



STUDIO DEL POTENZIALE EFFETTO SUL REGIME IDRODINAMICO DELLE CORRENTI INTERNE ALL'AREA PORTUALE DELLA SPEZIA A SEGUITO DELLA REALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI PREVISTI AL TERMINAL DEL GOLFO, MARINA DI FOSSAMAISTRA E MARINA DEL CANALETTO



RELAZIONE TECNICA

CODICE DOCUMENTO

ELABORATO

C 2 0 8 - 0 1 - 0 0 1 0 0 . D O C L C 1

00	FEB.05	A.CROSTA	M.BUFFO	A.CROSTA	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

RIPRODUZIONE O CONSEGNA A TERZI SOLO DIETRO SPECIFICA AUTORIZZAZIONE

INDICE

1. PREMESSA	1
2. APPROCCIO METODOLOGICO E SCENARI DI RIFERIMENTO	1
3. COSTRUZIONE DEL MODELLO NUMERICO	3
3.1 Geometrie del modello	3
3.2 Condizioni al contorno	5
3.3 Caratteristiche dell'acqua di mare	7
3.3.1 Temperatura dell'acqua	7
3.3.2 Salinità dell'acqua	7
3.4 Forzanti idrodinamiche	8
3.4.1 Il vento	8
3.4.2 Immissioni in rada	9
3.5 Parametri del modello	11
3.5.1 Passo di integrazione	11
3.5.2 Viscosità turbolenta	11
3.5.3 Scabrezza del fondo	12
3.5.4 Periodo di simulazione	12
4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	13
4.1.1 Scenario di "calma" con fondo attuale - simulazioni a) e b)	13
4.1.1.1 Risultati in forma planimetrica	13
4.1.1.2 Risultati in forma grafica	21
4.1.2 Scenario con fondo dragato - simulazioni c) e d)	38
4.1.3 Scenario di "tempesta" - simulazioni e) ed f)	45
5. ELABORAZIONE DEI RISULTATI	52
6. CONCLUSIONI	60

ALLEGATO 1 - MIKE 3 - A Three-dimensional Hydrodynamic Model

1. PREMESSA

Oggetto del presente studio è l'analisi del regime idrodinamico delle correnti interne all'area portuale della Spezia a seguito della realizzazione degli interventi previsti al Terminal del Golfo e nelle aree di Marina di Fossamastra e Marina del Canaletto.

Nelle tre aree citate sono previsti interventi di riempimento ed estensione a mare delle banchine presenti; in particolare, presso il Terminal del Golfo e Marina del Canaletto sono previsti banchinamenti con riempimento a mare, mentre presso Marina di Fossamastra, data la presenza dello scarico ENEL, è prevista l'estensione della banchina esistente con fondazione su pali.

Obiettivo dello studio è quindi l'analisi comparativa delle caratteristiche idrodinamiche delle correnti allo stato di fatto ed a seguito della realizzazione degli interventi previsti, al fine di verificare eventuali effetti indotti dalle nuove strutture.

La presente relazione tecnica descrive l'approccio metodologico, le diverse fasi di lavoro ed i risultati conseguiti nell'ambito dello studio, che rappresenta un'estensione dello "*Studio idrodinamico e dei processi diffusivi e dispersivi nello specchio acqueo interno al golfo della Spezia*" recentemente concluso da Intecno-DHI.

2. APPROCCIO METODOLOGICO E SCENARI DI RIFERIMENTO

Il comportamento idrodinamico della rada del porto della Spezia, come confermato da studi precedenti, risulta essere fortemente irregolare, in quanto condizionato da molteplici fattori quali:

- le correnti ed i flussi di marea presenti nel Mar Ligure;
- il moto ondoso all'esterno ed all'interno della rada;
- la geometria dell'area;
- il gradiente di temperatura conseguente allo scarico della Centrale ENEL;
- il gradiente di salinità indotto dagli apporti di acqua dolce;
- il vento locale.

Al fine di una corretta analisi delle correnti interne alla rada è stato necessario utilizzare un modello numerico complesso, in grado di poter rappresentare l'effetto combinato di tutti i fattori sopra elencati.

Per questo, è stato utilizzato il codice di calcolo tridimensionale MIKE 3 del DHI Water & Environment, di cui si riporta una descrizione dettagliata nell'allegato 1.

Con il modello numerico è stato possibile rappresentare il comportamento idrodinamico delle correnti nella rada, confrontando lo scenario attuale con quello a seguito della realizzazione degli interventi previsti.

Il confronto è stato condotto in riferimento a due diverse geometrie del fondo, in funzione della realizzazione del dragaggio, ed a due scenari climatici, uno di "calma" ed uno di "tempesta".

Le geometrie dell'area necessarie al modello sono state ricavate dal già citato "*Studio idrodinamico e dei processi diffusivi e dispersivi nello specchio acqueo interno al golfo della Spezia*", nell'ambito del quale sono state acquisite tutte le informazioni geometriche e batimetriche necessarie.

Lo stesso studio, avendo analizzato a diversa scala l'idrodinamica di una porzione di mare molto più ampia, ha anche fornito le condizioni al contorno in termini di livelli e flussi di corrente in corrispondenza della diga foranea, limite esterno del modello di dettaglio utilizzato nella presente analisi.

I due scenari climatici di riferimento risultano essere gli stessi già considerati nell'ambito della precedente analisi, da cui la possibilità di estrarne le condizioni al contorno.

Nel modello sono stati poi considerati gli effetti locali dello scarico ENEL, con il conseguente eccesso di temperatura, della portata di acqua dolce del Canale Lagora e del vento locale nei due diversi scenari climatici.

I vari apporti sono stati caratterizzati sulla base dei dati forniti dall'Autorità Portuale della Spezia derivanti da studi precedenti, come descritto nei paragrafi a seguire.

Complessivamente sono state condotte 6 simulazioni, così individuate:

- a) stato attuale delle banchine, assenza di dragaggio, scenario di "calma";
- b) stato di progetto delle banchine, assenza di dragaggio, scenario di "calma";
- c) stato attuale delle banchine, realizzazione del dragaggio, scenario di "calma";
- d) stato di progetto delle banchine, realizzazione del dragaggio, scenario di "calma";
- e) stato attuale delle banchine, assenza di dragaggio, scenario di "tempesta";
- f) stato di progetto delle banchine, assenza di dragaggio, scenario di "tempesta".

Per ogni coppia di simulazioni è stato possibile confrontare la dinamica delle correnti presenti nell'area, evidenziando quindi gli effetti indotti dagli interventi previsti.

3. COSTRUZIONE DEL MODELLO NUMERICO

MIKE 3 è un modello finalizzato ad una grande varietà di applicazioni in diverse aree:

- offshore
- aree costiere
- estuari e laghi

Il modello è tridimensionale, non idrostatico, e risolve le equazioni del moto e di continuità nelle tre direzioni cartesiane.

MIKE 3 è in grado di simulare flussi non stazionari tenendo in considerazione le variazioni di densità, forzanti esterne quali quelle meteorologiche, le variazioni di marea, le correnti ed altri fattori influenti sul sistema.

Nel modulo idrodinamico le variabili incognite sono le componenti della velocità nelle tre direzioni e la pressione del fluido. Le equazioni del modello sono schematizzate secondo uno schema implicito alle differenze finite e risolte non iterativamente mediante l'utilizzo della tecnica implicita delle direzioni alternate.

Il trasporto di quantità scalari, come la salinità e la temperatura, è risolto attraverso un modulo avvezione-dispersione che utilizza una tecnica esplicita alle differenze finite basata su una interpolazione quadratica da monte nelle tre dimensioni. Lo schema alle differenze finite, approssimato al quarto ordine, presenta utili caratteristiche in riferimento alla dispersione numerica, alla stabilità ed alla conservazione della massa.

3.1 Geometrie del modello

E' stata costruito un modello del terreno in ambiente GIS relativo all'intera area del porto della Spezia a maglia regolare quadrata di lato 10 metri.

Le informazioni geometriche e batimetriche sono state ricavate dai dati forniti dall'Autorità Portuale della Spezia in occasione dello "*Studio idrodinamico e dei processi diffusivi e dispersivi nello specchio acqueo interno al golfo della Spezia*" (Intecno-DHI 2004).

Rispetto a tale studio, è stata costruita una batimetria di maggior dettaglio al fine di descrivere al meglio i fenomeni idrodinamici nei pressi delle strutture portuali e le variazioni indotte dagli interventi in progetto.

Sulla base del modello del terreno così costruito sono state elaborate 4 diverse batimetrie di calcolo in base alla realizzazione del dragaggio e degli interventi previsti al Terminal del Golfo, Marina di Fossamastra e Marina del Canaletto.

Le 4 batimetrie sono quindi relative alle seguenti configurazioni geometriche:

- stato attuale
- realizzazione del solo dragaggio;
- realizzazione dei soli interventi alle banchine;
- realizzazione del dragaggio e degli interventi alle banchine.

Le batimetrie sono ruotate in senso antiorario di 33° rispetto al nord e sono costituite da 410 x 500 (205000) celle, coprendo un'area complessiva di circa 20 Km².

Nelle seguenti figure da 1 a 4 sono rappresentate le batimetrie sopra citate. In colore grigio sono indicate le aree emerse.

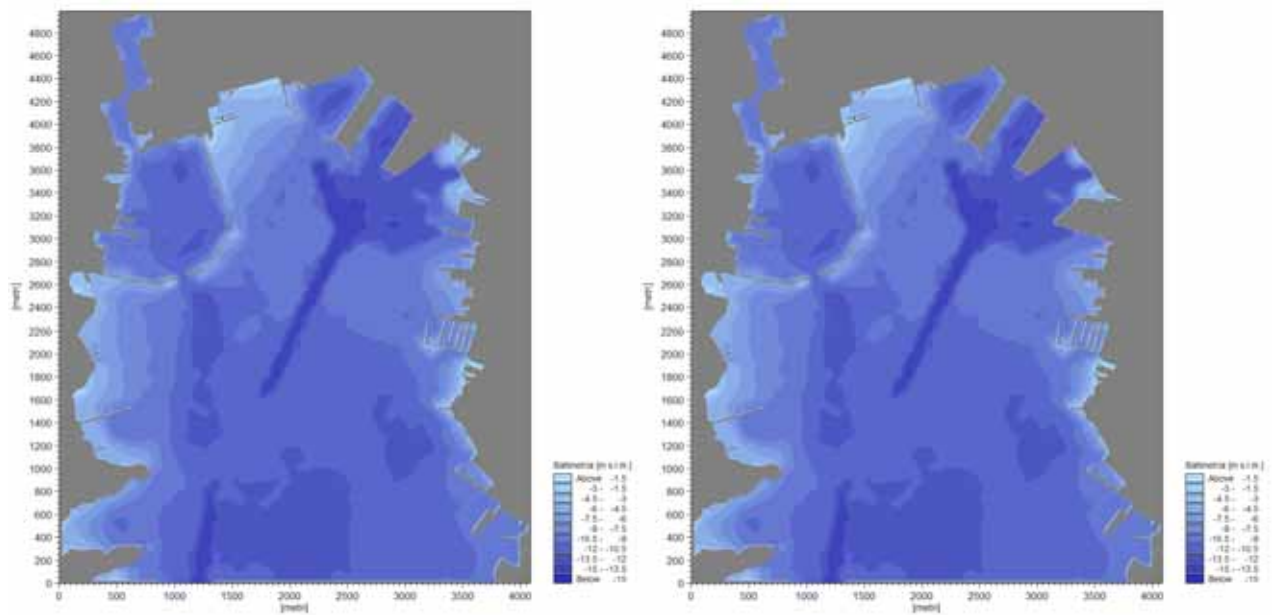


Figure 1 e 2 - Batimetrie di calcolo allo stato attuale delle banchine (1) e successivo agli interventi (2), entrambe con fondo attuale.

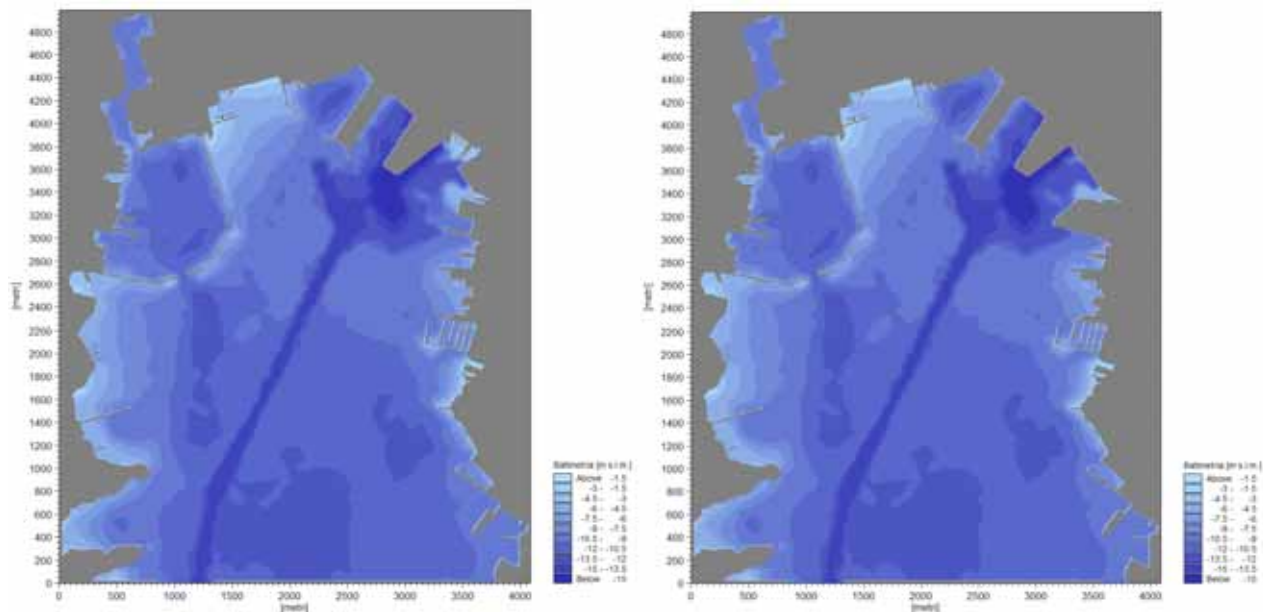


Figure 3 e 4 - Batimetrie di calcolo allo stato attuale delle banchine (3) e successivo agli interventi (4), entrambe con fondo dragato.

Rispetto all'asse verticale, l'area di studio è stata discretizzata in più layer di calcolo in funzione della profondità locale, con altezza pari a 3 metri.

3.2 Condizioni al contorno

Il modello idrodinamico necessita di condizioni al contorno in tutti i punti di calcolo "aperti" della griglia.

In riferimento alle batimetrie descritte al punto 3.1 è quindi necessario imporre delle condizioni al contorno in corrispondenza delle due bocche della diga foranea, che costituisce il limite inferiore dell'area di studio.

Le condizioni al contorno sono state estratte dallo "*Studio idrodinamico e dei processi diffusivi e dispersivi nello specchio acqueo interno al golfo della Spezia*" (Intecno-DHI 2004), nell'ambito del quale è stato costruito un modello multi griglia che, partendo dalla modellazione ad ampia scala di tutto il Mar Ligure e parte del Mar Tirreno, ha permesso di rappresentare, con risoluzione crescente, le caratteristiche locali del golfo della Spezia e dell'area del porto.

Nell'ambito di tale studio sono stati analizzati i due scenari di "calma" e di "tempesta" selezionati anche per la presente analisi. E' stato quindi possibile estrarre direttamente le condizioni al contorno

dai risultati dello studio precedente, la cui affidabilità è stata verificata sulla base del già citato studio ENEA.

Nella seguente figura 5 è riportata una rappresentazione delle diverse griglie di calcolo a risoluzione crescente utilizzate nello studio dei processi diffusivi recentemente concluso.

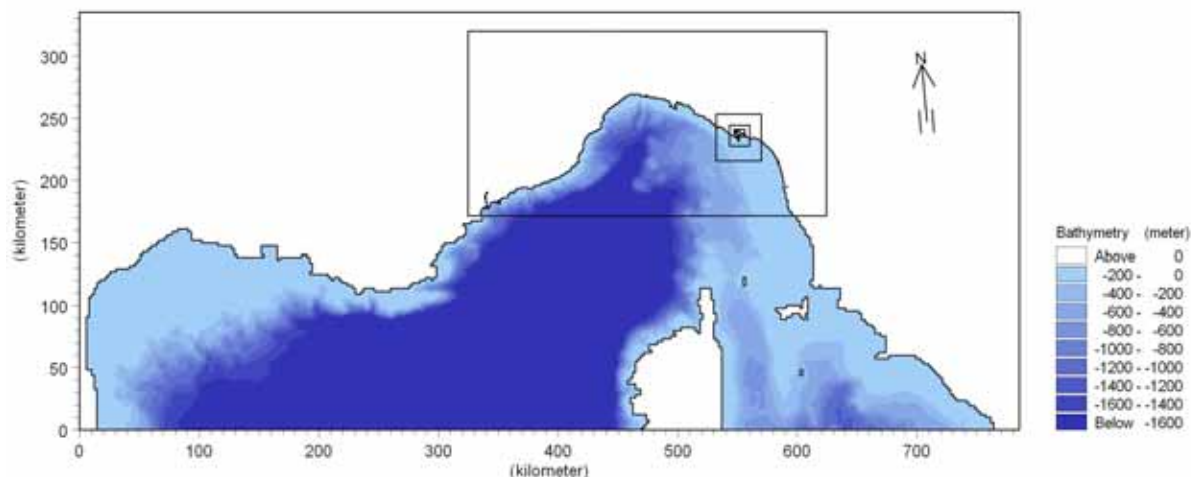


Figura 5 - Batimetrie a differente risoluzione utilizzate nello studio dei processi diffusivi recentemente ultimato.

Il modello multi griglia ha pertanto fornito le serie temporali di livello e velocità di corrente presso le due bocche della diga foranea in corrispondenza dei due scenari climatici considerati nella presente analisi. In particolare, presso entrambe le bocche è stata utilizzata come condizione al contorno una serie temporale di velocità di corrente.

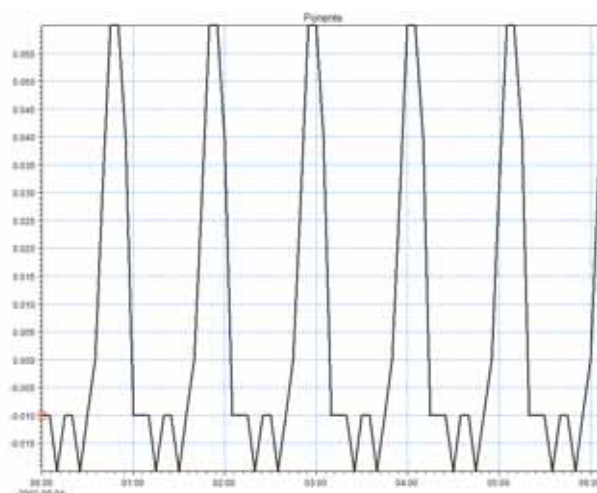


Figura 6 - Serie temporale di velocità in corrispondenza della bocca di ponente della rada.

Nelle figure 6 e 7 sono riportate le serie temporali di velocità relative allo scenario di “calma” risultanti dal modello multi griglia ed utilizzate come condizioni al contorno per il modello di dettaglio qui presentato. Le serie sono caratterizzate un comportamento ciclico con periodo di circa 80 minuti per la bocca di levante e 65 minuti per quella di ponente.

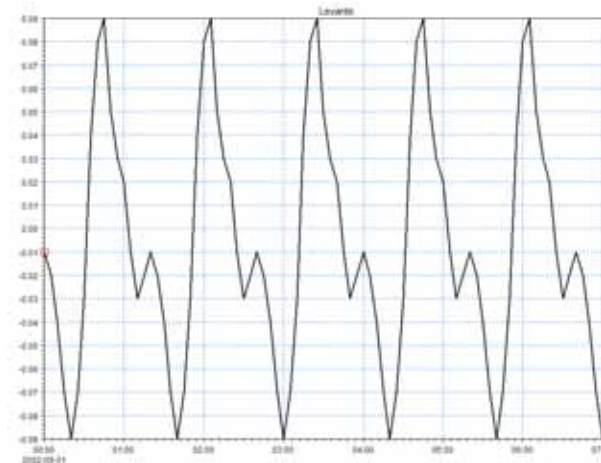


Figura 7 - Serie temporale di velocità in corrispondenza della bocca di levante della rada.

3.3 Caratteristiche dell'acqua di mare

3.3.1 Temperatura dell'acqua

La temperatura dell'acqua è variabile nello spazio e nel tempo durante il periodo di simulazione ed è in particolare condizionata dallo scarico della centrale ENEL, come descritto al paragrafo 3.4.2.

Per l'intera area è stato fissato un valore di temperatura, in assenza di disturbo, pari a 22.5 gradi Celsius.

3.3.2 Salinità dell'acqua

Anche la salinità dell'acqua è variabile nello spazio e nel tempo, in funzione degli apporti di acqua dolce, come descritto al paragrafo 3.4.2.

Per l'intera area è stato fissato un valore di salinità in assenza di disturbo pari a 37.8 PSU.

Entrambi i valori di temperatura e salinità caratteristici per l'area sono stati desunti dall'accurato studio ambientale del Golfo della Spezia affidato nel 1989 all'ENEA/CREA e all'ENEL-DCO/ULP e fornito dall'Autorità Portuale della Spezia.

3.4 Forzanti idrodinamiche

3.4.1 Il vento

Il vento utilizzato per lo scenario di "calma" è il tipico regime di brezza diurno/notturno. I dati di direzione e velocità sono stati estratti dal già citato rapporto ENEA.

In figura 8 sono riportati, per un ciclo di 24 ore, i valori di velocità del vento e le relative direzioni nell'arco di una giornata tipica.

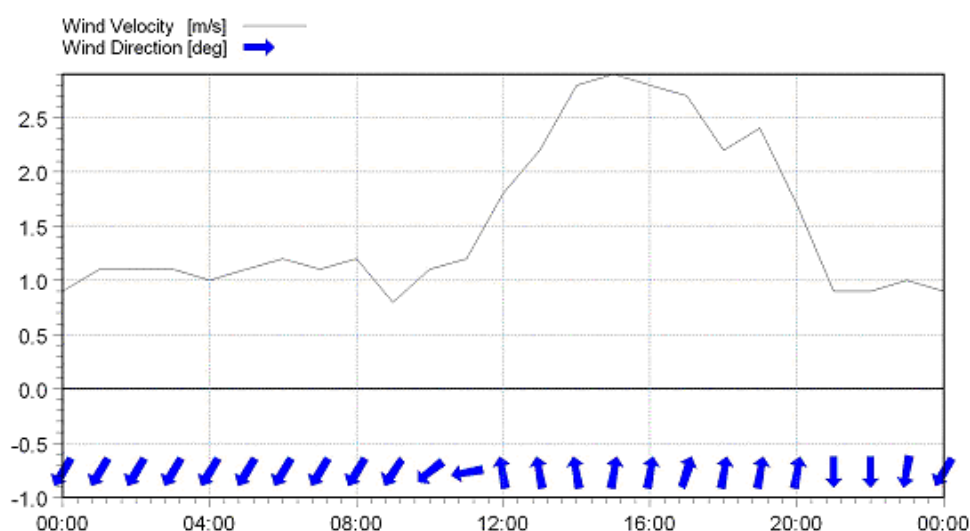


Figura 8 - Serie temporale di vento utilizzata nel modello relativa allo scenario di "calma".

Relativamente allo scenario di "tempesta", al fine di ottenere una condizione estrema per l'andamento delle correnti all'interno della rada, è stato ipotizzato un vento variabile in intensità, da un valore minimo pari a 0 m/s ad uno massimo di 20 m/s (oltre 70 km/h), e, ripetutamente, in direzione (Figura 9).

Tali condizioni risultano più gravose, in termini di intensità di correnti generate, rispetto ad un vento costante anche superiore in intensità al valore massimo considerato per il presente studio. Questo effetto è stato verificato effettuando alcune simulazioni con diverse combinazioni di intensità e direzione del vento ed è suffragato dall'esperienza maturata in precedenti studi analoghi.

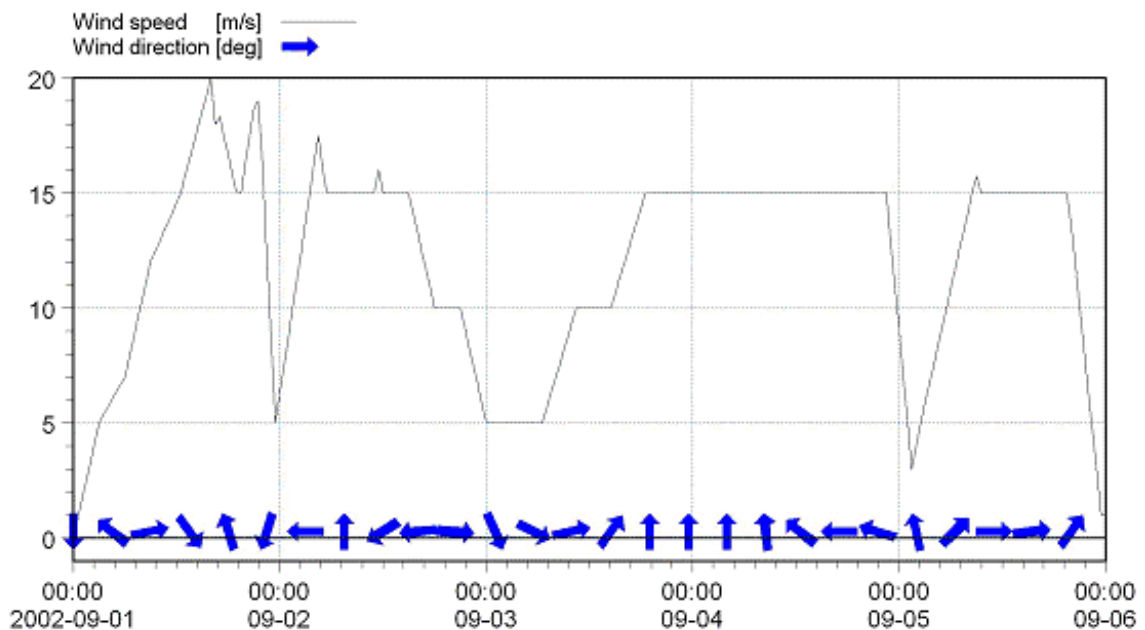


Figura 9 - Serie temporale di vento, utilizzata nel modello, relativa allo scenario di "tempesta".

3.4.2 Immissioni in rada

Il modello comprende due immissioni di acqua all'interno della rada della Spezia:

- il canale Lagora, che determina un apporto di acqua dolce;
- lo scarico della centrale elettrica, che riversa in rada acqua con temperatura superiore a quella prelevata dal corpo idrico ricettore.

Oltre a questi, sono naturalmente presenti nell'area diversi scarichi minori i cui apporti possono essere considerati trascurabili ai fini del presente studio.

Nella figura 10 è riportata la localizzazione del punto di prelievo e delle due immissioni relativamente allo stato di fatto.

Nella tabella 1 è invece riportato un prospetto riassuntivo relativo ai valori di portata, salinità e temperatura delle due immissioni considerate nel modello e della derivazione della centrale elettrica.

I valori di portata del Canale Lagora sono differenti tra lo scenario 1 ("calma") e lo scenario 2 ("tempesta"), ipotizzando un deflusso maggiore, pari a 50 m³/s all'occorrere dell'evento estremo.

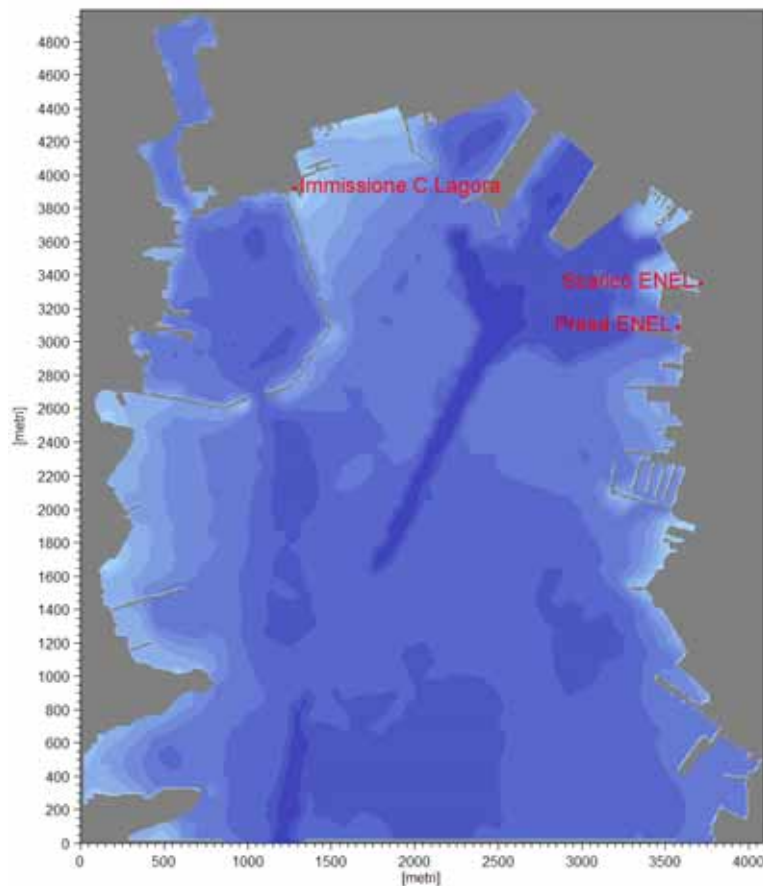


Figura 10 - Localizzazione delle immissioni e del punto di prelievo.

La portata del Canale Lagora relativa allo scenario estremo è stata definita in considerazione dei valori di massima piena per tempi di ritorno $T=50, 200$ e 500 anni riportati nel relativo Piano di Bacino ($Q_{50} = 183 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{200} = 265 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{500} = 318 \text{ m}^3/\text{s}$), e presenta una ricorrenza di circa 5 anni.

L'acqua apportata dal canale è considerata dolce, quindi con salinità nulla, rispetto ad un valore indisturbato del mare pari a 37.8 psu, ed a temperatura pari a quella della rada.

Relativamente alla centrale ENEL è invece considerato uno scarico costante di $35 \text{ m}^3/\text{s}$, caratterizzato da un eccesso di temperatura pari a 9° C , rispetto ai 22.5° C assunti per l'acqua di mare indisturbata.

I dati relativi allo scarico della centrale ENEL sono stati desunti dalla relazione di sintesi " *Monitoraggio ambientale delle acque del golfo della Spezia ai sensi della L. 502/93 (Art. 3 C. 2) - Anni 1994 e 1995*".

	Canale Lagora	Presa della centrale	Scarico della centrale
Portata - Scenario 1 [m ³ /s]	5	35	35
Portata - Scenario 2 [m ³ /s]	50	35	35
Salinità [psu] (valore mare indisturbato: 37.8)	0	37.8	37.8
Temperatura [°C] (valore mare indisturbato: 22.5)	22.5	22.5	31.5

Tabella 1 - Prospetto relativo ai valori di portata, salinità e temperatura delle immissioni e derivazioni considerate nel modello.

3.5 Parametri del modello

3.5.1 Passo di integrazione

Il passo temporale di integrazione (Dt) è uno dei termini fondamentali per la stabilità della soluzione numerica. Un'indicazione del suo valore è data dal numero di Courant, il quale presuppone però la conoscenza a priori della velocità massima. Nel caso in esame è stato utilizzato un valore pari a 3 secondi che, in relazione alle dimensioni delle celle di calcolo, pari a 10 m, può supportare numeri di Courant adeguati anche per velocità di deflusso elevate.

3.5.2 Viscosità turbolenta

La viscosità turbolenta è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e viene simulata nel modello tramite la formulazione di Smagorinsky.

Tale parametro, ancor più del precedente, è di difficile valutazione e può essere tarato solo in presenza di misure finalizzate alla valutazione della distribuzione della velocità in una sezione. L'esperienza ha mostrato come una corretta valutazione di questo termine sia indispensabile in corrispondenza di dinamiche che comprendano al loro interno zone vorticosi di 1-2 ordini di grandezza superiori alla dimensione del passo di griglia.

Nel caso in esame il termine assume un'importanza relativa ed è variabile in funzione delle grandezze idrauliche locali sulla base della formulazione di Smagorinsky, il cui coefficiente di riferimento è stato fissato pari a 0.4 per gli assi orizzontali e 0.2 per quello verticale.

3.5.3 Scabrezza del fondo

La scabrezza del fondo presenta scarsa importanza per lo studio in esame, date le elevate profondità e le ridotte velocità di corrente nell'area.

E' stato comunque fissato un valore di rugosità pari a 0.05 metri, uniforme su tutta l'area di studio.

3.5.4 Periodo di simulazione

Per tutti gli scenari geometrici e climatici considerati è stata simulata una finestra temporale di 4 giorni, analizzando i risultati relativi al solo quarto giorno. E' stato infatti verificato come un intervallo di 3 giorni consenta di non risentire delle condizioni iniziali imposte al modello.

L'intervallo temporale di analisi, pari ad 1 giorno, il quarto di simulazione, risulta adeguato allo studio dei fenomeni idrodinamici e delle variazioni indotte dagli interventi in progetto.

4. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

4.1.1 Scenario di "calma" con fondo attuale - simulazioni a) e b)

4.1.1.1 *Risultati in forma planimetrica*

Il comportamento idrodinamico della rada del porto della Spezia risulta, come noto, fortemente variabile nel tempo.

Le correnti presenti variano frequentemente in direzione ed intensità anche con intervallo di tempo limitato.

Relativamente all'area più prossima alla diga foranea, possono individuarsi due fasi caratteristiche ricorrenti, una prima in cui si ha un ingresso nella rada dalla bocca di levante ed un flusso in uscita da quella di ponente, con conseguente direzione della corrente verso ovest, ed una seconda con flusso contrario.

Tra queste due fasi, si riscontrano altri scenari caratterizzati da velocità inferiori e maggiore variabilità nelle direzioni di flusso.

Le due fasi si alternano ripetutamente con frequenza variabile nel tempo, assumendo valori di velocità al picco non costanti. Mediamente, l'intervallo di tempo tra una fase e la successiva è di 70 minuti.

Tale comportamento risulta uniforme sia allo stato di fatto sia a seguito della realizzazione degli interventi previsti.

Anche nell'area centrale della rada si registra un comportamento ciclico, pur caratterizzato da minore regolarità rispetto alla zona prossima alla diga. Le correnti presentano direzioni variabili nel tempo risentendo sia del flusso tra le due bocche, sia della circolazione indotta dalla presa e scarico ENEL. Le correnti in questa parte della rada sono caratterizzate da velocità minori, conseguentemente alle frequenti variazioni di direzione.

Il comportamento nell'area di Marina di Fossamastra risulta prevalentemente condizionato dalla presenza dell'impianto ENEL. In quest'area le correnti sono pertanto meno variabili nel tempo, poiché caratterizzate dalla presa e scarico della centrale, i cui valori di portata sono assunti costanti.

La distribuzione delle correnti in quest'area risente in modo più significativo degli interventi previsti, che determinano inevitabilmente una parziale alterazione delle direzioni del flusso in funzione delle diverse geometrie.

