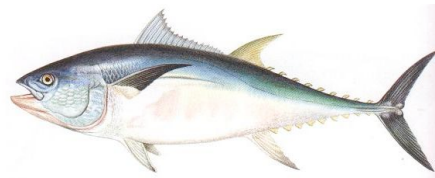
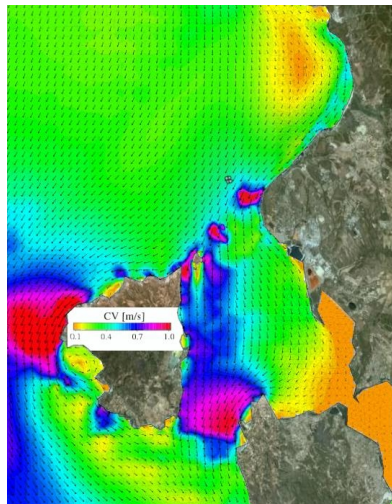




IAMC-CNR UOS Oristano

RAPPORTO TECNICO

Analisi modellistica delle caratteristiche idrologiche del tratto di mare costiero antistante Capo Altano (Sardegna sud-occidentale) finalizzato ad investigare i potenziali impatti di un impianto di maricoltura (Tonnare Sulcitane)



Andrea Cucco e Angelo Perilli

Anno di creazione - anno 2008

Revisionato - anno 2016

INDICE

SOMMARIO	2
INTRODUZIONE	3
METODI	5
• Modello concettuale rifiuti organici.....	5
• Mangimi e Rifiuti organici	8
METODO NUMERICO	3
• Modello idrodinamico e Modello d’onda	3
• Modello di trasporto.....	8
• Set-up Modello Numerico.....	8
• Analisi Anemometrica	10
RISULTATI	17
• Scenario annuale.....	17
• Analisi ondametria	17
• Analisi correntometrica.....	26
• Analisi dei processi di trasporto.....	33
• Scenario con vento di maestrale.....	36
• Scenario con vento di libeccio.....	40
• Scenario con vento di scirocco.....	44
CONCLUSIONI.....	49
REFERENZE	50

SOMMARIO

Il lavoro si propone di investigare i potenziali impatti derivanti dall'attività di maricoltura prevista nel tratto di mare antistante Capo Altano, Sardegna sud-occidentale, attraverso un'analisi correntometrica. Lo studio è finalizzato ad una stima dell'areale maggiormente soggetto all'accumulo di sostanza organica prodotta da un ipotetico impianto off-shore per l'allevamento intensivo di Tonni

Al fine di riprodurre la circolazione delle acque e del moto ondoso nell'area di indagine e di effettuare delle simulazioni in grado di stabilire quale siano le aree interessate al deposito di sostanza organica prodotta dall'attività di maricoltura, sono state implementate diverse classi di modelli numerici ed effettuati alcuni esperimenti in laboratorio. In particolare, sono stati sviluppati un modello numerico idrodinamico, agli elementi finiti, in grado di riprodurre il campo di moto bidimensionale; un modello ondometrico, agli elementi finiti, al fine di riprodurre lo stato del mare; nonché un modello numerico in grado di simulare il trasporto di sostanze disperse nella colonna d'acqua ad opera dei venti, correnti e moto ondoso finalizzato ad individuare l'estensione delle aree potenzialmente impattabili dai detriti organici prodotti.

Tali strumenti numerici sono stati applicati all'area di interesse in modalità accoppiata al fine di analizzare le dinamiche di interesse sia nell'arco di un intero anno solare sia per definiti scenari meteomarini di riferimento.

Lo studio ha permesso di simulare la dinamica di trasporto e deposizione dei fecal pellets prodotti e dei mangimi utilizzati nell'ambito dell'attività prevista di maricoltura. Infine è stato possibile valutare l'estensione massima raggiunta dalla sostanza organica rilasciata da un ipotetico impianto off-shore di allevamento intensivo prima della deposizione sul fondale, in relazione a determinati scenari meteo-marini, ed individuare l'areale soggetto ad un potenziale impatto sulle comunità bentoniche.

INTRODUZIONE

Per un quarto di secolo, l'acquacoltura è stato il settore di produzione alimentare con il più rapido tasso di crescita al mondo, l'8,8% a partire dal 1970. In paragone, la produzione zootecnica, anch'essa in crescita, ha registrato nello stesso periodo un incremento del solo 2,8% annuo (FAO, 2007). Attualmente, circa il 45% di tutto il pesce consumato – 48 milioni di tonnellate in totale – è d'allevamento (FAO, 2007). Per l'anno 2030, a causa dell'incremento demografico, che porterà 2 miliardi di persone in più, l'acquacoltura avrà bisogno di produrre quasi il doppio - 85 milioni di tonnellate all'anno - solo per mantenere gli attuali livelli di consumo pro-capite (FAO, 2007). E poiché la pesca da cattura tradizionale ha raggiunto ormai il livello massimo di produzione, la pesca d'allevamento rappresenta l'unica risorsa per colmare il deficit. Tuttavia sarà in grado di farlo solo se sviluppata e gestita in modo responsabile (FAO, 2007).

In Italia, negli ultimi dieci anni, l'attività di acquacoltura intensiva ha subito un rapido sviluppo (+380% dal 1996 al 2002). Il numero di impianti di maricoltura in aree costiere e offshore è quasi decuplicato, parallelamente all'aumento della capacità produttiva dei singoli impianti. Ciò ha determinato un crescente interesse da parte della comunità scientifica verso le alterazioni determinate nell'ambiente marino dalle attività di allevamento, ricollegabili principalmente all'immissione di notevoli quantità di reflui ad elevato contenuto organico (FAO, 1995).

Il problema principale legato alla maricoltura deriva dall'elevato carico organico causato dall'immissione di cibo e dalle deiezioni dei pesci (Holmer, 1991; Iwama, 1991, Holmer *et al.*, 2008).

Studi in laboratorio suggeriscono che il 5-30% del peso secco di mangime consumato, o 250-300 kg di peso secco per tonnellata di pesce prodotto viene trasformato in feci (Butz and Vens-Cappell 1982; NCC 1990). Nel caso dell'allevamento di salmoni, il 29% del carbonio (Hall *et al.*, 1990), il 23% dell'azoto (Hall *et al.*, 1992) e il 47-54% del fosforo (Holby and Hall, 1991) distribuito come cibo non viene assimilato e si deposita sul fondo.

L'elevato accumulo di questi residui organici sotto le reti altera la composizione chimica nei sedimenti causando un impatto dannoso sulle praterie di piante marine (Holmer *et al.*, 2008), sulle

dinamiche delle comunità bentoniche (Findlay *et al.*, 1995, Vezzulli *et al.* 2003), un aumento del metabolismo bentonico in termini di flussi di O₂ e CO₂ (Findlay *et al.*, 1995), alterazioni il trasferimento del carbonio nei vari livelli trofici modificando la produzione primaria del sistema (Findlay *et al.*, 1995; Tsutsumi 1995), effetti sulla salute umana, favorendo lo sviluppo di comparti microbici e virali, anche di natura patogena (Findlay and Watling, 1997), .

In particolare, l'attività di acquacoltura intensiva comporta un aumento della concentrazione azoto e fosforo sia in forma disciolta che particolata (Holby and Hall, 1991; Hall *et al.*, 1992) che può generare un forte impatto negativo e danneggiare l'ambiente specialmente su scala locale (Karakassis *et al.*, 1998; Troell and Norberg, 1998; Naylor *et al.*, 2000).

Molti studi hanno inoltre osservato il formarsi di un gradiente spaziale nella dispersione dei residui organici prodotti entro un raggio massimo di 100 metri circa dalla posizione delle gabbie (Holmer, 1991; Beveridge, 1996; Karakassis *et al.*, 1998; Pearson and Black, 2000). La magnitudine di tale dispersione è determinata principalmente dalla profondità dell'acqua, dalla velocità della corrente, dalla velocità di sprofondamento dei residui organici e dall'intensità di produzione dell'allevamento (Magill *et al.*, 2006).

L'utilizzo di modelli numerici fornisce un utile strumento per prevedere l'insorgenza di potenziali impatti dannosi sull'ambiente dovuti all'introduzione di un impianto di acquacoltura o ad un eventuale incremento dell'intensità di produzione. Inoltre, i modelli numerici permettono di esplorare le conseguenze di diversi scenari (variabilità di regimi ventosi, posizione delle gabbie, intensità di produzione, tipo e quantità del mangime somministrato, ecc.) sulla dispersione e il tempo di residenza dei residui organici.

A tale scopo è necessario stimare in maniera accurata non solo la quantità e composizione dei rifiuti organici, ma anche la loro velocità di sprofondamento. La percentuale di mangime che non viene consumato e sprofonda sul fondo può variare tra l'1% e il 20% (Cromey *et al.*, 2002; Doglioli *et al.*, 2004), ma un valore del 5% viene correntemente utilizzato per impianti di acquacoltura moderni (Findlay and Watling, 1994; Cromey *et al.*, 2002; Doglioli *et al.*, 2004; De Gaetano, 2008).

Con lo scopo quindi di investigare i potenziali impatti derivanti dall'attività di acquacoltura prevista nel tratto di mare antistante Capo Altano si propone sia un'analisi correntometrica sia una stima dell'areale maggiormente soggetto all'accumulo di sostanza organica prodotta dagli impianti di

produzione. Entrambe le attività sono effettuate mediante l'utilizzo di avanzati modelli numerici sia di tipo idrodinamico-ondametrico sia di tipo meteorologico. Di seguito saranno descritti i metodi utilizzati per effettuare le analisi correntometriche nonché i risultati ottenuti.

METODI

Al fine di riprodurre la circolazione delle acque e del moto ondoso nell'area di indagine e di effettuare delle simulazioni in grado di stabilire quale siano le aree interessate al deposito di sostanza organica prodotta dall'attività di acquacoltura, sia sono state implementati diverse classi di modelli numerici sia sono stati effettuati alcuni esperimenti in laboratorio.

In particolare, sono stati sviluppati: un modello numerico agli elementi finiti di tipo idrodinamico in grado di riprodurre il campo di moto bidimensionale; un modello agli elementi finiti di tipo ondametrico al fine di riprodurre lo stato del mare; nonché un modello numerico in grado di simulare il trasporto di sostanze disperse nella colonna d'acqua ad opera dei venti, correnti e moto ondoso finalizzato ad individuare l'estensione delle aree potenzialmente impattabili dai detriti organici prodotti.

Tali strumenti numerici sono stati applicati all'area di interesse in modalità accoppiata e al fine di simulare ed analizzare le dinamiche di interesse sia nell'arco di un intero anno solare sia per definiti scenari meteomarine di riferimento.

• **MODELLO CONCETTUALE RIFIUTI ORGANICI**

Per quanto riguarda il processo di interazione tra sostanza organica prodotta e ambiente acquatico in figura 1 si riporta uno schema dettagliato della dinamica di trasporto e degradazione a cui sono soggette le particelle di materiale organico proveniente dall'impianto di produzione.

Tale modello concettuale descrive il destino dei rifiuti organici derivanti dall'attività di acquicoltura. In linea generale, una quantità di mangime, che varia a seconda della stagione, viene distribuita con una certa frequenza (in genere giornaliera) all'interno dell'area occupata dalle gabbie.

