

# Ricerca di Sistema elettrico



Previsione ad alta risoluzione della circolazione per il sito di  
Pantelleria

M. Palma, A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino



## Titolo completo del report Previsione ad alta risoluzione della circolazione per il sito di Pantelleria

M. Palma, A. Carillo, E. Lombardi, G. Sannino

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti

Linea di attività: LA1.2

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino, (ENEA)

Responsabile del Work Package: Gianmaria Sannino (ENEA)

Mese inizio previsto: luglio 2023

Mese inizio effettivo: luglio 2023

Mese fine previsto: dicembre 2024

Mese fine effettivo: dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

## Indice

1	INTRODUZIONE.....	4
2	MODELLISTICA NUMERICA .....	5
2.1	Codice utilizzato: il MIT General Circulation Model .....	5
2.1.1	Equazioni in coordinate "R" .....	5
2.1.2	Capacità di non-idrostaticità.....	7
2.1.3	Discretizzazione temporale .....	8
2.1.4	Discretizzazione spaziale .....	9
2.2	Il MITgcm in applicazioni costiere.....	9
2.3	Parametrizzazioni e schemi di turbolenza .....	11
3	CONFIGURAZIONE DEL MITGCM PER LA SIMULAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE ATTORNO L'ISOLA DI PANTELLERIA.....	13
3.1	Griglia, batimetria e condizioni iniziali .....	13
3.2	Condizioni al bordo .....	18
4	SIMULAZIONI E RISULTATI .....	19
4.1	Circolazione superficiale .....	19
4.2	Trasporti .....	21
4.3	Temperatura e salinità superficiale .....	23
4.4	Operativo .....	25
5	CONCLUSIONI.....	26
6	BIBLIOGRAFIA .....	27

## Indice delle figure

Figure 1: Sfalsamento tridimensionale delle componenti di velocità (Adcroft et al. 2004) .....	9
Figure 2: Schematizzazione delle griglie computazionali. In rosso la griglia del modello MITO, in blu la griglia del modello MITO HR PANT; a destra uno zoom. ....	14
Figure 3: Griglia computazionale dei 2 modelli: A) MITO; B) MITO HR PANT.....	15
Figure 4: Batimetria dell'area geografica di Pantelleria. A) modello MITO, B) alta risoluzione ..	15
Figure 5: Batimetria "mista, utilizzata dal modello MITO HR PANT. Integra i dati a bassa risoluzione (sui bordi) con quelli ad alta risoluzione .....	16
Figure 6: Campo di velocità del 2 settembre 2024 alle ore 00:00. Inizio simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra .....	20
Figure 7: Campo di velocità del 10 settembre 2024 alle ore 00:00. Fine simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra .....	20
Figure 8: Serie temporale del trasporto netto al bordo ovest. Modello MITO a sinistra; modello MITO HR PANT a destra .....	22
Figure 9: Serie temporale del trasporto netto al bordo est. Modello MITO a sinistra; modello MITO HR PANT a destra .....	22
Figure 10: Campo di temperatura del 2 settembre 2024 alle ore 00:00. Inizio simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra.....	23
Figure 11: Campo di temperatura del 10 settembre 2024 alle ore 00:00. Fine simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra.....	24
Figure 12: Campo di salinità del 2 settembre 2024 alle ore 00:00. Inizio simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra .....	24
Figure 13: Campo di salinità del 10 settembre 2024 alle ore 00:00. Fine simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra .....	25

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Parametri schemi di turbolenza.....	19
---	----

# 1 INTRODUZIONE

In questo documento si descrivono le attività della linea LA1.2 dell'Accordo di Programma MASE-ENEA, finalizzate all'implementazione e alla validazione di un sistema operativo per la previsione della circolazione attorno l'isola di Pantelleria.

Il progetto si colloca nell'ambito delle iniziative per lo sviluppo di tecnologie rinnovabili marine, con particolare attenzione alla conversione dell'energia del moto ondoso in energia elettrica tramite il Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC) (Pozzi et al., 2018). L'isola di Pantelleria è stata scelta come sito pilota per l'installazione di questo dispositivo innovativo, progettato per ottimizzare la produzione di energia dalle onde, sfruttando le condizioni specifiche del Mediterraneo. A differenza degli oceani, il Mediterraneo è caratterizzato da onde meno potenti ma più frequenti, rendendo necessaria una tecnologia specificamente progettata per massimizzare l'energia disponibile in queste condizioni.

Nel deliverable precedente (Iacono et al., 2020), le simulazioni della circolazione marina attorno a Pantelleria si sono basate sul modello di previsione operativa del bacino mediterraneo (scala regionale), denominato MITO, dell'ENEA. Sebbene questo modello possa fornire condizioni al contorno fondamentali per le simulazioni locali, la sua risoluzione (ordine di chilometri) non è sufficiente per catturare le dinamiche oceaniche più fini, cruciali per l'ottimizzazione dell'ancoraggio del PeWEC. In particolare, la complessità della batimetria e la presenza di vortici richiedono una rappresentazione più dettagliata delle correnti per assicurare il corretto posizionamento del dispositivo.

Le simulazioni numeriche ad alta risoluzione sono essenziali per lo studio di fenomeni oceanici complessi, specialmente in aree costiere e insulari. I modelli regionali, anche con risoluzione al di sotto dei 10km, spesso non riescono a catturare le strutture idrodinamiche più piccole, come i vortici e i flussi turbolenti locali, che possono avere un impatto significativo sulla distribuzione dell'energia. A Pantelleria l'uso di una risoluzione spaziale di circa 500 metri consente di rappresentare con maggiore precisione i processi di circolazione e mescolamento verticale, che sono cruciali per la progettazione e il funzionamento di dispositivi di energia marina come il PeWEC (Giorgi, Cervelli 2023).

Il PeWEC, sviluppato dal Politecnico di Torino e dall'ENEA, è un dispositivo che sfrutta il movimento di un pendolo all'interno di un guscio galleggiante per trasformare l'energia delle onde in energia elettrica. L'efficacia del PeWEC dipende fortemente dalla conoscenza dettagliata delle condizioni marine locali, incluse le correnti e la batimetria, quindi per il suo ancoraggio nei pressi dell'isola di Pantelleria, le simulazioni numeriche ad alta risoluzione sono essenziali per identificare le aree con il miglior potenziale energetico.

Nel corso degli ultimi 3 semestri è stato realizzato il modello ad alta risoluzione della circolazione attorno all'isola di Pantelleria, che chiameremo "MITO HR PANT", basato sul codice MITgcm. Nel primo semestre sono state costruite la griglia computazionale, le condizioni iniziali e le condizioni al bordo per la simulazione numerica, con una risoluzione orizzontale di circa 500 metri. Partendo dai dati batimetrici del database EmodNet, opportunamente interpolati, è stata costruita la batimetria per il modello ad alta risoluzione. I campi iniziali e le condizioni laterali sono stati derivati dai campi tridimensionali (temperatura, salinità, e componenti U e V della velocità) prodotti dal modello operativo MITO con risoluzione di 2,5 km.

Nel secondo semestre sono stati eseguiti test per definire i settaggi dei parametri del modello, al fine di ottimizzare la propagazione delle condizioni laterali ricavate dal modello operativo

MITO all'interno del dominio a più alta risoluzione. Le attività si sono concentrate sulla calibrazione dei parametri relativi alla definizione dello "sponge layer", con l'obiettivo di evitare riflessioni e stabilizzare il flusso ai confini aperti del dominio.

Nel terzo semestre si è proceduto con l'effettuare le simulazioni numeriche, la loro analisi e con il rendere operativo il nuovo modello sviluppato.

## 2 MODELLISTICA NUMERICA

### 2.1 Codice utilizzato: il MIT General Circulation Model

In questo paragrafo viene descritto il MIT General Circulation Model.

Il MIT General Circulation Model (MITgcm) è un modello numerico progettato per lo studio dell'atmosfera, degli oceani e del clima. Sviluppato presso il Massachusetts Institute of Technology, risolve le equazioni del moto che governano l'oceano o l'atmosfera terrestre utilizzando il metodo dei volumi finiti ed è stato uno dei primi modelli non idrostatici dell'oceano. La sua formulazione non idrostatica gli consente di simulare fenomeni fluidi su un'ampia gamma di scale (Adcroft et al., 2004).

Il MITgcm presenta una serie di aspetti inediti:

- può essere utilizzato per studiare sia i fenomeni atmosferici che quelli oceanici; un unico kernel idrodinamico viene utilizzato per far avanzare sia i modelli atmosferici che quelli oceanici
- ha una capacità non idrodinamica e quindi può essere utilizzato per studiare processi sia su piccola che su grande scala
- vengono impiegate tecniche di volume finito che consentono una discretizzazione intuitiva e supportano il trattamento di geometrie irregolari utilizzando griglie curvilinee ortogonali.
- il modello è stato sviluppato per funzionare in modo efficiente su un'ampia gamma di piattaforme computazionali.

#### 2.1.1 Equazioni in coordinate "R"

Per avere un unico kernel idrodinamico sono stati sfruttati gli "isomorfismi" tra gli insiemi di equazioni che governano l'evoluzione dei rispettivi fluidi.

Le variabili del modello hanno interpretazioni diverse a seconda che si studi l'atmosfera o l'oceano. Così, ad esempio, la coordinata verticale "r" è interpretata come pressione,  $p$ , se si modella l'atmosfera e come altezza,  $z$ , se si modella l'oceano (Adcroft et al., 2004).

