

CIRCOLAZIONE MARINA ALLE ISOLE TREMITI: CONFRONTO TRA MISURAZIONI DI CAMPO E SIMULAZIONI NUMERICHE

M. Ben Mefteh¹, M. Mossa² & A. Pollio¹

- (1) Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica, Politecnico di Bari, Via E. Orabona 4, 70125 Bari, Italia, a.pollio@poliba.it
(2) Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente e per lo Sviluppo Sostenibile, Politecnico di Bari, Via E. Orabona 4, 70125 Bari, Italia, m.mossa@poliba.it

SOMMARIO

In questo lavoro si è voluta effettuare una comparazione tra dati di campo e simulazioni numeriche a riguardo della circolazione marina al largo delle Isole Tremiti. Misurazioni correntometriche in situ sono state effettuate il giorno 14 settembre 2007 e i dati, opportunamente elaborati, sono stati utilizzati per la calibrazione di un modello numerico, in particolare il MIKE 21 prodotto dalla DHI. Dopo un rapido inquadramento territoriale della zona oggetto di studio e una descrizione del modello di calcolo usato, la memoria riporta alcuni dei dati misurati e la comparazione di questi ultimi con gli output del software che hanno permesso di affinare i parametri di calibrazione al fine di ottenere un campo di moto simulato che risponde correttamente a quello acquisito strumentalmente. In particolare, vengono presentate le deduzioni che si sono colte dai risultati ottenuti, focalizzando l'attenzione in primo luogo su come i tre parametri di calibrazione usati, il coefficiente di attrito del vento, il coefficiente di Gauckler-Strickler (per la modellazione dell'attrito al fondale) e il coefficiente di Smagorinsky (per la modellazione dei fenomeni turbolenti alle scale inferiori a quelle della griglia di integrazione) vadano ad influire rispettivamente sui campi di moto ottenuti dalle diverse simulazioni condotte.

1 INTRODUZIONE

Le Isole Tremiti (**Figura 1**), unico arcipelago dell' Adriatico, sono costituite da cinque isole (San Domino, San Nicola, Capraia, Cretaccio, Pianosa) ed alcuni scogli, di modestissime dimensioni. Le isole sono ubicate a circa 20km dalla costa ad eccezione della piccola isola di Pianosa che dista invece circa 32km dalla penisola Garganica.

Le Isole Tremiti si sviluppano per una superficie complessiva di circa 3km². Lo studio marino di questa zona è importante per la rilevanza dell'Area Marina Protetta, estesa 1.509 ha, che interessa l'area costiera che circonda le isole di S. Domino, S. Nicola, Capraia e Pianosa per tutto il tratto di mare compreso, in via di massima, fino all'isobata dei 70m. Le Isole Tremiti nella loro lunga storia sono state modellate in un

susseguirsi di ripide scogliere, insenature rocciose, grotte, archi naturali e tranquille calette, in un alternarsi che si ripete nelle parti sommerse, dove a fondali rocciosi lentamente degradanti, si alternano falesie che si inabissano vertiginosamente, bassifondi sabbiosi, fondi ciottolosi, in una tale varietà di tipi cui consegue una notevole varietà di popolazioni animali e vegetali che qui trovano le condizioni adatte per insediarsi, alimentarsi e riprodursi. Al fine di conservare, tutelare e valorizzare questo fragile ecosistema naturale, è stata istituita la Riserva Naturale Marina "Isole Tremiti".



