertamento;
- la pianificazione regionale, provinciale e comunale.

Le “Mappe d’inondazione da tsunami indotto da sisma (MIT)” e le relative zone di allertamento elaborate da ISPRA coprono tutte le coste italiane e sono consultabili al seguente link:

<http://sgi2.isprambiente.it/tsunamimap/>.

Le mappe individuano le aree costiere italiane potenzialmente esposte a maremoti generati da terremoti. La loro elaborazione, prevista dalla sopra citata Direttiva SiAM del 17 febbraio 2017 e dalle indicazioni del Capo Dipartimento della Protezione Civile, ha la finalità di supportare gli enti e le amministrazioni nelle attività di pianificazione di protezione civile e di allertamento in ambito SiAM.

Come indicato nel sito, queste mappe, devono essere considerate preliminari perché sono state realizzate applicando una metodologia speditiva anche se accreditata a livello internazionale. Al momento, comunque, rappresentano le migliori informazioni a disposizione sulla base dei dati fruibili a livello nazionale. Sono quindi aperte ad affinamenti, in funzione della qualità e della risoluzione dei dati di base cartografici e dell’evoluzione delle metodologie di elaborazione.

Queste mappe, da considerarsi provvisorie ma di dettaglio per la Regione Emilia-Romagna, mostrano che il porto di Ravenna può essere potenzialmente soggetto a fenomeni di inondazione indotti da maremoti generati da sismi (vedi Figura 3-1) e di conseguenza è legittimo aspettarsi che anche la zona di ormeggio della FSRU e la diga può essere sottoposta a un simile rischio.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 14 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

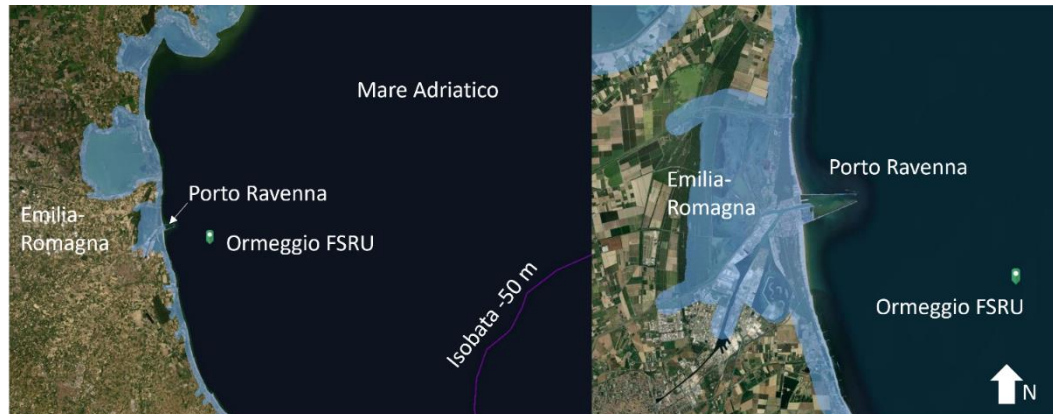


Figura 3-1 Mappe di inondazione di allerta rossa definite da ISPRA per il Porto di Ravenna e l'area circostante con segnalata la zona di ormeggio e diga a protezione della FSRU.

Pertanto, si è deciso di eseguire uno studio apposito al fine di verificare con maggior dettaglio l'effettiva situazione di esposizione della zona di ormeggio della FSRU e della diga di protezione, alla pericolosità di allagamenti indotti da maremoti generati da sismi.

Lo studio comprende la definizione degli scenari di pericolosità e la definizione delle condizioni al contorno per un modello numerico in grado di simulare l'evoluzione spazio-temporale delle onde di maremoto da largo fino alla zona di interesse al fine di definire con accuratezza le aree di inondazione attese sulla diga e le massime escursioni di variazione di superficie libera e massime velocità. Per definire le caratteristiche delle onde di maremoto incidenti da largo da prendere in esame per il sito della FSRU Ravenna, si è applicato lo stesso approccio utilizzato dall' ISPRA per la redazione delle carte di inondazione costiere.

Tale approccio si basa sulla «*quantificazione probabilistica della pericolosità dovuta a maremoti indotti da sismi*» (S-PTHA – *Seismic - Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*) sviluppata tra il 2016 e il 2018 nell'ambito del Progetto Europeo TSUMAPS-NEAM (North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and connected seas), co-finanziato dal DGECHO e coordinato dall' INGV.

I risultati di TSUMAPS-NEAM sono pubblici e consultabili al sito web:

<http://ai2lab.org/tsumapsneam/interactive-hazard-curve-tool/>

Nel sito sono riportate le curve interattive di pericolosità per tutte le coste del Nord Est Atlantico, del Mediterraneo e dei mari ad esso collegati incluso il Mar Nero (NEAM).

Ciascuna curva di pericolosità esprime la massima altezza d'inondazione (*MIH: Maximum Inundation Height*) in funzione della relativa probabilità di superamento. Le curve di pericolosità sono espresse in termini di percentili che caratterizzano l'incertezza della previsione. Le curve di pericolosità risultano essere funzione dei seguenti parametri:

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 15 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

- tempo di esposizione V_n ;
- tempo di ritorno T_r dell'evento sismico che genera il maremoto;
- incertezza della curva di pericolosità espressa in percentili.

Le curve vengono fornite per punti di interesse, denominati "POIs" (Points Of Interest), localizzati a largo della costa alla profondità di circa -50 m s.l.m.m e ad una distanza l'uno dall'altro di circa 20 km.

Dal punto di vista metodologico nell'ambito della presente relazione si è operato come segue:

- in primo luogo, si sono definiti per il sito di ormeggio della FSRU i POIs di riferimento per il calcolo della Maximum Inundation Height di progetto (MIH_d) seguendo la metodologia fornita da Tonini et al. (2021) "Testing Tsunami Inundation Maps for Evacuation planning in Italy" la cui procedura è illustrata nel Capitolo 4;
- si è poi definita la MIH_d a largo della zona di ormeggio della FSRU (profondità – 50,0 m) utilizzando le curve di pericolosità facendo riferimento allo scenario della direttiva SiAM che prevede di utilizzare una MIH_d caratterizzata da una probabilità di superamento del 2%;
- si è infine definita la metodologia di calcolo da utilizzare per generare le serie temporali di variazione della superficie libera rispetto al l.m.m da imporre come condizione al contorno "a largo" (off-shore) al modello numerico impiegato al fine di riprodurre la MIH_d e quindi poter calcolare l'evoluzione spazio-temporale delle onde che si propagano da largo in costa per determinare le effettive aree di inondazione nella zona oggetto degli interventi.

Si riportano di seguito le fonti normative e conoscitive in base alle quali si è sviluppata l'analisi riportata nel presente rapporto:

1. TSUMAPS-NEAM NEAMTHM18 Documentation: the making of the TUSMAPS-NEAM Tsunami Hazard Model 2018, 11/09/2019;
2. TSUMAPS-NEAM: Extended Progress Report, 15/03/2018;
3. DPCM del 17 Febbraio 2017: Istituzione del Sistema d'Allertamento nazionale per i maremoti generati da sisma;
4. Allegati 1-4 al Dpcm del 17 Febbraio 2017;
5. Art. 18 del Decreto Legislativo 2 Gennaio 2018, n.1 del 2018 "Codice della protezione civile";

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 16 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

6. Indicazioni per l'aggiornamento delle pianificazioni di protezione civile per il rischio di maremoto, 05/06/2017;
7. Allegato 1 alle indicazioni operative – Metodologia utilizzata per la definizione delle zone di allertamento, 05/06/2017;
8. Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series (UNESCO): Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas, NEAMTWS – Implementation Plan v.3.4, ottobre 2009;
9. Tonini, R., Di Manna, P., Lorito, S., Selva, J., Volpe, M., Romano, F., & Vittori, E. (2021). Testing Tsunami Inundation Maps for Evacuation Planning in Italy. *Frontiers in Earth Science*, 9, 82.
10. Basili, R., Brizuela, B., Herrero, A., Iqbal, S., Lorito, S., Maesano, F. E., & Zaytsev, A. (2021). The making of the NEAM tsunami hazard model 2018 (NEAMTHM18). *Frontiers in Earth Science*, 8, 753.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 17 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

4 ANALISI PROBABILISTICA E DEFINIZIONE DEGLI SCENARI DI PERICOLOSITA'

4.1 Introduzione

Come accennato in precedenza, la quantificazione probabilistica della pericolosità dovuta a maremoti indotti da sismi (S-PTHA – *Seismic - Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*) è stata sviluppata per le coste del Nord-Est Atlantico, del Mediterraneo e dei mari collegati tra il 2016 e il 2018 nell'ambito del Progetto Europeo *TSUMAPS-NEAM* (North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and connected seas) co-finanziato dal DGECHO e coordinato dall' INGV (<http://www.tsumaps-neam.eu/>).

In particolare, seguendo l'isobata – 50,0 m s.l.m.m prospiciente la fascia costiera analizzata, che include tutta la costa italiana, la stessa fascia costiera è stata suddivisa in tratti di lunghezza pari a circa 20 km denominata zona di interesse (target area). In corrispondenza all'estremità di ciascun tratto di fascia costiera posta alla profondità – 50,0 m s.l.m.m, sono stati localizzati i punti di interesse (POIs - POints of Interest), dove è stata eseguita la quantificazione probabilistica della pericolosità dovuta ai maremoti.

Il parametro utilizzato per esprimere la pericolosità del maremoto è costituito dalla Massima Altezza di Inondazione (*Maximum Inundation Height – MIH*) rappresentata nella Figura 4-1. Questa altezza esprime la massima altezza raggiunta dalla cresta delle onde di maremoto rispetto al livello medio marino lungo un profilo topografico ortogonale alla costa. La MIH calcolata in corrispondenza dei POIs rappresenta l'intensità del maremoto nella zona di interesse associata a ciascun POI.

In sostanza la *MIH* esprime la massima quota raggiunta dalla cresta delle onde rispetto al l.m.m. locale e deve essere considerata rappresentativa di un tratto di fascia costiera.

In corrispondenza di ciascun POI vengono fornite le curve di pericolosità. Ciascuna curva di pericolosità esprime la massima altezza di inondazione MIH in funzione della sua probabilità di superamento. Le curve di pericolosità sono espresse in termini di percentili che caratterizzano l'incertezza della previsione.

Le curve di pericolosità di ciascun POI sono state calcolate prendendo in esame tutte le possibili sorgenti "tsunamigeniche" che caratterizzano l'area in esame e ricostruendo, mediante simulazioni numeriche lineari, un elevato numero di scenari di maremoto. I valori della *MIH* ottenuti lungo le fasce costiere rappresentate da ciascun POI e per ogni scenario di maremoto propagato, sono andati a costituire la popolazione di dati sulla base della quale sono state calcolate le curve di pericolosità.

I periodi dei maremoti presi in esame per la definizione della *MIH* sono compresi tra 120 s ai 3600 s.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 18 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Si sono analizzati maremoti tali da dar luogo sia ad un cavo che ad una cresta come movimento iniziale della superficie libera.

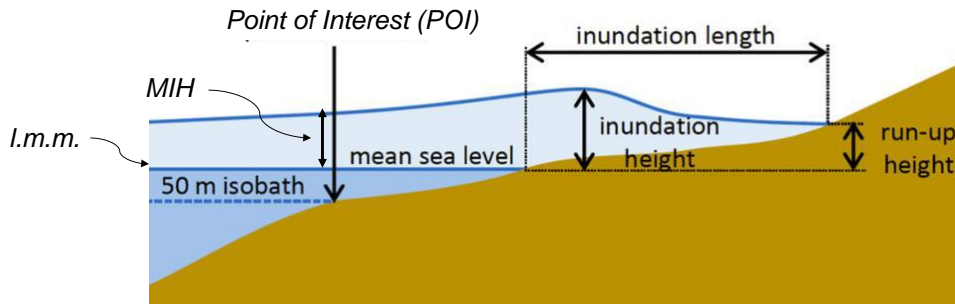


Figura 4-1 Definizione della massima altezza di inondazione (MIH) in corrispondenza di un Punto di Interesse (POI) posto alla profondità di -50,0 m sul l.m.m.

Come già accennato, nella Figura 3-1 sono riportate, per uno scenario di “allerta rossa”, le mappe di inondazione causate da un maremoto nella zona di Ravenna ottenute da ISPRA. Le mappe, che come indicato nel sito dell’ISPRA sono da considerarsi di dettaglio ma non definitive per la Regione Emilia-Romagna, sono state ottenute utilizzando una procedura semplificata, descritta anche in Tonini et al. (2021), che non ha previsto l’applicazione di simulazioni numeriche per riprodurre la propagazione delle onde di maremoto tra la profondità di -50.0 m e la fascia costiera.

La mappa mostra che l’area d’inondazione è particolarmente critica per tutta l’area portuale in quanto ricade tutta nell’area inondabile.

4.2 Metodologia di scelta dei “POIs” per la definizione della MIH_d

Nella Figura 4-2 sono riportati i punti di interesse (POIs) localizzati lungo la costa della dell’Emilia-Romagna posti in prossimità dell’ormeggio della FSRU.

Per quanto riguarda questi ultimi, seguendo il suggerimento di Tonini et al. (2021), si è tracciata una circonferenza con centro ricadente nella zona baricentrale dell’area in esame (ormeggio FSRU) e raggio di 40 km. Nessun POI ricade all’interno della suddetta circonferenza. Per questo motivo si sono considerati ai fini del calcolo della MIH_d i 3 POIs più vicini al bordo della circonferenza disegnata denominati 1, 2 e 3.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 19 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

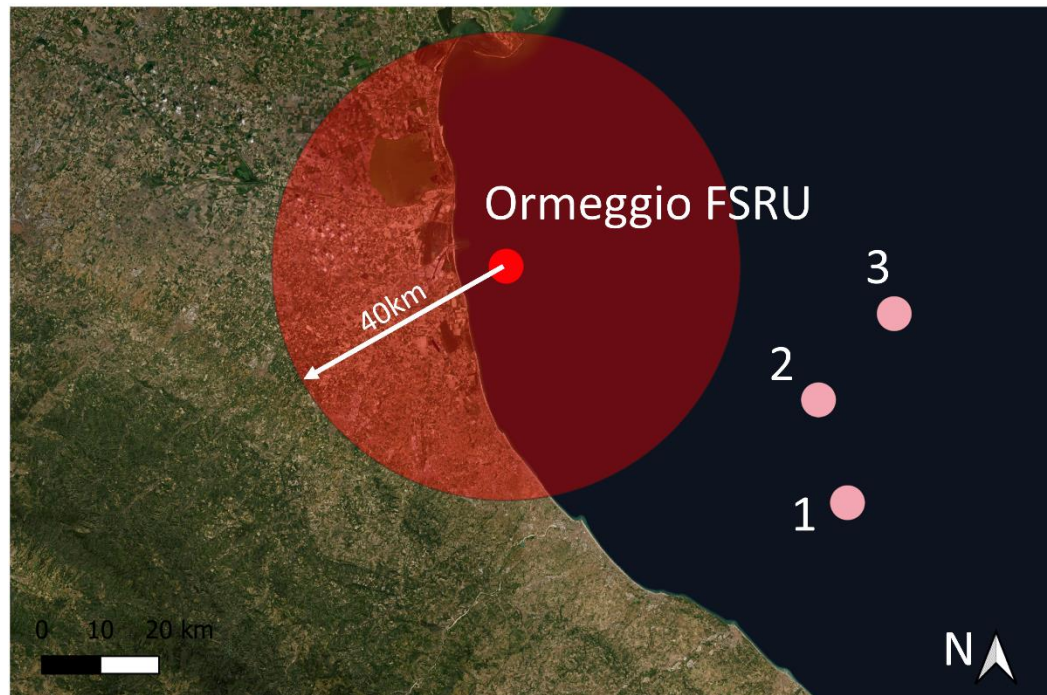


Figura 4-2 Area di riferimento per Ravenna per la scelta dei POIs sulla base dei quali definire la MIH_d .

Tabella 4-1 Definizione delle coordinate dei vari POIs presi in esame.

POI	Latitudine	Longitudine
1	44.115	13.142
2	44.272	13.075
3	44.407	13.233

4.3 Calcolo della Pericolosità nell'area di ormeggio della FSRU e della diga di protezione in base alla direttiva SiAM

4.3.1 Definizione della probabilità di superamento

Come accennato in precedenza, in corrispondenza ad ogni punto di interesse (POI) posto ad una profondità di circa -50 m s.l.m.m. il progetto TSUMAPS-NEAM fornisce le curve di pericolosità che associano la probabilità di superamento P_{vr} alla MIH incidente da largo. Le curve sono espresse in termini di percentili che caratterizzano l'incertezza della previsione.

Utilizzando la formula di validità generale adattata al presente caso, si ricorda che la probabilità di superamento P_{vr} viene definita come segue:

$$P_{vr}(MIH \geq MIH_d) = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{V_n} \quad [1]$$

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 20 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

dove P_{vr} esprime, in corrispondenza del singolo POI, la probabilità che la MIH risulti superiore alla MIH_d (MIH design, ovvero MIH di progetto), caratterizzata dal tempo di ritorno T_r , durante la finestra temporale di durata V_n comunemente denominata “tempo di esposizione” dell’opera.

La direttiva del SiAM stabilisce che la massima altezza d’inondazione MIH da considerare per il calcolo delle aree di allagamento in un singolo POI deve essere definita tenendo conto dei seguenti parametri:

- tempo di esposizione $V_n = 50$ anni;
- tempo di ritorno dell’evento sismico che genera il maremoto $T_r = 2500$ anni al quale è associata la MIH_d ;
- curva di pericolosità relativa all’84° percentile.

Inserendo nell’equazione [1] i primi due parametri sopra riportati, si ottiene che la probabilità di superamento dell’evento MIH_d di progetto per il singolo POI risulta pari a $P_{vr} = 0,02$ (2%).

In sintesi, si può affermare che la direttiva SiAM impone che la massima probabilità di superamento accettabile per la MIH_d sia pari al 2%.

Nel decreto del 2 Ottobre 2018 (GU n.266 1_11_2018) il DPC ha pubblicato in allegato le “Indicazioni alle Componenti ed alle Strutture operative del Servizio nazionale di protezione civile per l’aggiornamento delle pianificazioni di protezione civile per il rischio maremoto”. Nel documento allegato sono stati definiti i parametri sopra riportati, giustificandone la scelta sulla base delle seguenti ragioni:

- la scelta del tempo di ritorno uguale a 2500 anni risulta più cautelativa rispetto a quella cui fanno riferimento le norme sismiche (anche a livello internazionale) per la definizione dell’azione sismica di progetto sia per le costruzioni ordinarie, sia per le costruzioni strategiche;
- l’adozione dell’84° percentile, più prudenziale rispetto alle norme sismiche italiane che fanno invece riferimento al 50° percentile, tiene conto delle maggiori incertezze insite nella previsione probabilistica degli tsunami;
- 2500 anni è anche il tempo di ritorno adottato o suggerito in USA e in Nuova Zelanda (New Zealand DGL8/16; ASCE7 Standard Tsunami Chapter) nell’analoga trattazione del rischio tsunami;
- i risultati che si ottengono in termini di aree di allagamento sono compatibili con le massime aree di allagamento osservate storicamente.

Tenendo conto di questi parametri, si riportano nella Figura 4-3 le curve di pericolosità relative ai 3 punti e corrispondenti all’84°. Come si evince dalla Figura 4-3 il punto che risulta nella MIH più elevata è quello del POI 1.