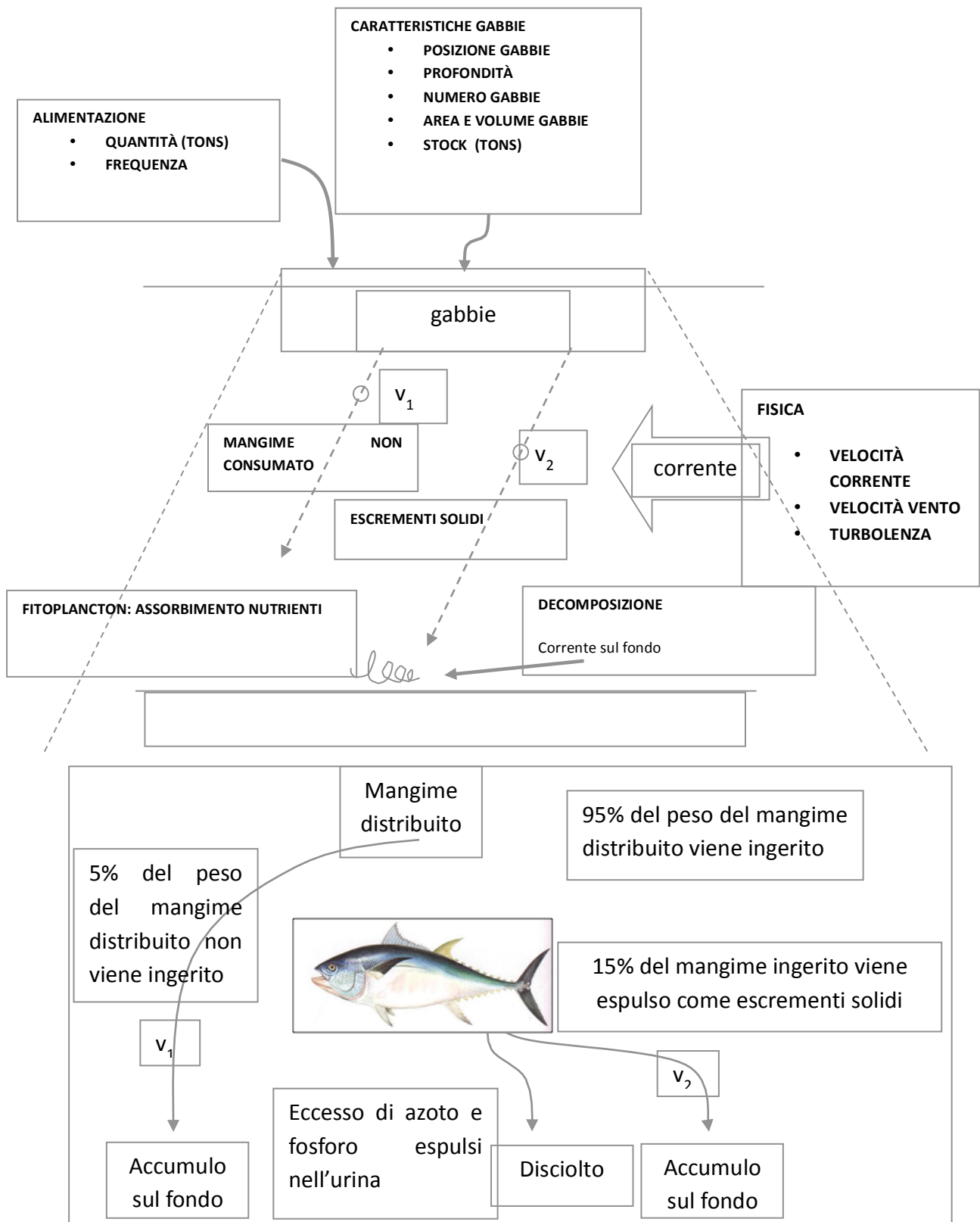


Figura 1 – Struttura del modello concettuale

Il modello concettuale qui descritto assume che il 5% di mangime distribuito non viene consumato (Findlay and Watling, 1994; Cromey *et al.*, 2002; Doglioli *et al.*, 2004; De Gaetano, 2008) e sprofonda sul fondo ad una velocità v_1 (m s^{-1}) che è funzione delle sue dimensioni e perso.

Il restante 95% del mangime distribuito viene ingerito dai pesci all'interno delle gabbie. Successivamente, mediamente il 15% del peso del mangime ingerito viene espulso sotto forma di escrementi solidi che sprofondano sul fondo con velocità v_2 ed i nutrienti (azoto e fosforo) in eccesso vengono rilasciati sotto forma di urina e dispersi dalla corrente.

I rifiuti organici solidi (mangime non ingerito e feci) vengono decomposti da una popolazione implicita di batteri e i nutrienti in essi contenuti sono re-mineralizzati in forma disciolta e trasportati dalla corrente. I nutrienti disciolti vengono assorbiti da una popolazione implicita di fitoplancton, la cui concentrazione varia stagionalmente. Il trasporto dei rifiuti organici solidi e dei nutrienti disciolti avviene per effetto della corrente marina.

Il suddetto schema concettuale è relativo ad un generico impianto off-shore di maricoltura, che nella maggior parte dei casi è caratterizzato da allevamenti misti di spigole (*Dicentrarchus labrax*) e orate (*Sparus aurata*).

Nel nostro caso specifico ovvero di un ipotetico impianto off-shore per l'allevamento intensivo di tonni, non sono disponibili informazioni dettagliate sia di tipo bibliografico che di tipo "parere esperto" riguardo ad alcuni tra i parametri fondamentali per la quantificazione dei flussi descritti in figura 1 quali: la quantità di pesce allevato all'anno, le quantità di mangime utilizzato nonché la frequenza di somministrazione, le caratteristiche fisiche delle feci prodotte nonché i rendimenti metabolici della specie ittica allevata.

Tali mancanze rendono necessarie alcune assunzioni e semplificazioni dello schema concettuale ora descritto. In particolare, si considera che giornalmente, sarà distribuita una generica quantità di mangime, le cui caratteristiche verranno successivamente descritte, e sarà prodotta una generica quantità di escrementi le cui caratteristiche fisiche saranno assunte essere analoghe a quelle di altre specie ittiche lungamente studiate, nello specifico spigole e orate.

• MANGIMI E RIFIUTI ORGANICI

La tipologia di mangimi utilizzati per l'ipotetico impianto di maricoltura sarà sostanzialmente caratterizzata, per una prima fase da scarti di pescato o pescato di piccola taglia nello specifico pesce azzurro, successivamente, definita la strategia di produzione, verranno utilizzati mangimi specifici le cui caratteristiche sono attualmente non note.

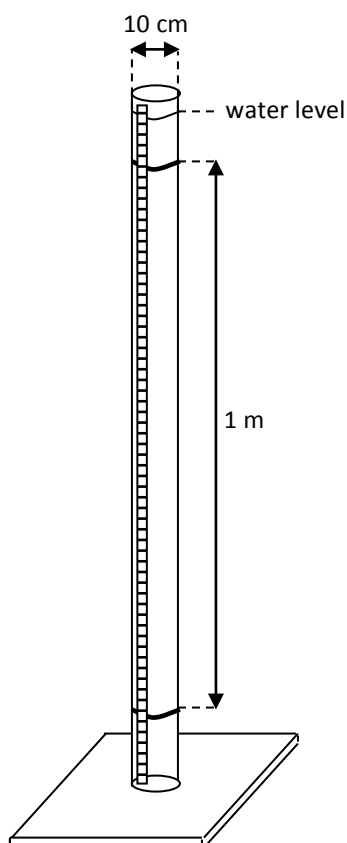


Fig.2 - Colonna utilizzata nell'esperimento per la determinazione della velocità di sprofondamento del

Al fine di riprodurre numericamente il modello concettuale sopra descritto, è necessaria la conoscenza della velocità di sprofondamento del mangime utilizzato, nonché del peso specifico.

Per ottenere tali informazioni sono stati effettuati alcuni esperimenti per definire le velocità di sprofondamento sia di una tipologia di pesce azzurro di piccola taglia nello specifico la sarda sia di 3 categorie di mangimi in pellets di utilizzo diffuso per l'allevamento di spigole e orate nello specifico Ecomar Primer, Ecomar 4 ed Ecomar 7.

In figura 2 è riportata la strumentazione utilizzata per l'esperimento. La velocità di sprofondamento è stata misurata manualmente cronometrando il tempo impiegato da sarde intere e a pessi a passare attraverso 2 linee di segnalazione poste a 1 metro di distanza su di una colonna trasparente dal diametro di 10cm (fig.2) e contenente acqua ad una temperatura di 19.5°C ed una salinità di 35.3 ppt.

In tabella 1 sono riportate le velocità di sprofondamento delle tre classi di mangimi considerate.

Per quanto riguarda i pellets, le velocità di sprofondamento ricavate sono comparabili con altri studi effettuati in laboratorio ed *in situ* (Findlay and Watling, 1994; Elberizon and Kelly, 1998; Chen *et al.*, 1999; Doglioli *et al.*, 2004; Vassallo *et al.*, 2006). La variabilità dei pellets di mangime in

termini di peso e velocità di sprofondamento viene simulata assumendo una distribuzione lineare della relativa deviazione standard sul numero totale di particelle di una data dimensione utilizzate dalla simulazione. Per quanto riguarda il pesce la velocità di sprofondamento è pari a 0.1 m/s.

Pellet size	Small	Medium	Large
Pellet name	EcoPrimer	Ecomar 4	Ecomar 7
d (mm)	1.5-2.0	4.0-4.5	6.8-7.7
w (mg)	11.3 ± 2.0	30.5 ± 3.0	215.1 ± 11.7
v (m s ⁻¹)	0.049 ± 0.009	0.085 ± 0.019	0.092 ± 0.015
n	30	30	30

Tabella 1 – Diametro (d), peso (w), velocità di sprofondamento (v) e numero di campioni (n) del mangime

Pochi studi sono stati fatti sulla velocità di sprofondamento degli escrementi solidi dei pesci, la maggioranza dei quali per il salmone dell'Atlantico, *Salmo solar* (Findlay and Watling, 1994; Elberizon and Kelly, 1998; Chen *et al.*, 1999). Uno dei pochi studi relativi a pesci di mare riguarda le spigole (*Dicentrarchus labrax*) e orate (*Sparus aurata*) nel quale si misura la velocità di sprofondamento degli escrementi solidi in funzione delle dimensioni del pesce (Magill *et al.*, 2006). Lo studio eseguito in laboratorio riporta una velocità media di sprofondamento di 0.7cm s⁻¹ per gli escrementi di spigole e 0.5 cm s⁻¹ per quelli di orata senza nessuna differenza significativa nella velocità di sprofondamento in funzione alle dimensioni del pesce (Magill *et al.*, 2006). Ai fini della simulazione della dispersione degli escrementi solidi dei tonni in mancanza di altra tipologia di dati sono stati utilizzati come riferimento i seguenti valori ottenuti come il valore medio tra quello delle orate e spigole ovvero una velocità di sprofondamento pari a 0.6 cm s⁻¹ per ogni particella prodotta.

Per quanto riguarda le quantità di mangimi ed escrementi prodotti non sono a nostra disposizione dati sufficienti a poter definire la strategia di funzionamento dell'impianto indi per cui

nel nostro caso è stata assunta sia per i mangimi somministrati sia per gli escrementi prodotti una quantità relativa tra 0 e 1 in scala dimensionale. Ulteriore assunzione è stata fatta sulla modalità di distribuzione del prodotto che è stato stabilito essere offerto dalla superficie delle vasche con frequenza giornaliera.

METODO NUMERICO

Al fine di simulare la circolazione delle acque il moto ondoso e il trasporto delle particelle disperse nelle acque dell'area in esame in corrispondenza del sistema di gabbie, è stato utilizzato sistema di modelli numerici accoppiati.

In particolare tale sistema è costituito da un modello numerico idrodinamico ad un modello numerico d'onda e da un modulo per la simulazione dei processi di trasporto e dispersione lagrangiano. Di seguito si riporta una breve descrizione dei metodi utilizzati.