Figura 1. Inquadramento territoriale delle isole Tremiti (Fonte: Virgilio Mappe)

Per tutte queste ragioni, risulta utile la conoscenza del clima correntometrico attuale della zona. Stante le difficoltà tecnico-economiche di poter effettuare misurazioni correntometriche in situ continue e su tutta l'estensione della zona di interesse, risulta questo uno dei casi in cui l'utilizzo di un modello numerico di circolazione marina potrebbe riuscire a fornire informazioni di base estremamente utili ai fini della corretta conoscenza del comportamento delle correnti e della variazione del loro comportamento a seguito di una qualsiasi opera che potrebbe essere messa in opera in futuro. Ma questo richiede anche una opportuna calibrazione di un modello di questo tipo, basata su dati misurati in campo. In questo lavoro si vuole appunto presentare un esempio di calibrazione di un modello numerico commerciale, relativamente semplice da utilizzare, sulla base di misurazioni correntometriche in sito. I risultati del modello numerico sono messi a confronto con i dati misurati andando a variare alcuni parametri di calibrazione al fine di rendere questi ultimi il più coerenti possibili con l'output numerico. Quest'ultimo può essere utilizzato per effettuare delle considerazioni sulla circolazione generale nella zona, sulla quale le misurazioni di campo poco possono dire, per via del numero necessariamente limitato di punti.

2 DESCRIZIONE DELLE MISURE DI CAMPO

I dati correntometrici sono stati acquisiti dal Dipartimento di Ingegneria dell'Acqua e di Chimica del Politecnico di Bari (Italia) il 14 settembre 2007 dalle ore 12.00a.m. circa alle ore 2.00p.m. circa (tempo locale). La strumentazione consisteva in un correntometro AWAC VM-ADCP (Vessel Mounted Acoustic Doppler Current Profiler) prodotto dalla Nortek (vedere la **Tabella 1** per le principali caratteristiche di misura) e

connesso ad una girobussola ed un sistema GPS differenziale, che hanno permesso la misura delle tre componenti di velocità dell'acqua lungo la profondità in sei stazioni di misura, scelte a priori nelle vicinanze delle Isole, la cui posizione è mostrata in **Figura 2**.

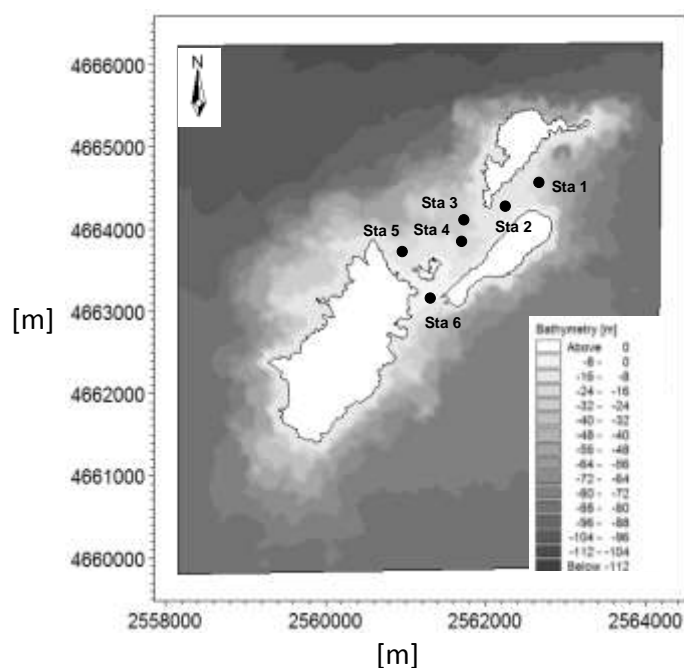


Figura 2. Posizione delle stazioni di misura

Osservando i valori relativi al campo di velocità misurabile dal correntometro ed i valori tipici della velocità della corrente nelle zone di interesse (in genere le correnti generate da maree e moto ondoso hanno valori ben compresi nel range delle misurazioni), si può affermare che l'utilizzo dell'AWAC è adatto allo scopo prefissato.

Prima di ogni misurazione è stata necessaria la calibrazione del correntometro, come riportato dal suo manuale di riferimento. Il software SurveyVM utilizza i dati così raccolti per effettuare in automatico la calibrazione.

