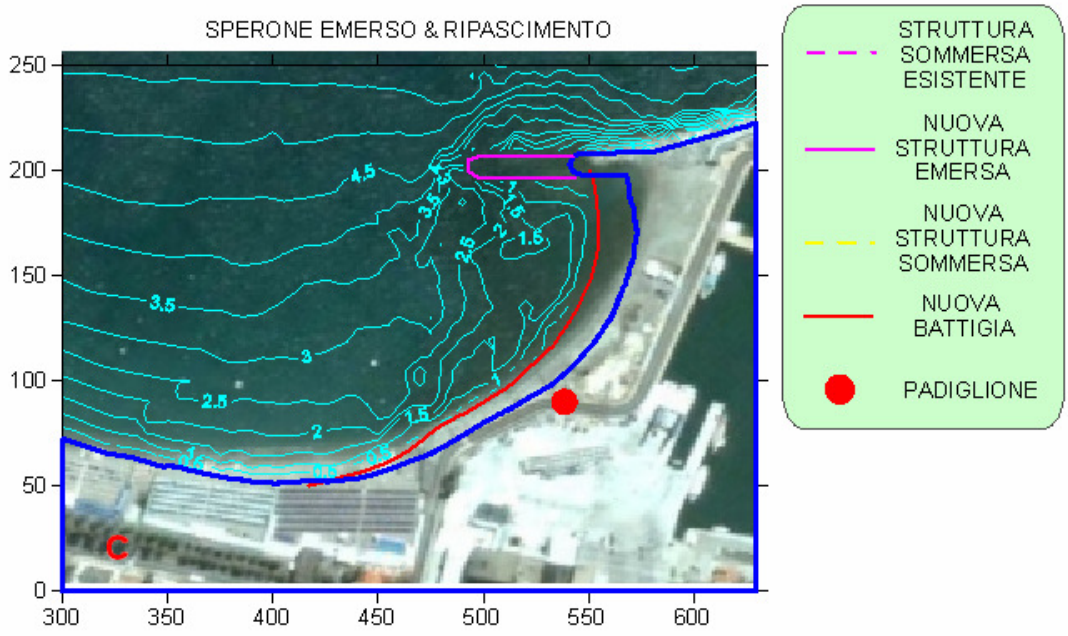
DOCUMENTO Nr. GD-VA-MD/02-2008 PAG. 01 di 71	**Azimut-Benetti Spa**	
MAR LIGURE		400157
AREA	CLIENTE	COMMESSA

LITORALE DI VARAZZE
ADIACENTE IL MOLO DI SOTTOFLUTTO



VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DI TRE IPOTESI DI INTERVENTO MEDIANTE LA SIMULAZIONE DELL'IDRODINAMICA COSTIERA

0	**Nov. 2008**	**Emissione**	**Dr. Ing. E. TERRILE**	**Dr. B. GUIDA**	**Dr. G. DE FILIPPI**
REV	DATA	DESCRIZIONE	AUTORI		APPROVATO

INDICE

1. INTRODUZIONE 3
1.1 Premessa 3
1.2 Scopo 4
2. METODOLOGIA 5
3. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI 6
3.1 Schematizzazione dell'area 6
3.2 Dati batimetrici 6
3.3 Moto ondoso 6
4. CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO 8
5. CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO 10
6. CONCLUSIONI 13
7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI ..... Errore. Il segnalibro non è definito.
ELENCO TABELLE ..... Errore. Il segnalibro non è definito.
ELENCO FIGURE 15
MODELLO "SWAN PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO COSTA 59
MODELLO IDRODINAMICO BAROTROPICO PER LA SIMULAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE COSTIERA 66

1. INTRODUZIONE

Prima di definire lo scopo del presente studio, si ritiene opportuno riportare alcune premesse.

1.1 Premessa

Il monitoraggio continuo e ripetuto della linea di riva dal 2003 al 2007 della spiaggia di Varazze, ha permesso di rilevare una insufficiente stabilità che interessa il breve tratto di spiaggia a ridosso dello sperone di sottoflutto del Porto, in particolar modo nella porzione antistante e immediatamente a nord del padiglione.
Studi precedentemente effettuati da DEAM nella stessa area hanno dimostrato che:

- l'arco litoraneo sabbioso a ridosso del molo è interessato da una dinamica naturale particolarmente intensa, ed i fondali antistanti non hanno raggiunto ancora uno stato di equilibrio. La presenza sui fondali di cumuli di massi e pietrame, con conseguente "scouring" e creazione di canali che sono sede di complessi fenomeni simultanei di rifrazione, riflessione e diffrazione delle onde, contribuiscono a creare condizioni idrodinamiche tali da facilitare la fuoruscita di sedimento verso il largo;

- la spiaggia antistante il padiglione è interessata da fenomeni di asporto dei sedimenti dal fondale, da attribuire principalmente a mareggiate provenienti da direzioni comprese tra 130° e 155° N (la cui frequenza media annua è prevalente), che fluiscono verso il Teiro, mentre mareggiate provenienti da direzioni da 80°a 130°N tendono ad indirizzare i sedimenti verso l'area del padiglione.
  Negli ultimi anni si è assistito localmente ad una quasi totale mancanza di mareggiate provenienti da settori direzionali favorevoli, mentre la frequenza delle situazioni sfavorevoli è quasi raddoppiata. Il litorale, come del resto tutto l'arco ligure, è stato anche interessato da una successione di eventi estremi ben oltre le frequenze statisticamente attese.

Ma, al di là delle variazioni del clima ondoso, particolarmente sfavorevoli dopo la realizzazione dell'ampliamento portuale e per le quali non si può ovviamente prevederne il futuro, rimane il fatto che, nell'area del padiglione, l'elemento saliente emerso dalle analisi effettuate è l'esistenza di un consistente trasporto trasversale.
Tale fatto era stato messo in evidenza già nel rapporto DEAM del 1995: è un fenomeno naturale che esiste localmente e che non è eliminabile se non con la realizzazione di nuove rilevanti strutture, che darebbero origine a benefici locali, ma che produrrebbero probabilmente un non trascurabile impatto sulla spiaggia adiacente.
Si tratta dunque di minimizzare il più possibile tale fenomeno di moto verso il largo, studiando soluzioni che, senza indurre effetti negativi sul litorale adiacente, comportino sostanziali benefici nell'area del padiglione.
Di fronte alla necessità di interrompere tale scarsa stabilità e mettere in sicurezza le strutture del padiglione, senza compromettere l'equilibrio che il litorale ha raggiunto nelle aree adiacenti, erano stati recentemente suggeriti interventi moderati, ma essenziali, per diminuire gli effetti negativi, e cioè:

- eliminazione delle irregolarità dei fondali mediante rimozione dei vari cumuli di massi e pietrame che innescano fenomeni di erosione localizzata (scouring);

- ripristino, mediante versamento di materiale sabbioso-ghiaioso di opportuna pezzatura, della pendenza dei fondali locali (dalla scogliera almeno fino al padiglione).

In seguito alle recenti violente mareggiate che hanno ancora una volta colpito il litorale ligure, è stata posta l'attenzione sulla necessità di proteggere in maniera più efficace il tratto di spiaggia in questione, mediante la realizzazione di una o più strutture di contenimento/protezione opportunamente scelte.

1.2 Scopo

Obiettivo del presente studio è dunque quello di simulare, mediante l'applicazione di modelli numerici, la circolazione locale in caso di realizzazione di tre scenari di intervento ipotizzati nel tratto di litorale compreso tra il molo sottoflutto del Porto e il molo dei bagni Roma (a circa 250 m dal molo del torrente Teiro), con particolare interesse per il tratto a ridosso dello sperone di sottoflutto, antistante e immediatamente a nord del padiglione.
Il fine è quello di fornire indicazioni ai progettisti per l'individuazione degli interventi più opportuni da adottare, che concretizzino la messa in sicurezza della spiaggia antistante il Padiglione, senza compromettere la stabilità delle spiagge adiacenti.

2. METODOLOGIA

La comprensione in dettaglio della dinamica dell'area in esame richiede la descrizione dei vari fenomeni coinvolti, con l'ausilio di modellistica opportuna e di una schematizzazione della batimetria alla massima risoluzione realizzabile (compatibilmente con il campo di applicabilità dei modelli e tempi di calcolo).
La metodologia seguita ha previsto la simulazione del campo idrodinamico indotto dalla propagazione delle onde e dall'azione del vento nel corso delle mareggiate tipiche, nei seguenti scenari di intervento:

- SCENARIO A: realizzazione di un pennello lungo circa 50 metri, radicato alla scogliera adiacente il padiglione, e ripascimento;

- SCENARIO B: realizzazione di un pennello lungo circa 50 metri, radicato alla scogliera adiacente il padiglione, prolungamento di 20 metri dello sperone sommerso a quota -1.0, e ripascimento;

- SCENARIO C: innalzamento a + 1 m dello sperone sommerso esistente e regolarizzazione della sua zona di testata, con avanzamento, sempre a + 1 m, di circa 10 m della struttura

In tutti e tre gli scenari, è stato considerato un versamento di materiale (in corso) per il ripascimento che interessa la spiaggia emersa e la spiaggia sommersa fino all'attuale isobata -1.50 metri. In **Fig. 2.2** sono riportati i tre scenari schematizzati A (**Fig. 2.2-A**), B (**Fig. 2.2-B**) e C (**Fig. 2.2-C**). sovrapposti ad un'immagine da satellite dell'area di interesse

La valutazione della fenomenologia locale e la conseguente verifica dell'efficacia degli scenari di intervento sono state effettuate utilizzando un modello idrodinamico costiero (già utilizzato negli studi precedenti effettuati sullo stesso litorale) applicato alla spiaggia di Varazze a mezzo di una schematizzazione di estremo dettaglio, in grado di descrivere compiutamente i fenomeni idrodinamici che si verificano nella zona litoranea. La batimetria fornita in input è quella recentemente rilevata con tecniche "multibeam", circa 1 settimana dopo una consistente mareggiata.

Sono state quindi simulate le mareggiate tipiche, e confrontati poi i campi idrodinamici ottenuti nei tre scenari ipotizzati.

3. IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

In questo capitolo si descrivono brevemente i dati forniti in input ai modelli.

3.1 Schematizzazione dell'area

Si è ritenuto opportuno schematizzare un'area più ampia dell'area oggetto di studio, che comprende il litorale di Varazze che si estende tra il molo sottoflutto del Porto e il molo dei bagni Roma (a circa 250 m dal molo del torrente Teiro).
Le caratteristiche principali della griglia di calcolo adottate sono riassunte nella seguente tabella:

Dimensione della maglia (m)	5x5
Estensione in X (Ovest-Est) (m)	630
Estensione in Y (Nord-Sud) (m)	330
N. maglie di calcolo	8316
Profondità massima del fondale (m)	7.5

La griglia di calcolo è orientata con l'asse x corrispondente alla direzione 220°N.

3.2 Dati batimetrici

Data l'estensione dell'area, è stato necessario integrare il rilievo multibeam con i dati batimetrici rilevati su tutta l'area nel 2007. I due rilievi (2007 e 2008) sono riportati rispettivamente in **Fig. 3.1** e **Fig. 3.2**.

3.3 Moto ondoso

Per valutare l'andamento dei fondali nella situazione attuale e nella configurazione con sperone sommerso prolungato, sono state selezionate le mareggiate tipiche che interessano l'area di studio, individuate sulla base del moto ondoso al largo, delle informazioni sul settore di esposizione del litorale al moto ondoso incidente, sull'orientazione della linea di riva e sulla presenza di strutture artificiali come il molo sopraflutto del Porto. Ulteriori informazioni utili a tale scopo derivano dalle analisi preliminari, che hanno permesso di valutare le modifiche subite dal moto ondoso incidente per effetto di shoaling, rifrazione e attrito indotti dai fondali.
Le onde tipiche simulate sono le seguenti:

- Hs: 1 e 1.5 m;
- Ts: 6 e 7 s;
- DIR: 80, 90, 100, 115, 120, 130, 140, 150 E 155°N.

Alle mareggiate è stato ovviamente associato il vento, sia per gli effetti “diretti” che esso induce sulla circolazione, sia per quelli “indiretti” sulle variazioni di livello.
Si ricorda infatti che mentre un vento trasversale alla costa, proveniente dal mare, crea un’elevazione del livello marino a costa, il vento longitudinale crea un innalzamento se la costa risulta a destra rispetto alla sua direzione di propagazione, un abbassamento se la costa risulta a sinistra (nel nostro emisfero), a causa della forza di Coriolis.
Si è pertanto associato ad ogni mareggiata il corrispondente valore della velocità del vento, tenendo conto dei venti tipici caratterizzanti l’area di studio.

Si ritiene opportuno inserire un breve commento a proposito della scelta delle mareggiate. Se è del tutto ovvio assistere a consistenti variazioni dei fondali in presenza di mareggiate estreme (che sono avvenute in buon numero in questi ultimi anni), meno abituale è il verificarsi di una consistente variazione in caso di mareggiate tipiche o medio-basse, come è successo nell’area in esame. Si è dunque preferito simulare l’andamento dei fondali nel corso di mareggiate la cui frequenza annuale è consistente, in modo da privilegiare la comprensione del ruolo giocato dalla direzione di provenienza delle onde e dalla presenza dello sperone sommerso, e individuare il loro peso nella fenomenologia costiera locale.

4. CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO

Per la definizione delle condizioni di moto ondoso in tutti i punti della griglia di calcolo è stato utilizzato il già citato modello SWAN, la cui descrizione è riportata in **Appendice 1.** In questo capitolo vengono presentati alcuni esempi illustrativi dei campi di moto ondoso simulati in presenza dello sperone sommerso prolungato, per periodi di 6 e 7s. Le **Fig. 4.1-4.18** evidenziano l'andamento dell'altezza d'onda risultante, contributo dei vari processi costieri che influenzano il moto ondoso e cioè:

- la rifrazione e lo shoaling;
- la diffrazione dovuta alla presenza dei moli;
- il frangimento dovuto alle acque basse.

I valori dell'altezza d'onda sono presentati secondo una scala cromatica identica per tutti i casi simulati, in modo da agevolare il confronto tra le varie mareggiate, a cui sono sovrapposte frecce che indicano il verso di propagazione del moto ondoso.

Dall'osservazione delle figure si nota, in generale, che:

- in tutti i casi simulati il campo di moto ondoso è caratterizzato da una significativa variabilità nella distribuzione spaziale dell'energia nell'area oggetto di studio, dove il fondale molto irregolare innesca processi di rifrazione e riflessione delle onde modificandone rapidamente (sia nel tempo sia nello spazio) il profilo;

- negli scenari A e B le onde provenienti dalle direzioni comprese tra 130° e 155°N vengono diffratte dal molo di sottoflutto e parzialmente diffratte dallo sperone sommerso antistante: si crea, così, una zona d'ombra in cui l'energia ondosa è, si, ridotta ma anche estremamente variabile in termini di distribuzione spaziale. In questa area di mare "confuso", le onde diffratte subiscono ulteriori processi costieri (rifrazione, riflessione, shoaling) indotti dall'irregolarità del fondale;

- il prolungamento dello sperone sommerso ha, ovviamente, l'effetto di ampliare l'estensione della zona d'ombra, ma non pone rimedio alle problematiche all'interno di essa: vale a dire che, anche con lo sperone prolungato, questa zona è caratterizzata da una estrema variabilità spaziale dell'energia ondosa, modulata dai processi indotti dal fondale irregolare su cui le onde diffratte dallo sperone continuano a propagare verso la costa;

- negli scenari A e B, il pennello realizzato davanti alla scogliera riduce solo parzialmente l'energia ondosa per onde provenienti dalle direzioni comprese tra 80 e 130°N, con effetti positivi su un tratto di circa 10-15 metri di costa lineare;

- il prolungamento dello sperone sommerso ha l'effetto di incrementare il set-up (innalzamento del livello) indotto dalle onde lungo l'arco di spiaggia retrostante, creando una maggiore differenza di livello tra la costa e il limite della zona d'ombra. Tale dislivello comporta l'incremento delle correnti uscenti, cioè dirette dalla costa verso il largo;

- in tutti i casi simulati nello scenario C, l'innalzamento dello sperone sommerso a quota +1.0 ha l'effetto di schermare in maniera efficace le onde, in particolar modo quelle provenienti da direzioni comprese tra 120 e 140°N: le onde diffratte dallo sperone emerso propagano in maniera regolare verso la costa con energia (e quindi altezza d'onda) fortemente ridotta.

5. CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO

Il campo di corrente è stato calcolato con il modello idrodinamico descritto in dettaglio nell' **Appendice 2.**
Il modello idrodinamico è forzato dal vento e dal moto ondoso che, nella zona delle onde frangenti, mediante il meccanismo del "radiation stress", induce una corrente costiera che rappresenta il veicolo principale della movimentazione dei sedimenti lungo costa.
Esempi grafici dei risultati ottenuti sono mostrati nelle **Figg. 5.1 – 5.18**, dove sono evidenziati i campi idrodinamici: l'andamento della corrente è rappresentato da frecce la cui direzione corrisponde a quella della direzione di propagazione del flusso e la cui lunghezza è proporzionale al valore della velocità (la velocità rappresentata si riferisce al valore medio sulla verticale). Tutti gli esempi si riferiscono al campo di corrente indotto dalle onde al momento del picco della mareggiata simulata.

Dall'analisi dei risultati negli scenari A e B si evidenzia un campo idrodinamico caratterizzato da correnti intense in corrispondenza dello sperone sommerso, che, per mareggiate provenienti da direzioni comprese tra 80°N e 130°N, determinano la generazione di una cella di circolazione oraria nei pressi del lato nord dello sperone, il cui flusso va ad interagire con la corrente longitudinale che fluisce in senso opposto.
Ne risulta lo svilupparsi di un intenso flusso di corrente verso il largo che tende a "richiamare" acqua dai fondali molto prossimi alla battigia. Quest'area di convergenza dei flussi, la cui ubicazione varia a seconda della direzione di provenienza delle onde, è un'area che potremmo definire, senza dubbio, "critica".

Confrontando i grafici delle tre configurazioni simulate (situazione attuale e ipotesi di prolungamento dello sperone), si evidenziano i seguenti aspetti:

- Mareggiate da 80°N e 90°N (**Figg. 5.1-5.2&5.10-5.11**): in presenza dello sperone sommerso per onde di 6 secondi, la corrente longitudinale fluisce verso sud, mentre in corrispondenza dello sperone si genera una cella di circolazione oraria che si estende tra -1.5 e -3.5 metri di profondità, la cui corrente rotatoria fluisce poi al di là dello sperone, in direzione dell'imboccatura del Porto di Varazze. I due flussi opposti (la corrente longitudinale e la cella oraria) convergono in una stessa area, con l'effetto di determinare un "richiamo" d'acqua dalle zone più prossime alla battigia. Nell'ipotesi di prolungare lo sperone sommerso le caratteristiche del campo idrodinamico sono analoghe, ma in questo caso si osserva una più ampia estensione trasversale della cella di circolazione che risulta, quindi, più vicina a costa. Nello scenario C, la circolazione è completamente diversa: non si sviluppa la cella di circolazione, bensì il flusso della corrente longitudinale proveniente da nord perde intensità mano a mano che procede verso lo sperone, e fluisce verso il largo senza avvicinarsi alla spiaggia retrostante lo sperone stesso. Le simulazioni con periodo d'onda di 7 secondi forniscono risultati del tutto analoghi: si evidenzia una maggiore estensione della cella di circolazione oraria, che risulta quindi più prossima alla costa.

- Mareggiate da 100°N, 115°N e 120°N (**Figg. 5.3-5.5&5.12-5.14**): per onde di 6 secondi, analogamente ai casi descritti al punto precedente, il campo idrodinamico

è caratterizzato da una cella di circolazione oraria sul lato nord dello sperone sommerso, il cui centro è ubicato a circa -2.5 metri di profondità. Il prolungamento dello sperone sommerso (ipotesi B) determina un ampliamento del raggio di questa cella di circolazione, che si avvicinerebbe all'estremità del pennello determinando correnti più intense anche in qeust'area. Nell'ipotesi C, come si nota facilmente dalle figure, la circolazione è molto più regolare in quanto non si sviluppa la cella di circolazione suddetta, ma il flusso di corrente longitudinale proveniente da nord fluisce lungo l'isobata -2.5 metri, oltrepassa lo sperone senza avvicinarsi alla battigia. Le simulazioni con periodo d'onda di 7 secondi forniscono risultati del tutto analoghi per lo stato attuale, ma con una maggiore estensione della cella di circolazione oraria nelle configurazioni A e B, che risulta quindi più prossima alla costa;

- Mareggiata da 130 e 140°N (**Figg. 5.6-5.7&5.15-5.16**): per queste direzioni di provenienza delle onde e periodo di 6 secondi, nelle configurazioni A e B non si assiste alla generazione della cella oraria vista nei casi precedenti, bensì a un intenso flusso di corrente che si sviluppa in corrispondenza della parte sommersa dello sperone e fluisce verso il largo. Nello scenario C, si osservano andamenti completamente differenti: in caso di onda da 130°N la circolazione è analoga a quella indotta da onde provenienti da 120°N, mentre onde provenienti da 140°N risultano essere quasi completamente schermate dallo sperone emerso, e il campo idrodinamico risulta essere caratterizzato da correnti deboli in tutto il dominio di calcolo. Le simulazioni con periodo d'onda di 7 secondi forniscono risultati del tutto analoghi;

- Mareggiate da 150°N e 155°N (**Figg. 5.8-5.9&5.17-5.18**): per i 6 secondi, il campo idrodinamico negli scenari A e B è essenzialmente caratterizzato dalla corrente che fluisce longitudinalmente alla costa, con velocità molto intense in corrispondenza dello sperone sommerso che si riducono progressivamente muovendosi lungo costa. Il prolungamento dello sperone sommerso sembra non avere nessun effetto significativo sul campo idrodinamico. Nello scenario C si osserva, invece, che il campo idrodinamico è caratterizzato da correnti deboli in tutto il dominio di calcolo. Le simulazioni con periodo d'onda di 7 secondi forniscono risultati del tutto analoghi.

Dal confronto tra i risultati delle simulazioni idrodinamiche ottenuti nei tre scenari, si può concludere che:

- nello scenario A, in corrispondenza della parte sommersa dello sperone si sviluppano correnti molto intense, indotte dai forti gradienti di altezza d'onda, che determina la formazione di una cella di circolazione oraria sui fondali antistanti la spiaggia compresa tra il porto e il padiglione, per onde provenienti da direzioni comprese tra 80 e 120°N. Nei restanti casi (direzioni comprese tra 130 e 155°N) l'intensa corrente si avvicina a costa prima di fluire verso il largo;

- nello scenario B, la fenomenologia è del tutto analoga a quella simulata nello scenario A, ma la corrente che si genera in corrispondenza dello sperone è più intensa e ampia, e determina lo svilupparsi di una cella di circolazione oraria più ampia e quindi più prossima alla costa;

- i risultati ottenuti nello scenario C dimostrano che l'innalzamento del pennello a quota emersa impedisce lo svilupparsi di correnti intense: di conseguenza, i campi idrodinamici simulati in questa configurazione sono molto diversi, rispetto alle configurazioni A e B, e in generale il tratto costiero compreso tra il molo di sottoflutto e la scogliera risulta essere interessato da correnti meno intense e che fluiscono in maniera molto più regolare e ad una maggiore distanza dalla battigia;

- in entrambi gli scenari A e B, la realizzazione del pennello non sembra apportare benefici significativi all'idrodinamica locale: in alcuni casi fa sì che la corrente intensa, proveniente dallo sperone, non si avvicini al tratto costiero cui è radicato, ma l'effetto positivo interessa solo circa 10-15 metri lineari di costa (cioè solo la scogliera);

- il versamento di materiale sul profilo di spiaggia comporta una regolarizzazione dei fondali, che attualmente si presentano invece fortemente irregolari, che ha un diretto effetto sulla circolazione indotta sui fondali antistanti.

Gli interventi simulati con lo scenario C risultano quindi essere i più efficaci in termini di protezione del tratto costiero in esame: in particolare l'innalzamento dello sperone a quota +1.0 m e il modesto prolungamento della struttura (circa 10 m) comporterebbe un forte miglioramento della dinamica intensa caratteristica di quest'area costiera, senza compromettere né modificare l'idrodinamica delle aree circostanti.