• MODELLO IDRODINAMICO E MODELLO D'ONDA

È stato utilizzato un modello idrodinamico 2D basato sul metodo degli elementi finiti che risolve il sistema di equazioni Shallow Water con approssimazione di Boussinesq in orizzontale e approssimazione idrostatica in verticale nella loro formulazione con i livelli d'acqua e i trasporti.

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial t} - fV + gH \frac{\partial \xi}{\partial x} + RU + X &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} - fU + gH \frac{\partial \xi}{\partial y} + RV + Y &= 0 \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} &= 0\end{aligned}\quad \text{eq.1}$$

Viene utilizzato il metodo degli elementi finiti per l'integrazione spaziale delle variabili indipendenti e un algoritmo semi implicito per l'integrazione nel tempo. I termini trattati implicitamente sono il gradiente di livello e il termine di Coriolis nell'equazioni dei - Eq.2momenti e il termine di divergenza nell'equazione di continuità. Il termine di frizione viene trattato come implicito, mentre tutti i rimanenti termini sono trattati espliciti.

Nel sistema di equazioni, U e V sono le velocità nelle direzioni x e y integrate verticalmente comunemente detti trasposti barotropici,

$$U = \int_{-h}^{\zeta} u dz \quad - \text{Eq.2}$$

$$V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$$

t il tempo, f il parametro di Coriolis, g l'accelerazione di gravità, e H lo spessore totale della colonna d'acqua, risultato dalla somma di h , inteso come profondità indisturbata o livello medio mare, e ζ livello dell'acqua.

$$H = h + \zeta \quad - \text{Eq.3}$$

R è il termine di frizione espresso come:

$$R = \frac{g\sqrt{u^2 + v^2}}{CH} \quad - \text{Eq.4}$$

dove C è il coefficiente di Cheazy che varia con il livello dell'acqua come

$$C = k_s H \quad - \text{Eq.5}$$

dove k_s è il coefficiente di Strikler

Gli ultimi due termini delle equazioni dei momenti, rispettivamente X e Y , includono tutti i termini che non necessitano di essere trattati implicitamente come lo stress del vento e i termini non lineari, i gradienti baroclini e le forzanti indotte dal moto ondoso. Per i dettagli della trattazione numerica si riporta a Umgiesser and Zecchetto (1995) e Umgiesser et al. (2004).

Per la simulazione della formazione e propagazione del moto ondoso in aree costiere si utilizza il modello WWM é un modello d'onda di terza generazione "phase averaging" ed ha un'implementazione fisica ed algoritmi di calcolo numerico sviluppati e studiati appositamente per superare le tradizionali difficoltà incontrate nell'applicazione di un modello d'onda in zone costiere caratterizzate da basse profondità.

Tale modello è basato sul metodo degli elementi finiti ed è in grado di simulare:

- Processi di propagazione: rifrazione dovuta alle variazioni di corrente e di profondità, effetto di shoaling (una conseguenza della graduale decrescita nella profondità dell'acqua fa sì che lo steepness dell'onda cresca, mentre la sua velocità decresce), blocco o riflessione dovuto a correnti opposte, trasmissione,

blocco o riflessione contro ostacoli, diffrazione dovuta a barriere, ostacoli, isole, ecc.

- Processi di generazione e dissipazione: generazione dovuta al vento, dissipazione dovuta al whitecapping, dissipazione per attrito sul fondo, dissipazione per rottura dell'onda dovuta alle variazioni di profondità, interazioni non lineari tra onde stesse (triad/quadruplet wave-wave interaction).

Per una descrizione dettagliata delle caratteristiche di tale modello si rimanda a Ferrarin et. al. (2008).

Il modello d'onda WWM è accoppiato in modalità "two way" al modello idrodinamico sopradescritto. In particolare, l'interazione onda-corrente viene risolta mediante la classica teoria del radiation stress. In particolare, le onde in ambiente costiero sono soggette ai processi dissipazione ad opera del fondale e al fenomeno di breaking.

Tali processi generano un flusso netto di momento noto comunemente come radiation stress. La componente perpendicolare alla costa è bilanciata da un gradiente di pressione in direzione opposta che genera l'innalzamento del livello delle acque noto come set-up o set-down.

La variazione spaziale di questo flusso genera una circolazione delle acque secondaria rispetto a quella istantanea indotta dal moto ondoso.

La forza indotta dall'azione del moto ondoso su unità di superficie, nota come gradiente del radiation stress, nelle componenti x e y si definisce come:

$$\begin{aligned} X &= -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \\ Y &= -\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \end{aligned} \quad \text{- Eq.6}$$

dove S rappresenta il tensore del radiation stress.

Dominio di calcolo

Per applicare il modello idrodinamico e ondometrico è stato necessario implementare una griglia di calcolo per la discretizzazione del dominio di indagine.

Tale griglia è costituita da elementi prismatici a base triangolare di varie dimensioni e forma. La costruzione della griglia è avvenuta mediante idonei softwares di generazione.

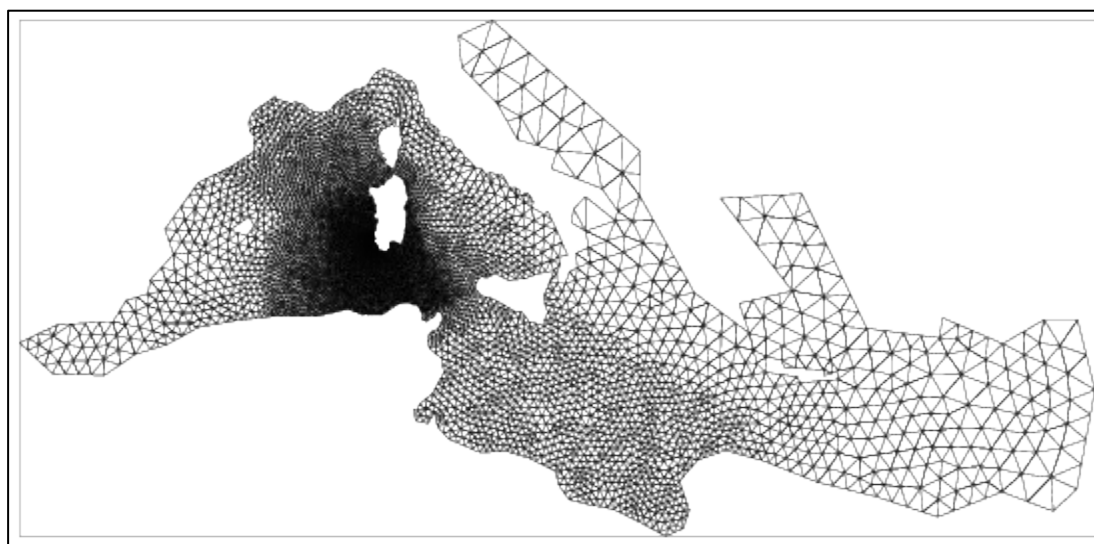


Figura 3 – Griglia di calcolo agli elementi finiti

In figura 3 è riportata l'intera griglia di calcolo del modello alle differenze finite utilizzata che descrive l'intero Mar Mediterraneo.

In figura 3 sono riportati 2 diversi ingrandimenti della griglia di calcolo sull'area di interesse.

La risoluzione della griglia varia in funzione della vicinanza alle aree costiere e alla zona di interesse corrispondente all'area di posizionamento dell'impianto di acqua coltura. In particolare si passa di elementi con dimensioni dell'ordine dei 50000 metri per le aree più esterne fino ad elementi dell'ordine dei 10 metri di lato per le aree di interesse.

I dati batimetrici e la linea di riva sono stati ottenuti dalla digitalizzazione di carte nautiche.

I diversi set di dati sono stati referenziati secondo un sistema di coordinate locali metriche e quindi utilizzati per descrivere la batimetria di tutta l'area di indagine e con maggior dettaglio l'area di installazione dell'impianto di acqua coltura (figura 4 e 5).

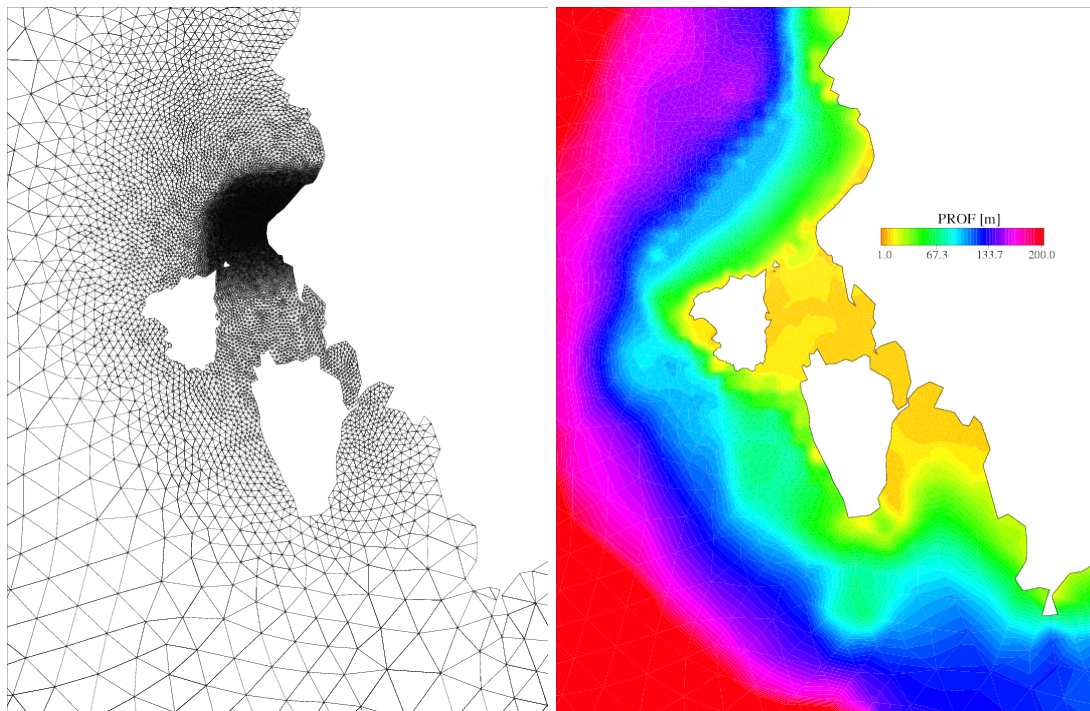


Figura 4 – Zoom della griglia di calcolo agli elementi finiti nella area di interesse e descrizione batimetrica

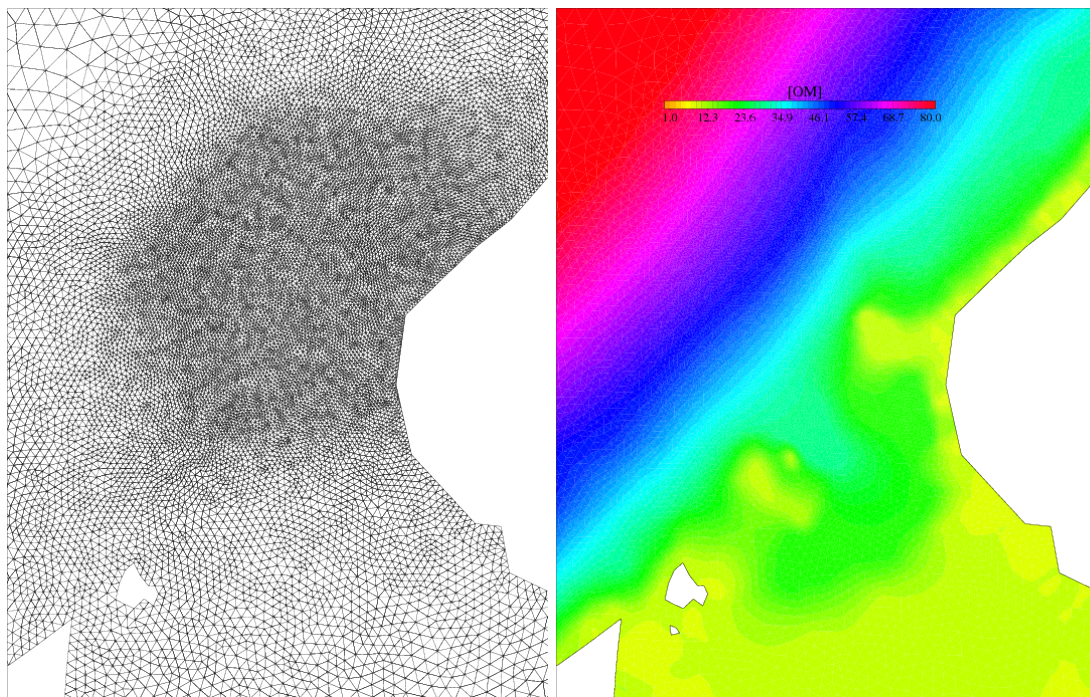


Figura 5 – Zoom della griglia di calcolo agli elementi finiti nella area di posizionamento degli impianti e descrizione batimetrica

- **MODELLO DI TRASPORTO**

Il modello idrodinamico agli elementi finiti è stato accoppiato con un modello per la simulazione dei processi di trasporto e dispersione di sostanze disperse in acqua quali le diverse categorie di pellets e mangime (sarde).