I valori numerici di MIH_d relativi alla probabilità di superamento del 2% prevista dalla direttiva SiAM sono riportati per i 3 POI’s selezionati nella Tabella 4-2 dalla quale si evince che i risultati più cautelativi in termini di MIH_d si ottengono per il POI 1.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 21 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Pertanto, si assume che il valore scelto di MIH_d sia cautelativo in quanto riferito ad un $Tr = 2500$ anni generalmente superiore a quello definito nelle norme sismiche italiane

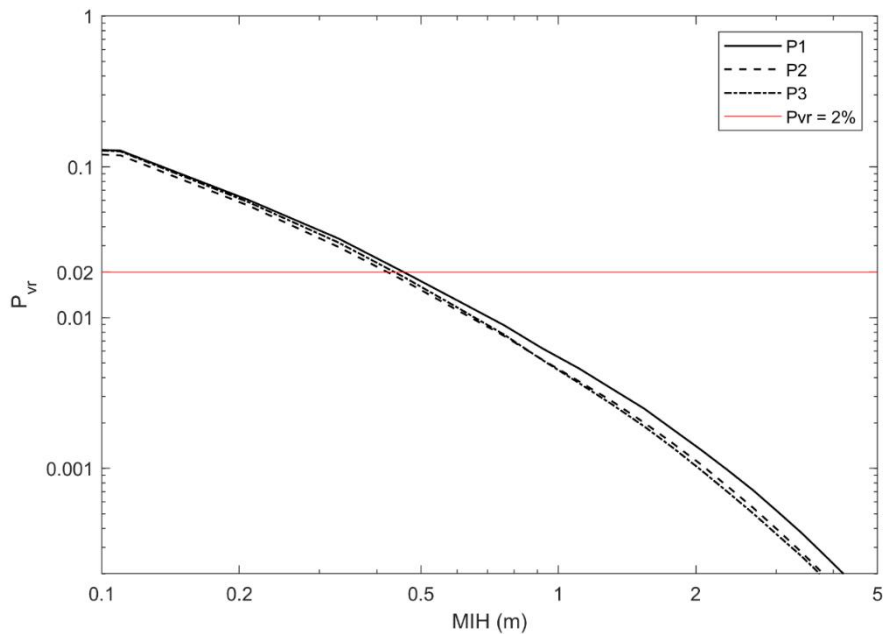


Figura 4-3 Curve di pericolosità all' 84° percentile per i punti presi in esame ottenute assumendo $V_n = 50$ anni. La linea rossa rappresenta la $P_{vr}=0.02$

Tabella 4-2 Valori di MIH_d di progetto calcolati in base alla direttiva SiAM ($P_{vr} = 2\%$).

POI	MIH (m)
1	0.46
2	0.43
3	0.45

Perciò, seguendo i valori calcolati e riassunti in Tabella 4-2 l' MIH_d sarà quello riferito al POI 1 con un valore di 0.46 m.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 22 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

5 DEFINIZIONE METODOLOGICA DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO “OFF-SHORE” PER ESEGUIRE LO STUDIO DI INONDAZIONE

5.1 Caratteristiche generali delle onde di maremoto oggetto di indagine

Per definire ciascun maremoto in modo completo, occorre associare alla massima altezza d'inondazione di progetto MIH_d , una o più serie temporali di variazione della superficie libera rispetto al l.m.m. da imporre come condizione al contorno “a largo” (off-shore) al modello numerico che si intende utilizzare per simulare l'evoluzione spazio-temporale delle onde di maremoto da largo a riva.

Con riferimento al metodo probabilistico di pericolosità da maremoti indotti da sisma (S-PTHA) sviluppato nell'ambito del progetto Europeo TSUMAPS-NEAM descritto nei precedenti paragrafi, la serie temporale deve rispondere ai seguenti requisiti:

- deve garantire in corrispondenza della profondità – 50,0 m sul l.m.m. il valore della MIH_d di progetto stabilita;
- deve presentare periodi compresi tra 120 s e 3600 s;
- l'onda di maremoto può presentare sia un cavo che una cresta come movimento iniziale della superficie libera.

Evidentemente questi requisiti non consentono di definire in modo univoco o quantomeno di circoscrivere un segnale temporale di livello della superficie libera e pertanto occorre prendere in esame una serie di segnali di livello (chiamati scenari di maremoto), in modo tale da ottenere alla profondità di -50 m la MIH_d desiderata

Per stabilire dove porre le condizioni al contorno del modello occorre valutare in via preventiva la pendenza relativa del fondale espressa dalla seguente relazione:

$$s_{rel} = s\lambda/h \quad [2]$$

dove s rappresenta la pendenza media della scarpata continentale nella zona in esame, λ la lunghezza d'onda che dipende dal periodo ed h la profondità locale. La (2), sostanzialmente esprime la variazione di fondale che si realizza su una lunghezza d'onda adimensionalizzata rispetto alla profondità media del fondale. Se la condizione:

$$s_{rel} = \frac{s\lambda}{h} < 1 \quad [2']$$

detta condizione di “mild slope”, è rispettata, il maremoto è in grado di adattarsi progressivamente al fondale e la condizione al contorno, in termini di variazione del livello del mare, può essere imposta alla profondità di -50,0 m. In caso contrario occorre riprodurre l'evoluzione del maremoto a partire dalla profondità di base del bacino posta al piede della scarpata continentale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 23 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Per lo studio in esame, facendo riferimento al fondale antistante Ravenna, la condizione di "mild-slope" è rispettata.

Il Mare Adriatico infatti presenta una acclività molto modesta per profondità superiori alla batimetrica -50 m. Considerando le profondità comprese tra la -100 m e la -50 m (dove il valore di MIH_d deve essere garantito), la pendenza media del fondale risulta pari all'incirca a 0.0003.

Tenendo conto del campo di periodi del maremoto in esame, compreso tra circa 120s e 3600 s, la condizione di mild slope [2'] è rispettata. Infatti, facendo riferimento al massimo periodo $T=3600$ s, stimando la celerità del maremoto con la relazione $c=\sqrt{(9.81 \times 100)}=31.32$ m/s si ottiene la lunghezza d'onda $\lambda=c \times T=112755$ m per cui risulta $s_{rel}=0.67$.

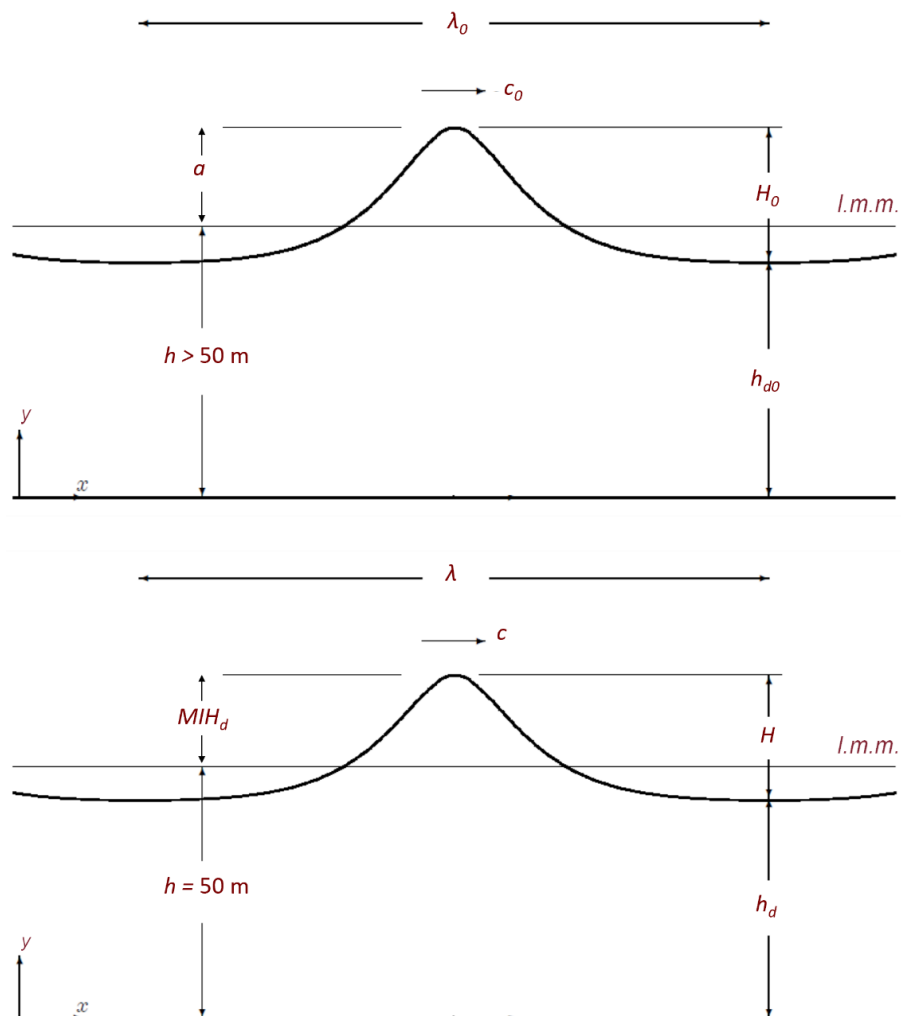


Figura 5-1 - Caratteristiche di un'onda di maremoto e del fondale sul quale si propaga ad una profondità di -50 m.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 24 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Partendo quindi da una profondità di -50 m, a seconda del periodo considerato in relazione al singolo scenario di maremoto, per garantire il requisito onda "localmente compatibile con il fondale" si può fare ricorso al famoso grafico di Le Méhauté (1969)¹ riportato nella Figura 5-2, che consente di definire la teoria del moto ondoso più appropriata da associare ad un'onda caratterizzata dal periodo T , dall'altezza H e che si propaga su un fondale di profondità h . Le teorie rappresentate nel diagramma descrivono onde periodiche.

Il grafico di Le Méhauté presenta in ascissa e in ordinata rispettivamente i seguenti rapporti:

$$\frac{h}{gT^2} \quad \text{e} \quad \frac{H}{gT^2}$$

[3]

dove gT^2 risulta, in base alla relazione di dispersione della teoria di Stokes al primo e al secondo ordine:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh), \quad [4]$$

proporzionale alla lunghezza d'onda in acqua profonda $L_0 = gT^2/2\pi$ con g accelerazione di gravità. Nella [4] $\omega = 2\pi/T$ è la frequenza angolare e $k = 2\pi/L$ è il numero d'onda, con L lunghezza d'onda da considerare equivalente a λ . Come noto la (4) in acqua bassa fornisce per la celerità di fase c il valore $c = \sqrt{gh}$.

¹ Le Mehaute, B., 1969. An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves. Water Wave Theories, 2, U.S. Department of Commerce, ESSSA, Washington.

Documento di proprietà **Snam**. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 25 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

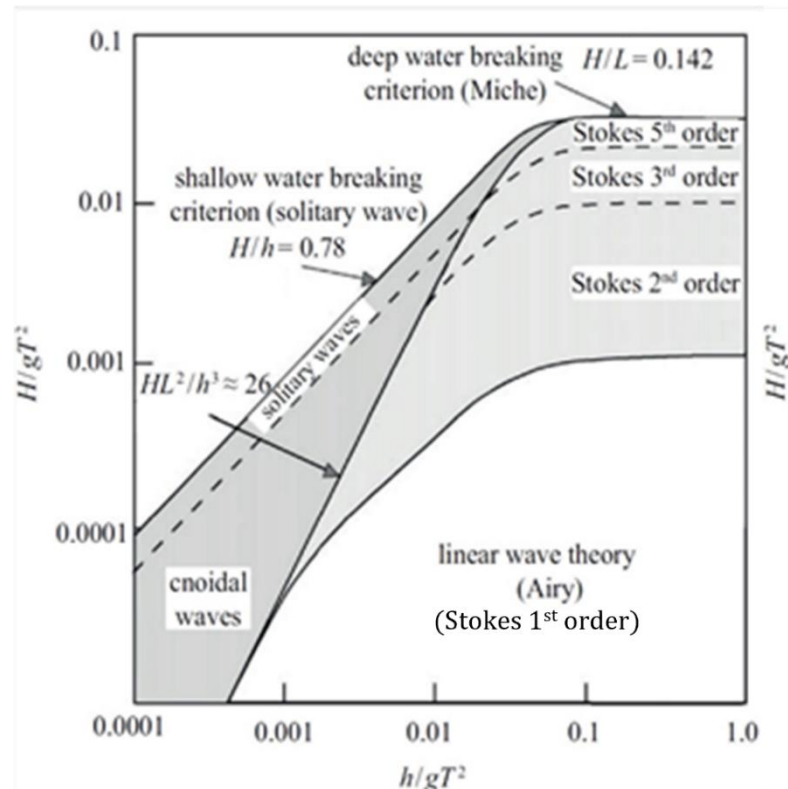


Figura 5-2 Grafico di Le Méhauté e definizione delle teorie d'onda appropriate da applicare per un set di parametri H, T e h .

Come visto, nel caso in esame per $120\text{ s} \leq T \leq 3600\text{ s}$ le onde possono essere generate ad una profondità $h = 50\text{ m}$, pertanto, si ottiene che il valore massimo dell'ascissa del diagramma, che si determina per $T = 120\text{ s}$, diviene:

$$\frac{h}{gT^2} = \frac{50}{9,81 \cdot 120^2} = 0,00035 \quad [5]$$

Pertanto, le onde in esame per questo intervallo di periodi rientrano nel campo delle "onde cnoidali" (*cnoidal waves*) e successivamente "onde solitarie" (*solitary waves*). Si ricorda che la lunghezza di un'onda e il periodo di un'isolitaria sono teoricamente infiniti.

Con riferimento alla Figura 5-1, si evidenzia che l'altezza d'onda H generalmente non coincide con la MIH_d , alla -50 m , la quale invece coincide con l'altezza della cresta dell'onda rispetto al l.m.m. assunto come riferimento per studiare la propagazione. Tra queste grandezze sussiste la seguente relazione facilmente derivabile dalla Figura 5-1:

$$MIH_d = H - (50 - h_d) \quad [6]$$

Nel grafico di Le Méhauté (1969) la curva che segna il confine tra la teoria cnoidale e le teorie di Stokes è fornita dalla relazione $U = HL^2/h^3 \approx 26$ dove U è il numero di Ursell (1953).

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 26 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Più recentemente Hedges (1995) ha modificato leggermente la precedente relazione, mostrando che il criterio migliore per definire il limite tra le teorie di Stokes e la teoria cnoidale è quello mostrato in Figura 5-3 con l'equazione:

$$U = \frac{H\lambda^2}{h^3} = 40 \quad [7]$$

Il diagramma di Figura 5-3, riportato da Fenton (1998), mostra, in modo del tutto simile al diagramma di Figura 5-2, il campo nel quale si possono verificare soluzioni periodiche per le onde.

Nel diagramma è riportata anche la curva H_m/h dove H_m rappresenta l'altezza delle onde più alte che si propagano su un fondale costante mantenendo la loro forma. La curva, calcolata da Fenton (1990), approssimando i risultati numerici di Williams (1981) rappresentati nella figura con i cerchietti, è fornita dalla seguente relazione (Fenton, 1990):

$$\frac{H_m}{h} = \frac{0.141063 \frac{\lambda}{h} + 0.0095721 \left(\frac{\lambda}{h}\right)^2 + 0.0077829 \left(\frac{\lambda}{h}\right)^3}{1 + 0.0788340 \frac{\lambda}{h} + 0.0317567 \left(\frac{\lambda}{h}\right)^2 + 0.0093407 \left(\frac{\lambda}{h}\right)^3} \quad [8]$$

Tuttavia, Nelson (1987) ha mostrato, sulla base di numerosi esperimenti eseguiti in laboratorio e in campo, che la massima altezza d'onda raggiungibile nella pratica è effettivamente solo $H_m/h = 0.55$. Ulteriori evidenze di questo risultato sono fornite da Le Méhauté et al. (1968). Da ciò si deduce che le onde reali che si propagano su un fondale orizzontale non possono raggiungere il limite teorico fornito dalla (8), ma sono limitate dalla retta orizzontale indicata con "Nelson" nella Figura 5-3.

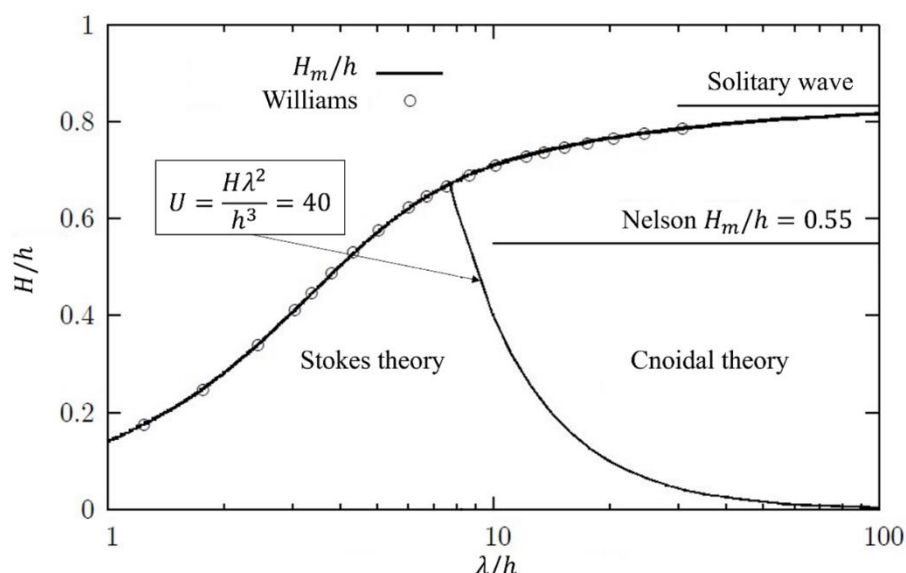


Figura 5-3 - La regione in cui verificano onde stazionarie di forma costante, che mostra le onde teoriche più alte (Williams), le più alte onde lunghe sperimentali (Nelson) e la linea di demarcazione proposta da Hedge tra le regioni di applicabilità delle teorie di Stokes e cnoidale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 27 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Considerando, la $MIH_d = 0.46$ m ed applicando la Teoria di Fenton (1998), di seguito descritta ed utilizzando un $T = 120$ s si può calcolare Eq. [7]:

$$\frac{H\lambda^2}{h^3} = 42 \quad [9]$$

Pertanto, le onde in esame rientrano nel campo delle onde “*onde cnoidali*” (*cnoidal waves*) e successivamente “*onde solitarie*” (*solitary waves*).

5.2 Formulazione Teorica di Fenton (1998)

Sulla base dell'analisi condotta al paragrafo 5.1, si è sviluppato appositamente un codice di calcolo in grado di generare un segnale di livello tale da riprodurre un'onda *cnoidale* o un'onda *solitaria*.

La finalità del codice è quella di generare segnali temporali di livello di prefissato valore di MIH_d e periodo T , in corrispondenza ad una prefissata profondità h riproducenti onde *cnoidali* o *solitarie*. Il codice è in grado di tenere conto anche della presenza di una corrente di base.

I segnali prodotti dal codice possono quindi essere utilizzati per imporre la condizione al contorno di largo (off-shore) a codici di calcolo in grado di simulare la propagazione largo-riva delle onde di maremoto, la loro risalita lungo la costa (run-up) e quindi di determinare le relative aree di allagamento.

Il codice di calcolo che è stato sviluppato, è basato sulla formulazione teorica sviluppata da Fenton (1998)² la quale è costituita da due approssimazioni analitiche della teoria cnoidale, che sono in grado di descrivere in modo accurato l'intero campo di applicazione della stessa teoria, inclusa l'onda solitaria. La prima approssimazione analitica è costituita dalla soluzione al terzo ordine, mentre la seconda è costituita dalla soluzione al quinto ordine con l'approssimazione di Iwagaki.

Le due soluzioni analitiche, che vengono descritte nei prossimi paragrafi, esprimono la variazione della superficie libera utilizzando la funzione cn , denominata funzione cnoidale, che costituisce una delle dodici funzioni ellittiche Jacobiane.

La funzione cn dipende dai due argomenti: $\alpha(x - ct)/h_d$ e m , dove: t è il tempo, x lo spazio, c è la velocità con la quale si sposta la perturbazione ed α è un coefficiente definito nel seguito insieme ad m .

L'argomento m della funzione cn , per $m \rightarrow 1$, è determinato dalla geometria dell'onda e può essere approssimato con la seguente espressione (Fenton, 1998):

$$m \approx 1 - 16 \exp^{-\sqrt{\frac{3U}{4}}} \quad [10]$$

² Fenton, J.D. (1998) *The Cnoidal Theory of Water Waves*, Chapter 2 of Developments in Offshore Engineering, Gulf, Huston.

Documento di proprietà Snam. La Società tutelerà i propri diritti in sede civile e penale a termini di legge.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 28 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

dove U è il numero di Ursell (1953).

La (10), pur essendo una espressione approssimata e quindi nel seguito non verrà utilizzata per effettuare i calcoli, consente di evidenziare che il parametro m dipende dal numero di Ursell. In base a tale dipendenza, m può essere interpretato come una misura dell'importanza relativa delle non-linearità rispetto ai fenomeni dispersivi.

Con riferimento al parametro m , la soluzione al terzo ordine deve essere applicata per $m < 0,96$, mentre quella al quinto ordine per $m \geq 0,96$.