Tabella 1. Caratteristiche principali del correntometro AWAC della Nortek

Frequenza acustica	600 kHz
Range delle velocità misurabili	± 10 m/s in orizzontale ± 5 m/s in verticale
Accuratezza	1% del valore misurato ± 0.5 cm/s
Massima profondità	20÷30m
Accuratezza velocità misurata dal DGPS	≥ 0.05 m/s
Accuratezza girobussola	$\geq 1^\circ$

La durata delle acquisizioni variava tra i 3 e i 5 minuti, e la velocità media della corrente è stata valutata mediando temporalmente le misure di velocità su detti periodi temporali, abbastanza lunghi da garantire una media mobile del segnale praticamente costante nel tempo. Questo ha permesso di escludere le variazioni di velocità dovute a componenti di fluttuazione turbolenta, e la misura su un intervallo relativamente breve di tempo ha permesso di escludere eventuali variazioni dovute agli effetti mareali. La **Figura 2** mostra come le misure siano state effettuate principalmente nelle immediate vicinanze delle tre isole maggiori, in cui ci si aspettava una intensità di corrente relativamente alta. Le misure sono state acquisite verticalmente lungo l'intera colonna d'acqua su celle verticali aventi altezze di 1m, a partire dalla profondità di 4m dalla superficie libera. La velocità della corrente variava tra circa 0.30m/s a circa 0.180m/s e le misurazioni erano effettuate con una frequenza di 0.5Hz, ovvero ogni 2s. La **Tabella 2** riporta i dati principali relativi alle sei stazioni di misura, ovvero le loro coordinate geografiche in longitudine est e latitudine nord, la profondità, l'orario locale di inizio acquisizione, la velocità media e la direzione media, misurata positivamente in senso orario a partire dal nord geografico, sul profilo verticale.

La **Figura 3** e la **Figura 4** riportano qualche andamento tipico dei dati misurati. Non è stato possibile includerli tutti per mancanza di spazio.

La **Figura 3** riporta l'andamento della media mobile delle componenti est e nord di velocità per le stazioni 3 e 4 a due distinte velocità. Si può osservare come le velocità misurate, se mediate per tempi di circa tre minuti, diano una buona indicazione della velocità media in corrispondenza delle singole celle di misura.

La **Figura 4** riporta un esempio dell'andamento dei vettori di velocità di corrente con la profondità, a partire da -4m sotto il livello del mare e per ogni 2m successivi, per le stazioni 2 e 3. Si può osservare in questi grafici la piccola dispersione delle velocità attorno alla loro direzione media (228°N per la stazione 2 e 331° per la stazione 3).

Tabella 2. Coordinate geografiche, profondità, inizio del tempo di acquisizione, velocità e direzioni medie dell'acqua alle singole stazioni

Stazione	Longitudine	Latitudine	Profondità	Ora	Velocità	Direzione
	[°]	[°]	[m]	[h. min]	[m/s]	[°]
1	15.514	42.131	-20	11.50	0.067	281
2	15.511	42.129	-9	11.54	0.215	228
3	15.506	42.127	-19	12.03	0.088	331
4	15.504	42.124	-17	12.08	0.036	336
5	15.496	42.123	-17	13.31	0.056	30
6	15.500	42.119	-7	13.39	0.068	229