Il modulo si basa su un approccio lagrangiano alla soluzione dell'equazione di avvezione-diffusione. In particolare, tale modulo si basa su un algoritmo di calcolo delle traiettorie basato sul metodo agli elementi finiti in grado di simulare la pura avvezione tridimensionale di particelle puntiformi dotate di massa con comportamento attivo o passivo. A tale algoritmo è inoltre associato un modulo per la soluzione dell'equazione di Fick in grado di associare alla traiettoria seguita dalla particella un moto turbolento la cui intensità varia in funzione dell'associato coefficiente di diffusione turbolenta K . Tale modulo "turbolento" si basa su un algoritmo di generazione di numeri casuali associato ad una funzione per il calcolo di un range di intensità di velocità turbolente. Si rimanda a Bilgili A. et al., (2005) per una dettagliata descrizione del set di equazioni utilizzate.

- **SET-UP MODELLO NUMERICO**

La simulazione della circolazione delle acque, del moto ondoso e dei processi dinamici che caratterizzano la dispersione dei mangimi, delle feci e dei metabolici rilasciati in corrispondenza degli impianti di acquicoltura è stata effettuata mediante l'utilizzo dei modelli numerici precedentemente descritti.

In particolare, le principali entità soggette al trasporto a seguito delle correnti marine sono: i mangimi (pellets e sarde) e i fecal pellets accumulata nelle aree circostanti gli impianti di acquicoltura. Come già anticipato, è stato utilizzato un approccio di tipo lagrangiano per la simulazione del trasporto dei mangimi e dei fecal pellets. Il modello concettuale semplificato descritto nel paragrafo 3.1 (figura 1) è stato così riprodotto:

- ogni 86400 secondi (1 giorno) viene simulato contemporaneamente il rilascio delle particelle di mangime e dei fecal pellets nei punti A, B, C e D di coordinate: $39^{\circ} 14' 21''$ N – $08^{\circ} 20' 36''$ E, $39^{\circ} 14' 14''$ N – $08^{\circ} 20' 39''$ E, $39^{\circ} 14' 15''$ N – $08^{\circ} 20' 45''$ E, $39^{\circ} 14' 22''$ N – $08^{\circ} 20' 42''$ E,. Sono state simulate 2 classi di fecal pellets e 4 classi di mangimi comprensivi della tipologia "sarde" mediante diversi gruppi di particelle. In particolare, ad ogni gruppo sono state associate 10000 particelle. Ad ogni particella è stata associata una quantità di OM pari a 1. Dai risultati ottenuti dal modello idrodinamico, il processo di trasporto al fondo del materiale depositato è stato valutato del tutto ininfluenza.

- Mediante il modulo lagrangiano viene simulato il trasporto orizzontale e verticale delle particelle che rappresentano le diverse categorie di pellets (mangimi e fecal pellets). La velocità orizzontale utilizzata dipende dalla profondità a cui si trova la particella secondo la seguente relazione $V = VM + 0.05 \times VW \times \left[1 - (z/h)^2\right]$, dove VM è la velocità media orizzontale della corrente, VW è la velocità del vento, z è la profondità a cui si trova la particella e h è la profondità della colonna d'acqua.
- Il trasporto verticale delle particelle è simulato utilizzando i valori di velocità riportati in sezione 3.1.
- Sono stati simulati 4 diversi scenari, uno finalizzato a descrivere l'evoluzione dei processi di interesse nell'arco di un anno tipo, gli altri 3 rappresentativi di eventi estremi in relazione ai 3 principali regimi di vento che caratterizzano l'area di interesse:
 - simulazione della durata di 1 anno, in cui il modello è stato forzato con la serie temporale di vento relativa all'anno 2006. I dati di vento sono stati generati da modelli numerici di tipo meteorologico per l'area del Mediterraneo Occidentale. È stato scelto l'anno 2006 come anno rappresentativo delle caratteristiche dinamiche degli strati più bassi dell'atmosfera per l'ultimo decennio in quanto presenta un'intensità media degli eventi di tempesta, espressa come media dell'intensità dei venti superiori ai 4 m/s, che rientra entro l'intervallo di $\pm 2 \times STD(VW)$ calcolato per il decennio 1998 - 2008.
 - simulazione della durata di 4 giorni con dominio numerico forzato da un vento di maestrale la cui velocità partendo da 0 raggiunge il suo valore massimo di 20 m/s all'inizio del 2 giorno, mantenendolo per tutta la durata dei giorni 2 e 3 e per ridursi in modo esponenziale a 0 entro la fine del quarto giorno;
 - simulazione della durata di 4 giorni con dominio numerico forzato da un vento di libeccio la cui velocità partendo da 0 raggiunge il suo valore massimo di 20 m/s all'inizio del 2 giorno, mantenendolo per tutta la durata dei giorni 2 e 3 e per ridursi in modo esponenziale a 0 entro la fine del quarto giorno;
 - simulazione della durata di 4 giorni con dominio numerico forzato da un vento di scirocco la cui velocità partendo da 0 raggiunge il suo valore massimo di 20 m/s all'inizio del 2 giorno,

mantenendolo per tutta la durata dei giorni 2 e 3 e per ridursi in modo esponenziale a 0 entro la fine del quarto giorno.

- **ANALISI ANEMOMETRICA**

Come accennato in precedenza sono state effettuate 4 diverse simulazioni numeriche allo scopo di caratterizzare in modo comprensivo tutti gli scenari meteomarini che possono interessare l'area in esame. In particolare, è stato scelto l'anno 2006 come anno rappresentativo delle caratteristiche meteorologiche dell'area in esame per il decennio 1998 – 2008.

I dati di vento utilizzati sono i risultati di simulazioni numeriche effettuate presso il Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine (ECMWF) di Reading (UK). Il modello numerico utilizzato (Persson, 2000), basato sulle equazioni primitive del moto, presenta una risoluzione spettrale orizzontale pari a 25 km all'equatore e fornisce i campi di vento e pressione con cadenza a 6 ore.

Di seguito si riporta un'analisi statistica della direzione ed intensità dei venti per l'area di interesse così come riprodotti dal modello di previsione.

Tale analisi è stata effettuata filtrando gli eventi con intensità inferiori ai 4 m/s la cui soglia può essere considerata come limite superiore per i regimi di brezza. In tal modo i risultati ottenuti sono rappresentativi dei processi meteorologici che interessano l'area di indagine.

Tali risultati sono riferiti ad un sistema di riferimento di tipo cartesiano ovvero la direzione rappresenta l'angolo che il vettore vento ottiene con l'asse positivo delle x, il tutto in senso antiorario, e.g. 0 indica un vento che soffia in direzione EST, 90 un vento che soffia in direzione NORD, 180 un vento che soffia in direzione OVEST, 270 un vento che soffia in direzione SUD.

In figura 6, pannello superiore, è riportata la distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di propagazione ottenuta analizzando l'intero set di dati. Come si può notare, la maggior parte degli eventi hanno una direzione di propagazione tra i 300° e i 360°, che per il sistema di riferimento considerato rappresentano venti dal 4 quadrante, nello specifico di Maestrale. Successivi a frequenza si individuano i venti di Scirocco, rappresentati nel sistema cartesiano dagli intervalli 120° - 180°. Infine, l'ultima classe di eventi rappresentativi è quella dei venti di Libeccio, qui individuati dall'intervallo dei 30°.

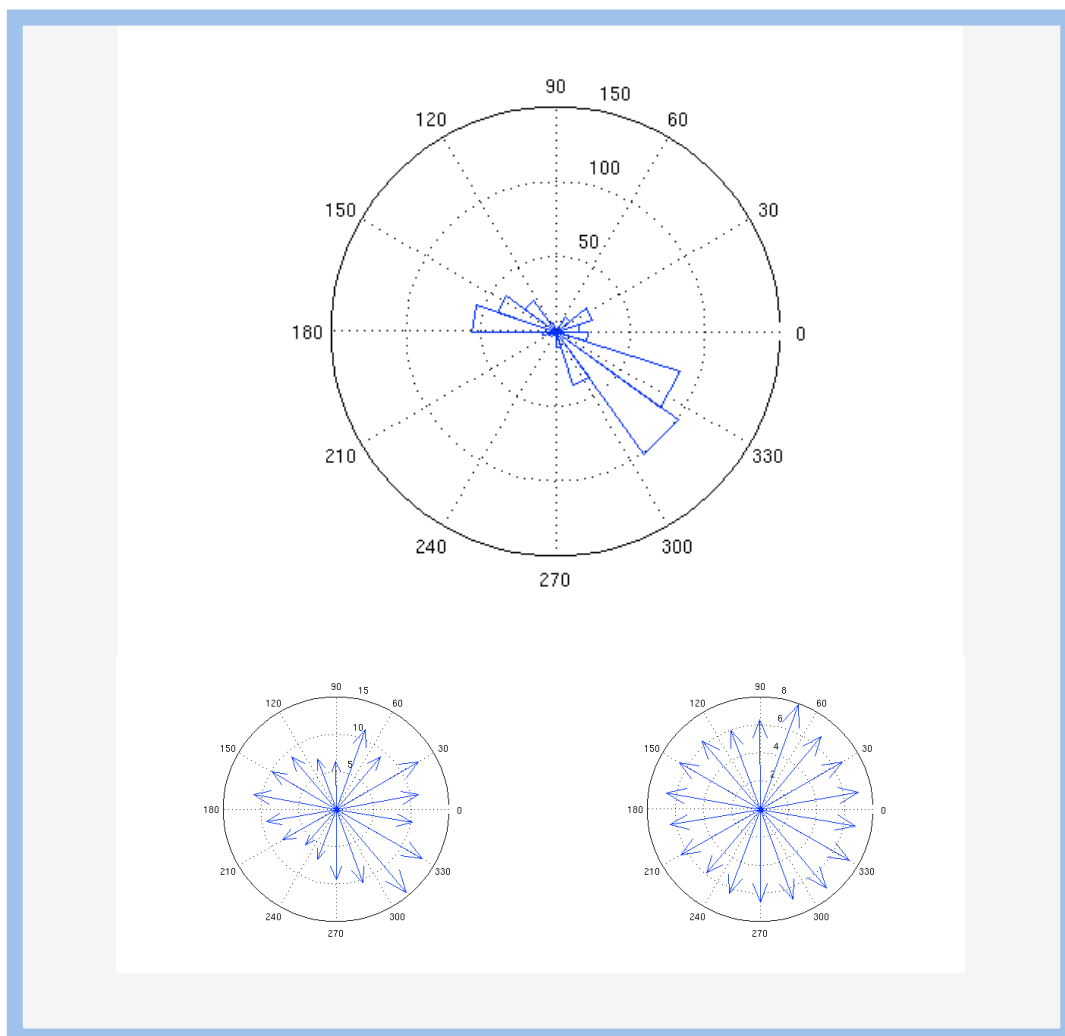


Figura 6. Statistiche dati anemometrici per l'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 4 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione di provenienza.