Il flusso risulta orientato prevalentemente in direzione ovest, sebbene si registrino fenomeni circolatori tridimensionali molto complessi nelle aree interne alle banchine, conseguenti alla presa e scarico dell'impianto ENEL.

Nelle seguenti figure da 11 a 14 sono rappresentate le correnti in superficie in due diversi istanti temporali, relativamente allo stato di fatto ed a seguito degli interventi in riferimento allo scenario di "calma" con fondo attuale - simulazioni a) e b). E' possibile apprezzare la diversa distribuzione dei vettori di velocità tra due istanti temporali distanti circa 40 minuti l'uno dall'altro.

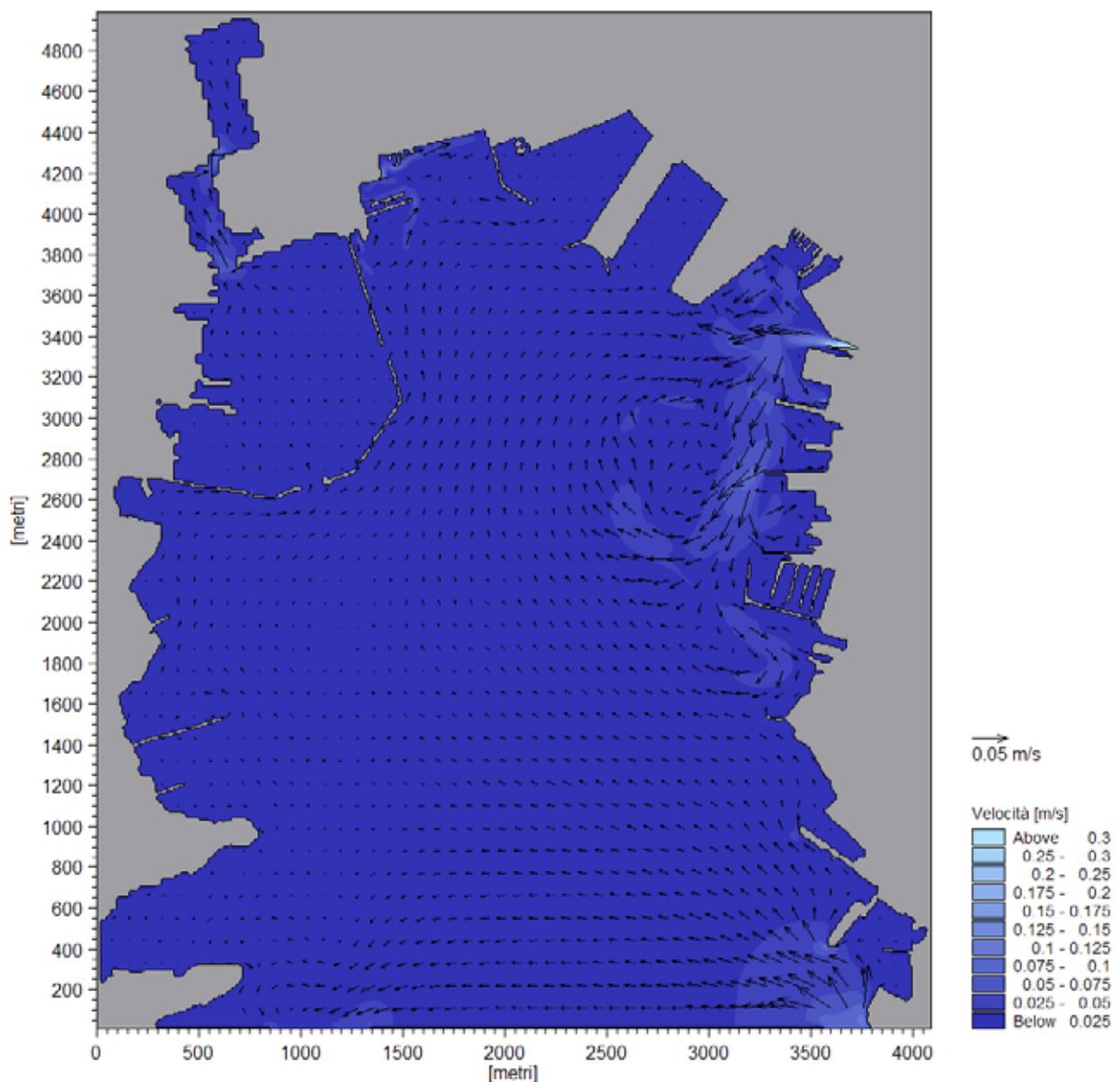


Figura 11 - Rappresentazione delle velocità superficiali di corrente in fase di ingresso dalla bocca di levante, stato di fatto - simulazione a).

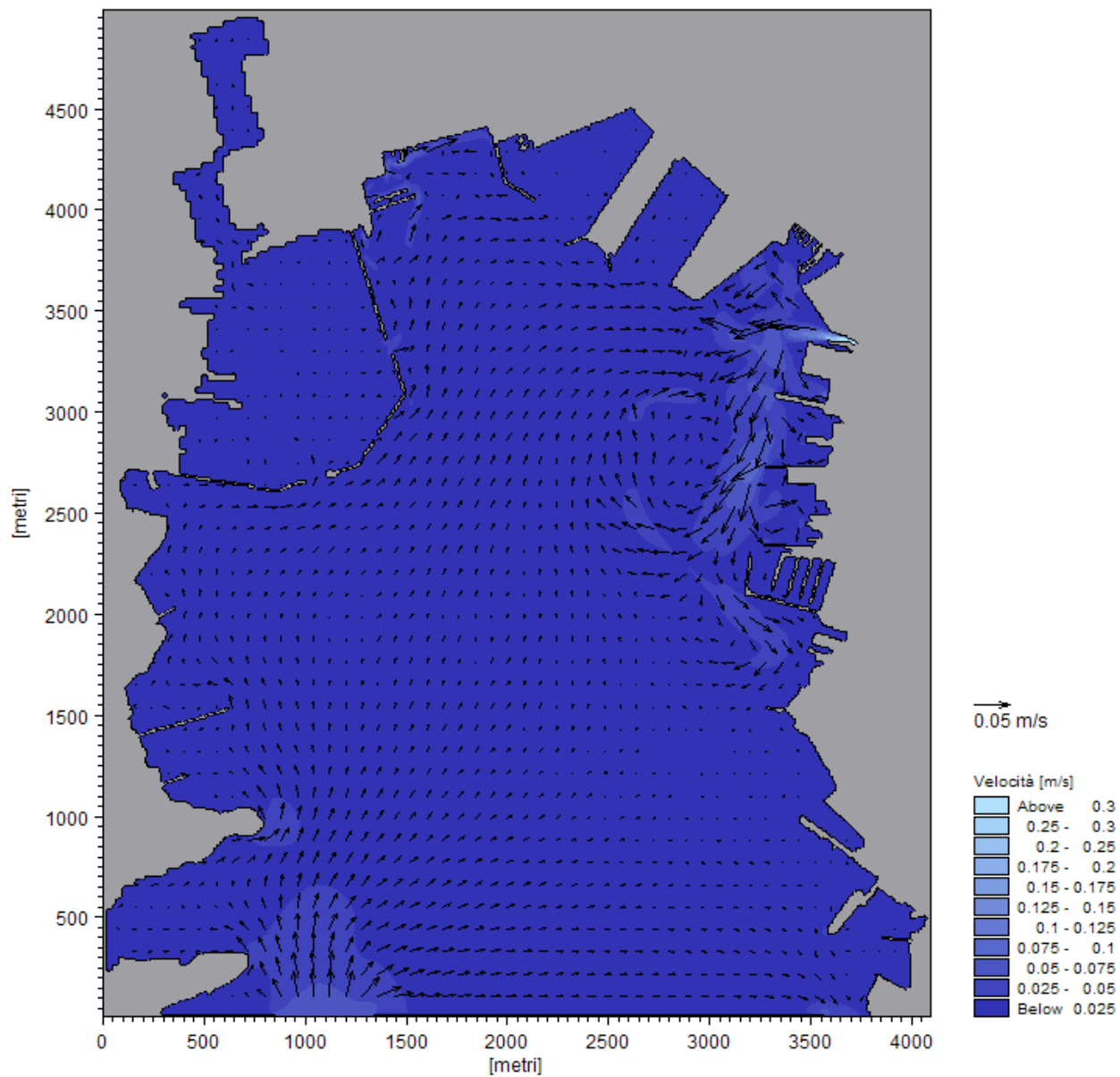


Figura 12 - Rappresentazione delle velocità superficiali di corrente in fase di ingresso dalla bocca di ponente, stato di fatto - simulazione a).

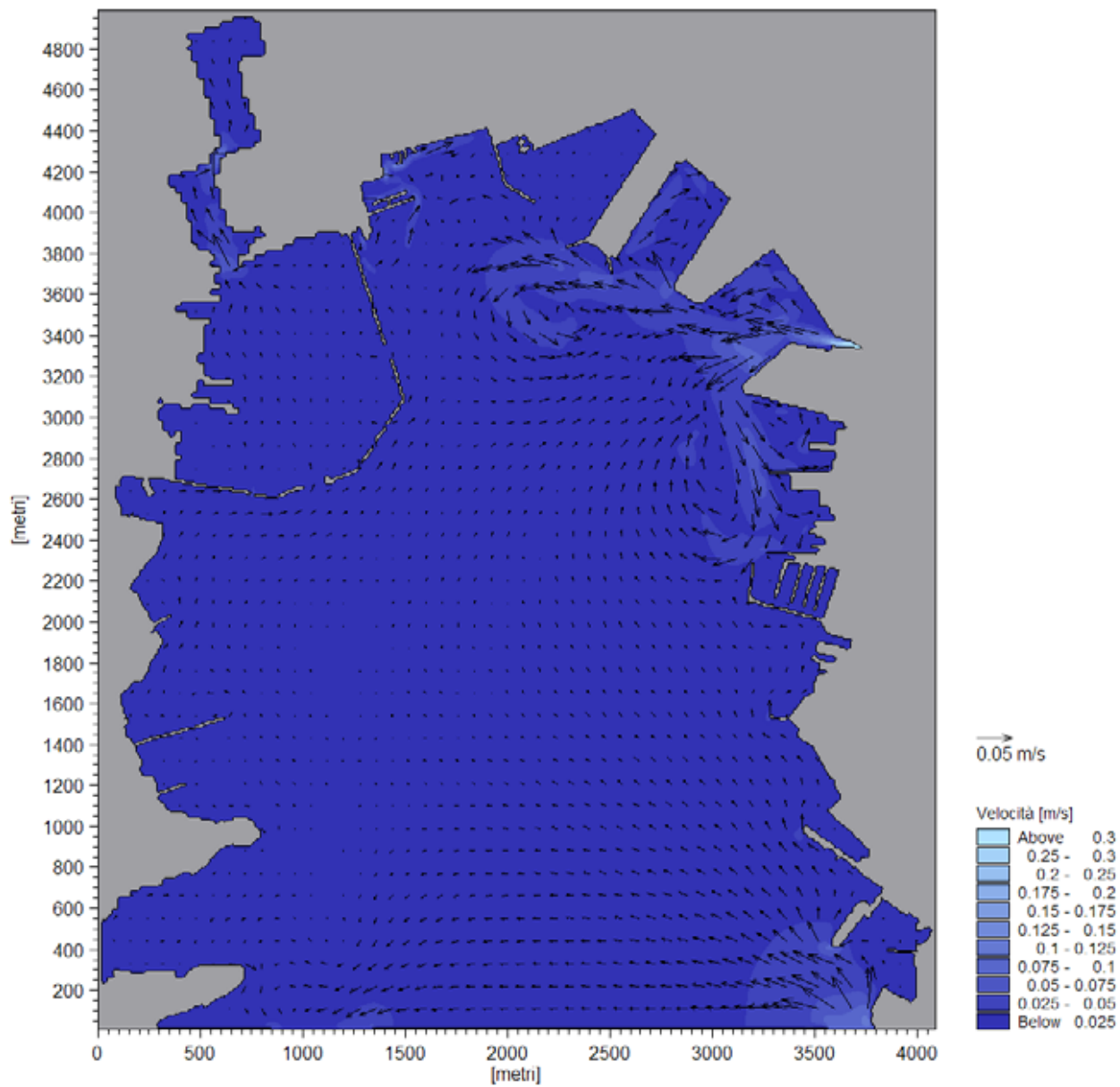


Figura 13 - Rappresentazione delle velocità superficiali di corrente in fase di ingresso dalla bocca di levante, stato post interventi - simulazione b).

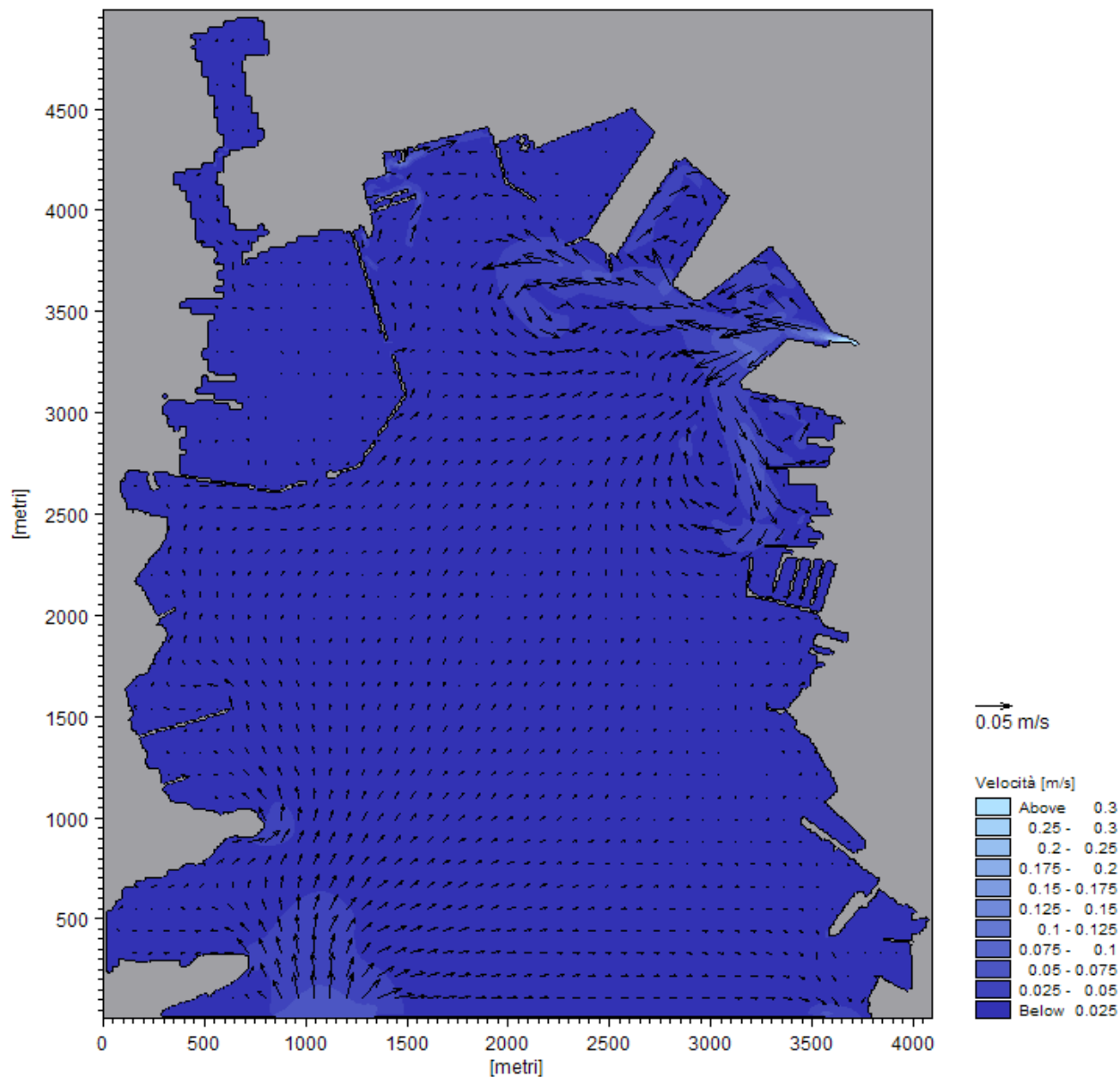


Figura 14 - Rappresentazione delle velocità superficiali di corrente in fase di ingresso dalla bocca di ponente, stato post interventi - simulazione b).

L'analisi comparativa tra le figure 11 - 13 e 12 - 14 fornisce una prima informazione relativa a come gli interventi in progetto determinino una parziale alterazione dei flussi di corrente nella zona del Terminal del Golfo ove è presente lo scarico della centrale ENEL.

In profondità, le direzioni di flusso risultano non sempre in accordo con quelle calcolate in superficie. In particolare, il comportamento risulta difforme nell'area del diffusore dello scarico ENEL dove, conseguentemente all'eccesso di temperatura presente, si riscontrano gradienti di densità verticali che portano a flussi in profondità di direzione anche opposta a quella in superficie.

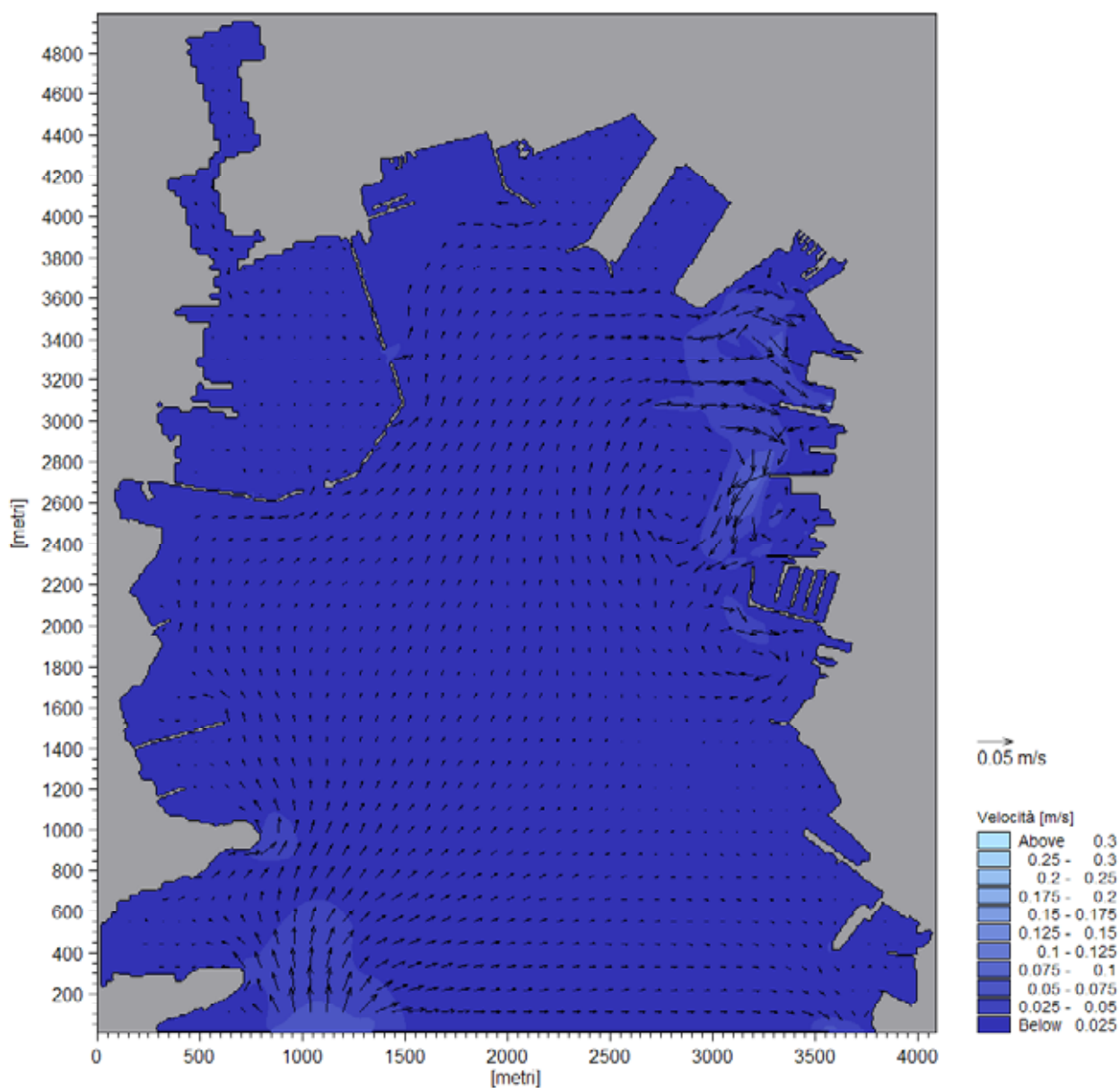


Figura 15 - Rappresentazione delle velocità di corrente in fase di ingresso dalla bocca di ponente alla profondità di -6 m, nello stesso istante temporale della figura 12 - simulazione a).

Le figure 15 e 16 presentano le distribuzioni delle velocità di corrente nel secondo strato di calcolo allo stato di fatto ed a seguito della realizzazione degli interventi previsti, nella fase di flusso in ingresso dalla bocca di ponente. L'istante temporale considerato è lo stesso delle figure 12 e 14, rispetto alle quali è possibile verificare il diverso comportamento dei flussi tra la superficie e le profondità di -6 m s.l.m..

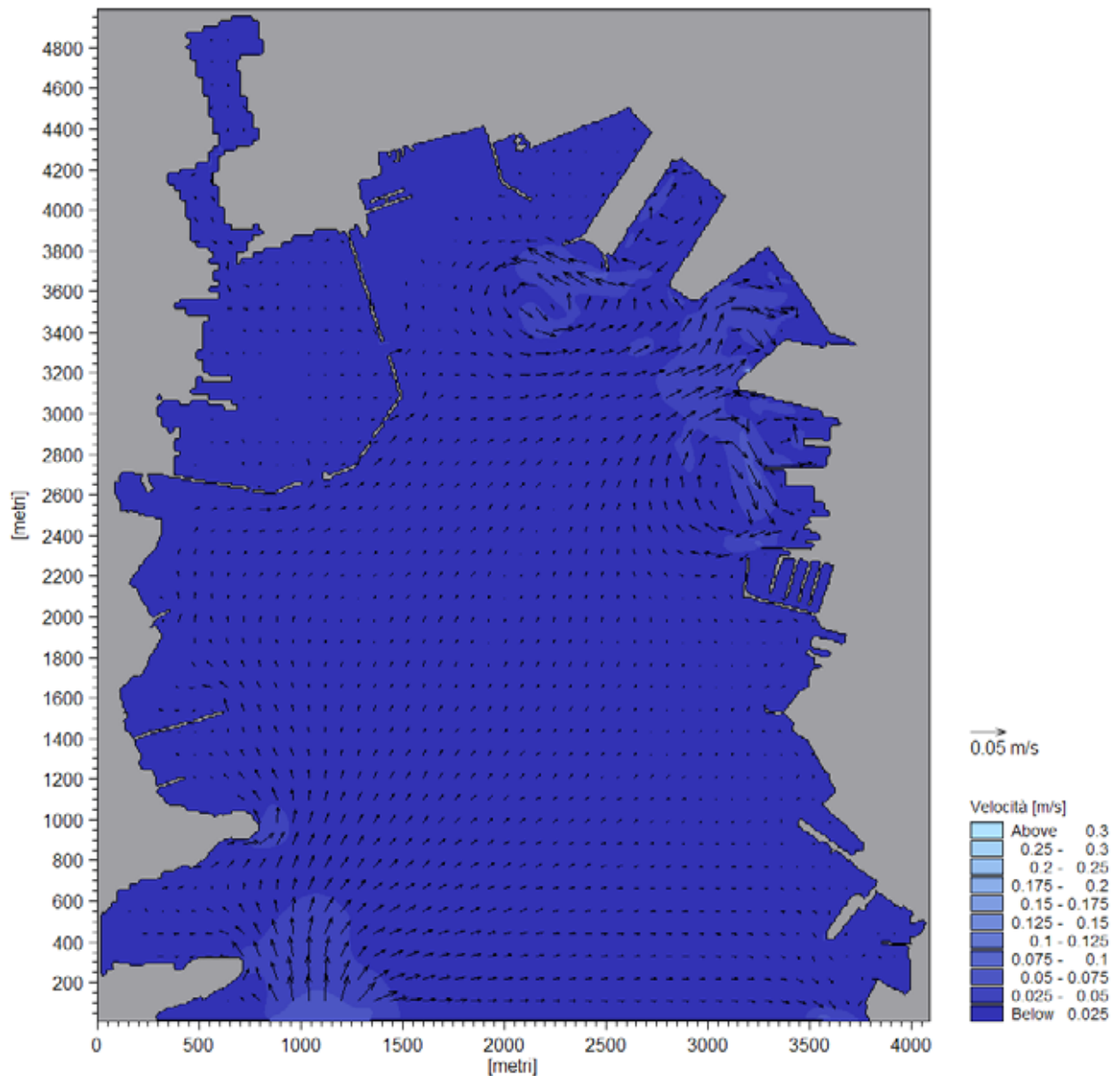


Figura 16 - Rappresentazione delle velocità di corrente in fase di ingresso dalla bocca di ponente alla profondità di -6 m, nello stesso istante temporale della figura 14 - simulazione b).

Anche i valori di salinità e temperatura risultano variabili durante il periodo di simulazione, pur mantenendo la stessa orientazione del gradiente di densità indotto. Nelle figure 17 e 18 sono presentate, a titolo di esempio, le distribuzioni di salinità e temperatura in un particolare istante di simulazione, relativamente allo stato di fatto delle banchine.

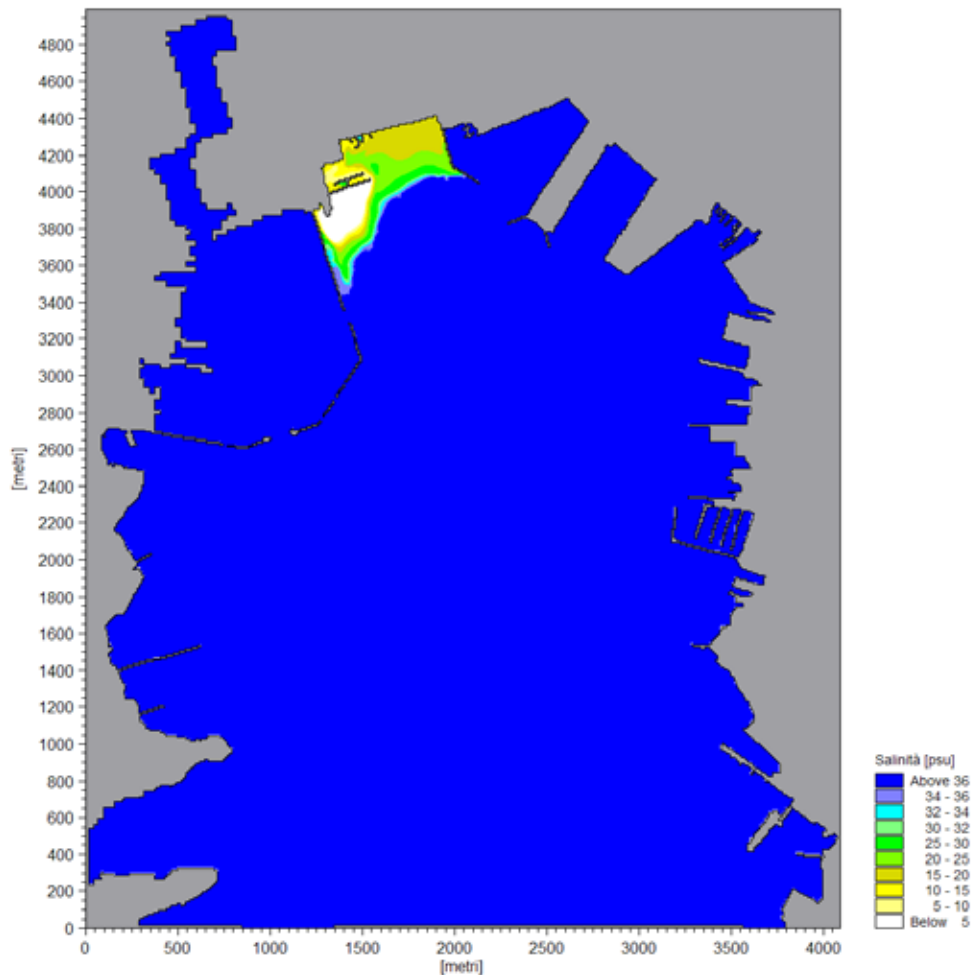


Figura 17 - Distribuzione della salinità superficiale dell'acqua relativa allo stato di fatto in un particolare istante della simulazione a).

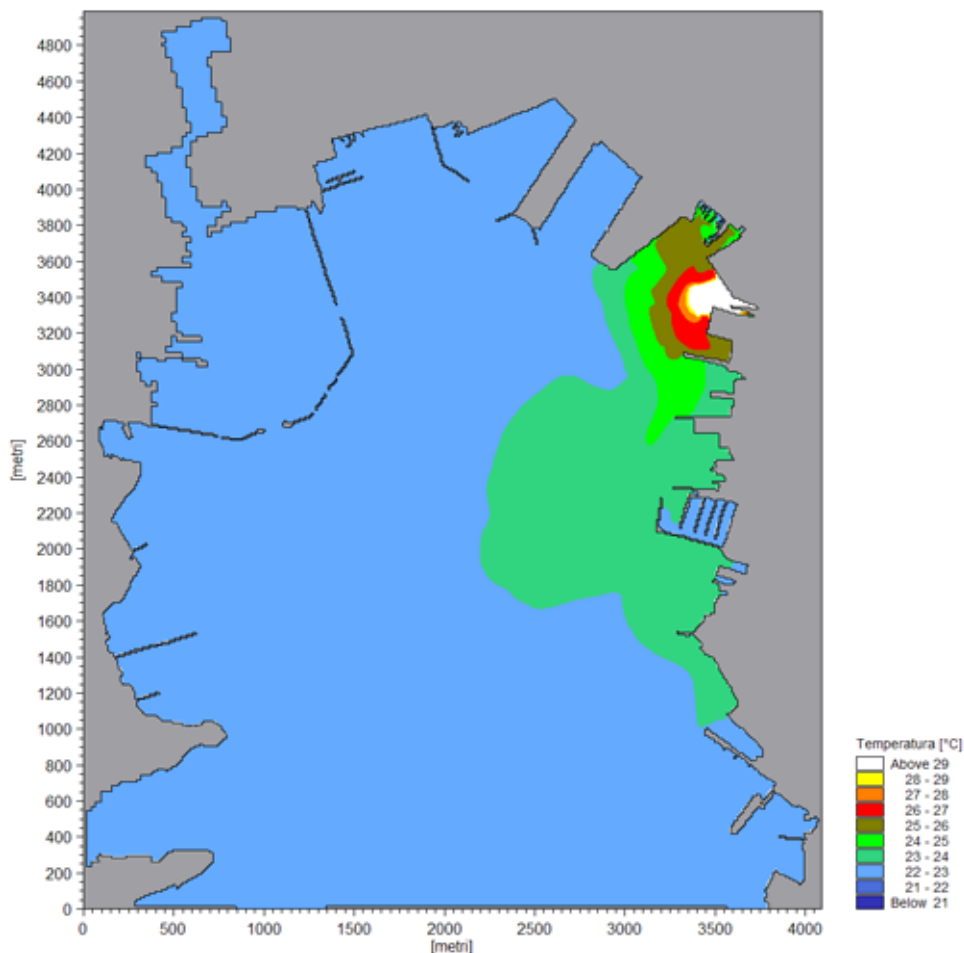


Figura 18 - Distribuzione della temperatura superficiale dell'acqua relativa allo stato di fatto in un particolare istante della simulazione a).

4.1.1.2 Risultati in forma grafica

Data la forte variabilità che caratterizza le correnti interne alla rada, al fine di valutare l'influenza indotta dagli interventi in progetto è stato necessario adottare una forma di rappresentazione dei risultati differente da quella planimetrica fin qui utilizzata.

La rappresentazione planimetrica non offre infatti una facile possibilità di confronto tra i due scenari geometrici, data la forte variabilità temporale delle grandezze idrauliche all'interno del singolo scenario.

Pertanto, si è scelto di analizzare il comportamento idrodinamico nei vari scenari in alcuni punti di riferimento, distribuiti su tutta l'area.

I punti adottati come riferimento per l'analisi sono rappresentati nella figura 19.

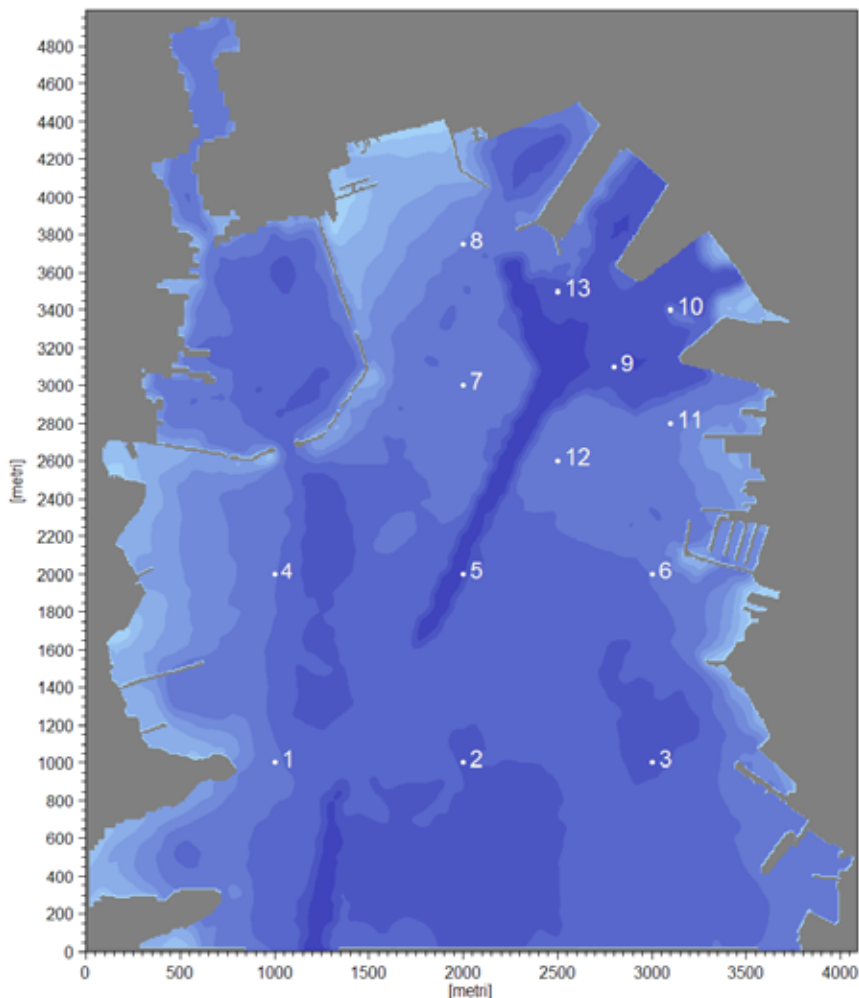


Figura 19 - Localizzazione dei punti di riferimento per il confronto tra stato di fatto e post interventi nelle diverse simulazioni.

