


# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## INTEGRAZIONI AL PROGETTO DEFINITIVO

### EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A. (MANDATARIA)  
 SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A. (MANDANTE)  
 COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L. (MANDANTE)  
 SACYR S.A.U. (MANDANTE)  
 ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD (MANDANTE)  
 A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE (MANDANTE)

<p><b>IL PROGETTISTA</b></p>  <p>Dott. Ing. E. Pagani          Ordine Ingegneri          Milano n° 15408</p>	<p><b>IL CONTRAENTE GENERALE</b>          Project Manager</p> <p>(Ing. P.P. Marcheselli)</p>	<p><b>STRETTO DI MESSINA</b>          Direttore Generale</p> <p>(Ing. G. Fiammenghi)</p>	<p><b>STRETTO DI MESSINA</b>          Amministratore Delegato</p> <p>(Dott. P. Ciucci)</p>
---	--	--	--

Firmato digitalmente ai sensi dell' "Art. 21 del D.Lgs. 82/2005"

<i>Area tematica</i>	STUDIO D'IMPATTO AMBIENTALE
<i>Ente emittente</i>	MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE
<i>Autore dell'osservazione</i>	COMMISSIONE TECNICA VIA - VAS
<i>Riferimento richiesta</i>	INTEGRAZIONI ALLA RICHIESTA PROT. CTVA-2011-0004534 DEL 22/12/2011
<i>Titolo del documento</i>	RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID2



CODICE

V I A C 0 2 9 - F1

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F1	30/05/2012	EMISSIONE	R. SORGENTE	F. BAIOTTO	E. PAGANI


NOME DEL FILE: VIAC029\_F1





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Rev</i></th> <th style="text-align: left;"><i>Data</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">F1</td> <td style="text-align: center;">30/05/2012</td> </tr> </tbody> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F1	30/05/2012
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F1	30/05/2012						

## INDICE

INDICE .....	3
Integrazioni e chiarimenti al Gruppo Istruttore della Commissione Tecnica VIA - VAS .....	5
1 Premessa.....	5
2 Richiesta integrazione ID C29 .....	5
3 Risposta integrazioni ID C29 .....	5
3.1 Introduzione .....	5
3.2 Regime idrodinamico dell'area di studio .....	8
3.3 Materiali e metodi .....	9
3.4 Risultati e discussione.....	12
3.4.1 Campo indotto dallo sforzo del vento alla superficie del mare .....	12
3.4.2 Campo indotto dal flusso di marea e lo sforzo del vento.....	17
3.5 Conclusioni.....	25
Lista delle Figure.....	29
Bibliografia .....	49

		<p align="center"><b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> PROGETTO DEFINITIVO</p>		
<p>RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29</p>		<p><i>Codice</i> VIAC029_F1</p>	<p><i>Rev</i> F1</p>	<p><i>Data</i> 30/05/2012</p>

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

## Integrazioni e chiarimenti al Gruppo Istruttore della Commissione Tecnica VIA - VAS

### 1 Premessa

Il presente documento fornisce riscontro alle osservazioni e alla richiesta di integrazione avanzate dalla Commissione Tecnica di Valutazione di Impatto nell'ambito della Procedura di VIA Speciale (L.O. 141), ex D.Lgs. 163/2006 e ss.mm.ii., artt. 166 e 167, comma 5, e Verifica di Ottemperanza, ex artt. 166, comma 3, e 185, comma 4 e 5 in riferimento al Progetto Definitivo "Attraversamento stabile dello Stretto di Messina e dei collegamenti stradali e ferroviari sui versanti Calabria e Sicilia. In particolare, con riferimento all'osservazione 29 Seconda Parte: Lato Calabria componente ambiente marino, il Ministero avanza la richiesta di chiarimenti ed integrazioni, che verrà sviluppata nel dettaglio al successivo paragrafo.

### 2 Richiesta integrazione ID C29



*Elaborare uno studio dell'eventuale modifica nel trasporto solido dei sedimenti a mare per valutare il possibile impatto sulla morfodinamica costiera relativamente all'opera di compensazione A1: Sistemazione di tratti di corsi d'acqua*

### 3 Risposta integrazioni ID C29

Al fine di rispondere alle richieste della CT VIA è stato elaborato il seguente "Studio del campo idrodinamico nello Stretto di Messina e conseguente avvezione/diffusione del tracciante Salinità" di seguito riportato.

#### 3.1 Introduzione

Il successo delle azioni di mitigazione nell'affrontare gli effetti inquinanti dovuti ad un eventuale sversamento di una generica sostanza disciolta in mare o come conseguenza di attività invasive, con conseguente riduzione della qualità delle acque, è strettamente dipendente dall'efficacia dei sistemi di monitoraggio e di simulazione numerica della circolazione marina. In particolare, sia che si tratti di eventi estremi di inquinamento acuto, quali incidenti marittimi con relativo sversamento di idrocarburi, sia di inquinamento cronico, come il rilascio continuo ad opera di sorgenti diffuse (flussi



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

sotterranei e/o puntuali quali foci fluviali), la conoscenza delle traiettorie seguite dalle masse d'acqua e degli inquinanti versati in mare risulta essere di essenziale importanza al fine di programmare e/o prevedere interventi di recupero delle aree costiere soggette a degrado. Le simulazioni numeriche costituiscono, infatti, un valido supporto per riprodurre e ipotizzare scenari futuri difficili da esaminare utilizzando soltanto osservazioni in situ.

La previsione di tali traiettorie in un campo turbolento come il mare può essere effettuata mediante l'applicazione di algoritmi semi empirici che, partendo dall'intensità dei venti, forniscono una stima del percorso seguito dalle masse d'acqua superficiali, oppure mediante l'applicazione di sofisticati modelli numerici in grado di riprodurre la circolazione delle acque e, quindi, di simulare il trasporto delle sostanze in esse disciolte e/o disperse. Per ottenere una stima dell'evoluzione, sia nello spazio che nel tempo (a breve termine), di un eventuale "plume" di inquinante nell'area di studio è stato scelto di eseguire simulazioni numeriche di scenario atte a replicare le tipiche condizioni meteo-marine dell'area in esame. In questo caso il valore aggiunto, rispetto a quelli "classici", è dato dalla simulazione della dinamica meteo-marina nel tempo (direzione ed intensità delle correnti marine e dello sforzo del vento), ossia dal calcolo della possibile traiettoria delle "particelle" tenendo conto del variare nello spazio e nel tempo delle condizioni meteo – marine. Vengono trascurati gli effetti dei flussi di calore e di acqua alla superficie aria – mare (accoppiamento atmosfera – mare) perché le scale temporali di nostro interesse (dalle ore al giorno) sono notevolmente più piccole di quelle dei flussi (mesi).

Si consideri comunque che risulta difficile ottenere un modello oceanico "universale" capace di risolvere accuratamente tutti i processi fisici su tutte le scale spaziali e temporali a causa della complessità computazionale del problema, ma anche della scarsa accuratezza della descrizione di alcuni processi fisici, come ad esempio la turbolenza che, nel caso particolare dello Stretto di Messina, risulta essere molto importante. Per tali ragioni è necessario sviluppare differenti classi di modelli a seconda dei fenomeni da comprendere e la scelta di un tipo di modello rispetto ad un altro dipende fondamentalmente dalla possibilità di implementare metodi numerici sempre più accurati ed efficienti che richiedono non solo grandi potenze di calcolo ma soprattutto la necessità di tempi di esecuzione adeguati.

Viste le esigenze "di tempo" del committente, uno dei modelli che può essere utilizzato per lo studio in questione è un modello alle differenze finite caratterizzato da una griglia spaziale verticale in coordinate sigma con chiusura della turbolenza. Questo modello numerico è usato per descrivere le correnti costiere. Risolve le equazioni di Navier - Stokes per un fluido incompressibile nell'approssimazione idrostatica, i processi termodinamici, il rimescolamento turbolento e le

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012



approssimazioni di boussinesq. Il modello è guidato dallo sforzo del vento, mentre i flussi di calore e di acqua sono trascurati come indicato in precedenza. Il modello usa la geostrofia, la marea e le correnti di Ekman, conosciute al bordo esterno. Il modello sarà eseguito in modalità baroclina (tridimensionale), cioè si terrà conto nella determinazione del gradiente di pressione anche delle variazioni di densità nella struttura interna della colonna d'acqua.

A causa dei tempi ristretti di esecuzione dello studio, la risoluzione spaziale orizzontale del modello numerico di simulazione sarà dell'ordine dei 100 m, quindi non saranno considerati processi al di sotto di tale dimensione spaziale. Inoltre, verrà utilizzato come tracciante del trasporto e della relativa dispersione e diffusione il campo di salinità, piuttosto che un inquinante univocamente determinato. Questa ipotesi è sufficientemente giustificata dalla caratteristica conservativa della salinità, sebbene questa ipotesi abbia numerosi limiti in quanto vengono trascurati tutti gli eventuali processi chimico-fisici coinvolti durante l'evoluzione.

Nota l'incertezza insita nella dinamica del trasporto in un mezzo turbolento, il risultato finale sarà quello di trarre conclusioni di tipo qualitativo, ovvero lo studio darà indicazioni a breve termine (qualche giorno) riguardo a dove più probabilmente si potrà dirigere un determinato inquinante in funzione delle diverse condizioni meteo-marine considerate, consentendo così di estrapolare il tipo di impatto che si può avere sull'ambiente marino che si presume sarà legato principalmente ad un possibile abbattimento della qualità dell'acqua; quest'ultimo si potrebbe esplicitare in termini di abbassamento della trasparenza dell'acqua e/o contaminazione dovuta all'associazione – per coesione – di qualche contaminante chimico al materiale fine.

Lo studio idrodinamico qui proposto, per i limiti di tempo indicati anche in precedenza, vuole essere il primo passo per ottemperare alle richieste dalla CTVIA mediante l'implementazione di un modello morfodinamico innestato al modello costiero (qui sviluppato) capace di simulare numericamente la dinamica del litorale (circolazione, onde e interazione onda-corrente) accoppiati a modelli di trasporto solido (simulazione dell'erosione, trasporto e deposito) e, quindi, capaci di simulare la variazione della linea di costa anche in funzione della presenza di opere marittime ad una risoluzione spaziale dell'ordine della decina di metri. Nella realizzazione di questo sistema gerarchico di modelli numerici dalla scala più bassa a quella più alta (shelf-costiero-morfodinamico) l'implementazione del sistema shelf-costiero sviluppato, quindi, consentirà di fornire le opportune condizioni iniziali e al contorno al modello morfodinamico come strumento di analisi degli impatti attesi nell'area di realizzazione del pontile (individuazione delle aree soggette ad erosione e/o deposizione).

Nel paragrafo successivo sono indicate alcune note sul regime idrodinamico dell'area di studio,

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

mettendo in evidenza le caratteristiche dei principali processi dinamici dell'area di studio al fine di giustificare le diverse ipotesi numeriche imposte. Nel paragrafo 3 vengono, invece, presentati i materiali e i metodi, mentre nel paragrafo 4 vengono presentati e discussi i risultati delle simulazioni numeriche effettuate. Nel paragrafo 5 sono presentate le conclusioni.



### 3.2 Regime idrodinamico dell'area di studio

Lo stretto di Messina è un canale che collega il Mar Tirreno con il Mar Ionio (**Figura 1**) attraverso la "sella" sottomarina la cui profondità non supera i 120 m circa. Si trova approssimativamente lungo la congiungente Ganzirri (Sicilia) - Punta Pezzo (Calabria) dove si riscontra anche la minore ampiezza tra le coste (3150 m). A partire dalla sella le profondità nel canale degradano con pendenze diverse. Verso il Mar Tirreno la profondità degrada lentamente, mentre in direzione opposta, verso il Mar Ionio, la profondità aumenta rapidamente fino a 1500 m.

L'idrodinamica nello Stretto di Messina è caratterizzata da un vasto insieme di fenomeni dinamici che presentano scale spaziali e temporali diverse e direttamente connesse alla dinamica del bacino tirrenico e ionico, che hanno caratteristiche fisico-chimiche ed oscillatorie diverse. Questo induce nell'area di studio la presenza di correnti di forte intensità, dovute principalmente alla corrente di marea che si manifesta come un segnale periodico. Alle correnti di marea scendente (Nord-Sud) e montante (Sud-Nord), con fase opposta e con uguale ampiezza, si sommano le correnti di deriva e quelle di densità, oltre alla turbolenza ed eventuali "gorgi".

Le correnti di marea sono dovute alle diverse caratteristiche oscillatorie del Mar Tirreno e Mar Ionio e si manifestano con un flusso di massa caratterizzato da una ben definita ampiezza e fase (Ribaud, 1884). Quando il Mar Tirreno presenta una bassa marea al confine settentrionale del canale il Mar Ionio è, invece, caratterizzato da una marea di uguale ampiezza ma di fase opposta. Il contrario, ovviamente, avviene al successivo cambio di marea. Il dislivello tra i due bacini è dell'ordine dei 30 cm ma queste determinano, soprattutto per effetto della forma, ampiezza ed estensione del canale, la nascita di correnti di marea molto intense che possono raggiungere anche velocità dell'ordine dei 300 cm/s (Mosetti, 1988). Una conseguenza di questo flusso di massa è il continuo trasporto di masse d'acqua con caratteristiche chimico – fisiche diverse, prima in una direzione e poi nell'altra, con implicazioni anche dal punto di vista biologico (Giacobbe e Spanò, 2001). Come è noto, l'andamento delle correnti di marea sono strettamente connesse all'attrazione gravitazionale esercitata dalla Luna e dal Sole sulle masse d'acqua (Longo, 1882; Longone, 1882; Defant, 1940). Nello Stretto di Messina ogni fase di corrente ha una durata di circa 6 ore. Pertanto in una giornata si susseguono quattro flussi diversi intervallati da dei periodi di





		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

“stanca” ovvero il periodo di quiete che intercorre tra la marea scendente e quella montante e viceversa. L’intensità delle correnti è strettamente legata alla posizione relativa della Luna e del Sole rispetto alle masse d’acqua. Quindi, in prima approssimazione, le maggiori intensità delle correnti di marea si osserveranno in corrispondenza dei giorni di novilunio e plenilunio, quando è massima la forza di attrazione gravitazionale esercitata sui due bacini dalla Luna che si va a sommare a quella del Sole la quale si troverà, a sua volta, in congiunzione o in opposizione. Ovviamente, oltre a questa rappresentazione schematica della circolazione indotta dall’attrazione gravitazionale, dobbiamo tener presente anche altri fattori che determinano scostamenti dall’andamento “teorico”. Sicuramente uno di questi è la batimetria e la morfologia della linea di costa che determinano variazioni, sia nell’intensità che nella direzione, della corrente dominante, oltre che dalle correnti di densità e quelle di deriva.

Per effetto della contiguità della masse d’acqua del Mar Tirreno e del Mar Ionio si generano anche delle correnti di densità permanenti. Nell’area di indagine queste sono quelle meno conosciute in termini di variabilità spaziale e temporale. Sono generalmente rappresentate da un segnale stazionario e si innescano a causa della differenza di densità delle masse d’acqua dei due bacini Ionio e Tirreno (De Domenico, 1987). Misure effettuate hanno mostrato che, in determinate condizioni meteo marine, queste possono raggiungere anche i 30 cm/s (Mosetti, 1988). L’incontro delle due masse d’acqua (ionica e tirrenica), trasportate principalmente dalla corrente di marea, determina anche la nascita di fenomeni di instabilità che si manifestano sotto forma di turbolenza sia sul piano orizzontale che verticale. Una delle manifestazioni più note sono le onde di discontinuità dovute al gradiente di densità che si instaura in seguito all’incontro delle masse d’acqua di tipo ionico (più calda e salata) e tirrenico (meno calda e meno salata della prima); tali onde di discontinuità tendono ad intensificarsi in alcuni particolari punti dell’area, per effetto della batimetria e per l’azione del vento alla superficie (De Domenico et al., 1987).



Le correnti di deriva, invece, sono quelle innescate dall’attrito del vento sulla superficie marina (corrente di Ekman, Pond and Pikard, 1989), ma anche dovute ai gradienti di pressione che si generano in prossimità della costa, entro il raggio di deformazione di Rossby (Pedlosky, 1986), per effetto dello spostamento delle masse d’acqua verso/lontano dalla costa. Mosetti (1995) ha stimato queste correnti con una intensità di circa 80 cm/s che sommate alla turbolenza ed eventuali “gorgi” possono portare a delle velocità delle correnti ad un massimo di 20 km/h. In determinate condizioni, l’attrito del vento è tale da “diminuire” la corrente di marea alla superficie (Fazio, 2011).

### 3.3 Materiali e metodi

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

Al fine di descrivere quanto più accuratamente possibile la circolazione marina si è utilizzata la metodologia del “downscaling” che consiste nell’implementazione di una gerarchia di modelli numerici ad area limitata. Questa tecnica, ben nota anche in campo meteorologico, più precisamente consiste nel risolvere adeguatamente le scale dinamiche più piccole, e limitatamente all’area di interesse, senza dover necessariamente andare a risolvere anche la dinamica a più larga scala attraverso l’utilizzo e l’implementazione di diversi modelli numerici con scala spaziale differente. In questo modo è possibile andare ad indagare le scale più piccole dell’area di studio senza perdere gli effetti dinamici a scala sub-regionale e/o di bacino che potrebbero condizionare la dinamica nello Stretto di Messina. Un esempio è rappresentato dalle correnti di marea, innescate dalla presenza del bacino del Mar Tirreno a nord e quello del Mar Ionio a sud che hanno caratteristiche oscillatorie diverse, le correnti a scala sub-regionale come la Bifurcation Tyrrhenian Current che fluisce verso est sulla costa settentrionale della Sicilia e della Calabria e le correnti di densità innescate dalla differenza di densità tra il bacino tirrenico e quello ionico. Questa metodologia, quindi, si presta molto bene nel caso dello studio idrodinamico dello Stretto di Messina perché è caratterizzata da un vasto insieme di fenomeni dinamici che presentano scale spaziali e temporali diverse e direttamente connesse alla dinamica del bacino tirrenico e ionico, aventi caratteristiche fisico-chimiche ed oscillatorie diverse.