Lo stato del fluido in qualsiasi momento è caratterizzato dalla distribuzione della velocità  $\vec{v}$ , dai traccianti attivi  $\theta$  e  $S$ , da un "geopotenziale"  $\Phi$  e dalla densità  $\rho = \rho(\theta, S, p)$  che può dipendere da  $\theta$ ,  $S$  e  $p$ . Le equazioni che governano l'evoluzione di questi campi, ottenute applicando le leggi della meccanica classica e della termodinamica a un fluido di Boussinesq e Navier-Stokes, sono scritte in termini di una generica coordinata verticale,  $r$ , in modo da poter applicare isomorficamente le condizioni al contorno cinematiche appropriate:

$$\frac{D\vec{V}h}{Dt} + (2\vec{\Omega} \times \vec{V})h + \nabla h\Phi = \mathcal{F}\vec{v}_h \quad \text{orizzontale}$$

$$\frac{D\dot{r}}{Dt} + \hat{k} \cdot (2\vec{\Omega} \times \vec{V}) + \frac{\partial\Phi}{\partial r} + b = \mathcal{F}\dot{r} \quad \text{verticale}$$

$$\nabla h \cdot \vec{V}h + \frac{\partial\dot{r}}{\partial r} = 0 \quad \text{continuità}$$

$$b = b(\theta, S, r) \quad \text{equazione di stato}$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = Q\theta \quad \text{temperatura potenziale}$$

$$\frac{DS}{Dt} = QS \quad \text{umidità/salinità}$$

Nell'oceano:

$$r = z \quad \text{è la profondità}$$

$$\dot{r} = \frac{Dz}{Dt} = w \quad \text{è la velocità verticale}$$

$$\Phi = p/\rho_c \quad \text{è la pressione}$$

$$b(\theta, S, r) = \frac{g}{\rho_c} (\rho(\theta, S, r) - \rho_c) \quad \text{è il galleggiamento}$$

dove  $\rho_c$  è una densità di riferimento fissa dell'acqua e  $g$  è l'accelerazione dovuta alla gravità.

In questo caso:

$$\text{Sul fondo dell'oceano: } R_{fixed}(x, y) = -H(x, y).$$

$$\text{La superficie dell'oceano è data da: } R_{moving} = \eta$$

$$\text{La posizione della superficie libera a riposo dell'oceano è data da } R_0 = Z_0 = 0$$

Le condizioni al contorno sono:

$$w = 0 \quad \text{at } r = R_{fixed} \quad (\text{fondo})$$

$$w = \frac{D\eta}{Dt} \quad \text{at } r = R_{moving} = \eta \quad (\text{superficie})$$

dove  $\eta$  è l'altezza della superficie libera.

## 2.1.2 Capacità di non-idrostaticità

La pressione,  $P$ , nell'oceano può essere suddivisa in tre diverse componenti:

$$P(x, z, t) = P_\eta(x, t) + P_{int}(x, z, t) + P_{nh}(x, z, t)$$

dove  $P_\eta = g\rho_0\eta(x, t)$  rappresenta la pressione dovuta all'elevazione della superficie,

$P_{int} = \int_z^0 \rho(x, z', t) dz'$  la pressione interna e  $P_{nh}$  la pressione non idrostatica generata dai movimenti interni del fluido.

L'approssimazione idrostatica è considerata dogmatica da molti scienziati negli studi su larga scala (Marshall et al., 1997). Con questa semplificazione si assume un equilibrio esatto tra il gradiente di pressione verticale e la forza gravitazionale (Kantha et al., 2000),

$$0 = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\rho}{\rho_0} g$$

L'ipotesi idrostatica è valida quando la scala di lunghezza verticale è molto più breve di quella orizzontale ( $H/L \ll 1$ ) e il numero di Froude ( $Fr = U/NH$ ) è piccolo ( $\ll 1$ ). In (Marshall et al, 1997) è stato suggerito il parametro non idrostatico:

$$n_{nh} = \frac{\Upsilon^2}{Ri}$$

dove  $\Upsilon = h/L$  e  $Ri = \frac{N^2 h^2}{U^2}$  rappresenta il numero di Richardson. Le scale di lunghezza orizzontale e verticale sono rappresentate da  $h$  e  $L$  rispettivamente. La frequenza di Brunt-Vaisala è data da  $N^2$ . Il flusso può essere considerato idrostatico quando:

$$n_{nh} \ll 1$$

Nei casi in cui l'ipotesi idrostatica non è più valida, la pressione deve essere trovata dall'equazione del momento verticale completa.

A causa dei costi computazionali, la correzione della pressione non idrostatica deve essere inclusa solo nei casi in cui gli effetti della pressione non idrostatica sono importanti e la risoluzione è sufficientemente alta per risolvere tali processi.

### 2.1.3 Discretizzazione temporale

Le equazioni del moto integrate dal modello coinvolgono quattro equazioni prognostiche per il flusso,  $u$  e  $v$ , la temperatura,  $\theta$ , e il sale/umidità,  $S$ , e tre equazioni diagnostiche per il flusso verticale,  $w$ , la densità/galleggiamento,  $\rho/b$ , e la pressione/geopotenziale,  $\phi_{hyd}$ . Inoltre, la pressione o l'altezza superficiale possono essere descritte da un'equazione prognostica o diagnostica e, se sono inclusi termini non idrostatici, viene risolta anche un'equazione diagnostica per la pressione non idrostatica. La combinazione di equazioni prognostiche e diagnostiche richiede un algoritmo di modello che possa far avanzare le variabili prognostiche soddisfacendo i vincoli imposti dalle equazioni diagnostiche (Adcroft et al., 2004).

Le formulazioni di base sono:

1. il metodo semi-implicito della pressione per equazioni idrostatiche con un "rigid-lid" con time-stepping di Adams-Bashforth,
2. come 1. ma con una superficie libera lineare implicita,
3. come 1. o 2. ma con variabili sfalsate nel tempo,
4. come 1. o 2. ma con termini non idrostatici inclusi,
5. come 2. o 3. ma con superficie libera non lineare.

In tutte le configurazioni sopra descritte è possibile sostituire lo schema di Adams-Bashforth con uno schema alternativo di time-stepping per i termini valutati esplicitamente nel tempo.

Lo schema di Adams-Bashforth è un metodo del quasi secondo ordine per tutti i termini espliciti delle equazioni della quantità di moto e del tracciante. Questa è ancora la modalità di funzionamento predefinita, ma è ora possibile utilizzare schemi alternativi per i traccianti (Adcroft et al., 2004).

Uno schema esplicito può essere descritto come:

$$\tau^* = \tau^n + \Delta t G_\tau^{(n+\frac{1}{2})}$$

dove  $\tau$  può essere una qualsiasi variabile prognostica ( $u$ ,  $v$ ,  $\theta$  o  $S$ ) e  $\tau^*$  è una stima esplicita di  $\tau^{n+1}$  e sarebbe esatta se non fosse per i termini impliciti nel tempo. La parentesi su  $n+1/2$  indica che il termine è esplicito ed estrapolato in avanti nel tempo e per questo si utilizza il metodo di Adams-Bashforth del quasi secondo ordine:

$$G_\tau^{(n+\frac{1}{2})} = \left(\frac{3}{2} + \varepsilon_{AB}\right) G_\tau^n - \left(\frac{1}{2} + \varepsilon_{AB}\right) G_\tau^{n-1}$$

Si tratta di un'estrapolazione lineare, in avanti nel tempo, a  $t = (n + 1/2 + \varepsilon_{AB})\Delta t$ . Un'estrapolazione al punto medio del tempo,  $t = (n + 1/2)\Delta t$ , corrispondente a  $\varepsilon_{AB} = 0$ , sarebbe accurata al secondo ordine ma è debolmente instabile per i termini oscillatori. Un valore piccolo ma finito per  $\varepsilon_{AB}$  stabilizza il metodo (Adcroft et al., 2004).

### 2.1.4 Discretizzazione spaziale

La discretizzazione spaziale viene effettuata con il metodo dei volumi finiti. Questo metodo equivale a un metodo a punti di griglia (ovvero differenza finita centrata del secondo ordine) all'interno del fluido, ma consente ai confini di intersecare una griglia regolare, permettendo una rappresentazione più accurata della posizione del confine (Adcroft et al., 2004). Le componenti del flusso sono sfalsate nello spazio sotto forma di una griglia Arakawa C. La fig. 1 mostra le componenti del flusso (u,v,w) sfalsate nello spazio in modo tale che la componente zonale cada sull'interfaccia tra le celle di continuità in direzione zonale. Analogamente, per le direzioni meridionali e verticali. La cella di continuità è sinonimo di cella tracciante.

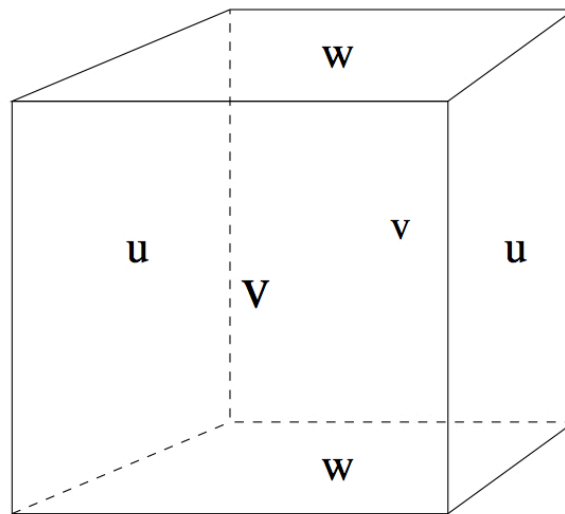


Figure 1: Sfalsamento tridimensionale delle componenti di velocità (Adcroft et al. 2004)

## 2.2 Il MITgcm in applicazioni costiere

I modelli numerici oceanici sono oggi ampiamente utilizzati negli studi scientifici di base, negli studi sul clima, nell'ingegneria e nella gestione delle risorse marine (Berntsen et al., 2009). La maggior parte delle simulazioni viene attualmente effettuata con modelli idrostatici. L'ipotesi idrostatica semplifica notevolmente i calcoli numerici e ha facilitato numerosi ed interessanti studi sul flusso oceanico (Berntsen et al., 2009).

L'aumento della risoluzione spaziale e temporale sembra essere una strada ovvia per ottenere simulazioni più accurate nelle applicazioni costiere. Tuttavia, l'aumento della risoluzione comporta delle penalizzazioni: ad esempio, il costo di gestione di un modello a più alta risoluzione può aumentare di diversi ordini di grandezza, perché se la risoluzione in 1-D è raddoppiata, la risoluzione in 2-D è pari a  $2^2$ , inoltre di solito si verifica una riduzione correlata del passo temporale che può portare a un aumento di un ordine di grandezza del tempo di esecuzione del modello per lo stesso periodo di tempo reale (Bricheno et al., 2013).