In corrispondenza dei punti così individuati sono state estratte le curve relative ad intensità e direzione della corrente nei diversi scenari di simulazione.

In particolare, la direzione della corrente è espressa in gradi rispetto all'orientazione dell'asse y (verticale) della batimetria di calcolo, a sua volta ruotata di -33° rispetto al Nord geografico.

La scala dell'asse cartesiano relativo alla direzione, nei grafici presentati a seguire, è variabile da punto a punto al fine di rendere più semplice l'analisi delle differenze tra la geometria relativa allo stato di fatto ed a seguito degli interventi.

I grafici così costruiti permettono un'analisi più immediata delle differenze indotte nel comportamento idrodinamico dagli interventi in progetto rispetto alla rappresentazione planimetrica fin qui adottata.

Le figure da 20 a 32 presentano le velocità di corrente e le relative direzioni nel primo layer di calcolo (superficiale) in riferimento allo scenario di "calma" con fondo attuale - simulazioni a) e b).

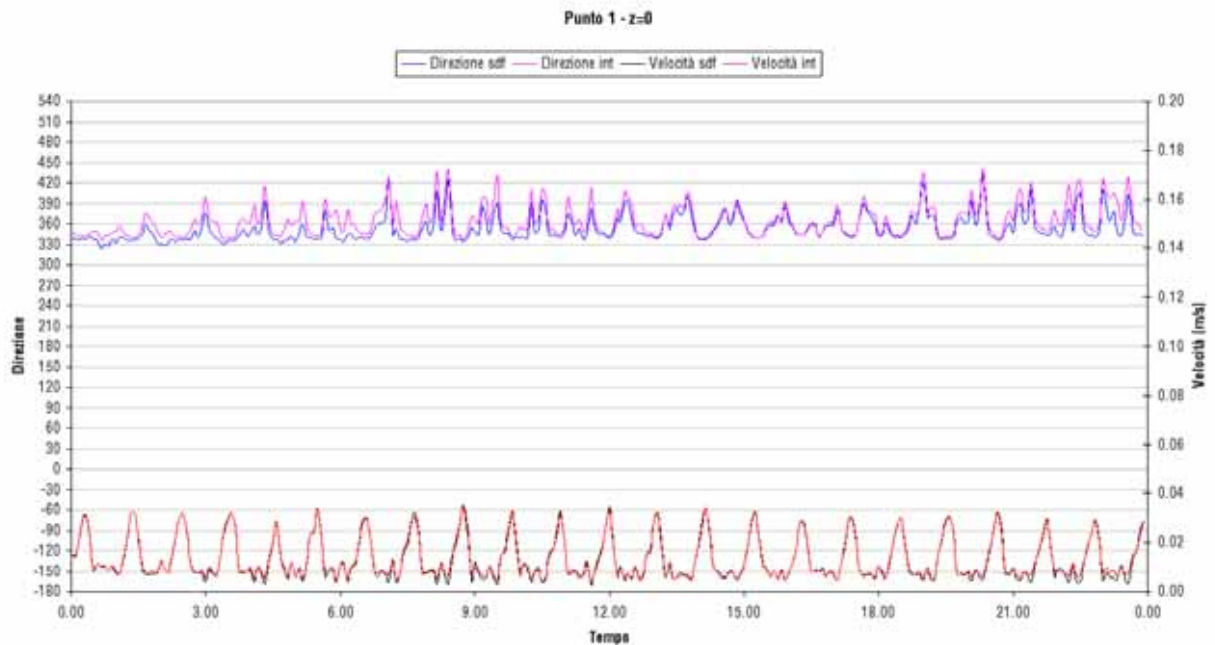


Figura 20 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 1 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

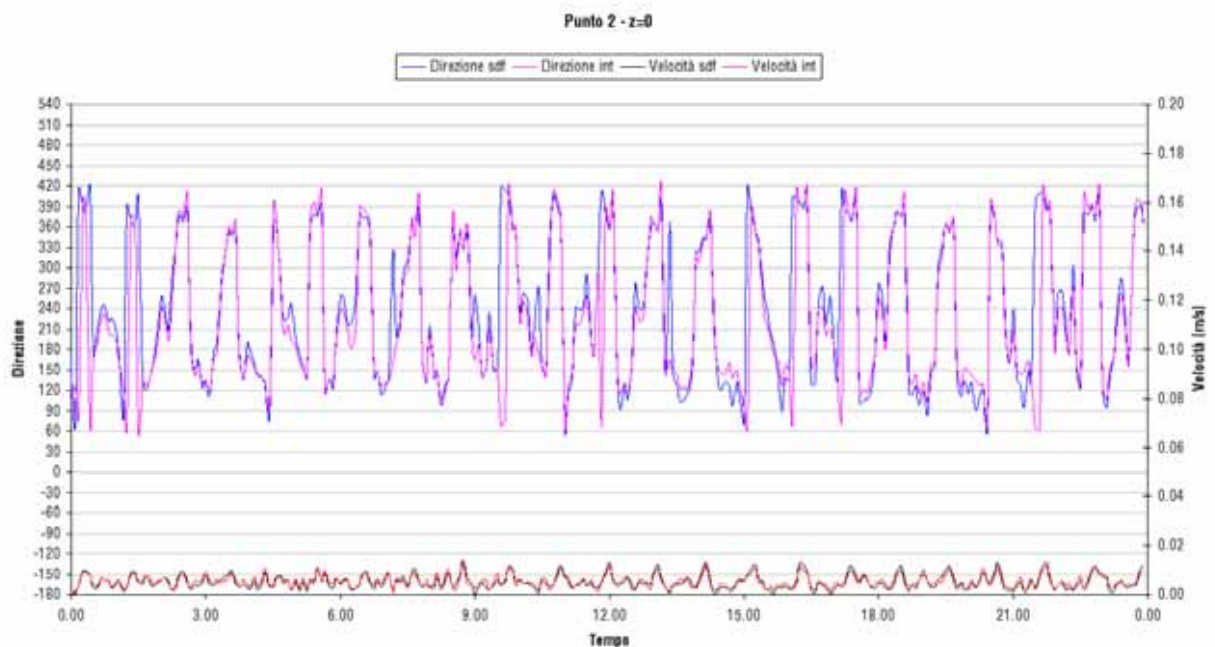


Figura 21 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 2 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

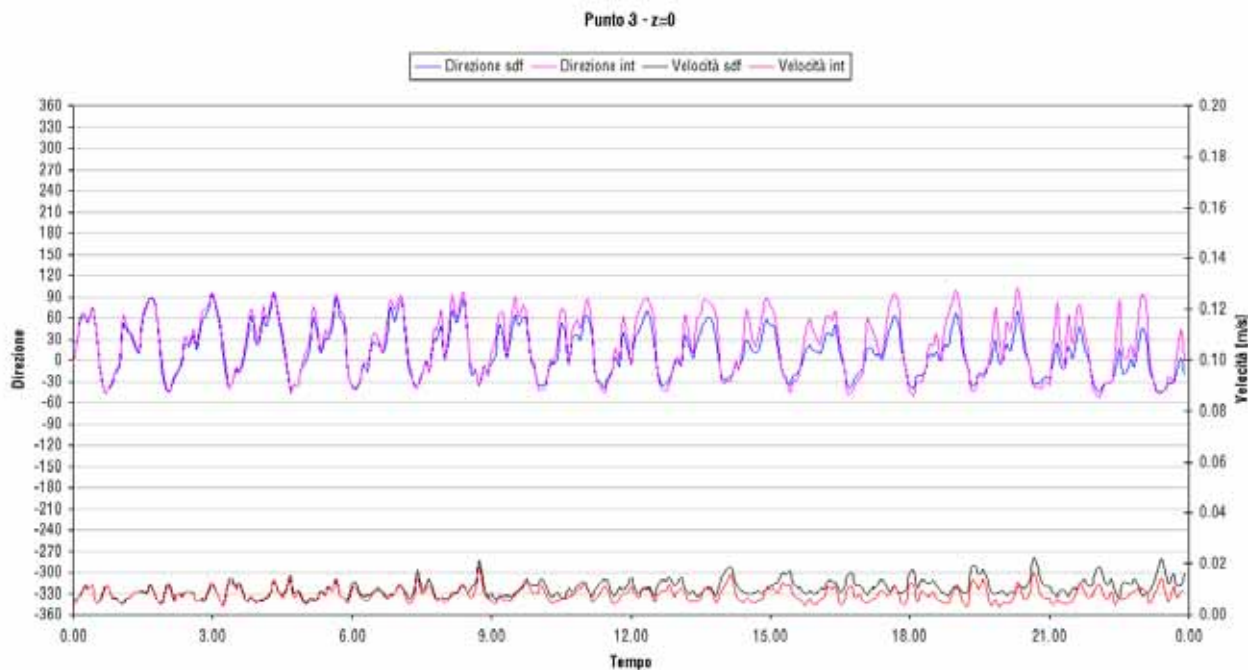


Figura 22 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 3 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

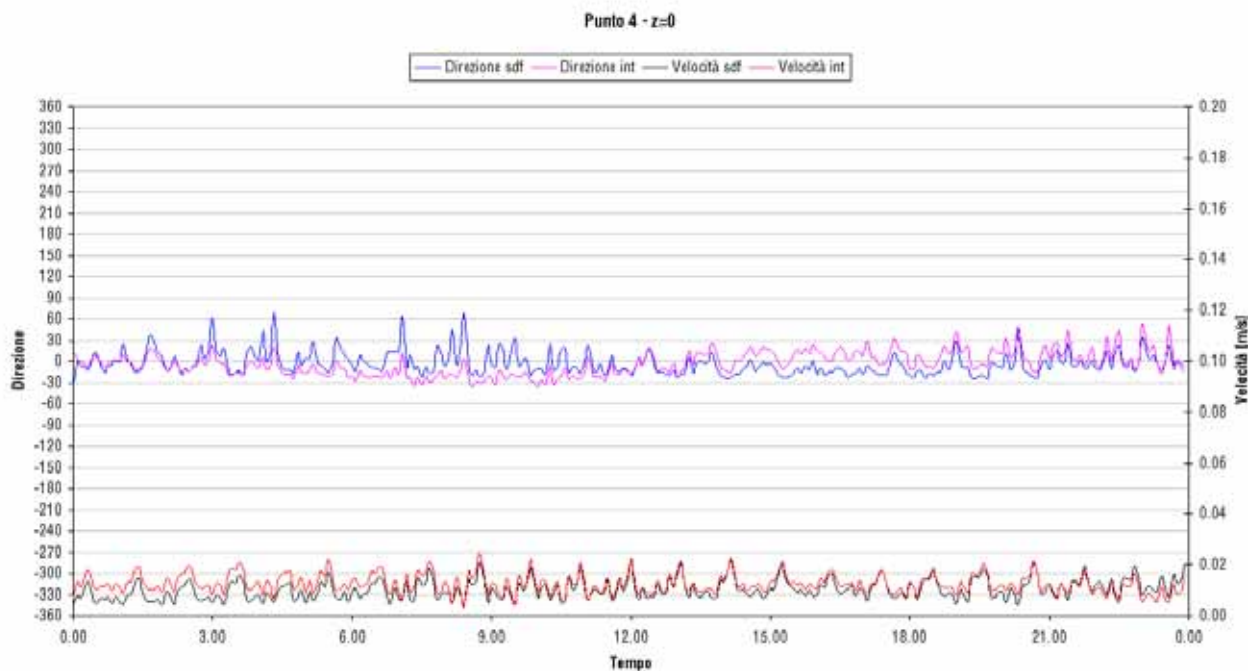


Figura 23 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 4 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

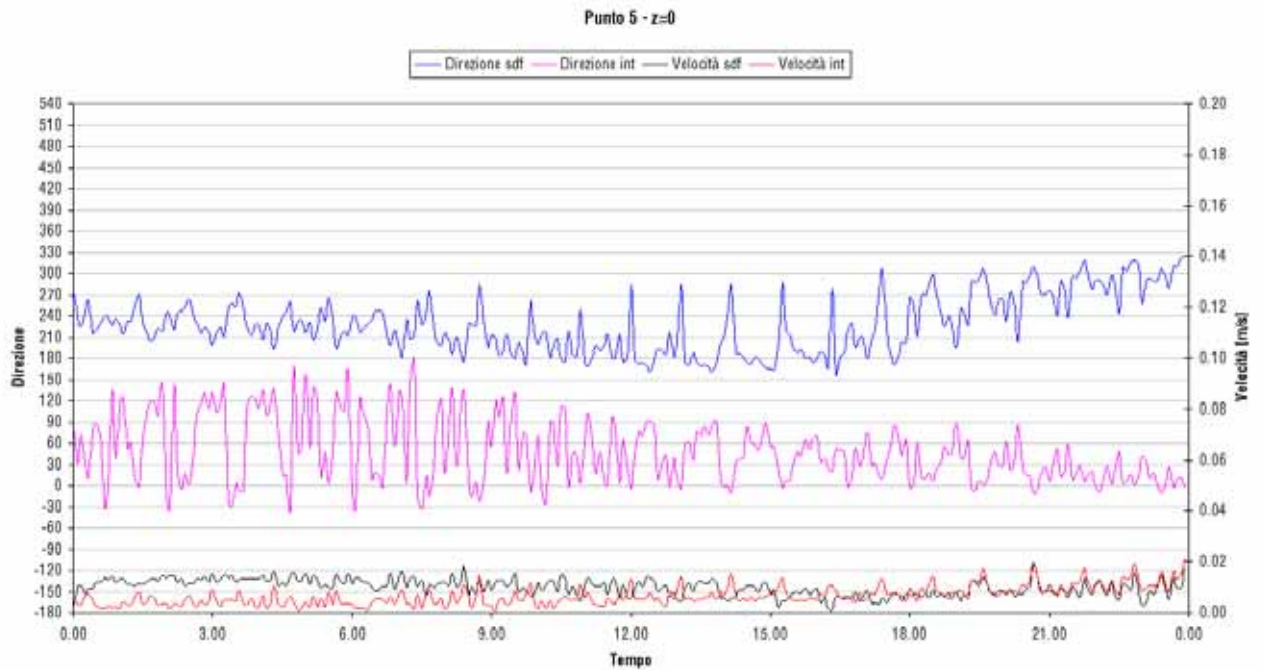


Figura 24 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 5 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

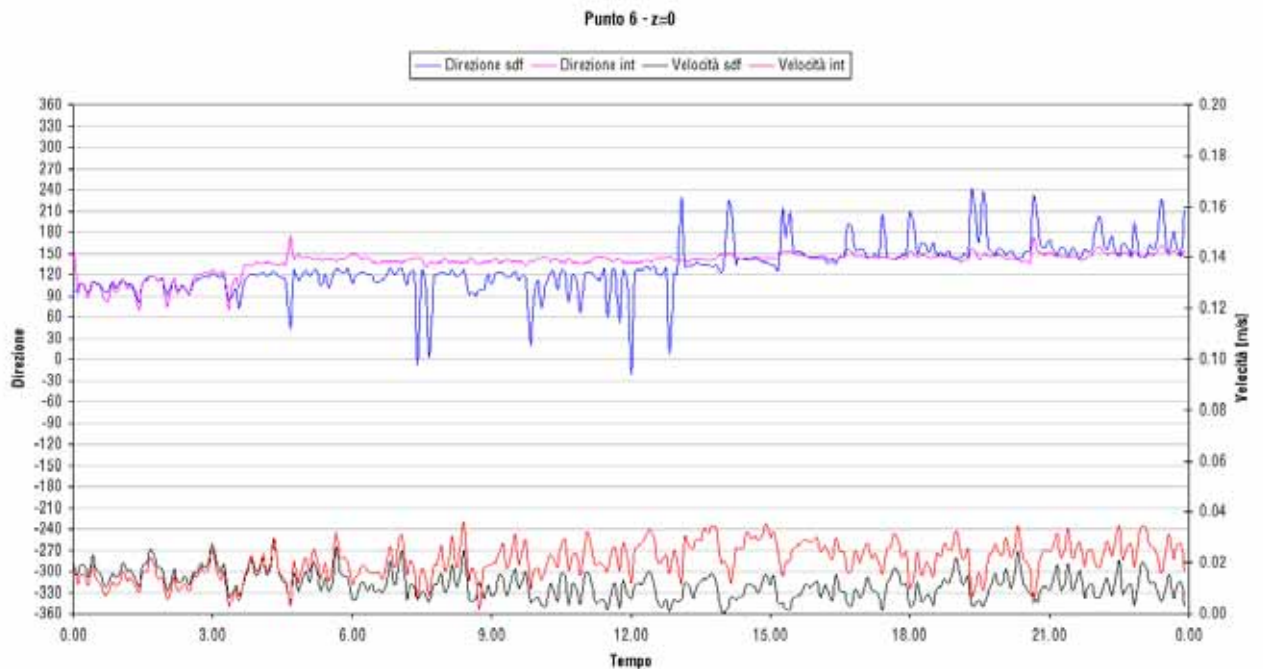


Figura 25 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 6 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

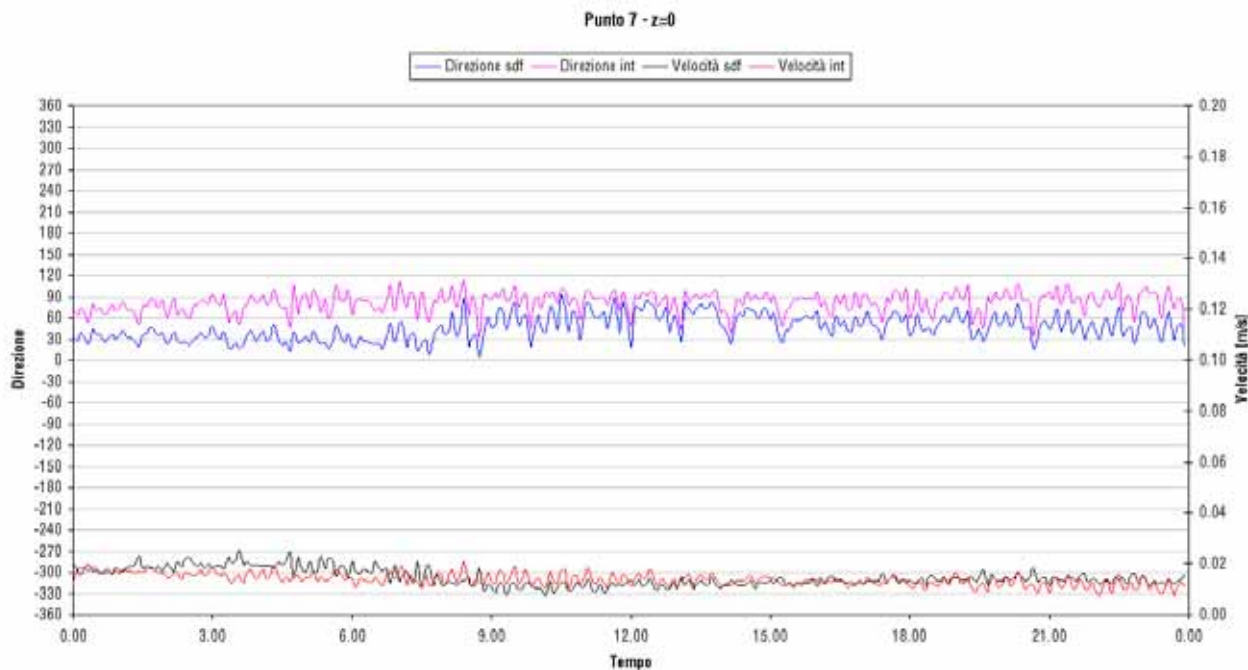


Figura 26 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 7 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

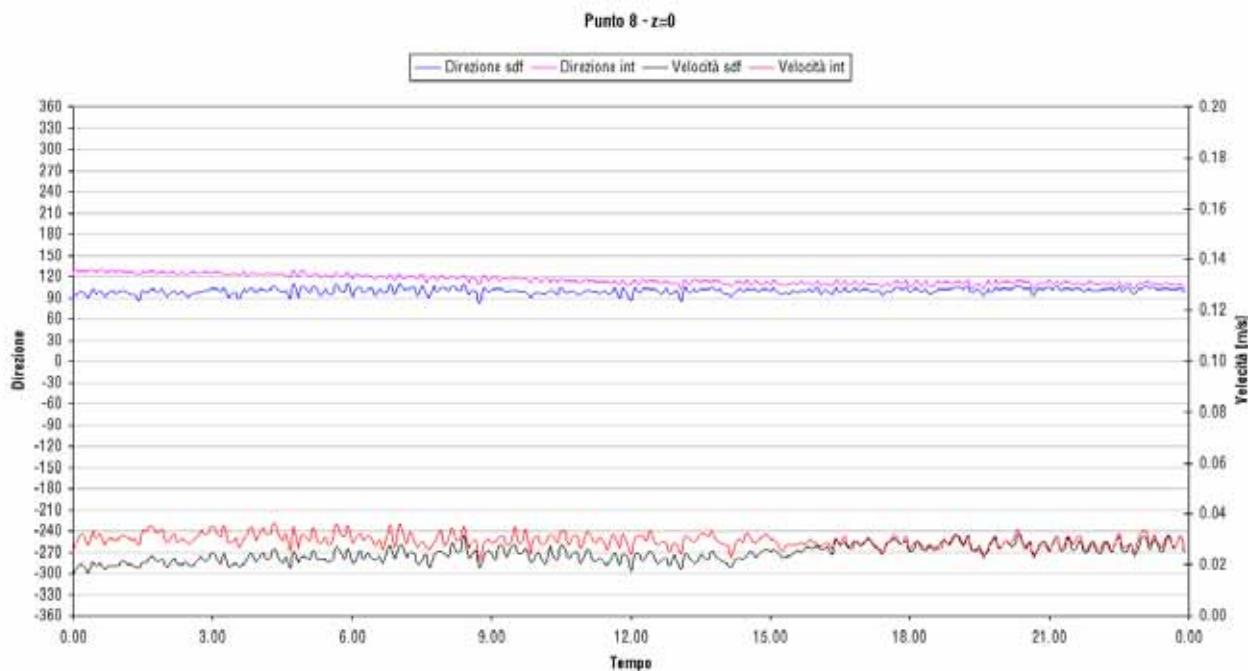


Figura 27 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 8 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

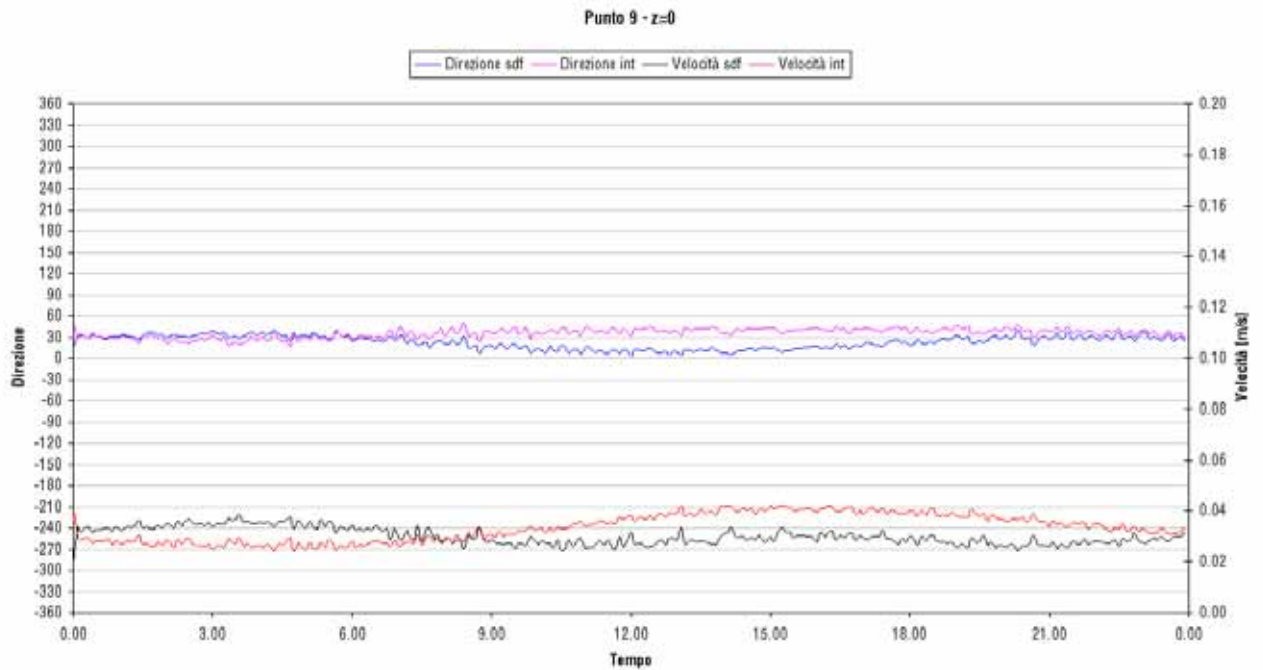


Figura 28 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 9 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

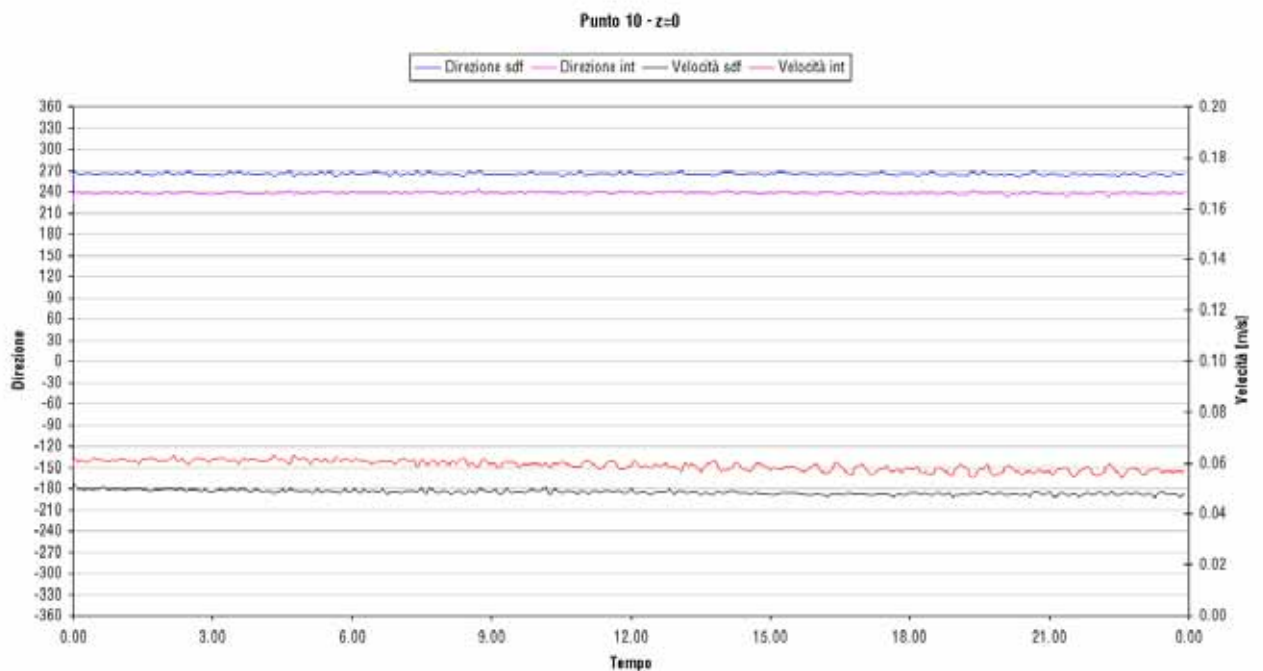


Figura 29 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 10 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

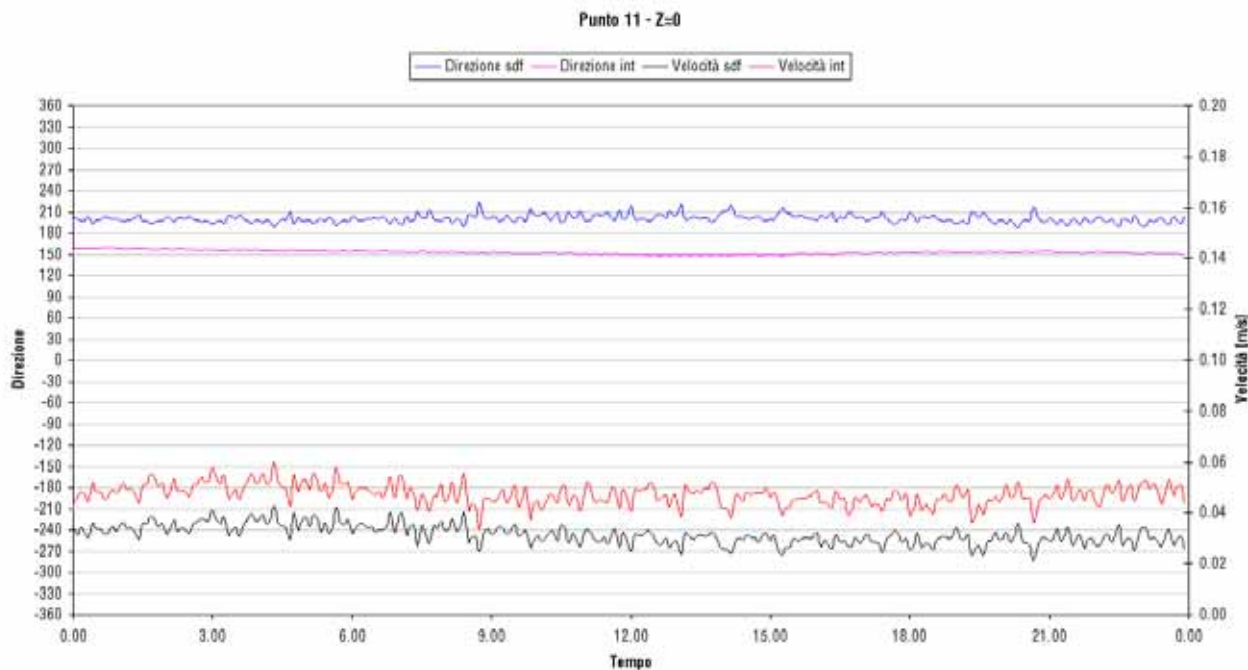


Figura 30 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 11 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

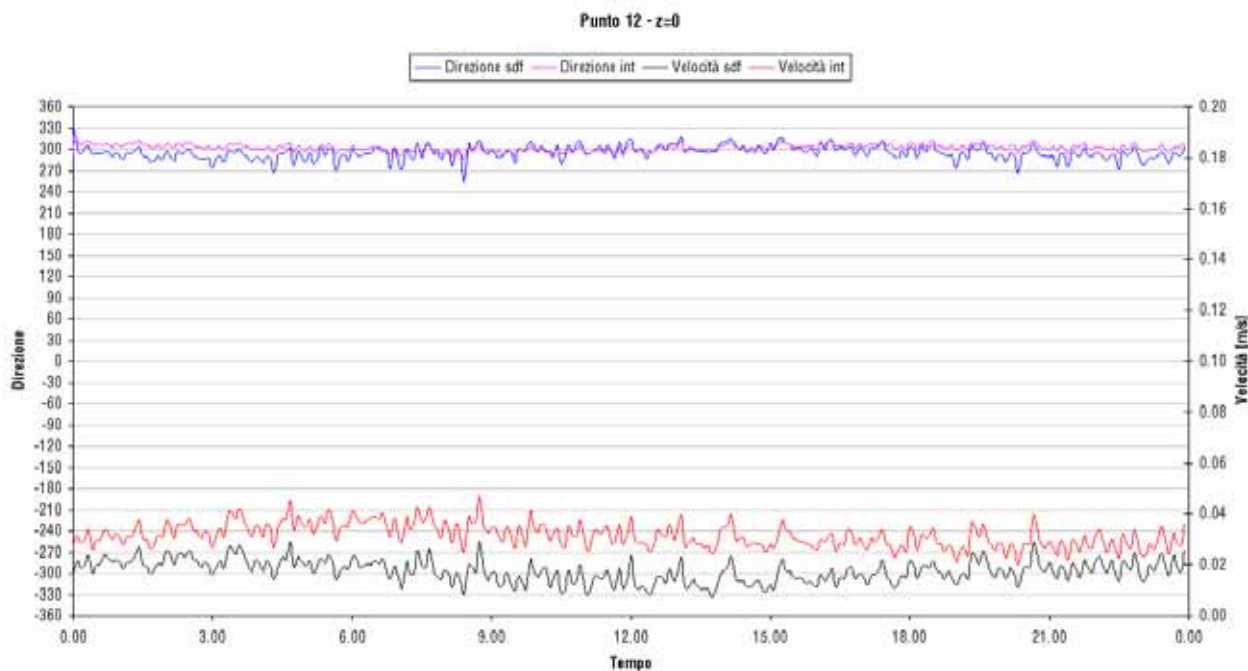


Figura 31 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 12 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

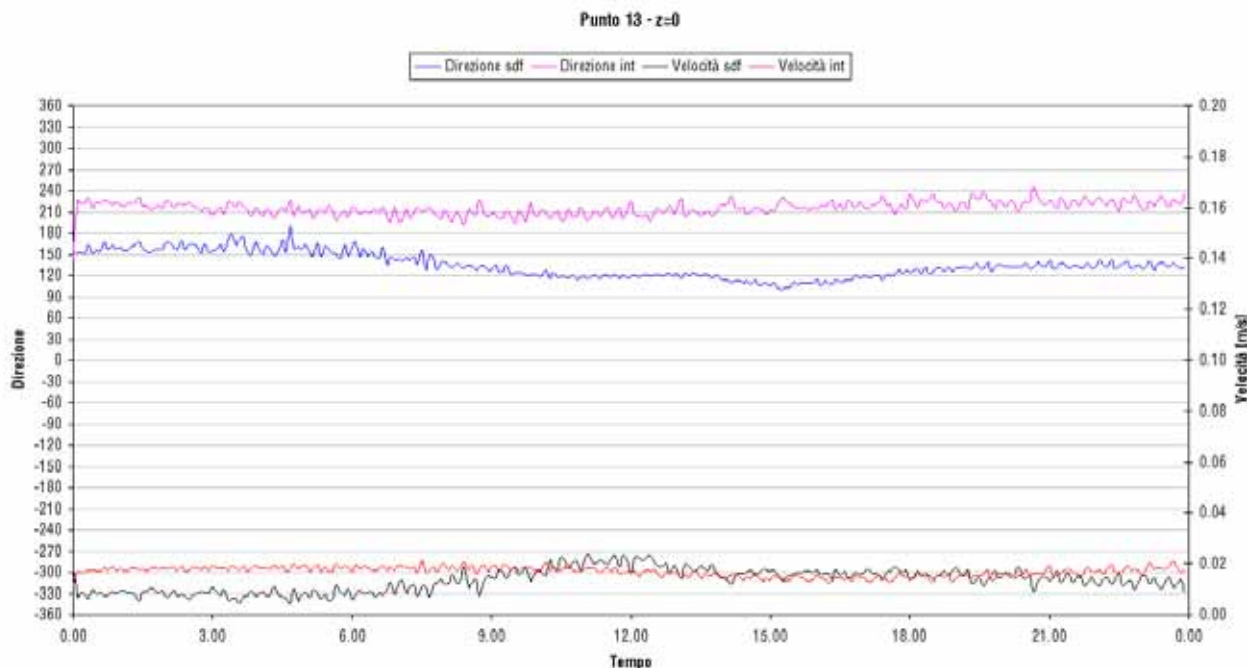


Figura 32 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 13 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

In corrispondenza delle due bocche della diga foranea, punti da 1 a 3, si può apprezzare il comportamento ciclico nelle direzioni di flusso, con periodo pari a 80 minuti per la bocca di levante ed a 65 minuti per quella di ponente.