A tale scopo è stato implementato un primo modello numerico alle differenze finite con una risoluzione spaziale di  $1/128^\circ$ , in latitudine e longitudine, equivalente a circa 700 m che indicheremo di seguito come Modello di Shelf. Lo scopo di questo modello è quello di fornire esclusivamente la condizione iniziale e le opportune condizioni al contorno (interpolatore dinamico) ad un secondo modello numerico che indicheremo di seguito come Modello Costiero, la cui batimetria è rappresentata in **Figura 2**. È noto che, al fine di non distorcere eccessivamente il segnale (salinità, temperatura, elevazione e velocità del campo di corrente) nel passaggio da un modello a bassa risoluzione (il modello di shelf) a quello a più alta risoluzione spaziale direttamente ad esso innestato (il modello costiero), il rapporto tra le risoluzioni spaziali non deve superare il fattore 4 (Sorgente et al., 2003). Pertanto, la risoluzione più alta che possiamo ottenere utilizzando un modello costiero alle differenze finite è di  $1/(128 \times 4)^\circ$ , equivalente a circa 100 m. Questa risoluzione spaziale non è sufficiente per poter risolvere con adeguata accuratezza problematiche di impatto di strutture sul regime idrodinamico, ma al momento rappresenta l’unico strumento in grado di trarre conclusioni di tipo qualitativo entro i tempi richiesti dal Committente.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012



Infatti, è doveroso far osservare che, avendo a disposizione un arco temporale maggiore (dai tre ai quattro mesi), l'utilizzo di un modello costiero agli elementi finiti rappresenta la soluzione migliore in quanto questo strumento, innestato ai contorni aperti con il Modello di Shelf qui sviluppato, ha la caratteristica di utilizzare una griglia di calcolo costituita da elementi la cui forma e dimensione sono tali da descrivere con elevato dettaglio la complessa morfologia costiera. Questo rappresenta un grande vantaggio perché si potrebbero ottenere risoluzioni spaziali dell'ordine della decina di metri soltanto nelle aree di interesse, come per esempio in prossimità delle sorgenti "inquinanti". Altro fattore da non trascurare è la necessità di avere a disposizione una batimetria ad altissima risoluzione, che sia almeno dello stesso ordine di grandezza della risoluzione del modello numerico di simulazione. Nel nostro studio questa è stata ottenuta andando ad interpolare i valori di profondità della U.S. Navy (DBDB1) sulla griglia del Modello di Shelf e Costiero, rispettivamente. I valori di profondità del data set DBDB1 coprono l'intero Mar Mediterraneo e sono rappresentati su una griglia strutturata con una risoluzione orizzontale costante di  $1/60^\circ$  in latitudine e longitudine (circa 1800 m).

Nello Stretto di Messina le correnti di marea possono raggiungere valori eccezionali (300 cm/s) per la componente principale (Mosetti e Mosetti Albrecht, 1994) e questa può addirittura raddoppiare alla superficie per effetto del vento; sono stati dunque programmati una serie di esperimenti numerici al fine di valutare gli effetti del vento (paragrafo 4.1), del flusso di marea e degli effetti combinati (paragrafo 4.2) sulla dinamica marina al fine di valutare qualitativamente il trasporto e la dispersione di un tracciante passivo (campo di salinità) rilasciato nei punti SP1 e CP1 in modo continuo per tutta la durata dell'esperimento numerico. I punti SP1 e CP1 di rilascio sono rappresentativi della posizione dei due pontili (**Tabella 1**).

	Latitudine	Longitudine
Ganzirri (SP1)	38° 15' 39.56" N	15° 38' 00.59" E
Cannitello (CP1)	38° 14' 01.96" N	15° 38' 42.10" E

**Tabella 1.** Coordinate dei punti di rilascio indicati di seguito con SP1 e CP1.

Negli esperimenti successivi, inoltre, sono esclusi tutti quei fattori che solitamente perturbano la

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

marea come fattori meteorologici (effetto della variazione della pressione dalla scala sinottica a quella stagionale), effetti climatici e le sesse<sup>1</sup>. Tutte questi “rumori” sono solitamente registrate nelle misure di corrente. Si ricorda che il tracciante utilizzato in questi esperimenti è rappresentato da un’anomalia del campo di salinità che non è assimilabile in alcun modo dal punto di vista quantitativo alla dispersione del materiale sospeso. I risultati pertanto, come più volte ribadito, sono da interpretare esclusivamente in modo qualitativo e non quantitativo.

### 3.4 Risultati e discussione

In tutti gli esperimenti numerici che seguono si fa l'ipotesi di fluido barotropico<sup>2</sup>, in particolare si ipotizza la temperatura potenziale =20°C e la salinità 35 psu. Per simulare la dispersione del tracciante è imposta nei punti di rilascio un’anomalia (negativa) di salinità.

Questa ipotesi, anche se non reale, permette di semplificare la trattazione di molti fenomeni ed è giustificata dal fatto che la corrente di densità, che nascerebbe in seguito alla differenza di densità tra le masse d'acqua tirreniche e quelle ioniche, è piccola (dell'ordine di qualche decina di cm/s) se confrontata con quella di marea e/o indotta dal vento (effetto combinato dell'ordine dei 100 cm/s). Inoltre, la scala temporale su cui agisce è di tipo stagionale, quindi molto maggiore di quelle che sono le scale di interesse di questo lavoro (dell'ordine delle ore). Da ciò segue che i gradienti orizzontali di velocità sono gli unici responsabili della variazione della vorticità del flusso.



Di seguito non vengono mostrati i risultati del Modello di Shelf che, in questo contesto, viene utilizzato esclusivamente per controllare la condizione iniziale e ai contorni aperti del Modello Costiero. I parametri che vengono passati attraverso l'accoppiamento numerico one - way sono il campo di velocità totale, temperatura e salinità. Vice-versa, verranno discussi i campi orizzontali superficiali del campo di velocità barotropico, il quale rappresenta l'integrale verticale della velocità esteso all'intera profondità della colonna d'acqua. Questo parametro, quindi, rappresenta il valore medio del trasporto a cui sarebbe soggetto un eventuale disperdente di materiale solido.

#### 3.4.1 Campo indotto dallo sforzo del vento alla superficie del mare

Il regime dei venti nello Stretto di Messina è sostanzialmente costituito principalmente dai venti che soffiano dal IV e I quadrante (da 300° a 45°), mentre meno intensi ma caratterizzati da una

<sup>1</sup> Sesse. Oscillazioni proprie di un bacino.

<sup>2</sup> Fluido omogeneo con densità costante nello spazio e nel tempo

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

maggiore variabilità interannuale sono i venti provenienti dal III quadrante (tra 180° e 195°). Non avendo a disposizione i parametri atmosferici delle stazioni meteo in prossimità dell'area di studio, per ogni esperimento numerico viene simulato il campo idrodinamico in assenza di marea. In particolare, è stata analizzata la risposta del modello in quattro situazioni ideali in funzione della direzione e intensità del vento, che ipotizziamo essere stazionario (costante nello spazio e nel tempo). Inoltre, l'intensità del vento per motivi legati alla stabilità numerica del modello è inizializzato a zero ed è crescente linearmente nel tempo per raggiungere il corrispondente massimo di intensità dopo 1.5 ore. Questo viene fatto per evitare al modello un "brusco colpo" alla superficie capace di generale del rumore sotto forma di onde di gravità. La durata di ogni esperimento numerico è di 24 ore, ma verranno analizzati i risultati delle prime 6 ore

Esperimento	Direz. Vento	Intensità	Marea
<b>Mark 1</b>	NE <sup>3</sup>	15 m s <sup>-1</sup>	NO
<b>Mark 2</b>	NW <sup>4</sup>	10 m s <sup>-1</sup>	NO
<b>Mark 3</b>	N <sup>5</sup>	10 m s <sup>-1</sup>	NO
<b>Mark 4</b>	SSO <sup>6</sup>	15 m s <sup>-1</sup>	NO

**Tabella 2.** Per ogni esperimento numerico è indicata la direzione del vento stazionario e la sua intensità dedotta dall'analisi della variabilità del forzante atmosferico per l'anno 2011 in corrispondenza delle stazioni meteorologiche di Messina e Reggio Calabria<sup>7</sup>.

Per ogni esperimento numerico, quindi, si andrà ad analizzare la risposta del modello sottoposto alla sola azione di trascinamento creato dall'attrito tra la massa d'aria in movimento e la massa d'acqua marina. Queste correnti sono note anche come correnti di deriva o di Ekman.

### 3.4.1.1 Esperimento Mark 1

Il campo di velocità barotropico dopo 6 ore (**Figura 3A**) è caratterizzato da un regime idrodinamico



<sup>3</sup> NE, vento proveniente da Nord – Est (45°)

<sup>4</sup> NW, vento proveniente da Nord – Ovest (275°)

<sup>5</sup> N, vento proveniente da Nord (0°)

<sup>6</sup> SSO, vento proveniente da Sud-Sud-Ovest (202.5°)

<sup>7</sup> Maggiori informazioni possono essere reperite al seguente indirizzo web: [www.idromare.it](http://www.idromare.it).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012



composto da una corrente costiera zonale a nord della soglia dello Stretto di Messina e da due distinte correnti costiere meridionali a sud della soglia, rispettivamente, lungo la costa siciliana e calabrese,.

La corrente lungo la costa della Sicilia ha direzione Sud - Ovest e presenta una intensità maggiore di quella lungo la costa della Calabria per effetto della corrente di gradiente che si va a sommare a quella di Ekman entro la fascia costiera definita dal raggio di deformazione di Rossby (la fascia costiera entro il quale in campo di velocità risente dell'effetto della costa). Velocità superiori ai 25 cm/s sono calcolati all'altezza del parallelo 38° 12' N. Vice-versa, lungo la costa calabrese il contributo della corrente di gradiente si va a sottrarre a quella di Ekman riducendo l'intensità, ma non la direzione prevalente che rimane verso il Mar Ionio. A nord della soglia il campo di velocità barotropico è caratterizzato da una corrente zonale che si muove in direzione occidentale seguendo la costa della Calabria e della Sicilia settentrionale. Parte di questa corrente zonale, all'altezza della soglia, attraversa lo Stretto di Messina verso sud e, per effetto della variazione della profondità, il flusso acquista vorticità. Questo si manifesta con la presenza di un ampio vortice anticiclonico centrale che separa due vortici ciclonici, tutti caratterizzati da velocità che non superano i 20 cm/s (**Figura 3 B**). La massima intensità si osserva verso la costa calabrese, in corrispondenza del lato inferiore del vortice anti-ciclonico, in cui si somma il contributo del flusso della corrente di Ekman con quello anti-orario del vortice. Viceversa, sul lato siciliano la risultante della corrente è di direzione opposta (NE), quindi contraria al vento.

Nell'ipotesi di un rilascio continuo di un tracciante passivo, rappresentato dall'anomalia del campo di salinità nei punti SP1 e CP1, la sua evoluzione spazio/temporale è governata dalla dinamica descritta in precedenza. In particolare, i campi di distribuzione spaziale del tracciante (**Figura 4 A-D**) mostrano una progressiva dispersione a partire dai punti di origine dovuta principalmente all'azione del vortice ciclonico centrato sulla soglia e da un trasporto prevalentemente verso sud per effetto delle correnti meridionali costiere. Quindi, in condizioni di assenza di marea, l'area di impatto del tracciante rimane prevalentemente nell'intorno dell'area di rilascio (SP1 e CP1).

### 3.4.1.2 Esperimento Mark 2

In questo esperimento numerico il modello costiero è forzato alla superficie da un vento stazionario proveniente da nord-ovest con una intensità di 10 m/s. Il campo di velocità barotropico dopo 6 ore (**Figura 5A**) mostra un regime di correnti costiere prevalentemente zonali (da ovest verso est) a nord della soglia dello Stretto di Messina e due correnti meridionali a sud della soglia dello Stretto. La corrente zonale si estende lungo tutta la fascia costiera settentrionale della Sicilia e della

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

Calabria raggiungendo valori di circa 20 cm/s sulla costa siciliana. In corrispondenza della soglia dello Stretto di Messina si osserva la biforcazione della corrente zonale. Una parte della corrente zonale prosegue lungo la costa nord della Calabria con una intensità dell'ordine dei 10 cm/s, mentre una parte attraversa la soglia dello Stretto di Messina andando ad alimentare ulteriormente, in termini di intensità, la corrente meridionale che si muove lungo la costa occidentale calabrese. Quest'ultima risulta di maggiore intensità rispetto a quella sul lato siciliano, estremamente debole perché sottovento. Si osserva, ancora una volta, l'effetto della soglia dello stretto che si manifesta nella deviazione del flusso principale per effetto del principio della conservazione della vorticità potenziale.



Nell'ipotesi di rilascio continuo di un tracciante passivo, rappresentato dall'anomalia del campo di salinità nei punti SP1 e CP1, la sua evoluzione spazio/temporale (**Figura 6 A-D**) mostra una progressiva dispersione a partire dai punti di origine dovuta principalmente all'azione del vortice anti-ciclonico centrato sulla soglia che tende, insieme alla corrente zonale e quella meridionale calabrese, a disperdere maggiormente il tracciante sull'intera sezione dello Stretto di Messina e lungo le sponde della costa siciliana.

### 3.4.1.3 Esperimento Mark 3

La soluzione ottenuta forzando il modello con un vento proveniente da N può essere considerato come una soluzione intermedia tra i due esperimenti numerici precedenti. Il campo di velocità barotropico (**Figura 7**) mostra, a nord della soglia dello Stretto di Messina la presenza di una corrente zonale che si estende lungo tutta la fascia costiera settentrionale della Sicilia e che si muove verso est in direzione dello Stretto. Viceversa, lungo la costa della Calabria è possibile osservare la presenza di una corrente costiera che si muove in direzione SW. Le due si "incontrano" in corrispondenza dell'apertura settentrionale dello Stretto generando un'area dinamica a bassa intensità. Parte della risultante di questa corrente attraversa lo Stretto subendo, però, una modificazione nella forma del flusso per effetto della variazione della batimetria. E' evidente, ancora una volta, la formazione del vortice anti-ciclonico centrato sulla soglia dello Stretto di Messina. A sud della soglia dello Stretto di Messina osserviamo ancora la presenza della corrente costiera meridionale lungo la costa della Calabria ed una intensificazione, rispetto all'esperimento precedente, di quella lungo la costa siciliana per effetto della sua maggiore "esposizione" al vento proveniente da nord.

Il rilascio continuo di un tracciante passivo, rappresentato dall'anomalia del campo di salinità nei punti SP1 e CP1, è fortemente condizionato dalla presenza del vortice anti-ciclonico centrato sulla



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012



soglia dello Stretto di Messina. La sua evoluzione spazio / temporale (**Figura 8 A-D**) mostra una progressiva diffusione del tracciante verso il centro del canale e, allo stesso tempo, l'effetto combinato dei rami del vortice e della corrente di Ekman. Questo si manifesta nella formazione di una ben definita "plume" costiera in entrambi i punti. In particolare, la "plume" che si forma a partire dal punto di rilascio SP1 è dovuta all'intensità del ramo settentrionale del vortice anti-ciclonico che presenta una direzione nord-est che si va ad opporre all'effetto contrario della corrente di Ekman (verso sud-ovest). In corrispondenza del CP1, invece, i due contributi di sommano e questo si manifesta con una "plume" che tende a muoversi progressivamente verso sud lungo la costa calabrese. In questo esperimento numerico, e nel Mark 2, la "plume" raggiunge la massima estensione dell'area di impatto lungo la costa calabrese a partire dal punto di rilascio.

#### 3.4.1.4 Esperimento Mark 4

Con venti provenienti da sud il campo di velocità barotropico (**Figura 9 A**) mostra chiaramente la presenza di due correnti meridionali lungo la costa siciliana e calabrese entrambe dirette a nord verso lo Stretto di Messina. Quella sul lato calabrese appare più intensa, di quella sul lato opposto, per effetto del contributo del gradiente di pressione che nasce per effetto della massa spinta verso la costa dal vento. In prossimità della soglia dello Stretto le due correnti convergono e parte della risultante si manifesta come controcorrente (diretta verso sud) in prossimità del centro del canale (**Figura 9 B**). L'altra parte della risultante delle due correnti meridionali attraversa lo stretto acquistando vorticità positiva (formazione di un vortice anti-ciclonico) per effetto della diminuzione della profondità. A nord della soglia dello Stretto di Messina notiamo una divergenza delle correnti. La prima si manifesta come una corrente debole che fluisce verso nord-est lungo la costa calabrese, mentre la seconda in direzione nord-ovest lungo la costa siciliana con una intensità maggiore rispetto alla precedente.

L'evoluzione spazio temporale del tracciante passivo è fortemente condizionato dalla presenza del vortice anti-ciclonico localizzato in corrispondenza della soglia. La distribuzione dell'anomalia di salinità, a partire dai punti SP1 e CP1, è rappresentato in **Figura 10 A-D** la quale mostra la propensione del tracciante ad "allargarsi" verso il centro del vortice anti-ciclonico (area di convergenza) con la formazione di una "plume" in direzione del Mar Tirreno in particolare dal punto di rilascio SP1. Questo è dovuto all'effetto combinato del ramo settentrionale del vortice anti-ciclonico e della corrente costiera che fluisce lungo la costa nord della Sicilia. La "plume" rilasciata a partire dal punto CP1, invece, rimane abbastanza confinata nell'intorno del punto di rilascio a causa delle direzioni contrastanti del ramo inferiore del vortice anti-ciclonico (verso sud-ovest) e la



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012



corrente di Ekman (verso nord-est) che tendono ad annullarsi.