Poiché la risoluzione orizzontale dei modelli oceanici viene gradualmente affinata con l'aumento della potenza dei computer, la validità dell'ipotesi idrostatica può diventare discutibile, a seconda dei problemi affrontati e delle dimensioni della griglia utilizzata. I modelli oceanici non idrostatici sono quindi utilizzati in molti studi recenti (Berntsen et al., 2009).

In questo paragrafo, si esaminano alcune applicazioni costiere del MITgcm; in questi studi viene applicata un'ampia gamma di dimensioni della griglia, in orizzontale e in verticale, e schemi di chiusura su scala di sotto griglia.

In *"Horizontal dispersion in shelf seas: High resolution modelling as an aid to sparse sampling (Stashchuk et al., 2014)"* viene esaminata la capacità di un modello idrodinamico di riprodurre i risultati di un esperimento di rilascio di colorante condotto in un ampio ambiente di piattaforma marina. Il dominio del modello è approssimato da una griglia 595 X 491 con una risoluzione orizzontale di 50 m in entrambe le direzioni zonale e meridionale. Oltre alla parte centrale del dominio, sono stati aggiunti 386 punti alla griglia del modello ai confini settentrionale, meridionale, occidentale e orientale, trasformandola in una griglia 1383 X 1279. Il passo verticale della griglia  $\Delta z$  è pari a 5 m nello strato superficiale superiore, di 40 m e al di sotto di esso  $\Delta z$  è aumentato a 10 m.

In *"High-resolution modelling of a large-scale river plume (Vlasenko et al., 2013)"* viene studiata l'evoluzione di un pennacchio fluviale su larga scala. I parametri del modello sono stati impostati vicino a quelli osservati nell'area della foce del fiume Columbia. Il dominio del modello rappresenta un'area di 27,5 km in direzione nord-sud e 23,7 km in direzione ovest-est. Contiene  $950 \times 1.100$  punti griglia con passo orizzontale  $\Delta x = \Delta y = 25$  m. Sono stati aggiunti altri 50 punti di griglia nelle direzioni nord, sud e ovest, con un passo di griglia che aumenta fino a 4.000 m. In direzione verticale, il passo di griglia varia da una risoluzione di 1 m vicino alla superficie a 10 m negli strati inferiori.

In *"Three-dimensional simulation of NLIW generation, propagation and breaking in Cayuga Lake (Boegman et al., 2011)"*, il MITgcm 3D non idrostatico viene applicato per simulare la dinamica delle onde interne non lineari (NLIW) nel lago Cayuga (NY). Ciò consente una simulazione ad alta risoluzione (20 m x 20 m x 0,5 m) in un dominio chiuso ad alto numero di Reynolds ( $Re \sim 105$ ).

In *"On the importance of non-hydrostatic processes in determining tidally induced mixing in sill regions (Xing et al., 2007)"* viene esaminata l'importanza di utilizzare un modello non idrostatico per calcolare il mescolamento e il flusso indotto dalle maree nella regione di una "sill", utilizzando una topografia idealizzata che rappresenta la "sill" all'ingresso di Loch Etive. Questo sito è stato scelto perché recentemente sono state effettuate misurazioni dettagliate. I calcoli vengono eseguiti con e senza l'inclusione di dinamiche non idrostatiche. Utilizzando griglie fini di 10 m in orizzontale e 1 m in verticale, è possibile utilizzare valori minimi di diffusività, ossia  $K_v = K_h = 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  and viscosity  $A_v = 10^{-3}$ ,  $A_h = 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . In questo modo è possibile risolvere in parte i processi su piccola scala che contribuiscono al mescolamento e determinare le regioni in cui può verificarsi un intenso mescolamento, identificate in termini di numero critico di Richardson.

In *"Subaqueous melting of Store Glacier, west Greenland from three-dimensional, high-resolution numerical modeling and ocean observations (Xu et al., 2013)"* vengono presentate simulazioni tridimensionali ad alta risoluzione della fusione del ghiaccio presso la parete di distacco dello Store Glacier, un ghiacciaio nella Groenlandia occidentale. Gli autori confrontano la fusione del ghiaccio simulata con una stima derivata dai dati oceanografici. Le simulazioni mostrano una risalita turbolenta ed una diffusione del pennacchio carico di acqua dolce lungo la parete di ghiaccio e una vigorosa fusione del ghiaccio a tassi di metri al giorno. Il dominio del modello è una rappresentazione semplificata del fiordo dello Store Glacier. È stata utilizzata una spaziatura della griglia orizzontale e verticale di 1 m in prossimità del fronte di ghiaccio, aumentando gradualmente la spaziatura della griglia orizzontale fino a 5 m in direzione x al confine con l'oceano aperto.

## 2.3 Parametrizzazioni e schemi di turbolenza

Nei modelli numerici di dinamica dei fluidi geofisici, come l'oceano o l'atmosfera, l'altissima risoluzione spaziale, come detto, è spesso limitata, in quanto si andrebbe a gravare sui costi computazionali e dunque non è possibile risolvere tutte le fluttuazioni turbolente. Di conseguenza la turbolenza a piccole scale viene trattata con tecniche di parametrizzazione "subgrid-scale" (di sotto-griglia). La Eddy viscosity rappresenta un approccio per modellare il mescolamento e la dissipazione delle piccole scale non risolte. Questa concettualizzazione è stata proposta per la prima volta da Joseph Boussinesq nel XIX secolo, e permette di sostituire la viscosità molecolare con una molto maggiore, basata sulle caratteristiche della turbolenza e della griglia.

Il concetto di Eddy viscosity si fonda sull'idea che i moti turbolenti, pur non essendo risolti a livello della griglia del modello, abbiano un effetto netto simile a quello di una viscosità aggiuntiva, o super-viscosità. Questo approccio riconosce che le proprietà turbolente del flusso possono variare significativamente tra direzione orizzontale e verticale. Di conseguenza, nei modelli di fluidodinamica geofisica, vengono spesso applicati coefficienti di Eddy viscosity distinti per la direzione orizzontale e verticale:  $A$  per l'orizzontale e  $V$  per il verticale, con la viscosità orizzontale solitamente molto più grande, poiché i moti turbolenti orizzontali coprono distanze maggiori (McWilliams 2006).

Un importante sviluppo della parametrizzazione della Eddy viscosity è dato dai modelli di turbolenza a piccola scala, come la formulazione di Smagorinsky (1963), che regola la viscosità in base alla deformazione del flusso, o l'approccio di Leith (1968, 1996), che si concentra sulla cascata di enstrofia nella turbolenza bidimensionale. Questi modelli sono fondamentali per simulare correttamente il mescolamento turbolento e gli scambi di quantità di moto e calore nei modelli oceanici e atmosferici.

L'implementazione di questi schemi di viscosità in modelli come il MITgcm consente di rappresentare i processi dissipativi che influenzano il flusso a scale più piccole, migliorando l'accuratezza delle simulazioni e permettendo di affrontare fenomeni complessi come il mescolamento turbolento o la generazione di vortici.

Gli utenti del MITgcm possono scegliere tra diverse parametrizzazioni, tra cui: "Eddy Viscosity limitata al numero di Reynolds", 'Viscosità Smagorinsky' e 'Viscosità Leith'; in questo lavoro è stata scelta l'ultima.

### *Schema di viscosità orizzontale: Leith Viscosity*

Leith (1996) trova un'alternativa alla viscosità di Smagorinsky concentrandosi sulla risoluzione della cascata di enstrofia diretta nella turbolenza 2D piuttosto che sulla cascata di energia diretta nella turbolenza 3D (Fox-Kemper 2008).

Leith (1968, 1996) osserva che la turbolenza bidimensionale è molto diversa da quella tridimensionale. Nella turbolenza bidimensionale, l'energia si sposta a cascata su scale più grandi, quindi non ci si preoccupa di risolvere le scale di dissipazione dell'energia. Invece, un'altra quantità, l'enstrofia (che è la componente verticale della vorticità al quadrato) si conserva nella turbolenza 2-d e va a cascata su scale più piccole dove viene dissipata.

Seguendo un'argomentazione simile a quella di Smagorinsky sul flusso di energia, il flusso di enstrofia è stimato pari al tasso di dissipazione dell'enstrofia su scala di griglia.

Dall'analisi dimensionale, la scala di enstrofia-dissipazione è  $L_\eta(A_{hLeith}) \propto \pi A^{1/2} \eta^{-\frac{1}{6}}$

La scala di lunghezza stimata da Leith dell'enstrofia-dissipazione e la eddy viscosity risultante sono:

$$L_{\eta}(A_{hLeith}) \propto \pi A_{hLeith}^{\frac{1}{2}} \eta^{-\frac{1}{6}} = \pi A_{hLeith}^{\frac{1}{3}} |\nabla\omega_3|^{-1/3}$$

$$A_{hLeith} = \left( \frac{viscC2Leith}{\pi} \right)^3 L^3 |\nabla\omega_3|$$

$$|\nabla\omega_3| \equiv \sqrt{\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right]^2 + \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \right]^2}$$

Holland (1978) ha suggerito che le "eddy viscosities" dovrebbero concentrarsi sulla dinamica alla scala della griglia, in quanto i moti più grandi verrebbero "risolti". Per migliorare la selettività di scala dell'operatore viscoso, propose una viscosità eddy biarmonica invece di una viscosità armonica (o laplaciana). Griffies e Hallberg (2000) propongono che se si scala la viscosità biarmonica in base a considerazioni di stabilità, i termini viscosi biarmonici saranno attivi in modo simile ai termini viscosi armonici alla scala della griglia del modello, ma molto meno attivi sui moti a scala maggiore. Analogamente, una diffusività biarmonica può essere utilizzata per flussi meno diffusivi.

In pratica, la viscosità e la diffusività biarmoniche consentono una simulazione meno viscosa, ma numericamente stabile, rispetto alla viscosità e alla diffusività armoniche. Il MITgcm supporta una pletora di viscosità e diffusività biarmoniche, che sono controllate con parametri denominati in modo simile alle viscosità e diffusività armoniche con la sostituzione  $h \rightarrow 4$  (Adcroft et al., 2004).