Dai dati aggregati risulta che i venti di Maestrale rappresentano il 65% degli eventi, i venti di Scirocco il 18% e i venti di Libeccio meno del 10%.

Per quanto riguarda le intensità delle diverse classi di regimi di vento in figura 6, pannelli inferiori, sono riportate le intensità massime e medie dei venti in relazione alla direzione di propagazione, sempre secondo il sistema cartesiano di riferimento. Dal pannello sinistro si nota come i valori massimi simulati sono stati dell'ordine dei 15 m/s e di Maestrale.

Per quanto riguarda le altre direzione i massimi di intensità sono stati dell'ordine dei 10-12 m/s.

Dal pannello destro infine si evince come le intensità medie dei venti nell'area di indagine siano dell'ordine dei 7-8 m/s con valori superiori per i venti di Maestrale e Libeccio e valori leggermente inferiori per i venti di Scirocco.

Un'ulteriore analisi statistica è stata effettuata suddividendo il set di dati in relazione alle diverse stagioni ottenendo 4 distinti sub-set per i quali sono stati analizzati sia la distribuzione di frequenza sia le intensità massime e medie dei venti.

In figura 7 sono riportati i diagrammi polari ottenuti per il primo sub-set rappresentativo la stagione primaverile.

Come si può notare, la variabilità meteorologica del periodo considerato è ben rappresentata dai risultati ottenuti che mettono in luce come anche per i mesi da Marzo a Maggio, i venti dominanti siano quelli di Maestrale, Scirocco e Libeccio.

Tuttavia, rispetto all'analisi dell'intero anno 2006, si nota come durante il periodo primaverile non vi sia una spiccata dominanza dei venti di Nord-Ovest rispetto ai venti di Sud-Est. In tal caso infatti i dati aggregati relativi a questo periodo presentano una distribuzione statistica caratterizzata da: 43% maestrale 32% Scirocco 18% Libeccio. %.

Per quanto riguarda le intensità delle diverse classi di regimi di vento in figura 7, pannelli inferiori, sono riportate le intensità massime e medie dei venti in relazione alla direzione di propagazione, sempre secondo il sistema cartesiano di riferimento.

Dal pannello sinistro si nota come i valori massimi durante il periodo primaverile sono dell'ordine dei 12 m/s con valori superiori per i venti da Nord Ovest rispetto ai venti provenienti dagli altri quadranti. Le intensità medie dei venti durante il periodo considerato non superano i 6-7 m/s e sono relativamente omogenei in relazione alle diverse direzione di propagazione.

In figura 8 sono riportati i risultati ottenuti per il periodo da Giugno a Agosto, rappresentativo della stagione estiva.

Dal pannello superiore, che riporta la distribuzione di frequenza degli eventi, si nota come vi sia una spiccata predominanza dei venti di Maestrale e una quasi del tutto assenza di venti di Libeccio con una scarsa abbondanza di eventi di Scirocco

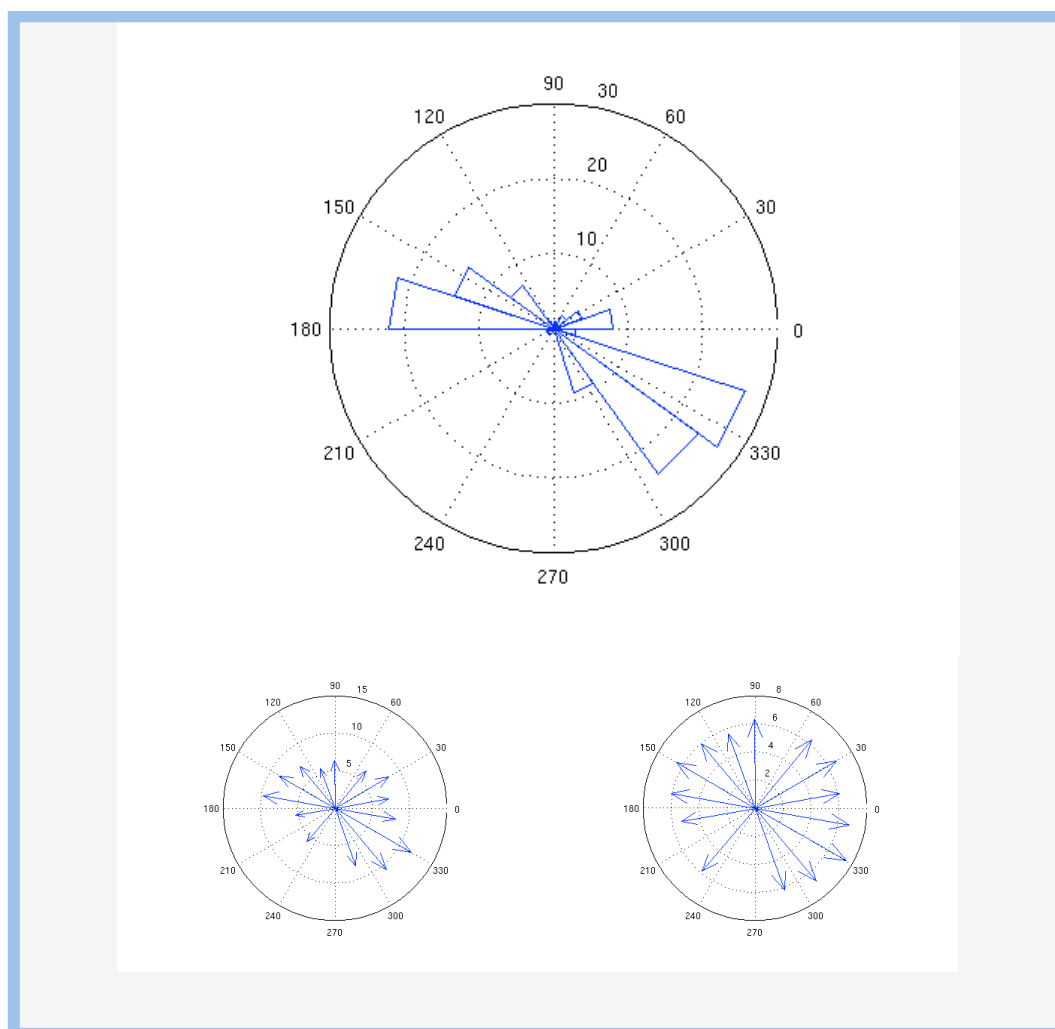


Figura 7. Statistiche dati anemometrici per la stagione primaverile anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 4 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione di provenienza.

Dai dati aggregati si ha che, nei 3 mesi considerati, l'85% degli eventi sono caratterizzati da venti provenienti dal 4° quadrante, Nord-Ovest il 12% da venti di Scirocco, 2 quadrante, il rimanente suddiviso per gli altri 2 quadranti.

Per quanto riguarda le intensità massime, pannello inferiore sinistro di figura 8, sono stati registrati valori pari a 10 m/s circa per i venti di Maestrale e di poco più di 7 m/s per i venti di Scirocco. I valori medi ottenuti per il periodo di indagine, pannello destro, sono per entrambi i principali regimi di vento di poco superiori ai 5 m/s.

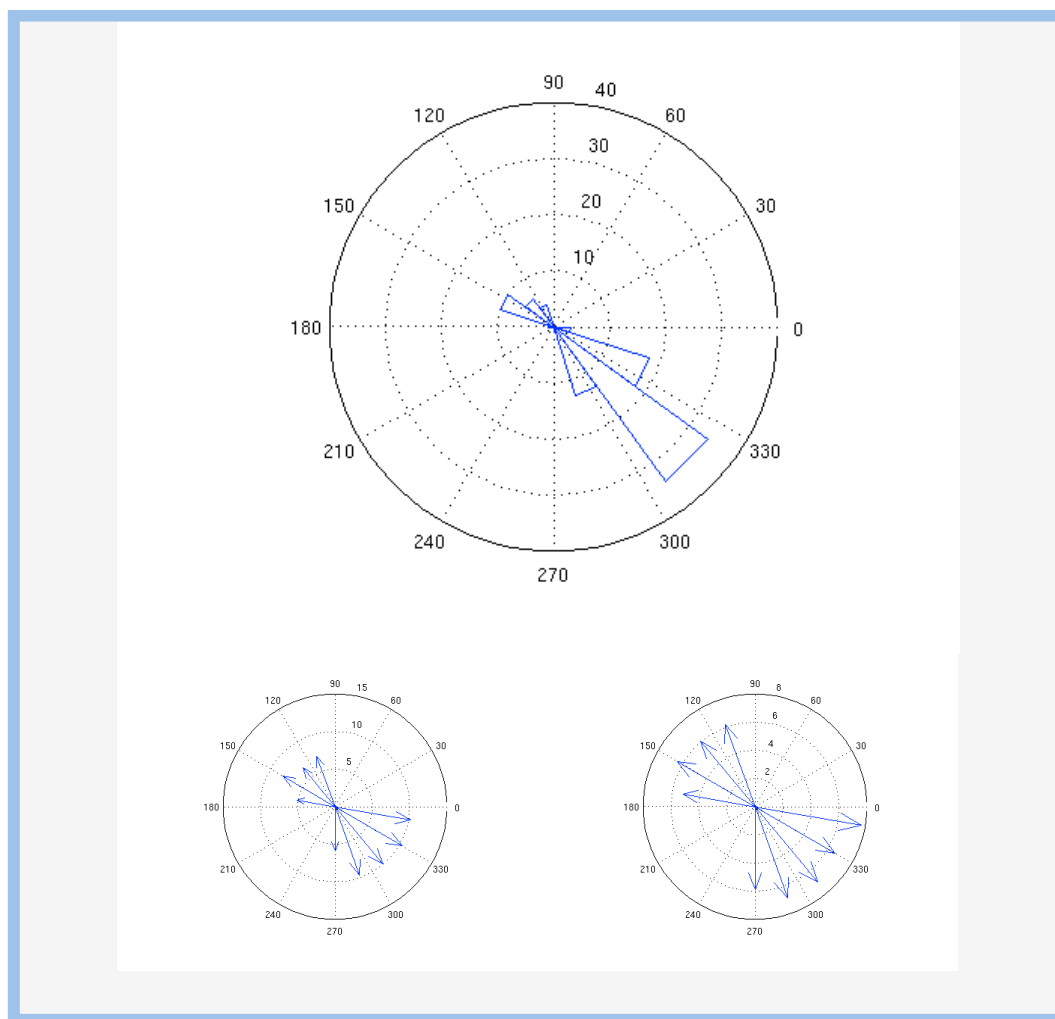


Figura 8. Statistiche dati anemometrici per la stagione estiva anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 4 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione di provenienza

In figura 9 sono riportati i risultati ottenuti per il periodo da Settembre a Novembre, rappresentativo della stagione autunnale. Dalla distribuzione di frequenza si nota la presenza dei 3 principali regimi di vento che caratterizzano l'area in esame.