### 3.4.2 Campo indotto dal flusso di marea e lo sforzo del vento

Le correnti nello Stretto di Messina sono dovute, oltre all'effetto dello sforzo del vento sulla superficie del mare, soprattutto dalle correnti di marea innescate dalle caratteristiche oscillatorie dei due bacini ad esso contigui, il Mar Tirreno e il Mar Ionio. Per ottenere questo effetto è stato necessario conoscere il regime di marea nei due mari adiacenti. Questo è stato ottenuto mediante l'utilizzo del Modello di Shelf, il quale ha fornito le opportune condizioni al contorno per il Modello Costiero. La descrizione dei risultati del Modello di Shelf esula dagli obiettivi di questo studio, pertanto saranno discussi solo quelli relativi al Modello Costiero.

La diversità del regime di marea alle due estremità dello stretto e dell'effetto combinato anche del vento alla superficie del mare è messa in luce attraverso tre esperimenti numerici e sue varianti. Nel primo esperimento numerico (Mark 5) attraverso le condizioni al contorno del Modello di Shelf viene applicata inizialmente una marea montante (il Mar Ionio presenta alta marea, mentre il Mar Tirreno si trova in regime di bassa) per poi invertirsi di seguito. La durata dell'esperimento è di 24 ore, quindi comprende due cicli semi-diurni. Nel secondo esperimento numerico alla condizione di marea viene aggiunto anche il contributo della corrente di deriva attraverso l'applicazione di un vento stazionario proveniente dai quadranti settentrionali (Mark 6) e dai quadranti meridionali (Mark 7). Come già ipotizzato anche negli esperimenti numerici del paragrafo 4.1, il fluido è barotropico, cioè la densità delle masse d'acqua coinvolte nel flusso alternato tra il Mar Ionio e Mar Tirreno hanno la medesima intensità. Inoltre, si ipotizza la marea di tipo nettamente semidiurno, come succede normalmente nel Mar Mediterraneo. Quindi, sono state considerate le onde principali ovvero, all'epoca del massimo sviluppo del fenomeno e cioè quando si ha luna piena o luna nuova. Viene anche trascurato l'effetto della pressione atmosferica sui due bacini. Gli esperimenti numerici effettuati sono riassunti nella **Tabella 3**.

Esperimento	Marea	Vento	Intensità
Mark 5.0	Montante+ Scendente	---	---
Mark 5.1	Scendente+ Montante	---	---

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

<b>Mark 6.0</b>	Montante+ Scendente	NE <sup>8</sup>	10 m s <sup>-1</sup>
<b>Mark 6.1</b>	Scendente+ Montante	NE	10 m s <sup>-1</sup>
<b>Mark 7.0</b>	Montante+ Scendente	SSO <sup>9</sup>	15 m s <sup>-1</sup>
<b>Mark 7.1</b>	Scendente+ Montante	SSO	15 m s <sup>-1</sup>

**Tabella 3.** Per ogni esperimento numerico è indicata la direzione del flusso di marea e l'eventuale applicazione dello sforzo del vento (stazionario nello spazio e nel tempo) alla superficie del mare. Ogni esperimento ha la durata di 24 ore.



Per brevità si evita di descrivere la distribuzione del campo di velocità e del tracciante durante il secondo periodo temporale della marea semi-diurna (le seconde 12<sup>h</sup>) perché le strutture dinamiche e del tracciante rimangono pressoché simili a quello descritto durante il primo periodo (12<sup>h</sup>). Inoltre, le figure sono limitate all'area della soglia dello Stretto di Messina in corrispondenza dei punti SCP1 e CP1 (**Tabella 1**).

### 3.4.2.1 Esperimento Mark 5

Attraverso il Modello di Shelf vengono fornite le condizioni al contorno per il Modello Costiero che, in questo esperimento numerico, corrispondono approssimativamente ad un livello di equilibrio tra i due bacini (condizione iniziale) che, successivamente nel tempo, porta il Mar Ionio in condizioni di alta marea e il Mar Tirreno in regime di bassa (marea montante o rema montante). La durata dell'esperimento è di 24 ore, quindi corrispondente a quattro inversioni di corrente nello Stretto di Messina. La massa d'acqua del Modello Costiero è così sottoposta ad un movimento oscillatorio per effetto degli impulsi che riceve dalle maree (sotto forma di condizioni al contorno dal Modello di Shelf) dal Mar Ionio al Mar tirreno (nelle prime 12 ore) e viceversa (nelle seconde 12 ore). Imponendo condizioni iniziali opposte (esperimento numerico Mark 5.1), cioè il Mar Tirreno in condizioni di bassa mare e il Mar Ionio in regime di bassa, i risultati qualitativi risultano pressoché identici. Ovviamente, l'evoluzione spazio temporale del tracciante passivo rilasciato nei punti SC1 e CP1 a partire dalla stesso istante temporale di rilascio saranno fortemente influenzate dalla

<sup>8</sup> NE, vento proveniente da Nord – Est (45°)

<sup>9</sup> SSO, vento proveniente da Sud-Sud-Ovest (202.5°)

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012



tipologia di marea (montante o scendente) a cui saranno soggette inizialmente. Si ipotizza, anche, che durante tutto l'esperimento numerico l'assenza del forzante meteorologico. Questo è fatto per enfatizzare gli effetti combinati della marea e del vento descritti negli esperimenti numerici successivi.

L'evoluzione temporale dell'energia cinetica mediata sulla sezione Ganzirri – Punta Pezzo (**Figura 11**) mostra l'alternarsi del flusso di marea montante e quella scendente durante tutto il periodo di integrazione numerica di 24<sup>h</sup>. I picchi di ampiezza maggiore sono relativi al flusso di marea montante, mentre quelli inferiori a quella scendente.

La distribuzione spaziale del campo di velocità barotropico corrispondente alla massima intensità della marea montante è mostrato in **Figura 12 A**. La maggiore intensità del flusso è raggiunto in corrispondenza della minore ampiezza del canale con velocità di circa 78 cm/s. Questa intensificazione del flusso durante l'attraversamento della soglia dello Stretto di Messina è da attribuirsi all'effetto Venturi, il quale impone un aumento della velocità del flusso in corrispondenza di una riduzione dell'ampiezza del canale. Sovrapposti al flusso di marea montante sono evidenti anche diverse strutture vorticose permanenti<sup>10</sup>. Il primo vortice di natura ciclonica è posizionata immediatamente a nord del porto di Messina davanti a San Ranieri<sup>11</sup>. L'origine della formazione di questo vortice è indotto dallo shear di velocità che si viene a generare tra il flusso della marea nella zona centrale del canale e la barriera che costituisce il porto di Messina. Per effetto dell'azione dell'attrito indotto dalla variazione della batimetria e della costa il flusso tende a ruotare in senso anti-orario. Di conseguenza, la corrente costiera a nord del porto di Messina appare in direzione opposta alla corrente montante. Più energetici sono i vortici anti-ciclonico e ciclonico a nord dello stretto di Messina. Il primo, quello anti-ciclonico, è posizionato in vicinanza della costa calabrese, mentre quello ciclonico sulla sponda siciliana davanti a Capo Peloro. L'origine di queste due strutture è da attribuire all'effetto combinato della variazione della velocità lungo la sezione trasversale al canale (shear di velocità), della batimetria e della morfologia della costa. Queste ultime due strutture rappresentano i vortici di Scilla e Cariddi (ben nota la citazione omerica di Scilla e Cariddi sui pericoli del mare nello Stretto di Messina) che si manifestano esclusivamente in condizioni di marea montante e ampiamente descritti da Defant (1940). Diversi esperimenti di sensibilità effettuati, ma non mostrati per brevità, hanno confermato che l'intensità di queste strutture è fortemente correlata alla profondità e all'ampiezza della soglia dello Stretto di Messina. All'uscita del canale prevale maggiormente l'inerzia del moto delle masse d'acqua sull'attrito e il

<sup>10</sup> Queste strutture tendono a formarsi ogni volta che è presente la corrente montante.

<sup>11</sup> Questa struttura sarà identificata successivamente con il nome di Vortice di San Ranieri.

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>					
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;"><i>Rev</i></td> <td style="width: 50%;"><i>Data</i></td> </tr> <tr> <td>F1</td> <td>30/05/2012</td> </tr> </table>	<i>Rev</i>	<i>Data</i>	F1	30/05/2012
<i>Rev</i>	<i>Data</i>						
F1	30/05/2012						

flusso di marea si riduce notevolmente.



La distribuzione spaziale del campo di velocità barotropico corrispondente alla marea scendente è mostrato in **Figura 12 B**. Il flusso di marea è diretto dal Mar Tirreno verso il Mar Ionio e la corrente raggiunge la sua massima intensità in corrispondenza della soglia dello Stretto di Messina per effetto Venturi. Sovrapposto al flusso si osserva anche la presenza di un vortice ciclonico, in corrispondenza della costa calabrese, con relativa contro-corrente costiera diretta verso nord. Al momento non risultano osservazioni a riprova dell'esistenza di questa struttura. Proseguendo verso il Mar Ionio l'intensità del flusso diminuisce progressivamente per effetto della riduzione dell'ampiezza dell'elevazione del mare (non mostrata) e dell'inerzia del moto delle masse d'acqua rispetto alla turbolenza.

La distribuzione spazio temporale del tracciante passivo rilasciato in maniera continua per l'intera durata dell'esperimento numerico nei punti SP1 e CP1 a partire dall'istante iniziale in condizioni iniziali di marea montante e assenza di vento, è mostrato in **Figura 13**. In corrispondenza della massima intensità della corrente montante (approssimativamente coincidente con il primo picco di massimo relativo di energia cinetica di **Figura 11**) si osserva una dispersione del tracciante verso il Mar Tirreno. In particolare, si forma una "plume" in direzione del mare aperto, a partire dal punto di rilascio SC1, mentre da CP1 la "plume" tende a disperdersi maggiormente lungo la fascia costiera immediatamente a est del punto di rilascio (**Figura 13 A**). In seguito alla naturale modificazione del campo di oscillazione, con una progressiva riduzione del flusso di marea scendente e conseguente aumento di quella montante, il tracciante diretto verso il Mar Tirreno tende a dispendersi su una vasta area a nord dello Stretto, mentre rimane confinata sotto-costa quella relativa al punto di rilascio CP1 (**Figura 13 B**). Il motivo è da attribuire alla progressiva formazione/dissipazione dei vortici di Cariddi e Scilla. Il primo, per la sua natura ciclonica, è caratterizzato da una struttura tridimensionale che tende a far divergere il flusso alla superficie spostando il tracciante verso i bordi del vortice<sup>12</sup>. Questo provoca una progressiva dispersione del tracciante su un'area direttamente proporzionale all'ampiezza del vortice stesso. Viceversa, la "plume" più a sud rimane confinata alla costa della Calabria che, per effetto della convergenza del flusso d'acqua verso il centro del vortice anti-ciclonico<sup>13</sup>, tende ad "allungarsi" verso la soglia dello Stretto di Messina. Questo è da attribuire alla contro-corrente costiera innescata dal ramo inferiore del vortice di Scilla lungo la costa della Calabria.

La conseguenza inversione delle correnti di marea, da montante a scendente

<sup>12</sup> Processo di "risalita" delle acque dal fondo verso la superficie, noto anche come upwelling.

<sup>13</sup> Processo di "sprofondamento" delle acque dalla superficie verso il fondo, noto anche come downwelling.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

(approssimativamente coincidente con il secondo picco di massimo relativo di energia cinetica di **Figura 11**), induce una dispersione del tracciante su una vasta area ad est della soglia dello Stretto di Messina, con un maggiore impatto sul lato sud del canale (**Figura 13 C**) per effetto delle forti correnti dirette verso il Mar Ionio (marea scendente). Alla fine dell'effetto della marea scendente (corrispondente al secondo minimo dell'energia cinetica di **Figura 11**) l'area di impatto appare lungo tutta la sezione (nord-est / sud-ovest) dello Stretto (**Figura 13 D**) per effetto del campo di avvezione risultante dalla corrente di marea scendente.

Nel caso di rilascio in condizioni iniziali di marea scendente la distribuzione spazio temporale del tracciante cambia notevolmente (**Figura 14**). In condizioni di massimo sviluppo della corrente scendente, coincidente con il primo picco di massimo relativo dell'energia cinetica di **Figura 11**, le "plume" che si formano in corrispondenza dei punti di rilascio SC1 e CP1 tendono a disperdersi verso sud-ovest in direzione del Mar Ionio lungo le rispettive coste (**Figura 14 A**). La distribuzione spaziale del tracciante in corrispondenza della fase di equilibrio tra i due bacini, coincidente con il primo minimo relativo di energia cinetica di **Figura 11**, mostra una intensa dispersione della "plume" lungo la costa della Sicilia (**Figura 14 B**) per effetto della maggiore velocità della corrente di marea lungo la costa della Sicilia. Viceversa, quella sulla costa della Calabria rimane confinata in una stretta fascia costiera per effetto della presenza del vortice ciclonico sul lato della costa della Calabria che induce, lungo la costa, una corrente che tende a contrastare quella della marea di direzione opposta. Questo riduce sensibilmente il campo di avvezione per il trasporto del tracciante dal punto CP1. La conseguente inversione delle correnti, da scendente a montante, provoca una ulteriore modificazione della distribuzione spaziale del tracciante (**Figura 14 C**). In condizione di massimo sviluppo della marea montante, coincidente con il secondo picco di massimo relativo dell'energia cinetica di **Figura 11**, si osserva una ulteriore dispersione della "plume" lungo la costa della Sicilia in direzione del Mar Ionio per effetto della contro-corrente presente lungo la costa indotta dal vortice ciclonico di San Ranieri con dispersione del tracciante verso il centro del canale (**Figura 14 D**). Sul lato della costa della Calabria, invece, la figura non mostra la presenza di alcun impatto del tracciante, probabilmente perché completamente mescolato dal riflusso della marea.

### 3.4.2.2 Esperimento Mark 6

In questo esperimento numerico attraverso il modello di Shelf vengono fornite le opportune condizioni al contorno per il Modello Costiero che consistono in un movimento oscillatorio per effetto degli impulsi che riceve dalle maree dal Mar Ionio al Mar Tirreno (nelle prime 12 ore) e viceversa (nelle seconde 12 ore). Inoltre, al flusso periodico di marea viene sovrapposto l'azione di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

un vento stazionario proveniente da NE per tutta la durata dell'esperimento numerico (24<sup>h</sup>). Come nel paragrafo precedente è analizzata la dispersione del tracciante passivo anche in funzione dalla tipologia di marea (montante seguita da scendente, esperimento Mark 6.0, e scendente seguita da montante, esperimento Mark 6.1).



La distribuzione temporale dell'energia cinetica mediata sulla sezione Ganzirri – Punta Pezzo è governata principalmente dal flusso indotto dalla marea a cui si va a sommare il contributo dello sforzo del vento alla superficie del mare. Questo è evidente in corrispondenza dei massimi e, soprattutto, dei minimi di intensità del flusso di marea, cioè durante i periodi di inversione della marea da montante a scendente e vice-versa (**Figura 15**).

La distribuzione del campo di velocità barotropico in corrispondenza della massima intensità della corrente montante mostra le principali strutture dinamiche discusse nel paragrafo 4.1 con una intensificazione della corrente costiera lungo la costa settentrionale della Sicilia per effetto dell'azione combinata del contributo della marea montante, la corrente di deriva e quella di gradiente. Sono ben evidenti i vortici di Scilla, Cariddi e San Raniero, ma caratterizzati da una variazione, sia in termini di intensità che di posizione, del campo di velocità dovuto al contributo dell'effetto del vento alla superficie del mare (si confronti la **Figura 16 A** con la **Figura 12 A**). Questo è ben evidente lungo la costa settentrionale della Sicilia (intensificazione), mentre una riduzione del flusso si osserva lungo il canale in corrispondenza della costa della Sicilia e della Calabria (**Figura 16 B**) per effetto della corrente di Ekman che tende a ridurre l'intensità della corrente di marea montante. Questo provoca una variazione sia della dimensione orizzontale che dell'intensità dei vortici, con conseguente variazione del campo di avvezione che induce la dispersione del tracciante passivo.

In corrispondenza della massima intensità della corrente discendente, il campo di velocità barotropico presenta le tipiche strutture dinamiche della corrente discendente (si confronti la **Figura 17 A** con la **Figura 12 B**) con una sensibile intensificazione (> 20 cm/s) delle correnti soprattutto lungo la costa della Sicilia e della Calabria del canale (**Figura 17 B**). L'incremento è maggiore verso la costa della Sicilia perché al contributo dell'effetto della corrente di Ekman si va a sommare anche la corrente di gradiente che si innesca per la presenza della costa. Questo effetto sulla costa della Calabria è, invece, molto piccolo perché, con venti provenienti da NE, il fetch<sup>14</sup> è praticamente nullo. Inoltre, la contro-corrente costiera che nasce per effetto del vortice anticiclonico sulla costa della Calabria viene quasi annullata dalla corrente di Ekman diretta in direzione opposta. Questo provoca, quindi, un'area caratterizzata da una bassa attività dinamica.

<sup>14</sup> Rappresenta la distanza orizzontale su cui può agire il vento senza ostacoli alla sua intensità e direzione.



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012



Verso il centro del canale, invece, il contributo della corrente di Ekman risulta essere piccolo rispetto a quello della corrente di marea. Per effetto dell'applicazione del vento da NE sulla costa settentrionale della Sicilia si nota, inoltre, la formazione di un ampio vortice anti-ciclonico. La sua natura è dovuta alla corrente di shear orizzontale che nasce per effetto del contrasto tra la corrente di deriva indotta dall'applicazione del vento alla superficie del mare (si veda anche la **Figura 3**) e la corrente di marea discendente (si veda anche la **Figura 12**). Questo induce una vorticità negativa con la formazione di un vortice anti-ciclonico.