#### *Schema di mixing verticale:*

Se i risultati dei modelli numerici fossero insensibili ai valori costanti assegnati ai parametri di mixing, ossia i coefficienti di eddy viscosity verticale  $\nu$  e di eddy diffusivity  $\kappa$ , non ci sarebbe da preoccuparsi; ma non è così.

#### *Schema "GGL90":*

Questo schema di parametrizzazione, sviluppato da Gaspar et al., (1990) si basa su lavori di modellazione della turbolenza atmosferica. È progettato per simulare il mescolamento verticale a tutte le profondità, dallo strato limite superiore fino all'abisso. Questo schema include una singola equazione prognostica per l'energia cinetica turbolenta. Il calcolo delle scale di lunghezza turbolente è diagnostico, piuttosto che prognostico. Nelle regioni debolmente turbolente, la diffusività verticale simulata è inversamente proporzionale alla frequenza di Brunt-Vaisala (Gaspar et al, 1990).

I flussi verticali turbolenti sono parametrizzati utilizzando il concetto classico di diffusività eddy. Le diffusività sono correlate alla Turbulent Kinetic Energy (TKE) in base a

$$K_m = c_k l_k \bar{e}^{1/2}$$

$$K_s = K_h = K_m / Pr_t$$

dove  $C_k$  è una costante,  $l_k$  è la lunghezza di mescolamento, e  $e$  è la TKE and  $Pr_t$  è il numero di Prandtl (Gaspar et al, 1990).

### 3 CONFIGURAZIONE DEL MITGCM PER LA SIMULAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE ATTORNO L'ISOLA DI PANTELLERIA

Il modello numerico di circolazione MITO HR PANT ad alta risoluzione, come detto, è stato sviluppato con il codice MITgcm. Basato sul lavoro di Marshall et al., il MITgcm risolve le equazioni di Navier-Stokes per fluidi incompressibili utilizzando l'approssimazione di Boussinesq. Nella configurazione di MITO HR PANT si utilizza la versione idrostatica del modello. La discretizzazione spaziale impiega un approccio ai volumi finiti su una griglia "staggered" di tipo Arakawa-C, con un trattamento implicito non lineare della superficie libera. La coordinata verticale utilizzata è una zeta scalata, mentre la topografia è gestita tramite celle parziali.

Il dominio del modello copre l'area attorno all'isola di Pantelleria avendo pertanto quattro frontiere aperte (open boundaries); queste hanno rappresentato una delle principali sfide del progetto.

Avere più frontiere aperte introduce infatti complessità notevoli, poiché ogni lato aperto rappresenta un ingresso o uscita per quantità di moto, calore e salinità dal dominio modellistico, richiedendo una gestione accurata per evitare problemi di instabilità e incongruenze con il sistema fisico.

#### 3.1 Griglia, batimetria e condizioni iniziali

In questo paragrafo ci soffermiamo ad illustrare il processo di configurazione della griglia, di creazione della batimetria e delle condizioni iniziali per il dominio ad alta risoluzione (MITO HR PANT, o "dominio figlio"), che è parte del modello "padre" più ampio (MITO). La simulazione ad alta risoluzione è stata eseguita utilizzando un fattore di nesting di 1:5, garantendo così un'elevata risoluzione nel dominio; avere un tale fattore di nesting ha comportato che ogni cella della griglia padre è stata suddivisa in 25 celle più piccole nella griglia figlio, aumentando significativamente il dettaglio spaziale della simulazione nelle aree di maggiore interesse.

In figura 2 è possibile osservare le due griglie computazionali, MITO in rosso e MITO HR PANT in blu, e la loro perfetta sovrapposizione.

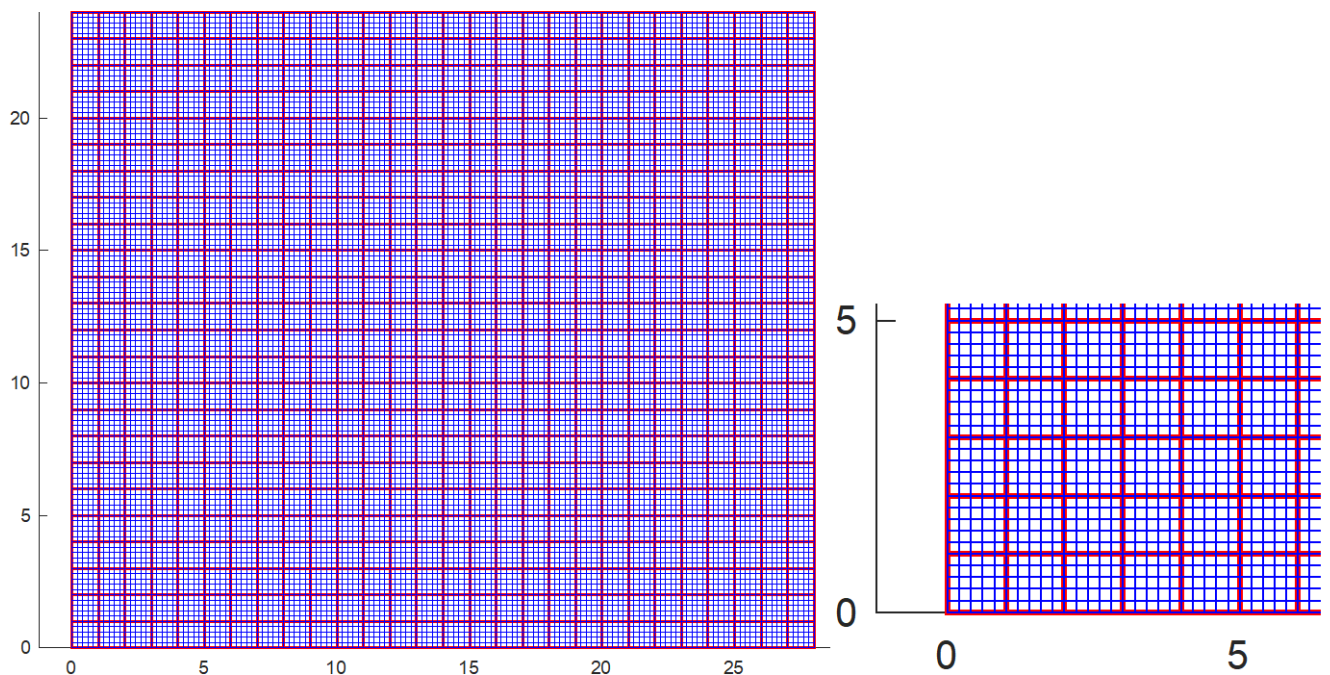


Figure 2: Schematizzazione delle griglie computazionali. In rosso la griglia del modello MITO, in blu la griglia del modello MITO HR PANT; a destra uno zoom.

Il primo passo di tutto il processo è stata la definizione del dominio di interesse nella configurazione MITO. E' stata infatti scelta una porzione geografica attorno a Pantelleria, selezionata in modo da assicurare che l'isola fosse posizionata centralmente e che fosse ben rappresentata. Successivamente, è stato necessario definire con precisione la risoluzione locale della griglia. Questo è stato fatto calcolando il 'passo' della stessa, cioè la distanza tra i punti della griglia in gradi, e poi convertendo questi valori in metri per avere un'idea più tangibile delle dimensioni delle celle. Una volta stabilita l'origine della griglia ( $X=11.70206^\circ$  e  $Y=36.49979^\circ$ ), sono state calcolate le coordinate dei quattro vertici della griglia MITO, definendo così con precisione i limiti del dominio padre e la risoluzione in punti di griglia (28 x 24).

Successivamente, utilizzando i dati di batimetria del fondo marino ad alta risoluzione, forniti da European Marine Observation and Data Network (EMODnet 2020; <https://www.emodnet-bathymetry.eu>), è stata dapprima selezionata la stessa area definita precedentemente e poi, avvalendosi della griglia del modello MITO HR PANT (di dimensioni 140x120 punti), si è generata la batimetria ad alta risoluzione. Questa batimetria così dettagliata è stata creata pertanto per catturare al meglio le variazioni di profondità attorno a Pantelleria.

In figura 3 è possibile osservare la griglia computazionale del modello MITO (a sinistra) e la nuova griglia computazionale ad altra risoluzione del modello MITO HR PANT (a destra).