Inserendo nella (10) il valore $U = 40$ fornito dalla (7) si ottiene il valore $m \approx 0.933$. Come evidenziato da Fenton (1989), ciò indica che quando la teoria cnoidale viene utilizzata nell'ambito dei limiti raccomandati, grossomodo m risulta sempre maggiore di 0.933, per cui la soluzione al quinto ordine di Fenton con l'approssimazione di Iwagaki copre la quasi totalità del campo di validità della teoria cnoidale. Tuttavia, per completezza nei seguenti paragrafi si riportano le espressioni fornite dalle due soluzioni analitiche di interesse per le presenti analisi.

Le soluzioni di seguito descritte dipendono anche dalla grandezza $e = e(m)$ la quale è fornita dalla seguente relazione:

$$e = e(m) = E(m)/K(m) \quad [11]$$

dove $K(m)$ e $E(m)$ sono rispettivamente integrali ellittici completi di prima e di seconda specie funzioni del parametro m .

Con riferimento a Fenton (1998), nel seguito si fa riferimento anche alla grandezza \bar{U} che esprime la velocità dell'onda rispetto ad una corrente preesistente, il cui valore medio nel tempo, misurato in un punto qualsiasi, è indicato con \bar{u}_1 . Tra queste grandezze sussiste la relazione:

$$\bar{u}_1 = c - \bar{U} \quad [12]$$

con c celerità di fase. Dalla precedente espressione se $\bar{u}_1 = 0$ si ottiene ovviamente che $c = \bar{U}$.

Si osserva che in presenza di una corrente, l'onda si sposta più velocemente con corrente a favore rispetto al caso in cui la corrente è contraria alla sua direzione di propagazione. Il periodo apparente dell'onda misurato da un osservatore, indicato con τ , dipende dall'effettiva velocità dell'onda e di conseguenza è influenzato dalla presenza della corrente a causa dell'effetto Doppler. In assenza di corrente il periodo τ coincide con T e la lunghezza d'onda λ coincide con L .

Essendo $\lambda = c \tau$, la (12) diviene:

$$\bar{u}_1 - \bar{U} - \frac{\lambda}{\tau} = 0 \quad [13]$$

Questa equazione può essere facilmente adimensionalizzata ottenendo (Fenton, 1998):

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 29 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

$$\frac{\bar{u}_1}{\sqrt{gh}} - \frac{\bar{U}}{\sqrt{gh_d}} \left(\frac{h_d}{h} \right)^{1/2} - \frac{\lambda/h}{\tau \sqrt{g/h}} = 0 \quad [14]$$

Come si vedrà nel seguito, poiché l'elevazione della superficie libera è legata alla funzione $cn^2(\alpha \frac{x-ct}{h_d}, m)$ la quale ha un periodo pari a $2K(m)$ e poiché l'onda ha una lunghezza λ , sussiste la seguente relazione:

$$\alpha(\epsilon) \frac{\lambda}{h_d} = 2K(m) \quad [15]$$

dove $\epsilon = H/h_d$ e $\alpha(\epsilon)$ è una quantità piccola, che esprime la relativa lentezza della variazione del termine $x - ct/h_d$, con h_d profondità del cavo dell'onda.

In assenza di corrente, sostituendo nella precedente espressione $\lambda = \bar{U}\tau = cT$, dalla (15) si ottiene l'espressione per il periodo dell'onda:

$$T = \frac{2K(m)h_d}{\alpha(\epsilon)c} \quad [16]$$

Si osserva che le onde cnoidali sono dispersive sia in frequenza che in ampiezza per cui la loro celerità c presenta una espressione del tipo:

$$c = \sqrt{gh[1 + f(H, T, h)]} \quad [17]$$

dove $f(H, T, h)$ esprime, solo formalmente, la dipendenza della celerità dall'altezza d'onda e dal periodo.

L'onda cnoidale diventa un'onda solitaria quando la sua lunghezza λ e il suo periodo τ diventano infiniti. In tal caso l'onda diventa dispersiva solo in ampiezza.

5.2.1 Soluzione al terzo ordine ($m < 0.96$)

La soluzione al terzo ordine di Fenton (1998) fornisce le espressioni che descrivono in modo completo tutte le caratteristiche dell'onda. Si riportano di seguito solo le espressioni di interesse per la presente trattazione.

Elevazione della superficie libera $\eta = \eta(x, t)$

$$\begin{aligned} \frac{\eta}{h_d} = & 1 + \left(\frac{\epsilon}{m}\right) m cn^2 + \left(\frac{\epsilon}{m}\right)^2 \left(-\frac{3}{4} m^2 cn^2 + \frac{3}{4} m^2 cn^4\right) \\ & + \left(\frac{\epsilon}{m}\right)^3 \left(\left(-\frac{61}{80} m^2 + \frac{111}{80} m^3\right) cn^2 + \left(-\frac{61}{80} m^2 - \frac{53}{20} m^3\right) cn^4\right. \\ & \left. + \frac{101}{80} m^3 cn^6\right) \end{aligned} \quad [A. 1]$$

Coefficiente α

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 30 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

$$\alpha = \sqrt{\frac{3\epsilon}{4} \left(1 + \left(\frac{\epsilon}{m}\right) \left(\frac{1}{4} - \frac{7}{8}m\right) + \left(\frac{\epsilon}{m}\right)^2 \left(\frac{1}{32} - \frac{11}{32}m + \frac{111}{128}m^2\right) \right)} \quad [A. 2]$$

Velocità dell'onda rispetto alla corrente

$$\begin{aligned} \frac{\bar{U}}{\sqrt{gh_d}} = & 1 + \left(\frac{\epsilon}{m}\right) \left(\frac{1}{2} - e\right) + \left(\frac{\epsilon}{m}\right)^2 \left(-\frac{13}{120} - \frac{1}{60}m - \frac{1}{40}m^2 + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{12}m\right)e\right) \\ & + \left(\frac{\epsilon}{m}\right)^3 \left(-\frac{361}{2100} + \frac{1899}{5600}m - \frac{2689}{16800}m^2 + \frac{13}{280}m^3\right. \\ & \left. + \left(\frac{7}{75} - \frac{103}{300}m + \frac{131}{600}m^2\right)e\right) \end{aligned} \quad [A. 3]$$

Lunghezza d'onda in termini di H/h

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{h} = & 4K(m) \left(3\frac{H}{mh} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{H}{mh}\right) \left(\frac{5}{4} - \frac{5}{8}m - \frac{3}{2}e\right) \right. \\ & \left. + \left(\frac{H}{mh}\right)^2 \left(-\frac{15}{32} + \frac{15}{32}m - \frac{21}{128}m^2 + \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{16}m\right)e + \frac{3}{8}e^2\right) \right] \end{aligned} \quad [A. 4]$$

Profondità del cavo dell'onda in termini di H/h :

$$\begin{aligned} \frac{h_d}{h} = & 1 + \frac{H}{mh} (1 - m - e) + \left(\frac{H}{mh}\right)^2 \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{2}m + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}m\right)e\right) \\ & + \left(\frac{H}{mh}\right)^3 \left(\frac{133}{200} - \frac{399}{400}m + \frac{133}{400}m^2 + \left(-\frac{233}{200} + \frac{233}{200}m - \frac{1}{25}m^2\right)e\right. \\ & \left. + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}m\right)e^2\right) \end{aligned} \quad [A. 5]$$

5.2.2 Soluzione al quinto ordine con l'approssimazione di Iwagaki ($m \geq 0.96$)

Anche la soluzione al quinto ordine fornisce le espressioni che descrivono in modo completo tutte le caratteristiche dell'onda. Come nel caso precedente, si riportano di seguito solo le espressioni di interesse per la presente trattazione.

Elevazione della superficie libera $\eta = \eta(x, t)$

$$\begin{aligned} \frac{\eta}{h_d} = & 1 + \epsilon cn^2 + \epsilon^2 \left(-\frac{3}{4}cn^2 + \frac{3}{4}cn^4\right) + \epsilon^3 \left(\frac{5}{8}cn^2 - \frac{151}{80}cn^4 + \frac{101}{80}cn^6\right) \\ & + \epsilon^4 \left(-\frac{8209}{6000}cn^2 + \frac{11641}{3000}cn^4 - \frac{112393}{24000}cn^6 + \frac{17367}{8000}cn^8\right) \\ & + \epsilon^5 \left(\frac{364671}{196000}cn^2 - \frac{2920931}{392000}cn^4 + \frac{2001361}{156800}cn^6 - \frac{17906339}{1568000}cn^8\right. \\ & \left. + \frac{1331817}{313600}cn^{10}\right) \end{aligned} \quad [B. 1]$$

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 31 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Coefficiente α

$$\alpha = \sqrt{\frac{3\epsilon}{4}} \left(1 - \frac{5\epsilon}{8} + \frac{71\epsilon^2}{128} - \frac{100627\epsilon^3}{179200} + \frac{16259737\epsilon^4}{28672000} \right) \quad [B.2]$$

Velocità dell'onda rispetto alla corrente

$$\frac{\bar{U}}{\sqrt{gh_d}} = 1 + \frac{H}{h_d} \left(\frac{1}{2} - e \right) + \left(\frac{H}{h_d} \right)^2 \left(-\frac{3}{20} + \frac{5}{12} e \right) + \left(\frac{H}{h_d} \right)^3 \left(\frac{3}{56} - \frac{19}{600} e \right) + \left(\frac{H}{h_d} \right)^4 \left(-\frac{309}{5600} + \frac{3719}{21000} e \right) + \left(\frac{H}{h_d} \right)^5 \left(\frac{12237}{616000} - \frac{997699}{8820000} e \right) \quad [B.3]$$

Lunghezza d'onda in termini di H/h

$$\frac{\lambda}{h} = 4K(m) \left(3 \frac{H}{h} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{H}{h} \right) \left(\frac{5}{8} - \frac{3}{2} e \right) + \left(\frac{H}{h} \right)^2 \left(-\frac{21}{128} + \frac{1}{16} e + \frac{3}{8} e^2 \right) + \left(\frac{H}{h} \right)^3 \left(\frac{20127}{179200} - \frac{409}{6400} e + \frac{7}{64} e^2 + \frac{1}{16} e^3 \right) + \left(\frac{H}{h} \right)^4 \left(-\frac{1575087}{28672000} + \frac{1086367}{17920000} e - \frac{2679}{25600} e^2 + \frac{13}{128} e^3 + \frac{3}{128} e^4 \right) \right] \quad [B.4]$$

Profondità del cavo dell'onda in termini di H/h :

$$\frac{h_d}{h} = 1 + \frac{H}{h} (-e) + \left(\frac{H}{h} \right)^2 \frac{e}{4} + \left(\frac{H}{h} \right)^3 \left(-\frac{1}{25} e + \frac{1}{4} e^2 \right) + \left(\frac{H}{h} \right)^4 \left(\frac{573}{2000} e - \frac{57}{400} e^2 + \frac{1}{4} e^3 \right) + \left(\frac{H}{h} \right)^5 \left(-\frac{302159}{1470000} e + \frac{1779}{2000} e^2 - \frac{123}{400} e^3 + \frac{1}{4} e^4 \right) \quad [B.5]$$

5.2.3 Sviluppo del codice numerico per l'applicazione delle soluzioni al terzo e al quinto ordine

Per applicare la teoria di Fenton (1998) è stato sviluppato un apposito codice numerico che di seguito viene descritto.

Lo sviluppo del codice ha richiesto di elaborare una tecnica di calcolo apposita di tipo iterativo poiché come detto l'altezza d'onda H nel presente caso non è nota a priori, essendo nota solo la MIH_d .

Il metodo sviluppato parte dalla conoscenza del periodo della perturbazione τ e fa riferimento ad una situazione in cui possa essere presente una corrente di base di intensità \bar{u}_1 nota.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 32 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Il codice sviluppato opera nel seguente modo.

Fissata la profondità h , ($h = 50\text{ m}$ nel presente caso), l'altezza d'onda H , che viene stimata come descritto nel seguito, il periodo dell'onda τ e la velocità della corrente \bar{u}_1 , si applica la (14):

$$\frac{\bar{u}_1}{\sqrt{gh}} - \frac{\bar{U}}{\sqrt{gh_d}} \left(\frac{h_d}{h} \right)^{1/2} - \frac{\lambda/h}{\tau\sqrt{g/h}} = 0 \quad [18]$$

In questa espressione \bar{u}_1/\sqrt{gh} e $\tau\sqrt{g/h}$ sono noti, mentre i termini incogniti, costituiti da $\bar{U}/\sqrt{gh_d}$, da h_d/h e da λ/h sono espressi rispettivamente dalle equazioni A.3 (o B.3), A.4 (o B.4) e A.5 (o B.5), nelle quali l'unica incognita è m . Pertanto, la (18) diventa un'equazione trascendente in m , e deve essere risolta numericamente utilizzando ad esempio il metodo della bisezione. Questo calcolo è stato svolto utilizzando una precisione alla trentaduesima cifra decimale necessaria perché $K(m)$ e $E(m)$, e di conseguenza i parametri d'onda, variano molto rapidamente per $m \rightarrow 1$.

Eseguito il calcolo si deve controllare che il valore finale di m rientri nei limiti della soluzione utilizzata (terzo o quinto ordine). Se questa condizione non è verificata si deve utilizzare l'altra soluzione.

Per scegliere preventivamente la soluzione da utilizzare, si può utilizzare la (10) stimando la lunghezza d'onda con la $\lambda = \tau\sqrt{gh}$. Comunque, alla fine del calcolo si deve sempre verificare che il valore effettivo della m rientri nel campo della soluzione utilizzata.

Calcolato m , si applicano di nuovo la A.5 (o la B.5) per calcolare h_d , la A.4 (o la B.4) per calcolare λ , la A.3 (o la B.3) per calcolare \bar{U} e la A.2 (o la B.2) per calcolare ϵ .

Per quanto riguarda il valore di H utilizzato nel precedente calcolo, si osserva che tale valore non è noto a priori. Tuttavia, con riferimento alla Figura 5-1, sussiste la seguente relazione:

$$H = MIH_d + (h - h_d) \quad [19]$$

che lega il valore di H alla MIH_d , ad h , che sono note, e alla h_d che viene fornita dal calcolo. Se il valore di H stimato per eseguire il calcolo precedente risulta diverso da quello fornito dalla (19), occorre ripetere il calcolo modificando la stima del valore H in modo iterativo fino a che la (19) risulti rispettata.

In generale si ha che $H > MIH_d$, per cui per la prima stima di H conviene assumere un valore maggiore di MIH_d .

Infine, definiti per un prefissato periodo tutti i parametri, il calcolo dell'andamento della superficie libera nel tempo, da utilizzare come condizione al contorno per il modello numerico di propagazione utilizzato, viene effettuato mediante l'applicazione della A.1 (o della B.1) assumendo un valore costante per la x .

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 33 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

5.2.4 Definizione del periodo “efficace” di un’onda solitaria

Per $\tau \rightarrow \infty$ si ha che $\lambda \rightarrow \infty$, $H \rightarrow MIH_d$, $h_d \rightarrow h$ e l'onda tende a diventare solitaria.

Per definizione l'onda solitaria ha un periodo e una lunghezza infiniti. Da un punto di vista ingegneristico si può però definire un periodo e lunghezza d'onda efficaci in grado di includere una percentuale elevata del volume totale dell'onda. Seguendo questo ragionamento Madsen e Schaffer (2008) definiscono il periodo T_{eff} e lunghezza λ_{eff} “efficaci” per cui all'infuori di $\pm \frac{\lambda_{eff}}{2}$ dal valore massimo della cresta dell'onda, la superficie libera ha un valore $< 0.007H$. Il calcolo di questi due parametri è definito partendo dalla teoria di Fenton (1999) con $m = 1$ per il cui valore la teoria converge in un'onda solitaria. Perciò possiamo scrivere il numero d'onda come:

$$K_c = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{3H}{4h}} \quad [20]$$

E la celerità di fase come:

$$c = \sqrt{g(h + H)} \quad [21]$$

Perciò la lunghezza d'onda efficace potrà essere calcolata come:

$$\lambda_{eff} = \frac{2\pi}{K_s} \quad [22]$$

e il periodo efficace

$$T_{eff} = \frac{2\pi}{K_c c} \quad [23]$$

5.3 Formulazione Teorica delle N-Waves di Tadepalli e Synolakis (1996)

Le N-WAVES come definito in Tadepalli e Synolakis (1996) è una formulazione d'onda creata appositamente per riprodurre segnali d'onda compatibili ad alcuni tipi di tsunami. Per la formulazione di questa teoria si sono basati su osservazioni di maremoti generati da sisma e sul fatto che generalmente in presenza di un maremoto, la linea di riva inizialmente recede e poi avanza durante l'impatto sulla costa. Per questo motivo sono state proposte le N-WAVES come una tipologia di onde finalizzate a riprodurre onde di maremoto. Queste vengono definite come una perturbazione costituita da due onde solitarie raccordate e con diversa polarità.

Queste onde sono anche qui utilizzate come possibile condizione al contorno in quanto studi successivi come ad esempio Madsen and Schaffer (2010) hanno dimostrato come questa tipologia di onde possa produrre inondazioni maggiori rispetto ad altri tipi di onde di maremoto.

Sulla base di ciò, si è sviluppato appositamente un codice di calcolo in grado di generare un segnale di livello tale da riprodurre una N-WAVE.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 34 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Il codice di calcolo è basato sulla formulazione teorica di Tadeballi e Synolakis (1996) con la formulazione estesa alla variabilità sia nel tempo che nello spazio di Lima et al. (2019). La variazione della superficie libera può essere perciò definita come:

$$\eta(x, t) = \epsilon(k(x - ct - x_1) - k\delta)H\text{sech}^2[k(x - ct - x_1)] \quad [24]$$

dove ϵ è un fattore di scala utilizzato in modo da poter definire H con il suo valore di progetto, $\delta = x_2 - x_1$ è un parametro di eccentricità definito come la distanza tra il flesso e la cresta dell'onda. La posizione del flesso è definita per $x = x_2$ e $t = 0$ che fornisce $\eta(x_2, 0) = 0$. Invece, la posizione della cresta si ottiene per $x = x_1$ e $t = 0$ che fornisce $\eta(x_1, 0) = H$. Infine, k è il numero d'onda generalizzato per le onde solitarie che deriva proprio dalla risoluzione della teoria dell'onda cnoidale (Fenton, 1999) considerando l'argomento della funzione cnoidale $m=1$. In Tadeballi e Synolakis (1996) è stato inoltre aggiunto il parametro p_0 che modifica la ripidità dell'onda, per questo motivo k può essere scritto come:

$$k = \frac{1}{h} \sqrt{p_0 \frac{3H}{4h}} \quad [25]$$

In quanto un range di valori per il parametro p_0 non è stato definito in Tadeballi e Synolakis (1996) e per assegnarne un valore congruente il segnale d'onda dovrebbe essere comparato con segnali già misurati (Madsen e Schaffer, 2008) si è deciso di considerare p_0 in modo tale da mantenere k e quindi ripidità costante con quella di un'onda solitaria di pari ampiezza.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 35 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

6 DEFINIZIONE DEI SEGNALI DI MAREMOTO ALLA -50 M CON MIH_d CONGRUENTE AL SIAM

Per definire alla -50 m i segnali di maremoto da utilizzare per le simulazioni numeriche si è deciso, utilizzando un approccio cautelativo, di fare riferimento al valore della MIH_d fornito dalla direttiva SiAM per il POI Elba NORD (vedi Tabella 4-2).

Si ricorda che tale valore, pari a $MIH_d = 0.46$ m, corrisponde ad una probabilità di superamento $P_{vr} = 2\%$, se si assume:

- per l'evento sismico il tempo di ritorno $T_r = 2500$ anni;
- per il tempo di esposizione $V_n = 50$ anni;
- per la curva di pericolosità l'84° percentile.

Data la profondità limitata dei fondali e considerando un periodo efficace dell'onda solitaria di circa 170s in questo studio si restringe il campo di periodi da prendere in esame tra 120 s e 170 s. Poiché non è possibile stabilire a priori qual è il periodo dell'onda incidente che determina le condizioni peggiori in termini di inondazione costiera, si è deciso di prendere in esame 4 Scenari di maremoto includendo anche onde solitarie ed N-Waves.

Pertanto, si è simulata un'onda cnoidale con periodo $T = 120$ s, un'onda solitaria con un periodo efficace di 170 s e due N-WAVE, una con il cavo che precede la cresta ed una dove la cresta precede il cavo, con lo stesso periodo efficace dell'onda solitaria.