6. CONCLUSIONI

Il presente studio si è posto l'obiettivo di fornire indicazioni ai progettisti per l'individuazione degli interventi più opportuni da adottare, che concretizzino la messa in sicurezza della spiaggia antistante il Padiglione senza compromettere la stabilità delle spiagge adiacenti.
A tal fine è stata simulata, mediante l'applicazione di modelli numerici, la circolazione locale in caso di realizzazione di tre scenari di intervento che riguardano il tratto di litorale compreso tra il molo sottoflutto del Porto e il molo dei bagni Roma (a circa 250 m dal molo del torrente Teiro), con particolare interesse per il tratto a ridosso dello sperone di sottoflutto, antistante e immediatamente a nord del padiglione. Gli scenari considerati sono i seguenti:

- SCENARIO A: realizzazione di un pennello lungo circa 50 metri, radicato alla scogliera adiacente il padiglione, e ripascimento;

- SCENARIO B: realizzazione di un pennello lungo circa 50 metri, radicato alla scogliera adiacente il padiglione, prolungamento di 20 metri dello sperone sommerso a quota -1.0, e ripascimento;

- SCENARIO C: innalzamento a + 1 m dello sperone sommerso esistente e regolarizzazione della sua zona di testata, con avanzamento, sempre a + 1 m, di circa 10 m della struttura

In tutti e tre gli scenari, è stato considerato un versamento di materiale (in corso) per il ripascimento che interessa la spiaggia emersa e la spiaggia sommersa fino all'attuale isobata -1.50 metri.

Il modello ha tenuto conto di tutti i principali aspetti oceanografici che si verificano nell'area, vale a dire: processi di rifrazione, diffrazione, shoaling, attrito e frangimento delle onde che propagano verso la costa, presenza del vento, variazioni del livello marino. Dal confronto dei risultati ottenuti nei tre casi, in termini sia di moto ondoso costiero sia di corrente costiera, si può concludere che la scelta degli interventi da attuare debba tenere conto dei seguenti punti:

- Il prolungamento dello sperone sommerso tende ad incrementare i valori di innalzamento del livello marino a costa e contribuisce ad incrementare le già intense correnti attualmente presenti, che tenderebbero ad evolversi in una cella di circolazione oraria che agirebbe sui fondali antistanti la spiaggia, con correnti intense vicine alla battigia, con conseguente maggiore asporto di materiale dalla spiaggia retrostante;

- la realizzazione di un pennello radicato alla scogliera sembrerebbe non apportare significativi benefici alla spiaggia in esame. Trattandosi di una struttura rigida trasversale, è certo che intercetterebbe almeno in parte i flussi longitudinali di corrente e di materiale sedimentario, andando probabilmente ad interferire con l'equilibrio sedimentario delle spiagge a nord;

- il versamento di materiale di ripascimento, se effettuato garantendo la regolarizzazione del profilo di spiaggia sommersa almeno fino all'isobata -1.5 m, rappresenta un efficace intervento di ripristino del tratto di costa in esame, che attualmente subisce forti perdite di materiale sedimentario in senso trasversale favorite dalla irregolarità del fondale stesso;

- l'innalzamento dello sperone sommerso a quota +1.0 m, vale a dire a pari livello rispetto alla sua porzione emersa, comporta un netto miglioramento della dinamica locale, con correnti longitudinali fluiscono in maniera molto più regolare, rispetto alle altre due ipotesi simulate, e, soprattutto, sufficientemente lontane dalla battigia della spiaggia in esame.

L'innalzamento dello sperone garantirebbe il raggiungimento del duplice obiettivo di attenuare la dinamica costiera attualmente in corso e ottenere una maggiore superficie di spiaggia emersa sufficientemente protetta, senza interferire con l'equilibrio dinamico delle spiagge situate a nord dell'area di intervento.

ELENCO FIGURE

FIG. 2.1 - AREA DI STUDIO

FIG. 2.2 - TRE SCENARI DI INTERVENTO SIMULATI SULLA BATIMETRIA REALE (DA RILIEVO MULTIBEAM 2008)

FIG. 3.1 - LITORALE DI VARAZZE: RILIEVO BATIMETRICO 2007

FIG. 3.2 - RILIEVO BATIMETRICO DI DETTAGLIO (2008)

FIG. 4.1 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 80°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.2 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 90°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.3 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 100°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.4 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 115°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.5 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 120°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.6 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 130°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.7 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 140°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.8 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 0.8 m PROVENIENTE DA 150°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.9 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 0.8 m PROVENIENTE DA 155°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.10 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 80°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.11 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 90°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.12 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 100°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.13 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 115°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.14 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 120°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.15 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 130°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.16 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 140°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.17 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 150°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 4.18 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 155°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.1 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 80°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.2 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 90°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.3 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 100°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.4 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 115°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.5 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 120°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.6 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 130°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.7 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 140°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.8 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 0.8 m PROVENIENTE DA 150°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.9 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 0.8 m PROVENIENTE DA 155°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.10 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 80°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.11 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 90°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.12 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 100°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.13 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 115°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.14 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 120°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.15 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 130°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.16 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 140°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.17 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 150°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

FIG. 5.18 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 155°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

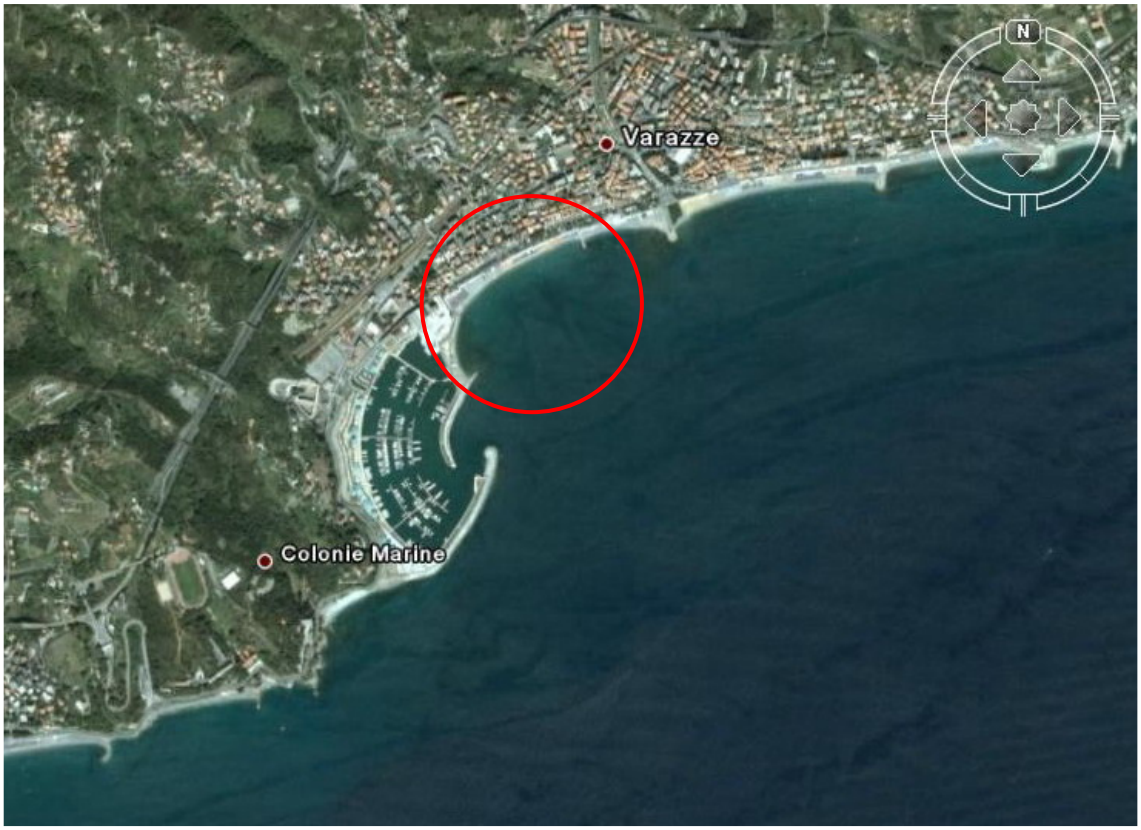


FIG. 2.1 – AREA DI STUDIO

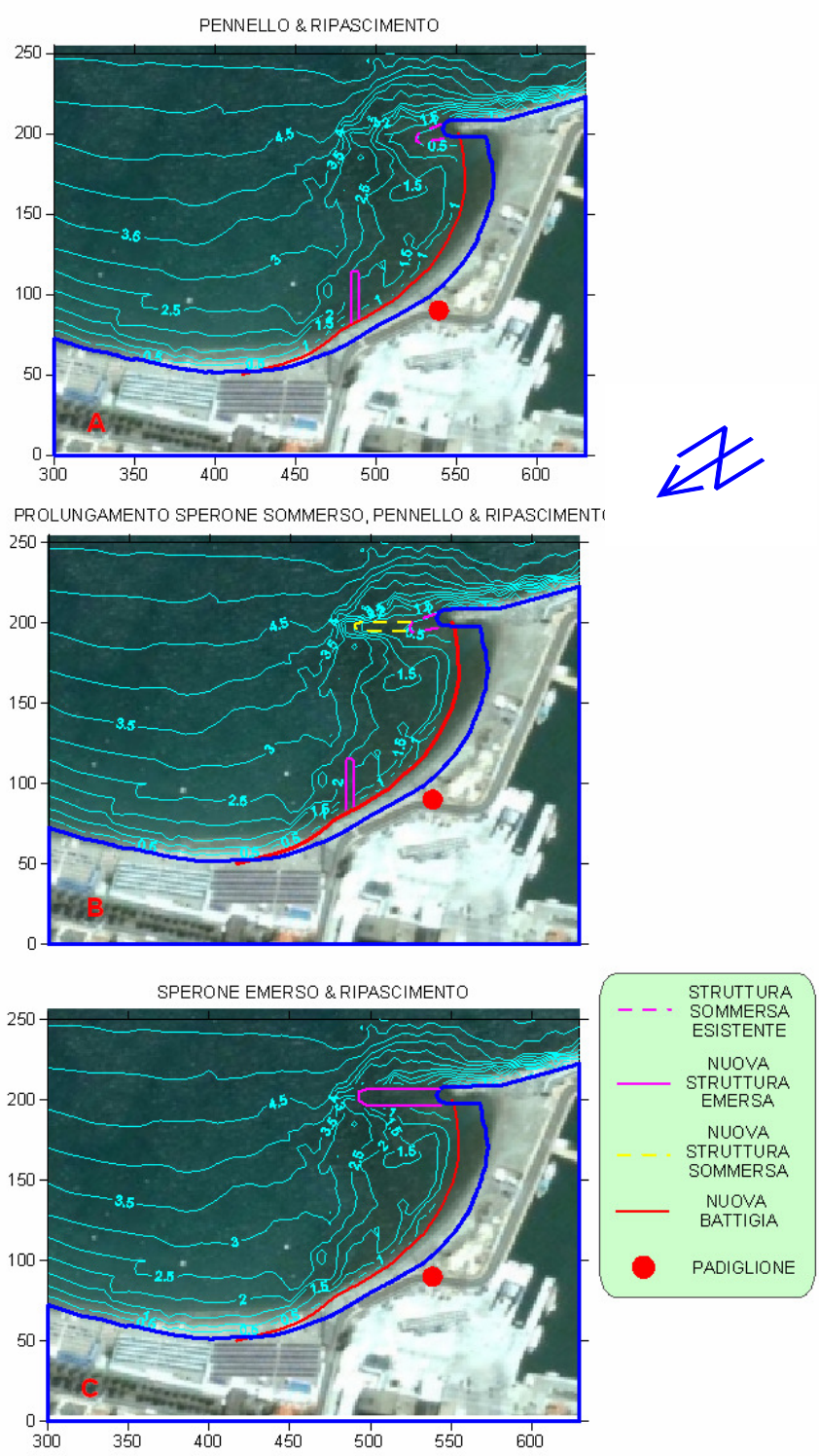


FIG. 2.2 - TRE SCENARI DI INTERVENTO SIMULATI SULLA BATIMETRIA REALE (DA RILIEVO MULTIBEAM 2008)

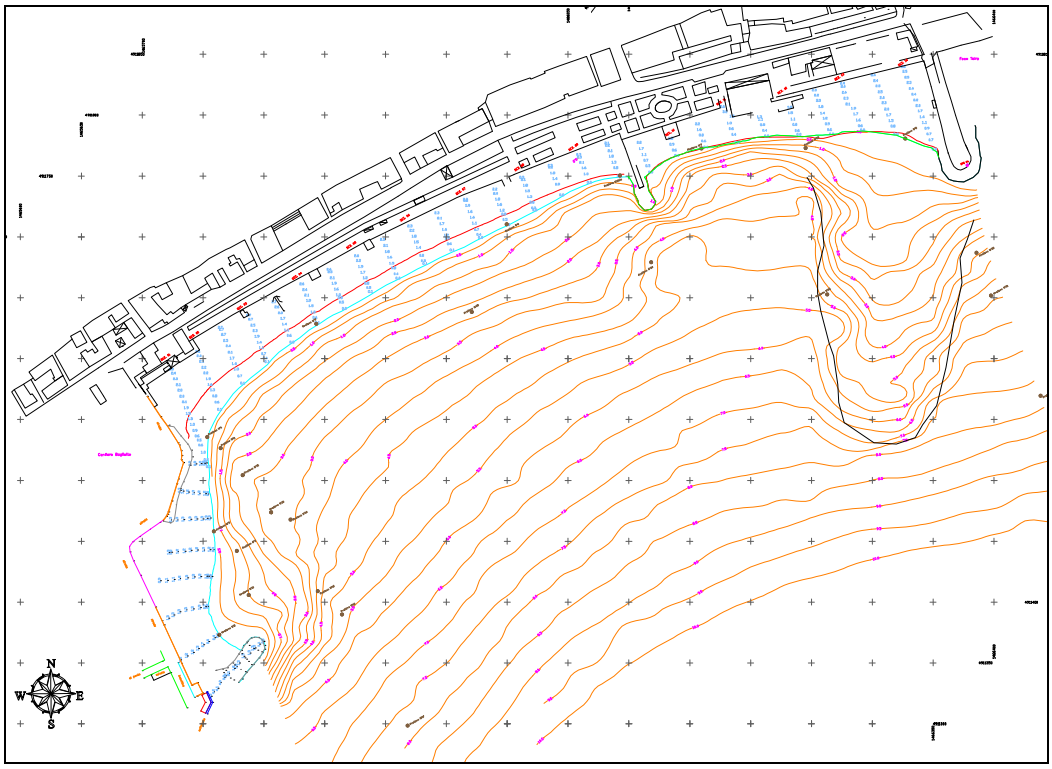


FIG. 3.1 – LITORALE DI VARAZZE RILIEVO BATIMETRICO 2007

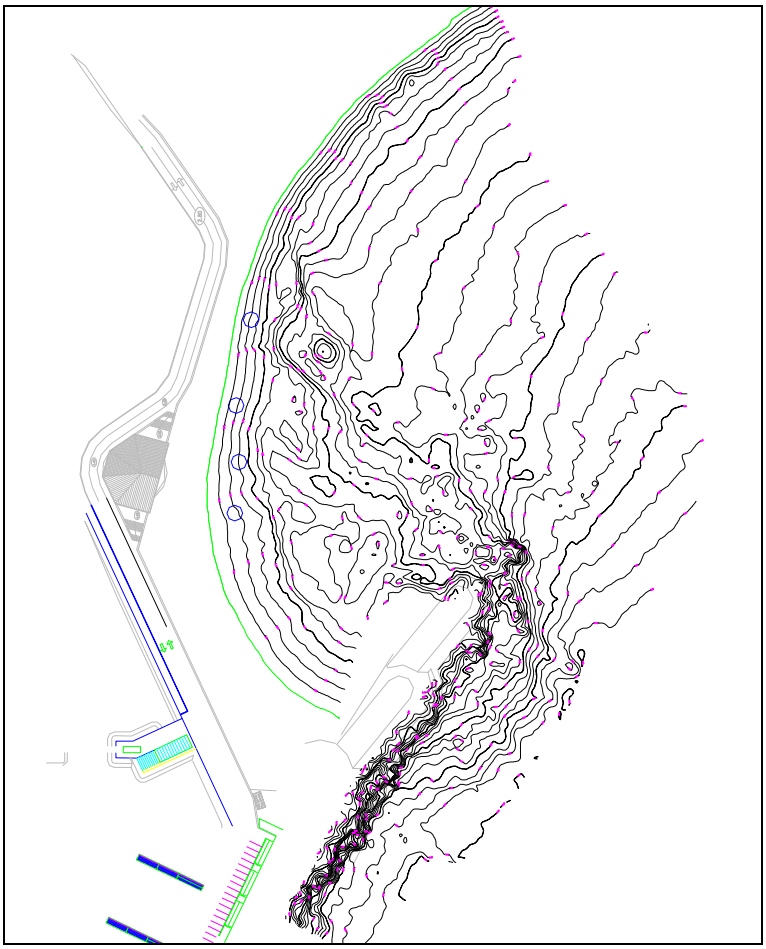


FIG. 3.2 – RILIEVO BATIMETRICO DI DETTAGLIO (2008)

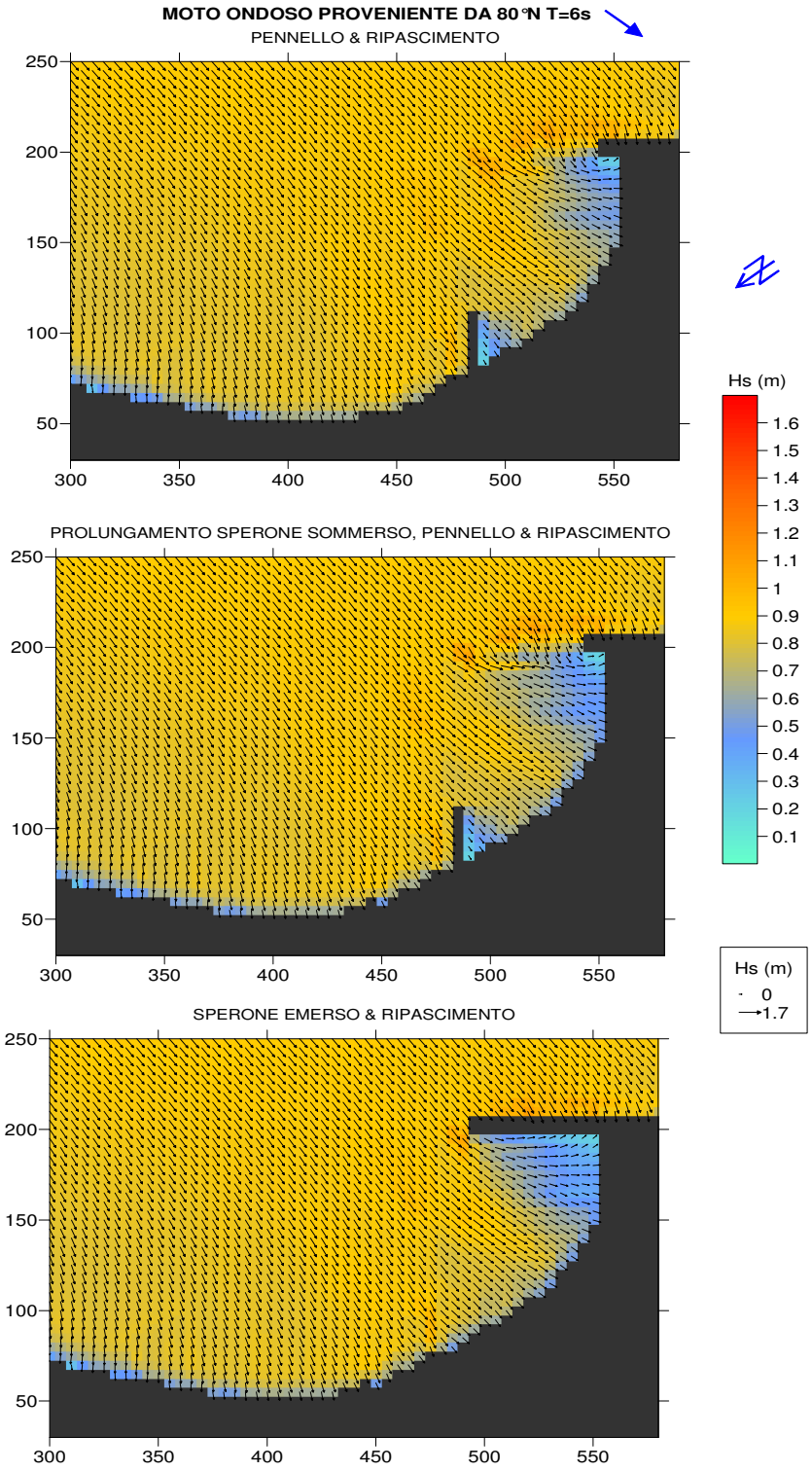


FIG. 4.1 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 80°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

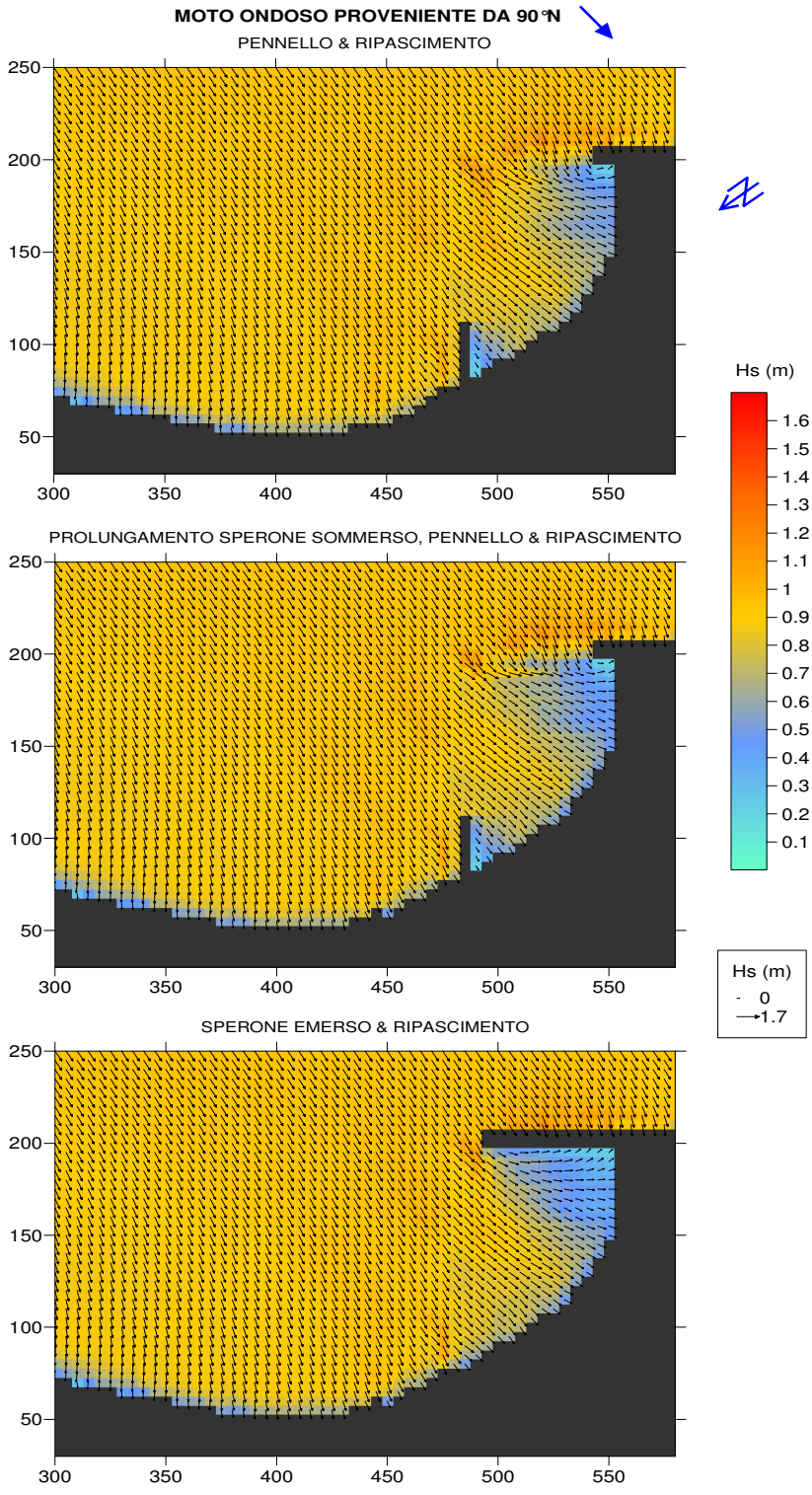


FIG. 4.2 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 90°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