La distribuzione spazio temporale del tracciante passivo rilasciato in maniera continua nei punti SP1 e CP1 in condizioni iniziali di marea montante (prime 12 ore) seguita dalla marea scendente (seconde 12 ore) e forzato alla superficie da un vento stazionario da NE è mostrato in **Figura 18 A-D**. La distribuzione spaziale del tracciante, rispetto ai risultati ottenuti senza l'applicazione del forzante meteorologico (**Figura 13 A-D**), presenta variazioni identificabili principalmente in una maggiore dispersione del tracciante lungo la direzione del canale maggiormente verso il Mar Ionio per effetto della somma dei contributi al trasporto indotto della marea scendente e dello sforzo del vento da NE. Si nota, inoltre, uno spostamento della dispersione anche verso la costa della Sicilia. Questo è da imputare all'azione del trasporto indotto dalla corrente di Ekman.

Nell'ipotesi di rilascio continuo in condizioni di marea scendente (prime 12 ore) e marea montante (seconde 12 ore), forzato alla superficie da un vento stazionario da NE, la distribuzione spazio temporale del tracciante passivo di salinità è mostrato in (**Figura 19 A-D**). Rispetto ai risultati ottenuti senza l'applicazione del forzante meteorologico (**Figura 14 A-D**) mostra un sensibile allargamento delle "plume" lungo la costa della Sicilia a partire dal corrispondente punto di rilascio (SC1) per effetto dell'azione combinata della marea scendente e del vento da NE (trasporto essenzialmente diretto verso il Mar Ionio) durante la fase di marea scendente. Inoltre, si osserva una maggiore dispersione verso il centro del canale del tracciante a partire dal punto di rilascio CP1 per poi raggiungere la costa opposta (la Sicilia). La naturale inversione della marea, da scendente a montante e con l'effetto del vento il cui trasporto è ora tendenzialmente opposto a quella della marea montante, tende a mantenere estesa l'area di impatto soprattutto sulla la costa della Sicilia.

### 3.4.2.3 Esperimento Mark 7

In questo esperimento numerico al flusso periodico di marea, sotto forma di condizioni al contorno provenienti dal Modello di Shelf, viene sovrapposto l'azione di un vento stazionario proveniente da SSO per tutta la durata dell'esperimento numerico (24<sup>h</sup>). Anche in questo paragrafo è analizzata la

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

dispersione del tracciante passivo in funzione dalla tipologia di marea (montante seguita da scendente, esperimento Mark 7.0, e scendente seguita da montante, esperimento Mark 7.1).



La distribuzione temporale dell'energia cinetica mediata sulla sezione Ganzirri – Punta Pezzo è governata principalmente dalla marea a cui si va a sommare il contributo dello sforzo del vento alla superficie del mare. (**Figura 20**). L'aumento di energia cinetica è evidente in corrispondenza dei massimi, ma l'aumento relativo è maggiore in corrispondenza delle fasi di stanca (corrispondenti ai valori minimi dell'energia cinetica).

La distribuzione del campo di velocità barotropico in corrispondenza della massima intensità della corrente montante mostra le principali strutture dinamiche discusse nel paragrafo 4.1 con una intensificazione delle correnti costiere lungo le coste della Sicilia e della Calabria per effetto dell'azione combinata del contributo della marea montante, la corrente di deriva e quella di gradiente (**Figura 21 A**). Sono ancora evidenti i vortici di Scilla, Cariddi e San Raniero, ma caratterizzati da una leggera modificazione del campo di velocità dovuto al contributo dell'effetto del vento alla superficie del mare e della corrente di gradiente (si confronti la **Figura 21 A** con la **Figura 12 B**). Questi contributi, se concordi, provocano una intensificazione delle correnti lungo la costa della Calabria e della costa settentrionale della Sicilia e delle correnti associate ai rami diretti verso nord dei vortici di Scilla e Cariddi (**Figura 21 B**), mentre in corrispondenza del vortice di San Raniero il vento provoca una riduzione della dimensione orizzontale della struttura ciclonica.

In condizioni di marea scendente l'azione del vento dal SSO tende ad aumentare le dimensioni del vortice ciclonico localizzato sulla costa nord della Sicilia, mentre appaiono due vortici anti-ciclonici sulla costa della Sicilia a nord e sud del porto di Messina (**Figura 22 A**). L'applicazione del campo di vento da SSO provoca una intensificazione della corrente costiera nel canale lungo la costa della Calabria, una riduzione del flusso di marea nella parte centrale del canale, una intensificazione della corrente costiera che si muove lungo la costa settentrionale della Sicilia, alla quale corrisponde al ramo inferiore del vortice ciclonico, e un aumento della velocità dei rami inferiori dei vortici di Scilla e Cariddi (**Figura 22 B**).

La distribuzione spazio temporale del tracciante passivo rilasciato in maniera continua nei punti SP1 e CP1 in condizioni iniziali di marea montante (prime 12 ore) seguita dalla marea scendente (seconde 12 ore) e forzato alla superficie da un vento stazionario da NE è mostrato in **Figura 23 A-D**. La distribuzione spaziale del tracciante, rispetto ai risultati ottenuti senza l'applicazione del forzante meteorologico (**Figura 13 A-D**), presenta variazioni identificabili principalmente in una maggiore dispersione del tracciante verso la costa settentrionale della Calabria per effetto della somma dei contributi al trasporto indotto della marea montante e dallo sforzo del vento da SSO sia



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012



per quanto riguarda il punto di rilascio SC1 che CP1. Questo impatto sulla costa della Calabria diventa ancora più evidente con il cambio naturale di oscillazione della marea (da montante a scendente). Questo provoca un ulteriore dispersione del tracciante verso la costa della Calabria con conseguente dispersione e allungamento della “plume” nella direzione nord-est / sud-ovest dell’asse del canale. Anche in questo esperimento numerico possiamo osservare la diversa concentrazione del tracciante nel tempo rispetto all’esperimento senza l’applicazione del forzante atmosferico. Per le sue caratteristiche fisiche, la salinità tende a mescolarsi maggiormente all’aumentare dell’energia cinetica.

Se il rilascio avviene in condizioni iniziali di marea scendente (prime 12 ore) seguita dalla marea montante (seconde 12 ore), sempre forzato alla superficie da un vento stazionario da SSO, la distribuzione spazio temporale del tracciante passivo di salinità mostra una minore dispersione del tracciante sul lato della costa della Sicilia con un aumento verso il centro dello Stretto (**Figura 24 A-D**). Un confronto con i risultati ottenuti senza l’applicazione del forzante meteorologico (**Figura 14 A-D**) mostra una riduzione delle “plume” lungo la costa della Sicilia e un allargamento verso il centro del canale per effetto dell’azione iniziale della marea scendente e del vento da SSO che tende a contrastarla soprattutto lungo la costa sia della Sicilia che della Calabria. Questo provoca una maggiore dispersione del tracciante verso il centro del canale (sia da SC1 che CP1) il quale viene è amplificata dopo la naturale inversione della marea (da scendente a montante) per effetto combinato con il vento da SSO.

### 3.5 Conclusioni

La modellistica numerica consente di fornire risposte alle esigenze fornendo previsione dell’evoluzione del sistema a breve termine e di studiare possibili scenari quanto mai realistici e consistenti, tenendo sempre presente la reale applicabilità dei modelli stessi (che è funzione delle approssimazioni compiute e delle scale spazio – temporali dei fenomeni da investigare). Data la complessità del sistema in esame, è evidente che l’approccio modellistico alle problematiche della gestione costiera deve essere quanto mai interdisciplinare. Per tale ragione, in uno studio morfodinamico, è fondamentale l’utilizzo di modelli che meglio si adattano alla particolare e complessa morfologia costiera dell’area di studio accoppiandoli a modelli di erosione costiera e dell’evoluzione dell’ecosistema.



Per questi motivi sono stati sviluppati un Modello di Shelf e un Modello Costiero. Entrambi i modelli numerici di simulazione sono stati introdotti allo scopo di aumentare la risoluzione spaziale limitatamente all’area di interesse utilizzando le informazioni allo stato iniziale e ai contorni aperti

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

provenienti dal modello a più bassa risoluzione spaziale. In questo studio la risoluzione spaziale orizzontale del Modello Costiero è di circa 100 m. Questa risoluzione spaziale non è sufficiente per poter risolvere con adeguata accuratezza problematiche di impatto di strutture sul regime idrodinamico (variazione della linea di costa, qualità delle acque), ma al momento rappresenta l'unico strumento in grado di trarre conclusioni di tipo qualitativo entro i tempi richiesti dal Committente. Infatti, è doveroso far osservare che, avendo a disposizione un arco temporale maggiore (dai tre ai quattro mesi), sarebbe possibile innestare numericamente al sistema qui realizzato un modello morfodinamico agli elementi finiti. Questo rappresenta la soluzione migliore in quanto questo strumento, innestato ai contorni aperti con il sistema numerico qui sviluppato, consentirebbe di raggiungere altissime risoluzioni (difficilmente raggiungibili mediante l'applicazione di un singolo modello numerico di simulazione) modificando opportunamente la dimensione e la forma degli elementi della griglia di calcolo in maniera tale da poter meglio adattarsi alla complessa morfologia costiera. Questo rappresenta un grande vantaggio perché permetterebbe di ottenere risoluzioni spaziali dell'ordine della decina di metri soltanto nelle aree di interesse, come per esempio in prossimità delle sorgenti "inquinanti" e di ottemperare alle richieste della commissione CTVIA. Quindi, il lavoro qui svolto può essere considerato come il primo passo nella realizzazione di un sistema numerico integrato capace di eseguire uno studio ad altissima risoluzione spazio temporale della dinamica del litorale in questione mediante modelli numerici innestati a scala spaziale differente (dalla mesoscala a quella costiera) capaci di fornire una stima del trasporto solido e della linea di costa in presenza di eventuali opere marittime in funzione dell'evoluzione dell'idrodinamica marina, dello stato del mare e dell'interazione onda-corrente.

A causa dei tempi ristretti di esecuzione dello studio non sono stati considerati processi al di sotto della risoluzione spaziale del Modello Costiero. Inoltre, è stato utilizzato come tracciante del trasporto e della relativa dispersione e diffusione il campo di salinità (anomalia del campo di salinità), piuttosto che un inquinante univocamente determinato. Questa ipotesi è sufficientemente giustificata dalla caratteristica conservativa della salinità, sebbene questa abbia numerosi limiti in quanto vengono trascurati tutti gli eventuali processi chimico-fisici coinvolti durante l'evoluzione.

Sono stati realizzati una serie di esperimenti numerici con l'obiettivo di identificare le principali caratteristiche dinamiche in funzione della tipologia di forzante (atmosfera e mareale). I risultati mostrano inequivocabilmente che le correnti di marea rappresentano il principale motore di trasporto e dispersione di un eventuale "materiale in sospensione". Un ruolo importante è anche giocato dallo sforzo del vento alla superficie soprattutto durante le fasi di stanca della marea e nelle aree costiere. In alcuni casi, a seconda della direzione e intensità, può dare origine a delle



		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

correnti opposte alla marea, questo soprattutto al di fuori dello Stretto di Messina, ma può “modulare”, in termini di intensità e posizione, le principali strutture dinamiche indotte dalla marea come i vortici di Scilla, Cariddi e di San Raniero.

Un confronto con le velocità dedotte dalla bibliografia indicano una sottostima delle correnti simulate in questo studio di circa il 30-40%. Il motivo è da attribuire a diversi fattori, tra cui la batimetria, di conseguenza anche la distribuzione spaziale della linea di costa, e l'assenza dell'effetto della pressione atmosferica sui due bacini. Se quest'ultimo effetto è di facile soluzione, attraverso l'utilizzo del Modello di Shelf, la batimetria invece risulta più complessa. Si ricorda, infatti, che la batimetria, e quindi anche della linea di costa e della distanza tra la costa siciliana e quella calabrese, è legata alla disponibilità di dati di profondità. In questo lavoro è stato usato un data set avente una risoluzione di 1/60°, circa 2 km. Questo data set viene utilizzato negli studi di oceanografia di mare aperto. Successivamente, questi dati sono stati interpolati linearmente sulla griglia del Modello Costiero. Questo comporta una non precisa rappresentazione del dato di profondità, rispetto a quello reale, con conseguente influenza sulla stima del campo di velocità. Inoltre, un non preciso posizionamento della costa in funzione dello spazio può, a sua volta, contribuire ad una errata stima del campo di velocità per effetto della maggiore/minore ampiezza dello Stretto di Messina. Da ciò segue che, per una migliore comprensione dei fenomeni oceanografici a scala costiera, si rende indispensabile l'utilizzo di modelli numerici di simulazione ad una risoluzione spaziale dell'ordine della decina di metri e la disponibilità di una batimetria, e quindi anche del posizionamento della linea di costa, sufficientemente realistica.

L'analisi della distribuzione spaziale e temporale del tracciante passivo utilizzato in questo studio (anomalia di salinità) mostra in maniera qualitativa che, a partire dai punti di rilascio in SC1 e CP1 e date le velocità di trasporto delle correnti simulate, potrebbe essere possibile ipotizzare processi di sospensione e trasporto dei sedimenti sospesi su gran parte delle coste nell'intorno dei punti di rilascio, mentre un'altra parte potrebbe essere trasportata verso il mare aperto e, quindi, verso i mari più profondi dove verrà dissipata la maggior parte dell'energia.

In condizioni di marea montante la dispersione dal punto SC1 sembra indicare un trasporto e conseguente dispersione verso il mare aperto (Mar Tirreno) soprattutto per effetto della dinamica indotta dal vortice di Scilla (area di divergenza). L'eventuale applicazione di un forzante meteorologico proveniente dai quadranti meridionali /occidentali molto probabilmente favorirebbe ulteriormente il processo di dispersione verso il mare aperto. In corrispondenza del punto di rilascio CP1, invece, l'area di impatto del tracciante è limitata alla costa "sotto-corrente" della Calabria settentrionale per effetto delle caratteristiche dinamiche del vortice di Cariddi (area di

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29	<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012	

convergenza). Come abbiamo mostrato negli esperimenti numerici dei paragrafi precedenti, l'applicazione del forzante meteorologico tende a modificare intensità e posizione del vortice. Di conseguenza, l'area di impatto potrebbe aumentare con l'applicazione di venti provenienti dai quadranti meridionali, mentre verrebbe contenuta con l'applicazione di forzanti atmosferici provenienti dai quadranti settentrionali.

In condizioni di marea scendente la dispersione a partire dal punto SC1 sembra essere inizialmente lungo la costa della Sicilia in direzione del Porto di Messina per poi muoversi verso il centro del canale per effetto della presenza del vortice ciclonico. I risultati delle simulazioni numeriche hanno mostrato, anche in questo caso, la capacità del vento di modulare queste strutture dinamiche provocando variazioni nell'intensità e nella posizione delle strutture. Le simulazioni effettuate hanno mostrato che in condizioni di vento proveniente dai quadranti meridionali il vortice tende ad allargarsi verso il centro del canale, viceversa in condizioni di vento proveniente dai quadranti settentrionali.

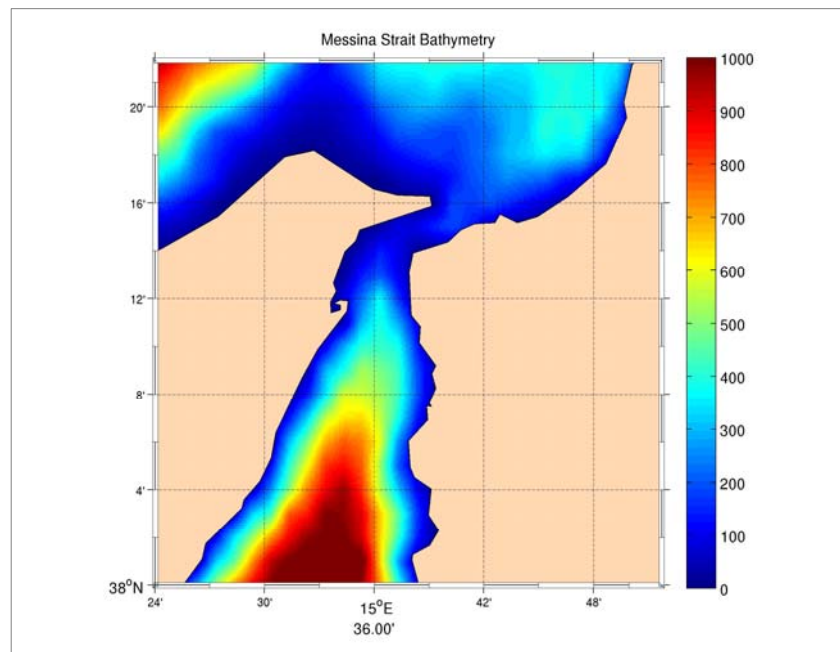
In conclusione, il forzante dinamico principale dell'area di studio è rappresentato dal flusso di marea e da diverse strutture dinamiche ad esse connesse (come per esempio i vortice di Scilla, Cariddi e San Raniero). Il forzante atmosferico, in condizioni di massima ampiezza della marea, non sembra giocare un ruolo importante sul trasporto, eccetto nelle fasi di stanca, lungo la costa e fuori dallo Stretto di Messina. In ogni caso, gli esperimenti numerici realizzati attribuiscono allo sforzo del vento la capacità di modulare le strutture dinamiche descritte in precedenza con importanti ripercussioni sul trasporto e conseguente area di impatto.

Poiché lo studio eseguito non consente di indicare l'entità degli impatti derivanti dalla costruzione dei pontili, dovute alle ipotesi di partenza, limitazioni temporali del committente, le approssimazioni numeriche, ecc., si propone l'utilizzo del sistema qui realizzato per fornire ad un eventuale futuro modello morfodinamico (agli elementi finiti) le corrette condizioni al contorno alla scala spaziale di interesse (decine di metri).