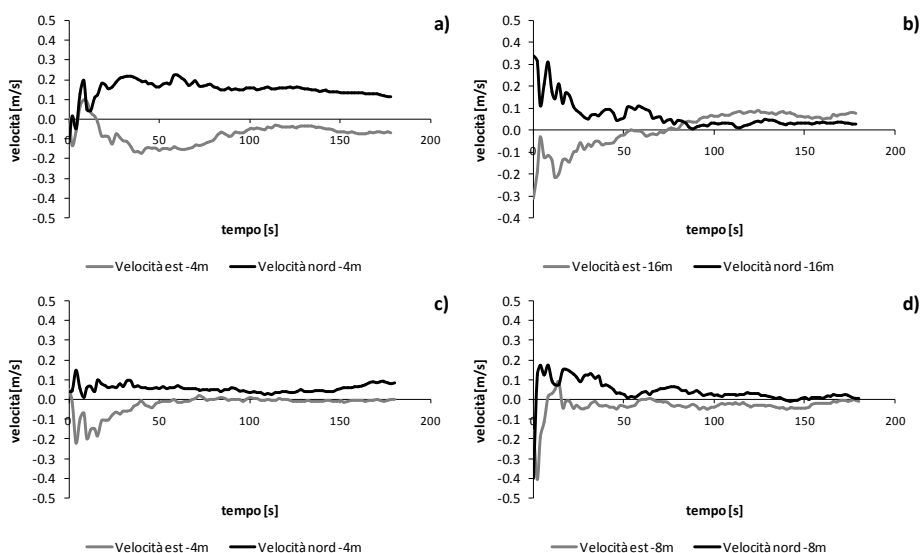


Figura 3. Tipici andamenti della media mobile temporale delle componenti est e nord della velocità dell'acqua. Stazione 3 alle profondità di (a) -4m, (b) -16m. Stazione 4, alle profondità di (c) -4m, (d) -8m

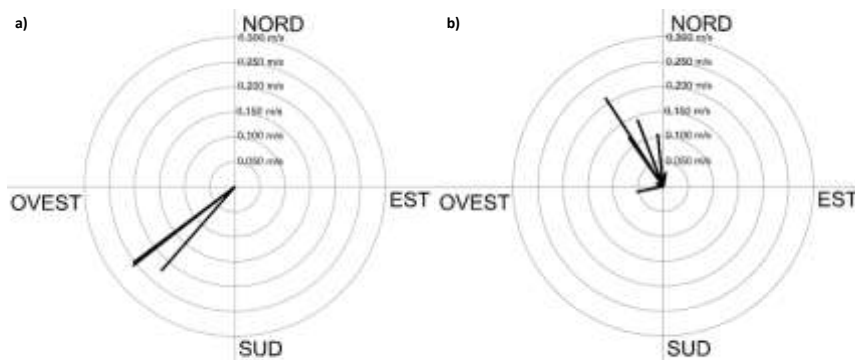


Figura 4. Esempi di vettori di velocità della corrente misurati alle singole stazioni lungo la verticale: a) Stazione 2; b) Stazione 3

3 BREVE DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO MIKE21 E MODALITÀ DI LANCIO DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE

Le misurazioni delle correnti in situ sono state utilizzate per la calibrazione del modello di calcolo Mike21 (modulo HD), che ha consentito di condurre delle simulazioni correntometriche al fine di conoscere la direzione predominante e la velocità dei flussi marini in tutta la zona di interesse. Il modello numerico Mike21, prodotto dalla DHI (Danish Hydraulic Institute), è basato sull'utilizzo di mesh a griglia

e trova applicazione per simulazioni idrodinamiche in ambienti marini e costieri, risolvendo le equazioni di Navier-Stokes per fluidi incomprimibili integrate lungo la profondità (shallow water equations). In particolare, esso impiega un metodo alle differenze finite chiamato ADI (Alternating Direction Implicit technique), adatto per la risoluzione di equazioni differenziali parziali paraboliche ed ellittiche e che si dimostra essere incondizionatamente stabile. Per maggiori informazioni di dettaglio a riguardo delle equazioni alla base del Mike21 e delle tecniche di risoluzione si possono consultare Babu et al. (2004), e lo User Guide and Reference Manual for MIKE21 (2008). Il software permette di modellare la turbolenza mediante il concetto di viscosità turbolenta e adotta lo schema di Smagorinsky (Smagorinsky, 1963) per gli effetti di sub-griglia, in cui il coefficiente di Smagorinsky è considerabile come parametro che influisce sul processo di calibrazione. In genere esso varia tra 0.2 e 1, e nelle simulazioni di cui si parla in questo lavoro gli è stato fatto assumere un valore di 0.4, 0.5 e 0.6. Come si vedrà, i valori usati non influiscono apprezzabilmente nei risultati finali. L'attrito al fondale marino è modellato mediante la legge quadratica:

$$\tau_b = \rho c_b U |U| \quad (1.1)$$

in cui τ_b è lo sforzo tangenziale al fondo, ρ la densità dell'acqua, c_b un coefficiente di drag e U la velocità media della corrente sulla profondità. In particolare:

$$c_b = \frac{g}{\left(G h^{1/6}\right)^2} \quad (1.2)$$

dove g è l'accelerazione di gravità, G il coefficiente di Gauckler-Strickler e h la profondità. Analogamente, l'azione tangenziale τ_w causata dal vento sulla superficie marina è modellata tramite:

$$\tau_w = \rho_{air} c_w W_{10} |W_{10}| \quad (1.3)$$

dove ρ_{air} è la densità dell'aria, c_w un coefficiente di drag dovuto al vento e W_{10} il modulo della velocità del vento a 10m dalla superficie marina. In questo caso, seguendo la formulazione di Wu (1980, 1994) il coefficiente di drag del vento può essere costante o espresso con la formula empirica:

$$c_w = \begin{cases} c_a & W_{10} < W_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{W_b - W_a} (W_{10} - W_a) & W_a \leq W_{10} \leq W_b \\ c_b & W_{10} > W_b \end{cases} \quad (1.4)$$

dove $c_a = 1.255 \cdot 10^{-3}$ è il valore di c_w in corrispondenza della velocità del vento $W_a = 7m/s$, $c_b = 2.4 \cdot 10^{-3}$ è il valore di c_w in corrispondenza della velocità del vento $W_b = 25m/s$. c_a e c_b sono fattori empirici, che forniscono buoni risultati per applicazioni oceaniche. Osservazioni di campo mostrano c_w che decresce con l'aumento del fetch a parità di

condizioni di vento (Geernaert, 1988). Il dominio rettangolare di integrazione si sviluppa nel Mar Adriatico, è centrato sulle isole principali delle Tremiti (l'isola di Pianosa non è stata considerata, in quanto le misure non sono state effettuate nelle sue vicinanze), e presenta un'estensione nord di 26km ed est di 28km, con elementi di griglia rettangolari della dimensione di 50x50m. L'elevazione della superficie marina e le misure di velocità del vento (**Figura 5**) sono quelle relative alla stazione di Vieste della Rete Mareografica Nazionale, la più vicina possibile per ottenere questi dati. In effetti non sono disponibili dati di misurazione di vento e marea alle Tremiti (Bruno e Petrillo, 2008).

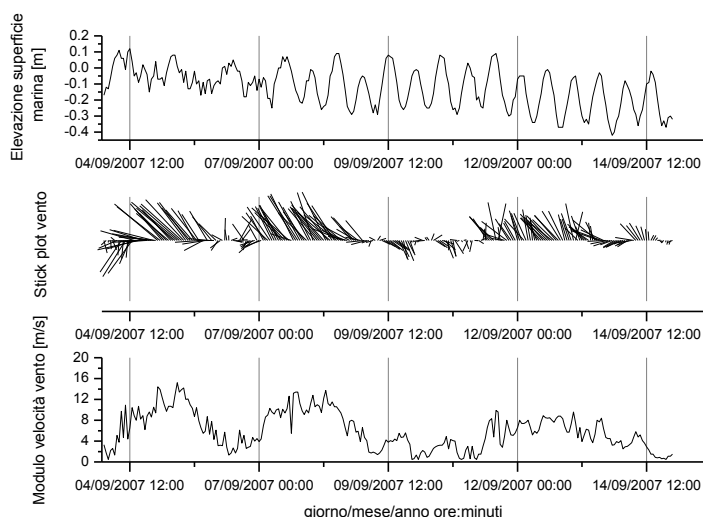


Figura 5. Elevazione della superficie marina, stick plot del vento e modulo della velocità del vento utilizzati per le simulazioni numeriche (Rete Mareografica Nazionale)

Ogni simulazione partiva da condizioni iniziali di velocità della corrente nulle, con un livello marino uguale a quello corrispondente a quello misurato nel momento di partenza delle simulazioni stesse. Per quanto concerne il periodo di simulazione, si è coperto un arco temporale di 264h, cioè 11 giorni (dal 04/09/2007 al 15/09/2007), in modo da eliminare il transiente (ossia l'influenza delle condizioni iniziali) ed ottenere nell'ultimo giorno simulato le condizioni a regime.