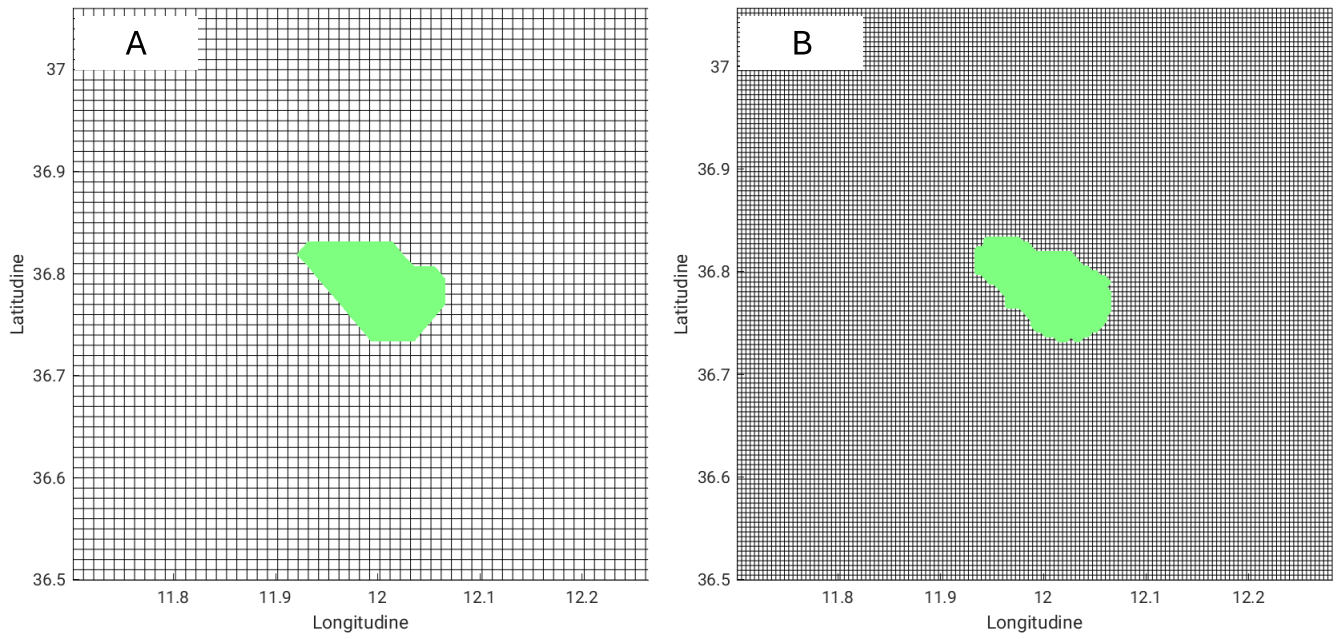
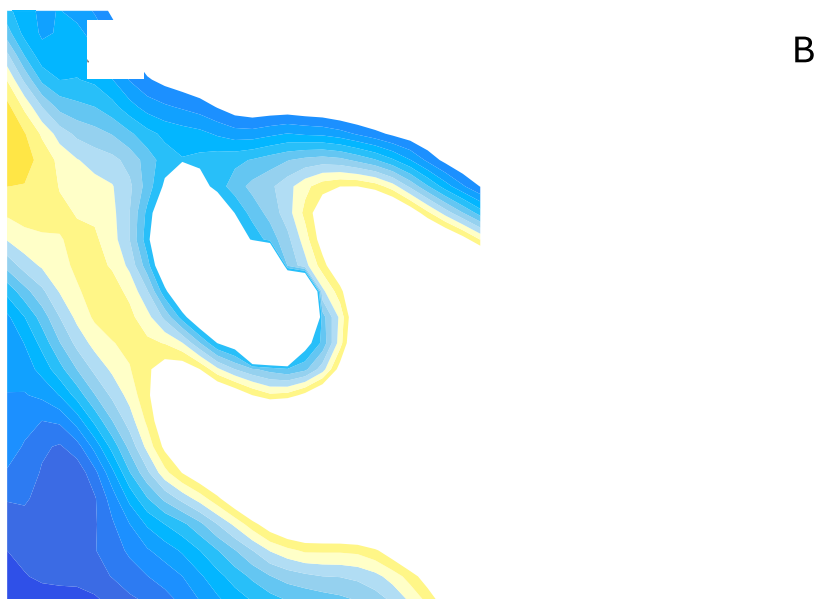


Figure 3: Griglia computazionale dei 2 modelli: A) MITO; B) MITO HR PANT

In figura 4 è invece possibile osservare le due rispettive batimetrie

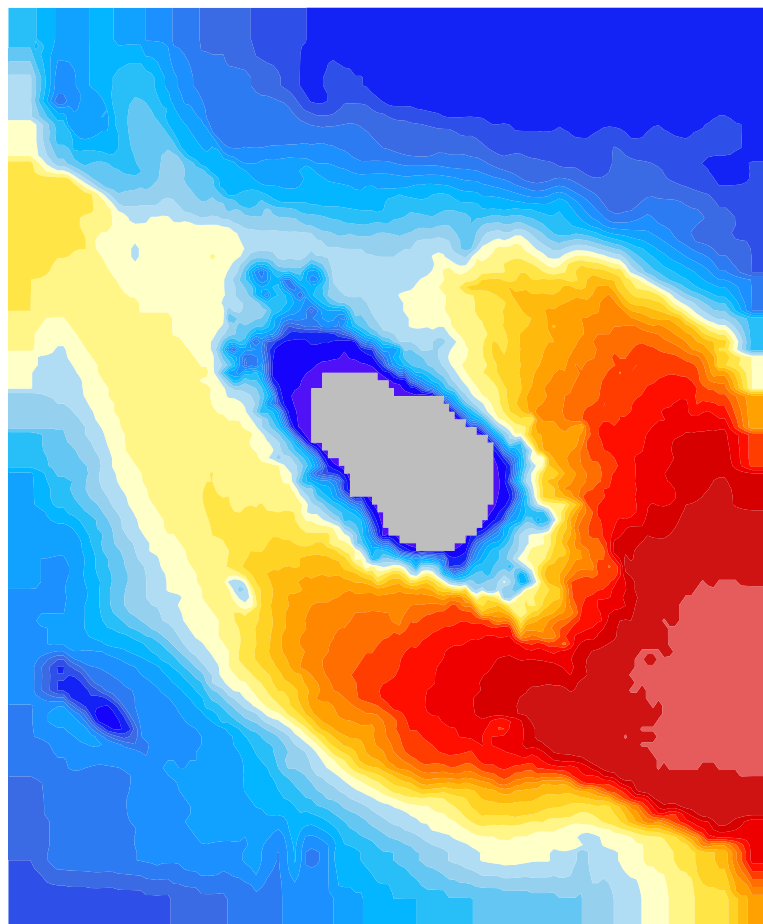


600 750 900 1050 1200 1350

Figure 4: Batimetria dell'area geografica di Pantelleria. A) modello MITO, B) alta risoluzione

Per evitare discontinuità nelle simulazioni, è stata sviluppata infine una terza ed ultima batimetria, che chiamiamo "mista" (mostrata in figura 5) che integra i dati della griglia padre con quelli della griglia figlio.

La transizione tra le griglie padre e figlio è stata infatti gestita con cura, utilizzando un processo di interpolazione su cinque punti attorno ai bordi della griglia figlio, creando così una transizione graduale tra le due griglie.



Depth (m)

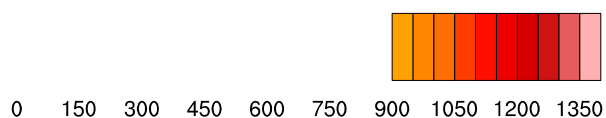


Figure 5: Batimetria "mista", utilizzata dal modello MITO HR PANT. Integra i dati a bassa risoluzione (sui bordi) con quelli ad alta risoluzione

Questo processo di configurazione della griglia e creazione della batimetria mista è fondamentale per garantire che le simulazioni di circolazione attorno a Pantelleria siano accurate e rappresentative delle condizioni reali. Il risultato finale è un dominio altamente dettagliato che fornisce una base solida per analisi e studi sulla dinamica delle correnti nella regione.

Per la discretizzazione verticale si sono utilizzati gli stessi 100 livelli, con una risoluzione variabile che va da circa 2 m in superficie a circa 62 m da 1500 m fino al fondo, già presenti nel modello operativo MITO.

Per quanto concerne la creazione delle condizioni iniziali (Initial Conditions, IC) il processo ha previsto l'elaborazione delle variabili scalari (temperatura, salinità, e altezza del livello del mare) e delle componenti della velocità (U e V) adattando i dati provenienti dal dominio padre al dominio figlio utilizzando una serie di operazioni per garantire una transizione fluida e una rappresentazione accurata.

E' stato richiesto, infatti, un processo di elaborazione e integrazione di dati per la gestione della transizione tra le due griglie. I files del modello padre, contenenti i dati a risoluzione più bassa, vengono utilizzati per gestire i bordi del dominio figlio; nello specifico si è adottata la seguente metodologia:

*Riempimento diretto dei bordi:* le prime cinque celle lungo i bordi del dominio figlio vengono riempite direttamente con i dati del file padre. Questo assicura che le condizioni ai bordi siano coerenti con il dominio padre.

*Interpolazione Bilineare:* le celle dalla 6 alla 10 lungo i bordi vengono riempite utilizzando un'interpolazione bilineare, creando una transizione graduale e fluida tra i dati del padre e quelli del figlio.

Questo processo appena descritto viene applicato per tutte le variabili, anche per le componenti della velocità (U e V), ma con adattamenti specifici per la gestione dei bordi, considerando le differenti posizioni dei punti U e V rispetto ai punti scalari su una griglia "staggherata" (vedi figura 1 in cui è illustrata la posizione delle variabili). Questo metodo garantisce che le condizioni iniziali per il modello MITO HR PANT siano preparate con precisione.

Per quanto concerne le forzanti atmosferiche, il modello implementato è forzato in superficie dal wind-stress, e dai flussi di calore e sale calcolati dai dati orari forniti dal modello atmosferico non-idrostatico regionale SKIRON (Kallos et al.1997). SKIRON è una delle componenti fondamentali del sistema di previsioni POSEIDON (Papadopoulos and Katsafados, 2009) dell'Università di Atene (<http://forecast.uoa.gr/forecastnewinfo.php>) e, da anni, è usato per diverse applicazioni sia in atmosfera che in oceano.

Per quanto riguarda i coefficienti di "eddy viscosity" e diffusività verticali si è utilizzata la chiusura di turbolenza di Gaspar et al. (1990), mentre la viscosità orizzontale (dipendente dallo spazio) è calcolata mediante l'uso dello schema di Leith. Tale schema differisce da quello classico di Smagorinsky, poiché risolve direttamente la cascata di enstrofia (cascata verso le scale più piccole), che è una caratteristica della turbolenza 2D. Il coefficiente di diffusività orizzontale è costante;  $K_h = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Lo schema di avvezione dei traccianti (temperatura e salinità) è del terzo ordine nello spazio e nel tempo e di tipo "flux limited".

Per ciò che riguarda l'interazione con la batimetria sono state utilizzate le condizioni no-slip per l'equazione del momento al fondo e ai bordi solidi laterali. In particolare, il coefficiente di attrito sul fondo è espresso come funzione quadratica del flusso medio nello strato limite. Il coefficiente di drag adimensionale utilizzato è di  $2.5 \times 10^{-3}$ .

## 3.2 Condizioni al bordo

Una delle maggiori difficoltà nell'implementazione delle condizioni al bordo è legata alla necessità di mantenere una transizione continua tra il dominio simulato e le informazioni imposte dall'esterno, come modelli regionali o dati osservativi. Se tali condizioni non sono ben calibrate o mancano di dati accurati, si rischiano problemi come riflessioni non fisiche e distorsioni dei flussi. Questi errori possono amplificarsi, portando a disturbi che si propagano nel dominio simulato e deteriorano la qualità delle simulazioni. (Jensen 1998, Sannino et al., 2009).