Lo studio della propagazione in costa delle onde di maremoto è stato eseguito mediante il modello numerico SWASH (Simulating WAVes till Shore) che è un modello numerico basato sulle non-hydrostatic non linear shallow water equations NH-NLSWE sviluppato dall'Università olandese TU-Delft. Questo modello è capace di risolvere la superficie libera nello spazio temporale delle singole onde. Inoltre, grazie alla suddivisione nella direzione verticale in più layers è capace di considerare la dispersione in frequenza in modo approssimato la quale è fondamentale per simulare accuratamente onde di maremoto quando sono caratterizzate da fenomeni dispersivi. Inoltre, tutti i fenomeni più importanti come rifrazione, riflessione, diffrazione, frangimento e l'attrito dovuto al fondo che diventa molto importante in acque basse sono considerati.

6.1 DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO E DEI SEGNALI DI LIVELLO PER LO STUDIO DI INONDAZIONE

Sulla base delle considerazioni sopra riportate, in corrispondenza della batimetrica -50m, si sono definiti i 4 scenari di maremoto riassunti in Tabella 6-1.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 36 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

Tabella 6-1 Caratteristiche dei 4 scenari di maremoto caratterizzati dalla $MIH_d = 0.46$ m assunti a largo dell'ormeggio della FSRU in corrispondenza della profondità -50,0 m sul l.m.m.

Scenario	T	Teoria	H (m)	MIH_d (m)
1	120 s	Fenton (1999)	0.745	0.46
2	N-wave isoscele cavo (170 s)	Tadepalli e Synolakis (1996)	0.92	0.46
3	N-wave isoscele cresta (170 s)	Tadepalli e Synolakis (1996)	0.92	0.46
4	Solitary (170 s)	Fenton (1999)	0.46	0.46

6.2 METODOLOGIA PER LA PROPAGAZIONE DEGLI SCENARI DALLA -50 m FINO IN PROSSIMITA' DELLA DIGA

Si è deciso di propagare dalla -50 m fino in prossimità della diga utilizzando il modello numerico SWASH nella sua versione 2DV (x,z) tenendo conto di 2 strati (layers) nella direzione verticale z. La scelta è dovuta alla grande distanza tra la batimetria -50 m ed il punto di interesse che renderebbe proibitivo lo studio dell'intera area di propagazione. Pertanto, i risultati ottenuti con queste simulazioni verranno utilizzati per imporre le condizioni al contorno delle simulazioni 3D.

Per quanto riguarda la batimetria è stata utilizzata quella fornita dal database Emodnet e interpolata sulla griglia di calcolo. Si è scelto il transetto rappresentativo della batimetria a largo della diga quello che connette il POI 1 con il centro della FSRU come mostrato nella Figura 6-1 con il punto iniziale definito dalle coordinate in Tabella 6-2. Questo non tiene conto della rifrazione delle onde con il loro progressivo avvicinamento alla costa e perciò si ritiene un approccio cautelativo in quanto l'ormeggio della FSRU è più esposto all'onda di maremoto nell'approccio utilizzato.

La Figura 6-2 mostra la batimetria del transetto di Figura 6-1 dove il valore $z = 0$ m corrisponde al l.m.m. e sull'asse delle ascisse è riportata la sua estensione normalizzata con il passo di griglia $\Delta x = 50$ m.

I segnali ottenuti all'incirca alla profondità -15 m sul l.m.m. sono quindi stati utilizzati come condizioni al contorno per le simulazioni di propagazione nella zona di interesse.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 37 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

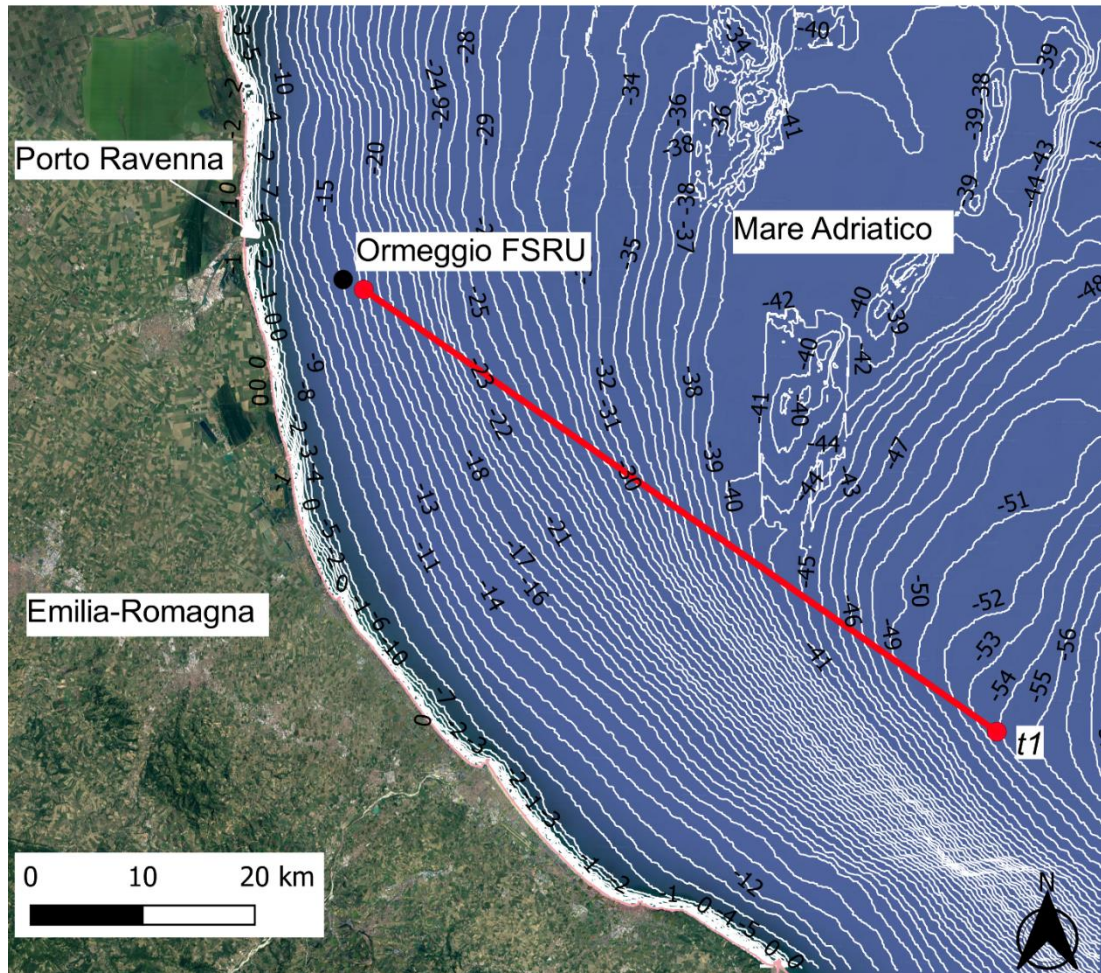


Figura 6-1 Curve batimetriche della zona compresa tra la batimetrica -50 m e la costa con evidenziato il transetto preso in esame nel processo di propagazione per la determinazione dei segnali d'onda da applicare alle simulazioni di dettaglio.

Tabella 6-2 Coordinate del punto iniziale del transetto in corrispondenza del POI 1 alla profondità di circa - 50 m in WGS84 / UTM zone 33N.

Punto	x (m)	y (m)
t1	351323.684	4886324.125

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 38 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

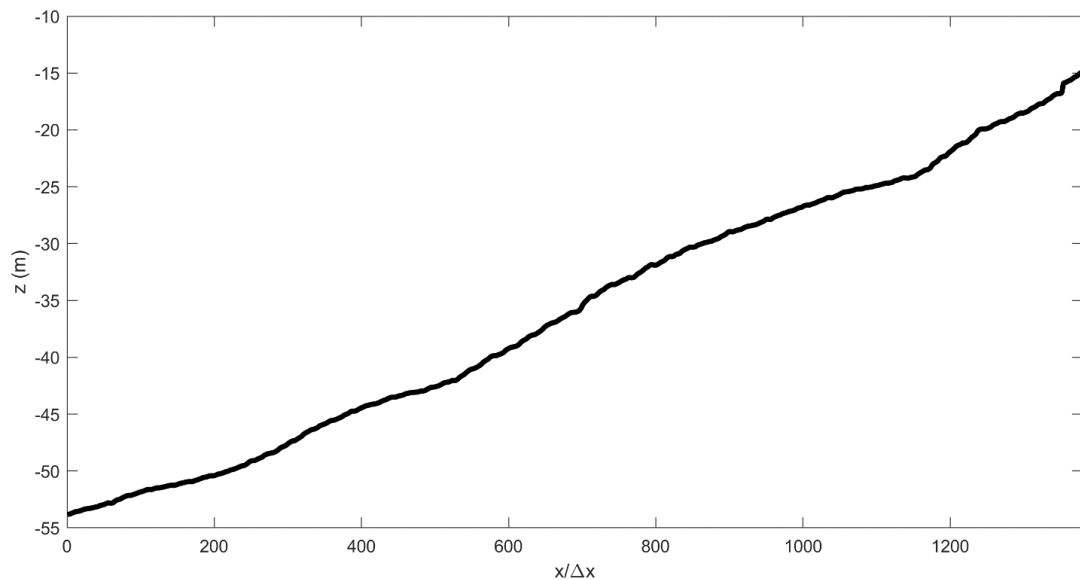


Figura 6-2 Batimetrie del transetto analizzato per le simulazioni di propagazione dalla -50 m fino in prossimità della diga.

In tutte le simulazioni di propagazione la batimetria è stata estesa alla -15 m con un plateau a fondale costante. L'inclusione del plateau è stata necessaria per permettere di assorbire completamente le onde alla -15 m in modo da escludere possibili riflessioni.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 39 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

7 RISULTATI SIMULAZIONI DI PROPAGAZIONE ED INONDAZIONE DEGLI SCENARI DI MAREMOTO CONSIDERATI

7.1 Descrizione metodologia e modello di calcolo SWASH

Come precedentemente accennato, per l'analisi delle onde di maremoto è stato utilizzato il modello numerico SWASH in modalità 3D (x,y,z) tenendo conto di 2 strati (layers) nella direzione verticale z.

Poiché il modello è in grado di simulare fenomeni di inondazione costiera, utilizzando una formulazione “wet and dry”, risulta necessario descrivere il dominio di calcolo tenendo conto sia della batimetria che della topografia emersa.

Per quanto riguarda la batimetria, questa è stata definita sulla base dei dati batimetrici Emodnet 2020 e dei rilievi batimetrici di dettaglio effettuati per la redazione del presente progetto, inoltre si è utilizzata la planimetria di progetto per il dragaggio del canale di accesso e dell'area di ormeggio della FSRU. Per la descrizione delle opere e in particolare della diga si è utilizzate la planimetria e le sezioni di progetto della diga. Il chart datum è riferito al l.m.m.

La griglia di calcolo è stata implementata in modo tale da avere il confine di largo del dominio di calcolo perpendicolare alla linea che collega il POI 1 alla FSRU considerata come direzione principale di propagazione delle onde di maremoto considerate in questo studio. Le condizioni d'onda degli tsunami sono state definite utilizzando la variazione della superficie libera nel tempo.

La griglia utilizzata è mostrata in Figura 7-1 e copre un'estensione di 4 km x 4 km con una maglia di risoluzione 4 m in modo da approssimare accuratamente la diga ed un angolo di rotazione di 55° rispetto al N geografico con coordinate dell'angolo in basso a destra della griglia di x=293613.65 m e y=4924085.2 m utilizzando il sistema di riferimento WGS84/ UTM 33N.

La generazione è stata effettuata nel lato SE. Nei rimanenti 3 lati del dominio di calcolo è stata imposta la condizione di assorbimento totale. La diga è stata considerata cautelativamente completamente riflettente nella sua altezza. Uno stralcio della griglia di calcolo in prossimità della zona di ormeggio della FSRU e della diga di protezione è mostrato in Figura 7-2. In Figura 7-2 sono state riportate le posizioni delle sonde numeriche in corrispondenza delle quali è stata misurata la variazione della superficie libera ed il modulo della velocità di corrente omnidirezionale.

In tutte le simulazioni è stato considerato un sovrizzo di marea astronomica congruente con la media delle alte maree sizigiali come definito dallo studio meteomarinario con un valore di 0.35 m.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 40 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

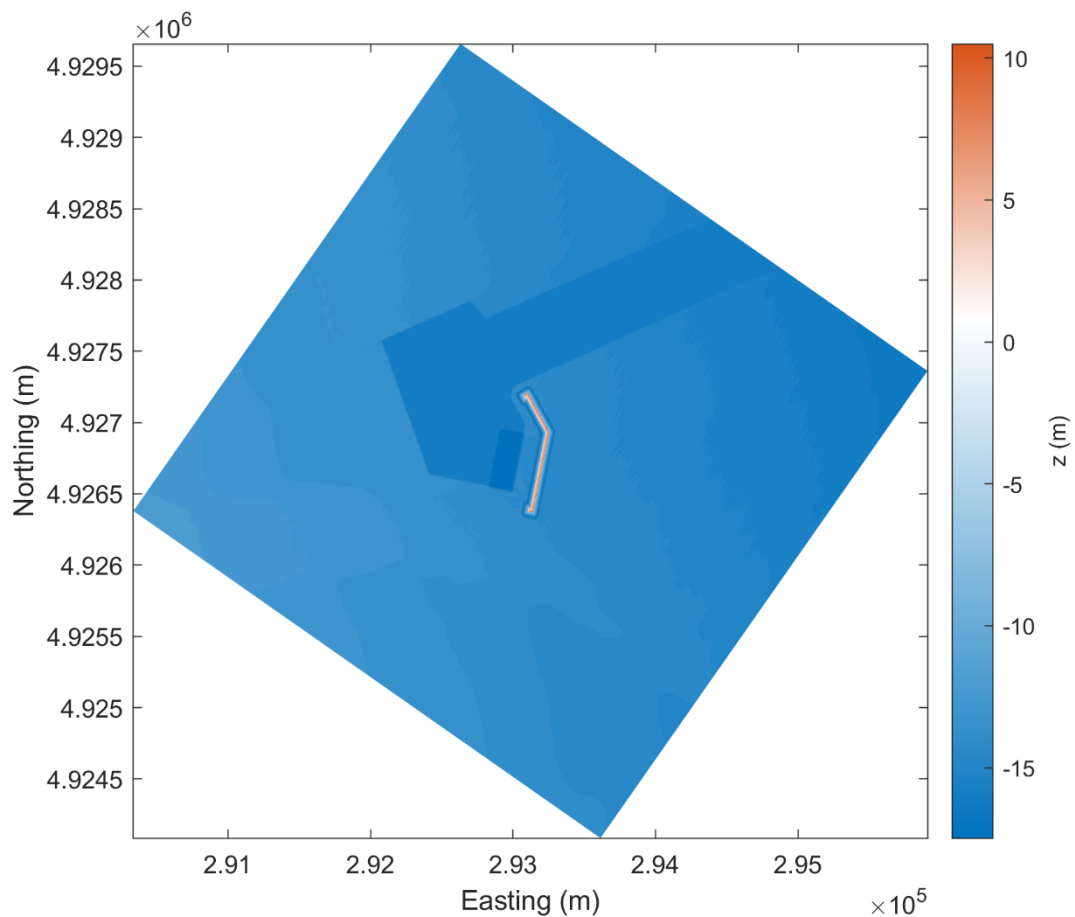


Figura 7-1 Griglia di calcolo.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 41 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

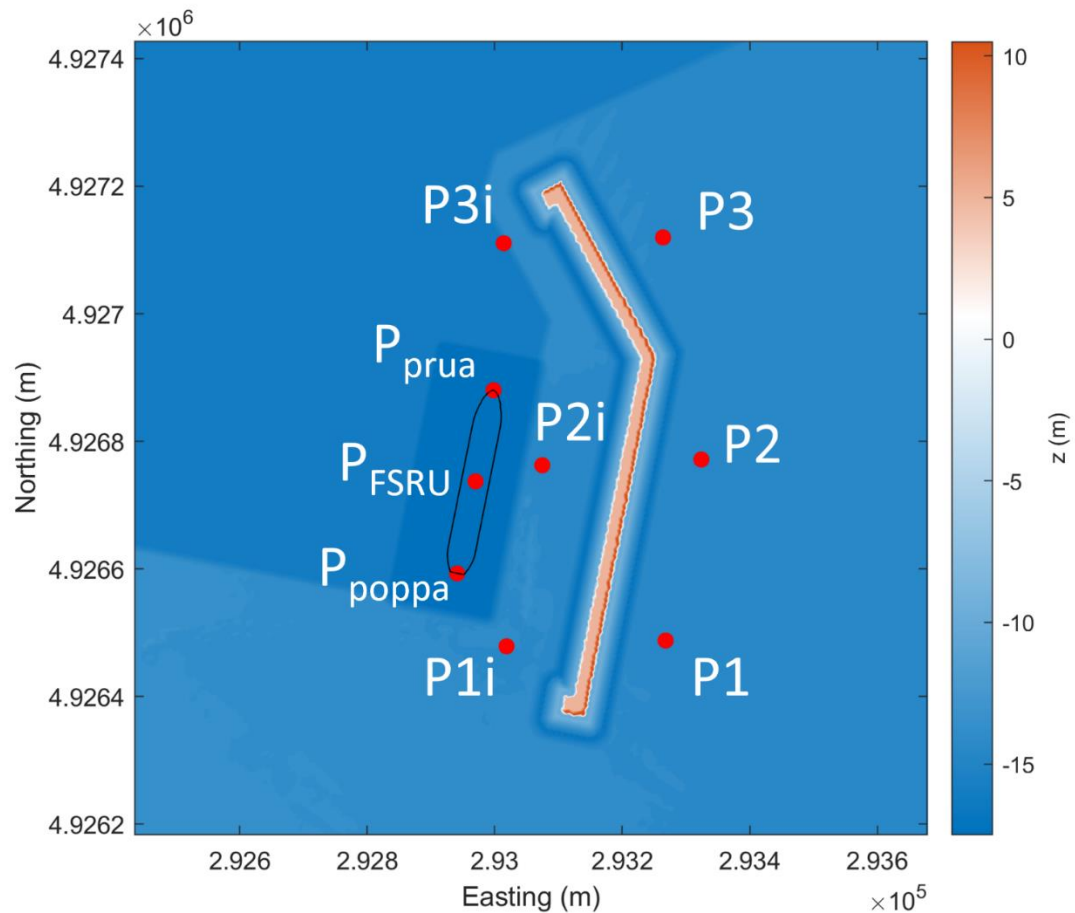


Figura 7-2 Stralcio della griglia di calcolo nelle vicinanze dell'ormeggio della FSRU e della diga di protezione.

7.2 Risultati propagazione ed inondazione da onde di maremoto

Qui di seguito sono mostrati i risultati delle simulazioni numeriche eseguite in relazione ai 4 scenari di maremoto definiti in Tabella 6-1.

Per ogni scenario sono mostrate in primo luogo l'andamento della superficie libera sull'intera griglia al netto del sovrizzo di marea astronomica in tre diversi istanti temporali mostrando un ingrandimento nelle vicinanze della zona di ormeggio nel momento in cui essa viene attraversata dall'onda di maremoto.

Successivamente è mostrata la variazione nel tempo della superficie libera rispetto al livello medio marino al netto del sovrizzo di marea astronomica di 0.35 m in modo da isolare il solo effetto delle onde di maremoto ed il modulo della risultante delle velocità omnidirezionale ($|v|$) in corrispondenza dei punti sopraflutto (P1, P2, P3), dei punti sottoflutto (P1i, P2i, P3i) rispetto alla diga ed i punti che identificano il centro (P_{FSRU}), la prua (P_{prua}) e la poppa (P_{poppa}) della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 42 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

7.2.1 Risultati propagazione ed inondazione da tsunami per lo Scenario 1
La propagazione delle onde di maremoto per lo Scenario 1 nella griglia di calcolo sono mostrate in Figura 7-3, Figura 7-4 e Figura 7-5 . In particolare, Figura 7-4 mostra un istante in cui l'onda di maremoto attraversa la zona di ormeggio della FSRU, evidenziata dalla sua sagoma in nero. Qui possiamo vedere come i fenomeni di diffrazione dell'onda incidente sulle due testate della diga giochino un ruolo fondamentale nella zona di ormeggio. Questo fa sì che l'onda di maremoto, diffratta in momenti diversi dalle testate della diga, si presenti con due distinti picchi nella zona di ormeggio ma ovviamente di ridotta intensità rispetto all'onda incidente grazie all'azione di difesa della diga.