4 RISULTATI

Tutte le simulazioni sono state condotte con il modulo HD del MIKE 21, utilizzando differenti valori del coefficiente di attrito del vento c_w , del numero di Gauckler-Strickler G e del coefficiente di Smagorinsky c_s nel modo di indicato in Tabella 3. Nelle simulazioni dalla 1 alla 4, G e c_s sono costanti e posti uguale a $36m^{1/3}/s$ e 0.5, rispettivamente, mentre il coefficiente di drag c_w assume il valore massimo costante 0.0024, variabile linearmente secondo l'eq.(1.4) tra i valori 0.001255 e 0.0024, il valore minimo 0.001255 e quello intermedio 0.001827. Lo stesso è stato fatto per le

simulazioni dalla 5 alla 8, in cui l'unica differenza è il valore assunto da G , pari a $50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, ovvero si è considerato un fondale con minor scabrezza. Nella simulazione 9, si sono ripresi gli stessi valori di G e c_s usati nelle simulazioni dalla 1 alla 4, e il coefficiente c_w è stato innalzato ulteriormente per osservare la sua influenza sulle intensità della corrente. Infine, le simulazioni 10 e 11 sono state caratterizzate da valori di G e c_w costanti ($36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ e 0.0024 , rispettivamente), mentre c_s veniva posto pari a 0.6 e 0.4 , per vedere di quanto esso influiva sui risultati finali. Al termine delle simulazioni, il campo di moto numerico è stato confrontato con i dati di campo misurati. Confrontando i risultati numerici ottenuti con le misure di campo effettuate è possibile notare, per quasi tutte le simulazioni, una buona corrispondenza tra i due campi di moto per quanto riguarda la direzione delle correnti.

Tabella 3. Valore dei parametri di calibrazione nelle singole simulazioni

Simulazione	Coefficiente di attrito del vento	Coefficiente di Gauckler-Strickler	Coefficiente di Smagorinsky
	c_w [-]	G [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]	c_s [-]
1	0.0024	36	0.5
2	$0.001255 \div 0.0024$	36	0.5
3	0.001255	36	0.5
4	0.001827	36	0.5
5	0.0024	50	0.5
6	$0.001255 \div 0.0024$	50	0.5
7	0.001255	50	0.5
8	0.001827	50	0.5
9	0.0039	36	0.5
10	0.0024	36	0.6
11	0.0024	36	0.4

I risultati sono mostrati nella **Figura 6**, nella **Figura 7** e nella **Figura 8**. Quelli relativi alle simulazioni 3 e 7 non sono riportati per motivi di spazio, in quanto le suddette simulazioni fornivano velocità delle correnti molto inferiori a quelle misurate.

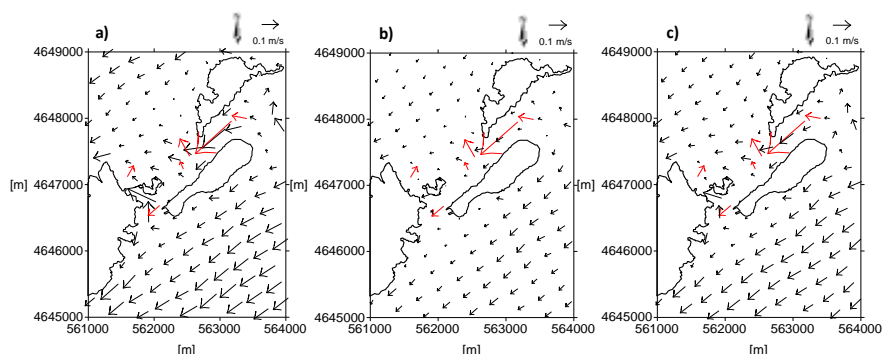


Figura 6. Simulazioni 1 (a), 2 (b), e 4 (c) (Frecce nere: campo numerico; frecce rosse: velocità misurate).