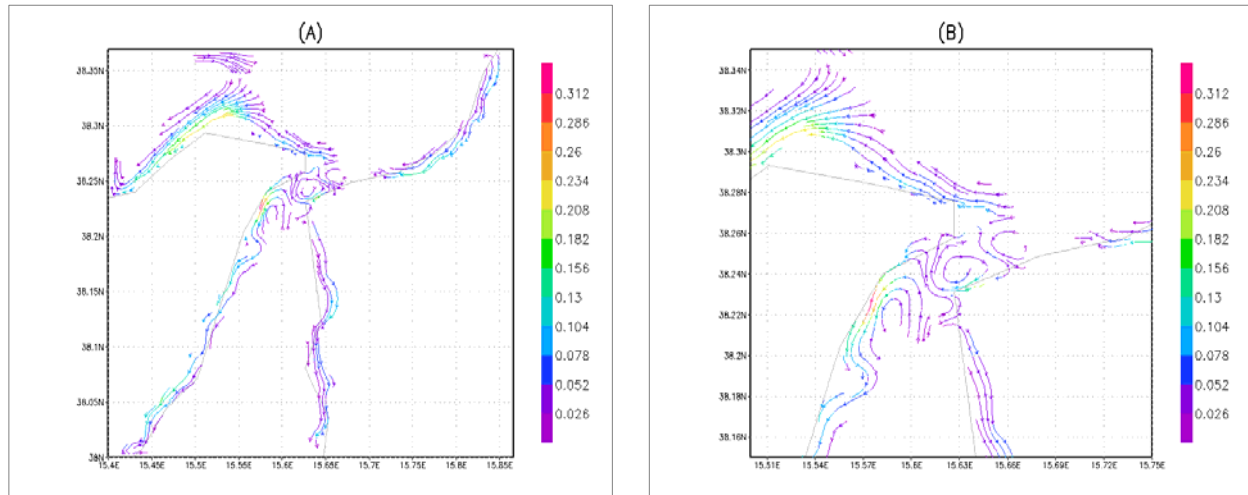
## Lista delle Figure



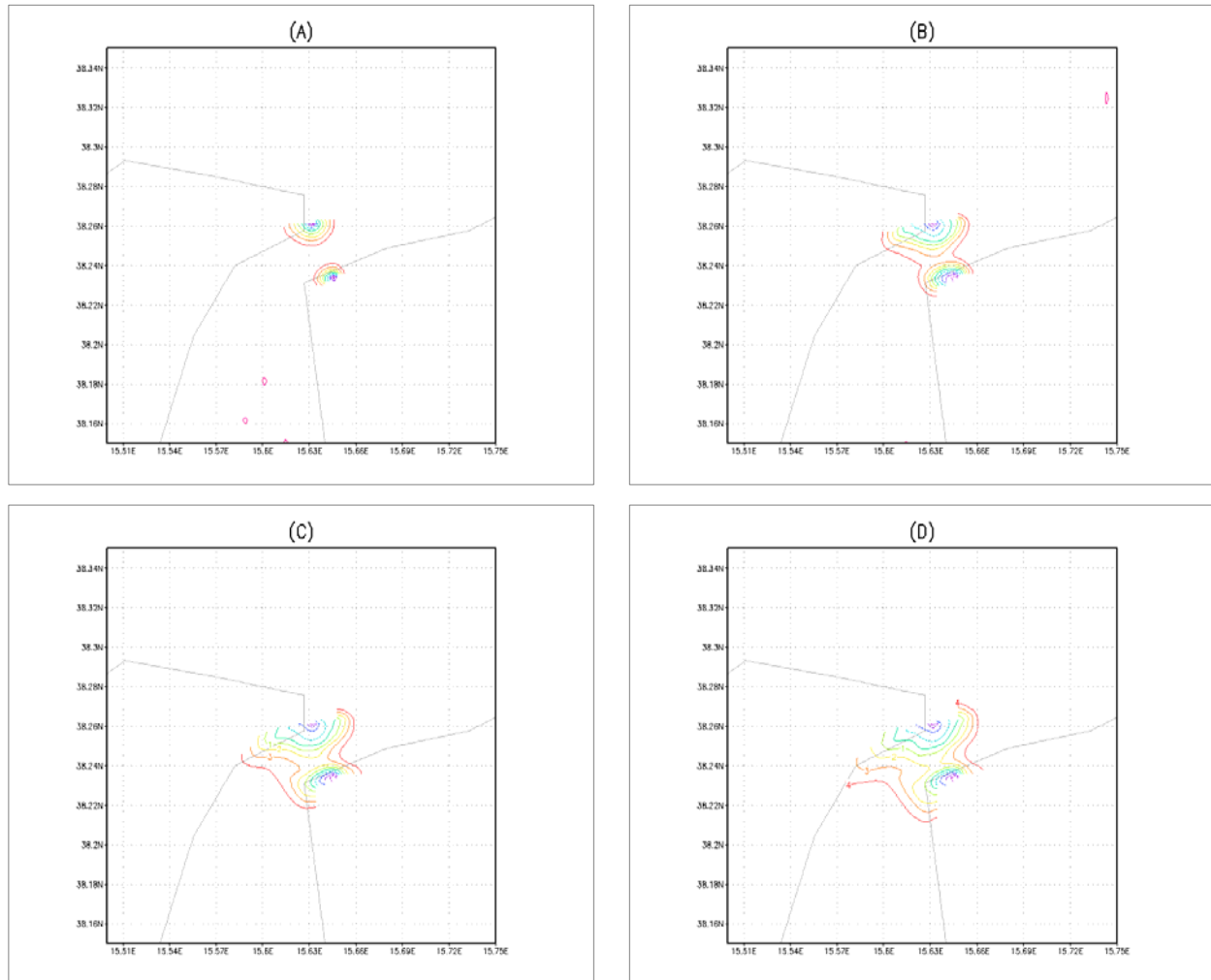
**Figura 1.** Vista da satellite dell'area di studio.



**Figura 2.** Rappresentazione della batimetria ottenuta interpolando i dati originali del data set DBDB1 (1/60°) sulla griglia del modello numerico di simulazione costiero. Le profondità sono in metri.

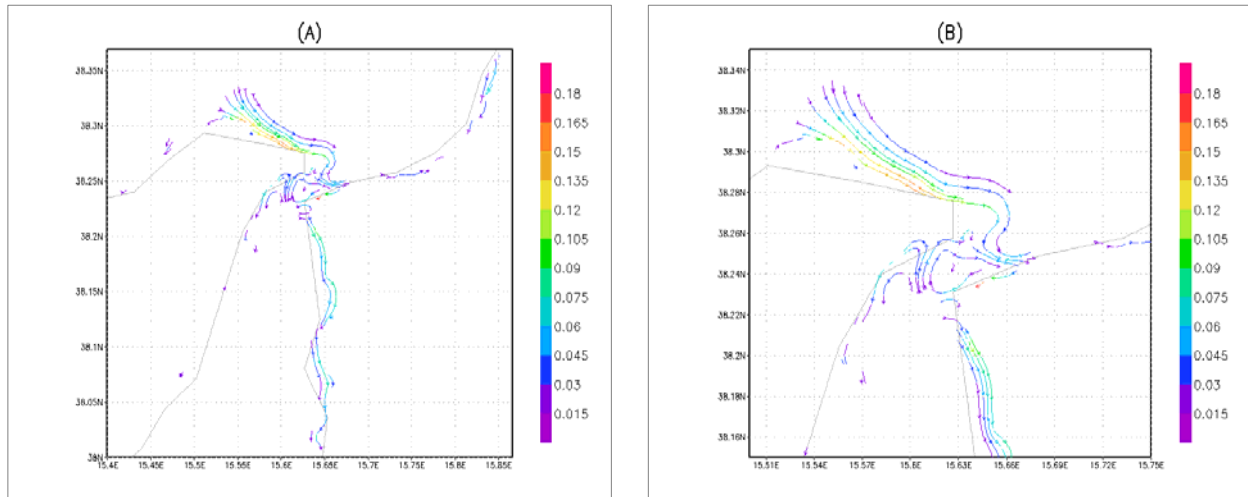


**Figura 3.** Esperimento numerico Mark 1. Campo di velocità barotropico (sotto forma di stream lines) dopo 6 ore ottenuto forzando il modello costiero con un vento stazionario di 15 m/s con provenienza da NE. Sulla sinistra (A) è rappresentata la soluzione relativa all'intero dominio del modello costiero, a destra (B) uno zoom della soluzione nell'area dello Stretto di Messina. Le velocità delle correnti sono in m/s. Quelle al di sotto dei 2 cm/s non sono mostrate.



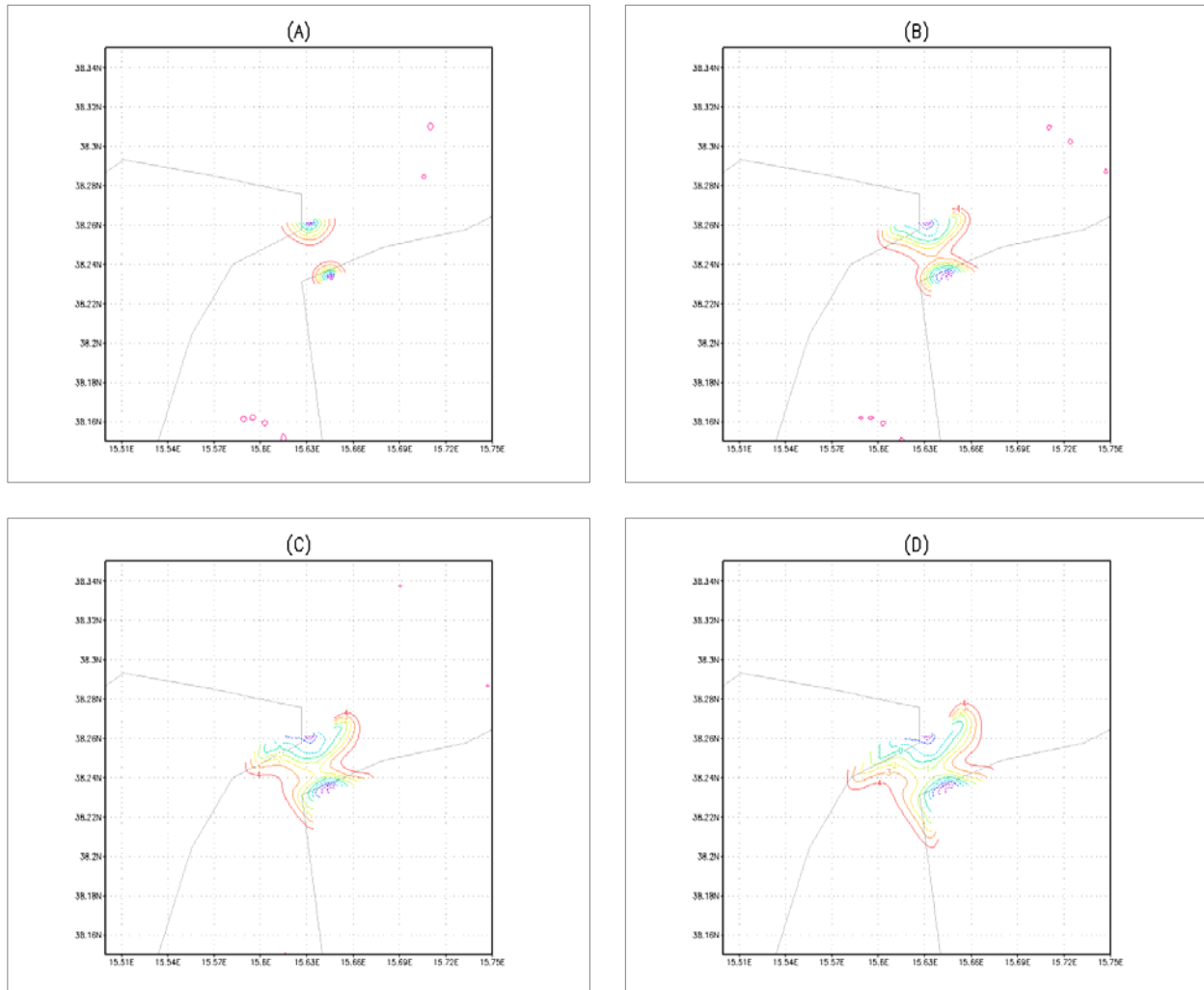
**Figura 4.** Esperimento numerico Mark 1. Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 dopo 1.5 ore (A), 3 ore (B), 4.5 ore (C) e 6 ore (D) a partire dalla condizione iniziale nell'area della soglia dello Stretto di Messina.



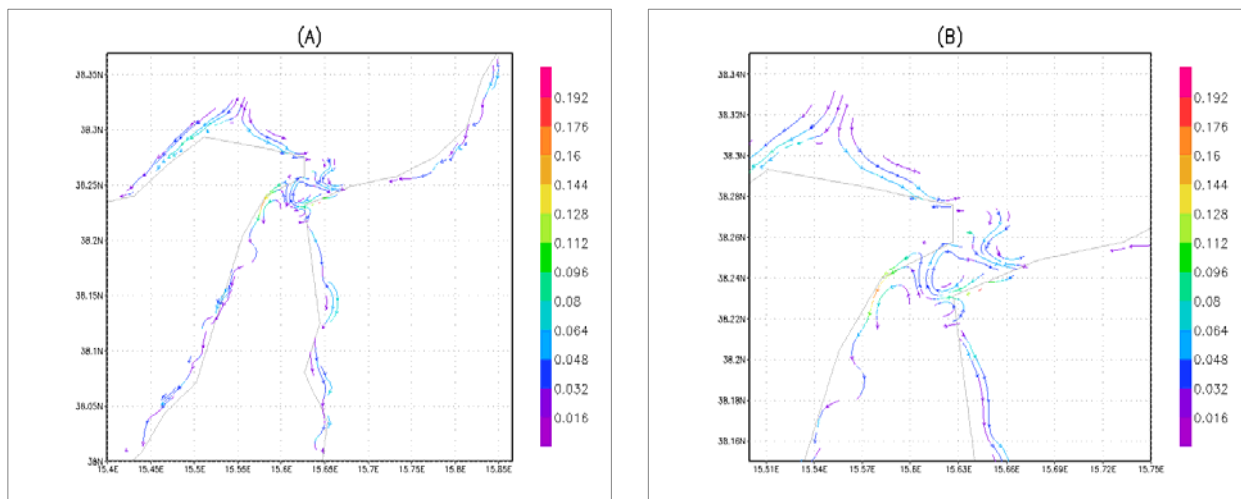


**Figura 5.** Esperimento numerico Mark 2. Campo di velocità barotropico (sotto forma di stream lines) dopo 6 ore ottenuto forzando il modello costiero con un vento stazionario di 15 m/s con provenienza da NW. Sulla sinistra (A) è rappresentata la soluzione relativa all'intero dominio del modello costiero, a destra (B) uno zoom della soluzione nell'area dello Stretto di Messina. Le velocità delle correnti sono in m/s. Quelle al di sotto dei 1 cm/s non sono mostrate.