Le velocità risultano modeste in tutta l'area prossima alla diga foranea, con valori inferiori a 0.03 m/s. Le figure da 20 a 22 evidenziano un'influenza nulla degli interventi in progetto; le curve di velocità e direzione sono, infatti, pressoché uniformi per tutta la durata del periodo di riferimento.

Nella parte centrale della rada, punti da 4 a 6, i grafici evidenziano un'alterazione nel comportamento delle correnti, modesto nelle aree laterali, punti 4 e 6, più significativo in quella centrale, punto 5.

La figura 24, relativa al punto 5, evidenzia infatti una significativa variazione nelle direzioni di corrente tra lo stato di fatto e quello a seguito degli interventi previsti. Il flusso risulta orientato prevalentemente verso Nord-Est nello scenario di progetto rispetto ad una direzione Sud-Ovest allo stato di fatto.

Le velocità in tale zona a seguito della realizzazione degli interventi alle banchine risultano parzialmente ridotte.

Il comportamento idrodinamico nell'area centrale della rada è, in generale, fortemente variabile nel tempo, come evidenziato analizzando i risultati in forma planimetrica. Le alterazioni evidenziate dalle simulazioni non sono quindi particolarmente significative rispetto alla dinamica complessiva del sistema, soprattutto in considerazione delle modeste velocità riscontrate, qui inferiori a 0.02 m/s in entrambi gli scenari geometrici.

Più indicativa è l'analisi dell'area prossima alle banchine oggetto degli interventi, individuata dai punti da 7 a 13, figure da 26 a 32. In questa zona il comportamento idrodinamico è meno variabile nel tempo, poiché condizionato dalla presa e scarico della centrale ENEL; è quindi possibile analizzare in modo più semplice e diretto le alterazioni indotte dagli interventi in progetto.

Nei punti 7 e 8, prossimi all'arsenale militare, si registra una rotazione della direzione media di flusso di circa 30° in senso orario, con modeste variazioni nelle relative velocità. Tale rotazione diventa più rilevante avvicinandosi al Terminal del Golfo, punto 13, ove si evidenzia una variazione di circa 90°, sempre in senso orario.

In tutti e tre i punti non si registrano significative alterazioni delle velocità superficiali di corrente.

Comportamento opposto si registra nei punti 10 ed 11, posti ai due lati del Terminal del Golfo, per i quali le figure 29 e 30 evidenziano una rotazione in senso antiorario di 30° e 45° rispettivamente. In entrambi i punti si registra anche un significativo incremento delle velocità di corrente.

Nel punto 9, figura 28, si riscontra una modesta variazione di direzione, non riconducibile ad un comportamento univoco.

Presso il punto 12, le direzioni di deflusso non subiscono variazioni, pur registrandosi un aumento delle velocità.

Analizzando il secondo layer di calcolo, relativo a profondità comprese tra -3 e -6 metri, nei punti da 1 a 6 è possibile individuare un comportamento simile allo strato superficiale già descritto. In tale zona, i gradienti dovuti alle differenze di densità dell'acqua, indotte dalle immissioni con diverse temperature e grado di salinità, risultano infatti meno significativi.

Per i punti da 1 a 6, i cui grafici sono presentati nelle figure da 33 a 38, è quindi possibile trarre le stesse conclusioni relative allo strato superficiale.

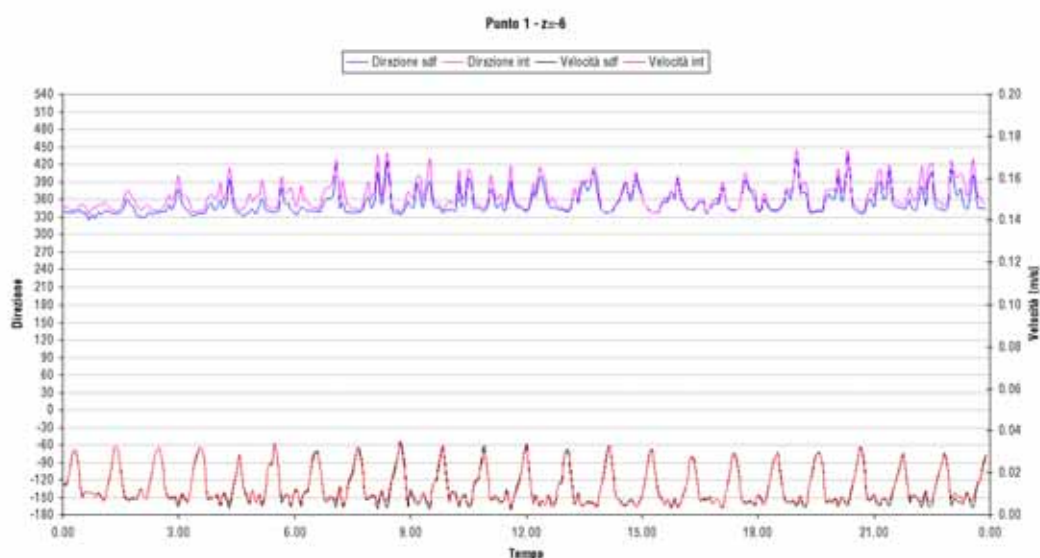


Figura 33 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 1 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

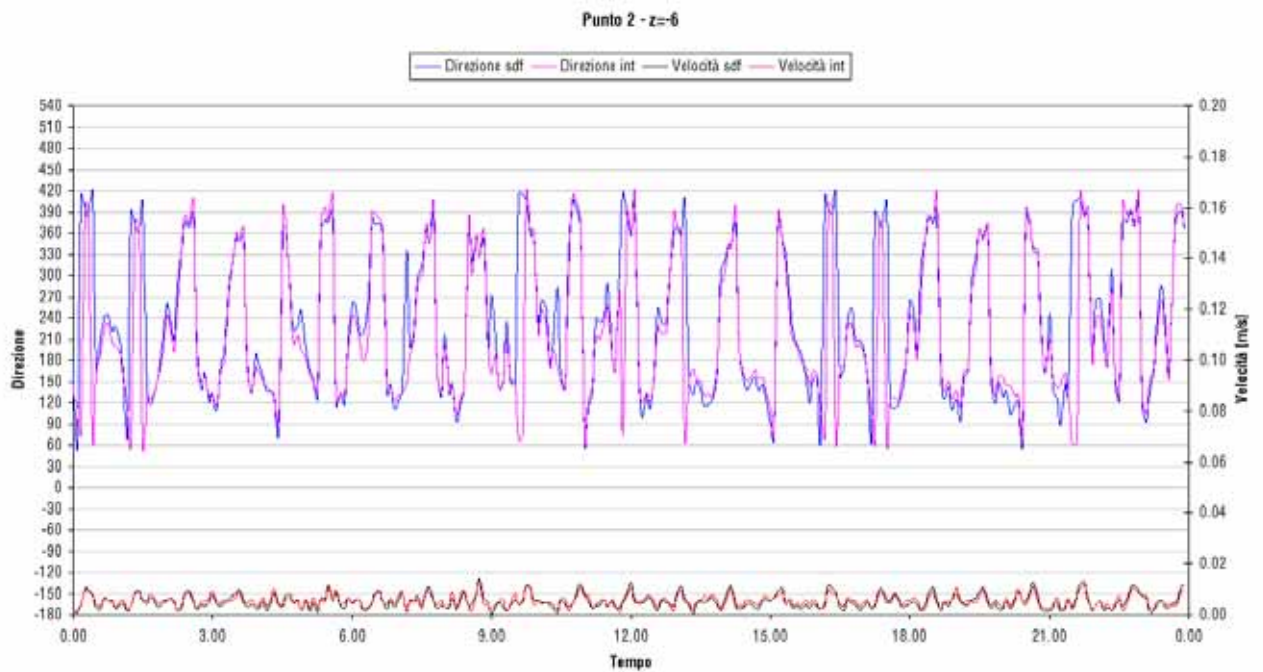


Figura 34 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 2 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

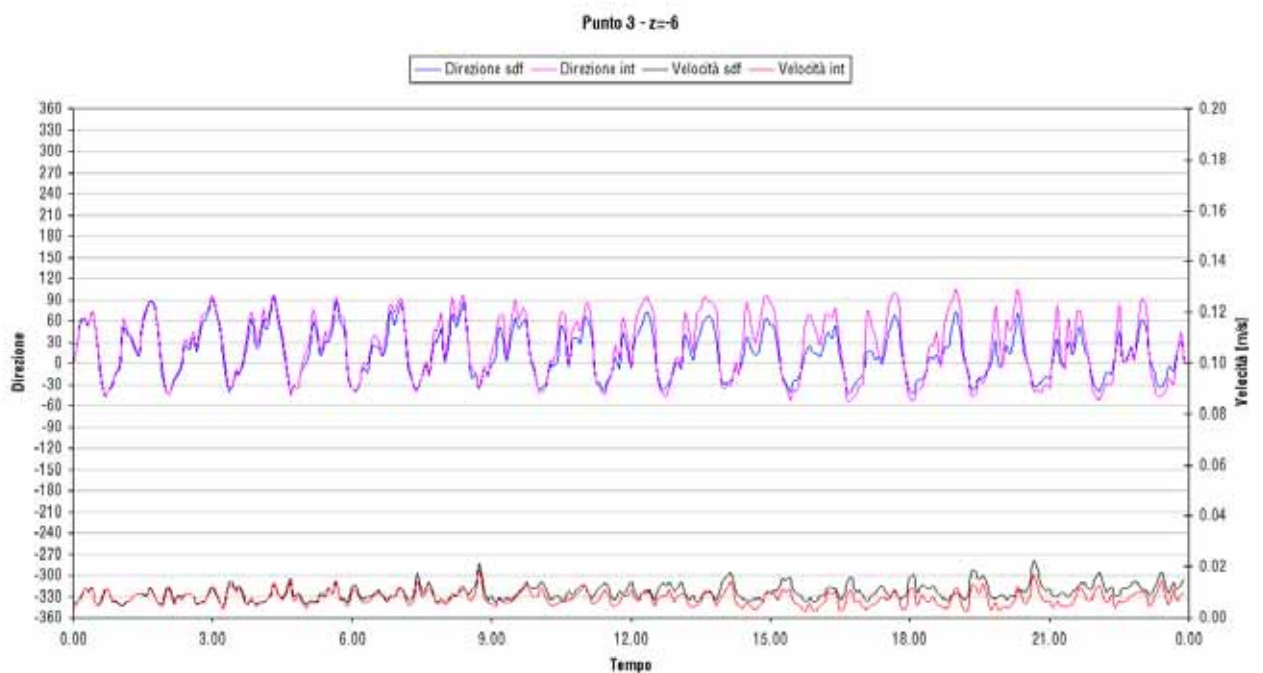


Figura 35 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 3 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

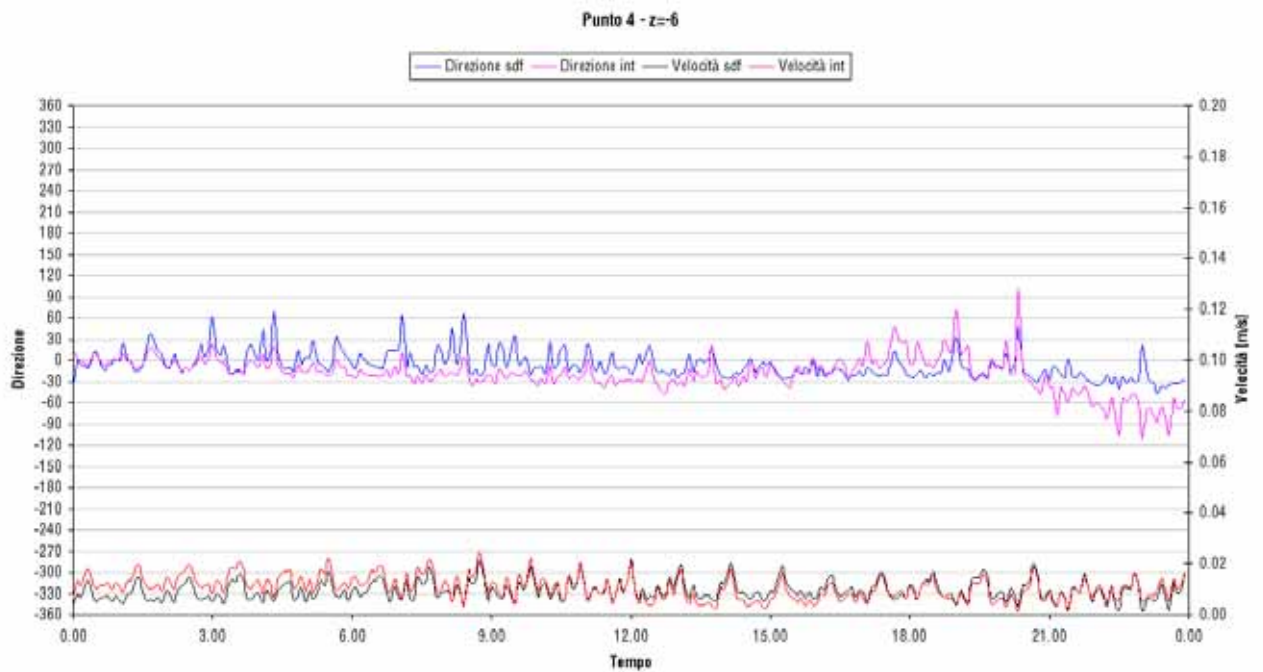


Figura 36 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 4 nello scenario di "calma" con fondo attuale.



Figura 37 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 5 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

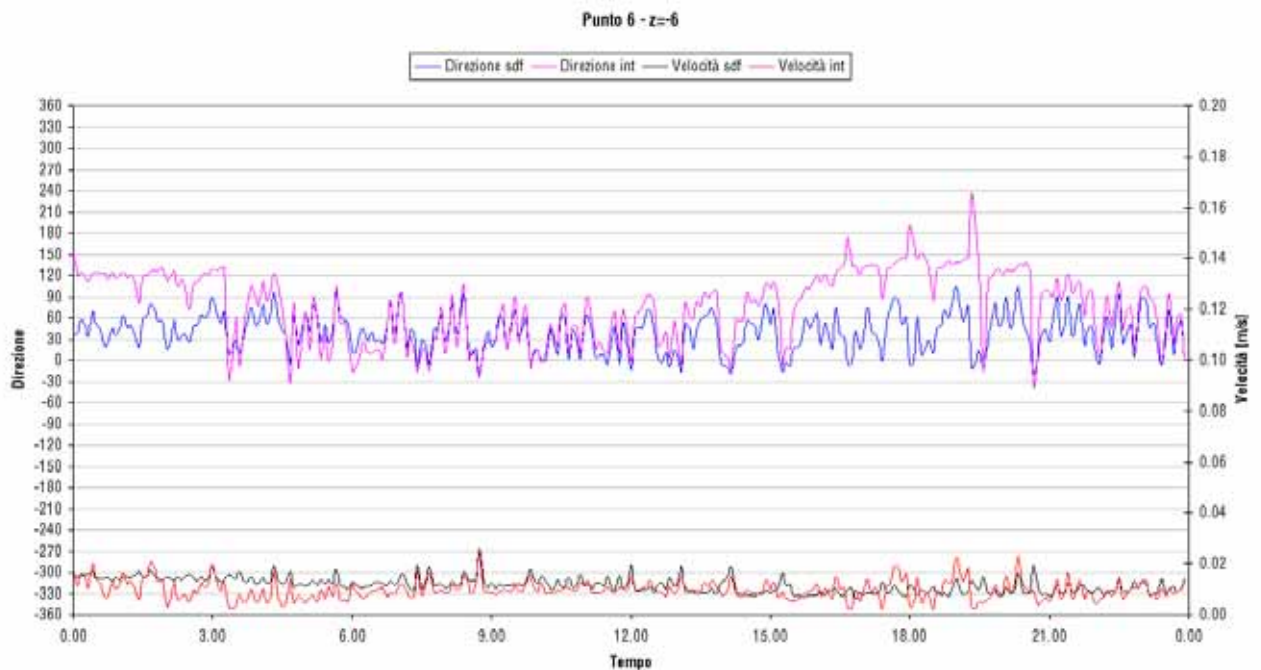


Figura 38 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 6 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

Nel punto 7, si evidenzia un comportamento uniforme tra i due scenari geometrici nella prima parte della finestra temporale di analisi. Le direzioni di deflusso sono invece in contrasto nella seconda parte del periodo di riferimento. Questo grafico evidenzia quindi la notevole instabilità del sistema e la possibilità di riscontrare comportamenti divergenti pur partendo da condizioni idrodinamiche simili.

Nel punto 8, figura 40, si registra in profondità una rotazione nelle direzioni di corrente di 30° in senso antiorario, contrariamente allo strato superficiale, figura 27.

Il punto 9 non presenta significative variazioni, mentre nel punto 10 si registra una rotazione della corrente in senso orario, contrariamente allo strato superficiale, con una riduzione delle velocità.

Il punto 11 presenta un comportamento uniforme tra lo strato superficiale e quello in profondità con una rotazione delle direzioni di deflusso in senso antiorario di circa 30° ed incremento delle velocità di corrente.

I punti 12 e 13 presentano alterazioni significative con rotazione in senso orario nel primo ed antiorario nel secondo con parziale incremento delle velocità.

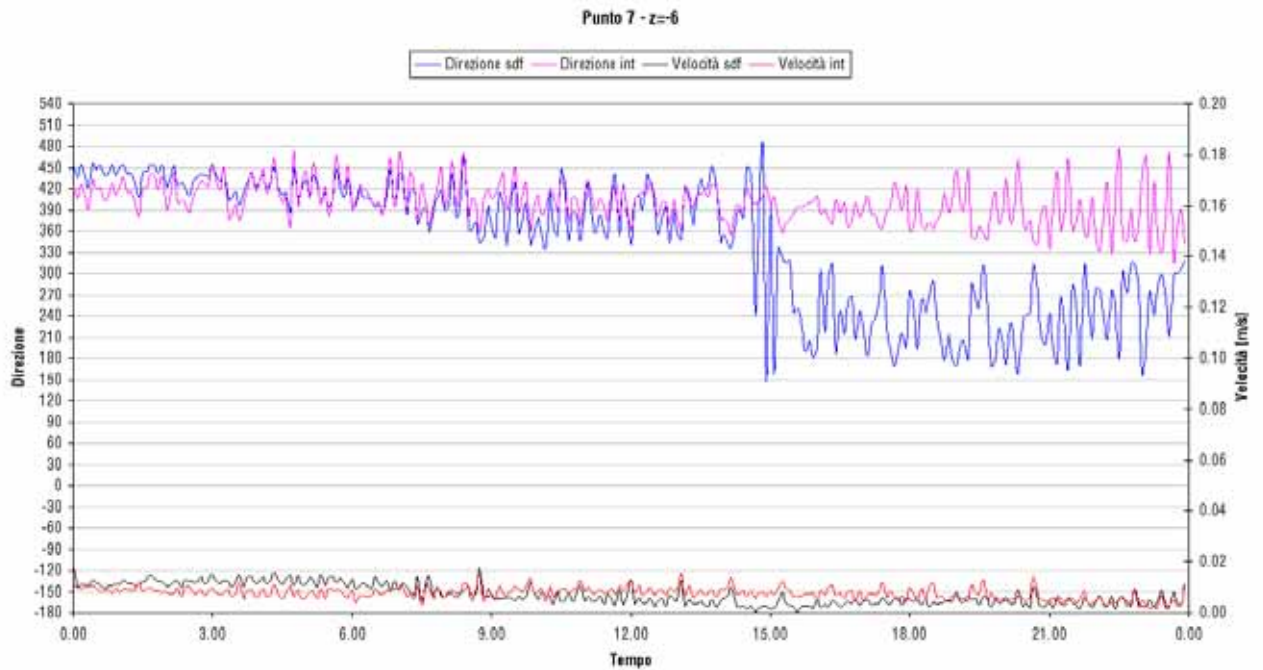


Figura 39 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 7 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

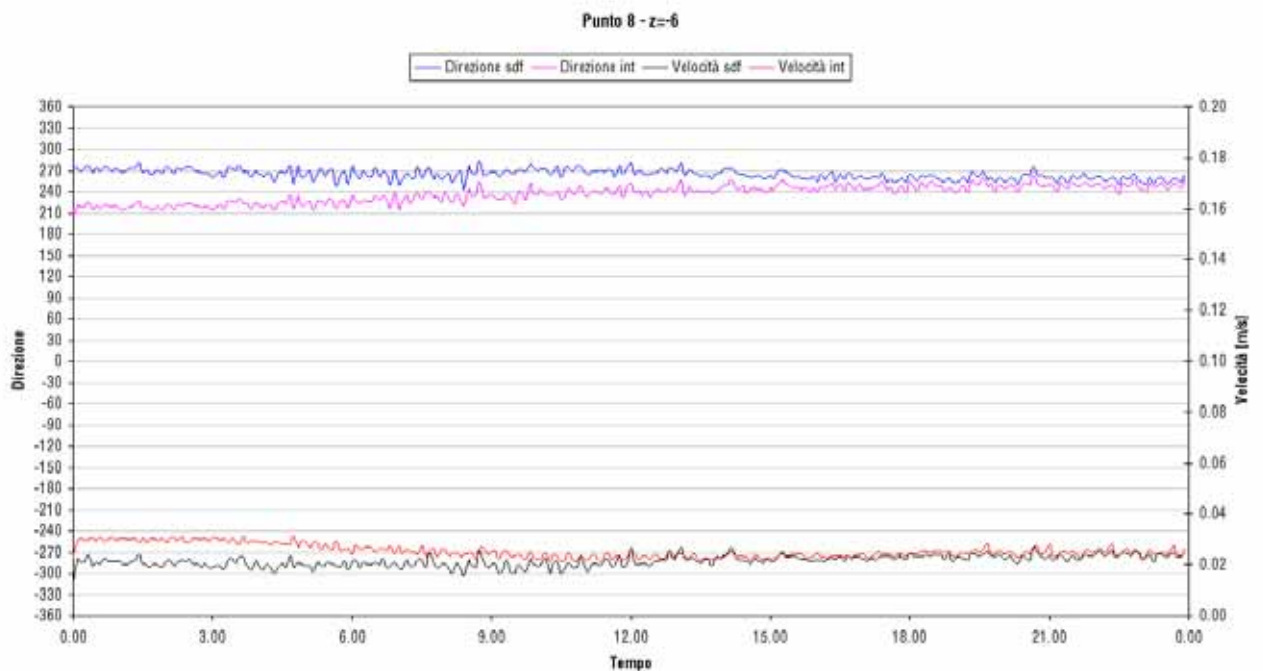


Figura 40 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 8 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

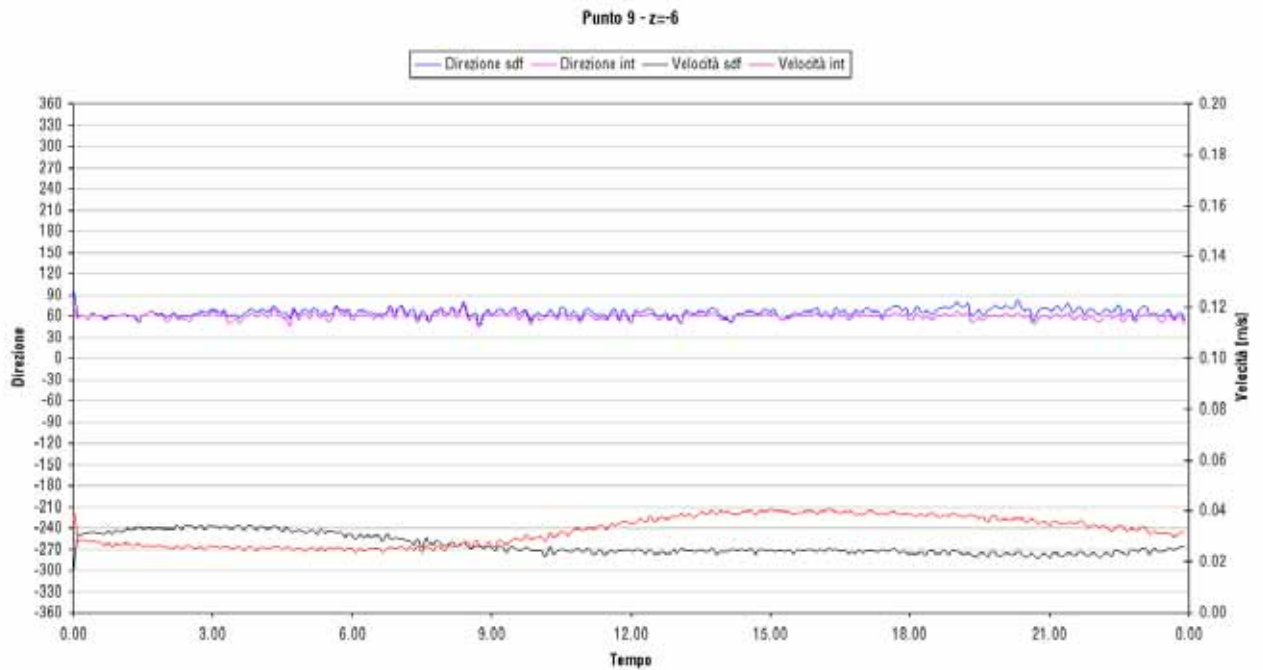


Figura 41 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 9 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

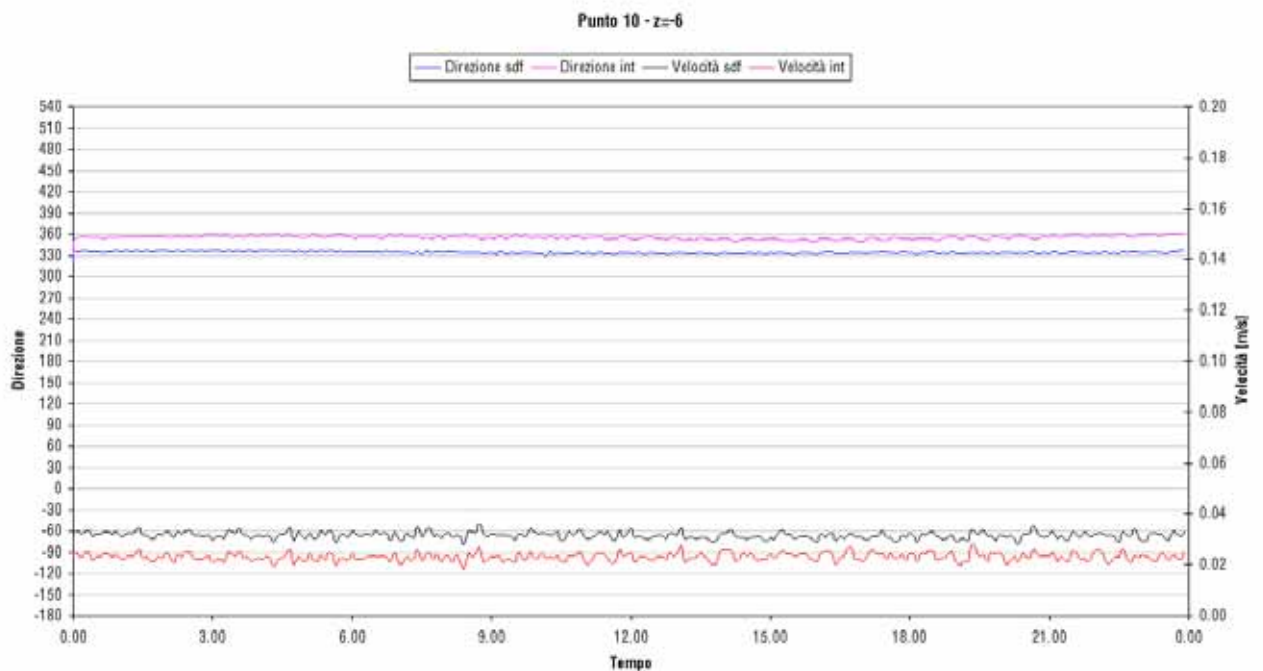


Figura 42 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 10 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

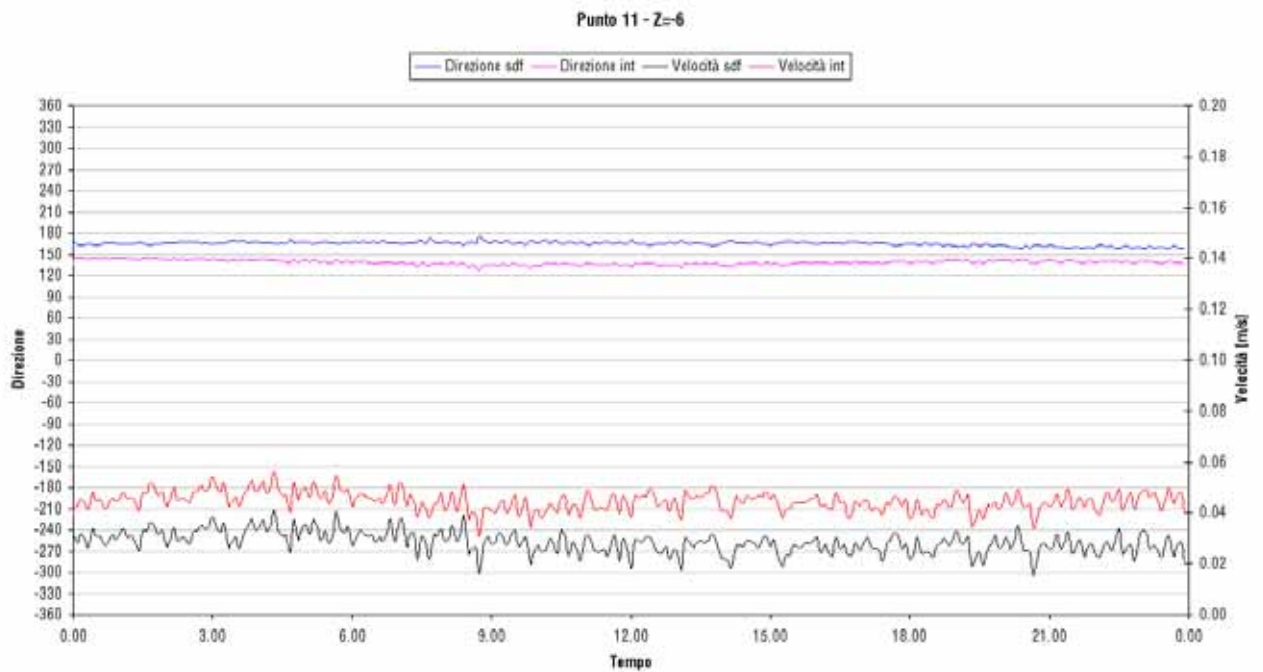


Figura 43 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 11 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

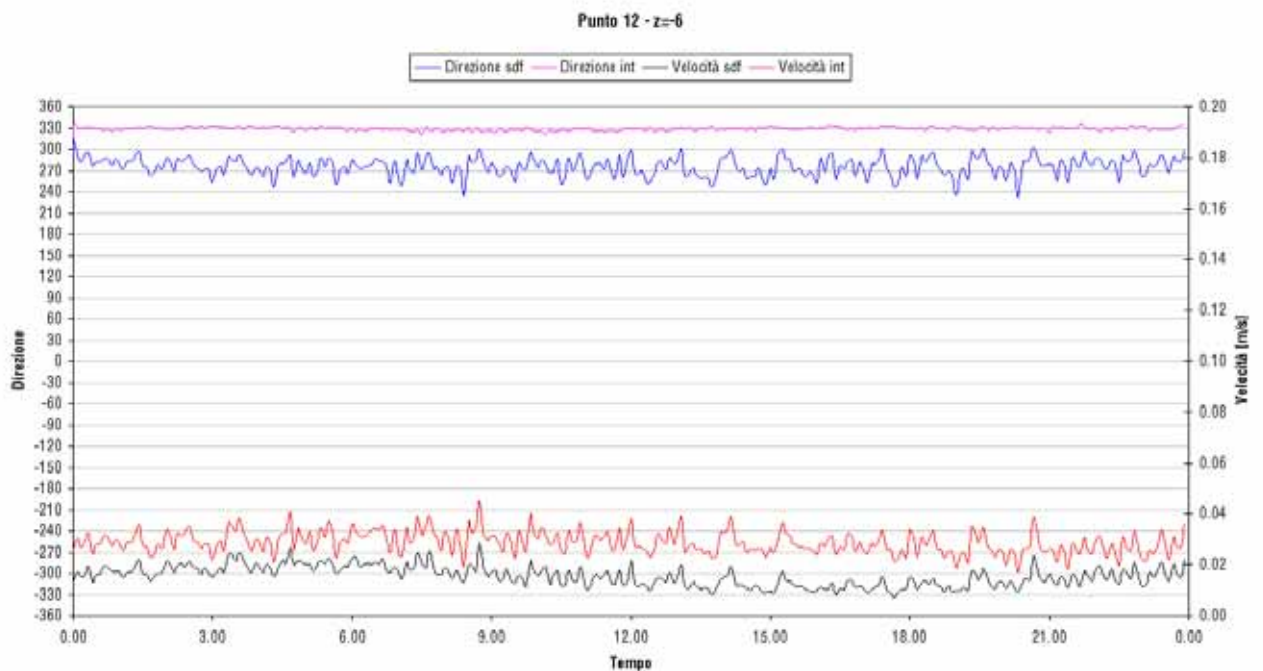


Figura 44 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 12 nello scenario di "calma" con fondo attuale.

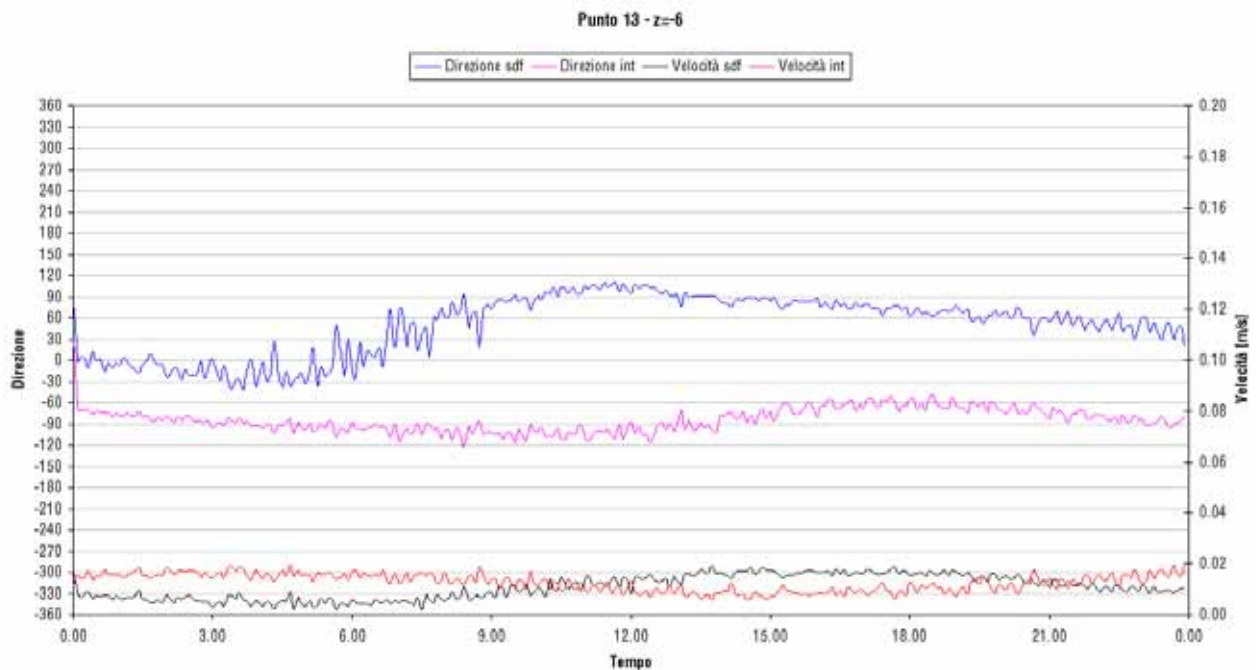


Figura 45 - Direzione e velocità di corrente in profondità nel punto 13 nello scenario di “calma” con fondo attuale.