In particolare, i dati aggregati mettono in luce un avvicinamento della distribuzione delle classi di frequenza alla media annuale con valori di 68% di eventi di provenienza 4° quadrante (Maestrale), 16% di eventi di provenienza 2° quadrante (Scirocco) e 11% di eventi di provenienza 1° quadrante (Libeccio).

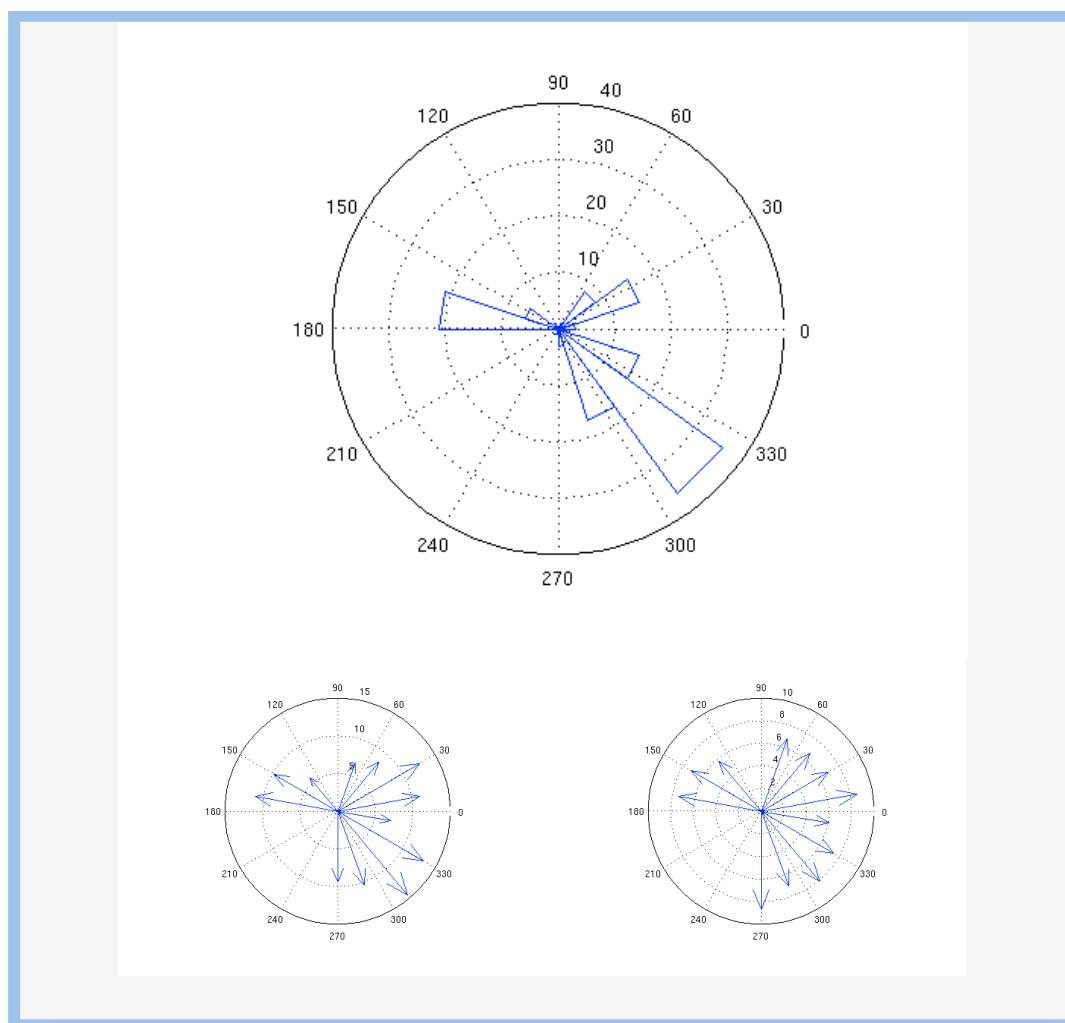


Figura 9. Statistiche dati anemometrici per la stagione autunno anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 4 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione di provenienza

Dalle analisi sulle intensità massime, pannello inferiore sinistro, si nota come durante questo periodo si registrano le intensità massime con valori dell'ordine dei 15 m/s di provenienza 4° quadrante. Analogamente ai periodi precedenti, i venti di Scirocco e Libeccio presentano intensità massime mediamente inferiori rispetto ai venti di Maestrale con valori dell'ordine dei 10-12 m/s.

Per quanto riguarda i valori medi si nota come le medie si attestano su intensità sempre inferiori ai 10 m/s, tuttavia superiori ai valori riscontrati per i periodi estivo e primaverile.

L'ultimo periodo selezionato è il periodo invernale, dal mese di Dicembre al mese di Febbraio.

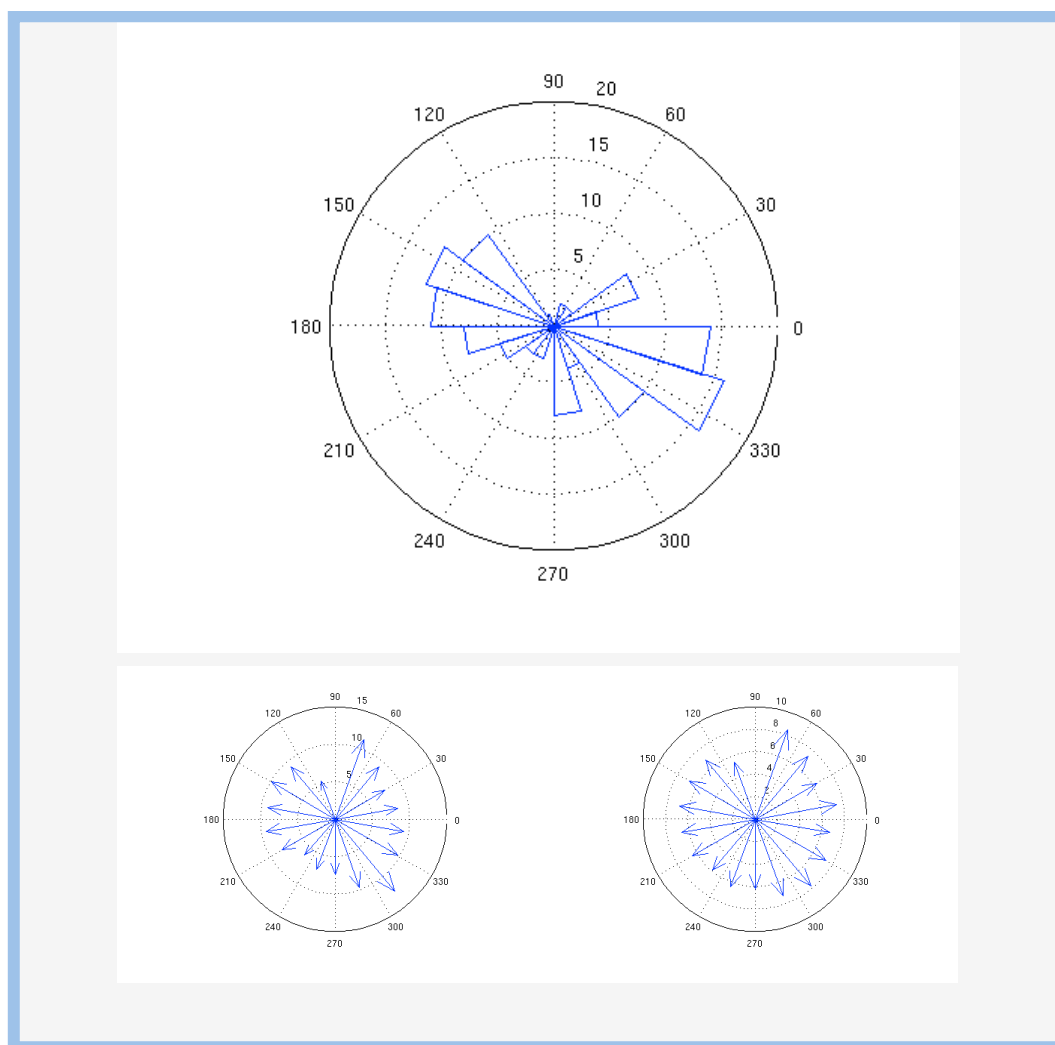


Figura 10. Statistiche dati anemometrici per la stagione invernale anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi di vento superiori ai 4 m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima del vento in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media del vento in relazione alla direzione di provenienza

In figura 10, pannello superiore sono riportati i risultati dell'analisi di frequenza degli eventi che caratterizzano il periodo selezionato. Come si nota dal diagramma polare, gli eventi sono quasi esclusivamente caratterizzati da venti di provenienza dal 4° e dal 2° quadrante ovvero da venti di Maestrale e di Scirocco. In minor quantità si ritrovano venti di provenienza dal 3° quadrante.

In particolare, tale situazione è ben rappresentata dai dall'analisi dei dati aggregati da cui si ha che il 45% degli eventi è caratterizzato da venti di Maestrale, il 30% da venti di Scirocco e il 10% da venti di Libeccio.

Per quanto riguarda le intensità massime riscontrate in tale periodo si ha, come per il caso precedente, una maggiore energia concentrata nei settori di Nord-Ovest con venti massimi di intensità pari a circa 13 m/s, mentre gli altri 2 settori principali presentano valori massimi mediamente inferiori agli 11 m/s.

Le intensità medie anche in questo caso, sono dell'ordine dei 8-9 m/s con valori superiori per i venti Occidentali (Maestrale e Libeccio) e valori inferiori per i venti Orientali, Scirocco.

RISULTATI

In questa sezione sono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione dei modelli numerici sopra descritti all'area di indagine in relazione agli scenari meteomarine considerati.

In particolare, si riportano i risultati relativi al moto ondoso, alla circolazione barotropica (integrata verticalmente) e al processo di trasporto e deposizione di sostanza organica, sotto forma di fecal pellets e mangimi, rilasciata nella colonna d'acqua a seguito della prevista attività di maricoltura.

- **SCENARIO ANNUALE**

Per quanto riguarda la simulazione annuale, i risultati relativi alla propagazione del moto ondoso e alla circolazione delle acque sono stati processati mediante un'analisi statistica con lo scopo di caratterizzare l'intero anno solare e le singole stagioni in relazione alla distribuzione di frequenza dei diversi regimi ondosi e correntometrici.

Inoltre è stata effettuata come per i dati anemometrici un'analisi degli eventi estremi e dei valori medi delle altezze d'onda e dell'intensità delle correnti in relazione alla direzione di propagazione. Anche in questo caso i risultati ottenuti sono riferiti ad un sistema di tipo Cartesiano.

- **ANALISI ONDAMETRICA**

Forzando il modello accoppiato onda-corrente descritto nel paragrafo 3.2.1 sulla griglia di calcolo di figura 2, 3 e 4 mediante i campi di vento prodotti dal modello meteorologico dell'ECMWF per l'anno 2006, sono stati simulati con un passo temporale pari a 400 secondi i processi di generazione, propagazione e dissipazione del moto ondoso.

Al fine di caratterizzare lo stato del mare nel paraggio di interesse, sono state considerati solo 2 dei diversi parametri che descrivono il moto ondoso ovvero la direzione di propagazione (DIR) e l'altezza significativa (WHS). Tali informazioni, estratte dai risultati del modello per il punto A di coordinate $39^{\circ} 14' 21''$ N – $08^{\circ} 20' 36''$ E, con frequenza esa-oraria sono state trattate mediante la già descritta analisi di frequenza.