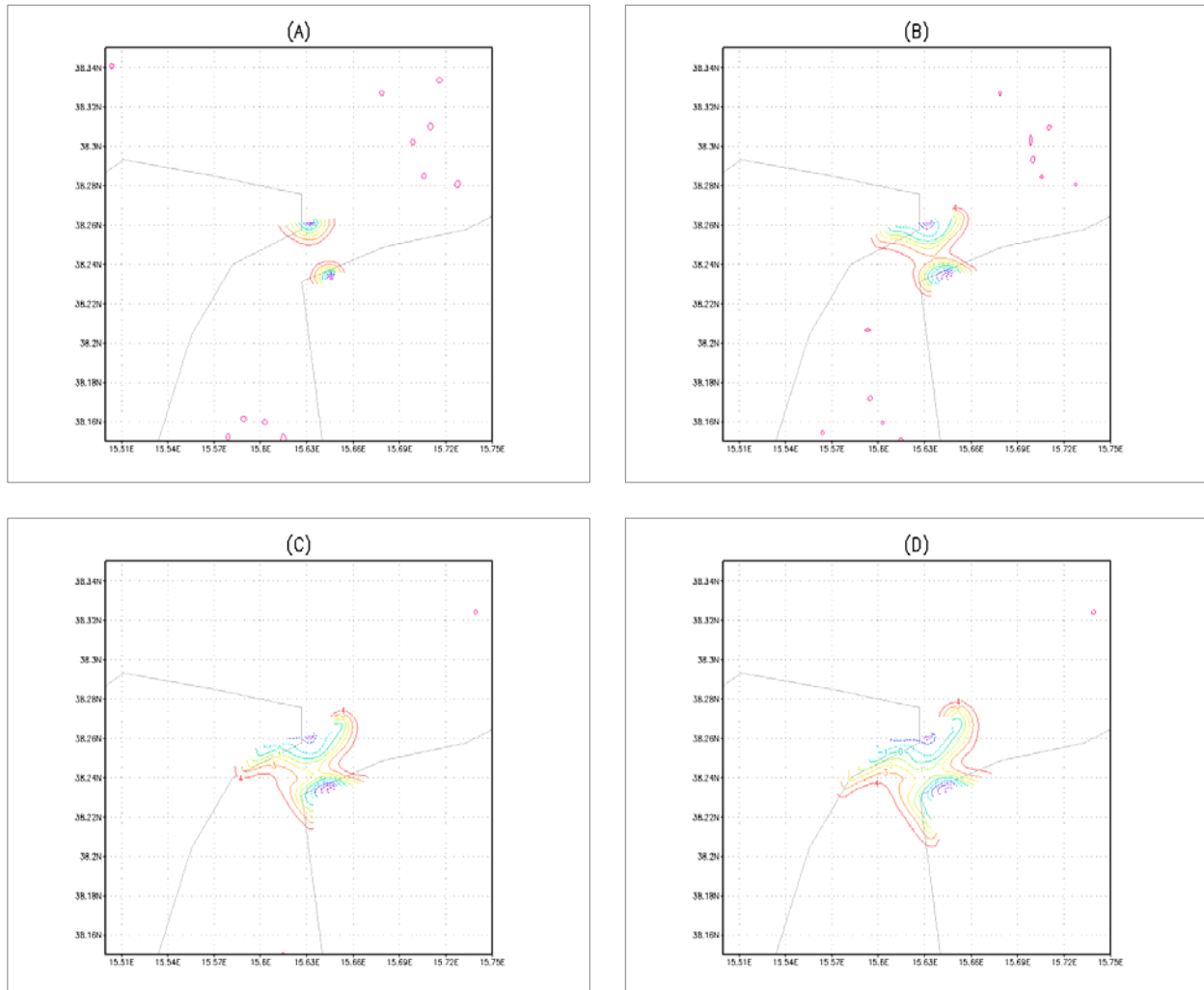




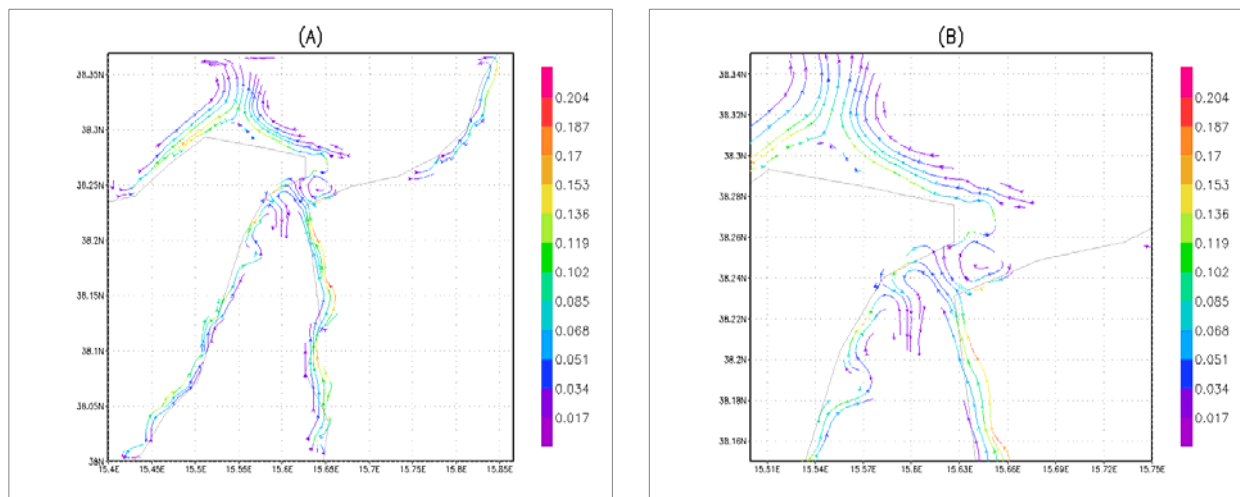
**Figura 6.** Esperimento numerico Mark 2. Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 dopo 1.5 ore (A), 3 ore (B), 4.5 ore (C) e 6 ore (D) a partire dalla condizione iniziale nell'area della soglia dello Stretto di Messina.



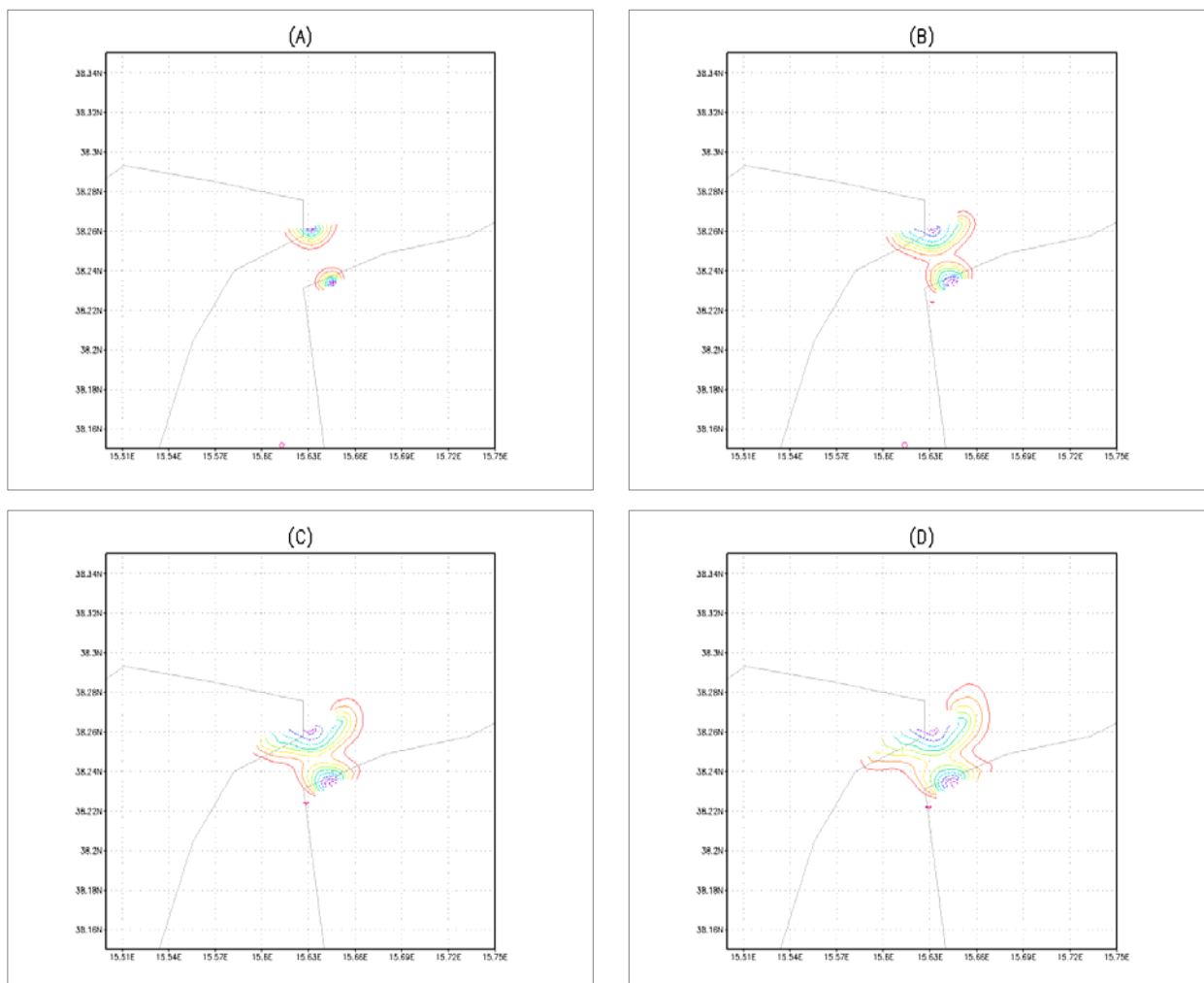
**Figura 7.** Esperimento numerico Mark 3. Campo di velocità barotropico (sotto forma di stream lines) dopo 6 ore ottenuto forzando il modello costiero con un vento stazionario di 15 m/s con provenienza da N. Sulla sinistra (A) è rappresentata la soluzione relativa all'intero dominio del modello costiero, a destra (B) uno zoom della soluzione nell'area dello Stretto di Messina. Le velocità delle correnti sono in m/s. Quelle al di sotto dei 1.5 cm/s non sono mostrate.



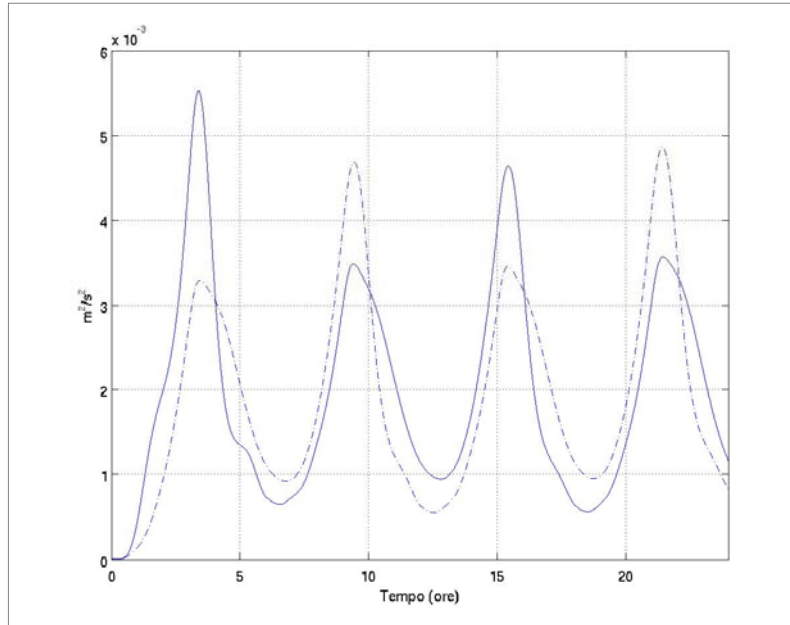
**Figura 8.** Esperimento numerico Mark 3. Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 dopo 1.5 ore (A), 3 ore (B), 4.5 ore (C) e 6 ore (D) a partire dalla condizione iniziale nell'area della soglia dello Stretto di Messina.



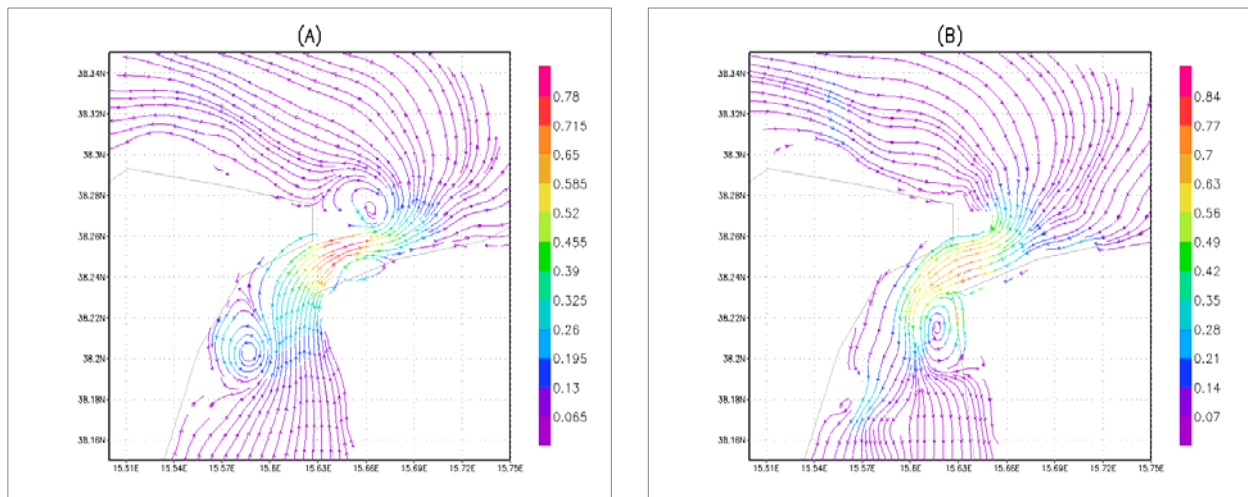
**Figura 9.** Esperimento numerico Mark 4. Campo di velocità barotropico (sotto forma di stream lines) dopo 6 ore ottenuto forzando il modello costiero con un vento stazionario di 15 m/s con provenienza da SSO. Sulla sinistra (A) è rappresentata la soluzione relativa all'intero dominio del modello costiero, a destra (B) uno zoom della soluzione nell'area dello Stretto di Messina. Le velocità delle correnti sono in m/s. Quelle al di sotto dei 1.5 cm/s non sono mostrate.



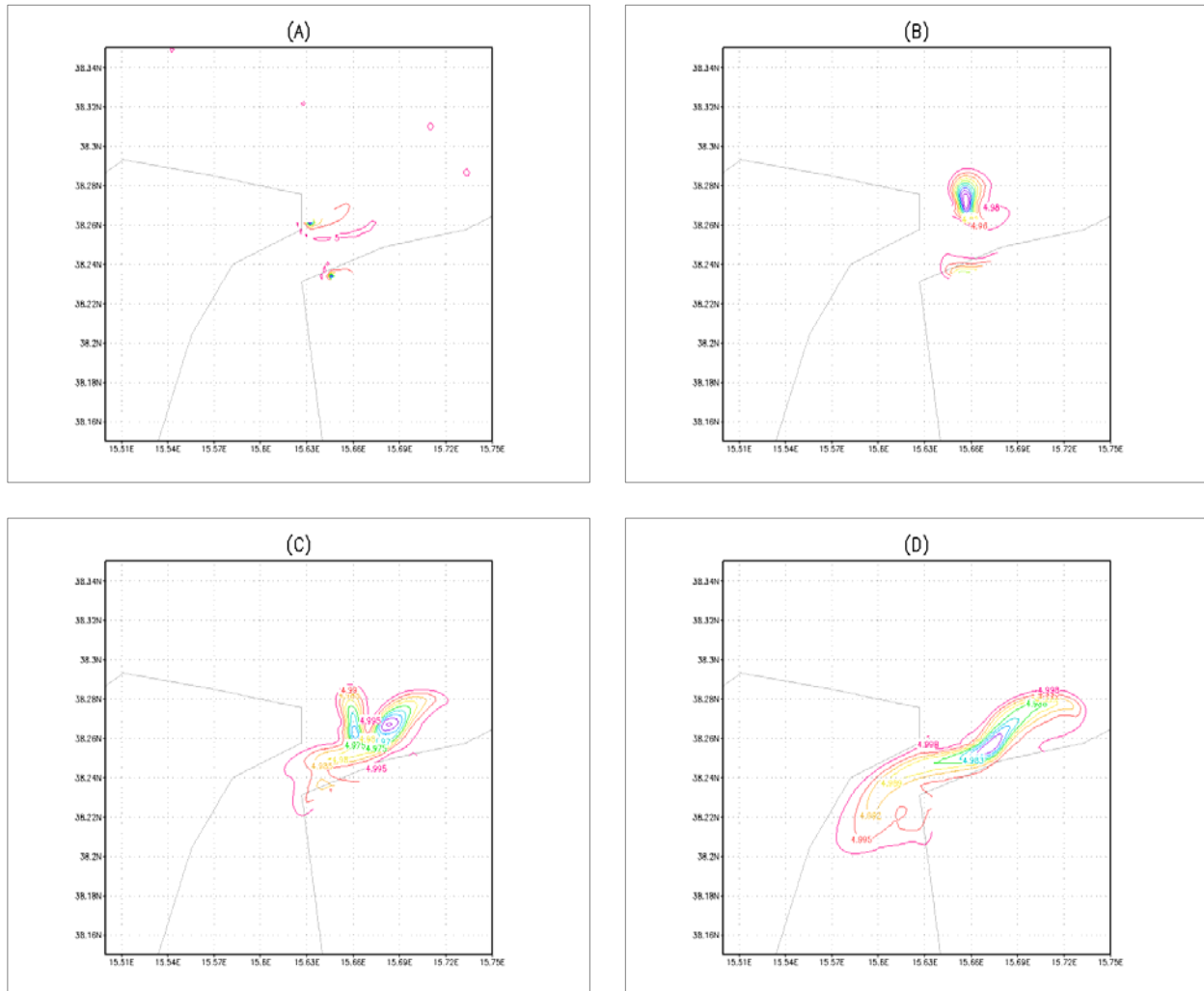
**Figura 10.** Esperimento numerico Mark 4. Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 dopo 1.5 ore (A), 3 ore (B), 4.5 ore (C) e 6 ore (D) a partire dalla condizione iniziale nell'area della soglia dello Stretto di Messina.



**Figura 11.** Evoluzione temporale dell'energia cinetica mediata sulla sezione Ganzirri - Punta Pezzo durante l'integrazione numerica (24<sup>h</sup>) a partire dalla condizione iniziale di marea montante seguita dalla marea scendente (linea continua, esperimento Mark 5.0) e marea scendente seguita da marea montante (linea tratteggiata, esperimento Mark 5.1). L'unità di misura è  $m^2 s^{-2}$  in funzione del tempo (ore). Si osservi che i picchi di massimo relativo sono sempre riferiti alla marea montante, quelli minimi alla marea scendente.