Nel caso specifico della simulazione attorno a Pantelleria, la presenza di quattro condizioni al bordo aperte ha richiesto test approfonditi per garantire che i campi di velocità generati al di fuori del dominio non provocassero anomalie lungo i bordi. Questo tipo di configurazione a più frontiere aperte introduce infatti ulteriori complessità rispetto a modelli con un numero inferiore di "open boundaries". La principale sfida risiede nel trovare un equilibrio tra le dinamiche esterne, che entrano nel dominio dai "lati", e i processi locali più dettagliati che il modello ad alta risoluzione è progettato per catturare. Per affrontare questi problemi, è stato necessario testare ed ottimizzare la namelist denominata "data.obcs" nel MITgcm; tale namelist permette di definire e settare specifici parametri di smorzamento e rilassamento per migliorare la transizione tra i confini aperti e il resto del dominio.

Per ridurre al minimo i problemi di stabilizzazione del flusso ai confini aperti, sono state utilizzate tecniche di smorzamento delle riflessioni nelle aree più prossime alle frontiere (tecnica denominata "sponge layer"). Questo tipo di approccio ha aiutato a mitigare gli effetti di riflessioni indesiderate e a migliorare la stabilità del modello.

Un aspetto chiave è stato il trasferimento del segnale di marea. Ricordiamo qui che nel modello padre sono state introdotte le quattro componenti di marea principali, diurne e semi-diurne (K1, O1, M2, S2), ma da un'attenta analisi spettrale delle simulazioni effettuate (Palma et al., 2020) si sono trovati picchi significativi con periodi di 6 ed 8 ore, originati da interazioni non lineari tra le componenti di marea esplicitamente rappresentate nel modello.

Interazioni di questo tipo avvengono in molte regioni costiere poco profonde e possono produrre onde che si propagano su lunghe distanze. Inoltre, diverse aree del Mar Mediterraneo, come il Banco dell'Avventura ed il Plateau di Malta (entrambi nel Canale di Sicilia), manifestano rotazioni giornaliere della circolazione, indotte dalla marea, ben catturate e visibili con una frequenza di campionamento pari a 6 ore (Palma et al., 2020).

In questo lavoro è stata adottata una frequenza di aggiornamento delle condizioni al bordo pari a 6 ore. Tale scelta rappresenta un compromesso tra la necessità di riprodurre correttamente le dinamiche a larga scala (inclusi i principali effetti mareali) e la disponibilità dei dati al contorno, non sempre orari per il periodo scelto. La presenza di picchi spettrali con frequenze di 6 e 8 ore, osservata nelle simulazioni, suggerisce che tale frequenza sia sufficiente a intercettare i segnali principali, pur riconoscendo che una risoluzione oraria delle condizioni al bordo costituirebbe la configurazione ideale per una completa rappresentazione dei processi.

Questo processo di calibrazione ha dimostrato quanto sia delicato l'uso delle "open boundaries" in simulazioni oceaniche locali, evidenziando la necessità di un'attenta ed accurata gestione dei parametri che regolano gli scambi, per evitare che le dinamiche esterne generino instabilità che si propagano poi in tutto il dominio.

## 4 SIMULAZIONI E RISULTATI

In questa sezione vengono discussi i risultati della simulazione effettuata con il modello MITO HR PANT (MITO ad alta risoluzione).

Il primo passo è stato effettuare un'analisi di sensibilità ed una calibrazione del codice numerico per simulare la risposta del dominio alla forzante dei quattro lati aperti; la comprensione della sensibilità del modello è stato infatti un passo iniziale fondamentale. Sono state condotte simulazioni brevi e sono state analizzate le prestazioni di diverse parametrizzazioni del mescolamento verticale e orizzontale per valutare in quali aspetti differiscono. Scelta la configurazione ottimale (mostrata nella seguente tabella) è stata infine effettuata una simulazione della durata di 9 giorni ininterrotti (dal 2 settembre 2024 al 10 settembre 2024) al fine di riprodurre un periodo di "spin-up" del modello previsionale MITO. Mostriamo in tabella 1 i valori scelti per le parametrizzazioni.

<b>Mixing verticale</b>	<b>Parametri</b>	<b>Mixing orizzontale</b>	<b>Parametri</b>
GGL90	Ck=0.15; Ceps=0.35; LengthMin=3;	LEITH	visC2=2; viscC2D=2 viscC4=3; viscC4D=3

Tabella 1 - Parametri schemi di turbolenza

### 4.1 Circolazione superficiale

Dopo 9 giorni di simulazione, la circolazione riprodotta dal modello ad alta risoluzione risulta in buon accordo con quella simulata dal modello padre; il modello MITO HR PANT riproduce correttamente tutte le correnti, i vortici principali e anche strutture di circolazione a più piccola scala.

Nello specifico però, osservando i campi di velocità del 2 settembre (inizio simulazione, figura 6) e del 10 settembre (fine simulazione, figura 7) per entrambe le configurazioni MITO (a sinistra) e MITO HR PANT (a destra), emergono importanti differenze che evidenziano i benefici della simulazione ad alta risoluzione.

Ad inizio simulazione il campo di velocità mostra una struttura simile nelle due configurazioni, con le correnti principali visibili su scala più ampia. Tuttavia, nel modello ad alta risoluzione, si osserva già una maggiore definizione delle caratteristiche di flusso vicino all'isola e nelle aree costiere, dove dettagli più fini evidenziano variazioni più precise della velocità.

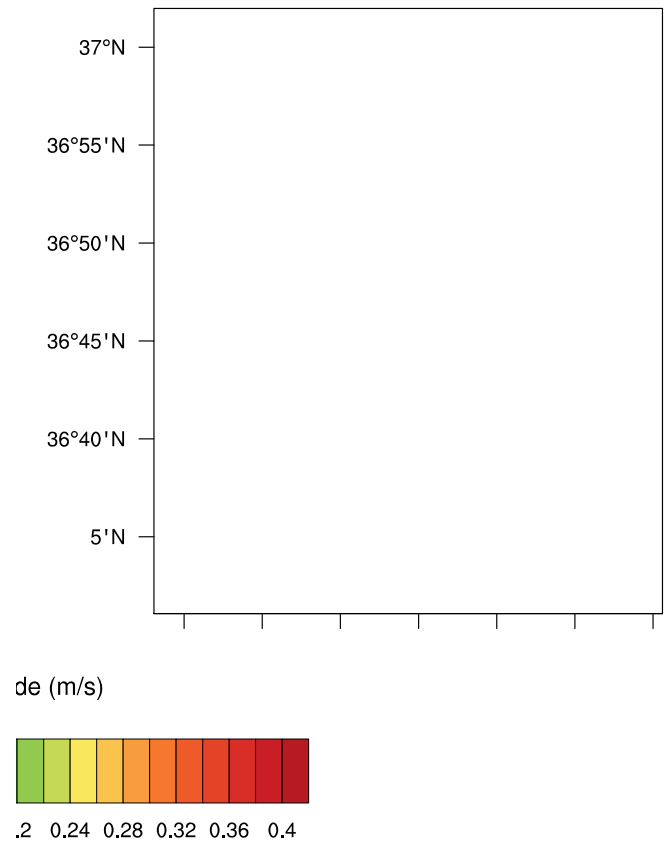


Figure 6: Campo di velocità del 2 settembre 2024 alle ore 00:00. Inizio simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra

6 0.42 0.48 0.54 0.6 0.66

Figure 7: Campo di velocità del 10 settembre 2024 alle ore 00:00. Fine simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra

Al termine della simulazione (10 settembre), la differenza tra le due configurazioni diventa più marcata. Mentre il modello MITO mantiene un campo di velocità meno dettagliato, il modello ad alta risoluzione cattura vortici e correnti locali che il modello a bassa risoluzione non riesce a rappresentare. Richiama l'attenzione il formarsi di una ricircolazione ciclonica a sud dell'isola, con il centro che si posiziona sui 12°E ed i 36°40'N, completamente assente nella simulazione a più bassa risoluzione.

Questo livello di dettaglio aggiuntivo, ottenuto grazie all'utilizzo di una risoluzione più alta, è particolarmente utile per lo studio delle dinamiche di piccola scala, tra cui le variazioni di velocità legate alla complessa batimetria attorno a Pantelleria. Questi fenomeni potrebbero avere un impatto diretto sull'ottimizzazione dell'ancoraggio e sull'efficacia del dispositivo PeWEC, poiché influenzano il trasporto di energia e la stabilità delle strutture ancorate.

## 4.2 Trasporti

Per verificare e testare la procedura sviluppata per creare le boundary conditions è stato calcolato il trasporto netto attraverso le pareti ovest ed est di entrambi i domini. La procedura corretta fa sì che ci sia conservazione della massa tra il dominio padre e il dominio figlio. Il trasporto netto rappresenta il flusso di acqua attraverso un confine, integrato sia nel tempo che nello spazio, e viene espresso in Sverdrup (Sv;  $m^3/s$ ). Il calcolo è stato effettuato includendo tutti i livelli verticali ( $Z=1-100$ ), con particolare attenzione alle condizioni al fondo per garantire un corretto calcolo vicino alla batimetria.

I risultati mostrano una coerenza tra i trasporti calcolati nei domini padre e figlio. Di seguito, un riepilogo delle medie dei trasporti netti calcolati:

Parete ovest:  $0.32 m^3/s$ .

Parete est:  $-0.033 m^3/s$ .

Sono stati generati grafici delle serie temporali dei trasporti per le pareti ovest ed est e sono mostrati di seguito (figura 8 e figura 9, rispettivamente). Questi grafici mostrano una perfetta sovrapposizione nelle fasi principali, evidenziando la coerenza tra i due modelli.

Il trasporto del dominio figlio (a destra nelle immagini) segue fedelmente quello del dominio padre (a sinistra nelle immagini); i puntini rossi indicano i momenti di perfetta corrispondenza tra i trasporti nei due domini, segno che le condizioni al contorno sono state implementate correttamente.