In figura 11, pannello superiore, è riportata la distribuzione di frequenza degli eventi di moto ondoso, in relazione alla DIR ottenuta analizzando l'intero set annuale di dati.

Come si può notare, le direzioni prevalenti sono quelle del moto ondoso proveniente dai quadranti occidentali, con la maggior parte degli eventi di direzione di propagazione tra i 300° e i 330° , che per il sistema di riferimento considerato rappresentano il moto ondoso generato dal vento di Maestrale. Successivi a frequenza si individuano gli eventi di DIR compresa dagli intervalli 0° - 20° .

Quest'ultima classe di eventi è rappresentativa del moto ondoso generato dal vento di Libeccio che, a seguito degli effetti di diffrazione generati dalla presenza dell'isola di San Pietro tende a subire una rotazione di circa 20° verso Sud rispetto alla direzione principale del vento, che nel caso specifico è compreso tra i 20° e i 40° .

Si nota l'assenza di un numero significativo di eventi provenienti dai quadranti Orientali, ovvero di moto ondoso generato dal vento di Scirocco. Questo è dovuto al fatto che, nonostante dall'analisi anemometria lo Scirocco abbia una frequenza pari al 18% rispetto al totale, i venti provenienti da terra non sono in grado di generare un moto ondoso di elevata energia a causa del limitato fetch.

Questo implica che il moto ondoso così generato non sia ad esempio in grado di sostituire e invertire la direzione ai treni d'onda formati dai venti orientali generalmente caratterizzati da WHS elevate. Quindi, nel caso in cui un vento di Scirocco si alterni, come di regola ad un vento di Maestrale non sarà in grado di sostituire o resistere all'effetto dominante del vento Occidentale di fatto non influenzando o quasi lo stato del mare esso formato.

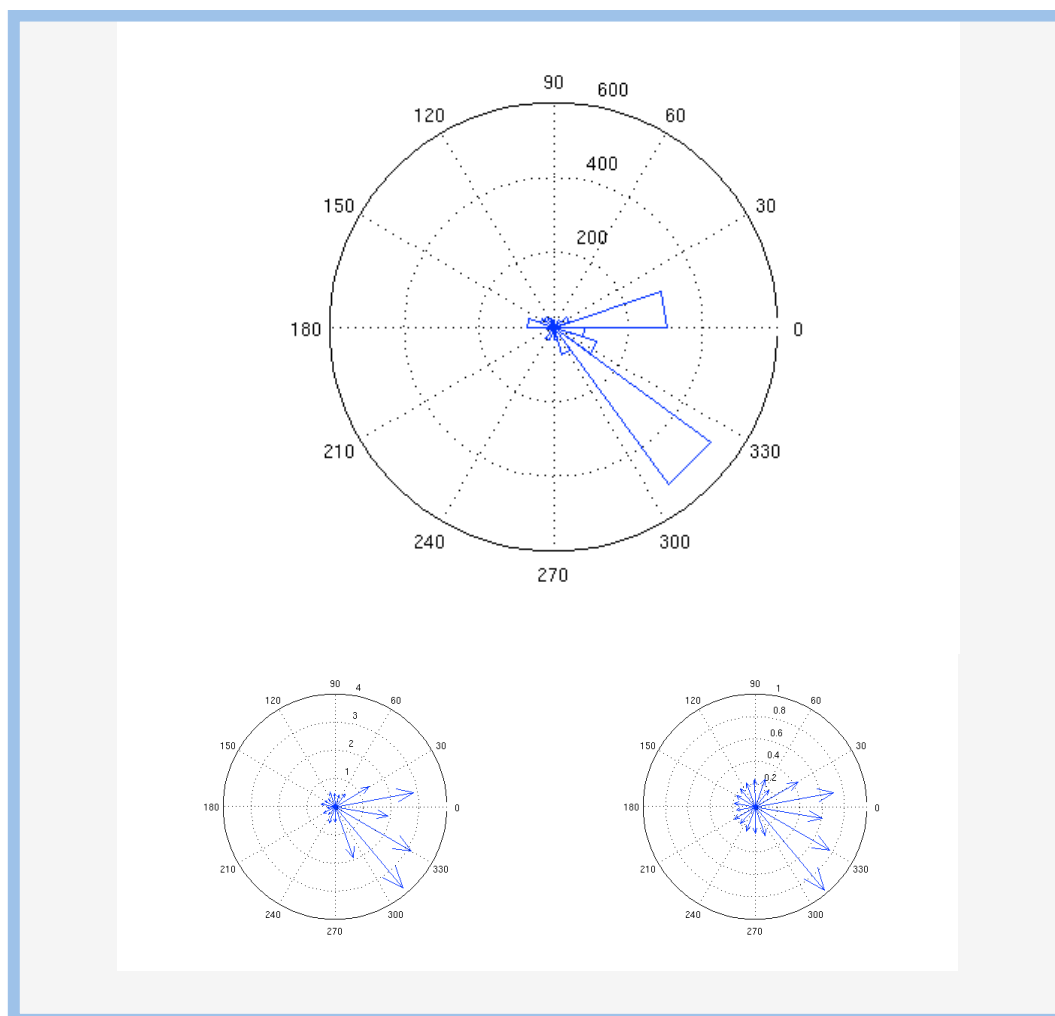


Figura 11. Statistiche dati ondametrici ottenuti da modello numerico per l'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima dell'altezza d'onda significativa (WHS) espressa in metri in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media dell'altezza d'onda significativa (WHS) espressa in metri in relazione alla direzione di provenienza.

Dai dati aggregati risulta quindi che il moto ondoso generato dai venti di Maestrale rappresentano il 59% degli eventi, quello generato dai venti di Libeccio il 30%, e il rimanente 11% suddiviso tra Scirocco e le altre direzioni. Per quanto riguarda le intensità delle WHS delle diverse DIR di moto ondoso, in figura 11, pannelli inferiori, sono riportate le intensità massime e medie delle WHS in relazione alla DIR sempre secondo il sistema cartesiano di riferimento.

Dal pannello sinistro si nota come i valori massimi di WHS simulati sono stati dell'ordine dei 4 m e generati da venti di Maestrale. Per quanto riguarda il moto ondoso generato dai quadranti Sud-

Ovest si nota un picco massimo di circa 3 metri nell'intervallo tra i 0° e i 20° corrispondente quindi ad eventi generati da venti di Libeccio. Per quanto riguarda le altre direzioni, in particolare le direzioni caratteristiche del moto ondoso generato dai venti Orientali, nella fattispecie il vento di Scirocco, i massimi di intensità sono stati sempre inferiori al metro, confermando l'ipotesi effettuata sull'effetto del limitato fetch del venti da terra sulla generazione del moto ondoso nell'area di interesse.

Dal pannello destro infine si evince come le intensità medie delle WHS nell'area di indagine siano mediamente inferiori al metro con valori decrescenti dalle direzioni di propagazione Sud-Orientali (onda di Maestrale) alle direzioni di propagazione Nord-Orientali (onda di Libeccio). Valori medi di WHS dell'ordine dei 0.2-0.3 m si riscontrano infine per il moto ondoso generato da venti di Scirocco.

Analogamente allo studio anemometrico, un'ulteriore analisi statistica è stata effettuata suddividendo il set di dati in relazione alle diverse stagioni ottenendo 4 distinti sub-set per i quali sono stati analizzati sia la distribuzione di frequenza sia le intensità massime e medie delle WHS.

In figura 12 sono riportati i diagrammi polari ottenuti per il primo sub-set rappresentativo la stagione primaverile.

Come si può notare, la variabilità meteorologica del periodo considerato è ben rappresentata dai risultati ottenuti che mettono in luce come anche per i mesi da Marzo a Maggio, le direzioni prevalenti del moto ondoso siano quelle tipicamente indotte dai venti di Maestrale e Libeccio.

I dati aggregati relativi a questo periodo presentano una distribuzione statistica caratterizzata da: 71% moto ondoso generato da venti di Maestrale, 25% moto ondoso generato da venti di Libeccio e il rimanente 4% moto ondoso generato da venti di altri quadranti.

Per quanto riguarda le intensità delle WHS in relazione alla direzione di propagazione, in figura 12, pannelli inferiori, sono riportate le intensità massime e medie sempre secondo il sistema cartesiano di riferimento.

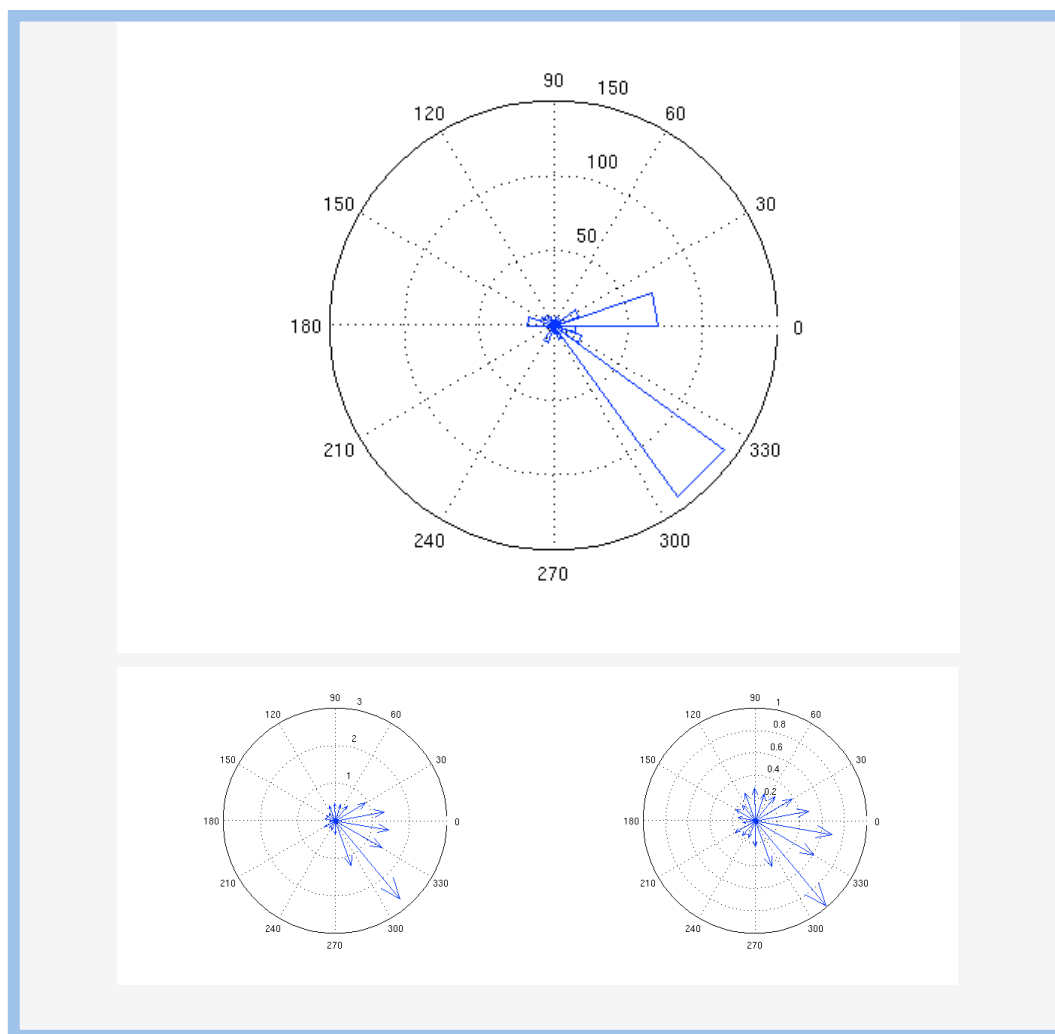


Figura 12. Statistiche dati ondametrici ottenuti da modello numerico per la stagione primaverile dell'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima dell'altezza d'onda significativa (WHS) espressa in metri in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media dell'altezza d'onda significativa (WHS) espressa in metri in relazione alla direzione di provenienza.