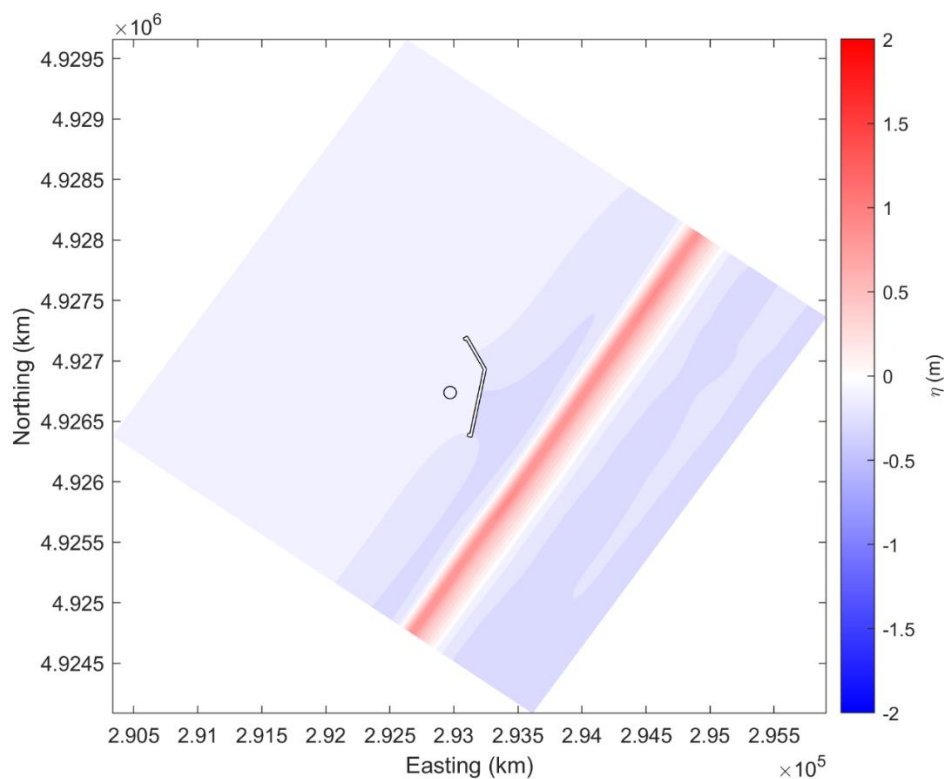


Figura 7-3 Propagazione dello Scenario 1 nell'intera griglia a $t = 4$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 43 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

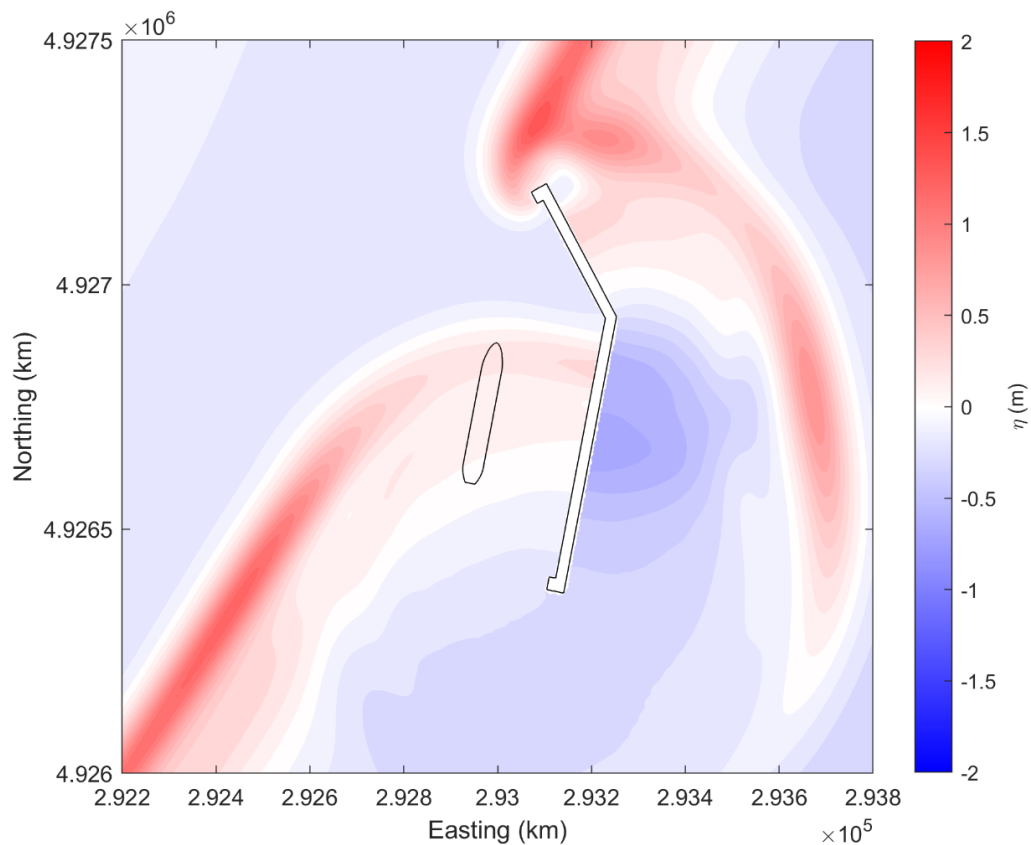


Figura 7-4 Propagazione dello Scenario 1 con ingrandimento nelle vicinanze della diga a $t = 5.5$ min con mostrato il contorno della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 44 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

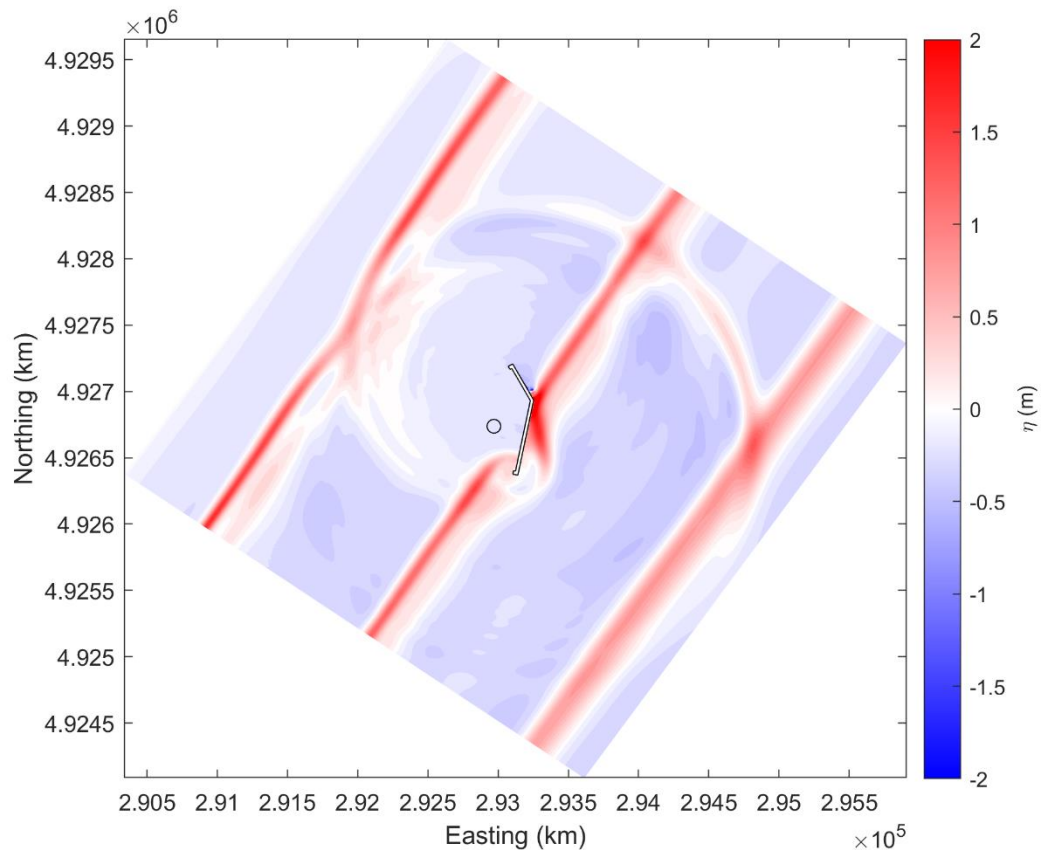


Figura 7-5 Propagazione dello Scenario 1 nell'intera griglia a $t = 7$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.

Le serie temporali della variazione della superficie libera rispetto al l.m.m. e quelle del modulo delle velocità omnidirezionali sono mostrate in Figura 7-6 per i punti esterni alla diga mentre in Figura 7-7 per quelli interni. Si può notare una differenza elevata tra l'esterno e l'interno dovuta all'azione di protezione della diga. Infine, in Figura 7-8 sono mostrati i valori per i punti posti nella zona di ormeggio della FSRU a prua (P_{prua}), al centro (P_{FSRU}) e a poppa (P_{poppa}). A conferma di quanto visto in Figura 7-4 nelle serie storiche si evidenziano due picchi in successione per ognuna delle tre onde simulate causati dalla doppia diffrazione dell'onda di maremoto subita dalle due testate della diga. Valori massimi si misurano sempre in concomitanza con la poppa della nave in quanto più esposta alla direzione incidente dell'onda di maremoto. Infine, i valori massimi e minimi della superficie libera insieme ai valori massimi della velocità omnidirezionale sono riassunti in Tabella 7-1 per i tre punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} .

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 45 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

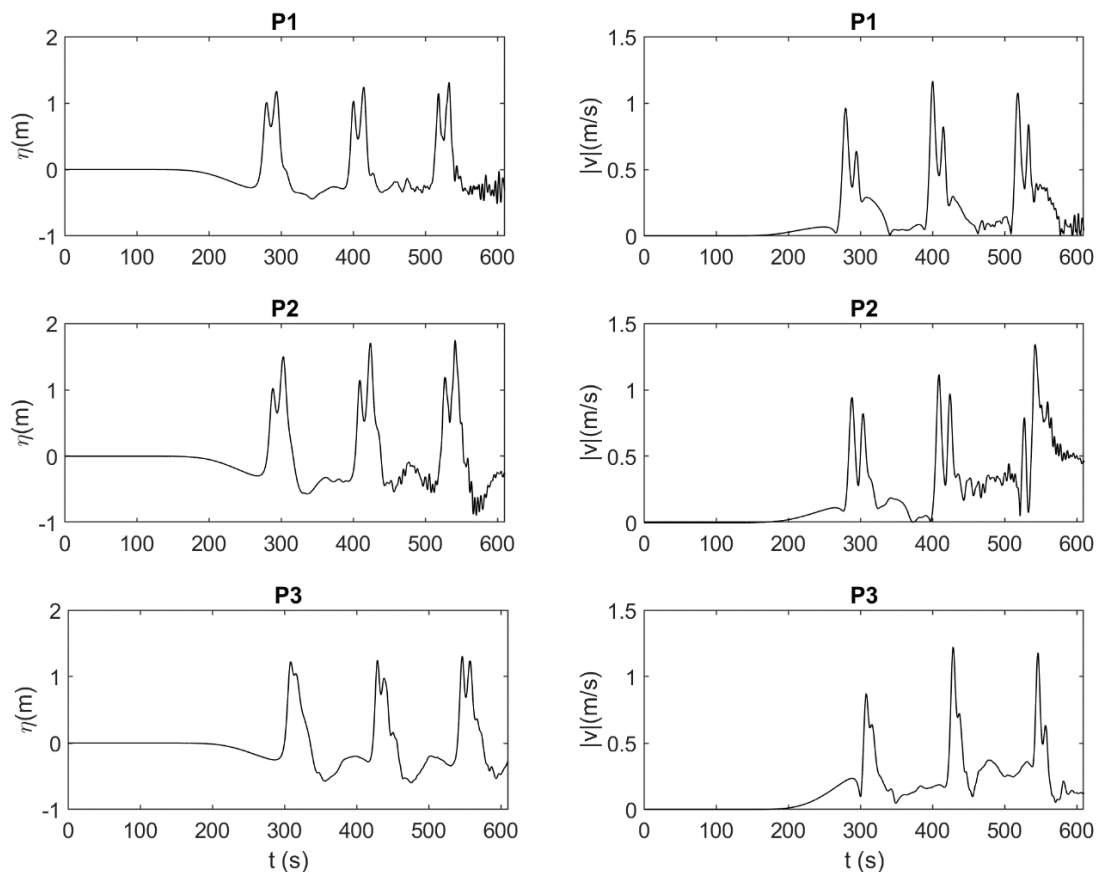


Figura 7-6 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 1 nei punti P1, P2, P3.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 46 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

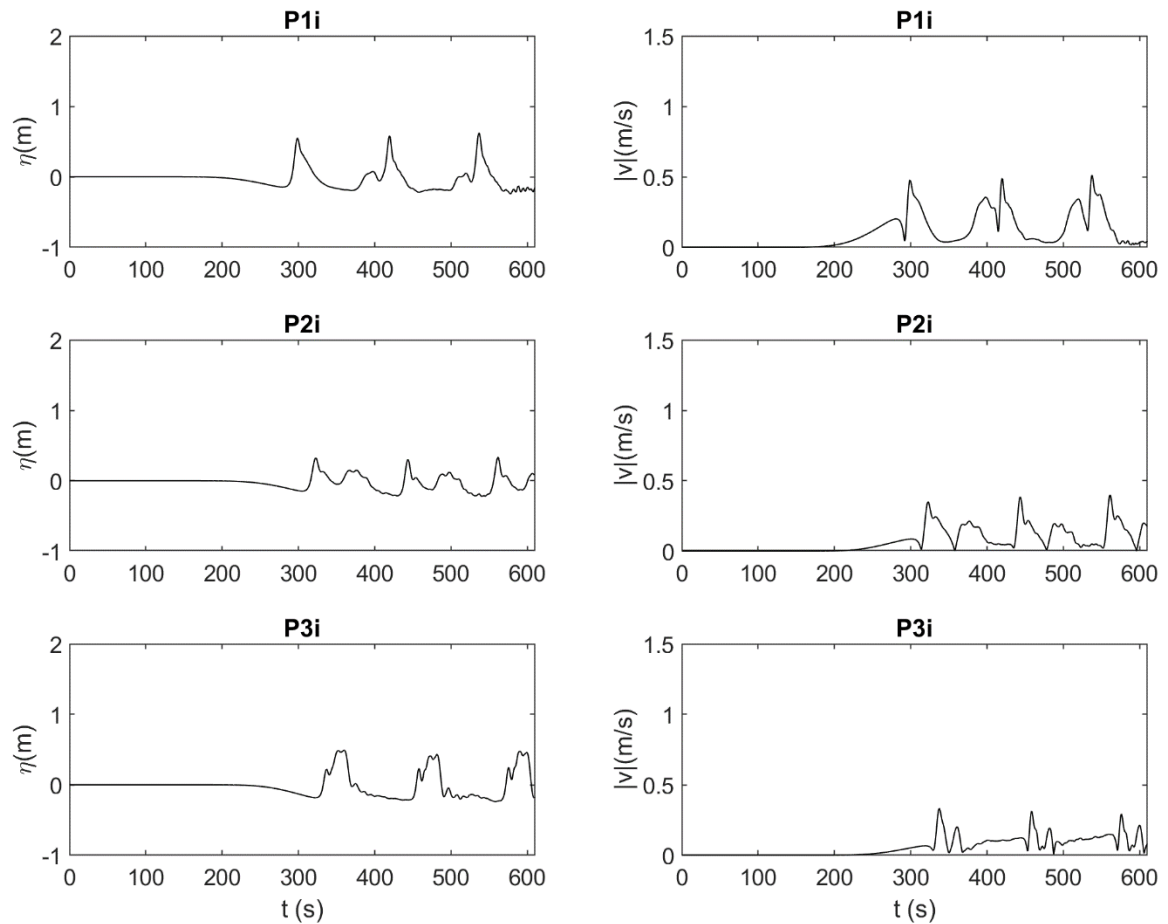


Figura 7-7 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 1 nei punti P1i, P2i, P3i.

	PROGETTISTA		COMMESSA	UNITA'
	LOCALITA'	RAVENNA (RA)	NQ/R22199	000
	PROGETTO / IMPIANTO	FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 47 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

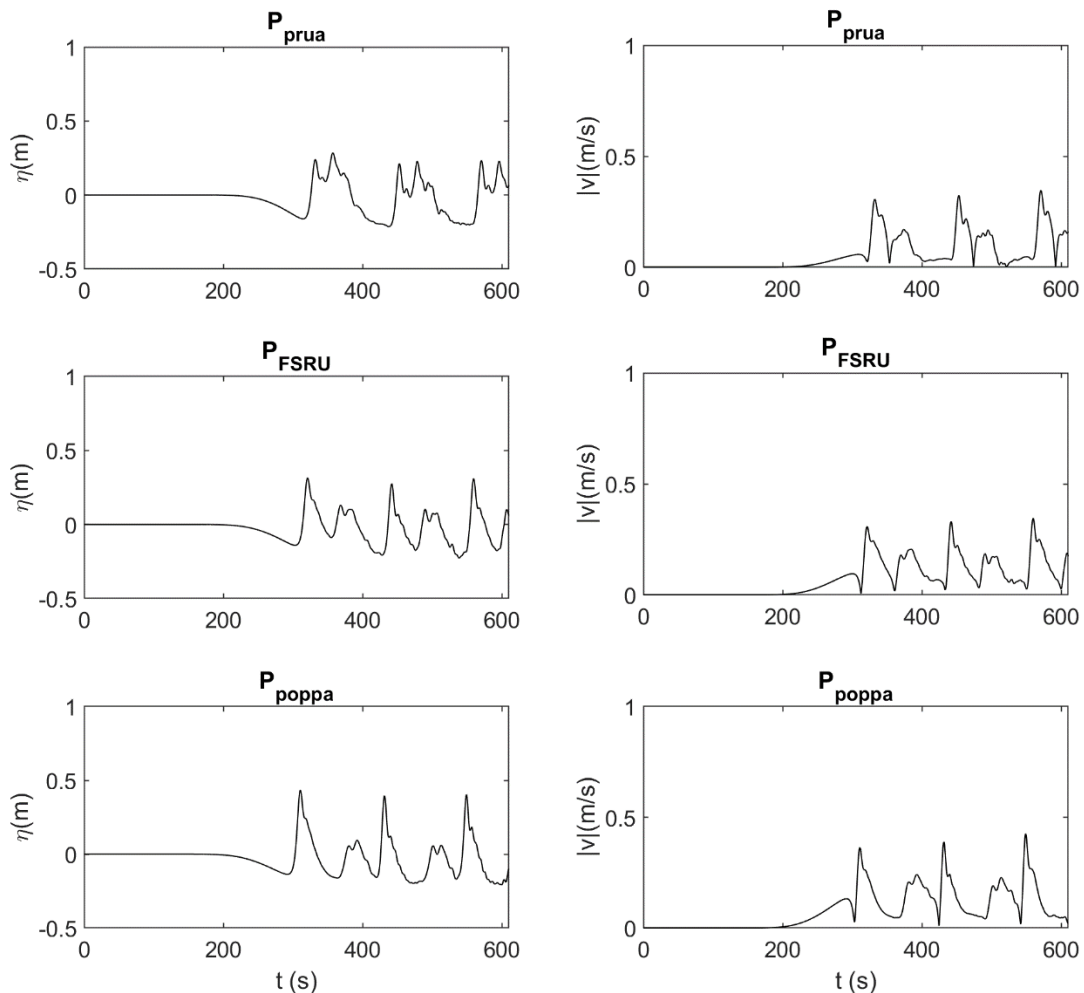


Figura 7-8 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 1 nei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} .

Tabella 7-1 Valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi e minimi della superficie libera ottenuti per lo Scenario 1 in corrispondenza dei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} posti in corrispondenza della FSRU.