L'analisi dei trasporti mette in luce alcuni aspetti tecnici rilevanti:

- 1) Le configurazioni di rilassamento e sponge layer hanno evitato riflessioni indesiderate.
- 2) La frequenza di aggiornamento delle "open boundaries" adottata si è dimostrata efficace nel rappresentare la variabilità delle condizioni al contorno e nel consentire la propagazione dei principali segnali mareali. Sebbene la frequenza oraria sia più accurata, la scelta effettuata è risultata adeguata in funzione dei dati disponibili e delle esigenze computazionali del sistema.
- 3) Il dominio figlio cattura dettagli più fini, come vortici locali, non influenzando i trasporti netti, ma migliorando la qualità della simulazione. I trasporti netti infatti bilanciano bene le entrate e le uscite, dimostrando che il modello ad alta risoluzione mantiene un bilancio globale coerente.

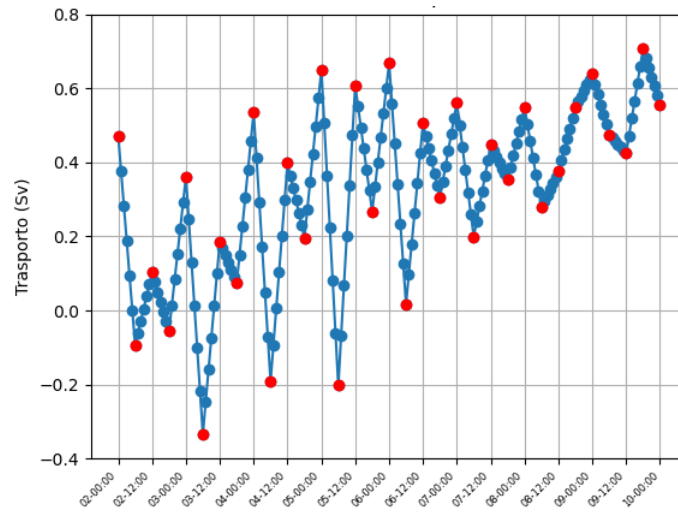
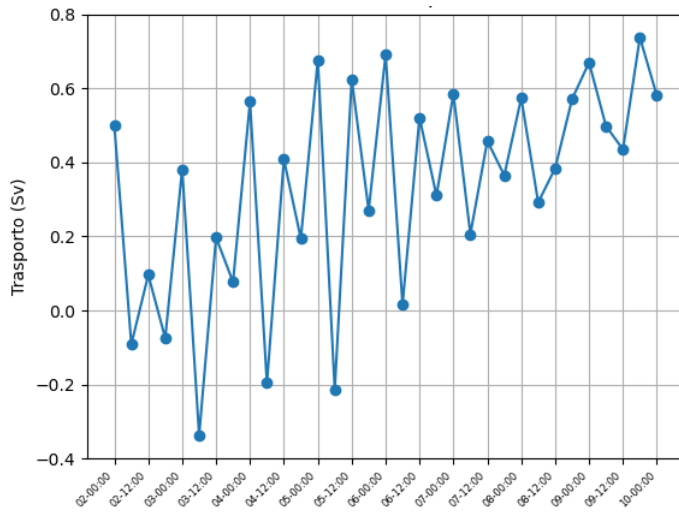


Figure 8: Serie temporale del trasporto netto al bordo ovest. Modello MITO a sinistra; modello MITO HR PANT a destra

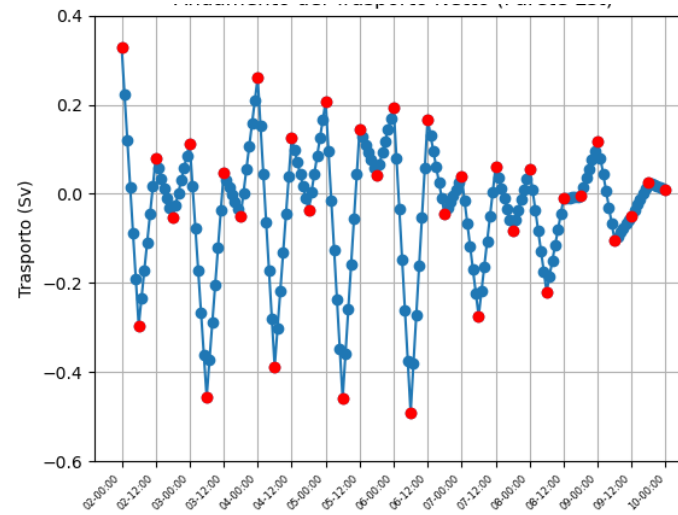
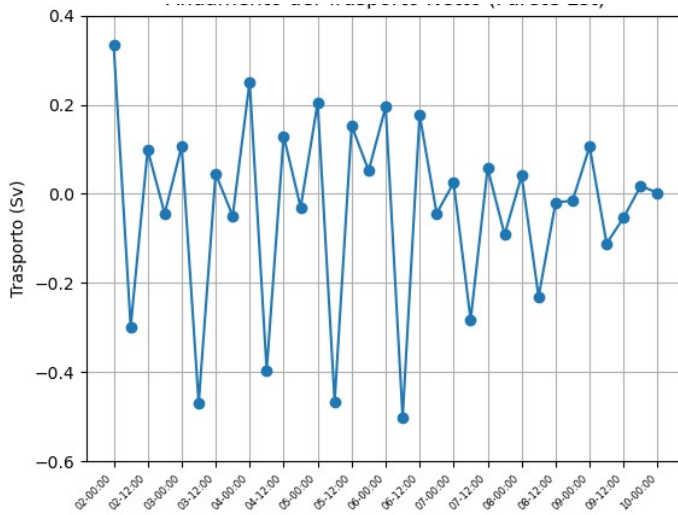


Figure 9: Serie temporale del trasporto netto al bordo est. Modello MITO a sinistra; modello MITO HR PANT a destra

### 4.3 Temperatura e salinità superficiale

In questo paragrafo analizziamo l'evoluzione dei campi di temperatura e salinità superficiale.

Nella seguente figura 10 è mostrato il campo di temperatura superficiale iniziale, a sinistra per il modello padre ed a destra per il modello figlio.

Dopo nove giorni di simulazione otteniamo i campi mostrati nella figura 11 e possiamo affermare che nel modello padre (a sinistra) la distribuzione della temperatura evolve, mantenendo gradienti termici ampi e relativamente uniformi; le strutture più grandi, come i vortici su mesoscala, sono visibili, ma manca la rappresentazione delle dinamiche più fini. Nel modello figlio (a destra) è evidente invece un'evoluzione dei gradienti termici su scala locale, con fenomeni di mescolamento verticale più pronunciati vicino alla costa. Il modello cattura infatti variazioni significative nei dettagli costieri. MITO HR PANT, grazie alla sua maggiore risoluzione, risolve dinamiche locali cruciali per la comprensione dei fenomeni costieri.

I campi iniziali di salinità superficiale sono mostrati nella seguente figura 12. Anche per la variabile salinità come per la temperatura, dopo nove giorni di simulazione (figura 13) la distribuzione della salinità evolve, mantenendo però un gradiente più o meno uniforme e ampie zone di omogeneità nel dominio padre; il campo rimane generalizzato, senza dettagli significativi sulla circolazione vicino all'isola. Nel dominio figlio si nota la comparsa di strutture locali evidenti vicino alla costa. La maggiore risoluzione consente di catturare vortici e fenomeni di mescolamento verticale e orizzontale non visibili nel modello padre.



Figure 10: Campo di temperatura del 2 settembre 2024 alle ore 00:00. Inizio simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra

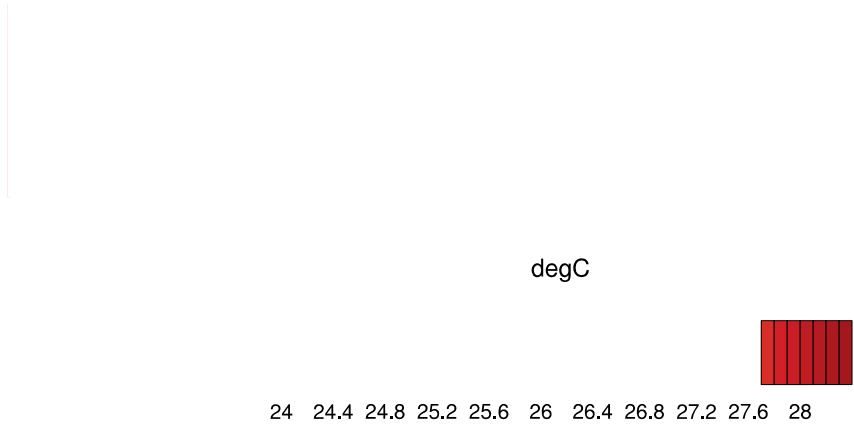


Figure 11: Campo di temperatura del 10 settembre 2024 alle ore 00:00. Fine simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra



Figure 12: Campo di salinità del 2 settembre 2024 alle ore 00:00. Inizio simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra

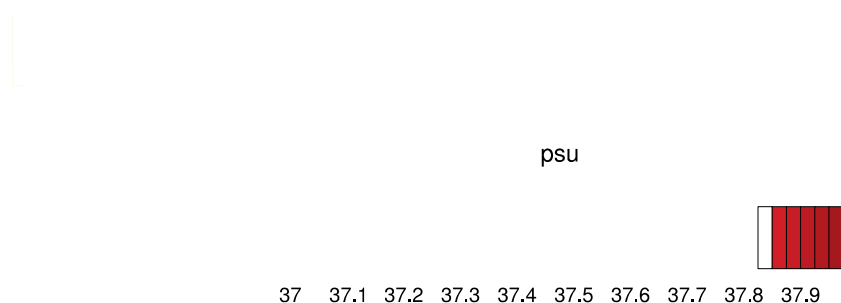


Figure 13: Campo di salinità del 10 settembre 2024 alle ore 00:00. Fine simulazione. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra

#### 4.4 Operativo

Il modello che abbiamo descritto, e di cui abbiamo valutato le performances, è stato inserito nella catena operativa che fornisce giornalmente le previsioni orarie a 5 giorni della circolazione marina del Mediterraneo e del mar Nero. Il suddetto sistema, denominato MITO, è stato ampiamente descritto nel deliverable LA1.1 (Iacono et al., 2020)

Gli outputs di MITO HR PANT sono dati orari di velocità (3D, tridimensionali), temperatura, salinità (3D) ed elevazione della superficie marina (2D, bidimensionali). I dati di input necessari per la realizzazione delle previsioni giornaliere sono i dati atmosferici previsionali di SKIRON (modello atmosferico regionale) ed i dati previsionali marini prodotti da MITO. Una volta alla settimana (il martedì) successivamente al “run di inizializzazione” di MITO, anche MITO HR PANT realizza un “run” di inizializzazione che simula i 9 giorni precedenti. Ogni giorno della settimana, invece, la catena operativa realizza un “run” previsionale di 5 gg.