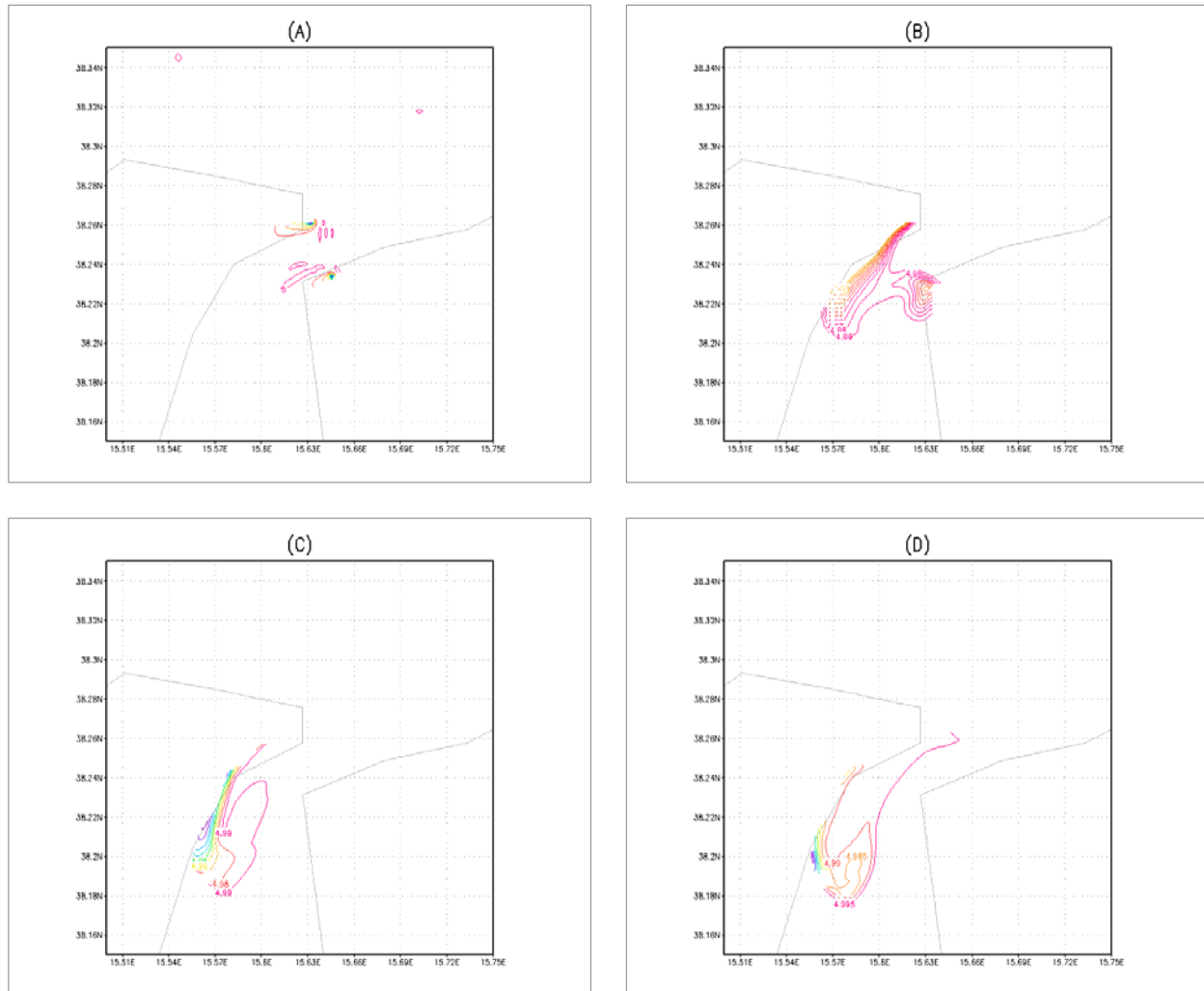


**Figura 12.** Esperimento Mark 5.0. Distribuzione del campo di velocità barotropico (sotto forma di stream lines) corrispondenti ai picchi di massima energia cinetica illustrati in figura 11 corrispondenti alle condizioni di marea montante (A) e scendente (B). Le velocità sono in  $m s^{-1}$  rappresentati dalla barra laterale a colori.

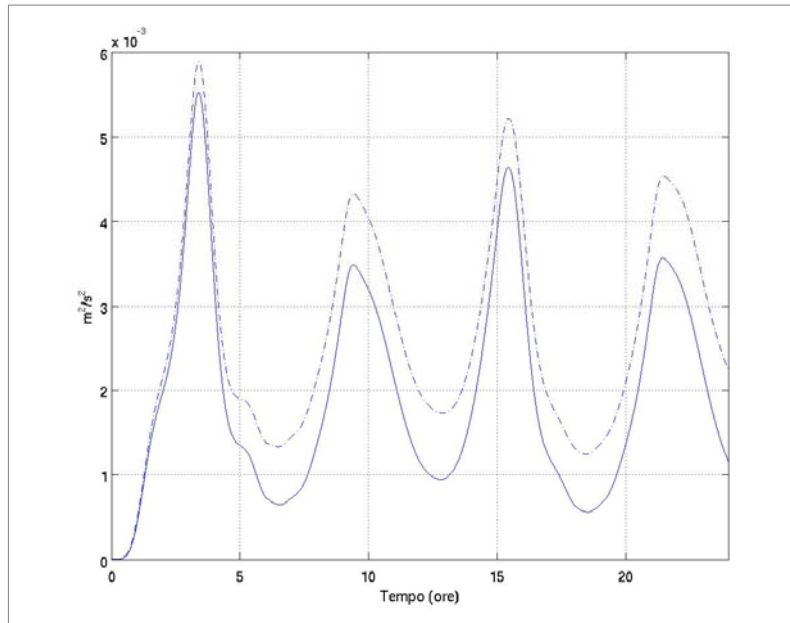


**Figura 13.** Esperimento numerico Mark 5.0. Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 a partire dalla condizione iniziale di marea montante (0-12<sup>h</sup>) seguita dalla marea scendente (12-24<sup>h</sup>) nell'area Messina dopo 3 ore (A), 6 ore (B), 9 ore (C) e 12 ore (D).

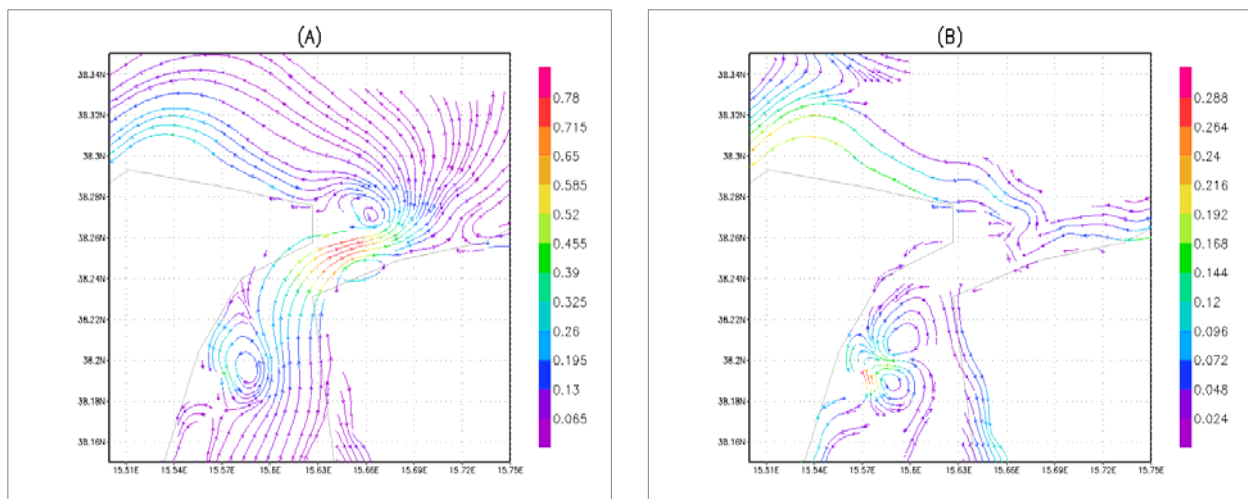




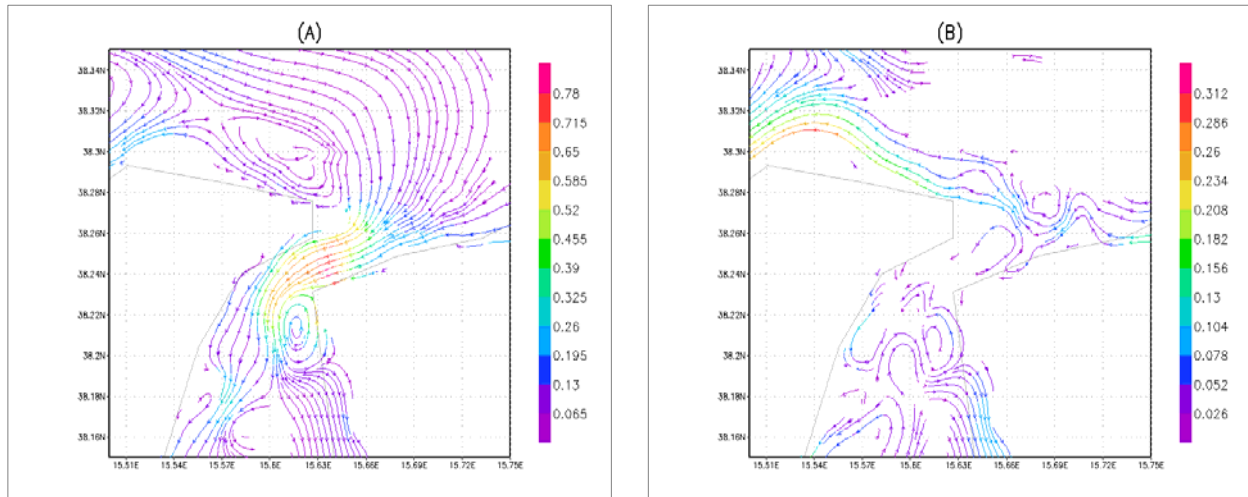
**Figura 14.** Esperimento numerico Mark 5.1. Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 a partire dalla condizione iniziale di marea scendente (0-12<sup>h</sup>) seguita dalla marea montante (12-24<sup>h</sup>) nell'area della soglia dello Stretto di Messina dopo 3 ore (A), 6 ore (B), 9 ore (C) e 12 ore (D).



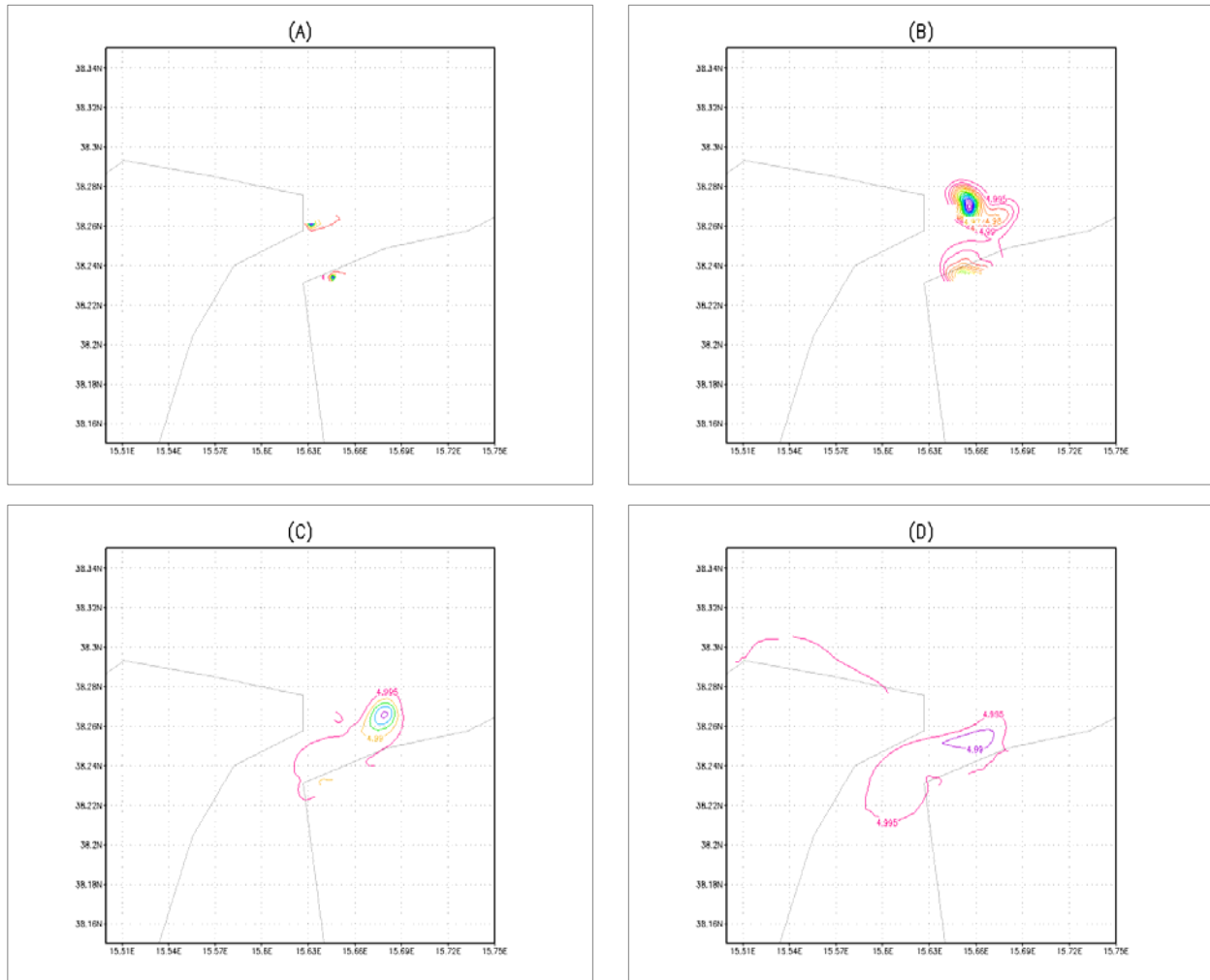
**Figura 15.** Evoluzione temporale dell'energia cinetica mediata sulla sezione Ganzirri - Punta Pezzo durante l'integrazione numerica (24<sup>h</sup>) a partire dalla condizione iniziale di marea montante seguita da marea scendente e in assenza di vento (linea continua di colore blu, esperimento Mark 5.0) e perturbata da un vento stazionario proveniente da nord-est. NE (linea tratteggiata, esperimento Mark 6.0). L'unità di misura è  $m^2 s^{-2}$  in funzione del tempo (ore).



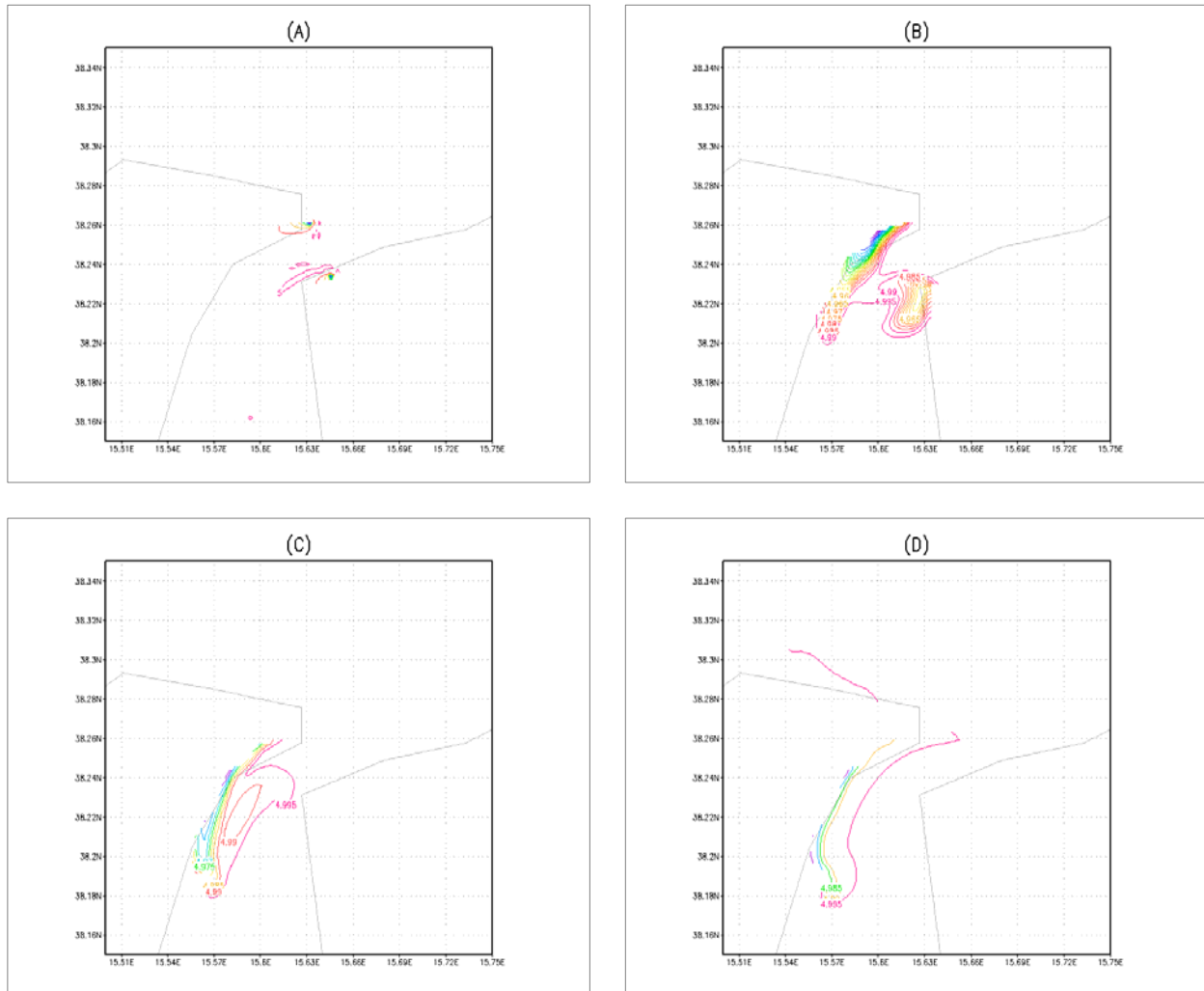
**Figura 16.** Esperimento Mark 6. Distribuzione del campo di velocità barotropica (sotto forma di stream lines) della marea montante + effetto del vento da NE alla superficie (A) e la differenza vettoriale (B) con il corrispondente campo di marea montante senza l'effetto del vento (esperimento Mark 5.0). Le velocità sono in  $m s^{-1}$  rappresentati dalla barra laterale a colori.