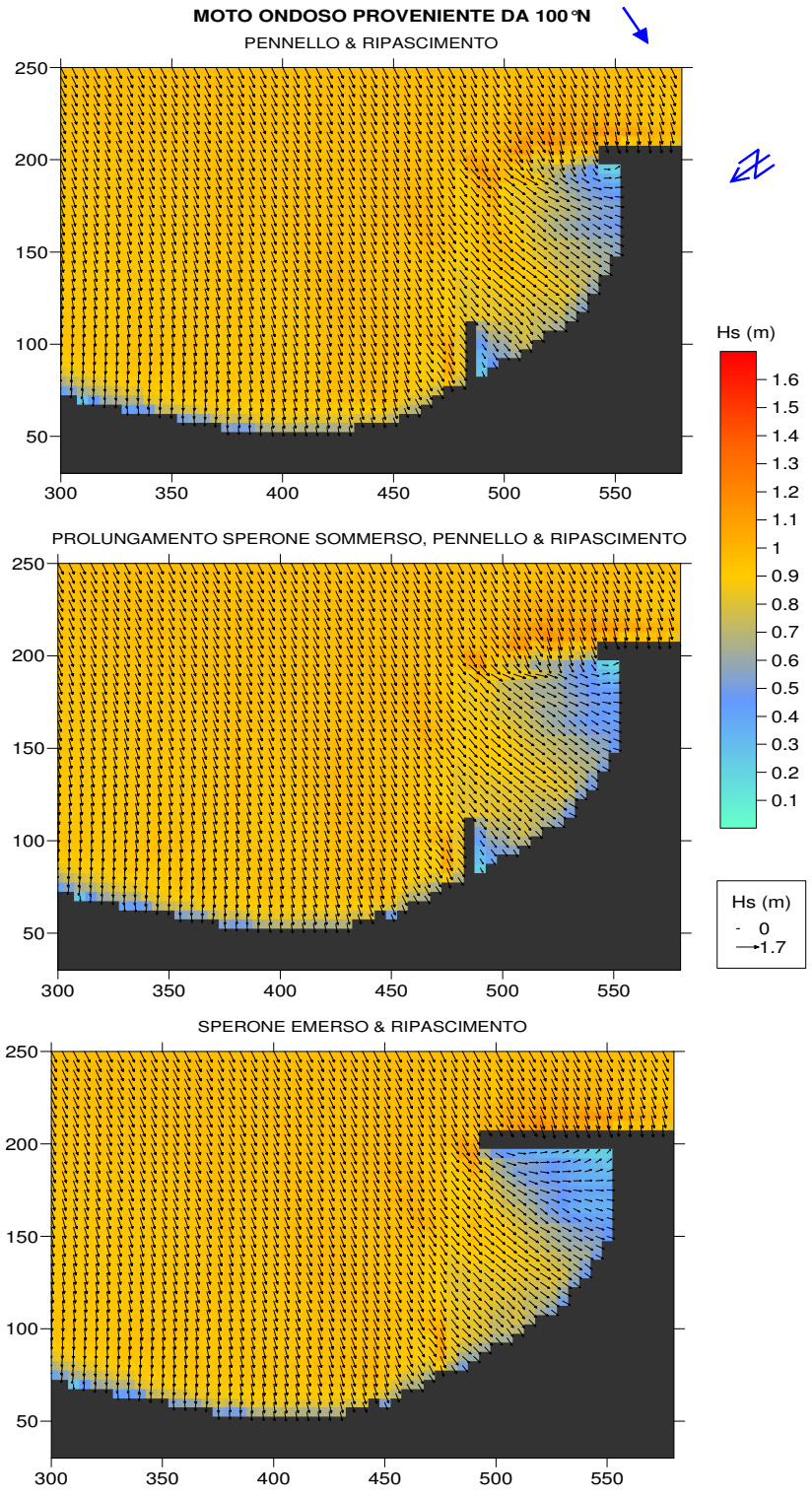


FIG. 4.3 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 100 °N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

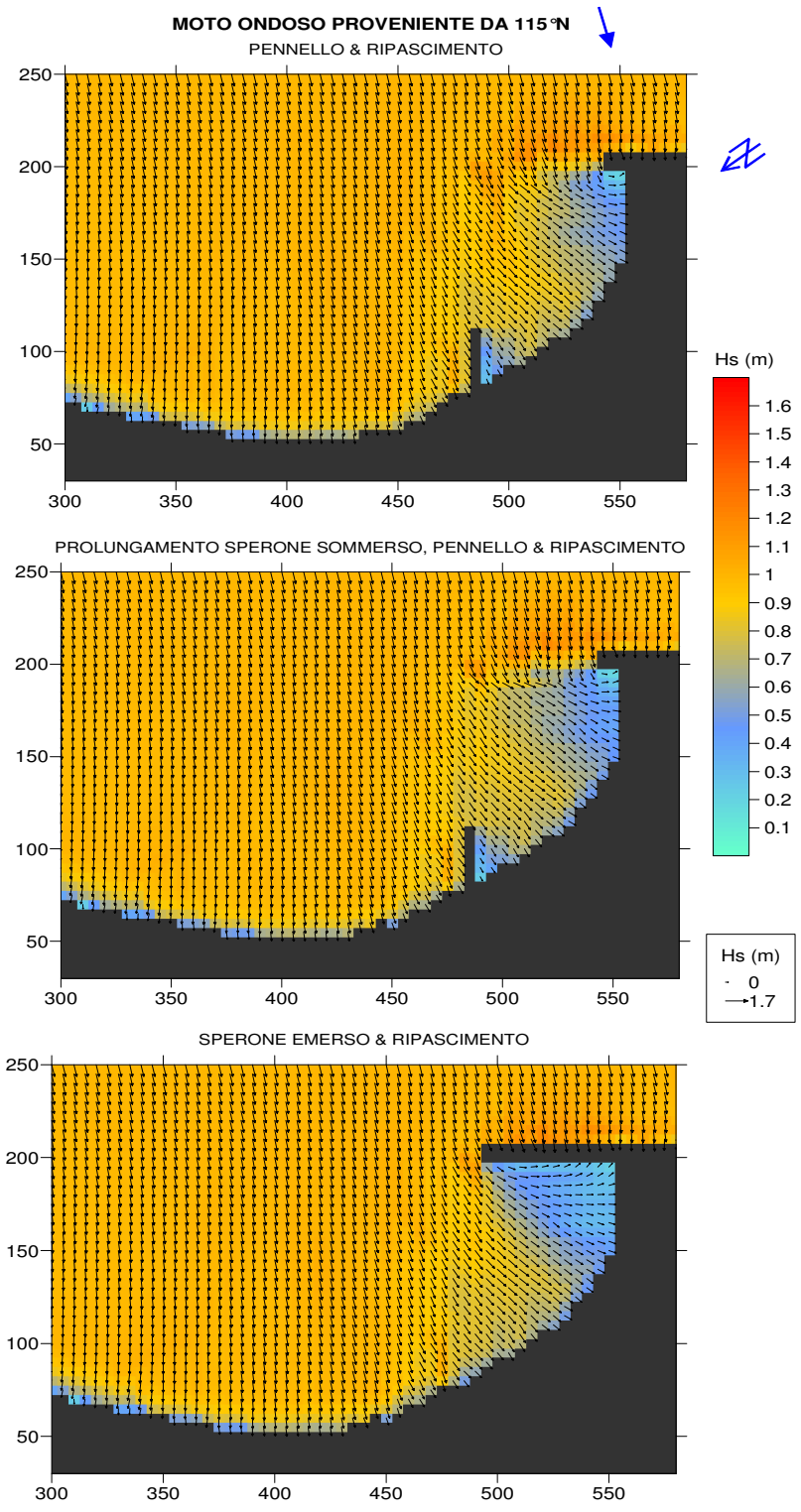


FIG. 4.4 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 115°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

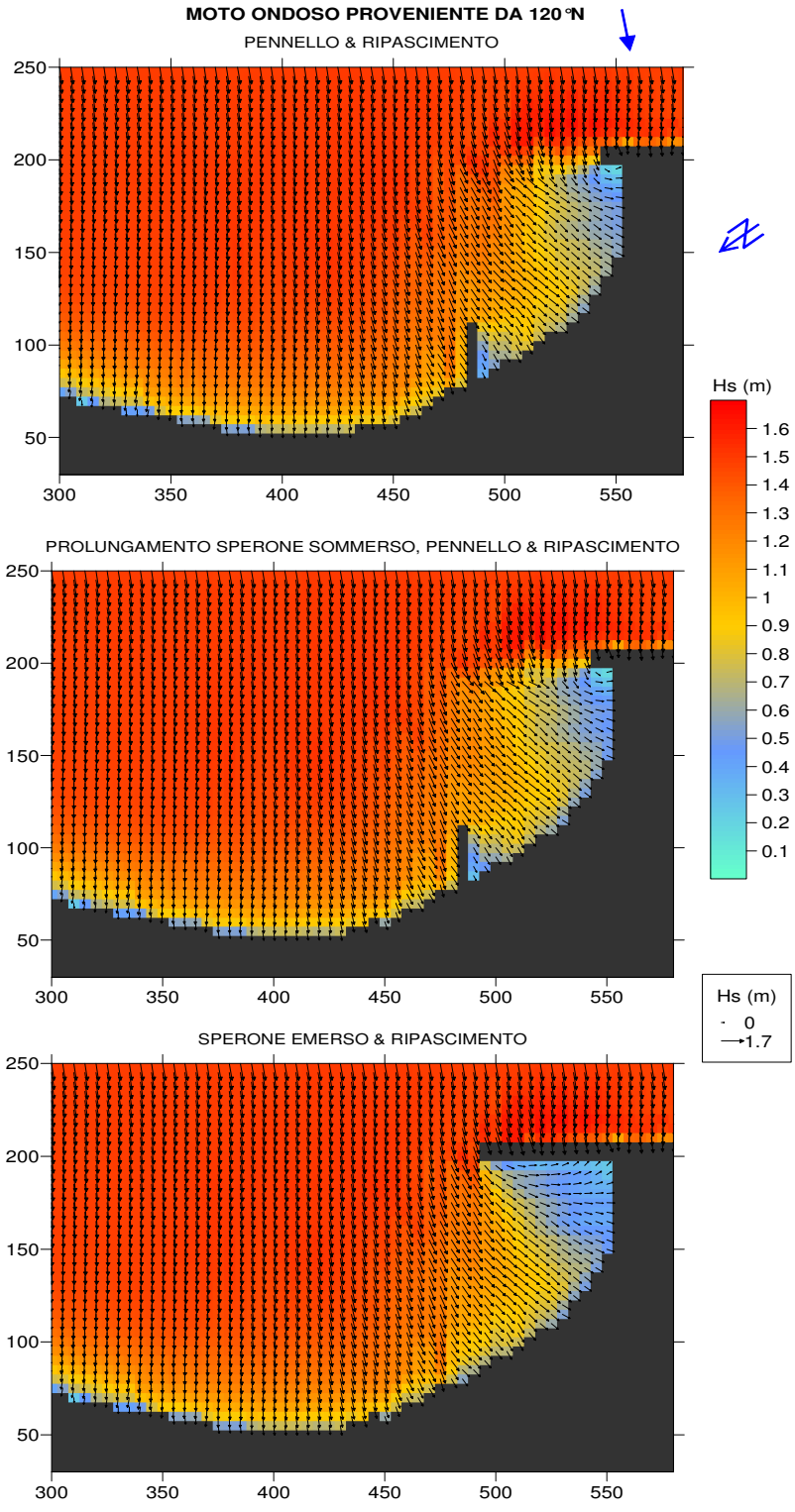


FIG. 4.5 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 120°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

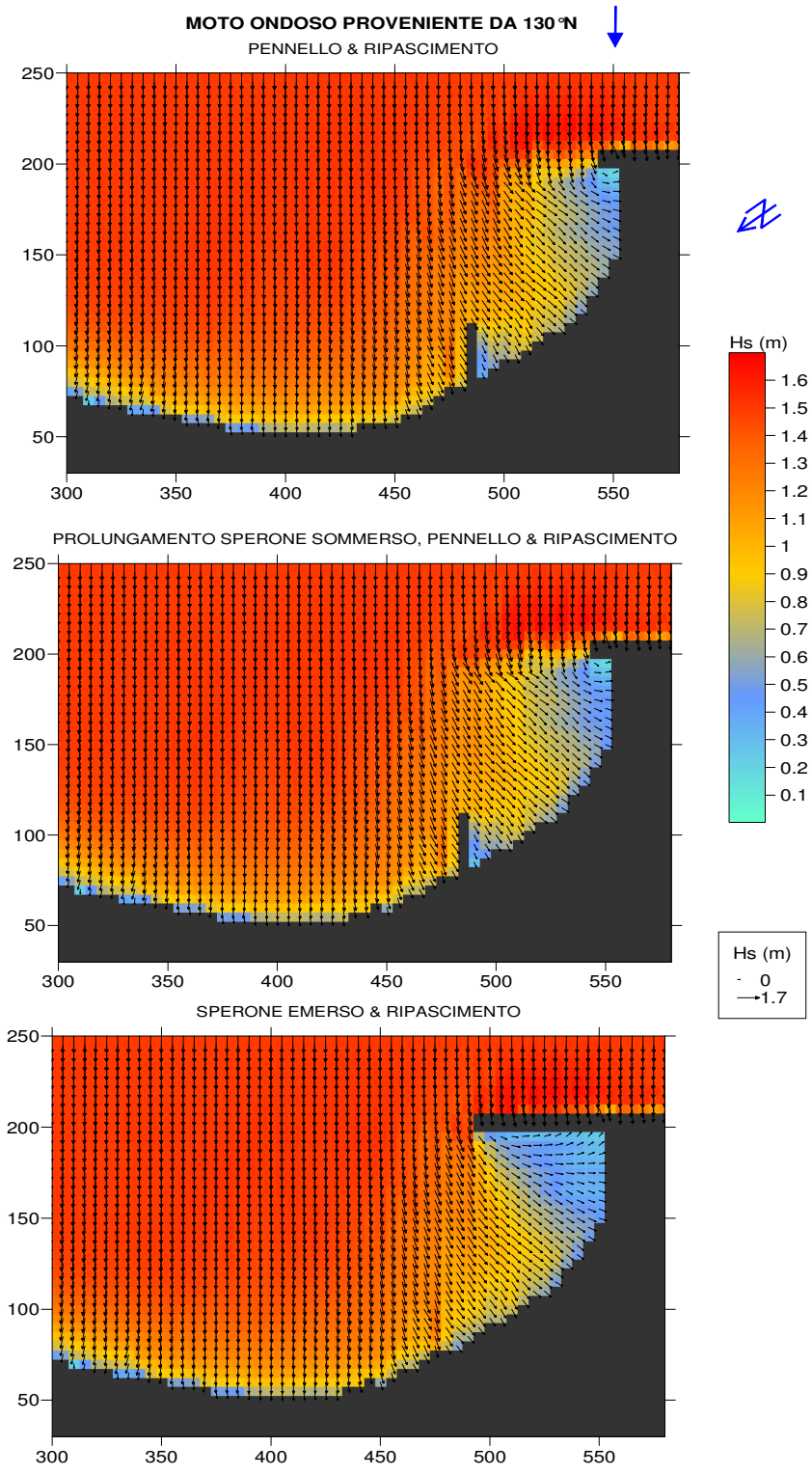


FIG. 4.6 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 130°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

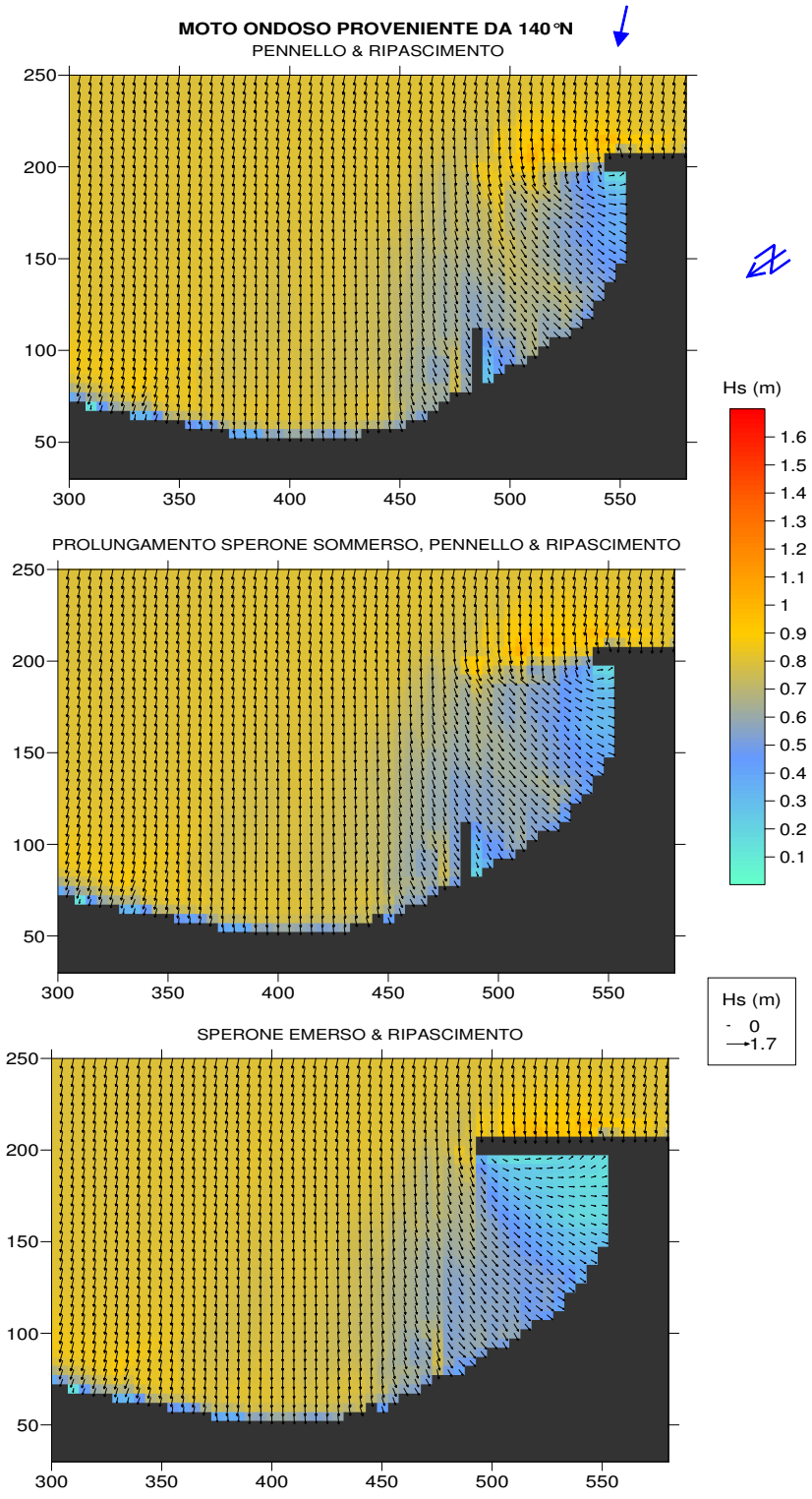


FIG. 4.7 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 140°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

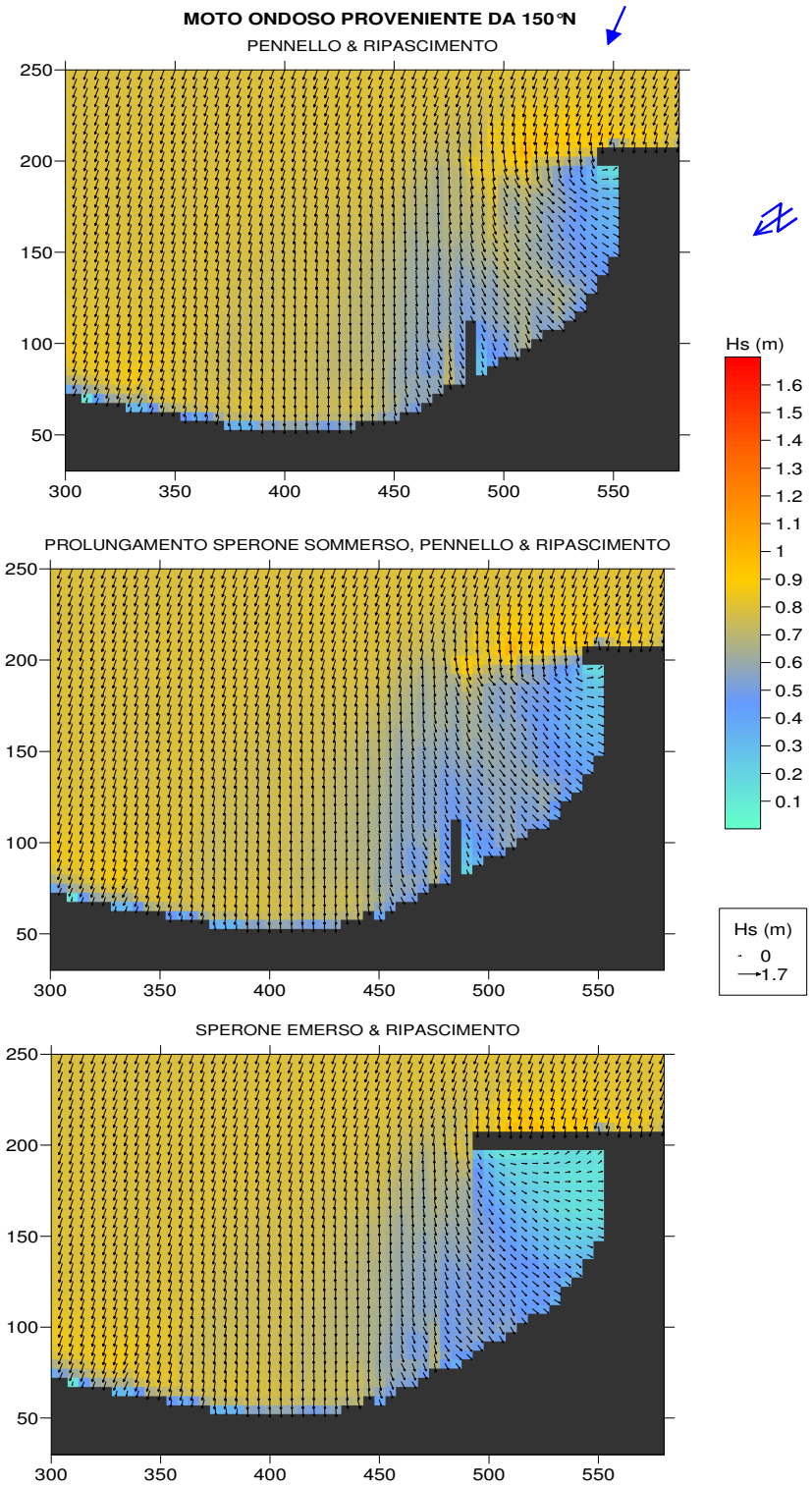


FIG. 4.8 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 0.8 m PROVENIENTE DA 150°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