In generale l'analisi condotta evidenzia una forte instabilità del sistema complessivo, che può presentare comportamenti non uniformi a livello localizzato all'occorrere di piccole alterazioni nelle condizioni di flusso.

Nello scenario di “calma” con fondo attuale qui analizzato, gli interventi previsti determinano alcune alterazioni localizzate ad essi riconducibili in modo diretto.

In particolare, il prolungamento a mare del Terminal dal Golfo tende ad “accompagnare” il flusso derivante dallo scarico della Centrale più a largo rispetto allo scenario attuale, aumentando l'ampiezza della circolazione indotta nell'area nord della rada.

La nuova configurazione delle banchine determina infatti un parziale aumento delle velocità presso il Terminal, che favorisce la circolazione all'interno della rada.

Tale circolazione, ben evidenziata nelle figure 13 e 14, interessa i punti di analisi da 6 a 13, da cui le alterazioni nelle relative direzioni di deflusso evidenziate dai grafici presentati in questo paragrafo.

Le altre variazioni tra i due scenari geometrici, che si riscontrano nei punti più distanti dalla zona d'intervento, sono dovute prevalentemente al carattere instabile del sistema complessivo.

Analizzando l'area nel suo insieme, gli interventi previsti non inducono variazioni sostanziali nelle dinamiche della rada, date le non significative alterazioni nelle velocità di corrente che risultano sempre contenute entro valori modesti, sempre inferiori a 0.05 m/s.

4.1.2 Scenario con fondo dragato - simulazioni c) e d)

I risultati delle simulazioni c) e d), relativi allo scenario di "calma" con fondo dragato, presentano un carattere di assoluta similarità con quelli in assenza di dragaggio.

Le figure da 46 a 58 presentano le curve di velocità e direzione limitatamente, per semplicità, allo strato superficiale.

Da un'analisi comparativa con le figure da 20 a 32, corrispondenti allo stesso scenario con fondo attuale, risulta evidente come il dragaggio del fondo non eserciti alcuna influenza sulle alterazioni delle correnti indotte dagli interventi alle banchine.

Tale considerazione è valida anche per gli strati a maggiore profondità, di cui si è preferito non riportare i grafici per focalizzare l'attenzione sugli aspetti di maggiore interesse per le finalità dello studio.

Tra i due scenari sussistono modeste differenze, in particolare relative alle direzioni di corrente, imputabili all'intervento di dragaggio.

In merito all'influenza degli interventi alle banchine sull'idrodinamica della rada, i risultati delle simulazioni nello scenario con fondo dragato ribadiscono quanto già esposto relativamente al fondo attuale: sono presenti alcune variazioni localizzate in termini di direzioni medie di deflusso, non tali da determinare alcuna alterazione significativa nelle caratteristiche idrodinamiche generali della rada.

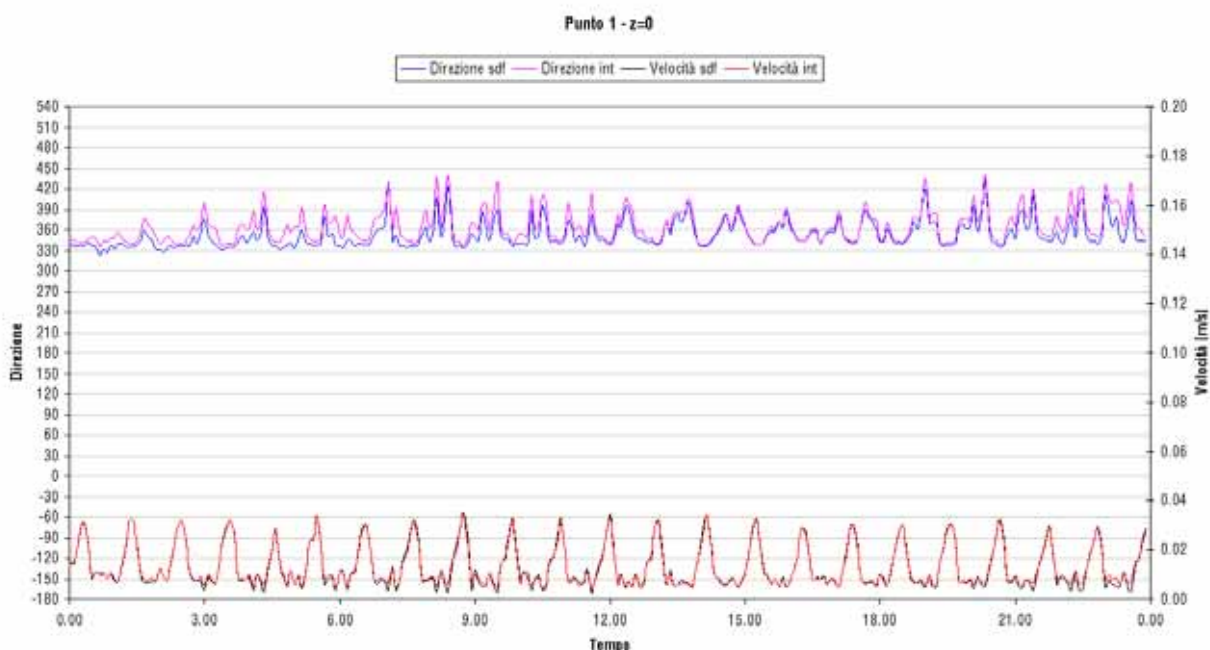


Figura 46 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 1 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

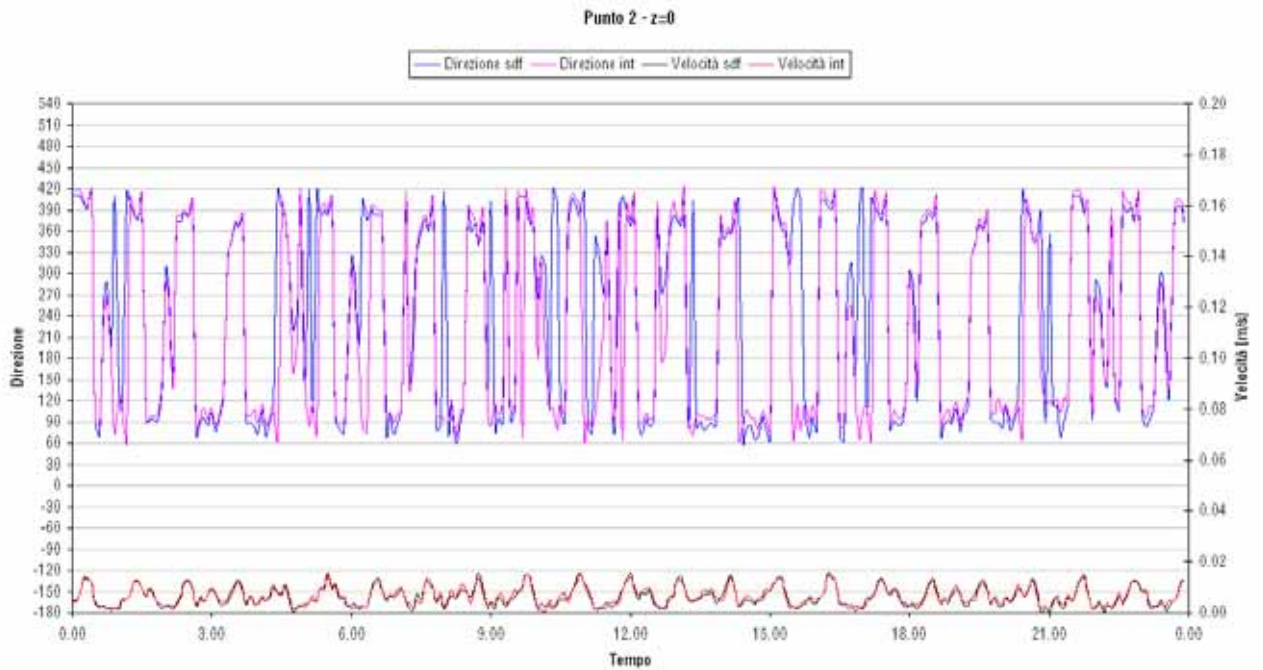


Figura 47 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 2 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

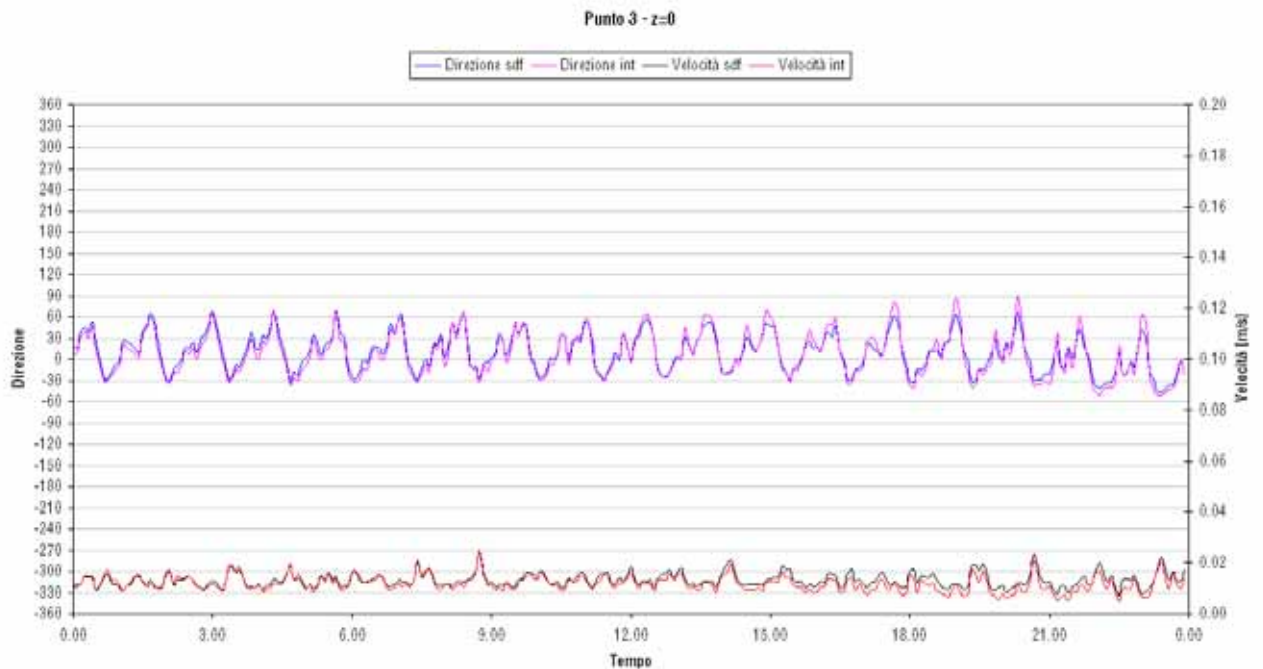


Figura 48 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 3 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

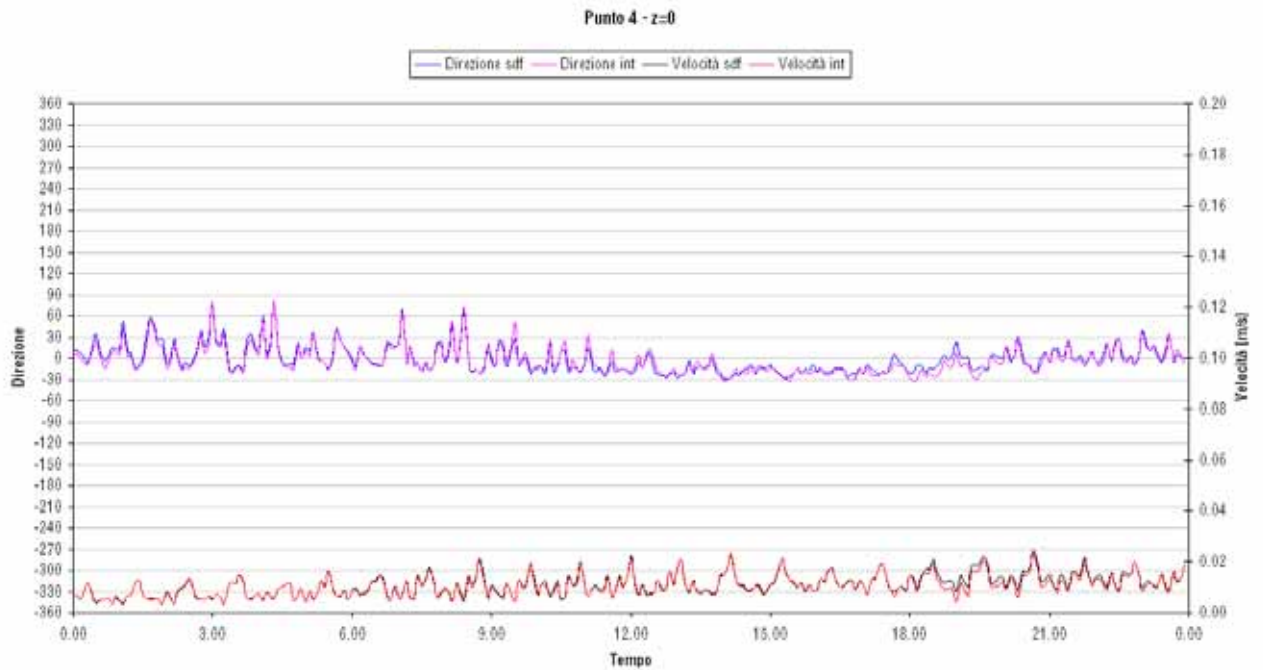


Figura 49 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 4 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

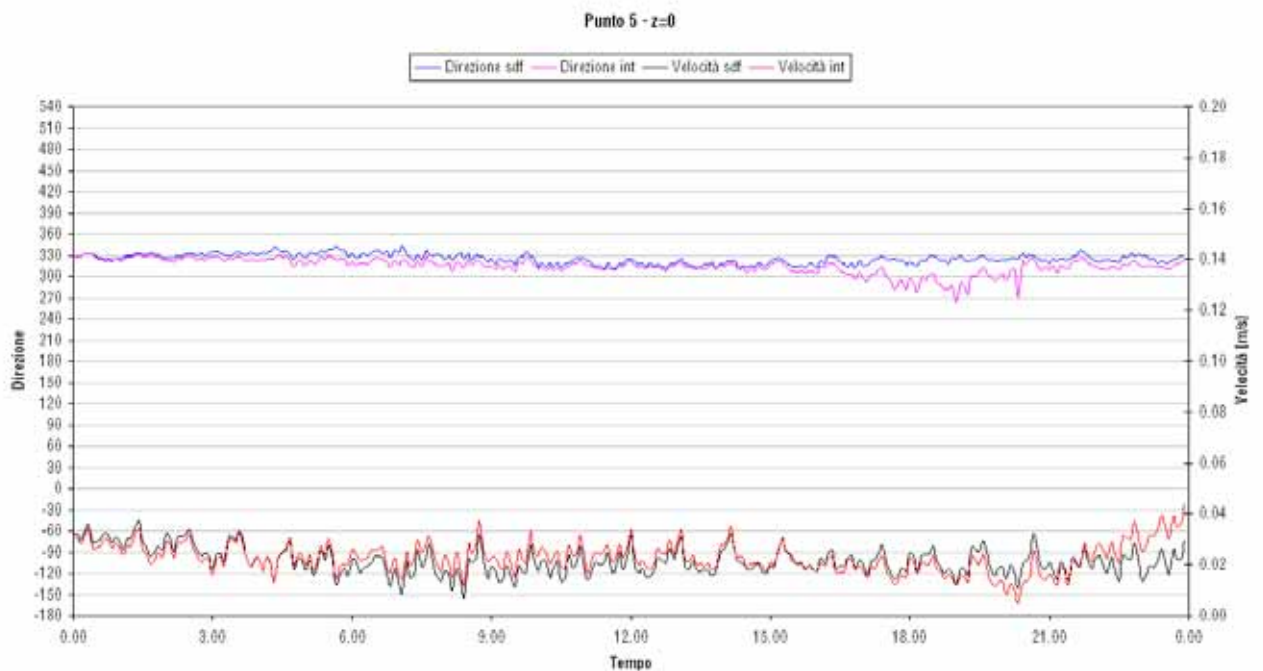


Figura 50 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 5 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

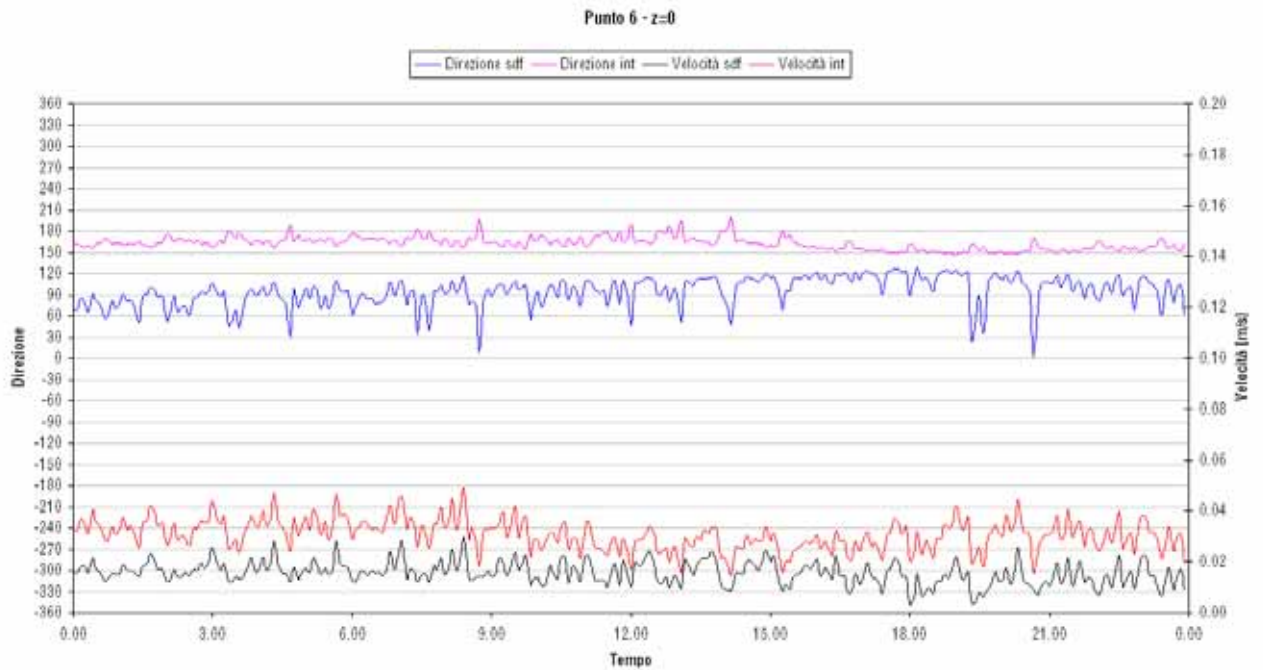


Figura 51 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 6 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

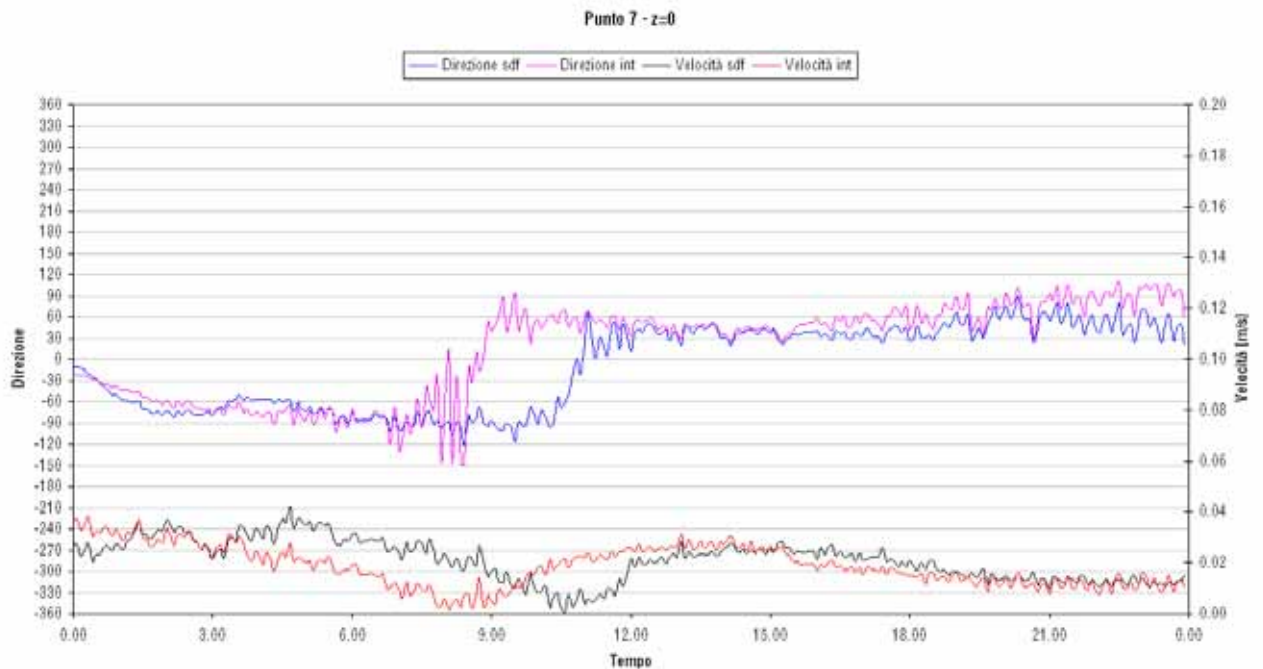


Figura 52 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 7 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

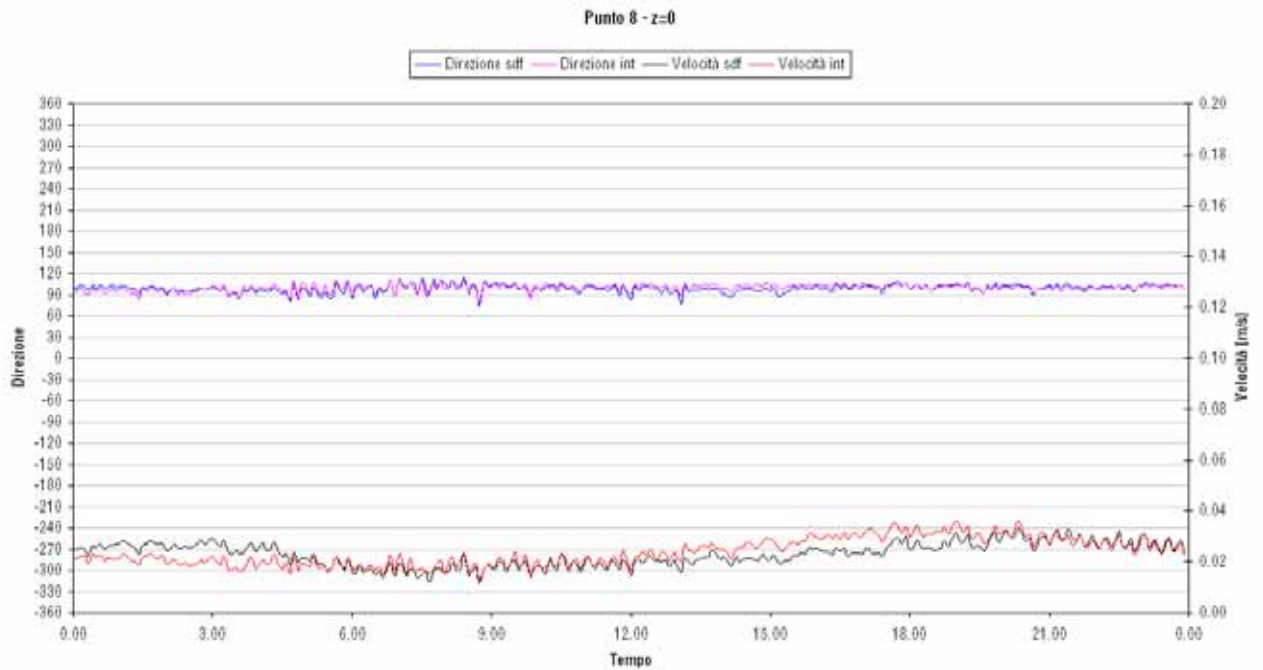


Figura 53 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 8 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

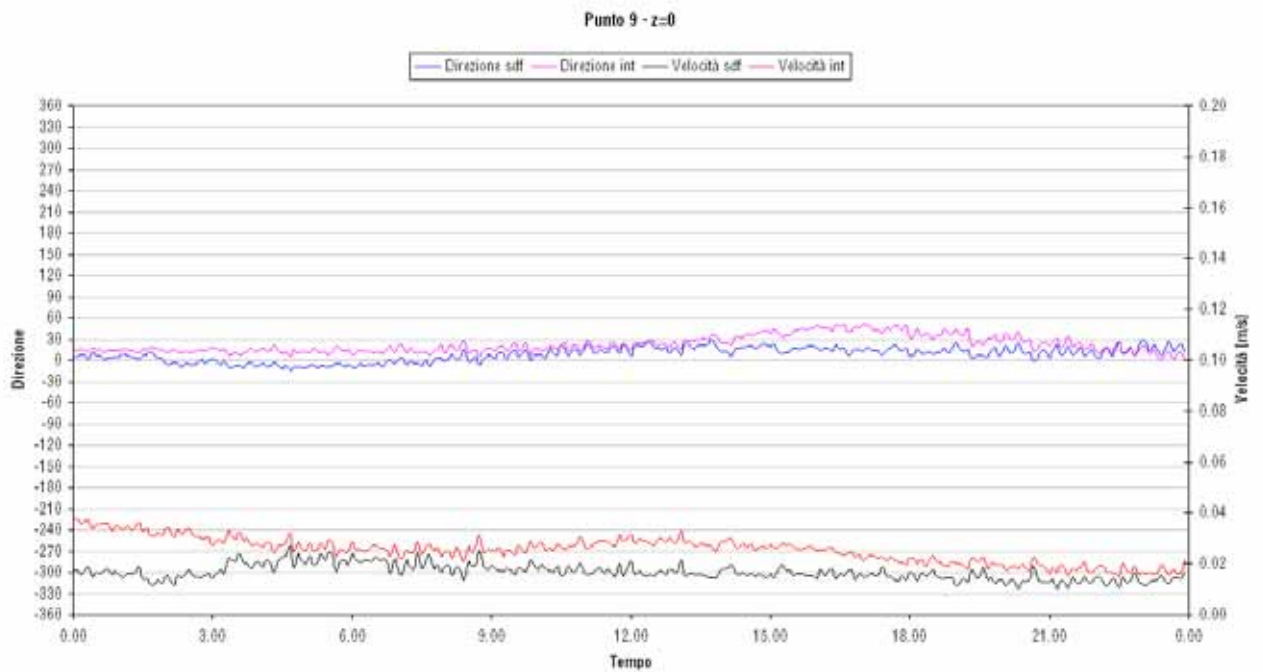


Figura 54 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 9 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

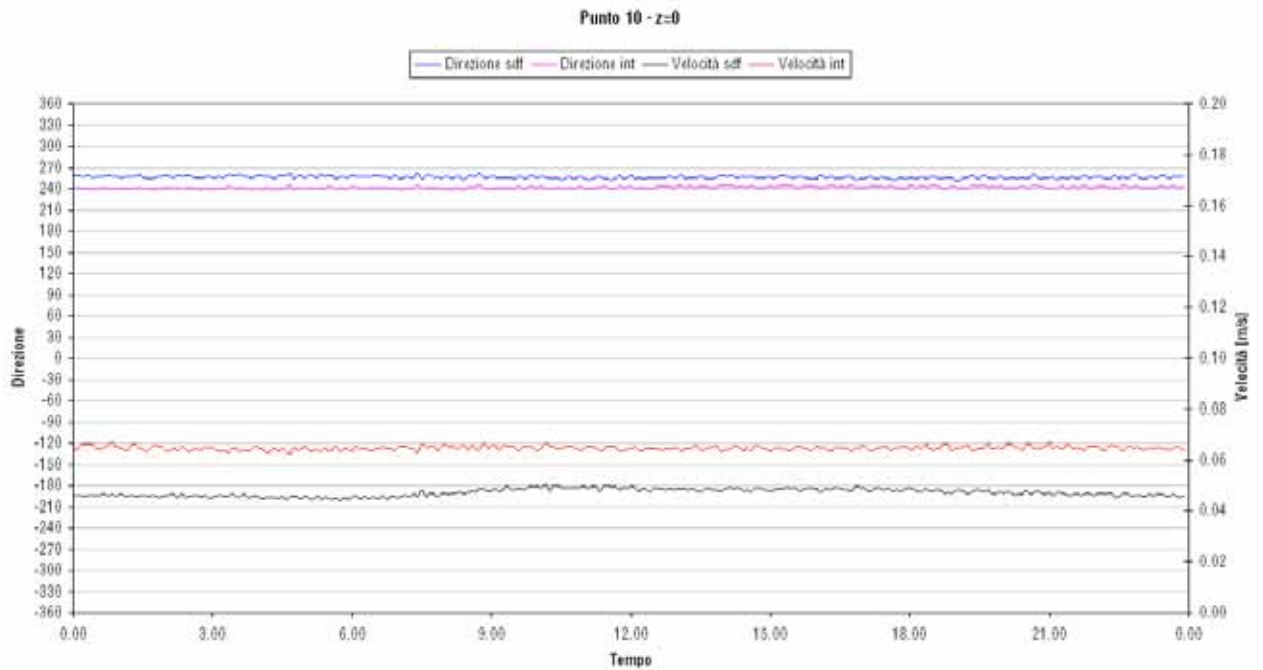


Figura 55 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 10 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

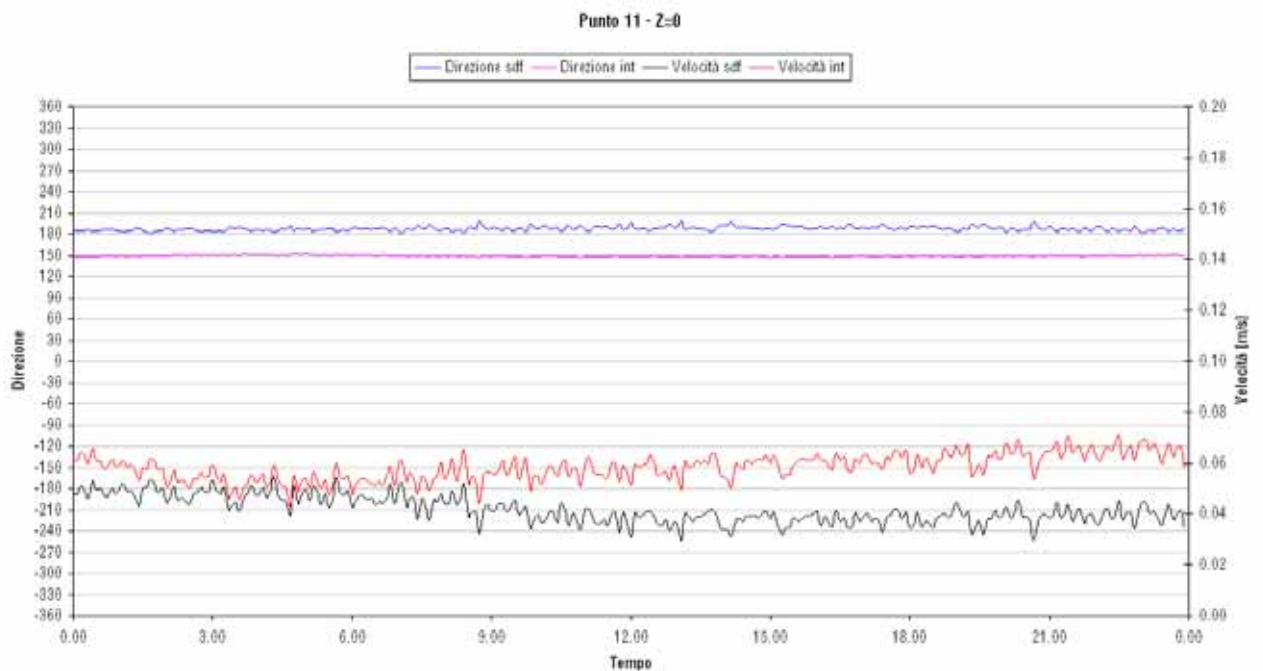


Figura 56 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 11 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

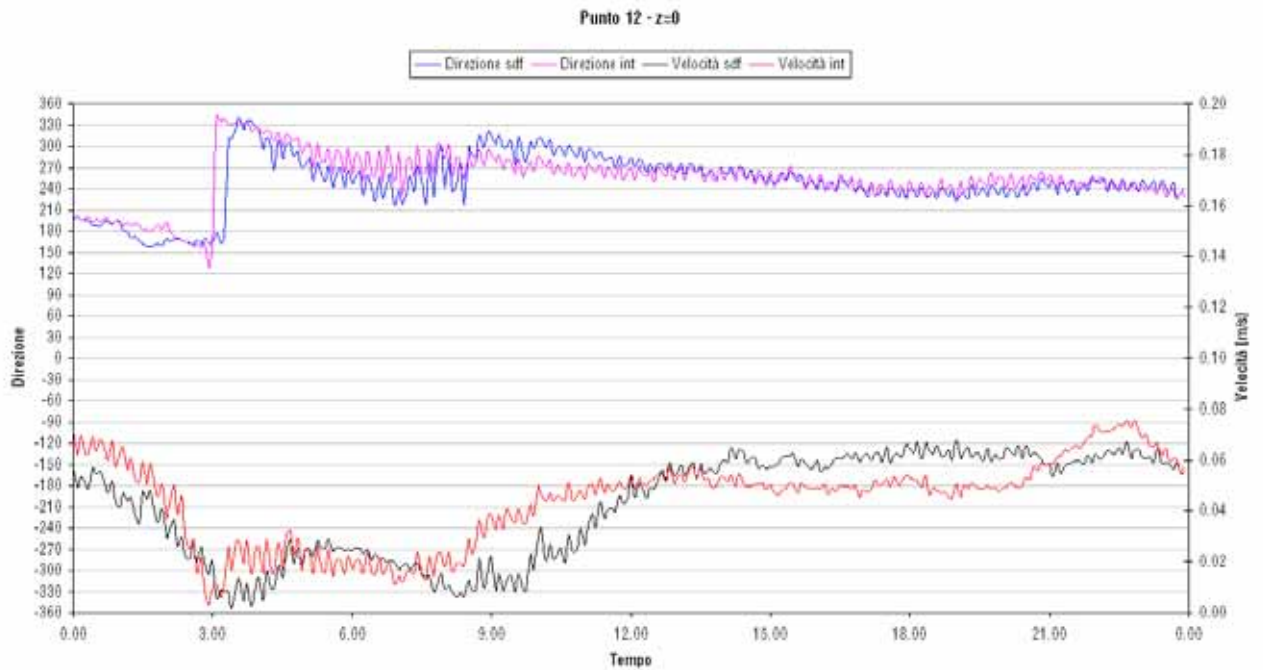


Figura 57 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 12 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

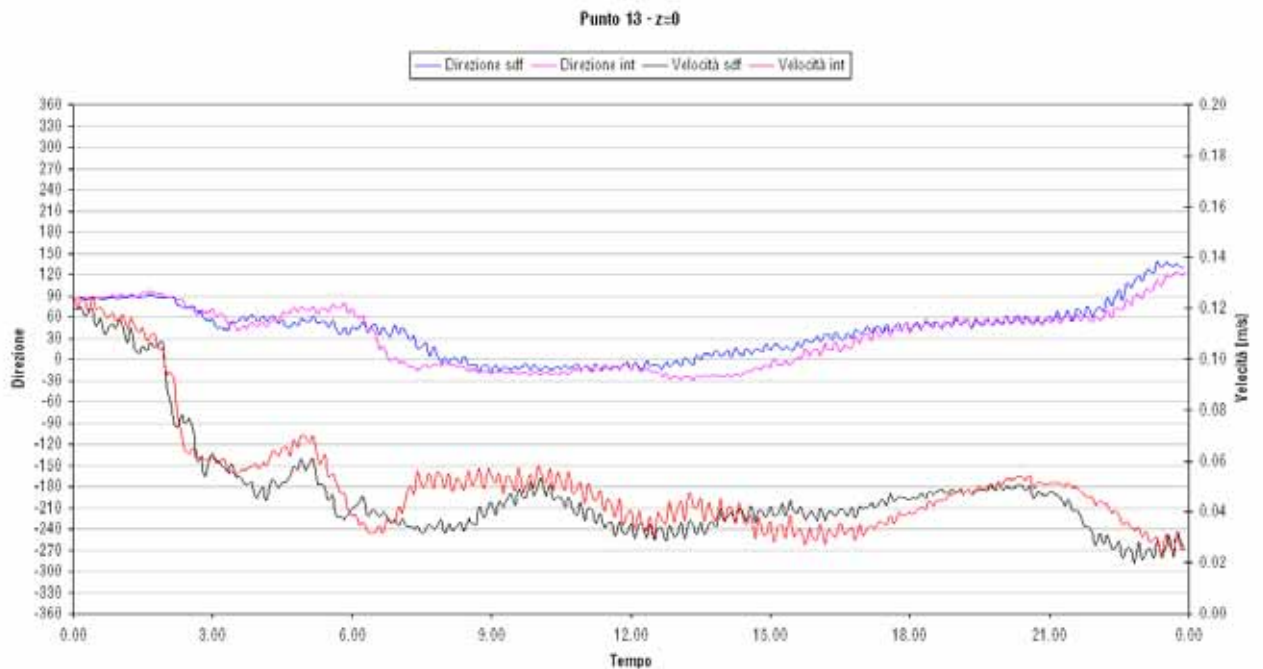


Figura 58 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 13 nello scenario di "calma" con fondo dragato.