PUNTI	Vmax (m/s)	η_{max} (m)	η_{min} (m)
P_{prua}	0.35	0.28	-0.21
P_{FSRU}	0.35	0.31	-0.23
P_{poppa}	0.43	0.43	-0.20

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 48 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

7.2.2 Risultati propagazione ed inondazione da tsunami per lo Scenario 2

Per lo Scenario 2 i risultati sono simili a quanto mostrato per lo Scenario 1 e come si può evincere da Figura 7-9 e Figura 7-10 con la diga che riesce a proteggere la zona di ormeggio della FSRU riducendo per diffrazione l'onda di maremoto incidente.

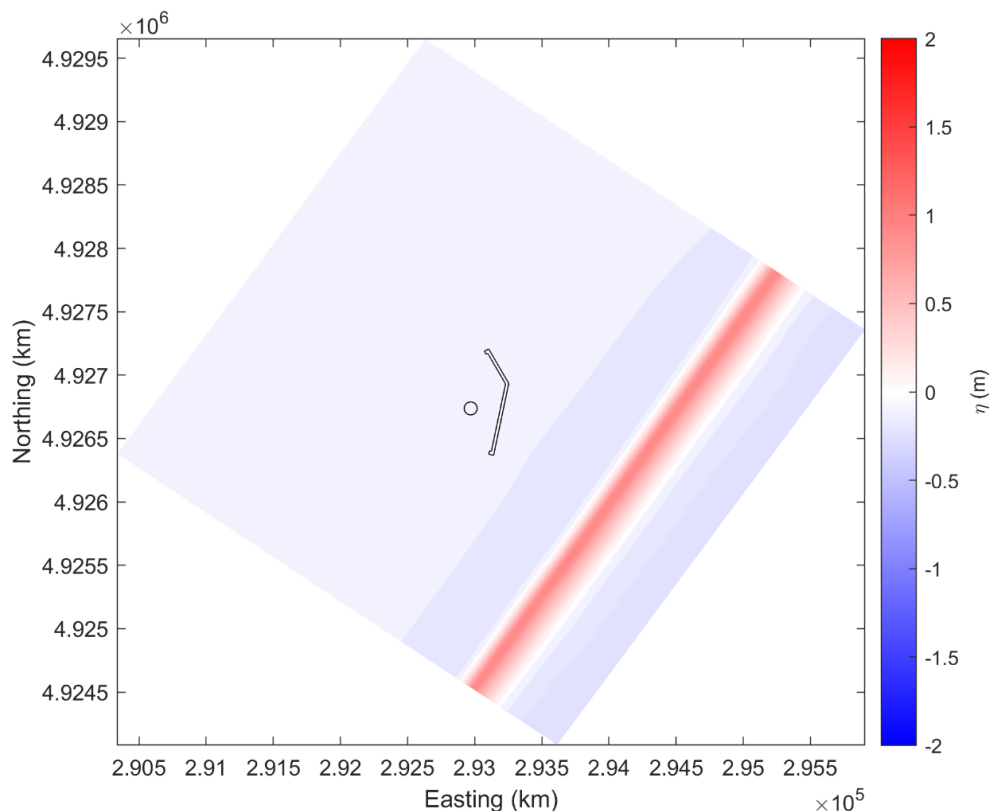


Figura 7-9 Propagazione dello Scenario 2 nell'intera griglia a $t = 4$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 49 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

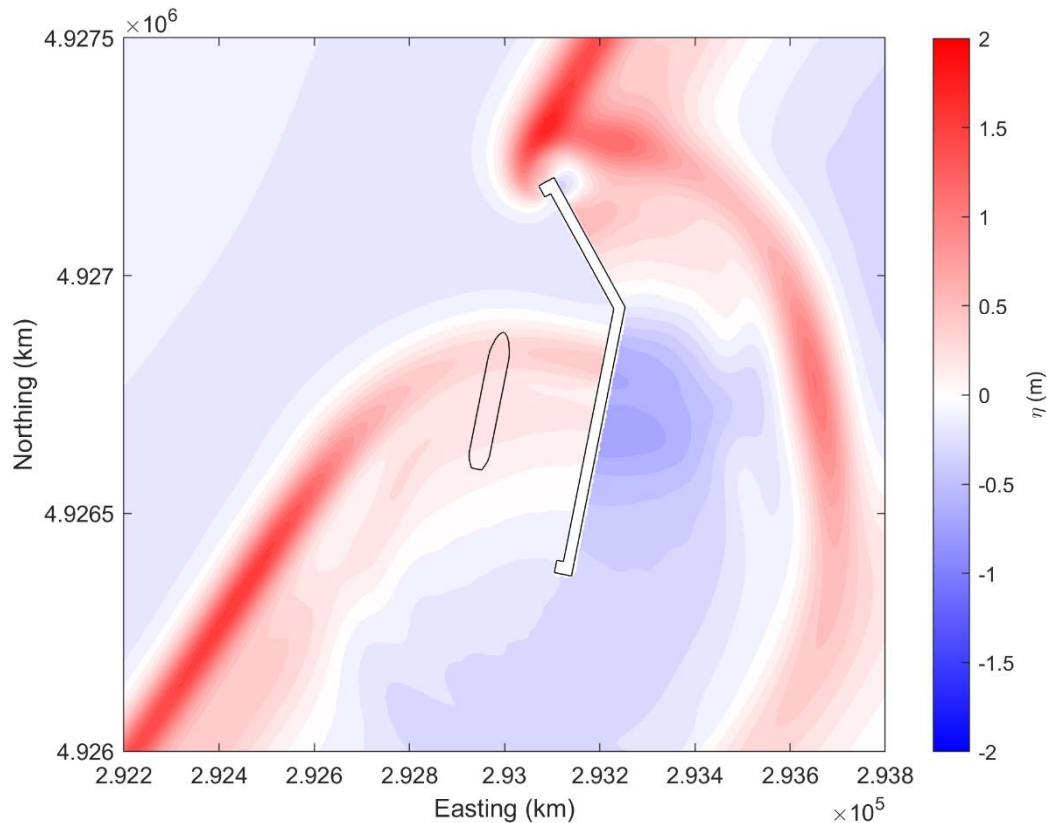


Figura 7-10 Propagazione dello Scenario 2 con ingrandimento nelle vicinanze della diga a $t = 6$ min con mostrato il contorno della FSRU.

Le serie storiche dei punti sopraflutto (Figura 7-12) e sottoflutto (Figura 7-13) nei pressi della diga mostrano caratteristiche simili a quanto visto nello scenario 1 con una significativa riduzione per i punti sottoflutto.

Anche le serie storiche in Figura 7-14 hanno caratteristiche simili rispetto a quanto visto per lo Scenario 1 con valori maggiori di velocità che raggiungono gli 0.48 m/s (Tabella 7-2) e di elevazione massima con i massimi sempre registrati nella poppa della FSRU con +0.58 m rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 50 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

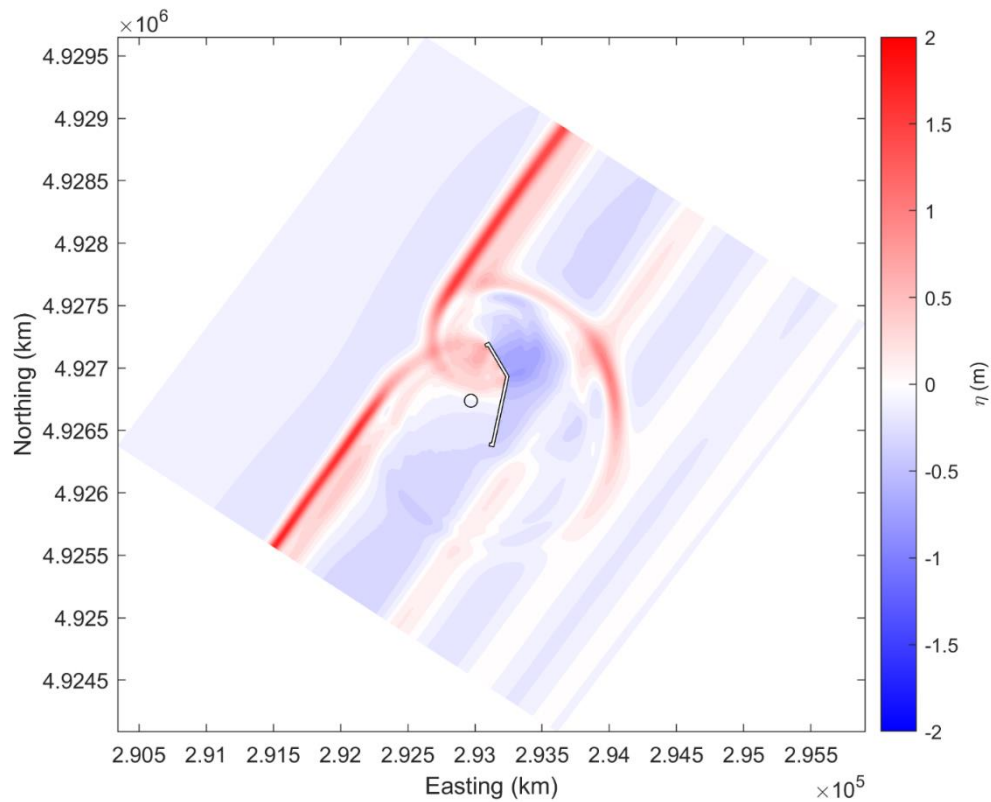


Figura 7-11 Propagazione dello Scenario 2 nell'intera griglia a $t = 6.5$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 51 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

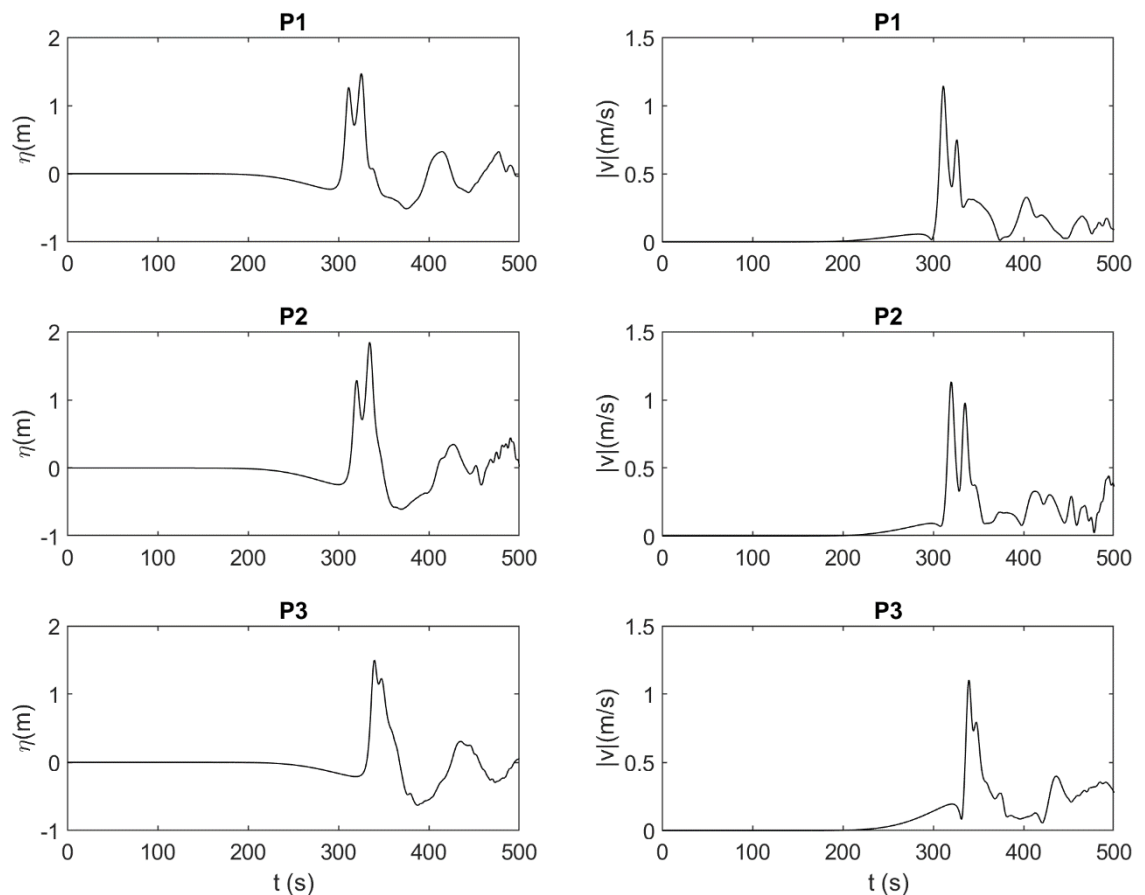


Figura 7-12 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovralzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 2 nei punti P1, P2, P3.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 52 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

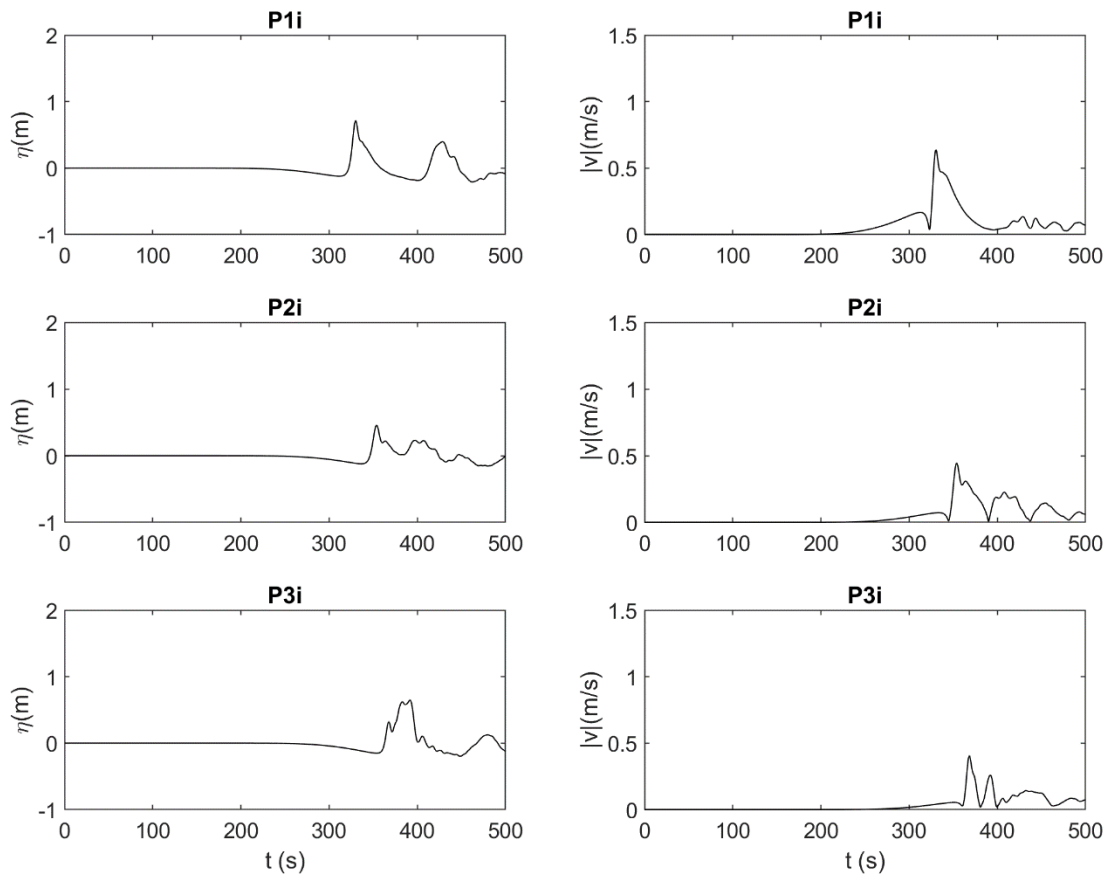


Figura 7-13 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 2 nei punti P1i, P2i, P3i.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 53 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

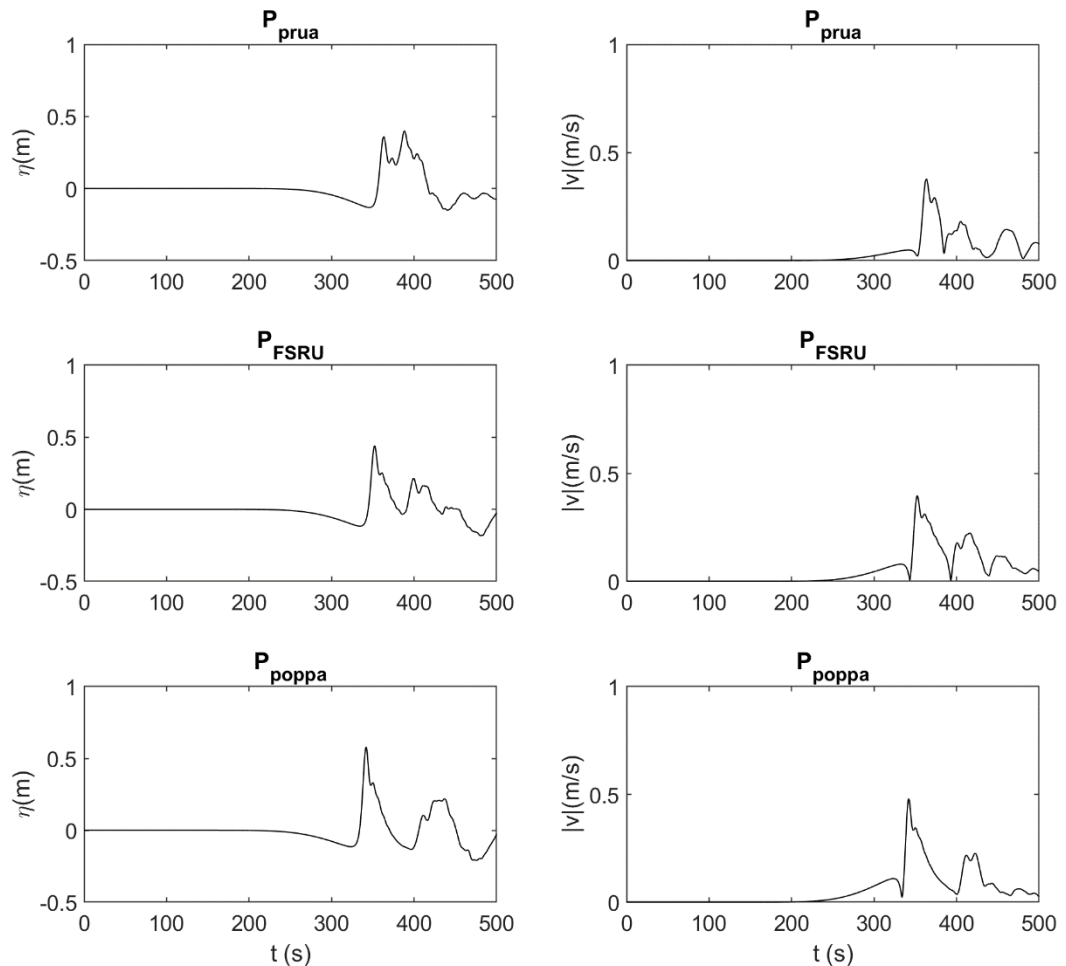


Figura 7-14 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 2 nei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} .

Tabella 7-2 Valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi e minimi della superficie libera ottenuti per lo Scenario 2 in corrispondenza dei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} posti in corrispondenza della FSRU.

PUNTI	Vmax (m/s)	η_{max} (m)	η_{min} (m)
P_{prua}	0.38	0.40	-0.15
P_{FSRU}	0.40	0.44	-0.18
P_{poppa}	0.48	0.58	-0.21

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 54 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

7.2.3 Risultati propagazione ed inondazione da tsunami per lo Scenario 3

Per lo scenario 3 i risultati mostrano lo stesso trend dei due Scenari precedenti con la diga che protegge la zona di ormeggio della FSRU dall'ingresso diretto dell'onda (Figura 7-16). Variazioni di superficie libera nei punti definiti nella zona di ormeggio della FSRU mostrano caratteristiche simili agli altri scenari ma con escursioni di superficie libera maggiori nel punto di prua rispetto ai due precedenti che mostravano massimi in prossimità della poppa. Questa differenza è causata da interferenza costruttiva del fronte d'onda diffratto dalle due testate in momenti diversi, infatti, in Figura 7-16 per il punto Pprua si può vedere un solo picco più elevato mentre negli altri due punti si distinguono due picchi di minore entità. Le velocità risultano in valori inferiori rispetto agli Scenari 1 e 2 e comunque con valori massimi a poppa essendo quella la zona più esposta all'onda incidente.