Si osserva che per G e c_s pari a $36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ e 0.5 (**Figura 6**) i risultati migliori a riguardo del confronto tra le intensità delle correnti si hanno per il valore coefficiente c_w

costante e pari a 0.0024. Diminuendo l'attrito al fondale (simulazioni 5, 6 e 8 in **Figura 7**) le intensità delle correnti numeriche aumentano molto poco nella zona delle misure (nelle figure l'effetto non risulta apprezzabile, sebbene sia più evidente al largo delle isole stesse), ma è ancora il valore del coefficiente c_w più elevato ($c_w=0.0024$) che fornisce un campo di moto più vicino a quello reale.

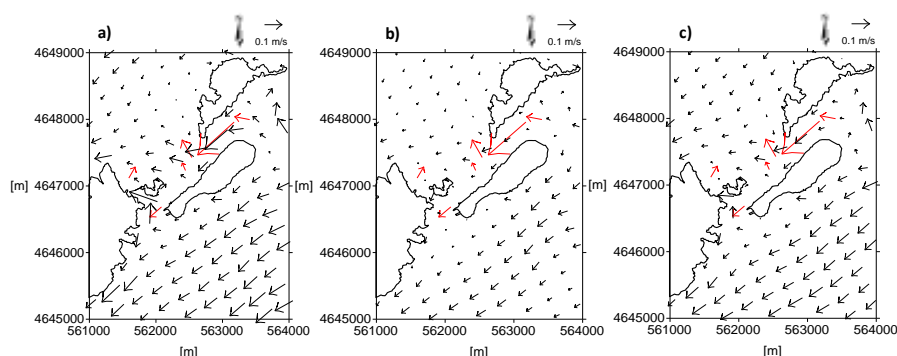


Figura 7. Simulazioni 5 (a), 6 (b), e 8 (c) (Frecce nere: campo numerico; frecce rosse: velocità misurate).

La comparazione tra dati di corrente misurati e numerici migliora se il coefficiente c_w del vento viene ulteriormente elevato al valore costante di 0.0039 (si osservi ad esempio l'intensità della corrente alla stazione 5, **Figura 8** (a) per la simulazione 9).

Infine, la **Figura 8** [(b) e (c)] mostra anche la piccola influenza del coefficiente di Smagorinsky c_s sullo stesso campo di moto. Entrambe le simulazioni suddette mostrano una chiara corrente predominante proveniente dal settore di nord-est (**Figura 9**) che, trovando ostacolo nella presenza delle isole, subisce una deviazione per circumnavigarle, ma genera anche una serie di vorticità locali tra le isole stesse, con zone in cui la corrente subisce apprezzabili incrementi (tra Capraia e S. Nicola e tra S. Domino e S. Nicola), o addirittura importanti diminuzioni (subito a valle di Capraia e S. Domino).

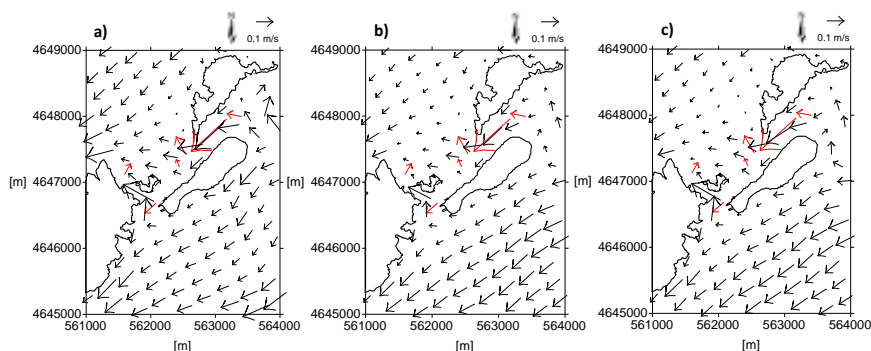


Figura 8. Simulazioni 9 (a), 10 (b), e 11 (c) (Frecce nere: campo numerico; frecce rosse: velocità misurate).