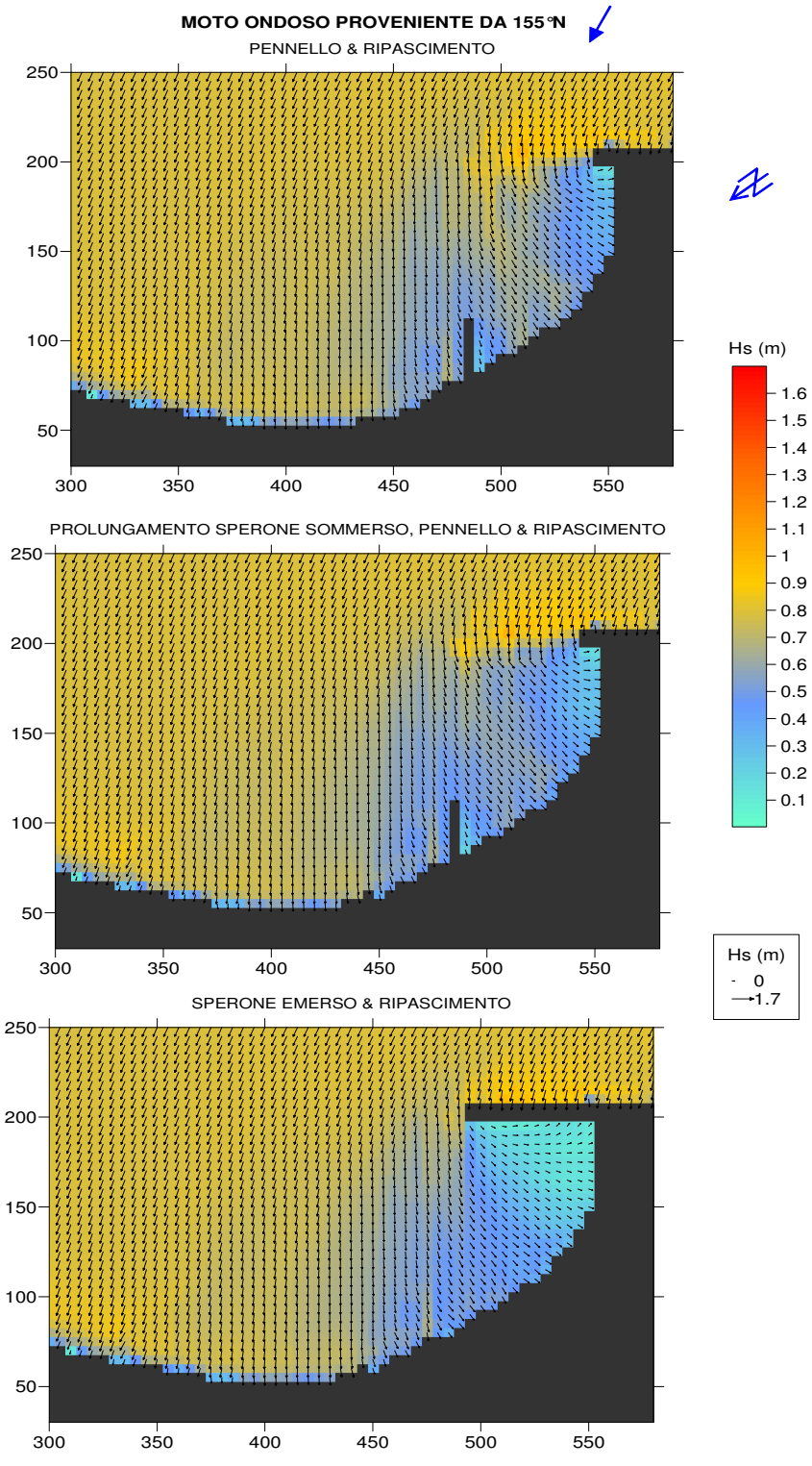


FIG. 4.9 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 0.8 m PROVENIENTE DA 155°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

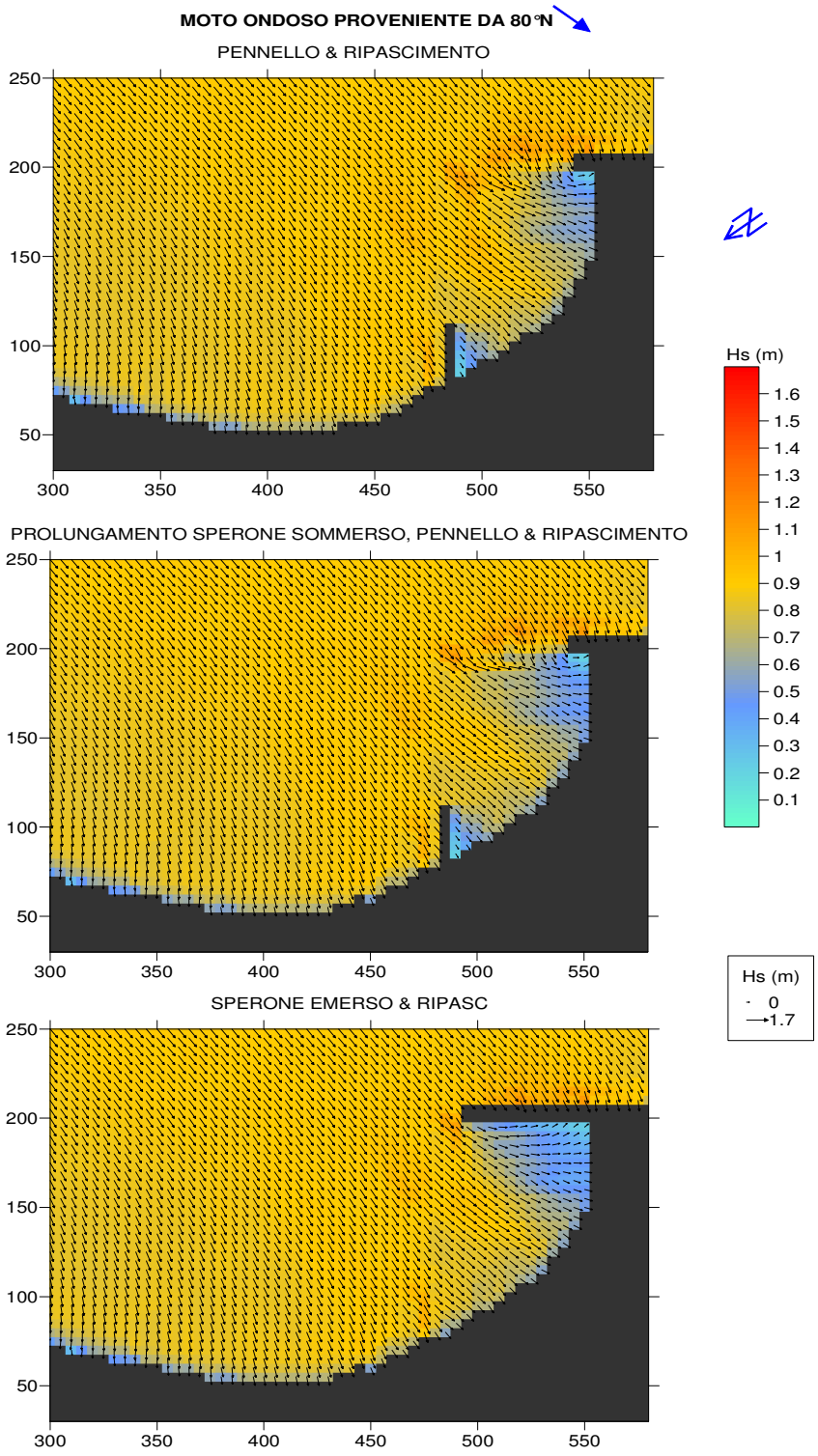


FIG. 4.10 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 80°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

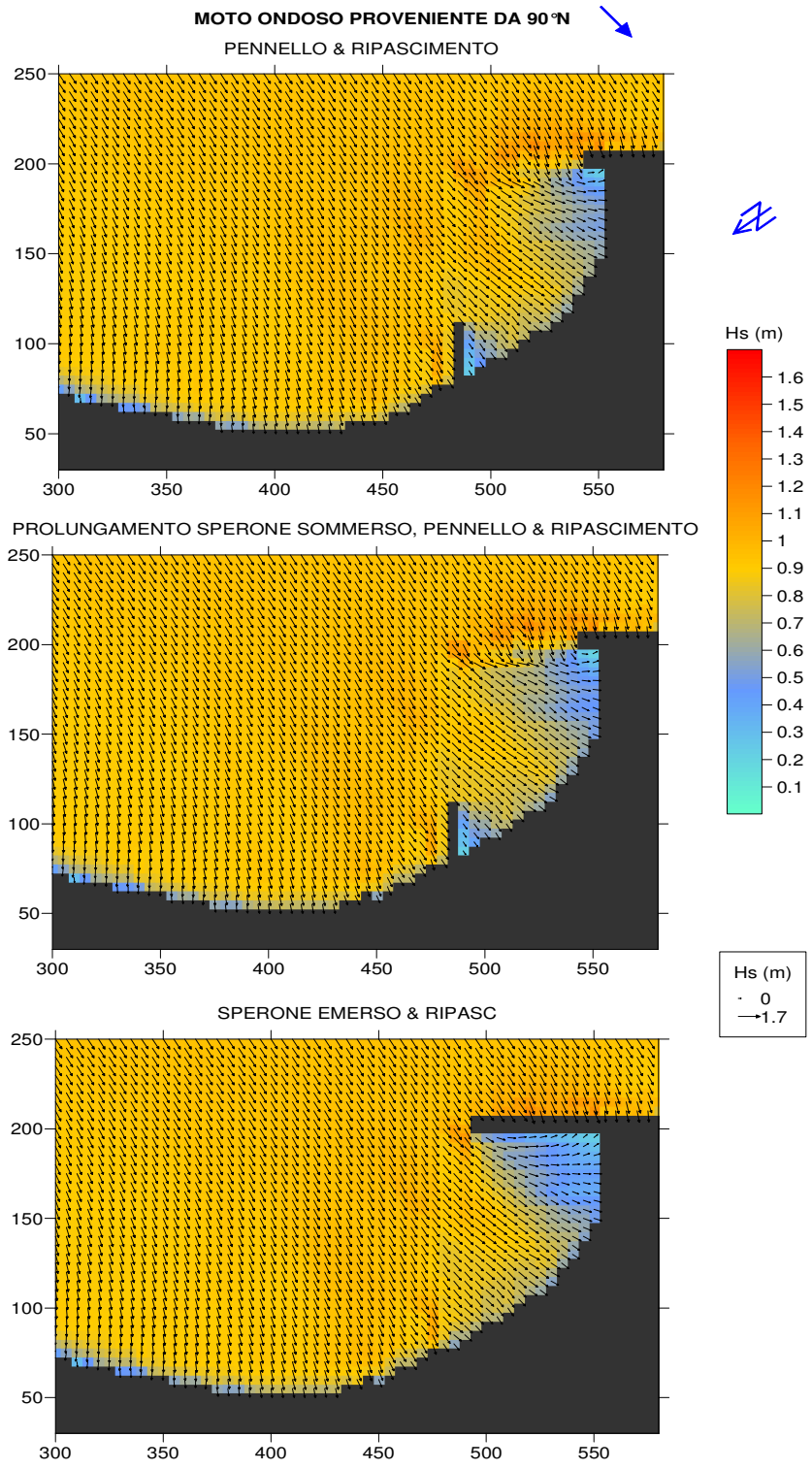


FIG. 4.11 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 90°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

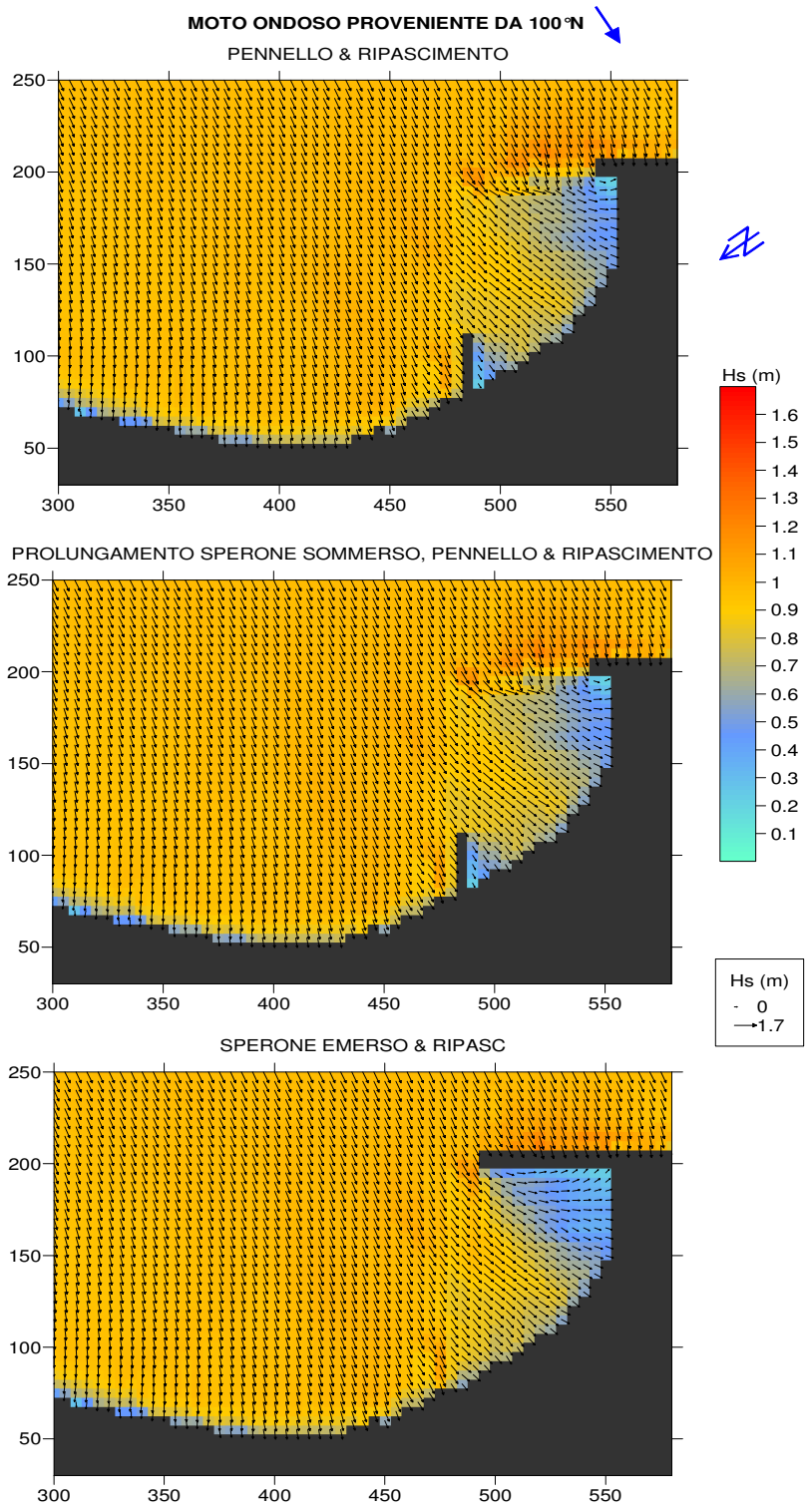


FIG. 4.12 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 100°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

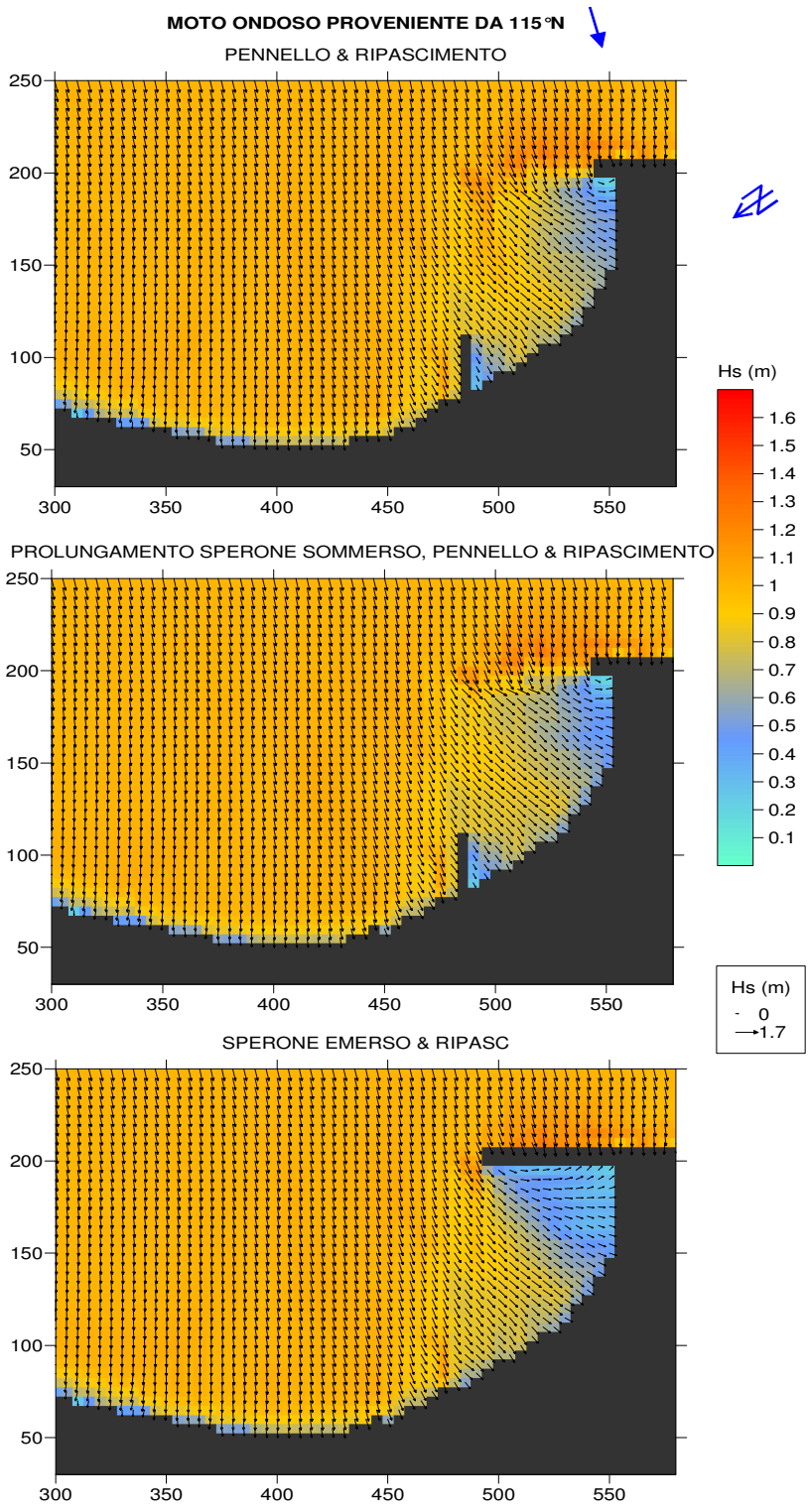


FIG. 4.13 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 115°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

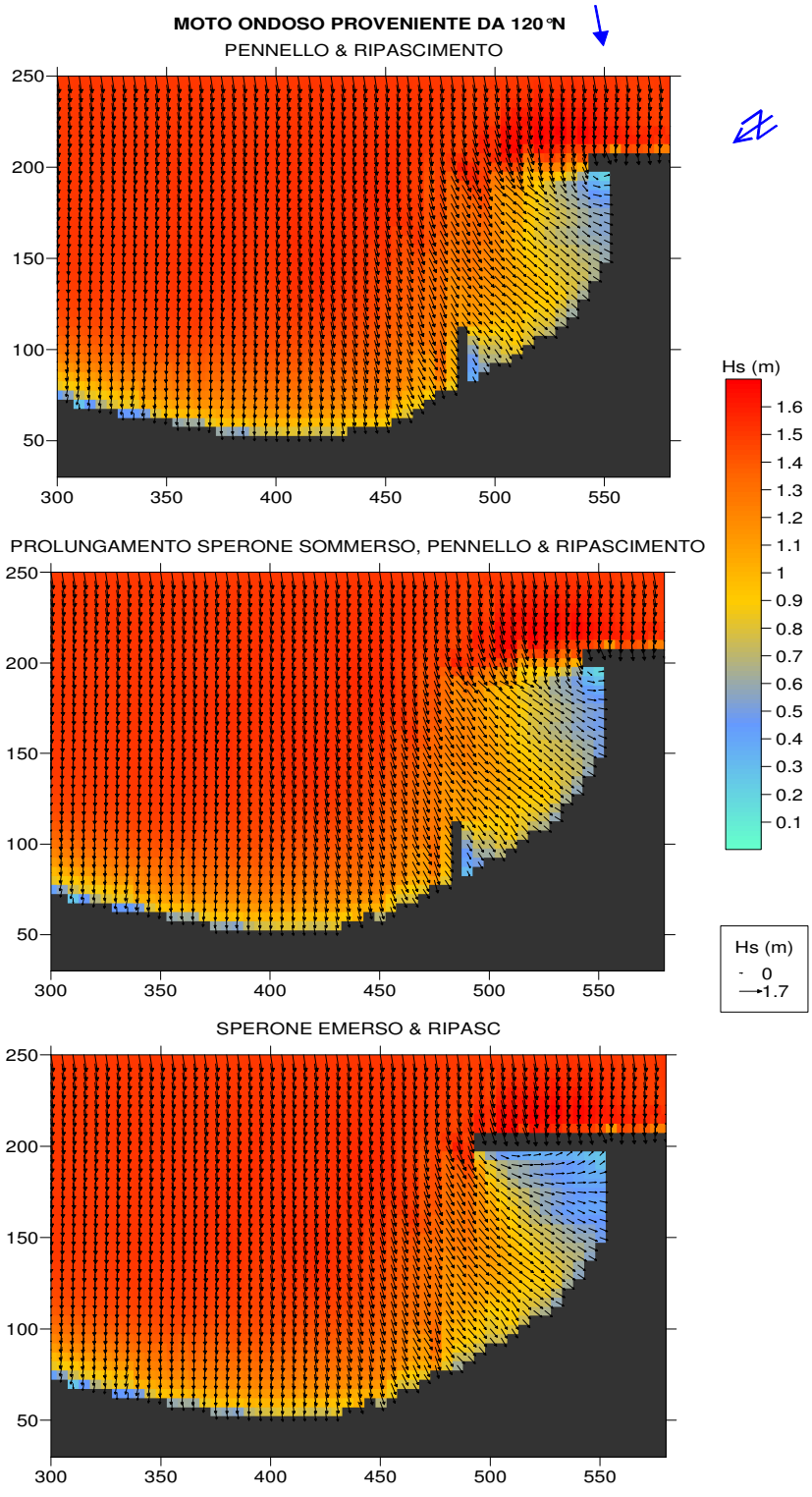


FIG. 4.14 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 120°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

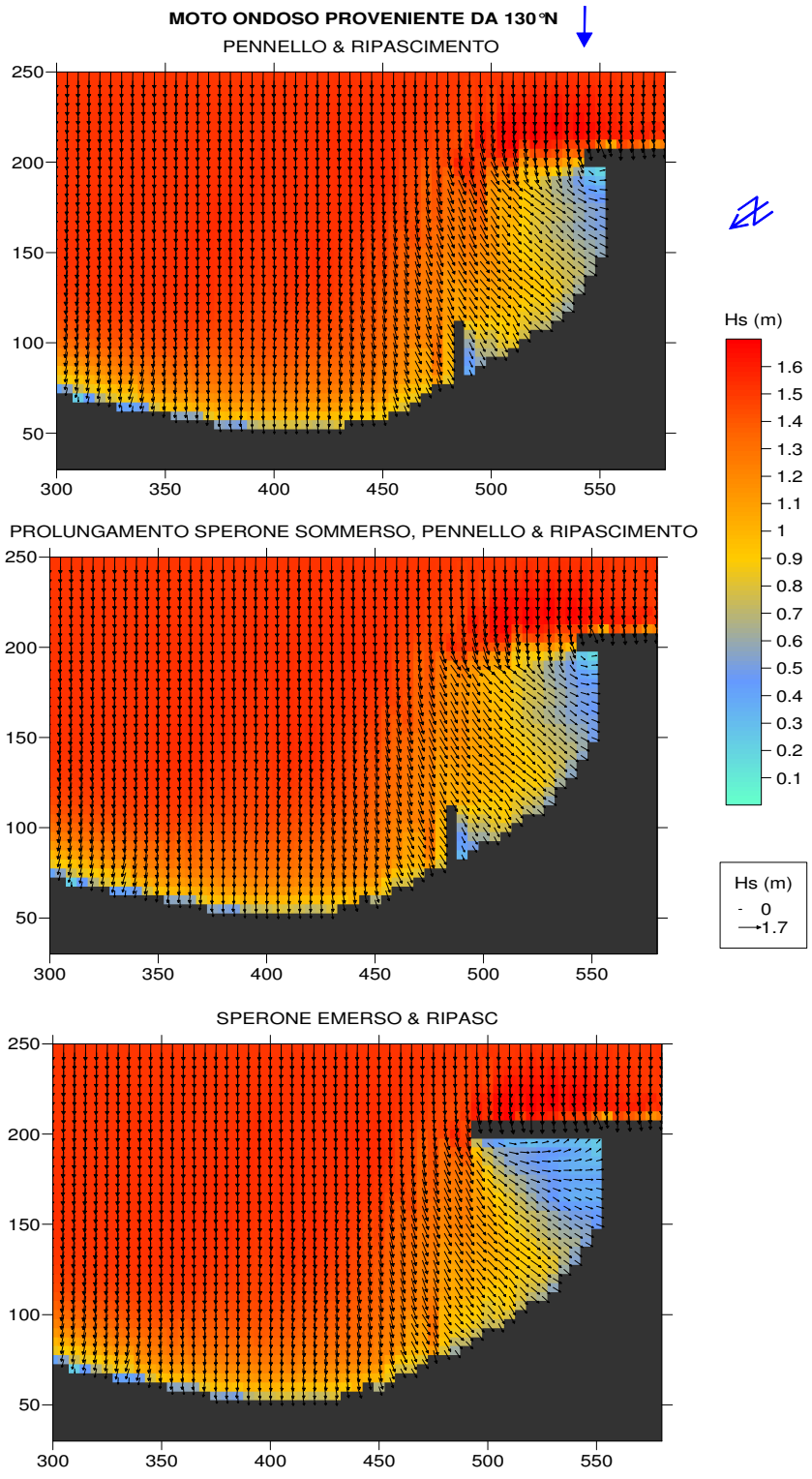


FIG. 4.15 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 130°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