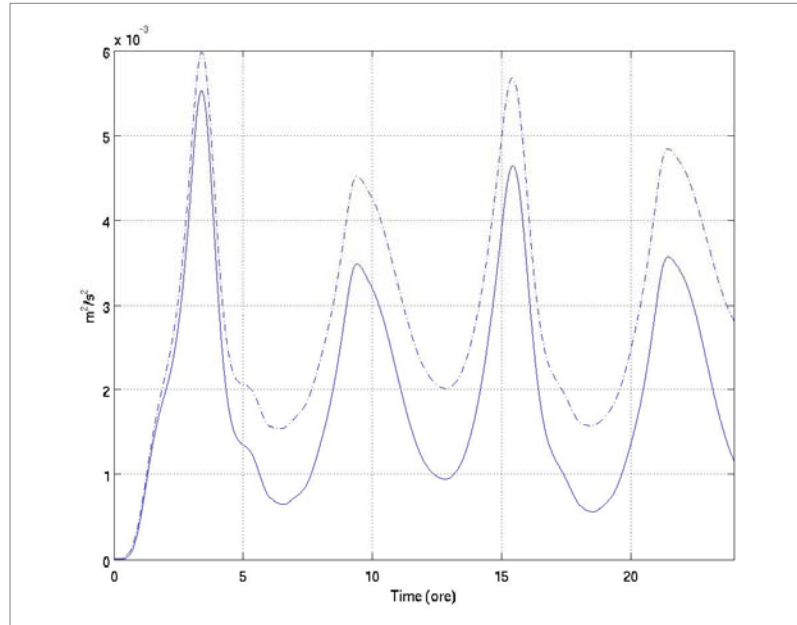
**Figura 17.** Esperimento Mark 6.1 Distribuzione del campo di velocità barotropico (sotto forma di stream lines) della marea scendente + effetto del vento da NE alla superficie (A) e la differenza vettoriale (B) con il corrispondente campo di marea montante senza l'effetto del vento (esperimento Mark 5.1). Le velocità sono in  $m s^{-1}$  rappresentati dalla barra laterale a colori.



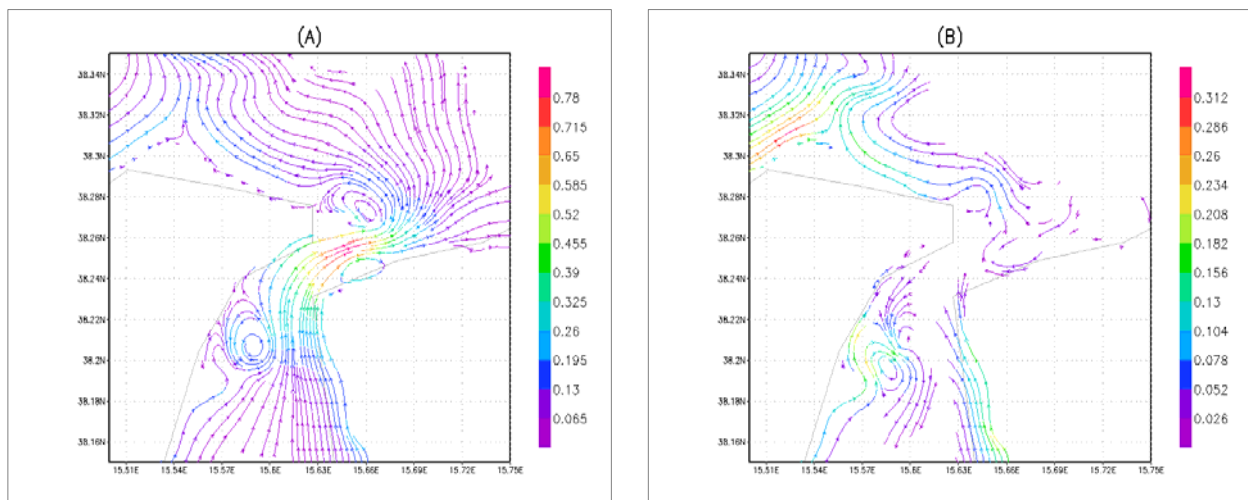
**Figura 18.** Esperimento numerico Mark 6.0 Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 a partire dalla condizione iniziale di marea montante (0-12h) seguita dalla marea scendente (12-24<sup>h</sup>) forzato da un vento stazionario da NE nell'area della soglia dello Stretto di Messina dopo 3 ore (A), 6 ore (B), 9 ore (C) e 12 ore (D).



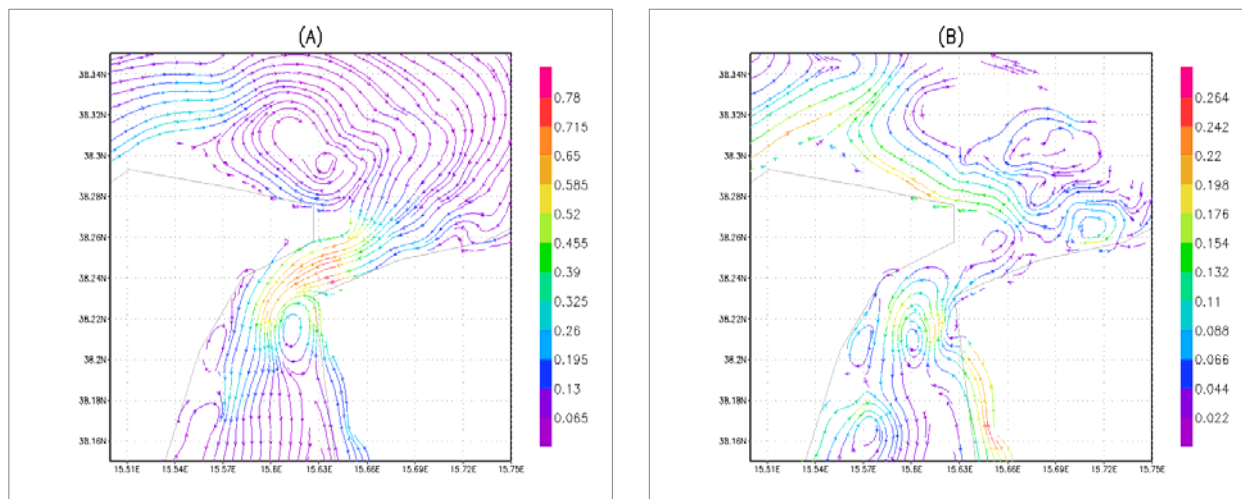
**Figura 19.** Esperimento numerico Mark 6.1 Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 a partire dalla condizione iniziale di marea scendente (0-12<sup>h</sup>) seguita dalla marea montante (12-24<sup>h</sup>) forzato da un vento stazionario da NE nell'area della soglia dello Stretto di Messina dopo 3 ore (A), 6 ore (B), 9 ore (C) e 12 ore (D).



**Figura 20.** Evoluzione temporale dell'energia cinetica mediata sulla sezione Ganzirri - Punta Pezzo durante l'integrazione numerica (24<sup>h</sup>) a partire dalla condizione iniziale di marea montante seguita dalla marea scendente e in assenza di vento (linea continua, esperimento Mark 5.0) e perturbata da un vento stazionario proveniente da SSO (linea tratteggiata, esperimento Mark 7.0). L'unità di misura è  $m^2 s^{-2}$  in funzione del tempo (ore).

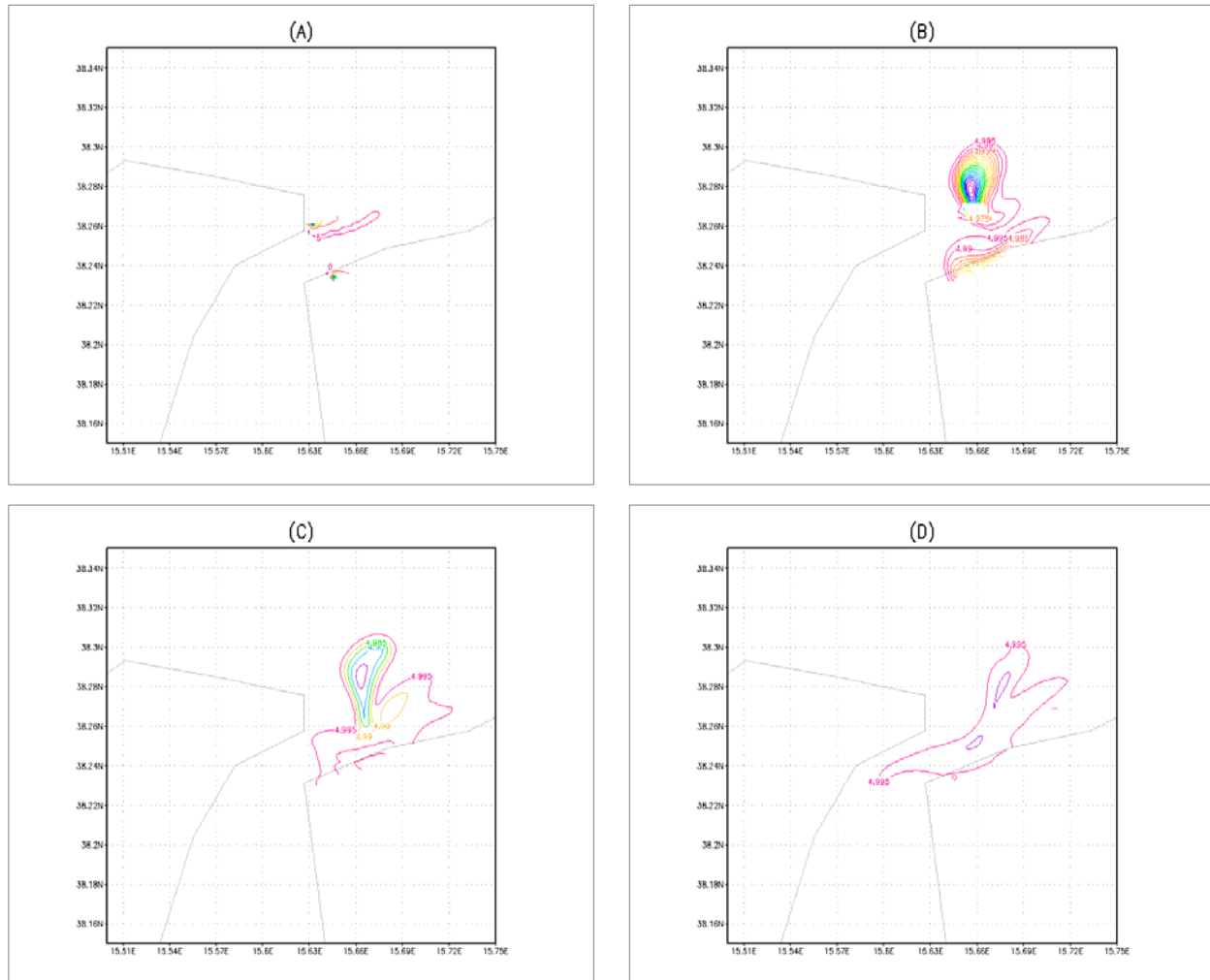


**Figura 21.** Esperimento Mark 7.0 Distribuzione del campo di velocità barotropico (sotto forma di stream lines) della marea montante + effetto del vento da SSO (A) e la differenza vettoriale (B) con il corrispondente campo di marea montante senza l'effetto del vento (esperimento Mark 5.0). Le velocità sono in  $m s^{-1}$  rappresentati dalla barra laterale a colori.

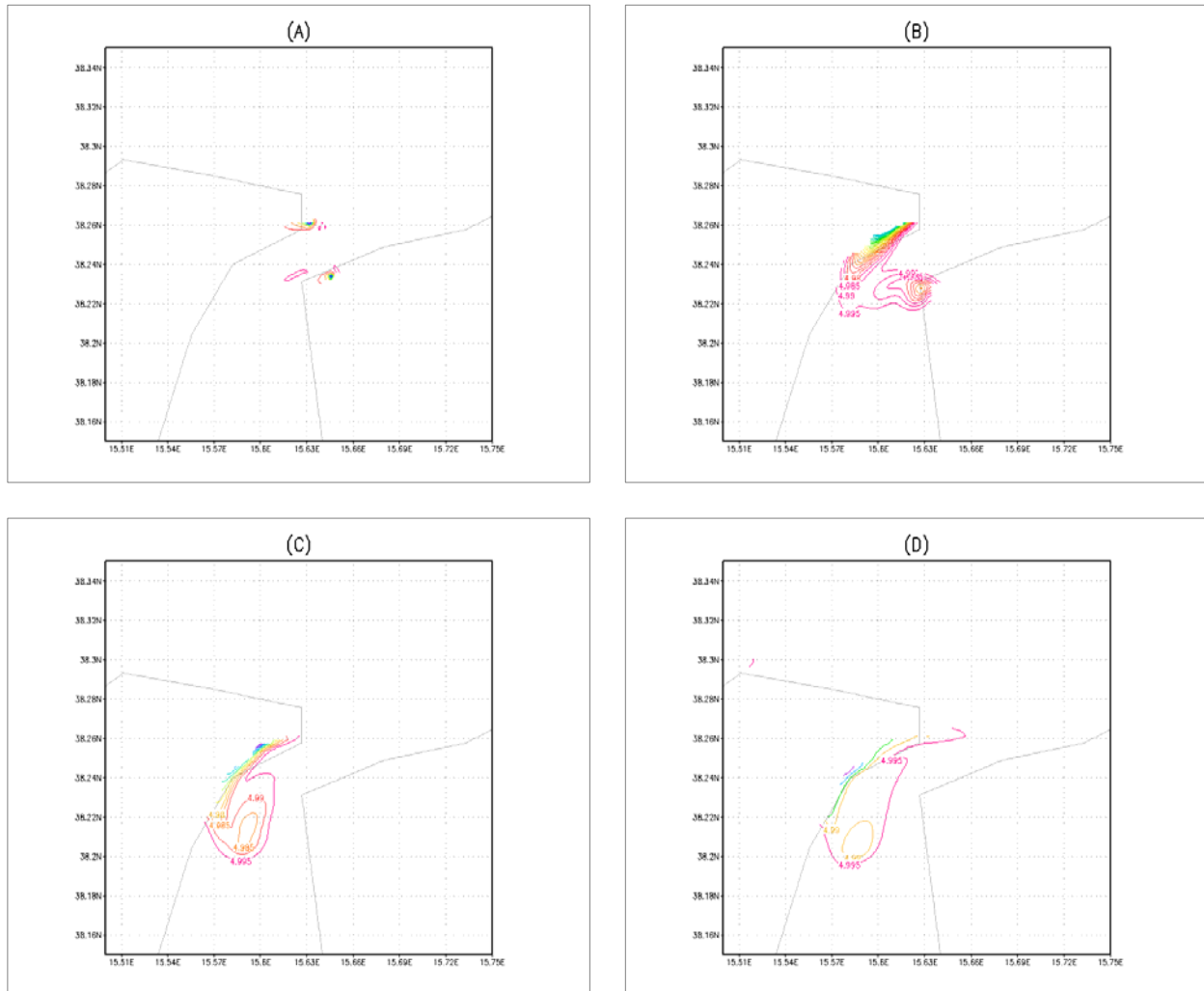


**Figura 22.** Esperimento Mark 7.1 Distribuzione del campo di velocità barotropico (sotto forma di stream lines) della marea scendente + effetto del vento da SSO alla superficie (A) e la differenza vettoriale (B) con il corrispondente campo di marea montante senza l'effetto del vento (esperimento Mark 5.1). Le velocità sono in  $m s^{-1}$  rappresentati dalla barra laterale a colori.







**Figura 23.** Esperimento numerico Mark 7.0 Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 a partire dalla condizione iniziale di marea montante (0-12<sup>h</sup>) seguita dalla mare scendente (12-24<sup>h</sup>) forzato da un vento stazionario da SSO nell'area della soglia dello Stretto di Messina dopo 3 ore (A), 6 ore (B), 9 ore (C) e 12 ore (D).



**Figura 24.** Esperimento numerico Mark 7.1 Evoluzione spazio temporale dell'anomalia di salinità rilasciata nei punti SP1 e CP1 a partire dalla condizione iniziale di marea scendente (0-12<sup>h</sup>) seguita dalla marea montante (12-24<sup>h</sup>) forzato da un vento stazionario da SSO nell'area della soglia dello Stretto di Messina dopo 3 ore (A), 6 ore (B), 9 ore (C) e 12 ore (D).

		<b>Ponte sullo Stretto di Messina</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b>		
RISPOSTA INTEGRAZIONE LATO CALABRIA ID29		<i>Codice</i> VIAC029_F1	<i>Rev</i> F1	<i>Data</i> 30/05/2012

## Bibliografia

Defant A. (1940) Scilla e Cariddi e le correnti di marea nello Stretto di Messina. Geofis. Pura Appl., 2: 93-112.

De Domenico E. (1987). Caratteristiche fisiche e chimiche delle acque nello Stretto di Messina. In: Le Detroit de Messine, Evolution Tectono-Sedimentaire Recente (Pliocene et Quaternaire) et Enviroment Actuel; di Geronimo, Barrier, Mantenat (es.s), Paris, DOC. ET TRAV. IGAL, 11: 225-235.

Fazio N. (2011). Con lo Stretto nel Cuore. Articolo pubblicato su [www.Baiadigrotta.it](http://www.Baiadigrotta.it).

Giacobbe S., Spanò N. (2001) The Pilumnus inermis species in the Southern Tyrrhenian Sea and Straits of Messina (Central Mediterranean): distribution and ecology. Crustaceana, 74(7): 659-672.

Longo F. (1882) Il Canale di Messina e le sue correnti, con appendice sui pesci che lo popolano. Messina.

Mosetti F. (1988). Some news on the Currents in the Straits of Messina. Boll. Oceanol. Teor. Appli., 6(3): pp. 119-201.

Ribaud P (1884). Trattato teorico, pratico e storico sulle correnti ed altre particolarità e sui fenomeni che hanno luogo nel Canale di Messina, Napoli.

Sorgente R., A. F. Drago and A. Ribotti. A., (2003). Seasonal variability in the Central Mediterranean Sea Circulation, Annales Geophysicae, European Geophysical Society, Vol. 21: pp. 299-322.

Vercelli F (1925). Crociere per lo studio dei fenomeni dello Stretto di Messina. I. Il regime delle correnti e delle maree nello Stretto di Messina. Commissione Internazionale del Mediterraneo, Off. Grafiche Ferrari, Venezia, 209 pp.