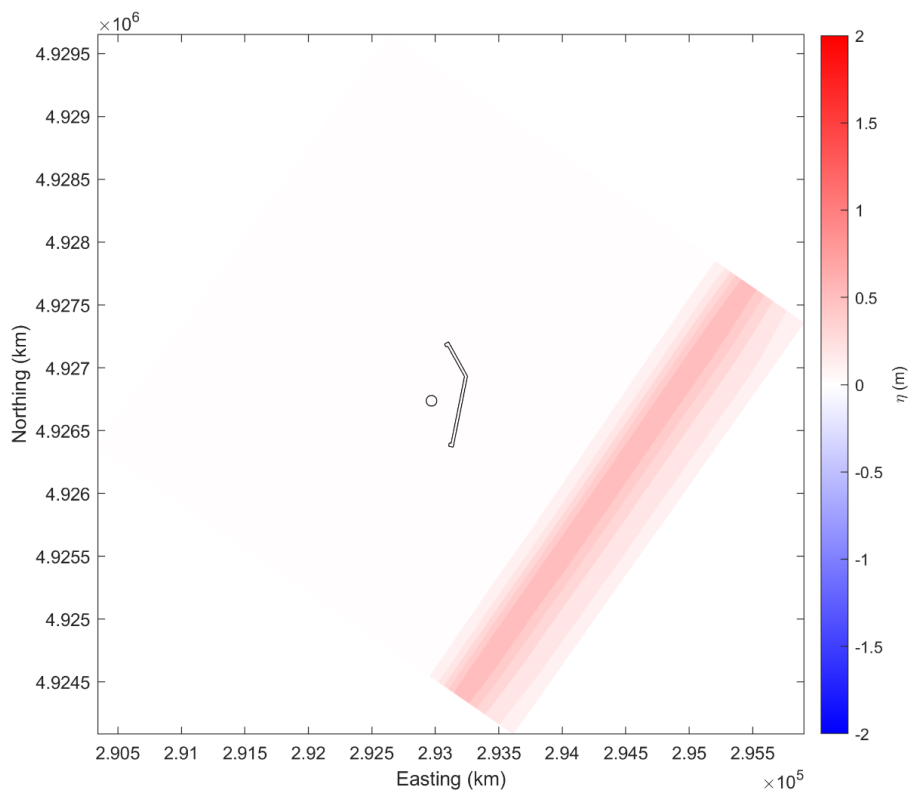


Figura 7-15 Propagazione dello Scenario 3 nell'intera griglia a $t = 2$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 55 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

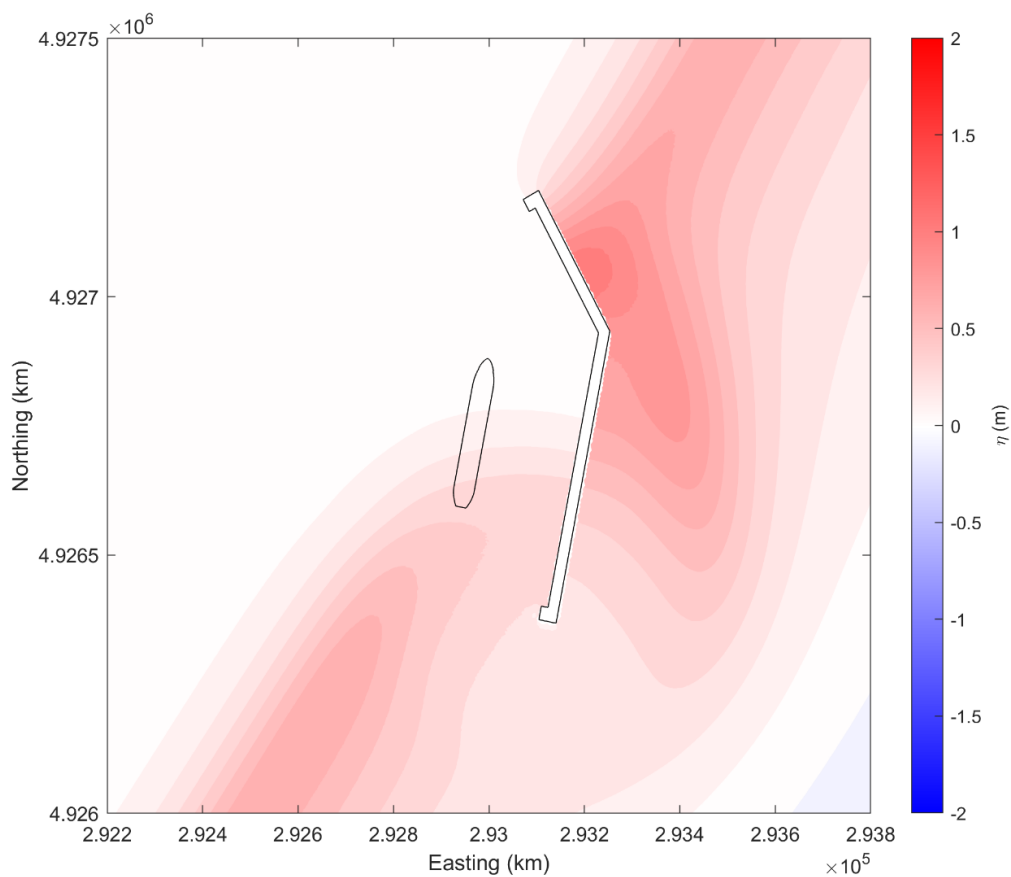


Figura 7-16 Propagazione dello Scenario 4 con ingrandimento nelle vicinanze della diga a $t = 4$ min con mostrato il contorno della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 56 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

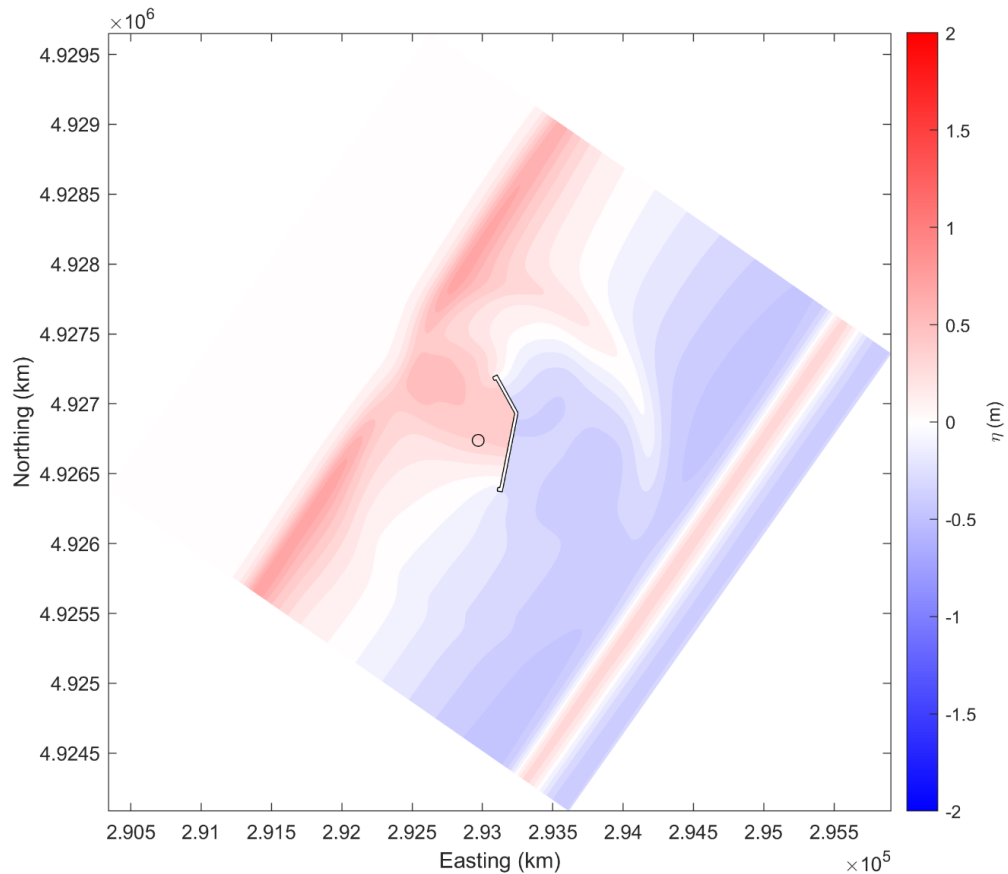


Figura 7-17 Propagazione dello Scenario 3 nell'intera griglia a $t = 5$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 57 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

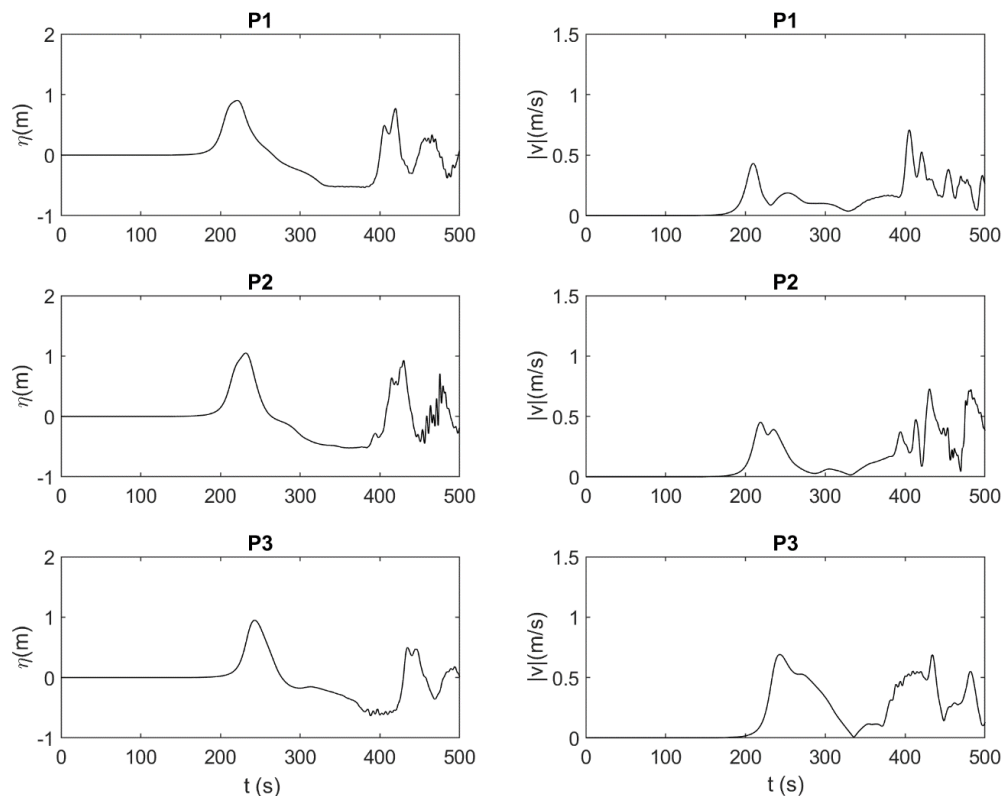


Figura 7-18 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 3 nei punti P1, P2, P3.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 58 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

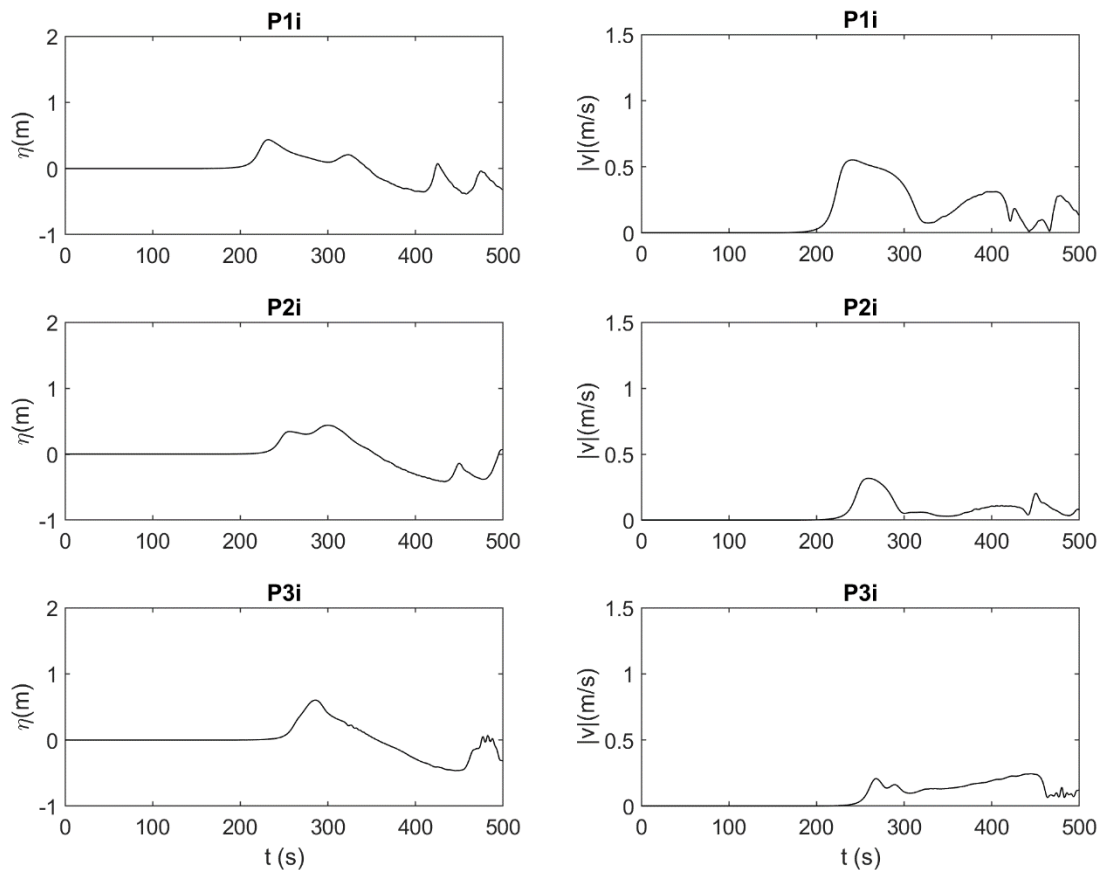


Figura 7-19 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 3 nei punti P1i, P2i, P3i.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 59 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

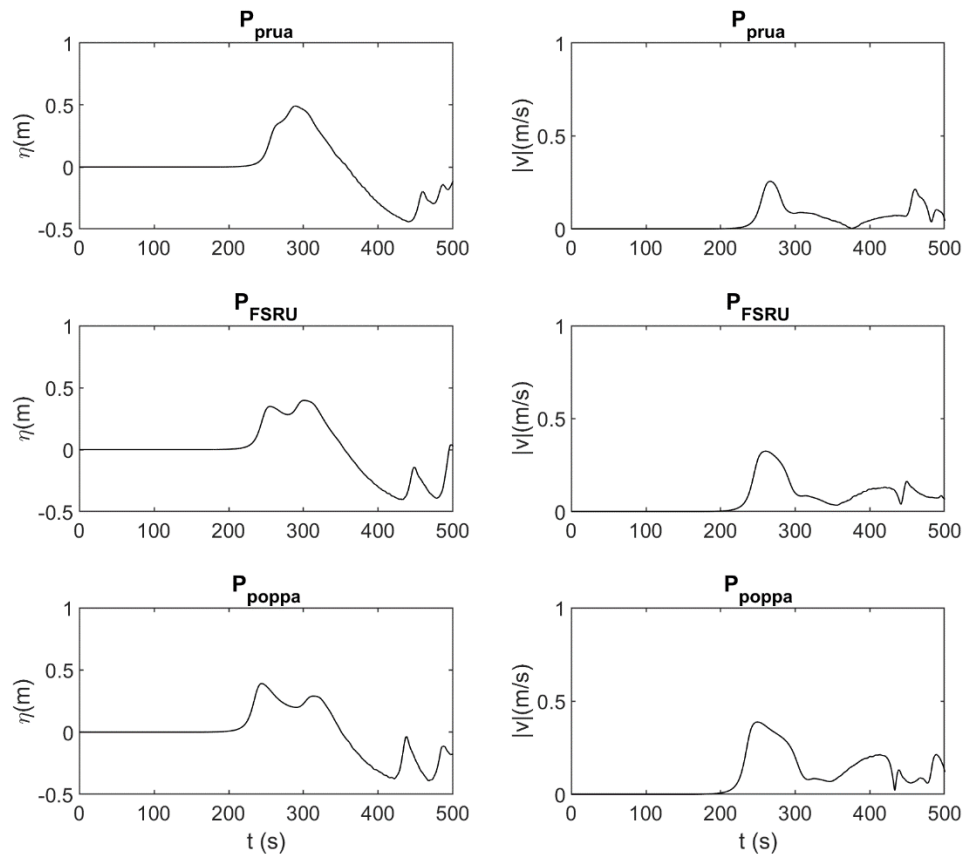


Figura 7-20 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 3 nei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} .

Tabella 7-3 Valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi e minimi della superficie libera ottenuti per lo Scenario 3 in corrispondenza dei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} posti in corrispondenza della FSRU.

PUNTI	Vmax (m/s)	η_{max} (m)	η_{min} (m)
P_{prua}	0.25	0.49	-0.44
P_{FSRU}	0.33	0.40	-0.40
P_{poppa}	0.39	0.39	-0.39

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 60 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

7.2.4 Risultati propagazione ed inondazione da tsunami per lo Scenario 4

Quanto visto nello Scenario 3 è presente anche per lo Scenario 4 dove valori massimi di elevazione della superficie libera sono misurati in corrispondenza della prua della nave mentre i valori massimi del modulo della velocità omnidirezionale sono misurati nella zona più esposta all'onda incidente ossia a poppa.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 61 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

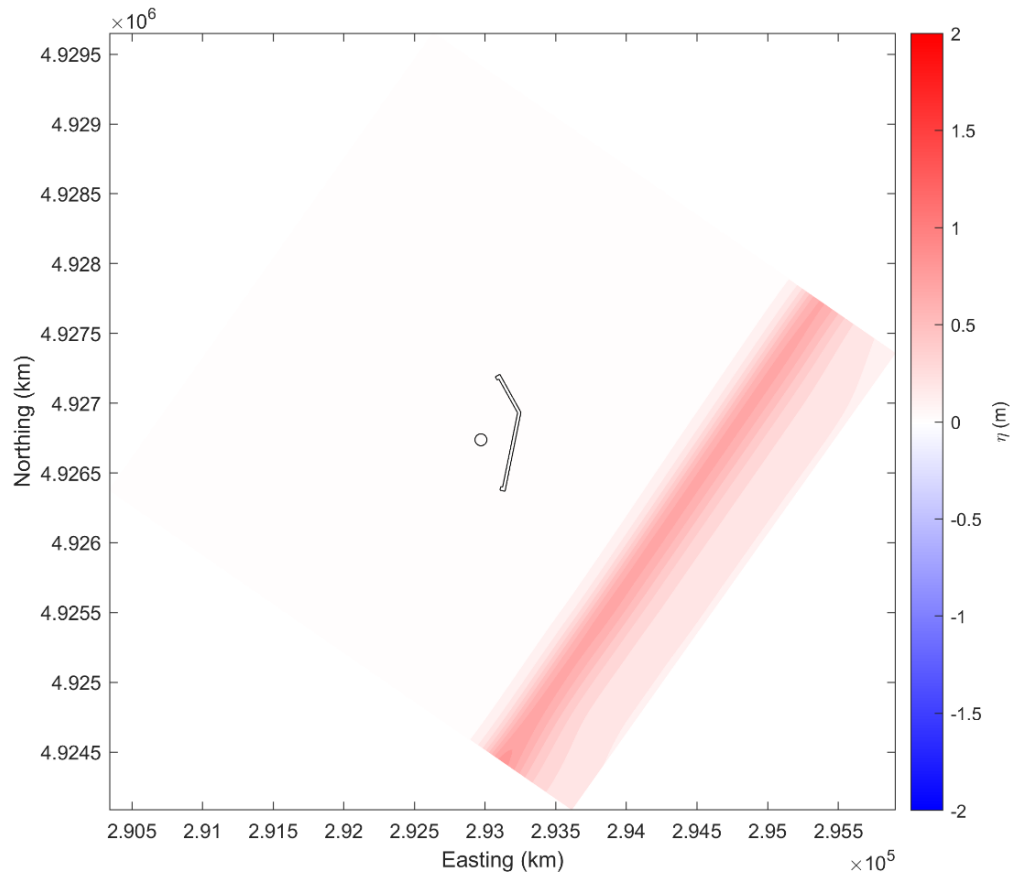


Figura 7-21 Propagazione dello Scenario 4 nell'intera griglia a $t = 2$ min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 62 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