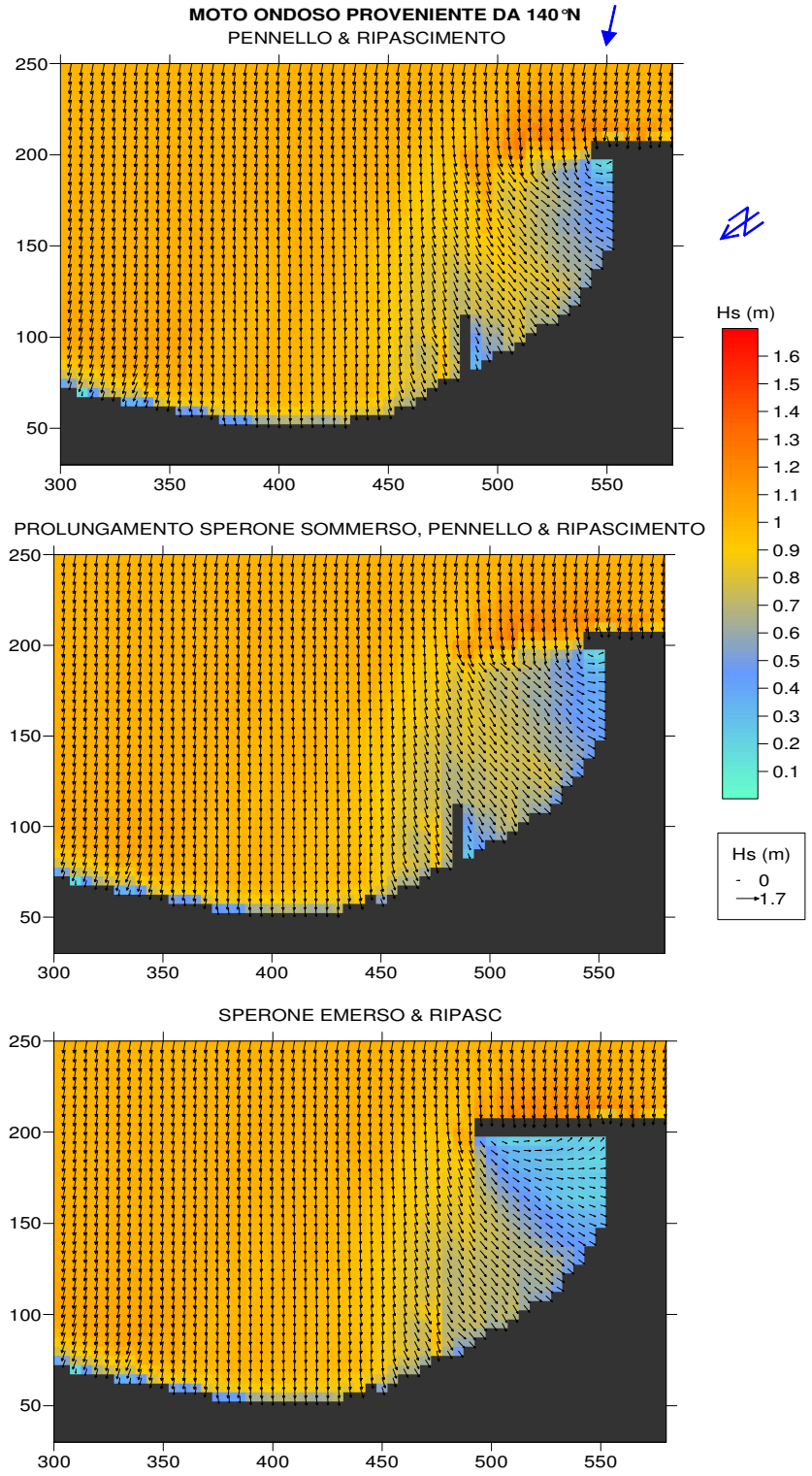


FIG. 4.16 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 140°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

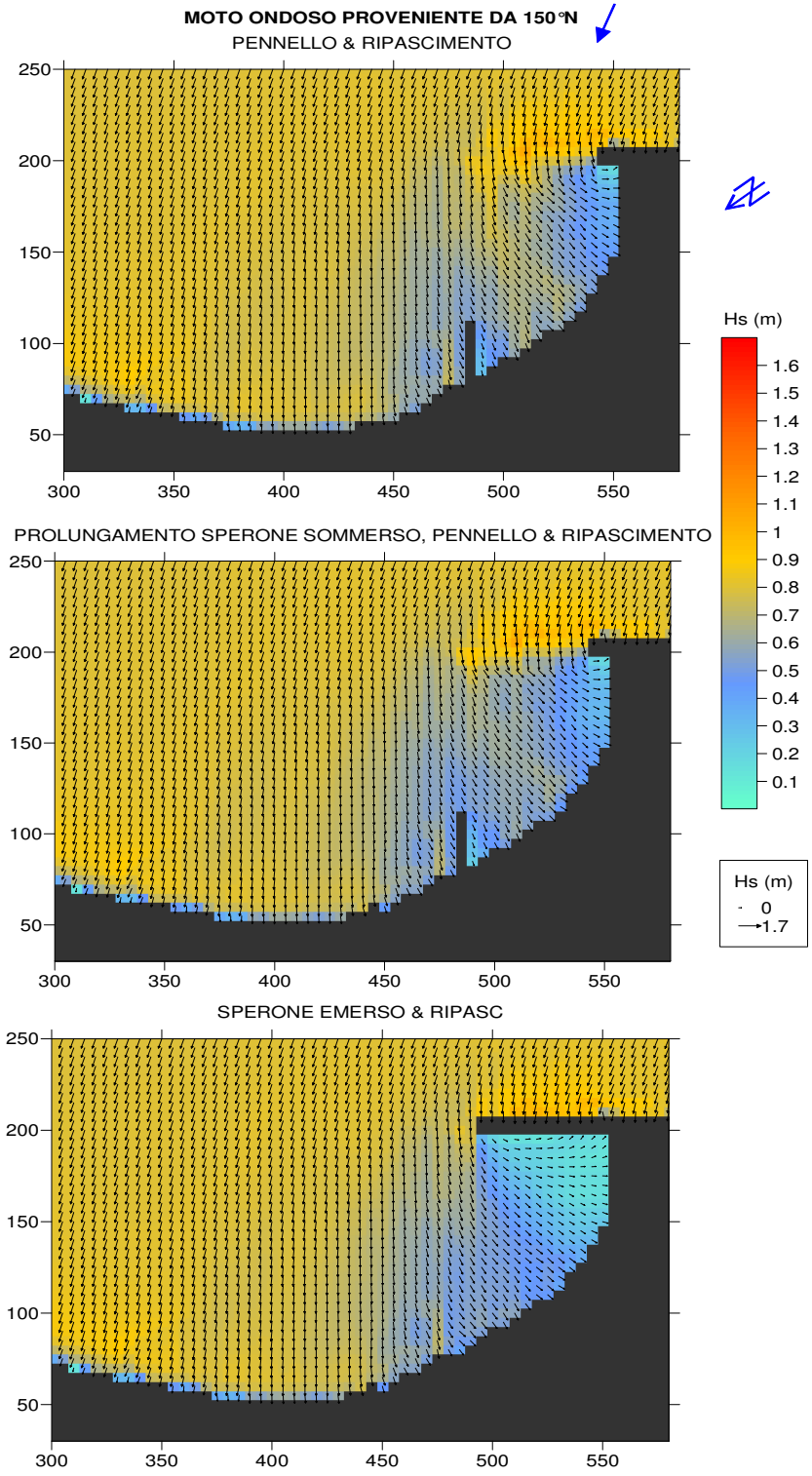


FIG. 4.17 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 150°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

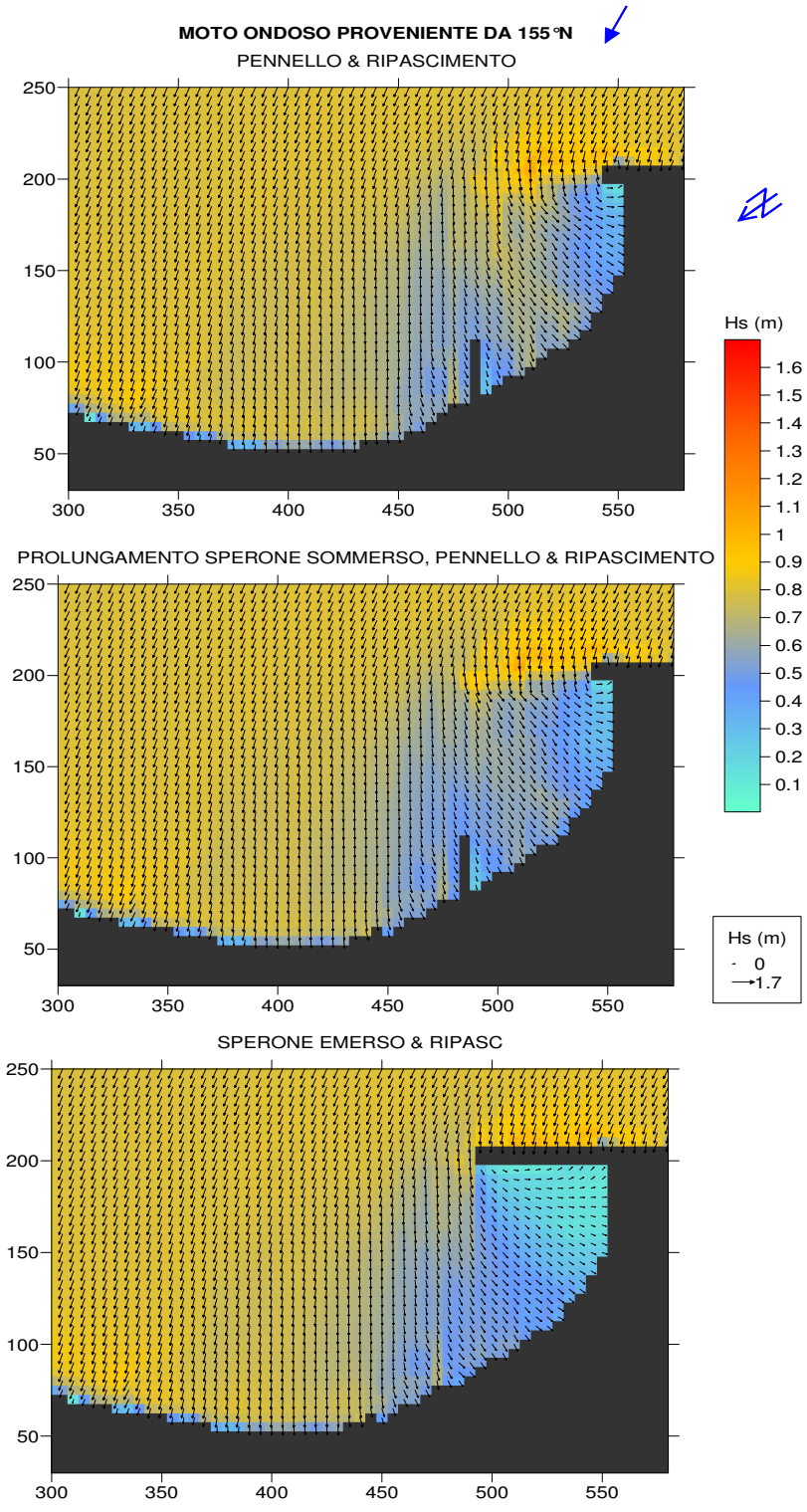


FIG. 4.18 - CAMPO DI MOTO ONDOSO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 155°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

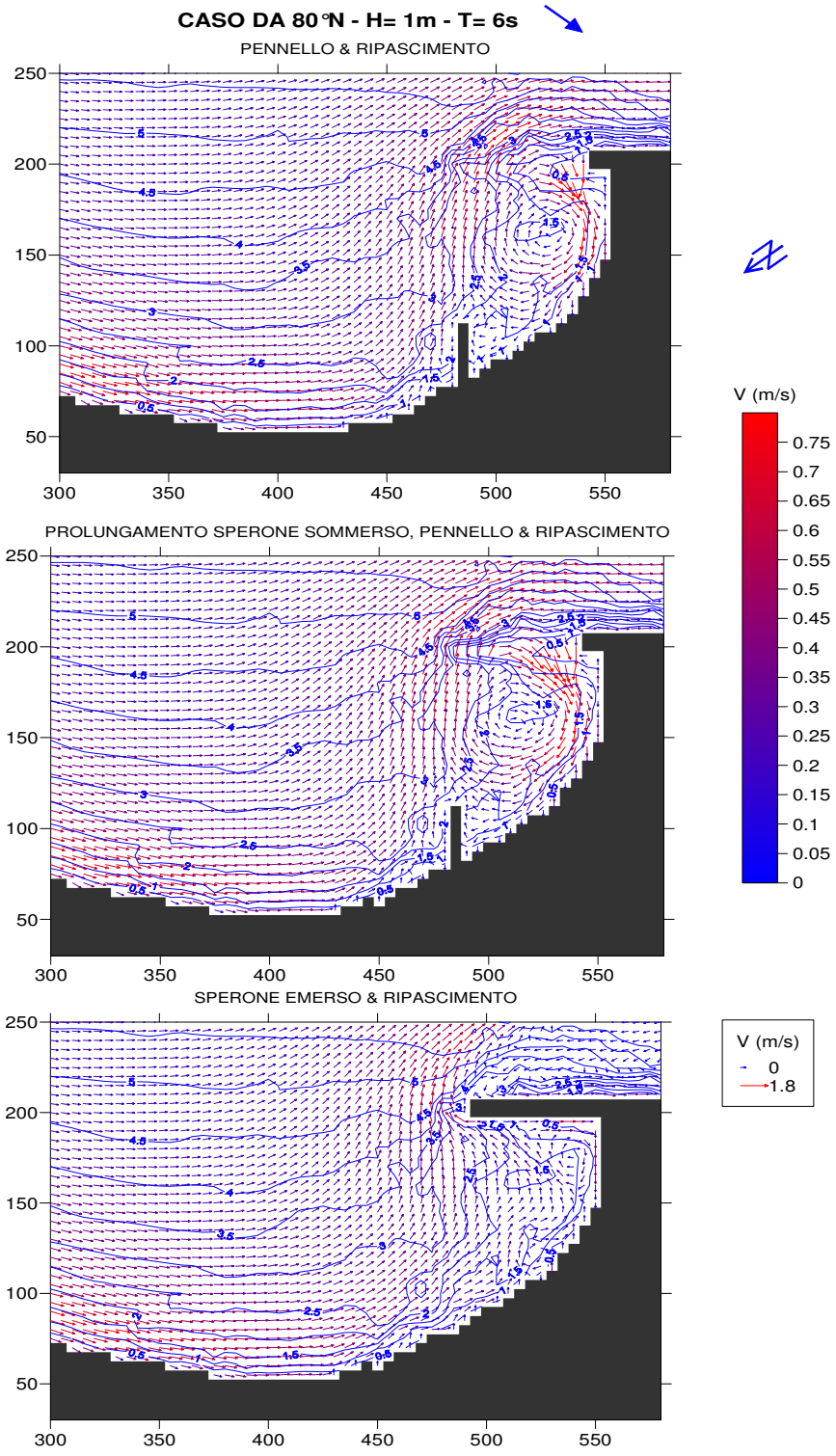


FIG. 6.1 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 80°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

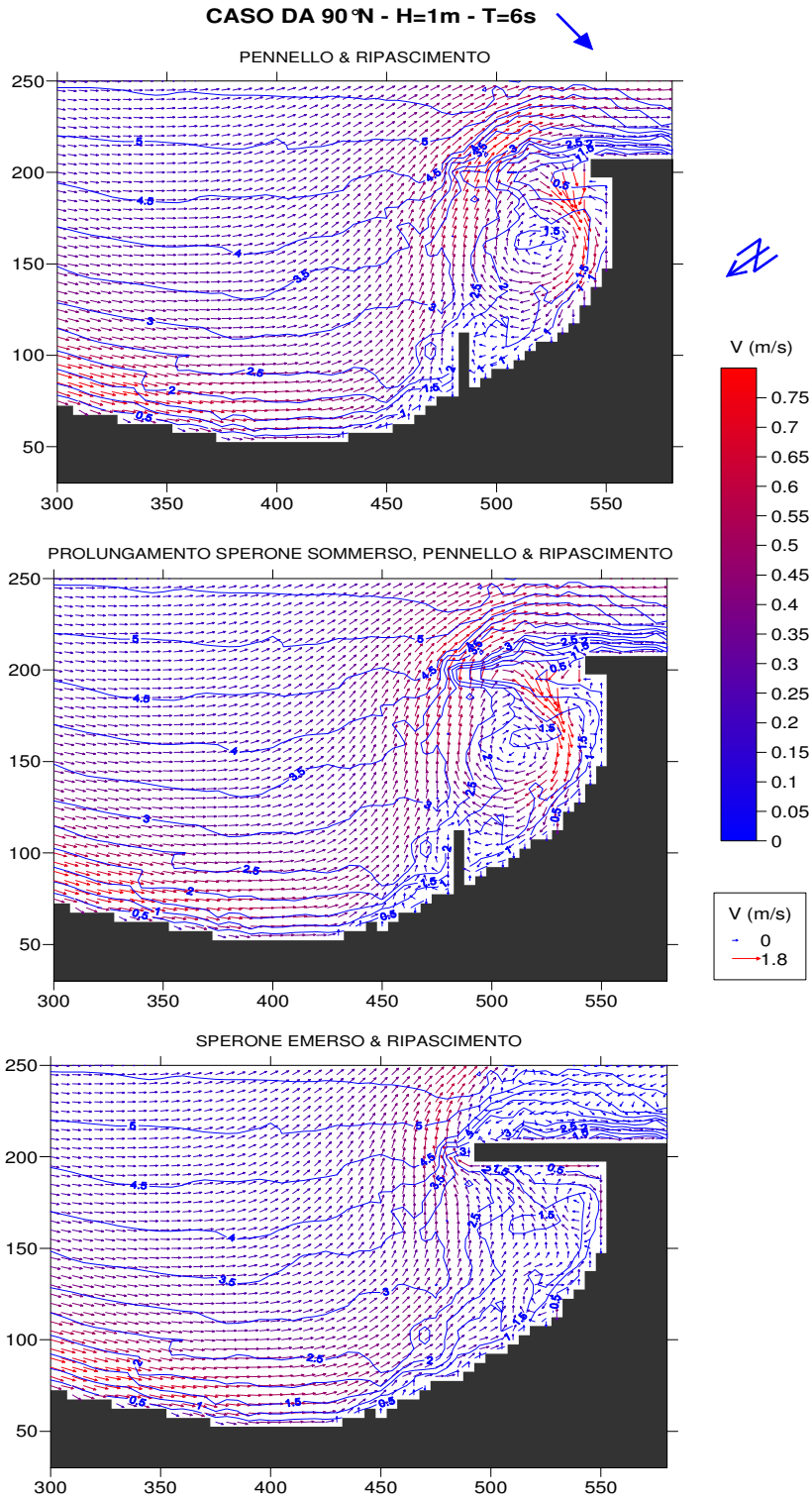


FIG. 6.2 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 90°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

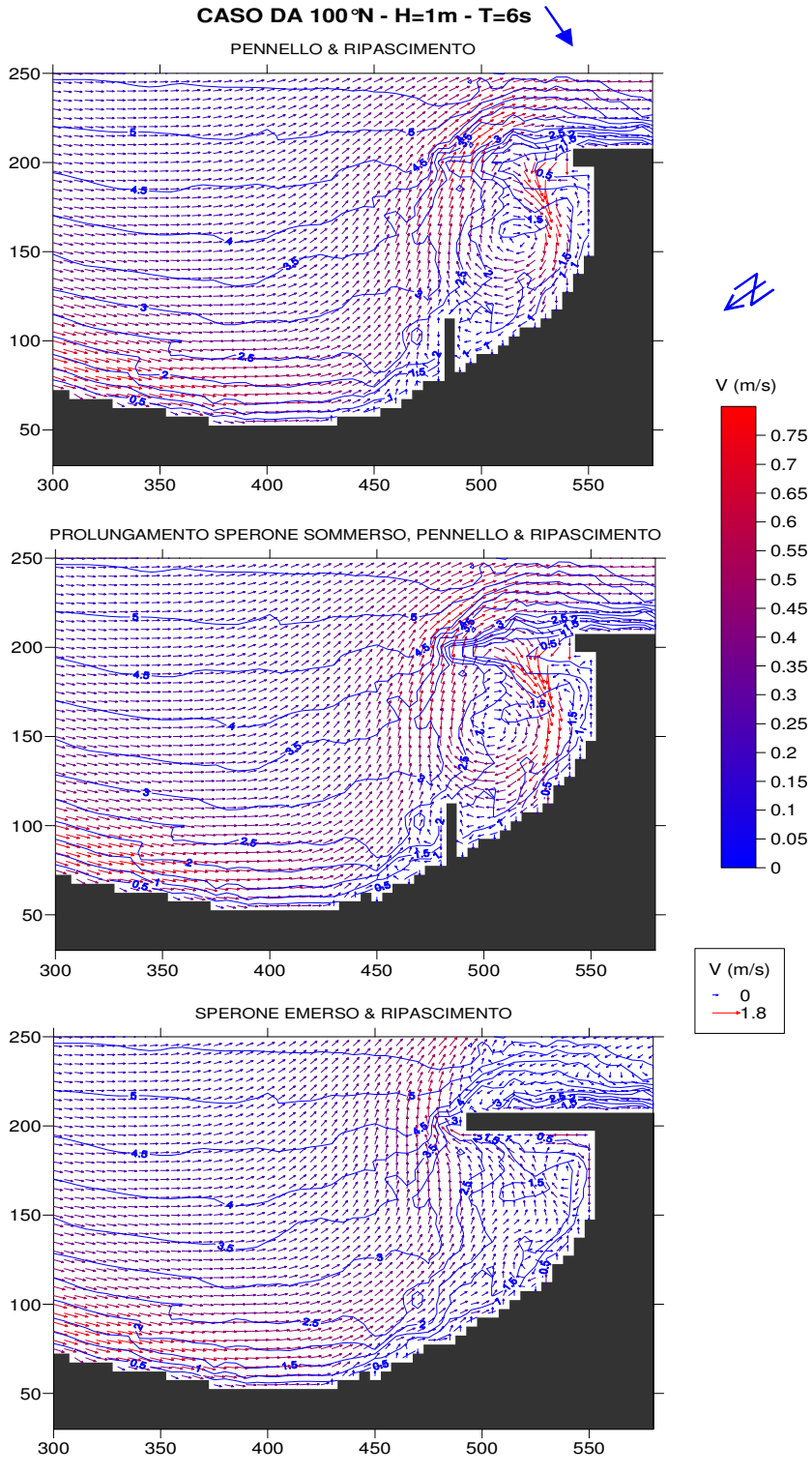


FIG. 6.3 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 100°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