4.1.3 Scenario di "tempesta" - simulazioni e) ed f)

Lo scenario di "tempesta" presenta correnti caratterizzate da velocità più elevate e variabili in direzione, conseguentemente al carattere irregolare del vento considerato.

In tale scenario è quindi più complesso estrapolare considerazioni di carattere generale in merito all'influenza indotta dagli interventi in progetto sull'idrodinamica della rada.

I risultati delle simulazioni e) ed f) sono presentati in forma grafica nelle figure da 59 a 71, sempre in termini di velocità e direzioni di corrente, limitatamente, per semplicità, allo strato superficiale.

Dall'analisi dei grafici è possibile evidenziare come le correnti nelle due geometrie risultino uniformi in tutti i punti di analisi.

Entrambe le grandezze, velocità e direzione, presentano variazioni significative nel periodo di analisi, con frequenti variazioni delle direzioni di corrente. Nonostante questo, le curve relative alle due geometrie assumono una tendenza comune, pur verificandosi scostamenti localizzati in alcune aree ed intervalli temporali.

L'influenza degli interventi in progetto in corrispondenza dell'evento estremo è quindi molto limitata e sicuramente inferiore a quella riscontrata nello scenario di "calma". Questo avviene perché l'influenza del vento è maggiore rispetto alle altre forzanti presenti, da cui il minore impatto degli interventi alle banchine. Tale considerazione è valida anche per i layer di calcolo relativi a profondità maggiori, di cui non si riportano i grafici per semplicità.

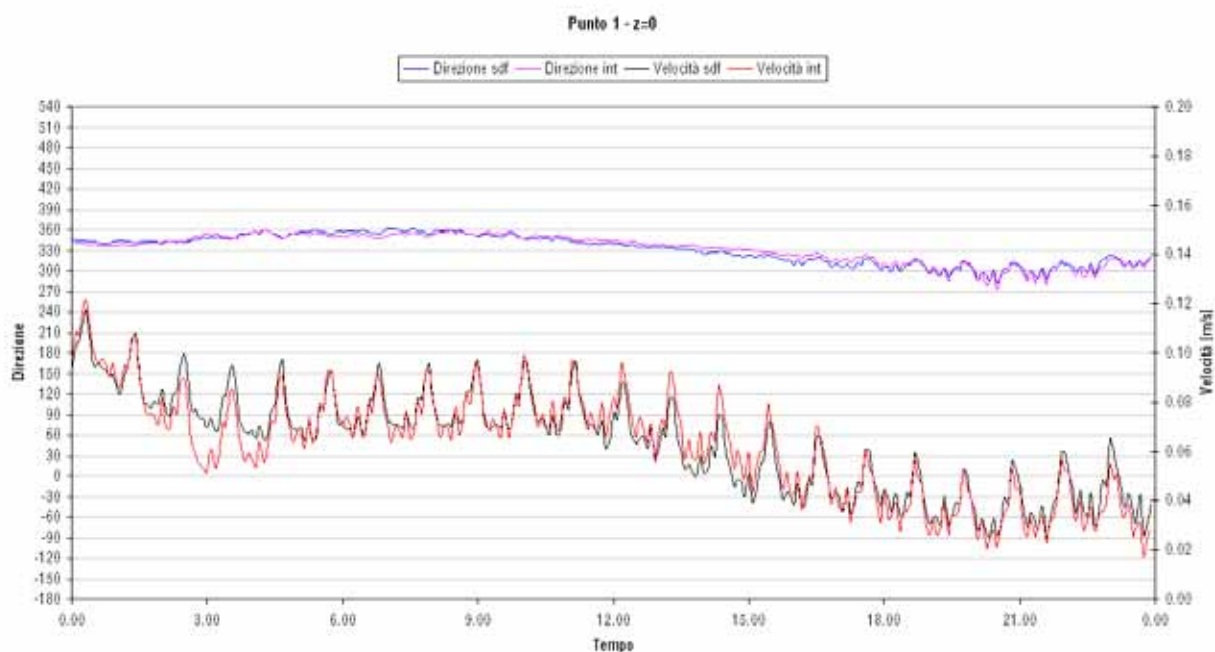


Figura 59 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 1 nello scenario di "tempesta" con fondo non dragato.

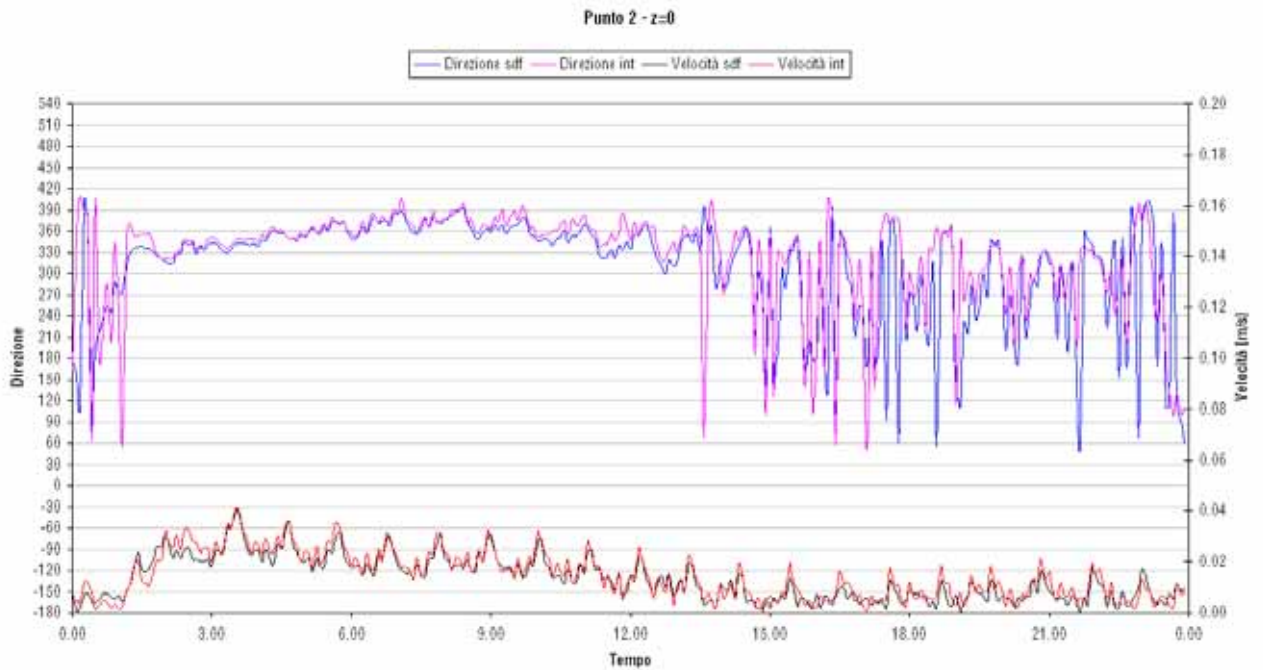


Figura 60 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 2 nello scenario di “tempesta” con fondo non dragato.

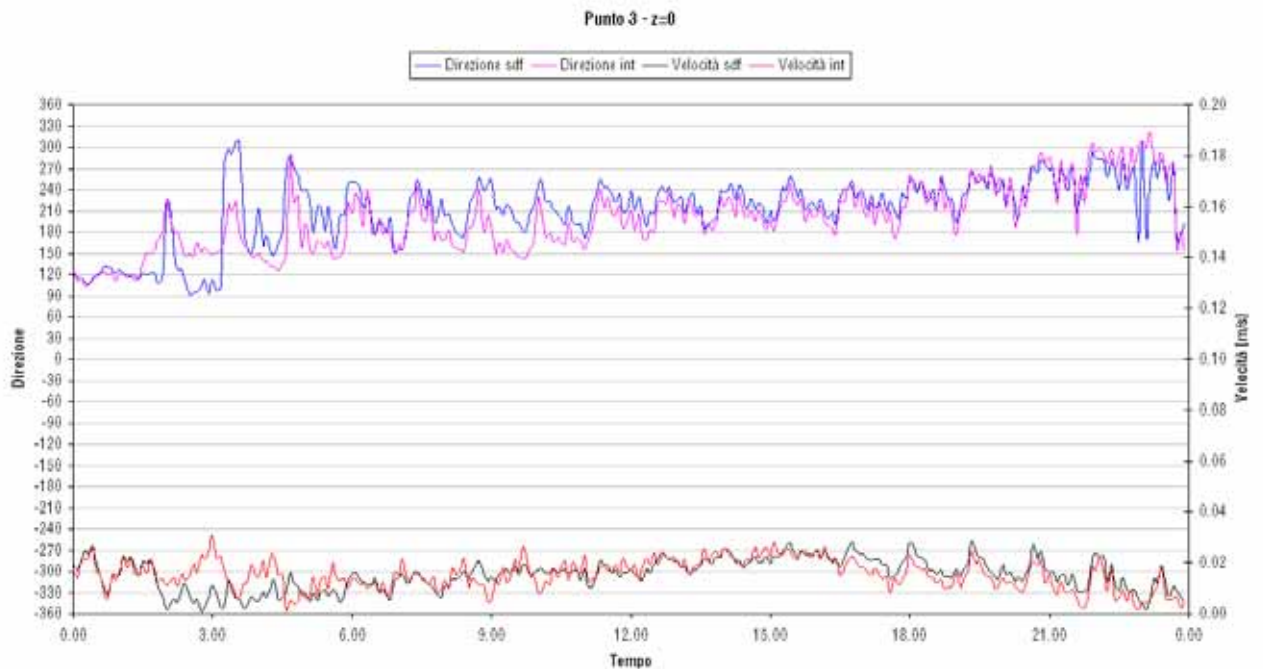


Figura 61 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 3 nello scenario di “tempesta” con fondo non dragato.

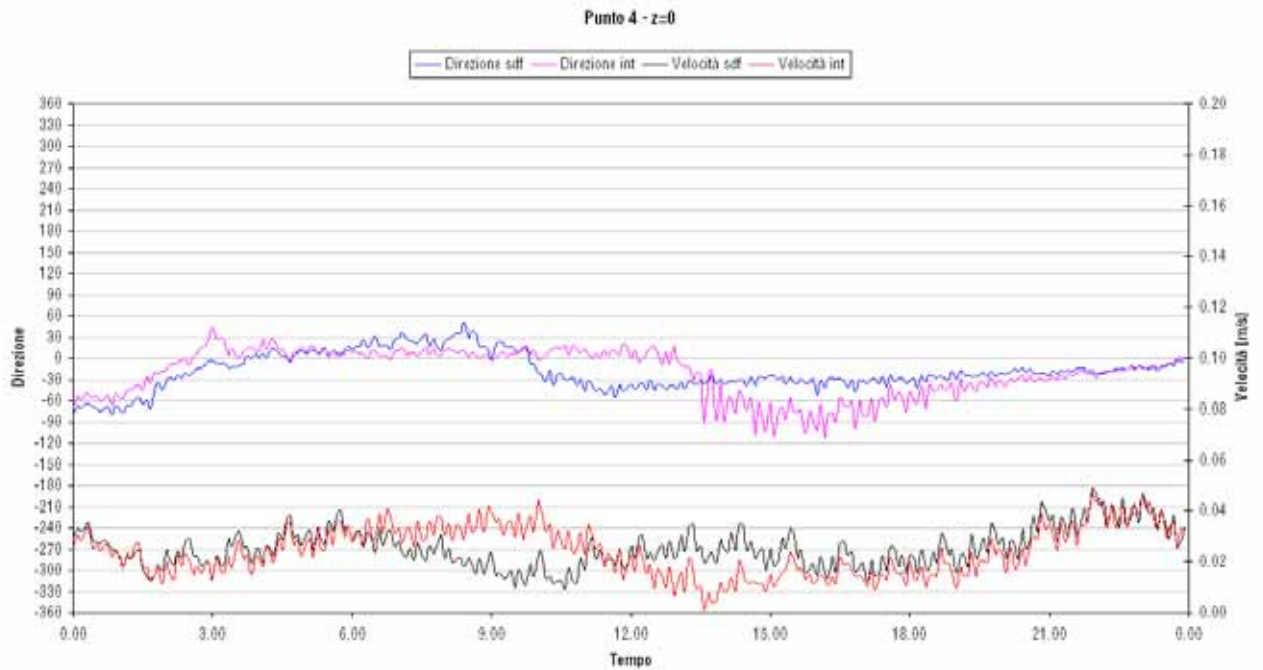


Figura 62 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 4 nello scenario di “tempesta” con fondo non dragato.

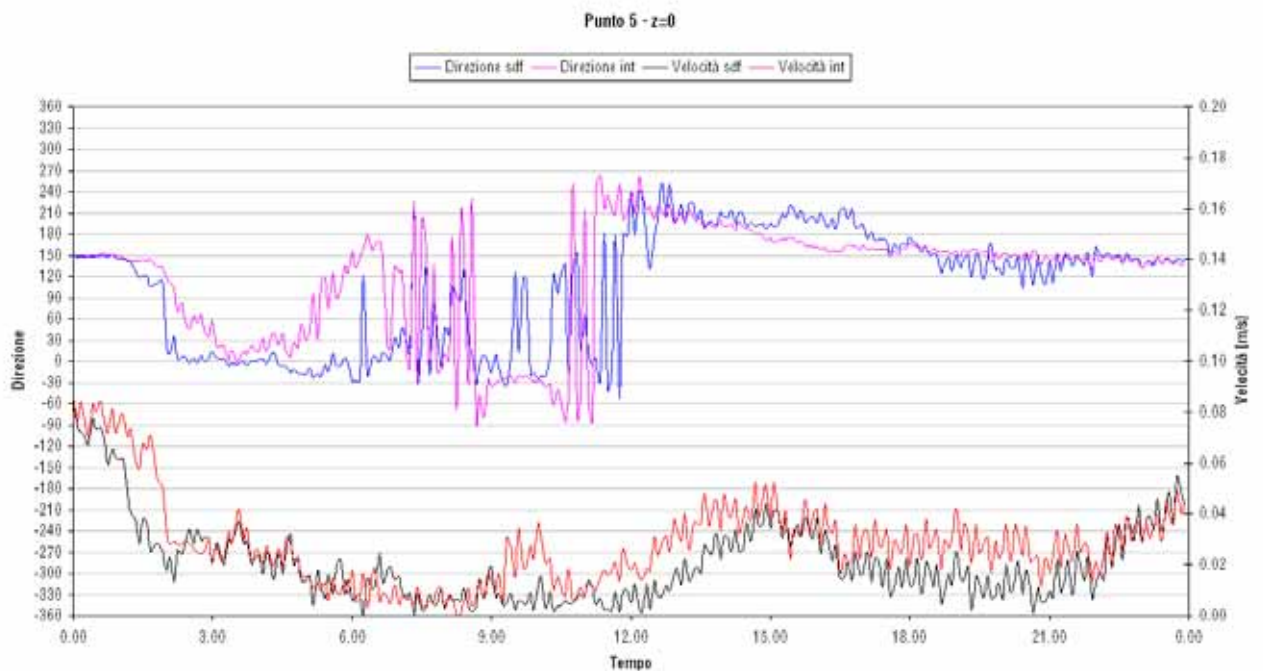


Figura 63 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 5 nello scenario di “tempesta” con fondo non dragato.

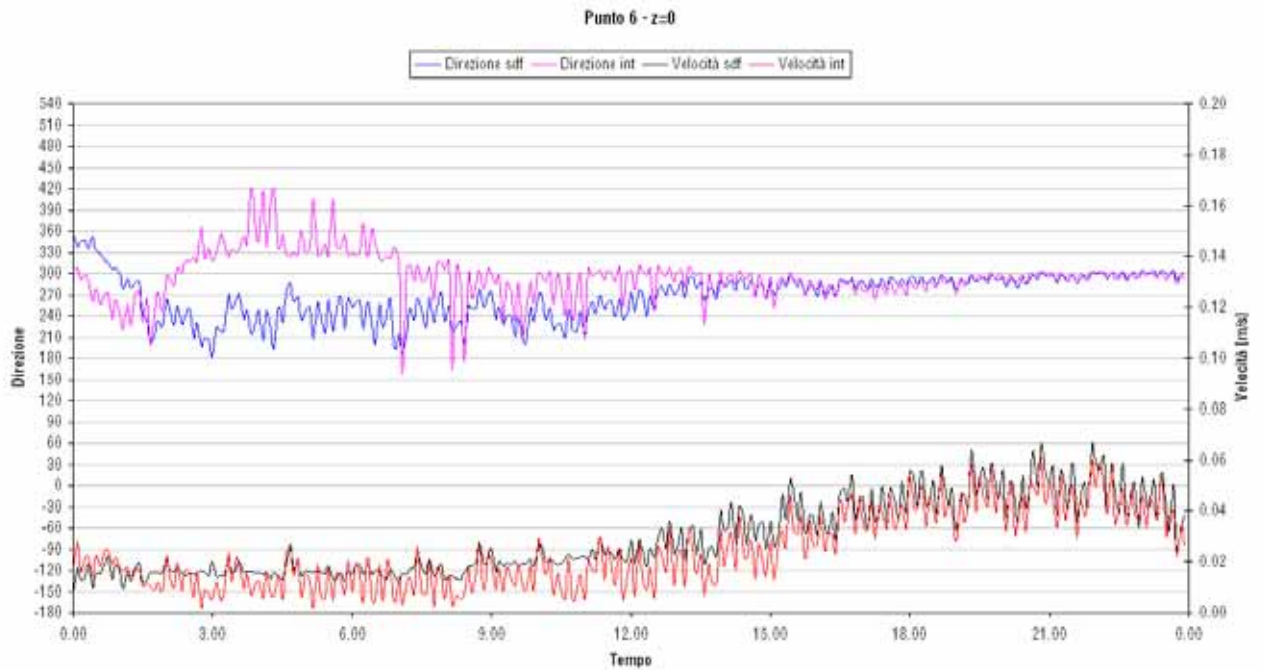


Figura 64 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 6 nello scenario di "tempesta" con fondo non dragato.

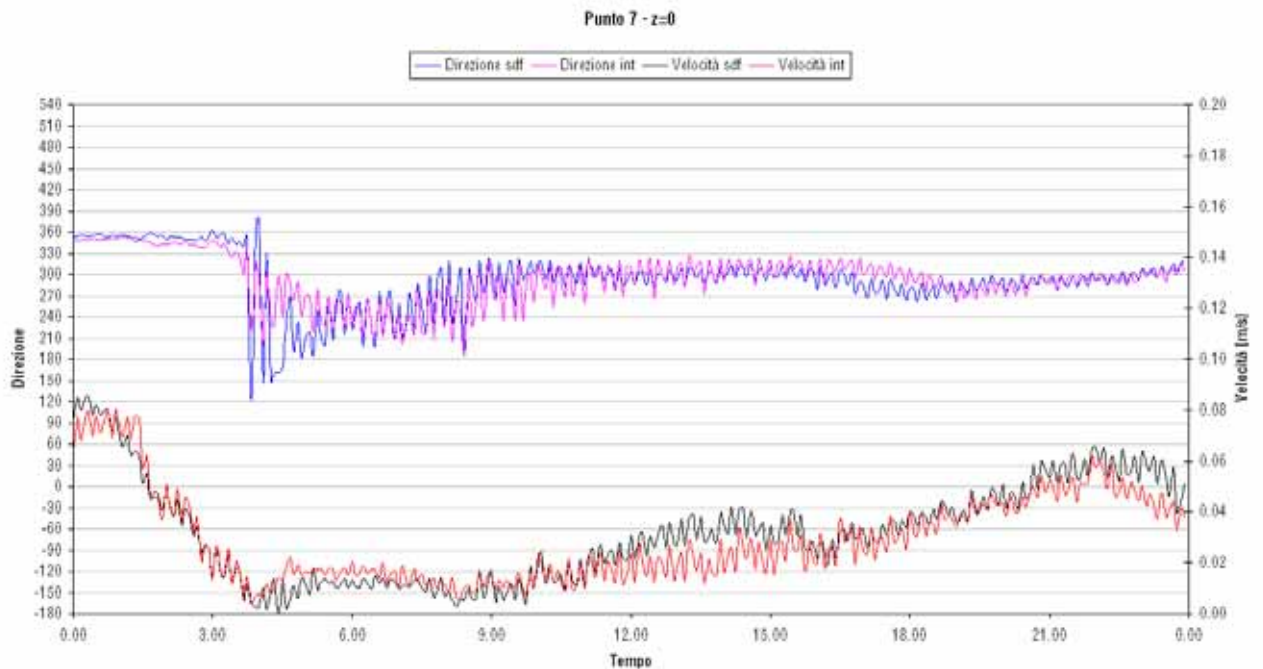


Figura 65 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 7 nello scenario di "tempesta" con fondo non dragato.

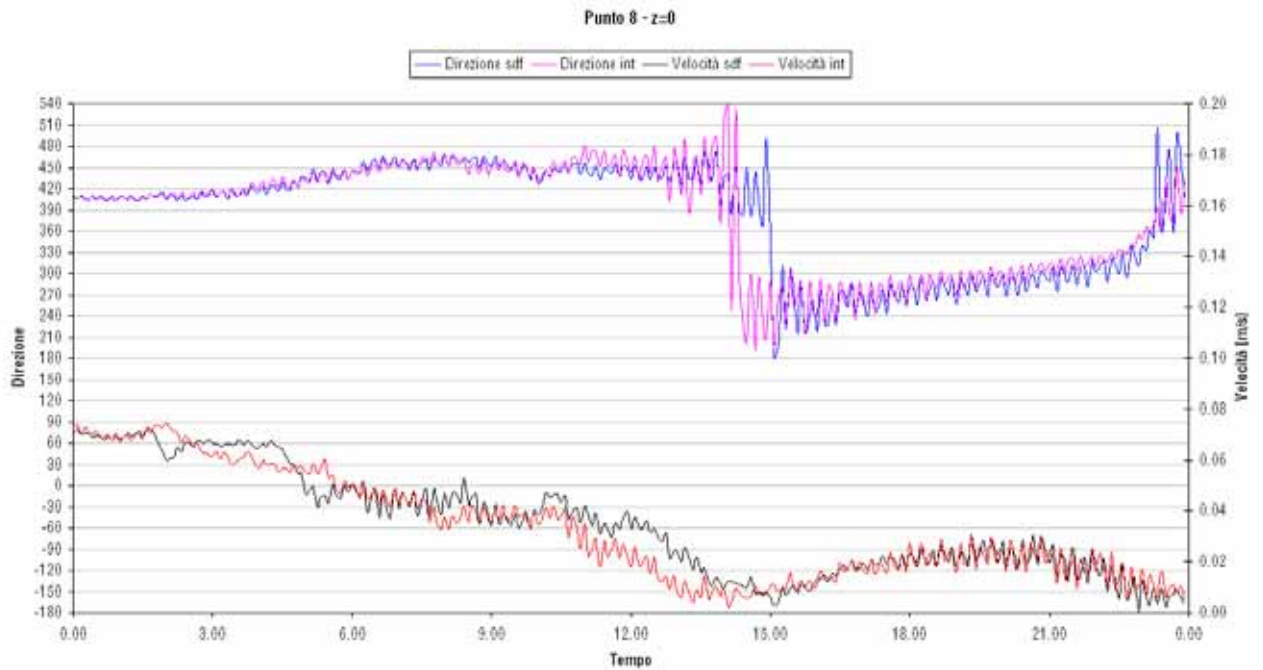


Figura 66 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 8 nello scenario di “tempesta” con fondo non dragato.

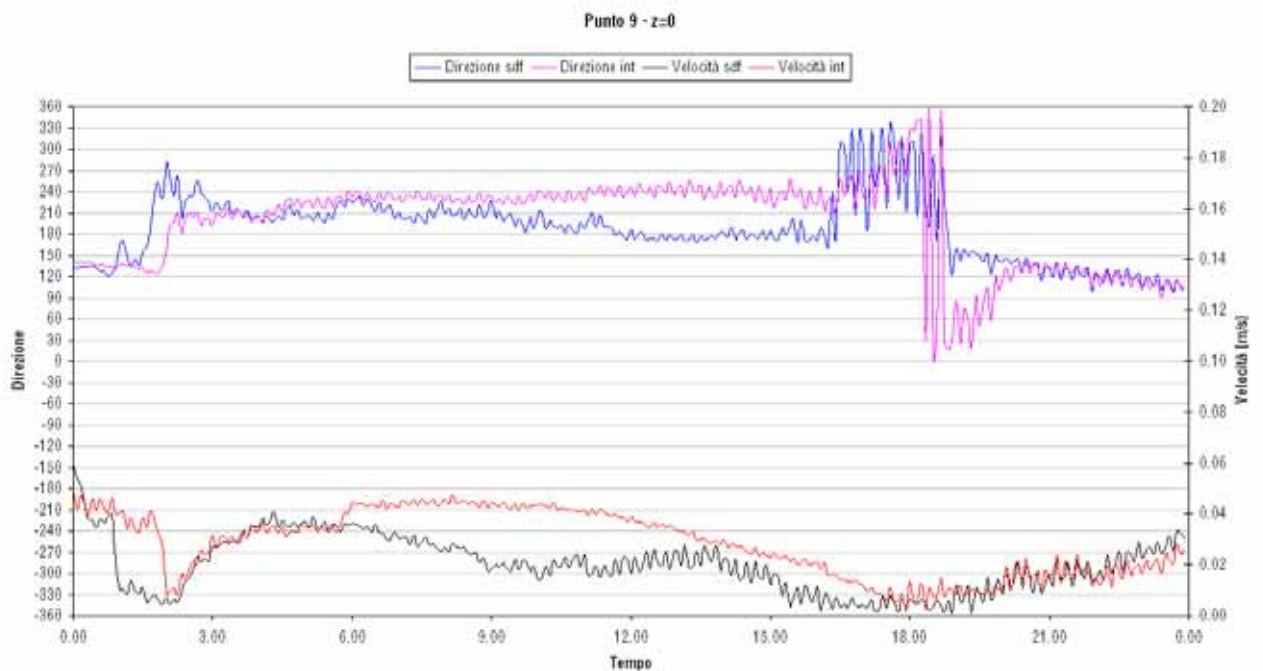


Figura 67 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 9 nello scenario di “tempesta” con fondo non dragato.

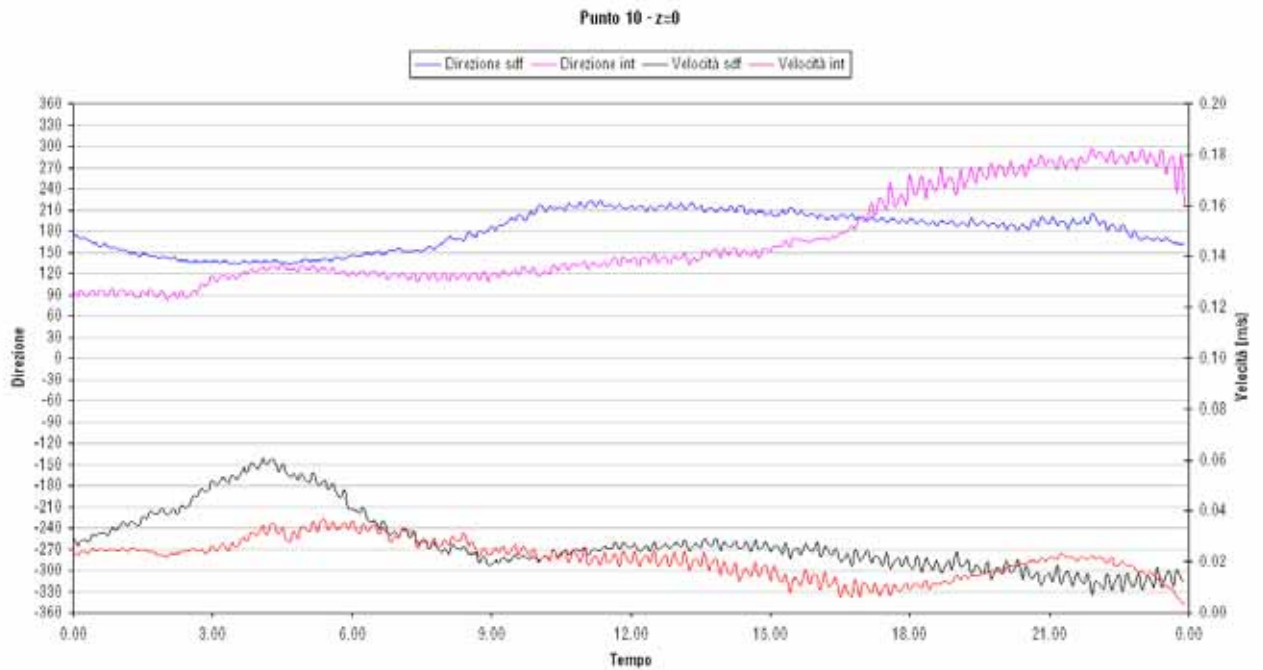


Figura 68 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 10 nello scenario di "tempesta" con fondo non dragato.

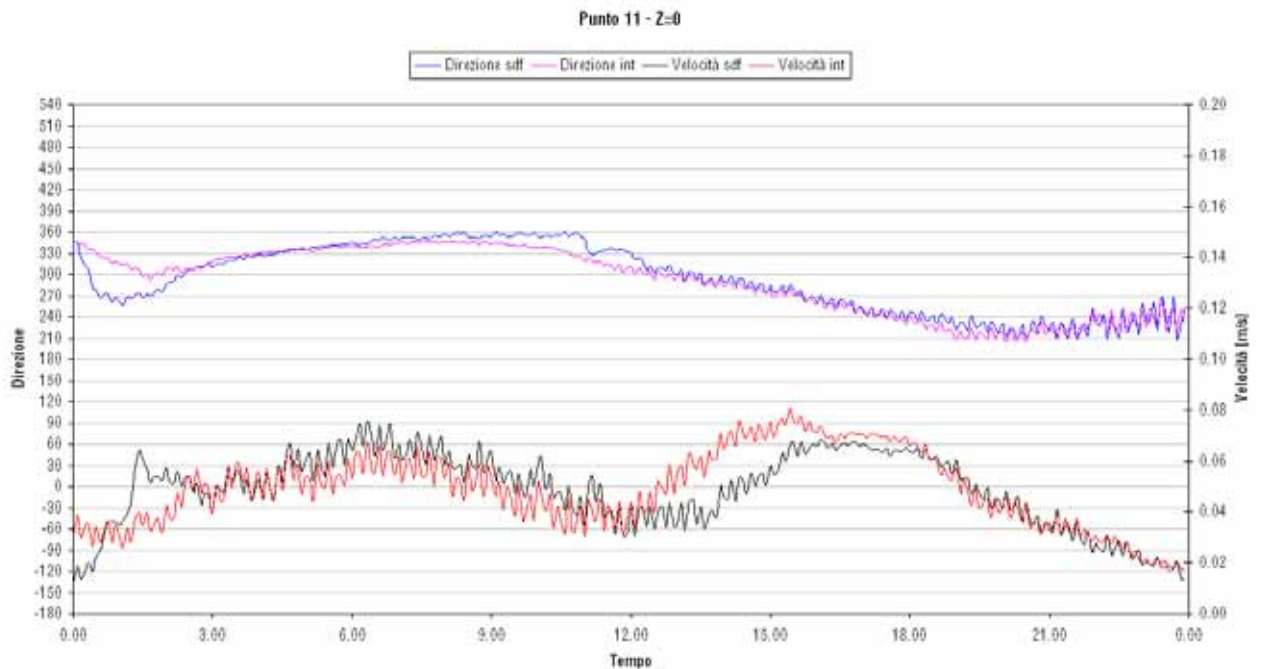


Figura 69 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 11 nello scenario di "tempesta" con fondo non dragato.