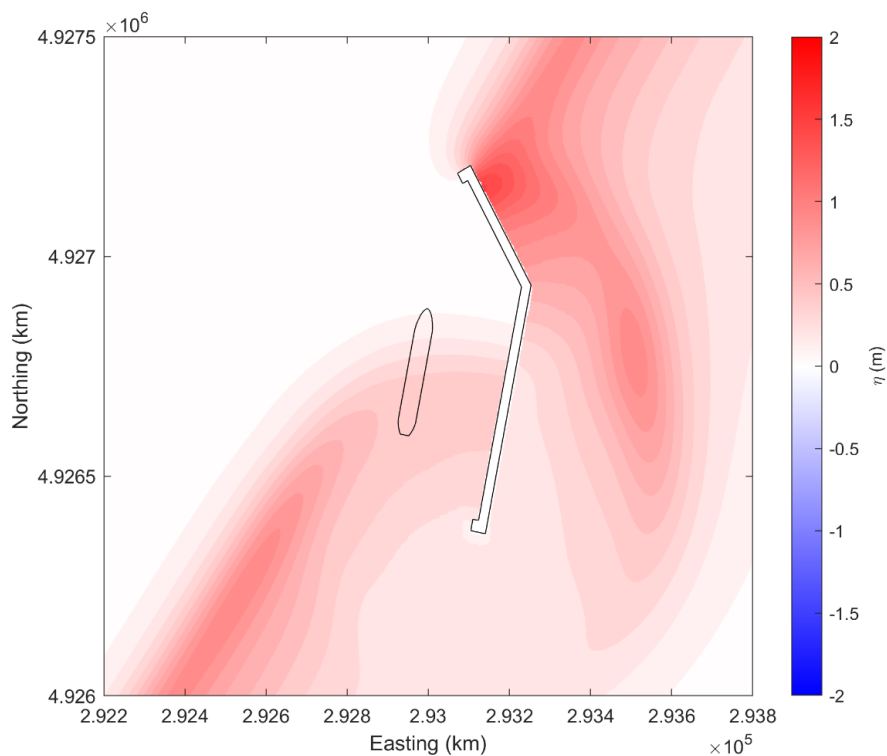


Figura 7-22 Propagazione dello Scenario 4 con ingrandimento nelle vicinanze della diga a t = 4 min con mostrato il contorno della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 63 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

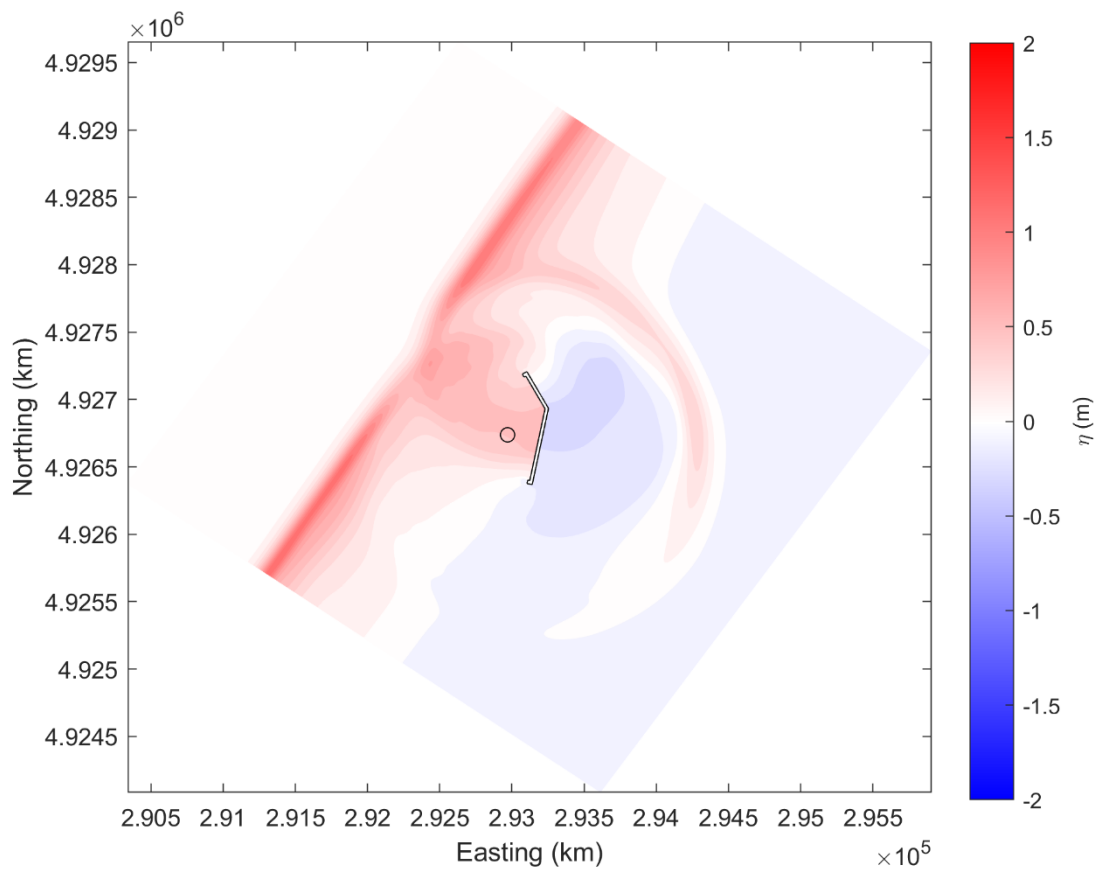


Figura 7-23 Propagazione dello Scenario 4 nell'intera griglia a t = 4 min con indicato da un cerchio il punto centrale della FSRU.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 64 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

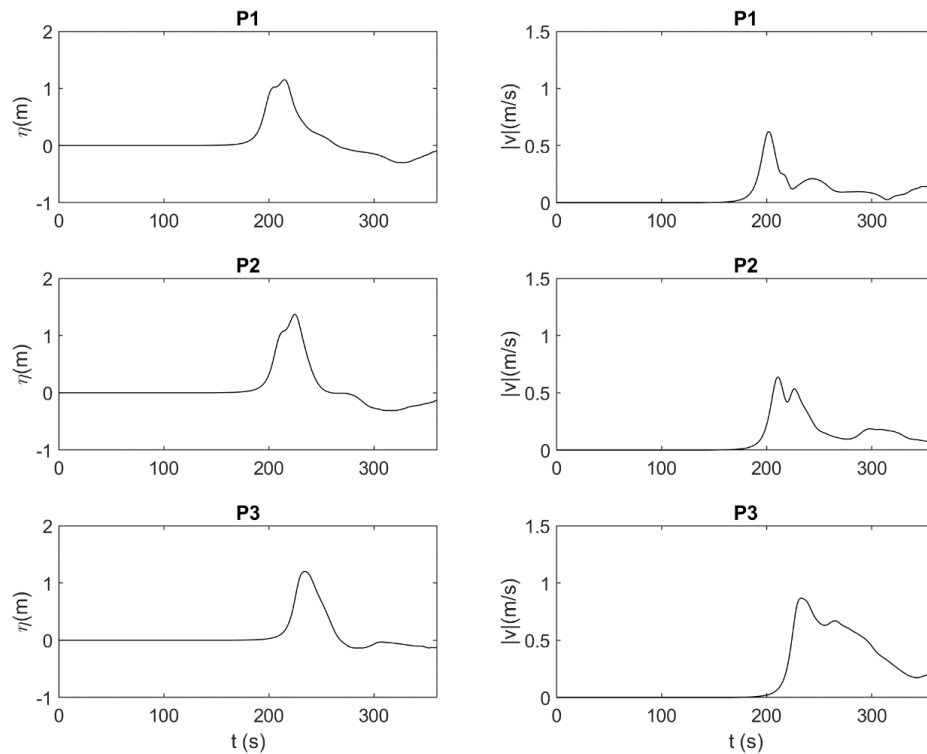


Figura 7-24 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 4 nei punti P1, P2, P3.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 65 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

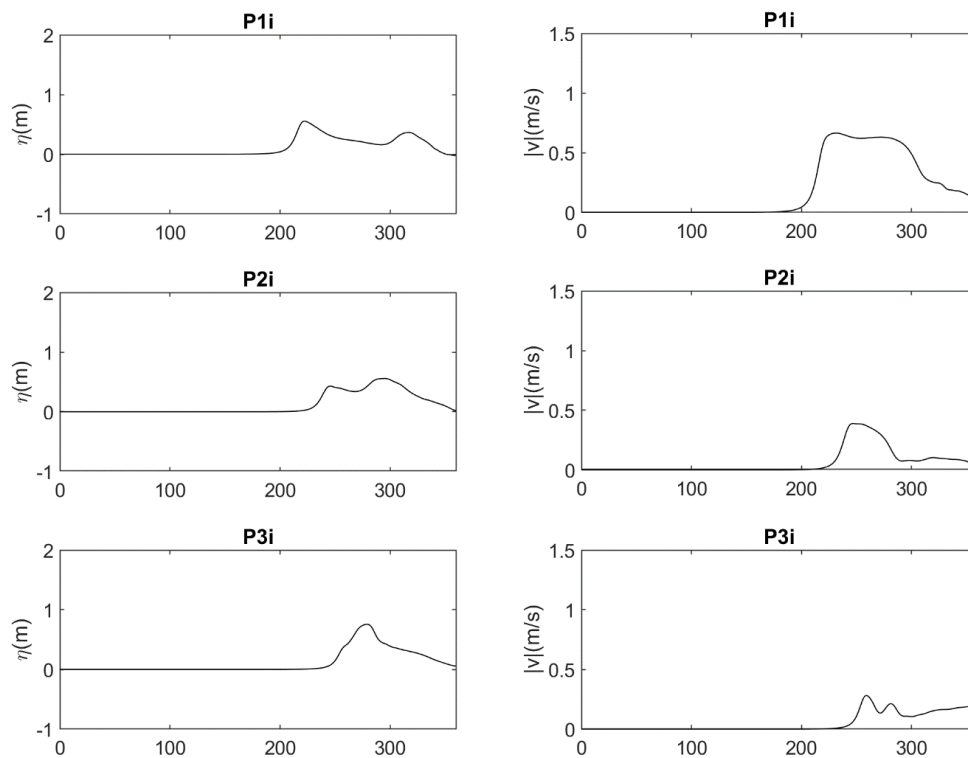


Figura 7-25 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 4 nei punti P1i, P2i, P3i.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 66 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

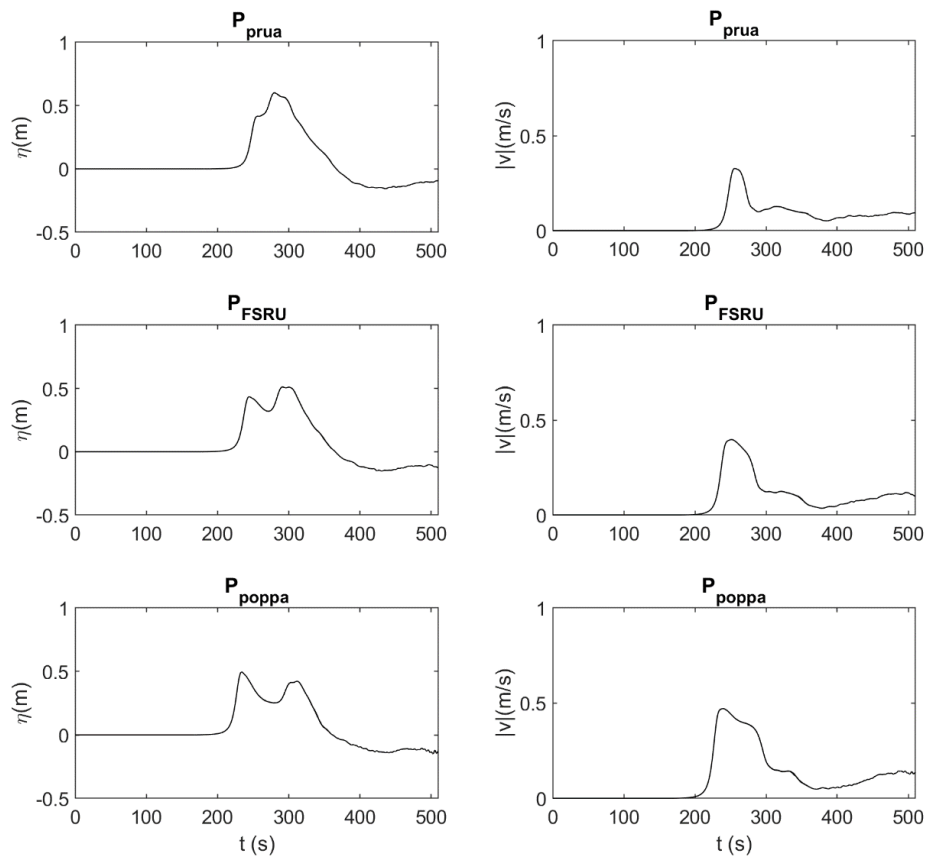


Figura 7-26 Variazione della superficie libera rispetto al l.m.m al netto del sovrizzo di marea astronomica e del modulo della velocità di corrente omnidirezionale nel tempo per lo Scenario 4 nei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} .

Tabella 7-4 Valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi della superficie libera ottenuti per lo Scenario 4 in corrispondenza dei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} posti in corrispondenza della FSRU.

PUNTI	Vmax (m/s)	η_{max} (m)	η_{min} (m)
P_{prua}	0.33	0.60	-0.16
P_{FSRU}	0.40	0.51	-0.15
P_{poppa}	0.47	0.50	-0.15

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 67 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

8 SINTESI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

Qui di seguito sono riassunti i valori massimi delle velocità omnidirezionali ed i valori estremi in termini di oscillazione massima e minima della superficie libera rispetto al livello medio marino al netto del sovrizzo di marea astronomica di +0.35 m (Tabella 8-1) così da isolare il solo effetto delle onde di maremoto in corrispondenza dei punti posti sulla FSRU (P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa}).

Tabella 8-1 Sintesi dei valori massimi del modulo delle velocità omnidirezionali della corrente e dei valori massimi e minimi della superficie libera ottenuti per i quattro scenari simulati in corrispondenza dei punti P_{prua} , P_{FSRU} e P_{poppa} posti in corrispondenza della FSRU.

PUNTI	Vmax (m/s)	η_{max} (m)	η_{min} (m)
P_{prua}	0.38	0.60	-0.44
P_{FSRU}	0.40	0.51	-0.40
P_{poppa}	0.48	0.58	-0.39

Si può notare come il punto posizionato sulla poppa della FSRU è quello dove è stata misurata la massima velocità idrodinamica in quanto più esposto data la direzione incidente considerata per le onde di maremoto.

Infine, si è ottenuto la diga di protezione non è mai soggetta a fenomeni di inondazione.

In conclusione, quindi, ai fini della sicurezza della nave all'ormeggio le massime velocità della corrente ottenuta (nell'ordine di 0.5 m/s) risultano modeste e tali da non dar luogo a sollecitazioni dimensionanti per i dispositivi di ormeggio.

Per quanto riguarda le massime escursioni di livello cresta-cavo di 1.04 m a cui potrà essere soggetta la FSRU durante un evento di maremoto, non risultano dimensionanti per gli ormeggi. Si fa notare come i valori massimi e minimi dell'elevazione della superficie libera in Tabella 8-1 corrispondono sempre a due scenari diversi e quindi si ritiene improbabile che si presentino in concomitanza in un unico scenario. Considerando il dislivello massimo all'interno dello stesso scenario si ha una massima escursione di 0.93 m per il punto P_{prua} . Infine, esse avvengono in uno spazio temporale di alcuni minuti, si ritiene pertanto che i dispositivi di ormeggio siano in grado di assorbirli.

Si sottolinea infine che si è considerato una vita nominale dell'opera di 50 anni superiore a quella effettiva di progetto di 25 anni seguendo un approccio cautelativo.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 68 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. TSUMAPS-NEAM NEAMTHM18 Documentation: the making of the TUSMAPS-NEAM Tsunami Hazard Model 2018, 11/09/2019.
2. TSUMAPS-NEAM: Extended Progress Report, 15/03/2018.
3. Art. 18 del Decreto Legislativo 02/01/2018, n.1 del 2018 "Codice della protezione civile".
4. DPCM (GU n.128 5_6_2017) "Istituzione del Sistema d'Allertamento nazionale per i Maremoti generati da sisma - SIAM" e allegati 1-4, 17/02/2017.
5. Indicazioni per l'aggiornamento delle pianificazioni di protezione civile per il rischio di maremoto, 05/06/2017.
6. Allegato 1 alle indicazioni operative – Metodologia utilizzata per la definizione delle zone di allertamento, 05/06/2017.
7. Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series (UNESCO): Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas, NEAMTWS – Implementation Plan v.3.4, 10/2009.
8. DPC (GU n.266 15_11_2018) "Indicazioni alle Componenti ed alle Strutture operative del Servizio nazionale di protezione civile per l'aggiornamento delle pianificazioni di protezione civile per il rischio maremoto". 02/10/2018.
9. Tonini, R., Di Manna, P., Lorito, S., Selva, J., Volpe, M., Romano, F., & Vittori, E. (2021). Testing Tsunami Inundation Maps for Evacuation Planning in Italy. *Frontiers in Earth Science*, 9, 82.
10. Basili R, Brizuela B, Herrero A, Iqbal S, Lorito S, Maesano FE, Murphy S, Perfetti P, Romano F, Scala A, Selva J, Taroni M, Tiberti MM, Thio HK, Tonini R, Volpe M, Glimsdal S, Harbitz CB, Løvholt F, Baptista MA, Carrilho F, Matias LM, Omira R, Babeyko A, Hoechner A, Gürbüz M, Pekcan O, Yalçiner A, Canals M, Lastras G, Agalos A, Papadopoulos G, Triantafyllou I, Bencheikroun S, Agrebi Jaouadi H, Ben Abdallah S, Bouallegue A, Hamdi H, Oueslati F, Amato A, Armigliato A, Behrens J, Davies G, Di Bucci D, Dolce M, Geist E, Gonzalez Vida JM, González M, Macías Sánchez J, Meletti C, Ozer Sozdinler C, Pagani M, Parsons T, Polet J, Power W, Sørensen M and Zaytsev A (2021) The Making of the NEAM Tsunami Hazard Model 2018 (NEAMTHM18). *Frontiers in Earth Science*. 8:616594.
11. LeMéhauté, B. (1969). An introduction to hydrodynamics and water waves (Vol. 52). *Environmental Science Services Administration*.
12. Williams, J. M. (1981) Limiting gravity waves in water of finite depth, *Phil. Trans Roy. Soc. London A* 302, 139–188
13. Hedges, T. S. (1995) Regions of validity of analytical wave theories, *Proc. Inst. Civ. Engrs, Water, Maritime and Energy* 112, 111–114
14. Ursell, F. (1953) The long-wave paradox in the theory of gravity waves, *Proc. Camb. Phil. Soc.* 49, 685– 694
15. Airy, G., 1845. Encyclopaedia metropolitana. *Tides and waves*.
16. Stokes, G., 1847. *On the theory of oscillatory waves*. Cambridge Library Collection - Mathematics, vol. 1, Cambridge University Press.
17. Fenton, J. D. (1999). The cnoidal theory of water waves. In *Developments in offshore engineering* (pp. 55-100). Gulf Professional Publishing.
18. Iwagaki, Y. (1968) Hyperbolic waves and their shoaling, in *Proc. 11th Int. Conf. Coastal Engng, London*, Vol. 1, pp. 124–144
19. Fenton, J. D. (1990) *Nonlinear wave theories, The Sea - Ocean Engineering Science, Part A*, B. Le Méhauté & D. M. Hanes (eds), Vol. 9, Wiley, New York, pp. 3–25.
20. Tadepalli, S., & Synolakis, C. E. (1996). Model for the leading waves of tsunamis. *Physical review letters*, 77(10), 2141.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITA' RAVENNA (RA)	000-ZX-E-17213	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 69 di 69	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-3303-205

21. Madsen, P. A., Fuhrman, D. R., & Schäffer, H. A. (2008). On the solitary wave paradigm for tsunamis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C12).