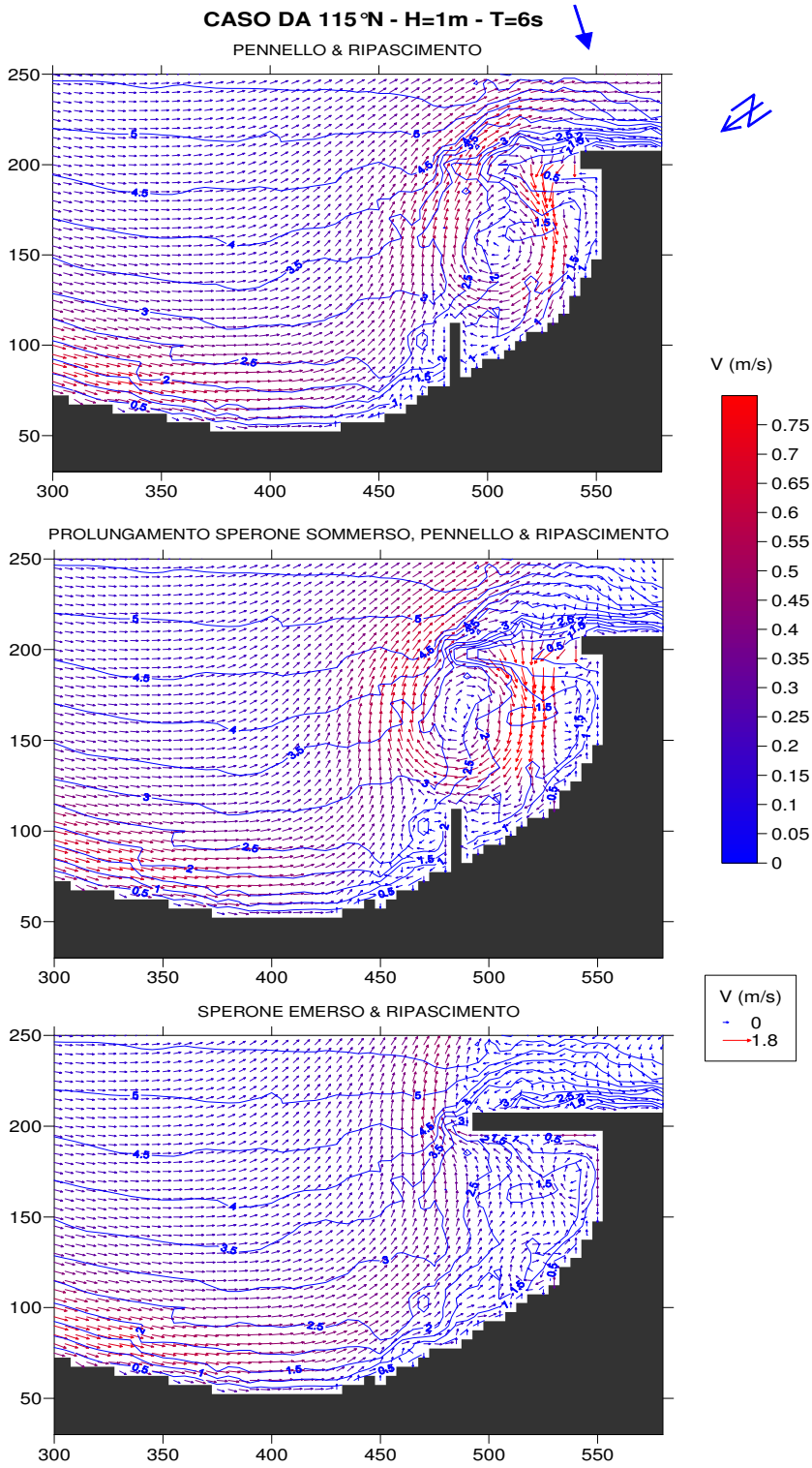


FIG. 6.4 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 115°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

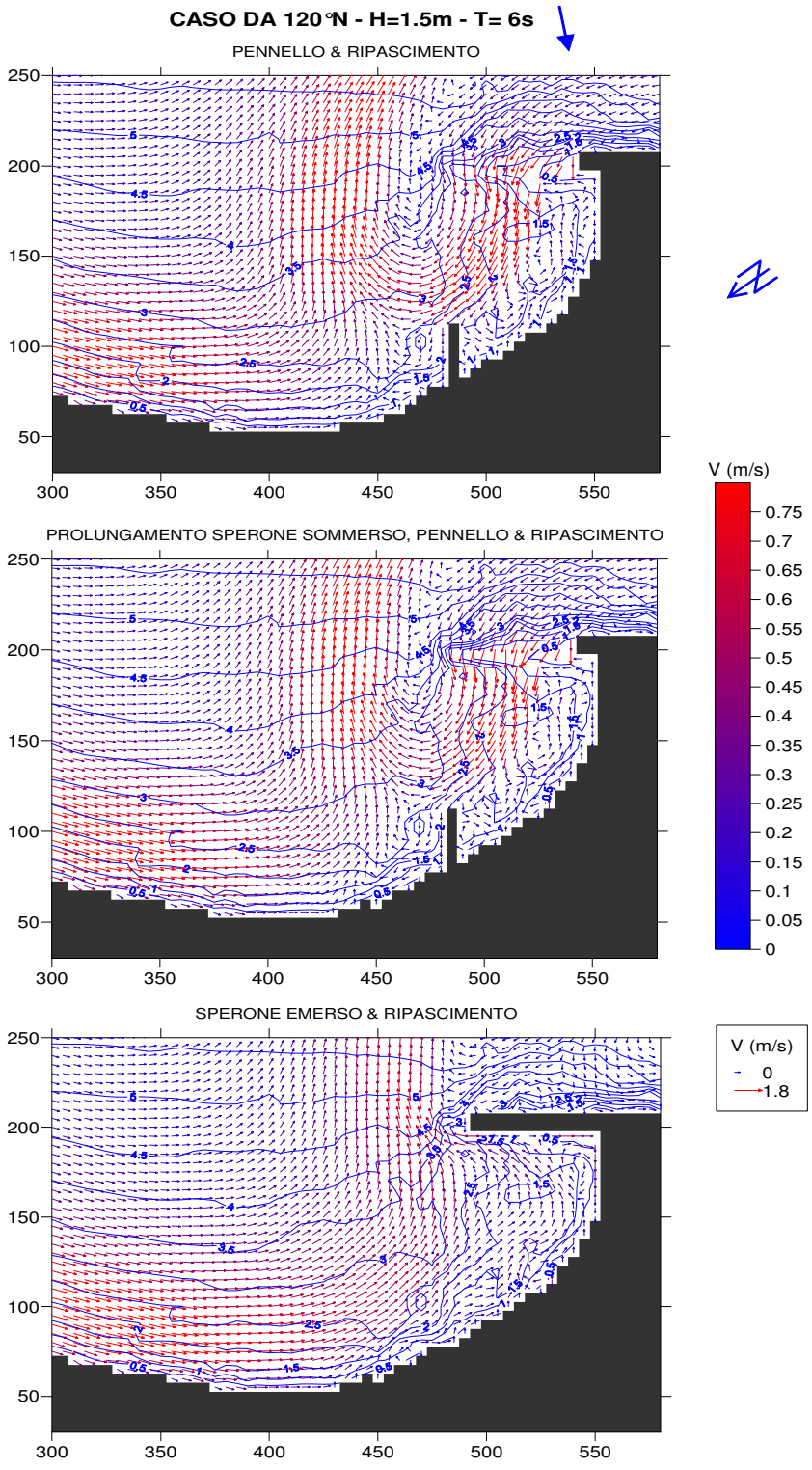


FIG. 6.5 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 120°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

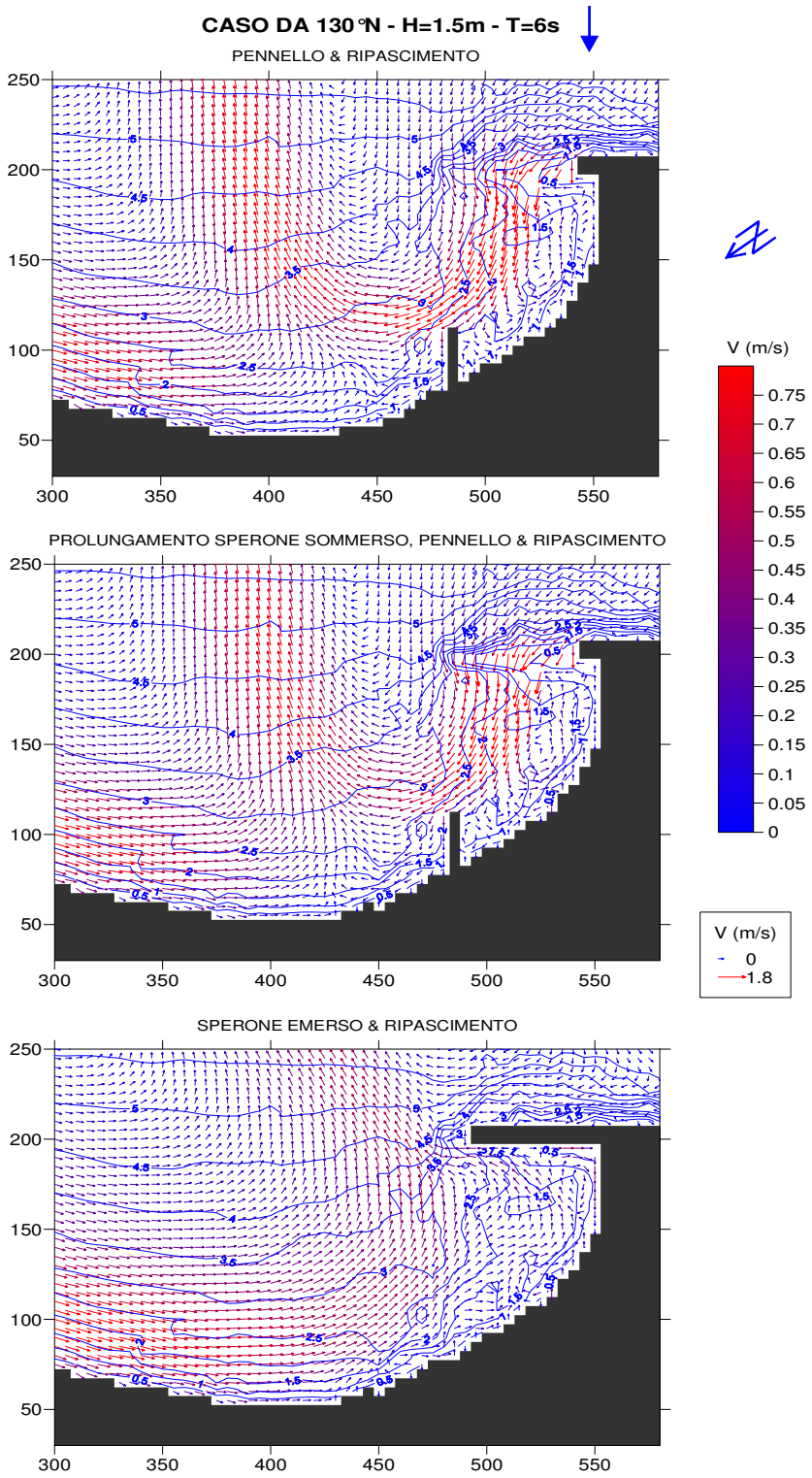


FIG. 6.6 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 130°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

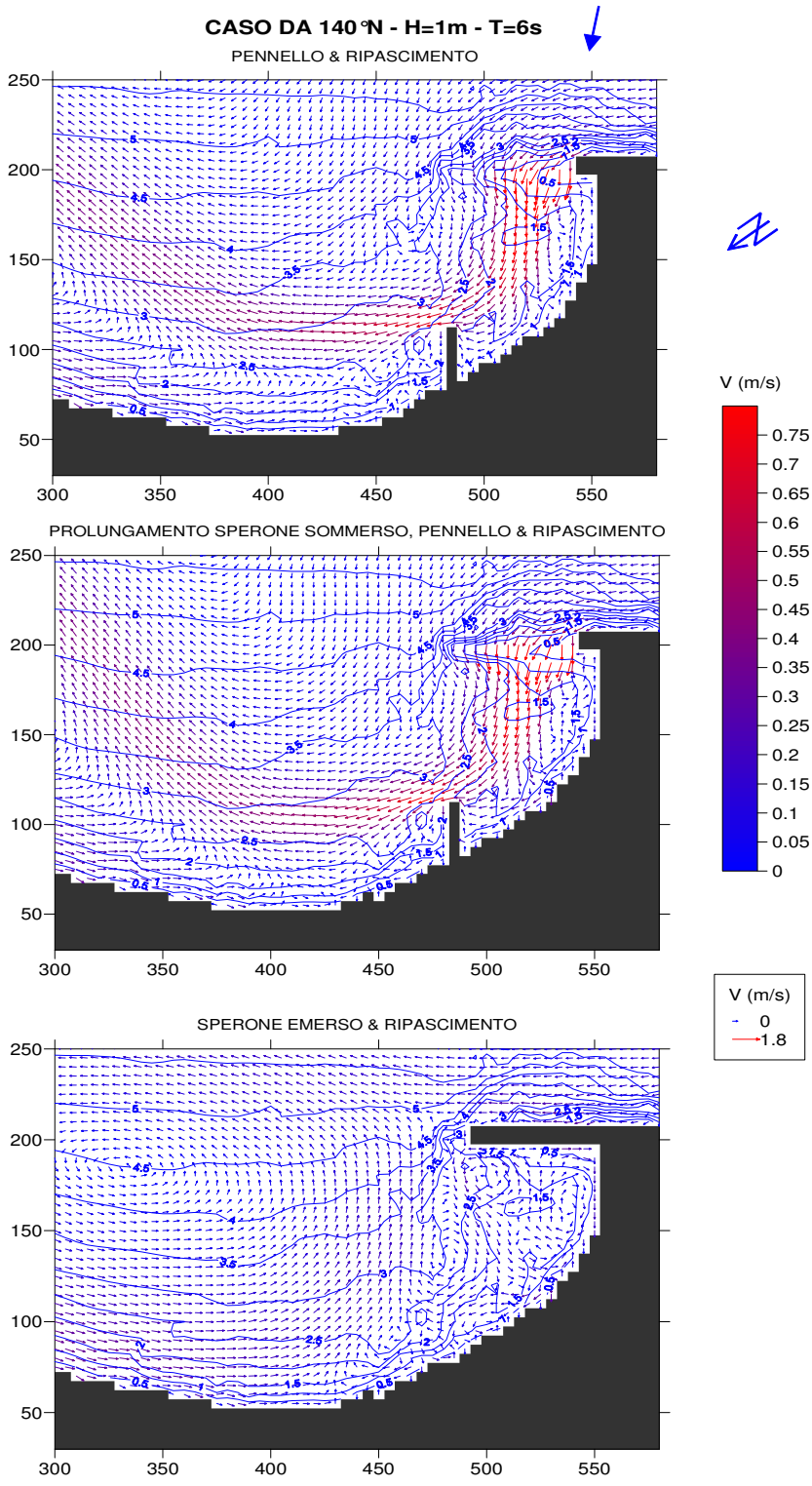


FIG. 6.7 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 140°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

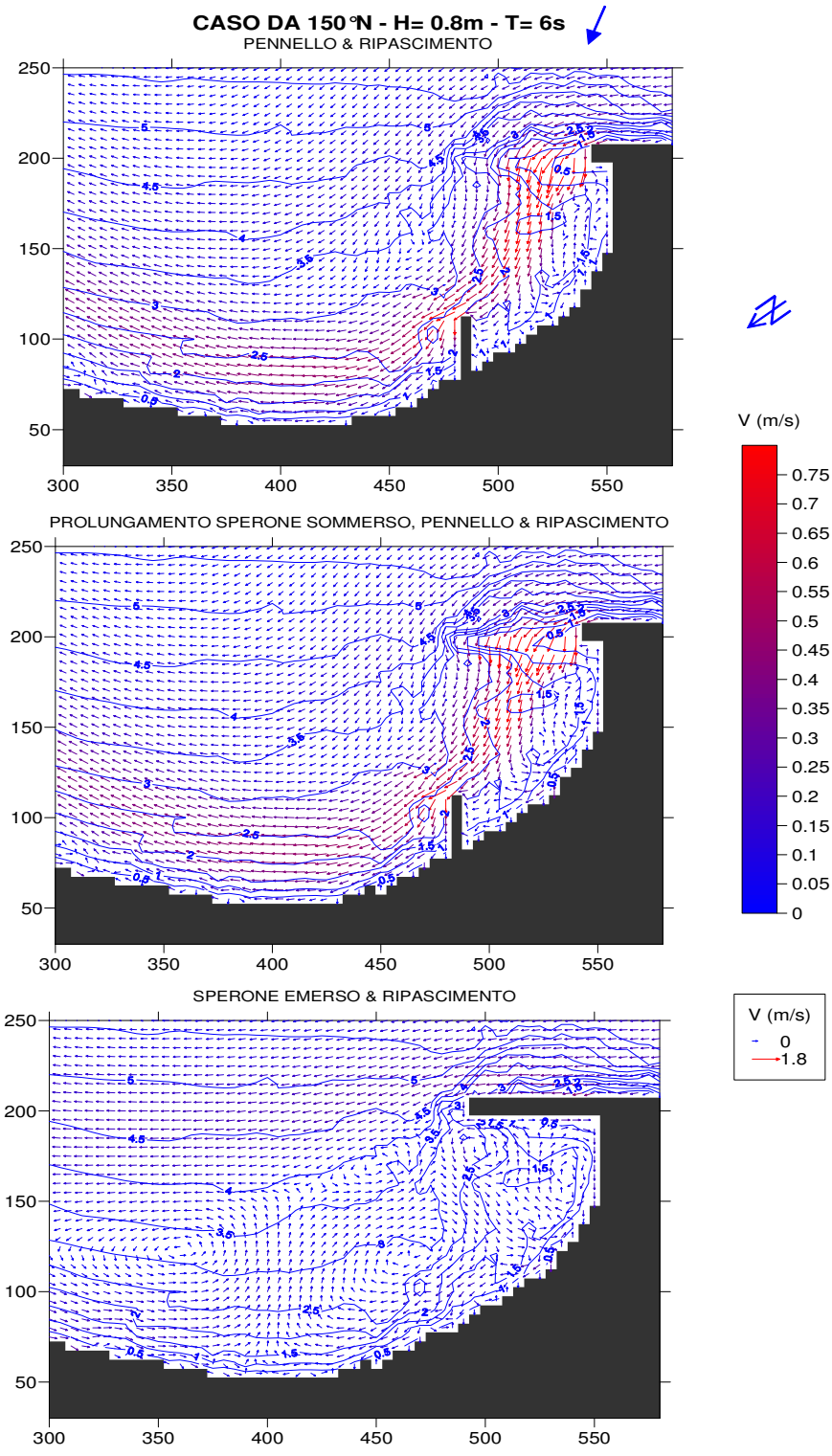


FIG. 6.8 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 0.8 m PROVENIENTE DA 150°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

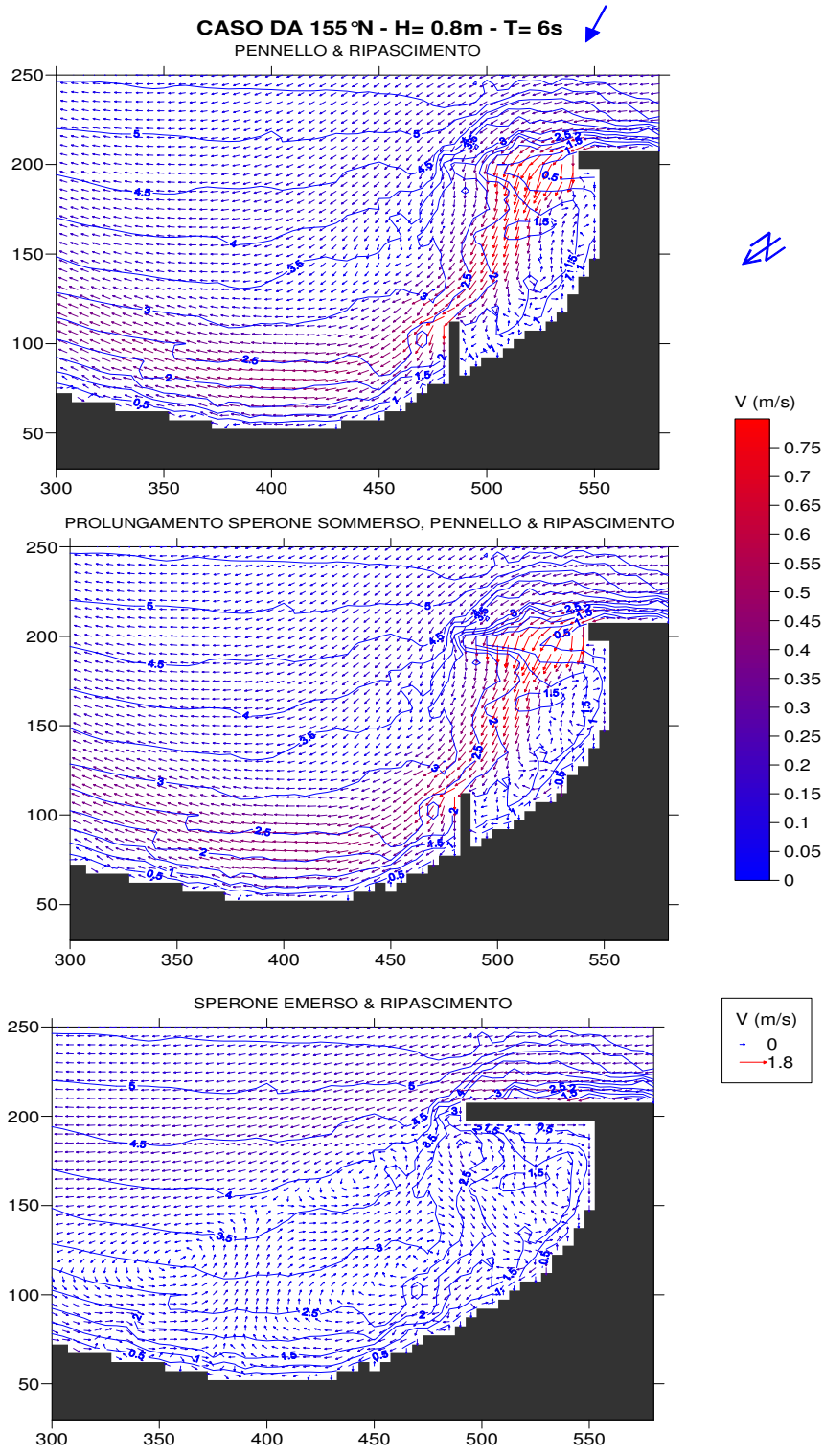


FIG. 6.9 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 0.8 m PROVENIENTE DA 155°N CON PERIODO DI RITORNO DI 6 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

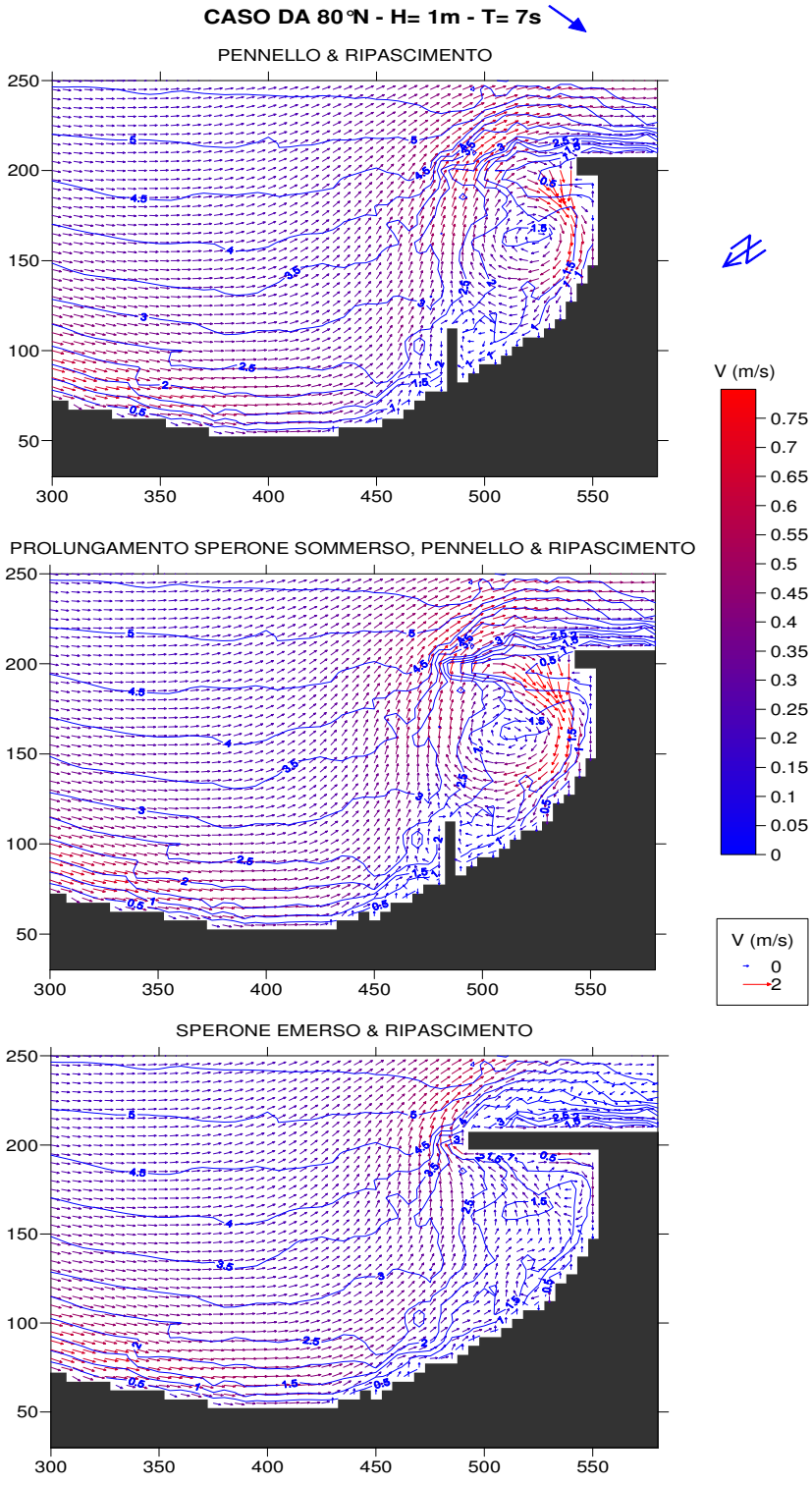


FIG. 6.10 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 80°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