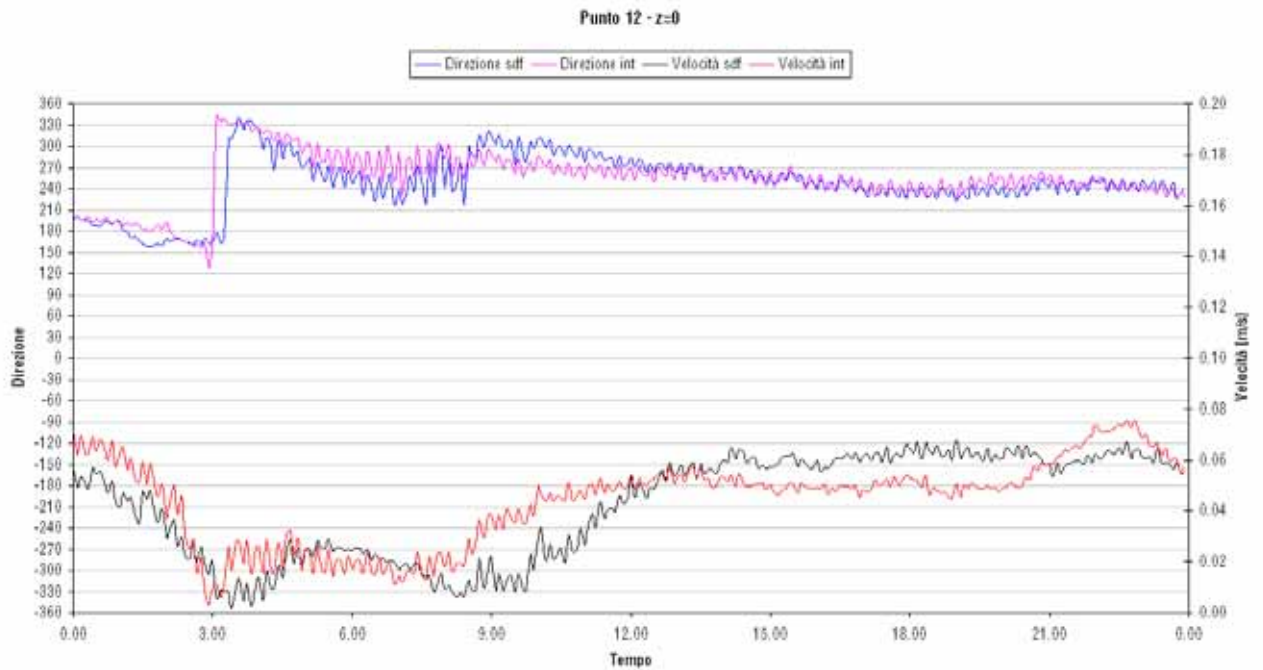


Figura 70 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 12 nello scenario di “tempesta” con fondo non dragato.

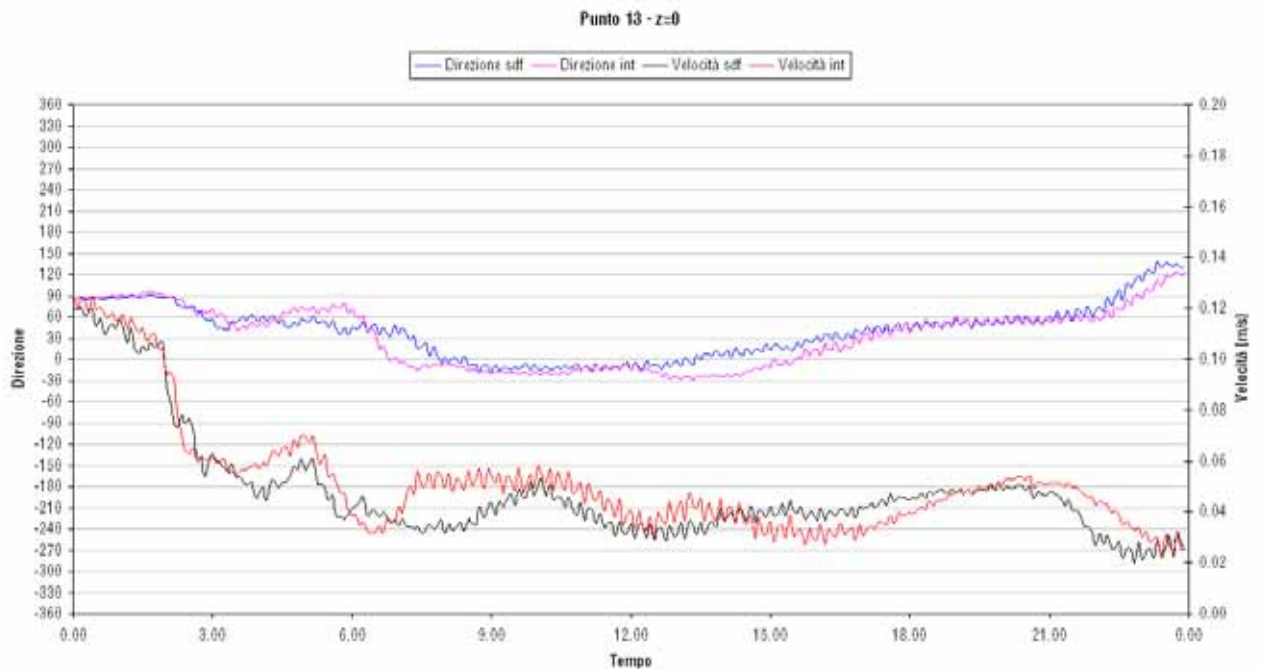


Figura 71 - Direzione e velocità di corrente superficiale nel punto 13 nello scenario di “tempesta” con fondo non dragato.

5. ELABORAZIONE DEI RISULTATI

Limitatamente alle simulazioni a) e b) ed allo stato di calcolo superficiale sono state condotte ulteriori elaborazioni dei risultati già presentati, al fine di evidenziare alcuni aspetti emersi dallo studio.

Le seguenti figure da 72 a 97 presentano il clima di corrente caratteristico, nello scenario di brezza locale considerato nello studio, per i punti di analisi individuati nella figura 19 e forniscono pertanto una informazione immediata sugli effetti degli interventi alle banchine.

In particolare, la scala dei colori presenta le velocità registrate nel periodo di simulazione mentre il raggio di ogni settore circolare indica la frequenza con cui la corrente assume la specifica direzione. L'area centrale, in colore bianco, rappresenta gli intervalli temporali in cui la velocità locale è inferiore a 0.5 cm/s.

Le figure mostrano quindi come le variazioni indotte dagli interventi alle banchine siano sempre modeste. In particolare, anche nei punti in cui l'analisi grafica evidenziava scostamenti significativi tra i due scenari geometrici, quali ad esempio il punto 5, la rappresentazione del clima di corrente mostra come le variazioni avvengano in corrispondenza di velocità estremamente basse e limitatamente ad alcune frazioni temporali dell'intero clima.

Le figure 90 e 91, relative al punto 10, evidenziano il parziale aumento delle velocità e la rotazione della direzione di corrente nell'area del Terminal del Golfo che favorisce la circolazione interna alla rada.

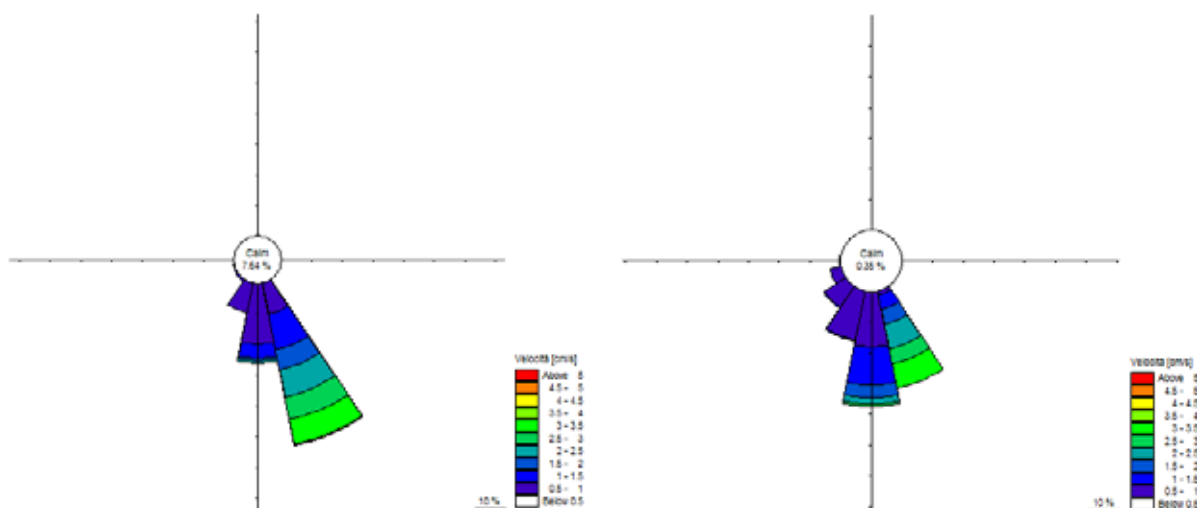


Figure 72 e 73 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 1 allo stato di fatto (72) e di progetto (73).

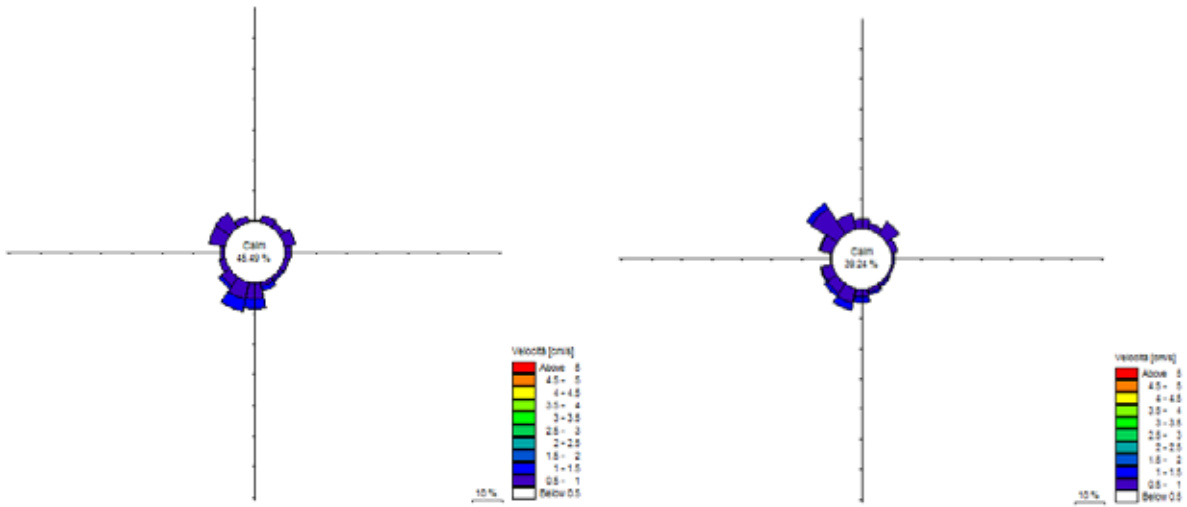


Figure 74 e 75 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 2 allo stato di fatto (74) e di progetto (75).

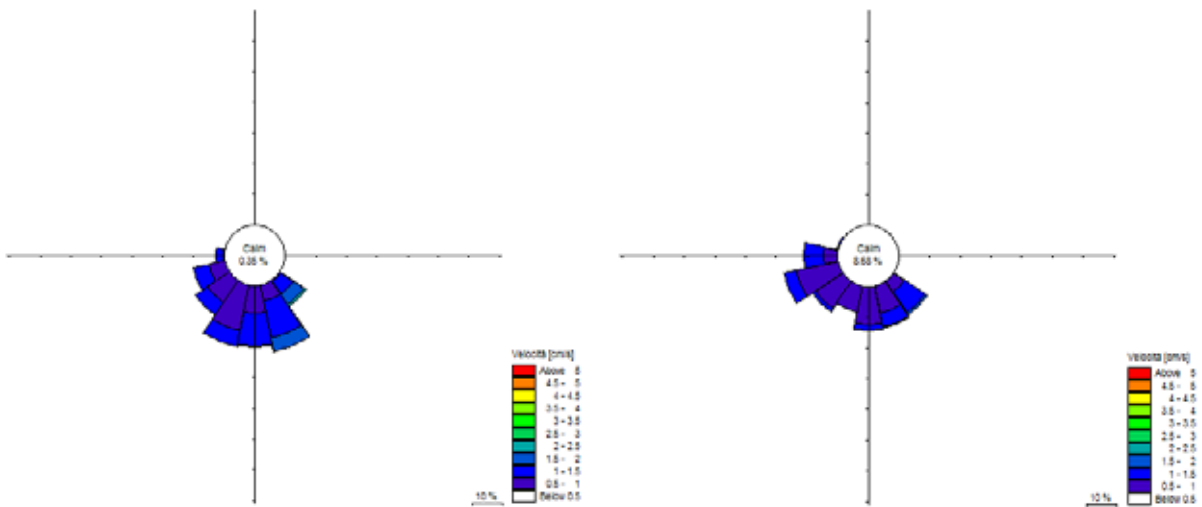


Figure 76 e 77 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 3 allo stato di fatto (76) e di progetto (77).

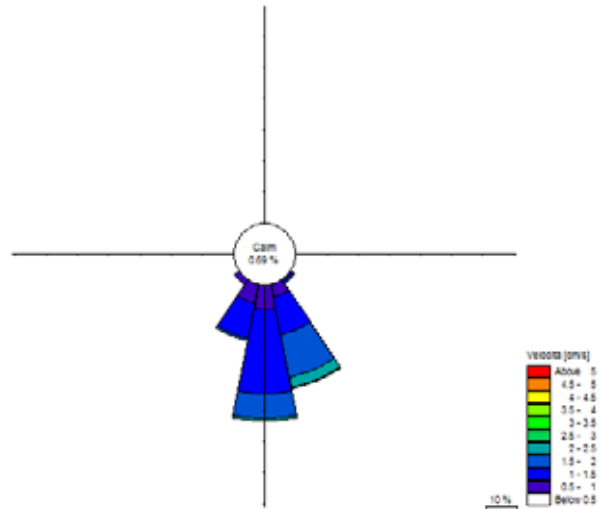
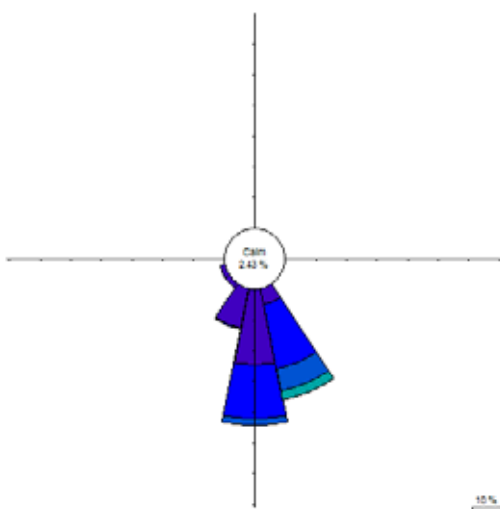


Figure 78 e 79 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 4 allo stato di fatto (78) e di progetto (79).

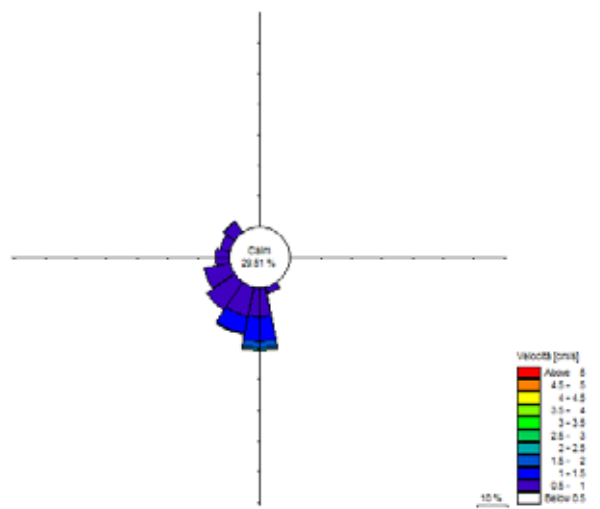
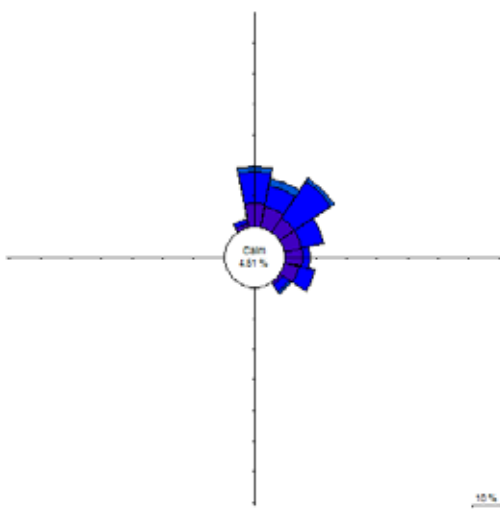


Figure 80 e 81 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 5 allo stato di fatto (80) e di progetto (81).

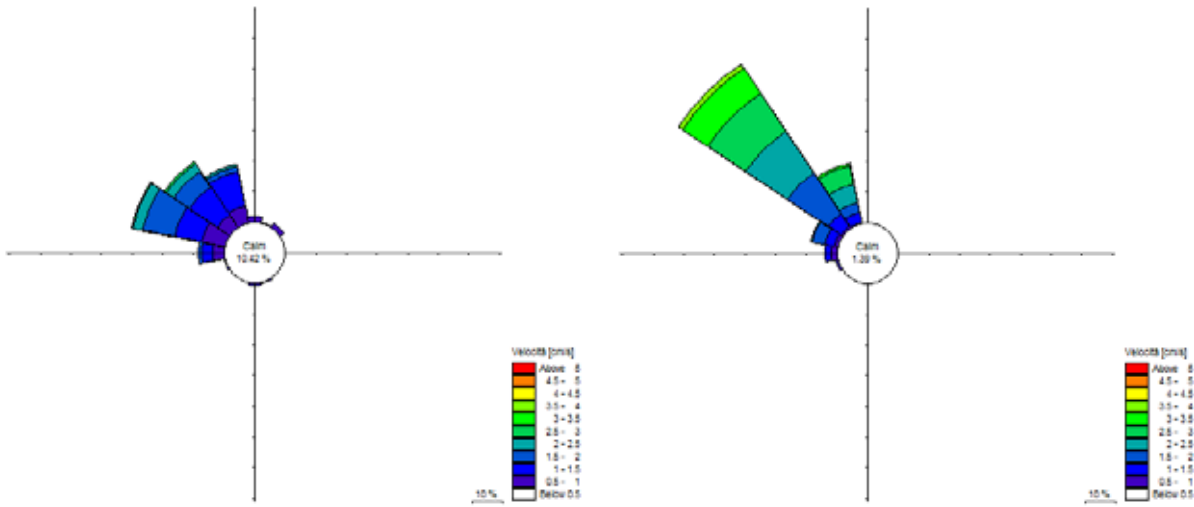


Figure 82 e 83 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 6 allo stato di fatto (82) e di progetto (83).

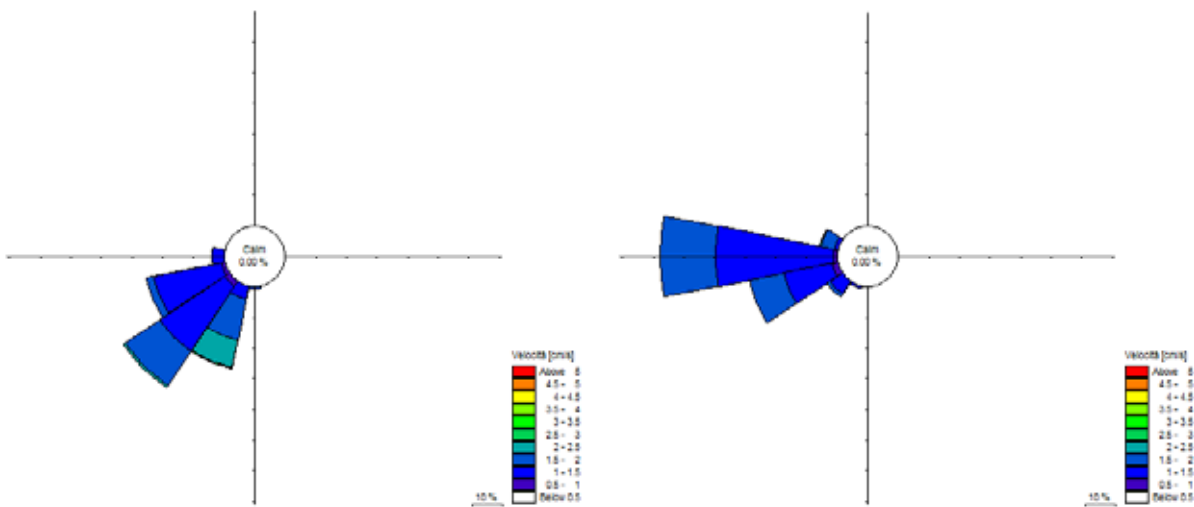


Figure 84 e 85 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 7 allo stato di fatto (84) e di progetto (85).

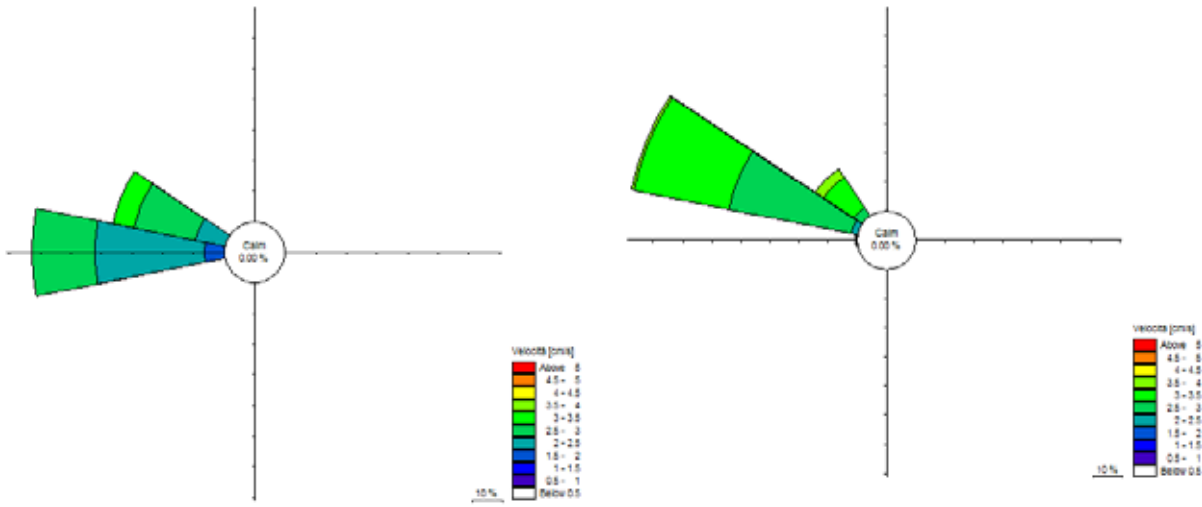


Figure 86 e 87 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 8 allo stato di fatto (86) e di progetto (87).

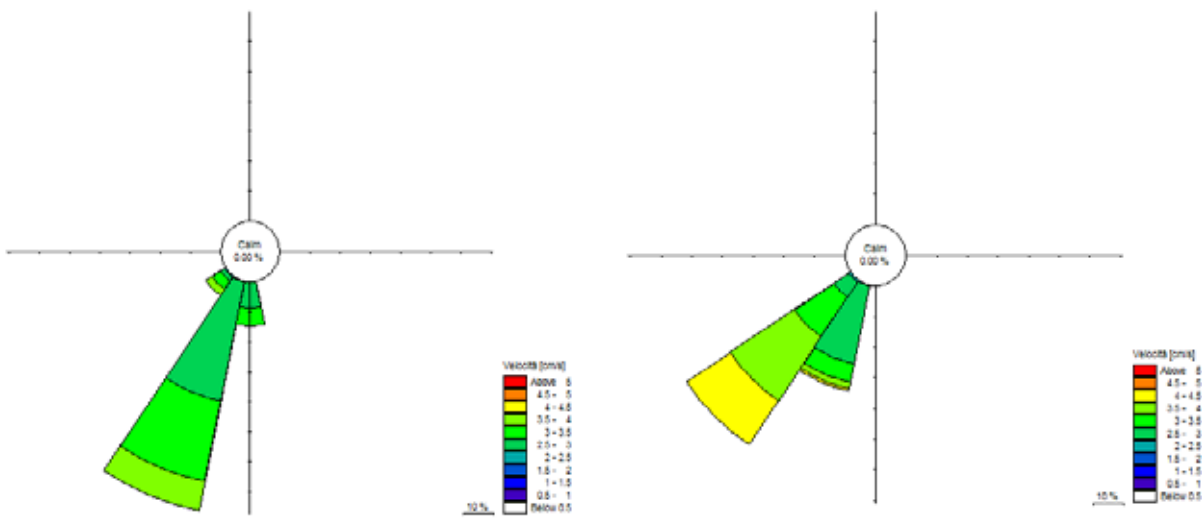


Figure 88 e 89 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 9 allo stato di fatto (88) e di progetto (89).

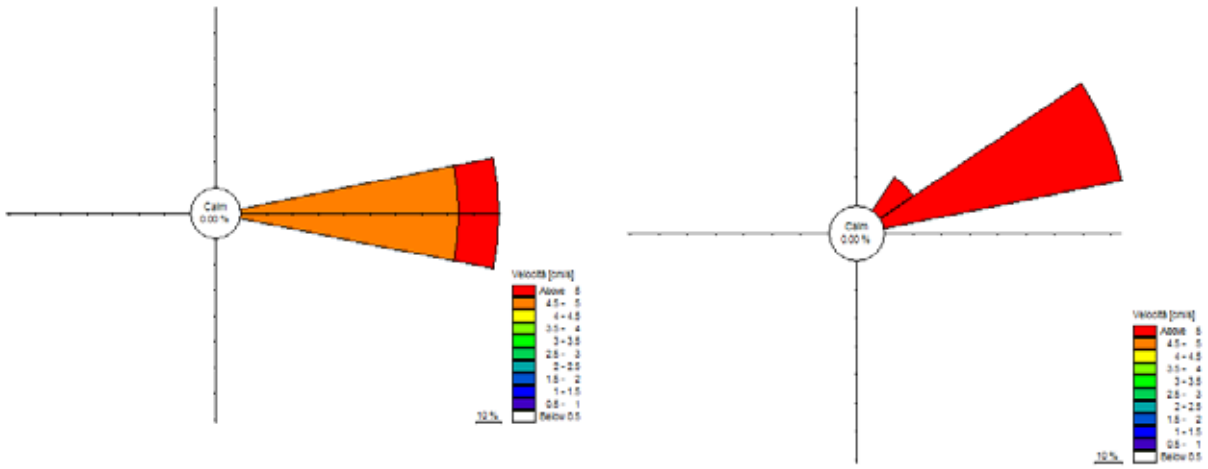


Figure 90 e 91 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 10 allo stato di fatto (90) e di progetto (91).

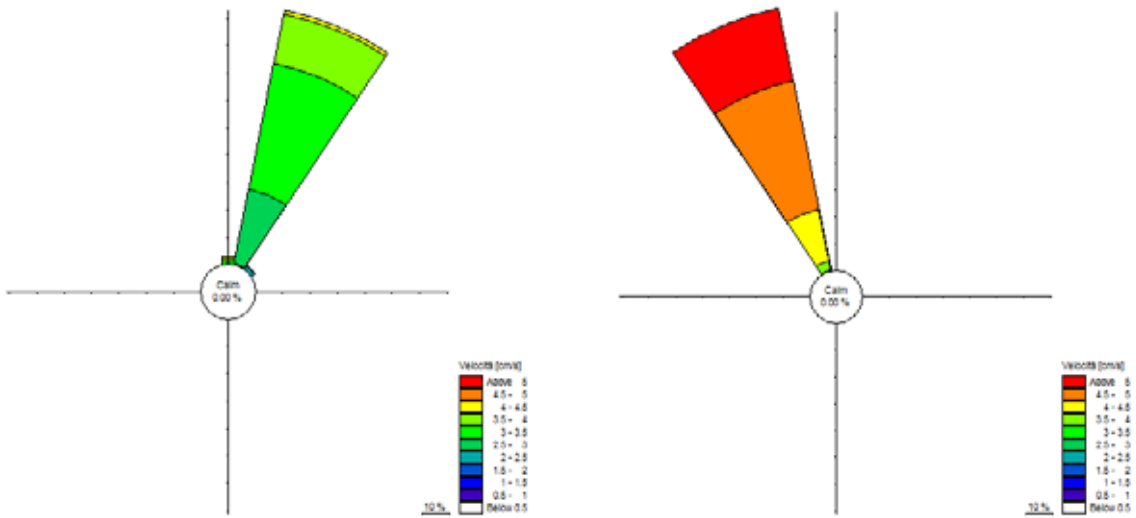


Figure 92 e 93 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 11 allo stato di fatto (92) e di progetto (93).

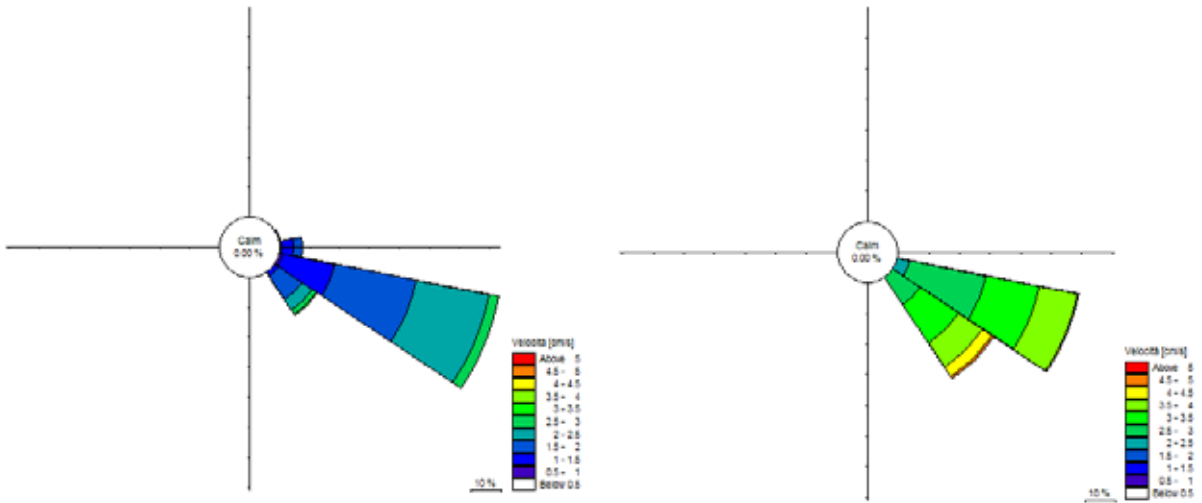


Figure 94 e 95 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 12 allo stato di fatto (94) e di progetto (95).

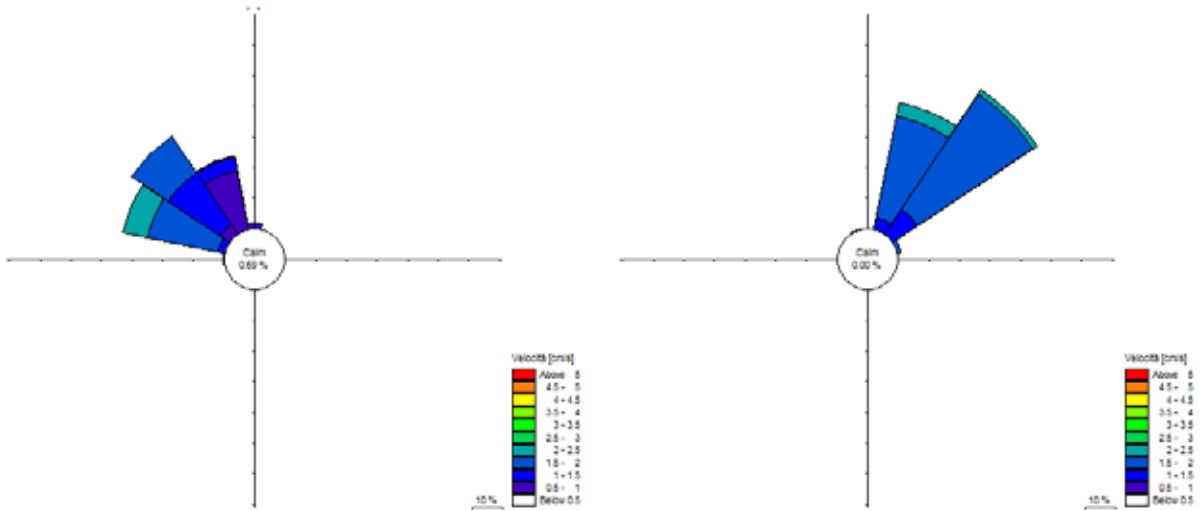


Figure 96 e 97 - Velocità e direzioni di corrente nel punto 13 allo stato di fatto (96) e di progetto (97).

In ultimo, le figure 98 e 99 presentano le variazioni percentuali ed assolute nelle velocità medie tra lo stato di fatto ed a seguito degli interventi.

Anche da queste figure si riscontra come, pur registrandosi variazioni percentuali elevate in alcuni punti, in assoluto i valori di velocità non subiscono alterazioni significative tali da modificare il comportamento idrodinamico della rada.

In valori assoluti, le variazioni maggiori sono localizzate nell'area prossima al Terminal del Golfo, ove si ha un aumento delle velocità di corrente che tende a favorire la circolazione interna alla rada.