Va sottolineato che ogni giorno, per simulare i 5 giorni successivi, MITO HR PANT legge come condizione iniziale il file di restart, che è stato creato dal run previsionale del giorno precedente. La sequenza completa delle simulazioni previsionali parte il martedì, quando viene realizzata l’inizializzazione, e prosegue fino al lunedì successivo. La catena segue dunque la stessa logica implementata ed utilizzata per il sistema MITO.

Tutte le fasi della catena operativa sono realizzate su Cresco che è un supercomputer con memoria distribuita con migliaia di processori.

I campi di velocità, temperatura e salinità, prodotti dalle simulazioni possono essere visualizzati attraverso un’interfaccia web dedicata (<https://giotto.casaccia.enea.it/mito/>), in cui si può seguire l’evoluzione del singolo forecast giornaliero.

## 5 CONCLUSIONI

Nel corso degli ultimi 3 semestri è stato realizzato il modello ad alta risoluzione della circolazione attorno all'isola di Pantelleria, che abbiamo denominato "MITO HR PANT", basato sul codice MITgcm.

Il modello ad alta risoluzione con inclusa la forzante di quattro frontiere aperte, ivi sviluppato e denominato MITO HR PANT, è stato utilizzato per una simulazione dedicata di 9 giorni, forzata da dati del modello padre MITO, che ha permesso di valutare le performance del modello e di effettuare dettagliati confronti con il modello padre. I risultati sono molto positivi; i campi di circolazione, temperatura e salinità, restano vicini a quelli prodotti dal modello MITO, già validato, lungo tutto il periodo della simulazione, dimostrando che il modello non introduce alcun tipo di bias su queste scale temporali, ma anzi fornisce un livello di dettaglio che solo con l'utilizzo dell'alta risoluzione costiera si può ottenere.

Parallelamente, il modello è stato inserito nella catena operativa di MITO; ciò consente un efficiente innestamento di MITO HR PANT, che utilizza i dati necessari per l'inizializzazione e le condizioni al contorno prodotte proprio da MITO. Il sistema fa anche uso (alla superficie) di dati atmosferici ad alta risoluzione (5 km) prodotti dal modello SKIRON, reso disponibile dall'Università di Atene.

Il sistema fornisce previsioni orarie a cinque giorni, che vengono rese disponibili sul sito web <https://giotto.casaccia.enea.it/mito/>.

L'analisi della simulazione dedicata ha permesso di analizzare gli effetti dell'alta risoluzione e delle quattro open boundaries sulla circolazione locale.

In definitiva possiamo affermare che:

Si sono ridotti al minimo i problemi di stabilizzazione del flusso ai confini aperti, utilizzando tecniche di smorzamento delle riflessioni nelle aree più prossime alle frontiere (tecnica denominata "sponge layer"). Questo tipo di approccio ha aiutato a mitigare gli effetti di riflessioni indesiderate e a migliorare la stabilità del modello.

L'adozione di una frequenza di aggiornamento delle condizioni al bordo pari a 6 ore si è rivelata un compromesso efficace, che ha permesso di propagare nel dominio ad alta risoluzione le principali dinamiche sviluppate a scala regionale, tra cui l'effetto della marea. La scelta riflette le attuali disponibilità di dati e le esigenze di efficienza, lasciando aperta la possibilità di future estensioni verso aggiornamenti orari.

Questo processo di calibrazione ha dimostrato quanto sia delicato l'uso delle "open boundaries" per evitare che le dinamiche esterne generino instabilità che si propagano poi in tutto il dominio. Questi aspetti confermano l'importanza del lavoro svolto per risolvere con successo le sfide poste dalle open boundaries, permettendo di ottenere simulazioni stabili e coerenti.

Dall'analisi dei trasporti è possibile affermare che il dominio figlio riproduce fedelmente i trasporti calcolati nel dominio padre, non generando alcuna riflessione indesiderata. Analizzando i campi di velocità possiamo affermare di aver ottenuto un livello di dettaglio aggiuntivo, grazie all'utilizzo di una risoluzione più alta, e questo è particolarmente utile per lo studio delle dinamiche di piccola scala, tra cui le variazioni di velocità legate alla complessa batimetria attorno a Pantelleria. In sintesi, la simulazione ad alta risoluzione ha fornito una visione più dettagliata e accurata del comportamento delle correnti locali, cruciale per una modellazione realistica delle interazioni tra il dispositivo PeWEC e l'ambiente marino circostante.

## 6 BIBLIOGRAFIA

Adcroft,A., Campin,J.M.: Rescaled height coordinates for accurate representation of free-surface flows in ocean circulation models; *Ocean Model* (2004), 7(34): 269–284.

Berntsen,J., Xing,J., Davies,A.: Numerical studies of flow over a sill: sensitivity of the non-hydrostatic effects to the grid size; *Ocean Dynamics* (2009), 59: 1043–1059.

Bricheno,L., Wolf,J., Brown,J.: Impacts of high resolution model downscaling in coastal regions; *Continental Shelf Research* (2013), 87: 7–16.

European Marine Observation and Data Network (EMODnet): (2020).

Fox-Kemper,B., Ferrari,R., Hallberg,R.: Parameterization of mixed layer eddies. Part I: theory and diagnosis; *J. Phys. Oceanogr.* (2008), 38: 1145–1165.

Fox-Kemper,B., Menemenlis,D.: Can Large Eddy Simulation Techniques Improve Mesoscale Rich Ocean Models?; *Ocean Modeling* (2008), 177.

Gaspar,P., Gregoris,Y., Lefevre,J.: A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site; *J. Geophys. Res.* (1990), 16: 179–193.

Giorgi,G., Cervelli,G.: On the errors in annual energy yield estimation due to monodirectional wave spectra assumption; *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference* (2023).

Griffies,S., Hallberg,R.: Biharmonic friction with a Smagorinsky-like viscosity for use in large-scale eddy-permitting ocean models; *Mon. Wea. Rev.* (2000), 128: 2935–2946.

Holland,W.: The role of mesoscale eddies in the general circulation of the ocean—numerical experiments using a wind-driven quasi-geostrophic model; *Journal of Physical Oceanography* (1978), 8: 363–392.

Iacono,R., Memè,S., Napolitano,E., Bargagli,A., Antonioli,F., Struglia,MV., Carillo,A., Pisacane,G., Anav,A., Cannata,R., Lombardi,E., Sannino,G.: LA1.1: Realizzazione di un sistema operativo per la previsione della circolazione del sistema accoppiato Mediterraneo-Mar Nero, che include gli effetti delle maree. Report RdS/PTR(2019)/162, Febbraio 2020.

Jensen, T.G.: Open boundary conditions in stratified ocean models; *Journal of Marine Systems* (1998), 16: 297–322.

Kallos, G., Nickovic, S., Papadopoulos, A., Jovic, D., Kakaliagou, O., Misirlis, N., Boukas, L., Mimikou, N., Sakellaridis, G., Papageorgiou, J., Anadranistakis, E., Manousakis, M.: The regional weather forecasting system SKIRON: an overview; *Proceedings of the Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments, Athens, Greece (1997), 15–17 October*: 109–122.

Kantha, L.H., Clayson, C.A.: *Numerical models of oceans and oceanic processes*; *International Geophysics Series*, Academic Press (2000), 66.

Kantha, L.H., Clayson, C.A.: *Small scale processes in geophysical fluid flows*; *International Geophysics Series*, Academic Press (2000), 67.

Leith, C.: Large eddy simulation of complex engineering and geophysical flows; *Physics of Fluids* (1968), 10: 1409–1416.

Leith, C.: Stochastic models of chaotic systems; *Physica D* (1996), 98: 481–491.

Marshall, J., Hill, C., Perelman, L., Adcroft, A.: Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling; *J Geophys Res* (1997a), 102: 5733–5752.

Marshall, J., Adcroft, A., Hill, C., Perelman, L., Heisey, C.: A finite-volume, incompressible Navier-Stokes model for studies of the ocean on parallel computers; *J Geophys Res* (1997b), 102: 5753–5766.

McWilliams, J.C.: *Fundamentals of Geophysical Fluid Dynamics*; Cambridge University Press (2006).

Palma, M., Iacono, R., Sannino, G., Bargagli, A., Carillo, A., Fekete, B.M., Lombardi, E., Napolitano, E., Pisacane, G., Struglia, M.V.: Short-term, linear and non-linear local effects of the tides on the surface dynamics in a new, high-resolution model of the Mediterranean Sea circulation. *Ocean Dyn.* (2020), <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01364-6>.

Papadopoulos, A., Katsafados, P.: Verification of operational weather forecasts from the POSEIDON system across the Eastern Mediterranean; *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* (2009), 9: 1299–1306.

Pozzi,N., Bonetto,A., Bonfanti,M., Bracco,G.: PeWEC: Preliminary Design of a Full-Scale Plant for the Mediterranean Sea; *Technology and Science for the Ships of the Future* (2018), 504–514.

Sannino,G., Herrmann,M., Carillo,A., Rupolo,V., Ruggiero,V., Artale,V., Heimbach,P.: An eddy-permitting model of the Mediterranean Sea with a two-way grid refinement at the Strait of Gibraltar; *Ocean Modelling* (2009), 30: 56–72.

Smagorinsky,J.: General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment; *Monthly Weather Review* (1963), 91: 99–164.

Stashchuk,N., Vlasenko,V., Inall,M., Aleynik,D.: Horizontal dispersion in shelf seas: High resolution modelling as an aid to sparse sampling; *Progress in Oceanography* (2014), 128: 74–87.

Vlasenko,V., Stashchuk,N., McEwan,R.: High-resolution modelling of a large-scale river plume; *Ocean Dynamics* (2013), 63: 1307–1320.