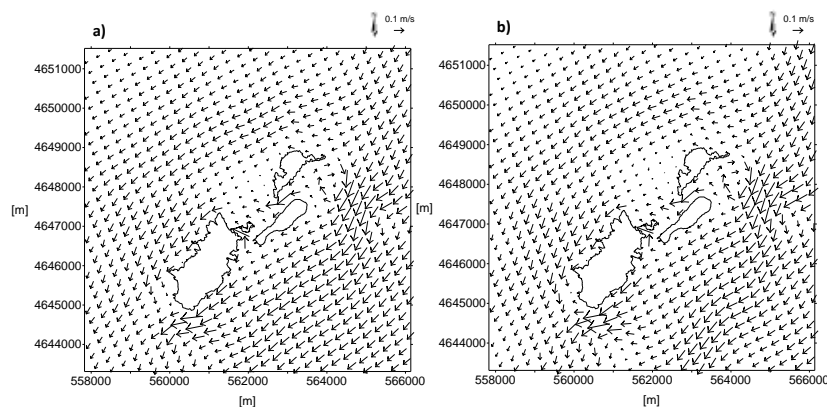


Figura 9. Campo di moto al largo delle Tremiti ottenuto dalle simulazioni 1(a) e 5(b).

5 CONCLUSIONI

In conclusione, a valle di tutte le simulazioni effettuate si può dire che il coefficiente di attrito del vento è il parametro che maggiormente influenza il campo di moto nella zona, almeno limitatamente alle misurazioni e simulazioni condotte. I risultati di tutte le simulazioni effettuate sono ragionevolmente attendibili a riguardo delle sole direzioni delle correnti sulla base di un confronto con dati di campo. Tuttavia, per quanto attiene alle intensità di corrente le simulazioni numeriche con coefficiente di attrito del vento avente valore pari o superiore a 0.0024 sono quelle per le quali il confronto con i dati di campo risponde molto bene alle intensità di corrente osservate. I risultati mostrano comunque che il software risponde è in grado di fornire informazioni attendibili sul campo di moto in prossimità delle Tremiti, purché opportunamente calibrato. Questa considerazione permette di estendere le informazioni numeriche anche a tutti i punti della regione occupata dalle Tremiti al fine di poter definire il clima correntometrico della zona.

BIBLIOGRAFIA

- Babu, M.T., Vethamony, P., Ehrlich Desa, Modelling tide-driven currents and residual eddies in the Gulf of Kachchh and their seasonal variability A marine environmental planning perspective, *Ecological Modelling*, 184 (2005) 299–312
- Bruno, M.F., Petrillo, A.F., Analysis on meteomarine climate at Tremiti islands. Application of physical modeling to port and coastal protection (Coastlab08). Bari, Italia, 2008.
- Geernaert, G. L. Drag coefficient modeling for the near coastal zone, *Dyn. Atmos. Ocean*, 1988 11, 307-322.
- Smagorinsky, J., General circulation experiment with the primitive equations, *Monthly Weather Review*, 1963, 3, 99-164.
- User Guide and Reference Manual for MIKE21, 2008. Reference Manual. Danish Hydraulic Institute, Agera Alle, Horsholm, Denmark.
- Wu J. (1980), “Wind-stress Coefficients over sea surface and near neutral conditions”, A revisit, *J. Phys. Oceanogr.*, 10, 727-740.
- Wu J. (1994), “The sea surface is aerodynamically rough even under light winds”, *Boundary layer Meteorology*, 69, 149-158.