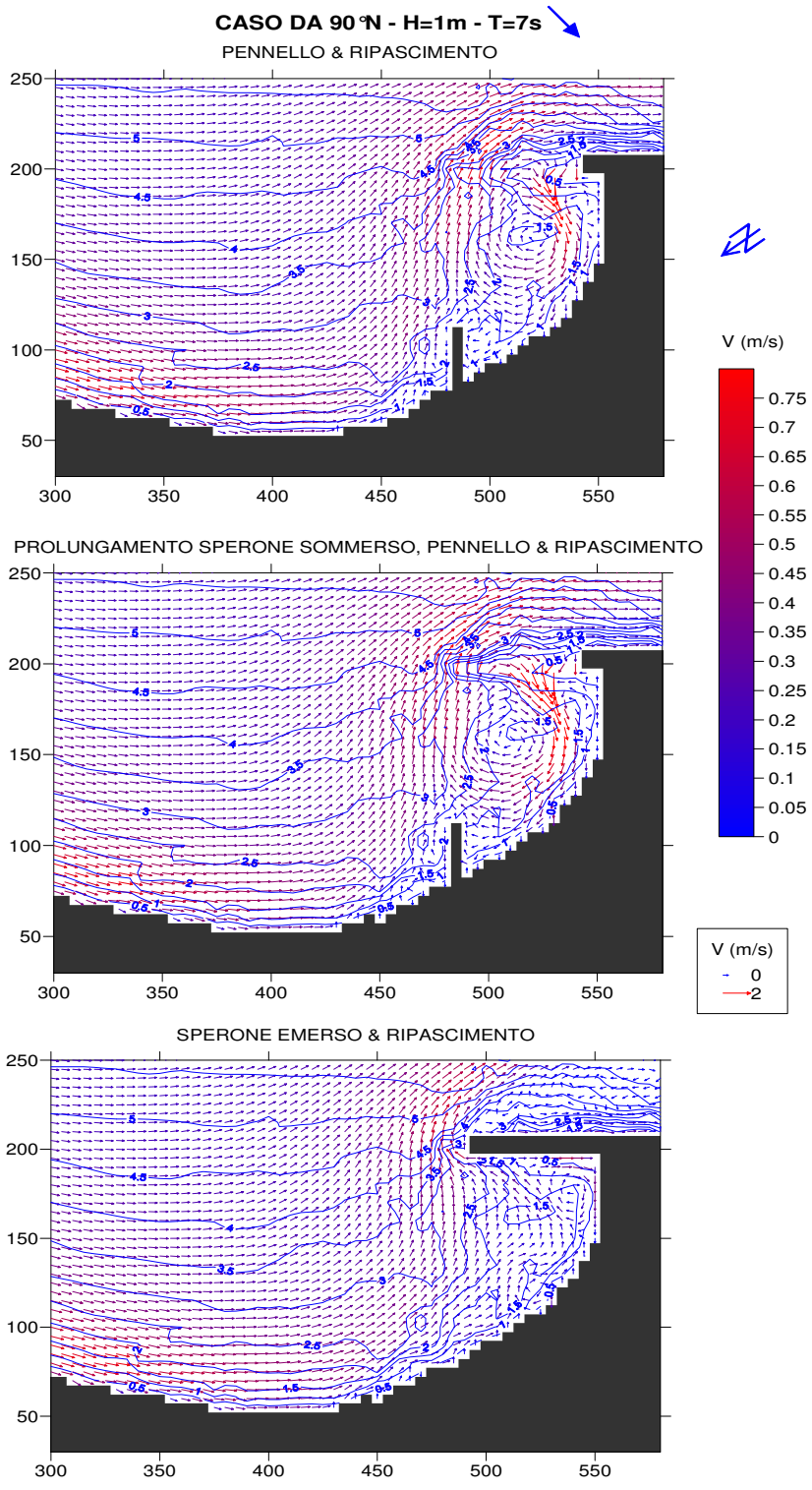


FIG. 6.11 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 90°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

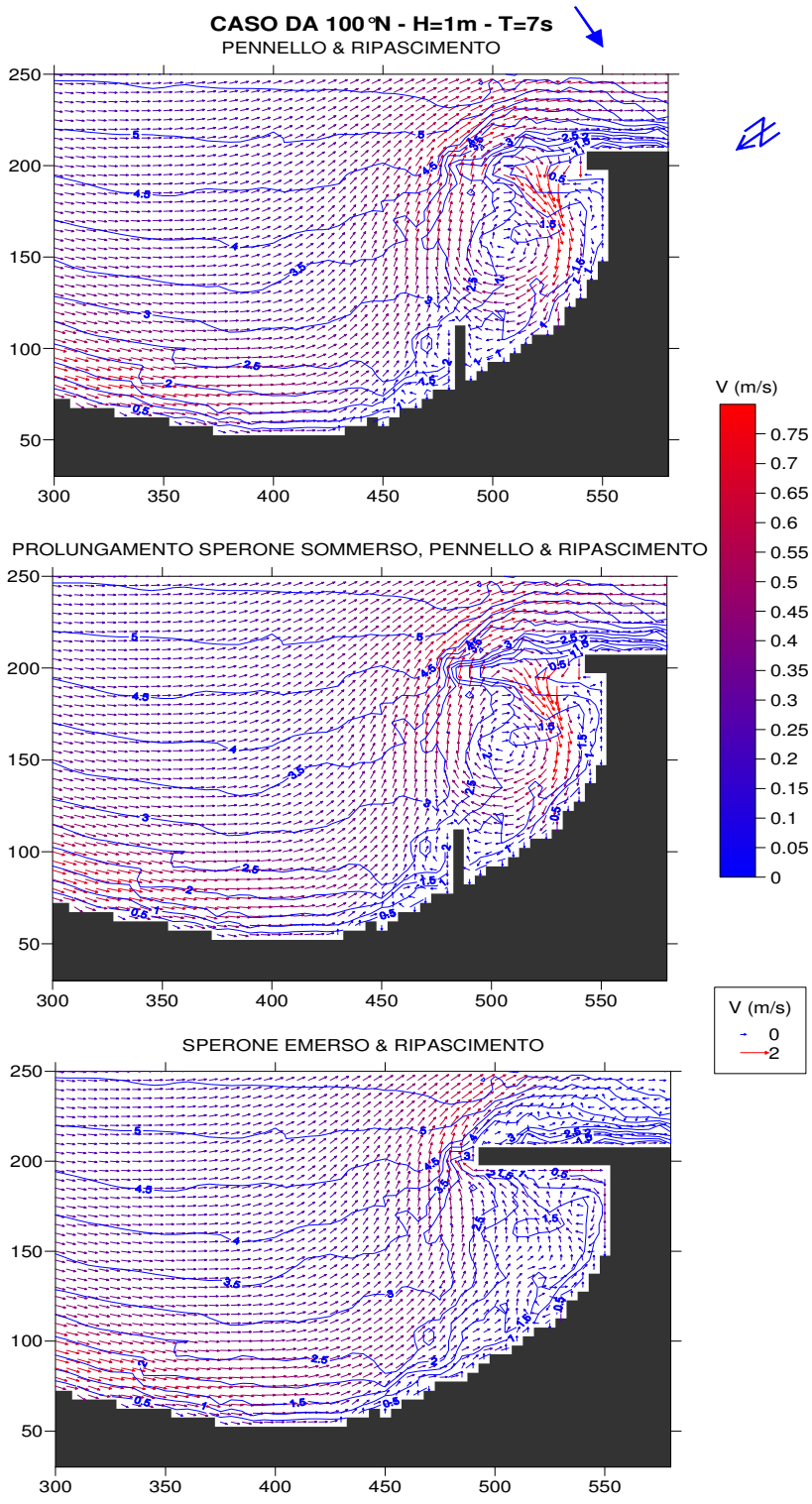


FIG. 6.12 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 100°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

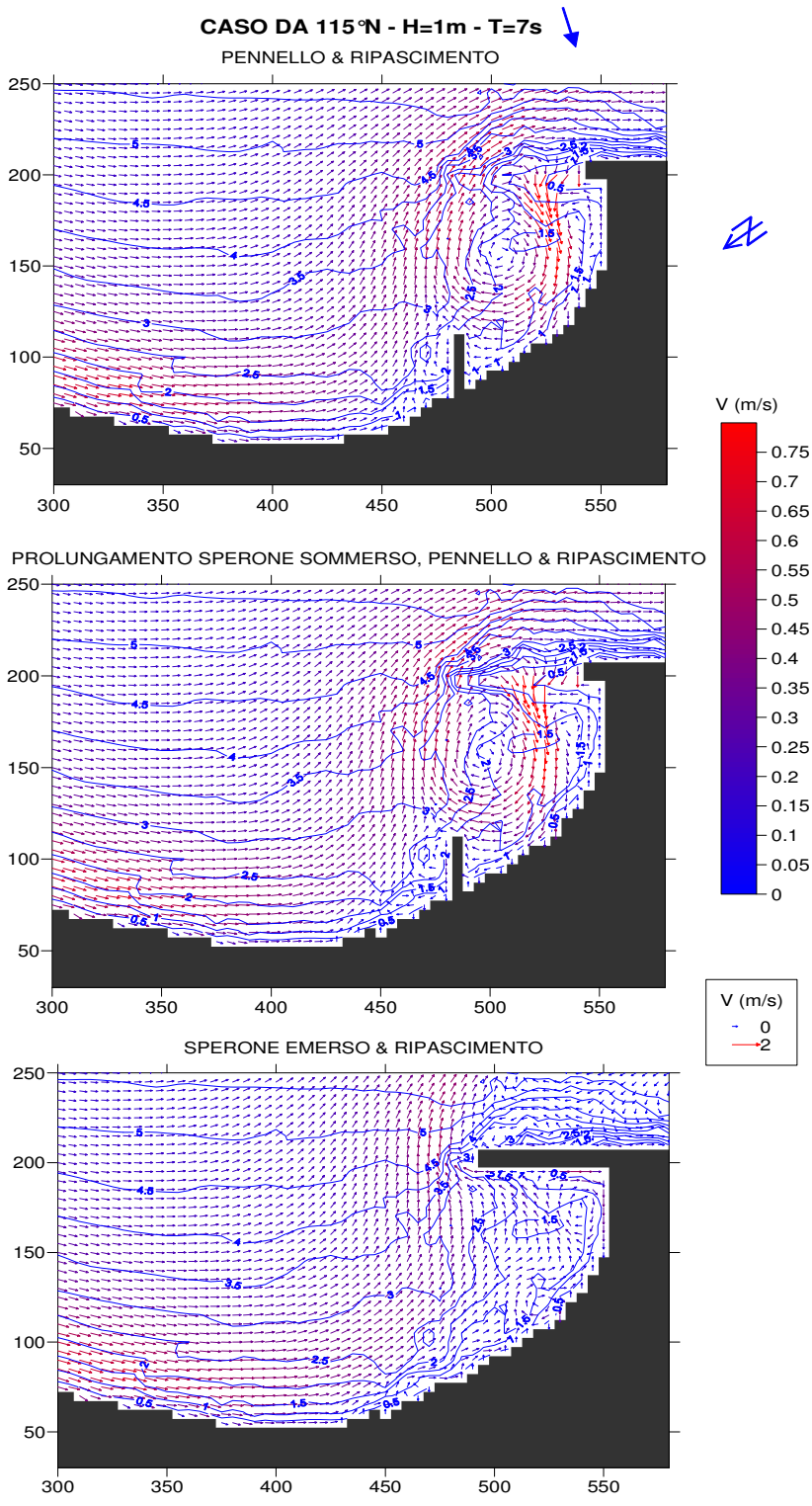


FIG. 6.13 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 115°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

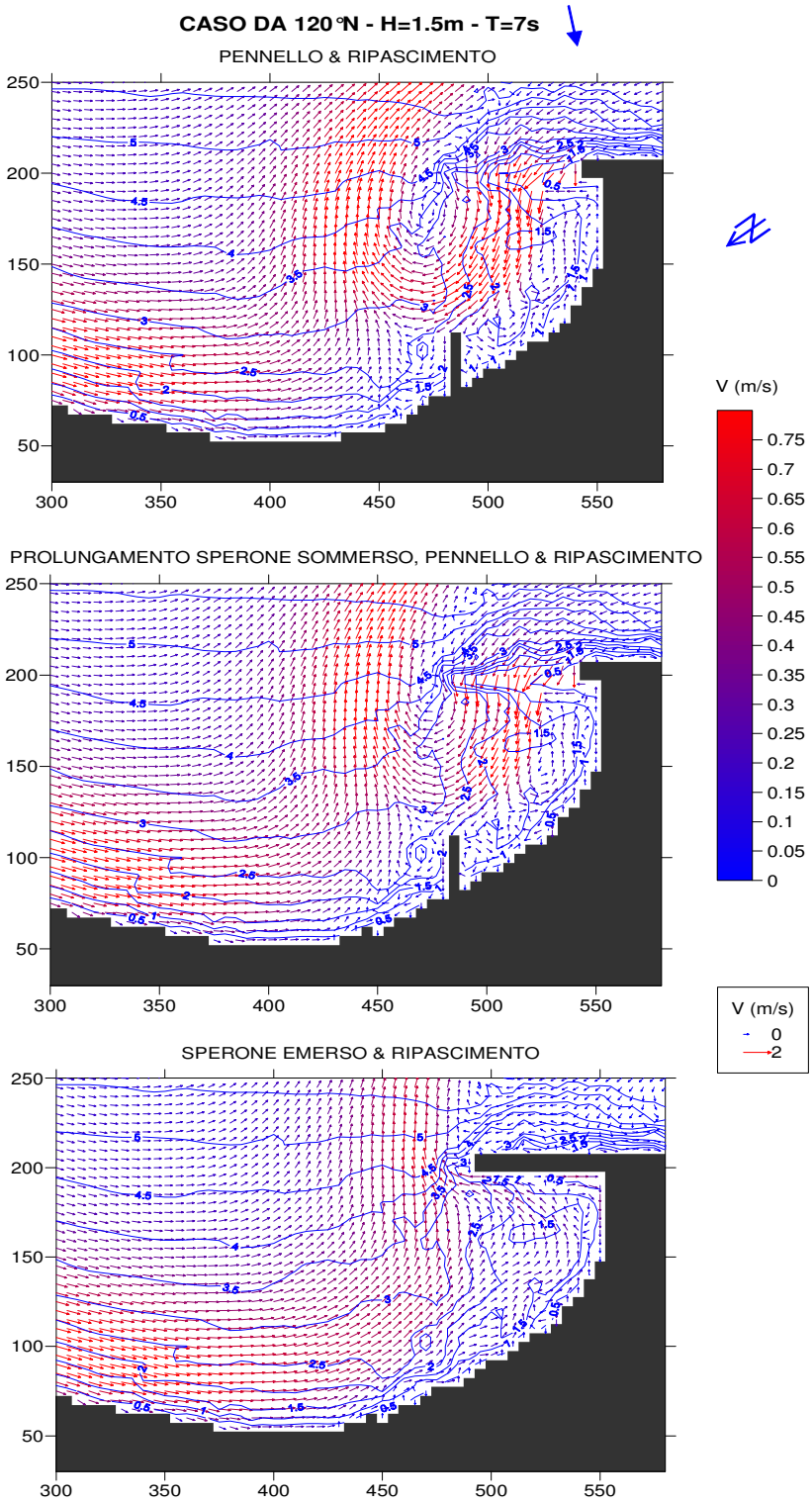


FIG. 6.14 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 120°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

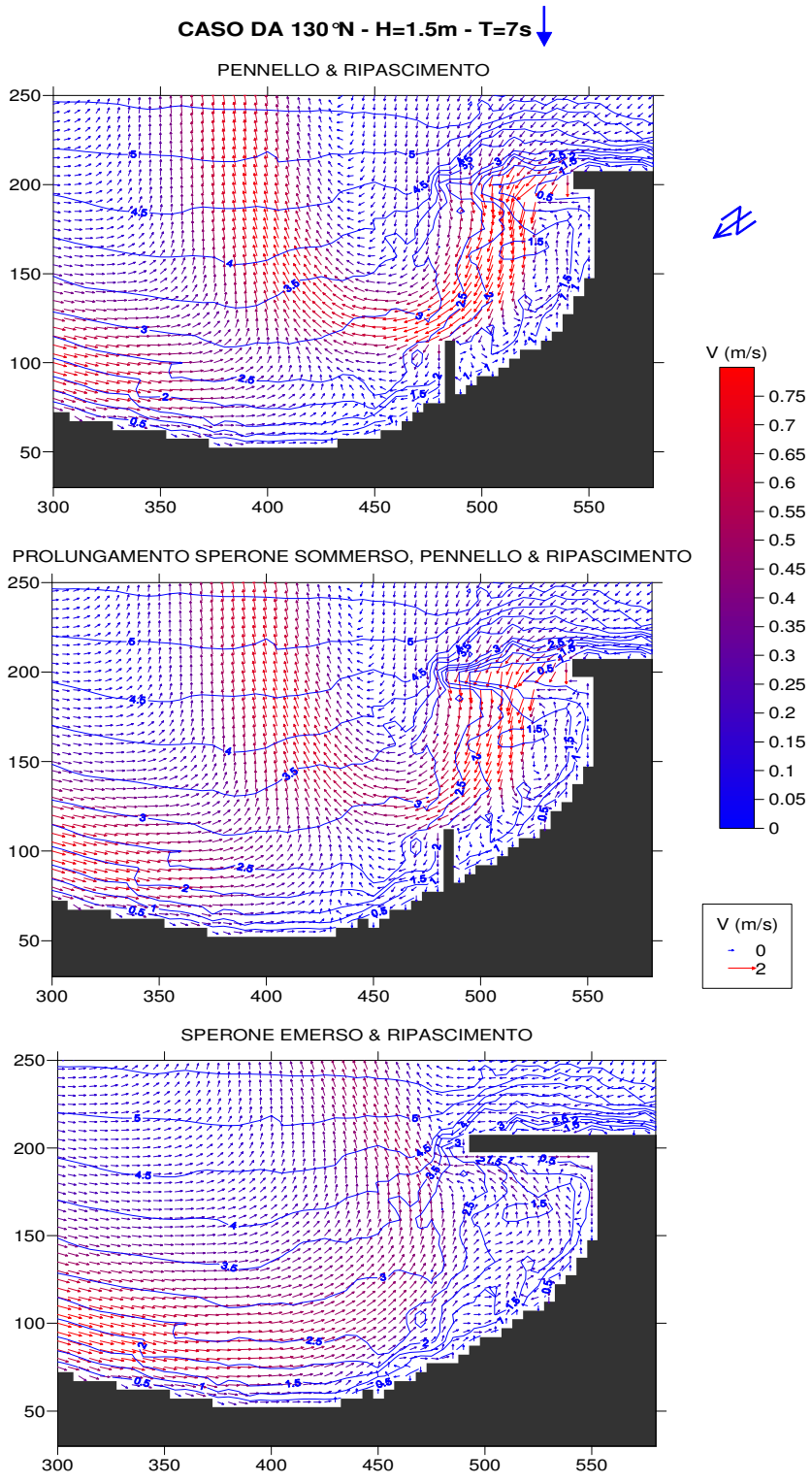


FIG. 6.15 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1.5 m PROVENIENTE DA 130°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

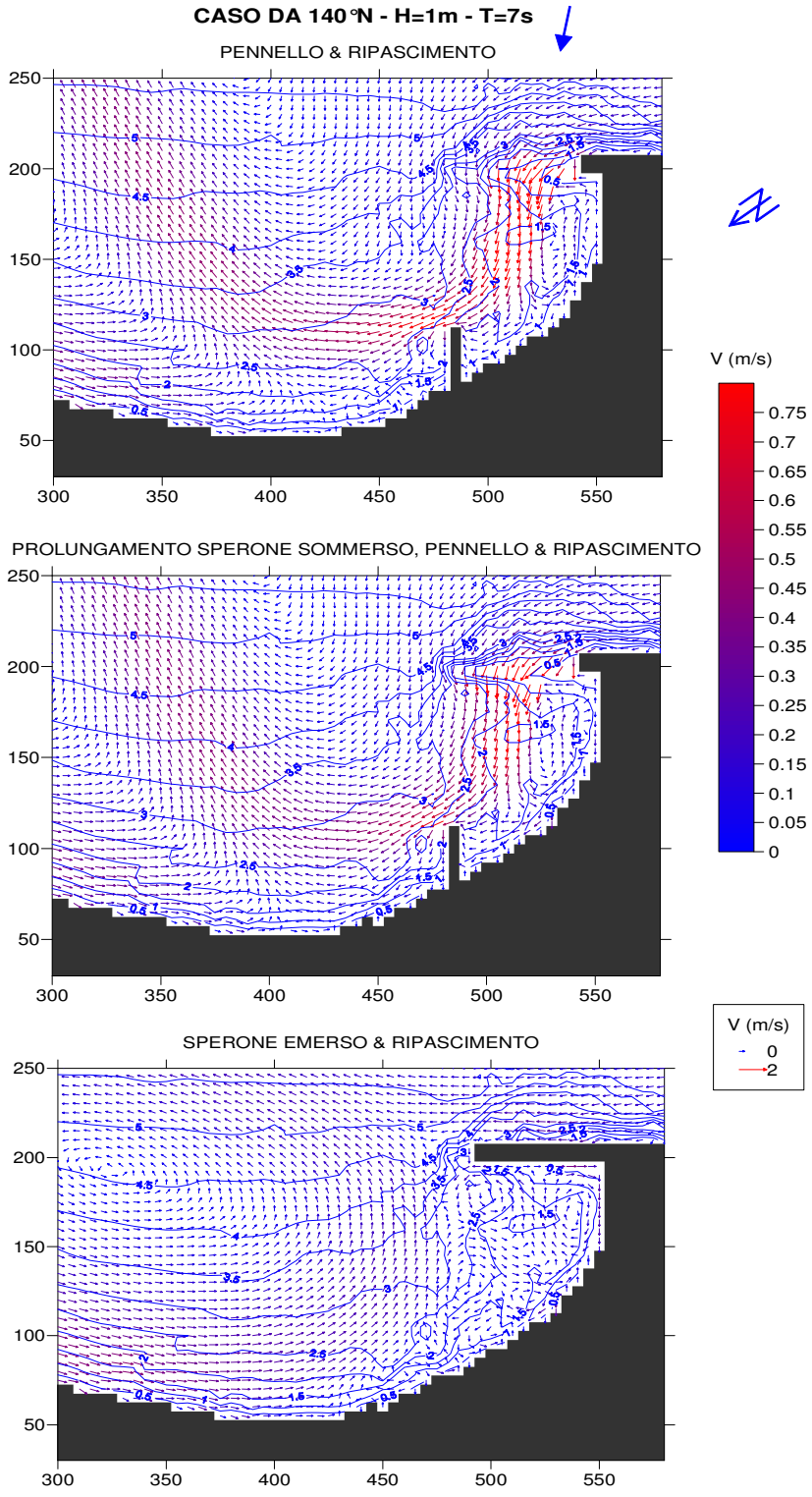


FIG. 6.16 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 140°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