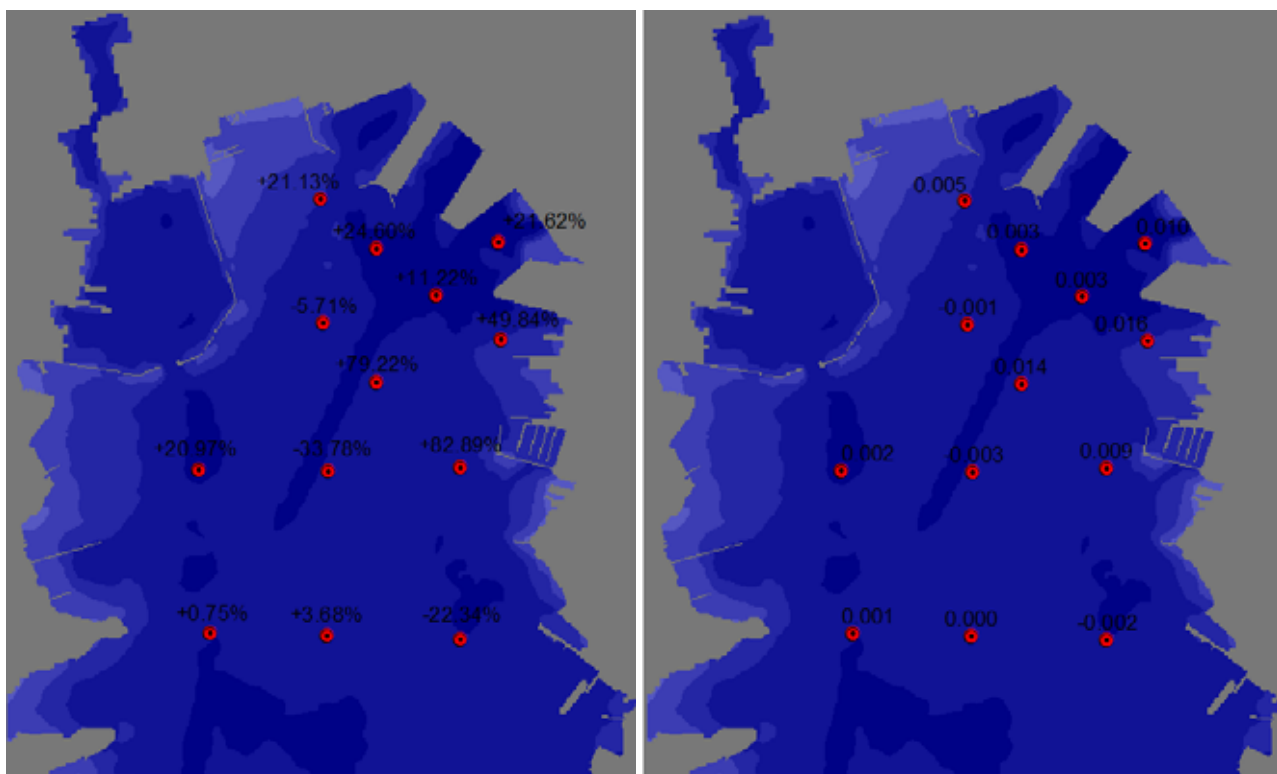


Figure 98 e 99 - Variazioni percentuali ed assolute delle velocità medie di corrente nei punti di analisi.

6. CONCLUSIONI

E' stato costruito un modello numerico tridimensionale per l'area del porto della Spezia utilizzando il codice di calcolo MIKE 3 del DHI Water & Environment.

L'area portuale, chiusa in corrispondenza della diga foranea, è stata descritta con una batimetria a maglia regolare di lato 10 x 10 metri.

Più precisamente, sono state costruite 4 diverse batimetrie in funzione della realizzazione del dragaggio del fondo e degli interventi di ampliamento delle banchine del Terminal del Golfo e delle aree di Marina del Canaletto e Marina di Fossamastra.

Le condizioni al contorno, poste in corrispondenza delle due bocche della diga foranea, sono state desunte dallo "*Studio idrodinamico e dei processi diffusivi e dispersivi nello specchio acqueo interno al golfo della Spezia*" recentemente concluso da Intecno-DHI, nell'ambito del quale è stato costruito un modello multi griglia in grado di simulare il comportamento idrodinamico dell'area a vasta scala.

L'utilizzo di tali condizioni al contorno ha permesso quindi di rappresentare all'interno della rada campi di circolazione coerenti con le dinamiche a più ampia scala nonché con le registrazioni effettuate nell'ambito dello studio ambientale del Golfo della Spezia affidato nel 1989 all'ENEA/CREA e all'ENEL-DCO/ULP e fornito dall'Autorità Portuale della Spezia.

Il modello ha permesso di rappresentare ed analizzare il comportamento idrodinamico delle correnti presenti nella rada considerando anche gli effetti indotti da apporti locali quali lo scarico di acqua calda della centrale ENEL e la portata dolce del canale Lagora.

Tali apporti, inducendo gradienti di salinità e di temperatura, determinano variazioni di densità dell'acqua che innescano correnti caratterizzate da velocità e direzione variabili nel tempo.

Ulteriore fattore considerato nello studio è il vento, rispetto al quale sono stati analizzati due differenti scenari, rispettivamente di "calma" e di "tempesta".

Per ogni scenario è stato simulato un intervallo temporale di 4 giorni analizzando solo le ultime 24 ore, al fine di poter disporre di risultati indipendenti dalle condizioni iniziali imposte.

Il modello numerico così costruito ha permesso di valutare gli effetti indotti dagli interventi previsti presso il Terminal del Golfo e le aree di Marina del Canaletto e Marina di Fossamastra nei diversi scenari considerati.

I risultati delle simulazioni sono stati presentati inizialmente in forma planimetrica, adottando in seguito una forma grafica relativa alle curve di velocità e direzione di corrente in diversi punti caratteristici della rada. Tale forma è risultata più adatta all'analisi dell'influenza indotta dagli interventi alle banchine previsti rispetto a quella planimetrica.

L'analisi ha riguardato prevalentemente lo scenario di "calma" con fondo non dragato, rispetto al quale sono state evidenziate alcune alterazioni locali delle condizioni di deflusso a seguito della realizzazione degli interventi.

Il confronto ha evidenziato parziali variazioni nelle direzioni principali di corrente e nelle relative velocità, in particolare per l'area prossima al Terminal del Golfo.

In tale area, a seguito della realizzazione delle nuove strutture si registra un leggero aumento delle velocità ed una variazione nella direzione di flusso, guidato verso il largo dalla banchina del Terminal del Golfo ora estesa, che tende a favorire la circolazione interna alla rada.

Ulteriori variazioni tra i due scenari geometrici sono state registrate nell'area centrale della rada. Tali alterazioni sono principalmente dovute alle caratteristiche di instabilità delle grandezze idrodinamiche dell'area, più che ad un effetto diretto degli interventi previsti.

Le velocità di corrente risultano sempre modeste, con valori massimi di 0.05 m/s. Le direzioni di deflusso sono invece molto variabili nello spazio e nel tempo con un comportamento di tipo ciclico nei pressi della diga foranea e più regolare in prossimità del Terminal del Golfo, data la forte influenza della presa e dello scarico della Centrale ENEL.

Comportamento simile è risultato dall'analisi relativa allo scenario con fondo dragato nell'ambito del quale l'influenza degli interventi alle banchine è concorde a quella registrata con il fondo attuale.

L'analisi relativa alle condizioni di "tempesta" ha evidenziato una minore influenza degli interventi alle banchine sulle correnti presenti nella rada. In tale scenario le velocità sono, infatti, molto più elevate e caratterizzate da comportamento estremamente irregolare, conseguentemente alla tipologia del vento assunto di riferimento. Le velocità e direzioni di corrente allo stato di fatto ed a seguito della realizzazione degli interventi risultano quindi più uniformi.

In ultimo, sono stati presentati i grafici relativi al clima di corrente nei diversi punti analizzati che hanno permesso una visualizzazione immediata del regime di corrente caratteristico nelle diverse zone della rada e, di conseguenza, dell'influenza indotta dall'ampliamento delle banchine.

In generale, dal confronto è emerso che gli interventi previsti non determinano alterazioni significative alle dinamiche fondamentali della rada, che risulta peraltro caratterizzata da un comportamento estremamente complesso ed irregolare, difficilmente riconducibile a scenari standardizzati.

Le variazioni di velocità evidenziate sono infatti sempre modeste, non tali da condizionare il comportamento complessivo della rada.

Sono presenti alcune variazioni di direzione localizzate presso la zona d'intervento, accompagnate da un parziale incremento delle velocità, che tendono a favorire la circolazione interna alla rada.

ALLEGATO 1

**MIKE 3 - A Three-dimensional Hydrodynamic
Model**

INTRODUCTION

MIKE 3 is a generalised mathematical modelling system designed for a wide range of applications in areas such as:

- oceanography
- coastal regions
- estuaries and lakes

The system is fully three-dimensional solving the momentum equation and continuity equations in the three Cartesian directions.

MIKE 3 simulates unsteady flow taking into account density variations, bathymetry and external forcing such as meteorology, tidal elevations, currents and other hydrographic conditions.

MIKE 3 can be applied to:

- oceanographic studies
- coastal circulation studies
- water pollution studies
- environmental impact assessment studies
- heat and salt recirculation studies
- sedimentation studies

MIKE 3 is composed of three fundamental modules: The hydrodynamic (HD) module, the turbulence module and the advection-dispersion (AD) module. Various features such as free surface description, laminar flow description and density variations are optionally invoked within the three fundamental modules.

A number of application modules have been implemented and can be invoked optionally. These are advection-dispersion of conservative or linearly decaying substances, a water quality (WQ) module describing BOD-DO relations, nutrients and hygienic problems, an eutrophication (EU) module simulating algae growth and primary production, and a mud transport (MT) module simulating transport along with erosion and deposition of cohesive material. A Lagrangian based particle (PA) module can also be invoked for simulating eg tracers, sediment transport or the spreading and decay of E-Coli bacteria.

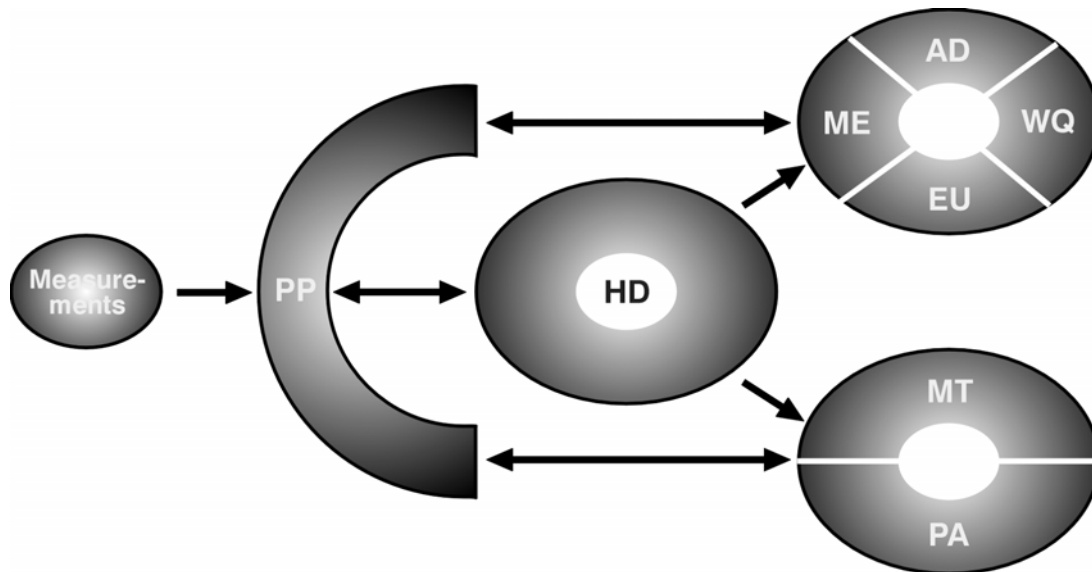
The modelling system is based on the conservation of mass and momentum in three dimensions of a

Newtonian fluid. The flow is decomposed into mean quantities and turbulent fluctuations. The closure problem is solved through the Boussinesq eddy viscosity concept relating the Reynold stresses to the mean velocity field. To handle density variations, the equations for conservation of salinity and temperature are included. An equation of state constitutes the relation between the density and the variations in salinity and temperature and - if the MT calculations are invoked - mud concentration.

In the hydrodynamic module, the prognostic variables are the velocity components in the three directions and the fluid pressure. The model equations are discretised in an implicit, finite difference scheme on a staggered grid and solved non-iteratively by use of the alternating directions' implicit technique. A phase and amplification analysis neglecting effects of viscosity, convective terms, rotation, density variations, etc has been performed. Under these circumstances, the finite difference scheme is unconditionally stable.

The transport of scalar quantities, such as salinity and temperature, is solved in the advection-dispersion module using an explicit, finite difference technique based on quadratic upstream interpolation in three dimensions. The finite difference scheme, which is accurate to fourth order, has attractive properties concerning numerical dispersion, stability and mass conservation.

The decomposition of the prognostic variables into a mean quantity and a turbulent fluctuation leads to additional stress terms in the governing equations to account for the non-resolved processes both in time and space. By the adoption of the eddy viscosity concept these effects are expressed through the eddy viscosity, which is optionally determined by one of the following five closure models: a constant eddy viscosity, the Smagorinsky sub-grid (zero-equation) model, the k - (one-equation) model, the standard k - ϵ (two-equation) model and, finally, a combination of the Smagorinsky model for the horizontal direction and a k - ϵ model for the vertical direction. The turbulence models are all solved in an explicit manner except for the one-dimensional (vertical) k - ϵ model, which is solved by an implicit scheme.



Design structure of the three-dimensional modelling system, called MIKE 3

GOVERNING EQUATIONS

In a three-dimensional hydrodynamic model for flow of Newtonian fluids, the following elements are required:

- mass conservation
- momentum conservation
- conservation of salinity and temperature
- equation of state relating local density to salinity, temperature and pressure as well as to possible mud concentration

Thus, the governing equations consist of seven (possibly eight) equations with seven (eight) unknowns.

The mathematical foundation is the Reynolds-averaged Navier-Stoke's equations in three dimensions, including the effects of turbulence and variable density, together with the mass conservation equation:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_T \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right\} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

where ρ is the local density of the fluid, u_i the velocity in the x_i -direction, Ω_{ij} the Coriolis tensor P the fluid pressure, g_i the gravitational vector, ν_T the turbulent eddy viscosity, δ_{ij} Kronecker's delta, k the turbulent kinetic energy, and t denotes the time.

Coast contours and depth contours are described as accurately as possible with the selected grid size. The transport equations for salt and temperature are used together with an equation of state for the density of the water:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j S) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_s \frac{\partial S}{\partial x_j} \right)$$

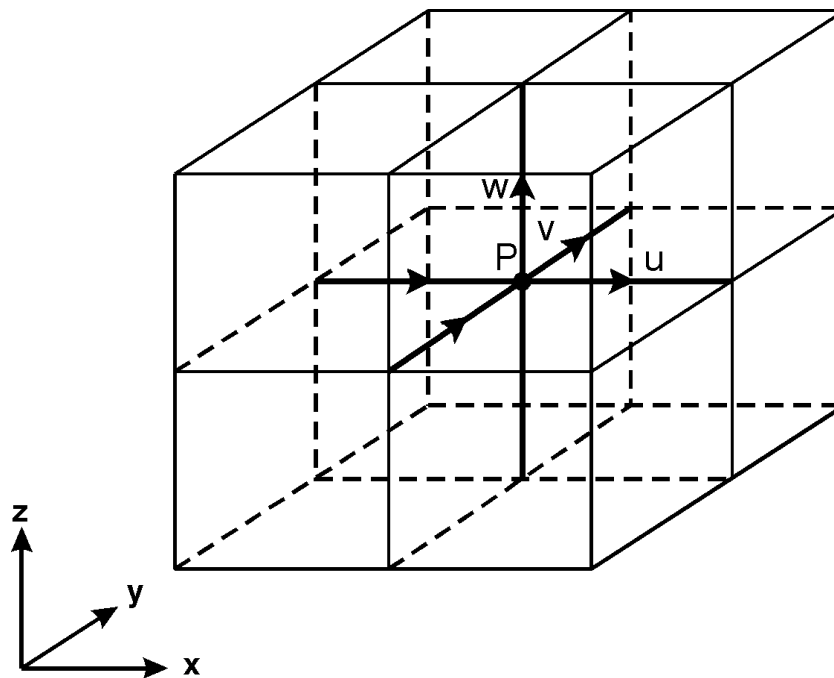
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q_H$$

where S is the salinity, T the temperature and Q_H the heat exchange with the atmosphere. D_s and D_T are the dispersion coefficients for salt and temperature, respectively. There are several types of equations of state for the density of seawater. In MIKE 3, the definition given by UNESCO has been adopted relating local density to salinity, temperature and pressure.

Heat exchange with the atmosphere is implemented with basis in the four physical processes:

- sensible heat flux (convection)
- latent heat flux (vaporisation)
- net short wave radiation
- net long wave radiation

The mass and momentum equations cannot be solved by a computer as they express a continuous change in both time and space. Thus, the equations need to be reformulated in terms of discrete changes in both time and space. A number of techniques for this reformulation are used in computational fluid dynamics of which the finite volume and finite difference are the most popular techniques.



The staggered grid adopted in MIKE 3

Traditionally, the finite difference technique is used in the field of hydraulics, and thus it is also used in (almost) all existing models developed throughout the years at the Danish Hydraulic Institute.

Before discretising the differential equations into a finite difference scheme, a spatial grid is required.

The actual grid that has been adopted is the so-called Arakawa C staggered grid, see figure above.

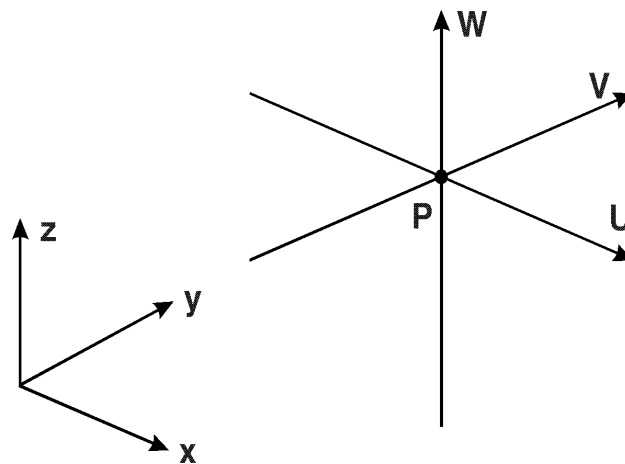
The mesh size (or grid spacing) is defined as the distance between two nodes.

The velocities u , v and w are defined between the nodes, whereas scalar quantities such as the pressure,

salinity, temperature, etc are defined in the nodes. The prognostic variables used in the hydrodynamic part of MIKE 3 are shown in the figure below.

The adopted staggered grid allows for the spatial discretisation of the differential equations. The mass equation is space centred in every node, whereas the momentum equations are space centred in the corresponding velocity 'nodes' to form a huge set of

equations. However, the time derivatives imply the definition of certain time levels, also, leading to either explicit or implicit schemes. In general, all prognostic variables in implicit schemes are defined at the same time level and then an iterative technique is applied to inverse the matrix to advance the solution one time step.



Definition of the prognostic variables used in the hydrodynamic part of MIKE 3

This inversion may be performed on the entire matrix in one step, which, due to the size of the matrix, is a costly way. Alternatively, the inversion may be split into three operations according to the three directions. In each operation, only the prognostic variables directly associated with the directions are considered as prognostic, whereas the other direction variables are locked, eg only the pressure and u-velocities during a x-direction operation. This technique is known as the Alternating Directions Implicit (ADI) algorithm.

In almost all of the modelling systems developed at the Danish Hydraulic Institute, the ADI-technique has been adopted to inverse the matrices. Usually, iterative methods are required for the inversion of the matrices due to the non-linear terms in the momentum equations. However, applying two special techniques allows for a non-iterative ADI algorithm to be adopted. The first of these two techniques is called the 'fractioned-step' technique.

Basically, the 'fractioned-step' technique is a time staggering of the prognostic variables. This technique has been described in detail by Leendertse (1967).

The second special technique is called 'side-feeding' and is basically a semi-linearisation of the non-linear terms. Details on this side-feeding technique are given by Abbott (1979).

The primitive equations, as listed above, will mathematically form an ill-posed problem whenever the fluid pressure and the velocities constitute the prognostic variables due to a weak coupling between the pressure and the velocities. *This is the key issue in three-dimensional modelling.* The system is said to be stiff as both slow and fast processes are present, which inherently cause difficulties in the numerical algorithm. In free surface flows, however, only the slow processes are of interest and usually the fast processes (like shock

waves) have no substantial influence on the slow processes (like the free surface waves) suggesting that they may be removed without loss of information. The fast processes are easily eliminated by replacing the time derivative of the density in the mass conservation equation with the pressure term in the equation of state, whereby a compressibility of the fluid is introduced. The fast processes are then subsequently eliminated through an artificial compressibility whereby the system has become hyperbolic dominated. This approach is known as the artificial compressibility approach and was first proposed by Chorin, 1967.

Alternatively, so-called pressure correcting methods can be applied in which the divergence-free continuity equation is enforced through the solution of a Poisson equation for the pressure (cf Ferziger, 1987 and Patankar, 1980).

It is the artificial compressibility method that has been adopted in MIKE 3.

ADVECTION - DISPERSION

MIKE 3 is applicable to flow problems in which density variations and turbulence are important features. The mathematical modelling of such flows requires the solution of partial differential equations of the advective-diffusive type.

The flow modelling will require the solution of the transport equation for:

- Salinity
- Temperature (heat)
- Turbulent kinetic energy (k-equation)
- Dissipation of turbulent kinetic energy (ϵ -equation).

The latter two equations form the well-known k and k - ϵ turbulence models, see Section on Turbulence. For the k -model and the standard k - ϵ model, the non-linear transport equations are solved by explicit UPWIND scheme. The one-dimensional (vertical) k - ϵ model essentially forms two one-dimensional diffusion equations, which are efficiently solved by an implicit scheme.

The partial differential equations describing transport of salinity and temperature as well as transport of concentrations of substances, water quality and

eutrophication components and mud concentration are all linear advective-diffusive type equations, and accordingly the same solution scheme is applied to all these components.

A large number of methodologies for solving the advection-diffusion problem are reported in the literature. However, in order to be consistent with the HD module, a finite difference approach was chosen.

The QUICKEST (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms, Leonard (1979)) is applied. The method is based on a conservative control-volume formulation. Upstream interpolation is used to determine higher order derivatives. This procedure avoids the stability problems of central differencing while remaining free of the inaccuracies of numerical diffusion associated with the usual upstream differencing.

The extension of this scheme to two and three dimensions is given in Justesen et al (1989), Ekebjærg and Justesen (1991) and Vested et al (1992). For use in situations where resolution of steep fronts are important, the scheme has been further improved by implementation of an exponential interpolation at steep fronts, the so-called QUICKEST-SHARP scheme, see also Leonard (1988).

Alternatively, the so-called QUICKEST-ULTIMATE scheme, using operator splitting, may optionally be invoked, see eg Leonard (1991). This scheme is advantageous in cases with more than one advection-diffusion component, since in MIKE 3 it has been implemented such that the CPU time consumption is practically independent of the number of components.

The equation to be solved in the AD model can be written as:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) + \frac{\partial}{\partial z}(wc) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + SOURCE / SINK$$

Considering the grid point (x_j, y_k, z_l) , the explicit, finite difference approximation for the equation above is written for the associated control volume

$$\left(\begin{array}{l} x_j - 1/2 - x, x_j + 1/2 - x ; \\ y_k - 1/2 - y, y_k + 1/2 - y ; \\ z_l - 1/2 - z, z_l + 1/2 - z \end{array} \right).$$

$$c_{j,k,l}^{n+1} = c_{j,k,l}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ T_x(j+1,k,l) - T_x(j-1,k,l) \} \\ - \frac{\Delta t}{\Delta y} \{ T_y(j,k+1,l) - T_y(j,k-1,l) \} \\ - \frac{\Delta t}{\Delta z} \{ T_z(j,k,l+1) - T_z(j,k,l-1) \}$$

It is computationally more convenient and efficient to express the scheme by the use of transports. The transports through the control surface are the velocity perpendicular to the surface multiplied by the surface concentrations. These concentrations are located between nodes and have to be interpolated.

With the QUICKEST-SHARP scheme, eight points are used to calculate the transport through each control surface. With the QUICKEST-ULTIMATE scheme, three points are used corresponding to down-stream, up-stream and very-up-stream positions relative to each control surface. The interpolation weights are determined in such a way that truncation error terms up to third order are cancelled.

TURBULENCE

Today, calculations of mean flow properties of turbulent flows in 2D and 3D can be accomplished with a number of different mathematical models to provide closure, eg the $k-\varepsilon$ model. Such calculations are now standard in many industrial applications.

Furthermore, in the scientific community, results of laboratory experiments are often compared with results from mathematical models. In such simulations it is usually possible to make a distinction between the 'mean flow' and the superimposed 'turbulent fluctuations' in an unambiguous way.

In geophysical systems, on the other hand, a variety of interacting motions at different time scales exist. The terms' grid scale processes and subgrid scale processes therefore apply to different physical phenomena depending upon the grid on which the system is resolved.

A number of processes are listed according to their time scale in the table below. The spectral window indicates the resolved time scales, whereas the smaller scale processes are given as filtered out processes. It is seen that depending upon which process one wants to resolve, a different, smaller scale process may be the most important to model.

Of course, there is a length scale associated with each of the time scales in the table below. It is observed that a larger time scale will generally correspond to a larger length scale.

The table below makes it apparent that the term turbulence model is inappropriate, because this model has to include the effects of processes that are usually not referred to as turbulence. Such processes include mesialscale and mesoscale processes such as internal waves, tides and surges. Generally, these motions would be placed at the 'mean flow' level, but in reality this will depend on the temporal resolution!

Time Scales in Oceanography. From Nihoul et al (1989)

Time scale	Frequency s⁻¹	Spectral windows (highlighted processes)	Smaller scale fluctuations (filtered out processes)
1 second	1	Microscale processes 3D "eddy" turbulence (+surface waves)	Molecular diffusion
1 minute	10 ⁻²	Mesialscale processes Internal waves Vertical microstructure "Bliny" inhibited turbulence	Eddy turbulence
1 hour	10 ⁻⁴	Mesoscale processes Inertial oscillations Tides, storm surges	"Bliny turbulence"
1 day	10 ⁻⁵	Diurnal variations	
1 week	10 ⁻⁶	Synoptiscale processes Frontal currents Meanders, "rossby" turbulence	Mesoscale variability
1 month	10 ⁻⁷	Seasonalscale processes	"Rossby turbulence"
1 year	10 ⁻⁸	Globalscale processes Climatic processes (Paleo) climatiscale processes	Seasonal variability

Smagorinsky model

A turbulence closure model must prove its validity through the model calibration and the associated comparisons with measured data. Good turbulence models have extensive universality without being too complex. The most popular model for the subgrid scale eddy viscosity was proposed by Smagorinsky (1963). Here, the eddy viscosity is linked to the filter size (grid spacing) and the large eddy strain rate, ie velocity gradients of the resolved flow field,

$$\nu_T = \lambda^2 \sqrt{2 S_{ji} S_{ij}}$$

in which

$$S_{ij} = -\frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$$

is the stress tensor and λ is a characteristic length scale.

k model

The first important improvement of the mixing-length theory is to determine the velocity scale from a transport equation rather than from the mean flow field.

It is physically most reasonable to utilise \sqrt{k} as the velocity scale. k is a direct measure of the intensity of the turbulent fluctuations in all three directions (the turbulent kinetic energy). Since this energy is contained in the large-scale eddies, \sqrt{k} becomes a velocity scale for the large-scale motion.

Now, using this velocity scale together with a prescribed length scale λ , the eddy viscosity can be expressed as

$$\nu_T = c'_\mu \sqrt{k} \lambda$$

This expression is known as the Kolmogorov-Prandtl relation. The distribution of k has to be deduced from the solution of a transport equation for k . c'_μ is an empirical constant to be determined from experiments.

Turbulence models that consist of the flow equation, the transport equation for k , and a specified length scale are called one-equation models of turbulence and are normally based on the eddy viscosity concept.

The inclusion of the memory effect in the turbulence represents one step forward in comparison with the zero-equation models. However, when the effects of convection and diffusion are important, a transport equation for either the length scale or a related quantity must be added to the turbulence model. This may be relevant in recirculating flows or rapidly changing flows.

Standard k-ε model

The length scale specification inherent in the one-equation model can be replaced by a transport equation for a turbulent quantity

$$z = k^m \lambda^n$$

where m and n can be any numbers. Several of these combinations have been proposed and tried so far. Little success has been gained using the length scale itself, see eg Launder and Spalding (1972). Instead, the isotropic energy dissipation rate has been used extensively:

$$\varepsilon = C_D \frac{k^{3/2}}{\lambda}$$

A two-equation turbulence model may consist of the flow equation, the transport equation for the turbulent kinetic energy, the transport equation for the dissipation rate, and the Kolmogorov-Prandtl expression

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

to link the quantities together. Such a model is usually referred to as a k - ε model in the literature.

Within the framework of the eddy viscosity concept it is the most advanced turbulence model that can be established. In many flows, however, when the individual Reynolds stresses play very important roles, transport equations can be derived that eliminate the need for the eddy viscosity.

Mixed 2D Smagorinsky, 1D k - ε model

Due to the large aspect ratio $\Delta x/\Delta z$ often used in applications of MIKE 3, different formulations are appropriate for the horizontal and the vertical directions. In the mixed Smagorinsky/ k - ε model, the horizontal eddy viscosity is determined as described above for the pure Smagorinsky model. For the vertical direction, the 1D k - ε model described by Burchard and Baumert (1995) is applied. This model uses transport equations for two quantities to describe the turbulent motion: the turbulent kinetic energy, k , and the dissipation rate of turbulent kinetic energy, ε . The Kolmogorov-Prandtl expression

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

couple the mean flow equations to the state variables of the turbulence model. The basic assumption of the present k - ε model is that vertical motions are mainly turbulent fluctuations and the mean component can be neglected. Due to the coarse horizontal resolutions, it is further assumed that advective processes are insignificant compared to the local balance. The transport equation for k and for ε then reads

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + G - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + c_{3\varepsilon} G) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

where

$$P = \nu_T \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}$$

is the production term due to velocity shear, and

$$G = \frac{g}{\rho} \frac{v_T}{\sigma_T} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

is the production term due to buoyancy, u and v are the horizontal velocity components, v_T is the effective eddy viscosity, g the gravity, ρ the density, and σ_T the Prandtl number. c_μ , σ_k , σ_ε , $c_{1\varepsilon}$, $c_{2\varepsilon}$ and $c_{3\varepsilon}$ are empirical parameters.

Buoyancy Effects

A very important aspect of turbulence modelling is to incorporate the effects of buoyancy in a correct way. Although turbulence modelling has been a research area for more than 20 years, there is no universal modification for buoyancy, which can be applied to the existing turbulence models in all cases. This is mainly due to the fact that stratified flows in oceanography are often governed by instabilities and countergradient transport phenomena. Usually, turbulence models are based on gradient diffusion/ transport models, which will fail in such cases.

When a density gradient is present in eg the mixing layer in a stratified flow, the diffusion coefficient is damped. This means that entrainment and mixing will be overpredicted if the model does not account for this effect. The simplest way of introducing this is to reduce the eddy viscosity in areas with density gradients. The problem is how to parameterise the dampening.

Various suggestions on how to modify the Smagorinsky formulation of the eddy viscosity have been given. From the research on stratified flows, see eg Pedersen (1980), it has been established that such a dampening must be a function of the Richardson gradient number, Ri given by

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} / \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}$$

For stable stratification, the Smagorinsky eddy viscosity can optionally be reduced as

$$\frac{v_T}{v_{T0}} = \frac{1}{(1 + \psi Ri)^\alpha}$$

where ψ and α are dimensionless constants. The Smagorinsky formulation of the eddy viscosity and modified to handle buoyancy effect has been implemented in an explicit manner.

In the k - ε closure model, the Prandtl number σ_T , which appears in the transport equations for k and ε , is modified explicitly by the expression

$$\sigma_T = \left\{ \frac{\left(1 + \frac{10}{3} Ri\right)^3}{1 + 10 Ri} \right\}^{1/2}$$

for stable stratification, while σ_T equals unity for unstable stratification. The eddy viscosity is modified implicitly through the k - ϵ equations and the Kolmogorov-Prandtl expression.

PARTICLE MODULE

MIKE 3 PA is a module for the simulation of transport and fate of dissolved and suspended substances discharged or accidentally spilled in lakes, estuaries, coastal areas or at open sea.

The substance simulated may be a pollutant of any kind, conservative or non-conservative, for example suspended sediment particles, inorganic phosphorus, nitrogen, bacteria or chemicals.

The pollutant is considered as particles being advected with the surrounding water body and dispersed as a result of random processes. To each particle, a corresponding mass is attached. This mass can change during the simulation as a result of decay or deposition.

MIKE 3 PA includes formulations for the effects of decay, light attenuation, exceeding concentrations, cohesive/non-cohesive sediment and constant/time varying sources.

The basic Lagrangian approach involves no other discretisations than those associated with the description of the bathymetry of the model area and the wind, current and water level fields. This concept has several advantages:

- numerical dispersion associated with finite differencing is eliminated
- computer requirements are small

MIKE 3 PA assumes that current velocities and water levels can be prescribed in time and space in a computational grid covering the area of interest. This information may be provided by means of a preceding MIKE 3 HD model simulation or on the basis of a 'library' of flow field.

Application areas for MIKE 3 PA include engineering applications such as studies of:

- sedimentation problems
- planning and design of outfalls
- risk analyses and accidental spillage of hazardous substances
- environmental impact assessment
- monitoring of outfalls
- monitoring of dredging works

REFERENCES

Abbott, M.B. (1979): "*Computational Hydraulics. Elements of the Theory of Free Surface Flows*", Pitman Publishing Ltd., London.

Burchard, H. and H. Baumert (1995): "*On the performance of a mixed-layer model based on the k - ϵ turbulence closure*", J. Geophysical Research, Vol. 100, No. C5.

Chorin, A.J. (1967): "*A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems*", J. Comp. Physics, 2, 12-26.

Ekebjærg, L.C. and Justesen, P. (1989): "*An explicit scheme for Advection-Diffusion Modelling in Two Dimensions*", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 1991, 88, 287-297.

- Ferziger, J.H. (1987): "*Simulation of Incompressible Turbulent Flows*", J. Comp. Physics, 69, 1-48.
- Justesen, P., Olesen, K.W. and Vested, H.J. (1989): "*High-Accuracy Modelling of Advection in Two- and Three-Dimensions*", Proc. IAHR Congress, Ottawa, Canada.
- Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1972): "*Mathematical Models of Turbulence*", Academic Press, New York.
- Leendertse, J.J. (1967): "*Aspects of a Computational Model for Long Water Wave Propagation*", Rand Memorandum, RH-5299-PR, Santa Monica, California.
- Leonard, B.P. (1979): "*A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation*", Computational Methods on Applied Mechanics and Engineering, Vol. 19, pp. 59-98.
- Leonard, B.P. (1988): "*Simple high-accuracy resolution program for convective modelling of discontinuities*" Internat. J. Numer. Methods Fluids, 8, pp- 1291-1318.
- Leonard, B.P. (1991): "*The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection*", Computational Methods on Applied Mechanics and Engineering, Vol. 88, pp. 17-74.
- Nihoul, J.C.J, Deleersnijder, E. and Djenidi, S. (1989): "*Modelling the General Circulation of Shelf Seas by 3D k-M Models*", Earth Science Reviews, Vol. 26, No. 3, p. 163.
- Patankar, S.V. (1980): "*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*", McGraw-Hill, New York.
- Pedersen, F.B. (1980): "*A Monograph on Turbulent Entrainment and Friction in Two Layer Stratified Flow*", Series Paper 25, Inst. of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.
- Smagorinsky, J. (1963): "*General Circulation Experiments with the Primitive Equations, 1, The Basic Experiment*", Mon. Weather Rev., Vol. 91, pp. 90-164.
- van Rijn, L. C. (1993): "*Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Sea.*" Aqua Publication.
- Vested, H.J., Justesen, P. and Ekebjærg, L.C. (1992): "*Advection-dispersion modelling in three dimensions*", Appl. Math. Modelling, Vol. 16, October 1992.