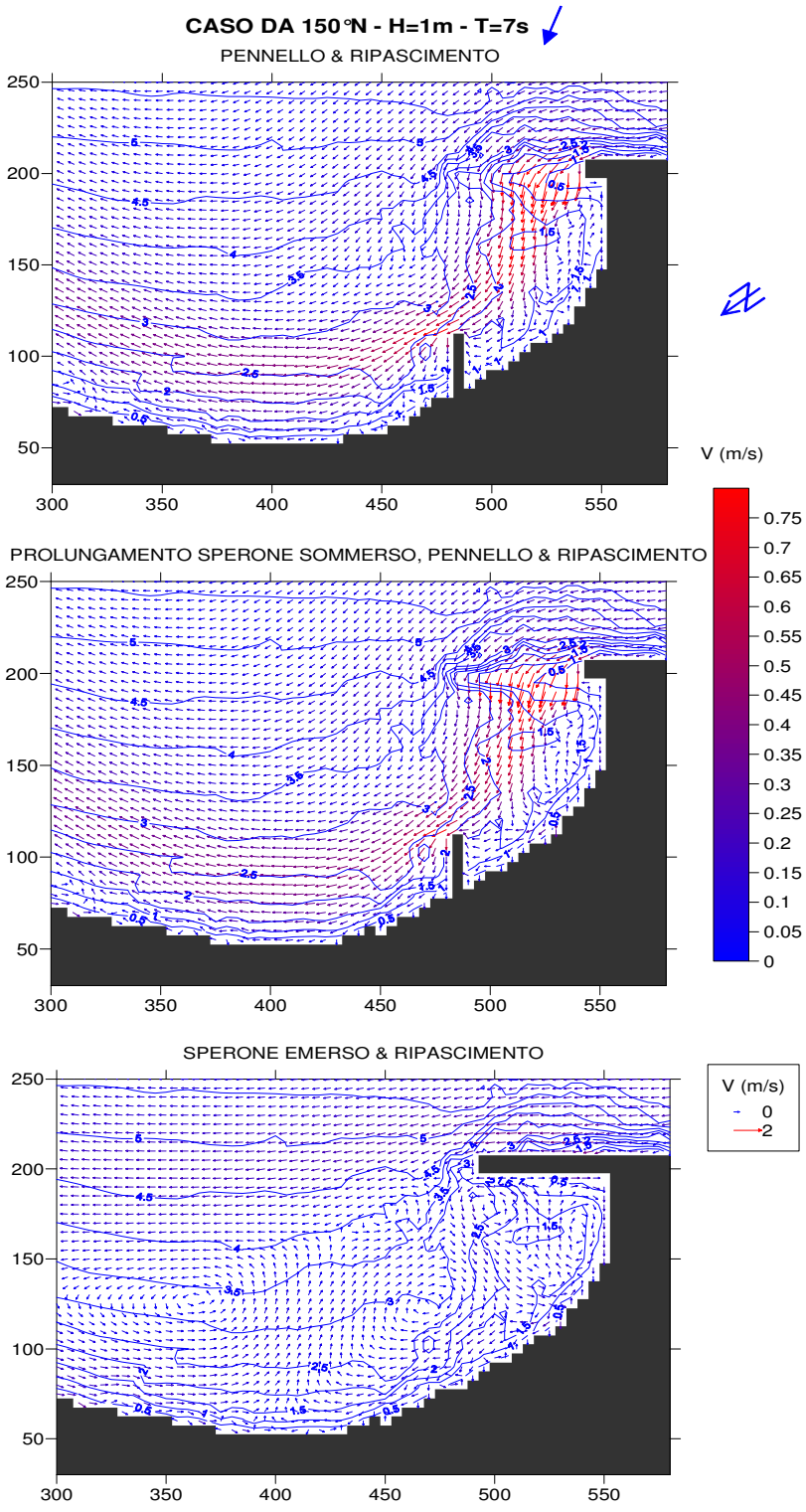


FIG. 6.17 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 150°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

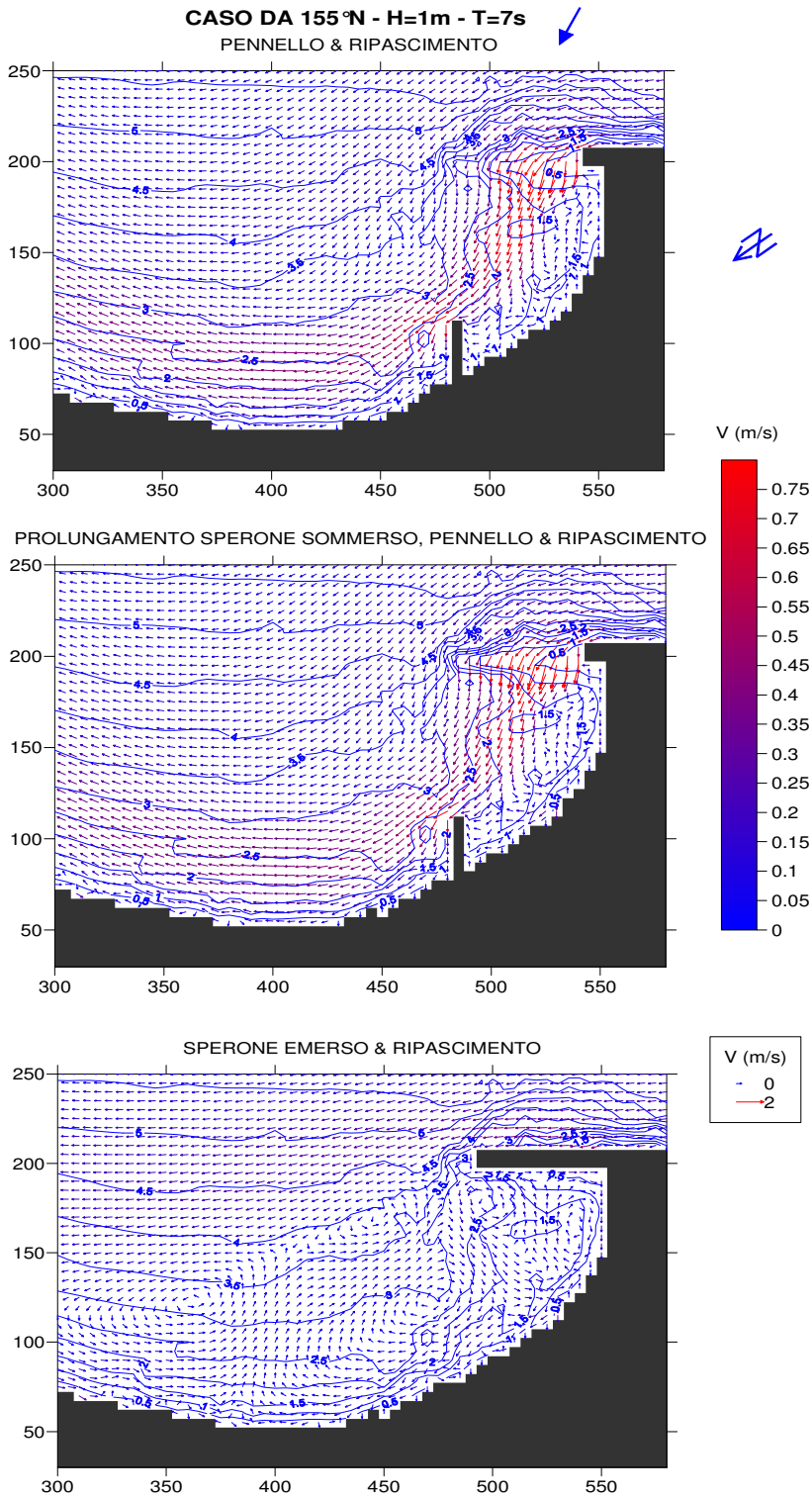


FIG. 6.18 - CAMPO IDRODINAMICO COSTIERO INDOTTO DA ONDE DI 1 m PROVENIENTE DA 155°N CON PERIODO DI RITORNO DI 7 s NEI TRE SCENARI SIMULATI

MODELLO "SWAN PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO COSTA

MODELLO NUMERICO PER LA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO VERSO COSTA - MODELLO "SWAN "(Simulating Waves Nearshore)

La propagazione delle onde estreme a costa viene simulata mediante il ben noto modello "SWAN", che rappresenta lo stato dell'arte.
Lo SWAN (Simulating Waves Nearshore) è un modello numerico che produce stime realistiche dei parametri delle onde in aree costiere, a partire da condizioni definite al largo, tenuto conto delle condizioni del vento, delle correnti e delle caratteristiche del fondale.
L'entità dei diversi fenomeni è calcolata a partire dalla batimetria reale dell'area oggetto di studio.

SWAN è un modello spettrale di terza generazione, che tiene conto dei seguenti processi:

- rifrazione dovuta a variazioni spaziali di profondità e corrente;
- "shoaling" dovuto a variazioni spaziali di profondità e corrente;
- attrito e rifrazione indotti da correnti contrarie;
- trasmissione o dissipazione dovuti alla presenza di ostacoli (ad esempio barriere frangiflutti).

In SWAN sono formulati I seguenti processi di generazione e dissipazione:

- vento;
- "white-capping";
- frangimento;
- attrito al fondo;
- interazioni non-lineari onda-onda.

SWAN differisce dagli altri modelli analoghi e dai suoi predecessori per i seguenti aspetti principali:

- è un modello spettrale (è, quindi, possibile selezionare il profilo spettrale da definire per le condizioni al contorno così come la funzione di "spreading" direzionale);
- considera la generazione di onde da vento anche in acque basse;
- considera l'interazione onda-corrente anche in acque basse;

Grazie ai tre punti sopra enunciati, SWAN definisce con maggiore completezza la dissipazione dell'energia rispetto ad altri modelli che tengono conto solo dell'attrito al fondo.

1. FORMULAZIONE GENERALE

SWAN descrive le onde mediante lo spettro bidimensionale di densità di azione d'onda, anche in condizioni in cui prevalgono fenomeni non lineari (ad esempio nella

"*surf-zone*"). Anche in condizioni fortemente non lineari, infatti, è possibile stimare con ragionevole accuratezza la distribuzione spettrale al secondo ordine.
SWAN utilizza lo spettro di densità di azione N(k,θ) anziché lo spettro di densità di energia E(k, θ) perché, in presenza di correnti, la densità di azione si conserva mentre la densità di energia non si conserva.
La densità di azione è uguale al rapporto tra la densità di energia e la frequenza relativa σ:

$$N(\sigma,\theta) = E(\sigma,\theta)/\sigma.$$

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa σ (misurata rispetto ad un sistema di riferimento che si muove con la velocità di propagazione dell'azione d'onda) e la direzione dell'onda θ (direzione perpendicolare alla cresta di ciascuna componente spettrale).
L'evoluzione dello spettro viene descritta mediante l'equazione di bilancio dell'azione spettrale, di seguito riportata, rispetto ad un sistema di coordinate cartesiane (Hasselmann et a., 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_x N + \frac{\partial}{\partial y}c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \qquad [1]$$

Il primo termine a sinistra rappresenta il gradiente locale di densità di azione, il secondo ed il terzo termine rappresentano la propagazione di densità di azione nello spazio geografico.
Il quarto termine rappresenta lo spostamento della frequenza relativa dovuto alle variazioni di profondità e corrente, mentre il quinto termine rappresenta la rifrazione indotta dalla corrente e dalle variazioni di profondità.

Le velocità di propagazione (c_x, c_y, c_σ, c_θ) all'interno del modello sono definite mediante la teoria lineare.
Il termine **S** (=S(θ,σ)) a destra dell'espressione [1] è il termine sorgente espresso come densità di energia, ed è costituito dagli effetti di generazione, dissipazione, e interazioni non-lineari onda-onda.
Per maggiori dettagli si rimanda al manuale del modello (SWAN User Manual).

2. PARAMETRI PRINCIPALI

In SWAN le principali grandezze sono così definite:

Altezza d'onda significativa: **Hs** (in m):

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

dove $E(\omega,\theta)$ è la densità spettrale della varianza, ω la frequenza determinata dallo shift in frequenza della relazione di dispersione.

Periodo medio d'onda: **Tm_{01}** (in s):

$$Tm01 = 2\pi\left(\frac{\iint \omega\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}{\iint E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}\right)^{-1} = 2\pi\left(\frac{\iint \omega\, E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}{\iint E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}\right)^{-1}$$

Periodo medio d'onda: **Tm_{02}** (in s):

$$Tm_0 2 = 2\pi\left(\frac{\iint \omega^2\, E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}{\iint E(\omega,\theta)\, d\omega\, d\theta}\right)^{-1/2} = 2\pi\left(\frac{\iint \omega^2\, E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}{\iint E(\sigma,\theta)\, d\sigma\, d\theta}\right)^{-1/2}$$

Direzione media dell'onda: **Dir** (in gradi, secondo la convenzione cartesiana o nautica), come convenzionalmente definita (Kuik et al., 1988).

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

Direzione del picco d'onda: **PDir** (in gradi, secondo la convenzione cartesiana o nautica):

$$PDir = E(\theta) = \int E(\sigma,\theta)\, d\sigma = \int E(\omega,\theta)\, d\omega$$

Velocità orbitale "Root-Mean-Square" in prossimità del fondo: **U_{rms}** (in m/s)

$$U_{rms} = < (U^2) >^{1/2}$$

Velocità orbitale massima "Root-Mean-Square" in prossimità del fondo: **U_{bot}** (in m/s)

$$U_{bot} = \sqrt{2}\, U_{rms}$$

3. SCHEMATIZZAZIONE

L'area di studio viene discretizzata mediante un reticolo di maglie quadrate o rettangolari e ad ogni maglia viene assegnata la corrispondente profondità del fondale.

Il modello non ha particolari problemi nella risoluzione spaziale: possono così essere effettuate simulazioni della propagazione dell'onda a costa considerando reticoli di estremo dettaglio o reticoli a vasta scala.
E' inoltre possibile effettuare, ove necessario, l'innesto ("nesting") di uno o più reticoli dettagliati su uno a vasta scala, garantendo in questo modo condizioni ai contorni oggettive dei modelli di dettaglio.

4. REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

[1] Andorka Gal, J.H., L.H. Holthuijsen, J.C.M. de Jong and A.T.M.M. Kieftenburg, 1998, Wave transformation near a quasi-1D coast, 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen,150-160

[2] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1996, The "SWAN" wave model for shallow water, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, pp. 668-676

[3] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R. Padilla-Hernandez, 1997, A nonstationary, parametric coastal wave model, Conf. Coastal Dynamics '97, Plymouth, 99-107

[4] Booij, N., L.H. Holthuijsen, N. Doorn and A.T.M.M. Kieftenburg, 1997, Diffraction in a spectral wave model, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 243-255

[5] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R. Padilla-Hernandez, 1997, Numerical wave propagation on a curvilinear grid, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 286-294

[6] Booij, N., L.H. Holthuijsen and R.C. Ris, 1998, Shallow water wave modelling, Oceanology International 98, The Global Ocean, Brighton, Conference Proceedings, 3, 483-491

[7] Booij, N., L.H. Holthuijsen and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing the second-generation HISWA wave model with the third-generation SWAN wave model, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 215-222

[8] Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J.Geoph.Research, 104, C4, 7649-7666

[9] Cavaleri, L. and L.H. Holthuijsen, 1998, Wave modelling in the WISE group, Proc. 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen, 498-508

[10] Gorman, R.M. and C.G. Neilson, 1999, Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary, Coastal Engineering, 36, 197-217

[11] Holthuijsen, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993, A spectral wave model for the coastal zone, Proceedings 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641

[12] Holthuijsen, L.H., N. Booij and R. Padilla-Hernandez, 1997, A curvi-linear, third-generation coastal wave model, Conf. Coastal Dynamics '97, Plymouth, 128-136

[13] Holthuijsen, L.H., N. Booij, R. Ris, J.H. Andorka Gal and J.C.M. de Jong, 1997, A verification of the third-generation wave model "SWAN" along the southern North Sea coast, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 49-63

[14] Holthuijsen, L.H., R.C. Ris and N. Booij, 1998, A verification of the third-generation wave model SWAN, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 223-230

[15] Holthuijsen, L.H., N. Booij and IJ.G. Haagsma, 1998, Comparing 1st-, 2nd - and 3rd-generation coastal wave modelling, 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen, 140-149

[16] Padilla-Hernandez, R., P. Osuna, J. Monbaliu and L. Holthuijsen, 1998, Intercomparing third-generation wave model nesting, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 102-112

[17] Ris, R.C., L.H. Holthuijsen and N. Booij, 1994, A spectral model for waves in the near shore zone, Proc. 24th Int. Conf. Coastal Engng, Kobe, Oct. 1994, Japan, pp. 68-78

[18] Ris, R.C. and L.H. Holthuijsen, 1997, Modelling of current induced wave-blocking in a spectral wave model, 8th International Biennal Conference on Physics of Estuaries and Coastal Seas, J. Dronkers and M.B.A.M. Scheffers (eds.), The Hague, 139-144

[19] Ris, R.C., N. Booij and L.H. Holthuijsen, 1999, A third-generation wave model for coastal regions, Part II: Verification, J.Geoph.Research, 104, C4,7667-7681

[20] Wood, D.J., M. Muttray and H. Oumeraci, 2000, The SWAN model used to study wave evolution in a flume, Coastal Engineering, accepted for publication.

MODELLO IDRODINAMICO BAROTROPICO PER LA SIMULAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE COSTIERA

MODELLO IDRODINAMICO BAROTROPICO PER LA SIMULAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE COSTIERA

1. EQUAZIONI

Il modello è basato sulle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, mediate sulla verticale e su di un intervallo di tempo pari al periodo dell'onda.
Le equazioni sono le seguenti:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial (uh)}{\partial x} - \frac{\partial vh}{\partial y} \qquad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g\frac{\partial \eta}{\partial x} - g\frac{u|\vec{u}|}{C^2 h} + \frac{1}{\rho h}\tau_x - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \qquad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g\frac{\partial \eta}{\partial y} - g\frac{v|\vec{u}|}{C^2 h} + \frac{1}{\rho h}\tau_y - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{1}{\rho h}\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \qquad [3]$$

dove:

h: profondità riferita al livello medio del mare;

η: elevazione della superficie libera;

u,v: componenti della velocità orizzontale mediate sulla verticale.

$$v = \frac{1}{h}\int_{-h}^{\eta} v(z)dz \qquad u = \frac{1}{h}\int_{-h}^{\eta} u(z)dz \qquad [4]$$

f: parametro di Coriolis;

$C=C_o h^{1/6}$ coefficiente di Chezy;

C_o: coefficiente di scabrezza del fondo;

τ_x τ_y: componenti dello stress superficiale del vento, legate alla velocità del vento W dalle relazioni

$$\tau_y = \rho_{aria} C_D W_y \left|\vec{W}\right| \qquad \tau_x = \rho_{aria} C_D W_x \left|\vec{W}\right| \qquad [5]$$

S_{xx}, S_{yy}, S_{xy} componenti del radiation stress del moto ondoso, fornite secondo la teoria lineare da

$$S_{xx} = E\left(\frac{3}{2}n - \frac{1}{2}\right) + E\left(\frac{n}{2}\right)\cos(2\theta)$$

$$S_{yy} = E\left(\frac{3}{2}n - \frac{1}{2}\right) + E\left(\frac{n}{2}\right)\cos(2\theta) \qquad [6]$$

$$S_{xy} = En\cos(2\theta)\sin(2\theta)$$

dove:

$E = \frac{1}{8}\rho g H^2$ densità di energia dell'onda;

H: altezza dell'onda;

ϑ: angolo tra la direzione di propagazione dell'onda e l'asse x;

$n = \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{2Kh}{sinh(Kh)}\right]$ rapporto tra la velocità di gruppo e la velocità di fase dell'onda.

2. IL METODO DI INTEGRAZIONE

Per l'integrazione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto è stato adottato uno schema numerico alle differenze finite di tipo esplicito.
Lo schema opera su di un reticolo regolare a maglie quadrate o rettangolari di tipo "traslato" nel quale, cioè, l'elevazione della superficie libera e le componenti della velocità sono definite in punti diversi della maglia, secondo lo schema indicato in **Fig. 1**.

Anche nel tempo la rappresentazione è di tipo “traslato”, in quanto l’elevazione della superficie libera è definita al tempo n-1/2, n+1/2, n+3/2, ..., mentre le componenti della velocità sono definite al tempo n, n+1, n+2, ...

L’integrazione del sistema di equazioni viene effettuata in due passi: dapprima viene integrata l’equazione di conservazione della massa e viene calcolata l’elevazione della superficie libera al tempo n+1/2 a partire dai valori di η al tempo n-1/2 e di u e v al tempo n, successivamente vengono integrate le equazioni di conservazione della quantità di moto calcolando i valori di u e v al tempo n a partire dai valori al tempo n-1 e dai nuovi valori η al tempo n+1/2.
Questa procedura è necessaria per garantire la stabilità della soluzione numerica.
Nelle equazioni della conservazione della quantità di moto i termini non lineari di tipo avvettivo vengono schematizzati mediante uno schema “upwind”, mentre i termini di attrito sono calcolati mediante uno schema di tipo semi-implicito, allo scopo di migliorare la stabilità della soluzione.
A causa della natura esplicita dello schema numerico adottato, il passo temporale Dt e le dimensioni spaziali Dx e Dy devono comunque soddisfare il criterio di stabilità di Courant-Levy:

$$D_t \le \frac{\max(D_x, D_y)}{\sqrt{2}\left(|\vec{v}|\right) + \sqrt{gh)}} \qquad [7]$$

Per l’integrazione del sistema di equazioni debbono essere assegnate opportune condizioni iniziali e al contorno.
Nelle acque basse l’effetto accentuato dell’attrito determina il rapido attenuarsi delle perturbazioni del moto, per cui l’influenza delle condizioni iniziali tende a divenire trascurabile e dopo breve tempo si stabilisce una condizione di regime dipendente dall’equilibrio tra le condizioni al contorno ed i termini forzanti.
Ciò semplifica notevolmente il problema della determinazione delle condizioni iniziali per le quali in generale viene assunto uno stato di quiete:

$$\eta,\ u,\ v = 0 \quad \text{per } t=0 \qquad [8]$$

Per quanto riguarda le condizioni al contorno vengono effettuate le seguenti assunzioni:

ai contorni chiusi viene imposto l’annullamento delle componenti normali della velocità (u_n) e della derivata normale al contorno della componente longitudinale della velocità (u_l):

$$u_n = 0 \qquad \frac{\partial u_l}{\partial n} = 0 \qquad \text{per } t \ge 0 \qquad [9]$$

al contorno aperto parallelo alla costa, corrispondente al contorno con il mare aperto, viene imposto l'annullamento dell'elevazione della superficie libera;

ai contorni trasversali alla costa vengono imposte condizioni periodiche. Queste ultime corrispondono ad imporre l'uguaglianza dei flussi e dell'elevazione della superficie nei due contorni trasversali e presuppongono che il tratto di costa in esame presenti caratteristiche simili in corrispondenza ai due contorni.

3. PARAMETRI DI INPUT

Per l'applicazione del modello sono necessari i seguenti dati di input:
geometria del bacino;
profondità in ogni maglia del reticolo;
rugosità del fondo in ogni maglia;
i termini del radiation stress in ogni maglia;
condizioni iniziali di u, v e η in ogni maglia;
condizioni ai contorni aperti ad ogni passo di integrazione δti;
è oscillazione di marea;
il vento superficiale (direzione ed intensità) ad ogni passo di integrazione δti e per ogni maglia.

4. CARATTERISTICHE DELL'OUTPUT

Come risultato dell'integrazione numerica, il modello fornisce, ad intervalli prefissati, il valore di U, V e η in ciascuna maglia del bacino.
E' inoltre possibile ottenere una rappresentazione grafica dell'andamento del campo di corrente e dell'elevazione della superficie libera.

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

I. RAMMING H. G., 1972: "Reproduction of physical processes in coastal areas", Proc. of 13th Conference on Coastal Engineering, Vancouver, Vol. 3;

II. HSU S.A., 1986: "A mechanism for the increase of wind stress (drag) coefficient with wind speed over water surfaces: a parametric model", J. of Phys. Oceanography, 16, 144-150;

III. HANSEN W., 1962: " Hydrodynamical methods applied to oceanographyc problems", Proc. of the Symposium on Mathematical Hydrodynamical Methods of Physical Oceanography. Institut fur Meerskunde der Universitat, Hamburg;

IV. REID R.O. e BODINE B.R., 1968: "A Numerical model for storm surges in Galverston Bay", Journal of the Waterways Harbours and Coastal Division, ASCE, Vol. 102, n. WW1;

V. NODA, E.K., SONU C.J., RUPERT, V.C. and COLLINS, J.I. 1974: "Nearshore circulations under sea breeze conditions and wave-current interactions in the surf-zone", Tetra Tech Report TC-149-4;

VI. ALLENDER, J.H., DITMARS, J.D., HARRISON, W. and PADDOCK, R.A. 1978: " Comparison of model and observed nearshore circulation", Proc. of 16th International Conference on Coastal Engineering, Hamburg;

VII. LIU, P. and LENNON, G.P., 1978: " Finite Element Modelling of Nearshore Currents", Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol. 104, WW2.

VIII. BIRKEMEIER, W.A. and DALRYMPLE; R.A., 1976: " Nearshore Water Circulation Induced by Wind and Waves", Proc. of the Symposium on Modelling Technique, ASCE;

IX. BRUCE A., EBERSOLE, DALRYMPLE R.A. 1980: "Numerical modelling of nearshore circulation", Procedings of VII Coastal Engineering Conference, Sydney, Australia;

X. BACKHAUS J.O. 1983: "A semi-implicit scheme for the shallow water equations for application to shelf sea modelling", Continental Shelf Research, 2.