Dal pannello sinistro si nota come i valori massimi durante il periodo primaverile siano dell'ordine dei 3 m con valori superiori per il moto ondoso generato dai venti da Nord Ovest rispetto ai venti provenienti dagli altri quadranti. In particolare, rispetto all'analisi annuale, le WHS dell'onda generata dai venti di Libeccio presentano valori inferiori non superiori ai 2 m. generati dai venti Occidentali e valori inferiori, dell'ordine dei 0.2-0.3 cm per gli eventi generati da venti Orientali.

per il quale si ha un'abbondanza di venti di Maestrone a scapito sia dei regimi di Libeccio e Scirocco. I dati aggregati per i 3 mesi considerati indicano come , l'87 % degli eventi sono caratterizzati da moto ondoso generato da venti provenienti dal 4° quadrante, Nord-Ovest e il rimanente suddiviso per gli altri settori. Per quanto riguarda le intensità massime delle WHS raggiunte in questo periodo, pannello inferiore sinistro di figura 13, sono stati registrati valori pari a circa 2 m per le direzione del moto ondoso generato da venti di Maestrone e di poco più di 0.5 m per le WHS del moto ondoso originato da venti di Libeccio. I valori medi ottenuti per il periodo di indagine, pannello destro, sono per entrambi sempre inferiori al metro con valori massimi per il settore di Maestrone e inferiori a 0.4 m per gli altri settori.

In figura 14 sono riportati i risultati ottenuti per il periodo da Settembre a Novembre, rappresentativo della stagione autunnale. Dalla distribuzione di frequenza si nota la presenza delle 2 principali direzioni del moto ondoso rappresentative dei regimi di Maestrone e Libeccio. In particolare, i dati aggregati mettono in luce suddivisione della distribuzione delle classi di frequenza tra i 2 fetch principali con valori di 45% di eventi generati da venti di Nord-Ovest (Maestrone), 38% di eventi generati da venti di provenienza Sud-Ovest (Libeccio)

Dalle analisi sulle intensità massime delle WHS, pannello inferiore sinistro, si nota come durante questo periodo si registrano le altezze massime con valori dell'ordine dei 4 m in corrispondenza di moto ondoso generato da venti di Maestrone. Analogamente ai periodi precedenti, il moto ondoso originato dai venti di Libeccio presenta intensità massime mediamente inferiori rispetto a quello indotto dal Maestrone tuttavia con valori massimi ragguardevoli e dell'ordine dei 3 m. Per quanto riguarda i valori medi si nota come le medie si attestano su intensità sempre inferiori al 1.5 metri, tuttavia superiori ai valori riscontrati per i periodi estivo e primaverile.

L'ultimo periodo selezionato è il periodo invernale, dal mese di Dicembre al mese di Febbraio.

In figura 15, pannello superiore sono riportati i risultati dell'analisi di frequenza degli eventi.

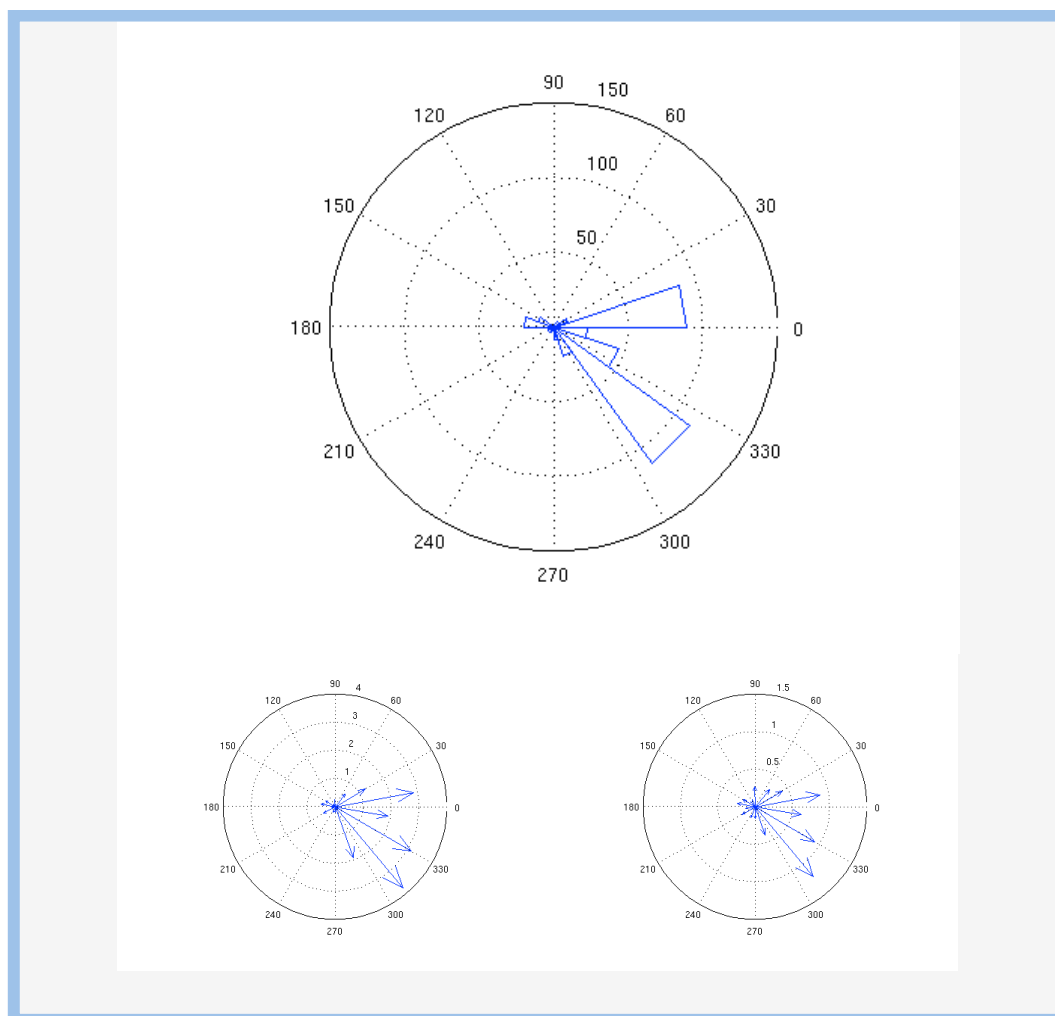


Figura 14. Statistiche dati ondametrici ottenuti da modello numerico per la stagione autunnale dell'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima dell'altezza d'onda significativa (WHS) espressa in metri in relazione alla direzione di provenienza; intensità media dell'altezza d'onda significativa (WHS) espressa in metri in relazione alla direzione di provenienza.

Come si nota dal diagramma polare, il moto ondoso che caratterizza il periodo selezionato è quello generato dai venti di Maestrale e Libeccio con una spiccata prevalenza di quest'ultimi rispetto i precedenti.

Dai dati aggregati risulta infatti che il 43% degli eventi considerati sia generato de venti di Libeccio mentre un 31% sia caratterizzato da moto ondoso originato da venti di Maestrale.

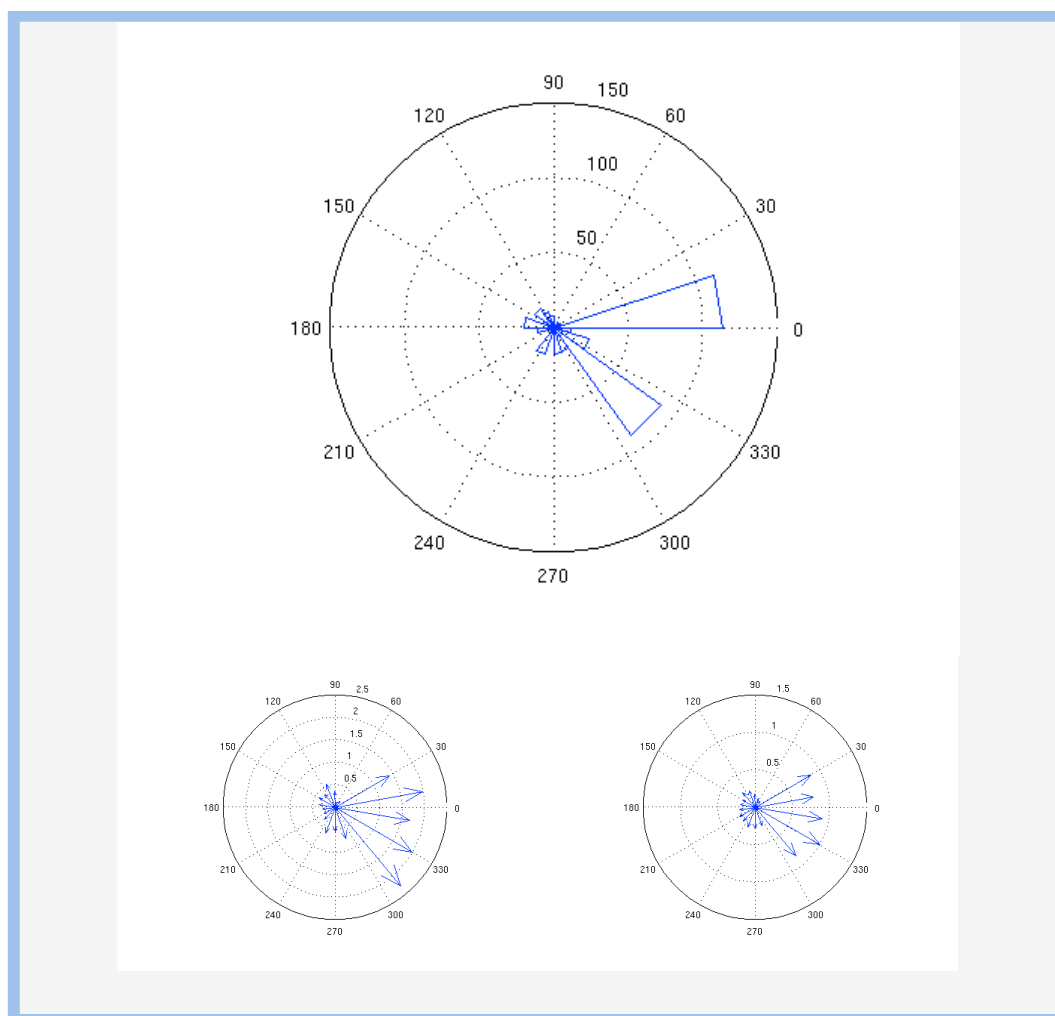


Figura 15. Statistiche dati ondametrici ottenuti da modello numerico per la stagione invernale dell'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima dell'altezza d'onda significativa (WHS) espressa in metri in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media dell'altezza d'onda significativa (WHS) espressa in metri in relazione alla direzione di provenienza.

Per quanto riguarda le intensità massime riscontrate in tale periodo si ha, come per il caso precedente, una maggiore energia concentrata nelle direzioni rappresentative del moto ondoso generato dai venti Occidentali con WHS massime inferiori ai 2.5 m, con valori quasi del tutto analoghi per i fetch di Maestrale e Libeccio.

Le WHS medie massime anche in questo caso, sono dell'ordine del metro con valori superiori per il moto ondoso indotto dai venti Occidentali (Maestrale e Libeccio) rispetto a quello caratteristico degli altri settori.

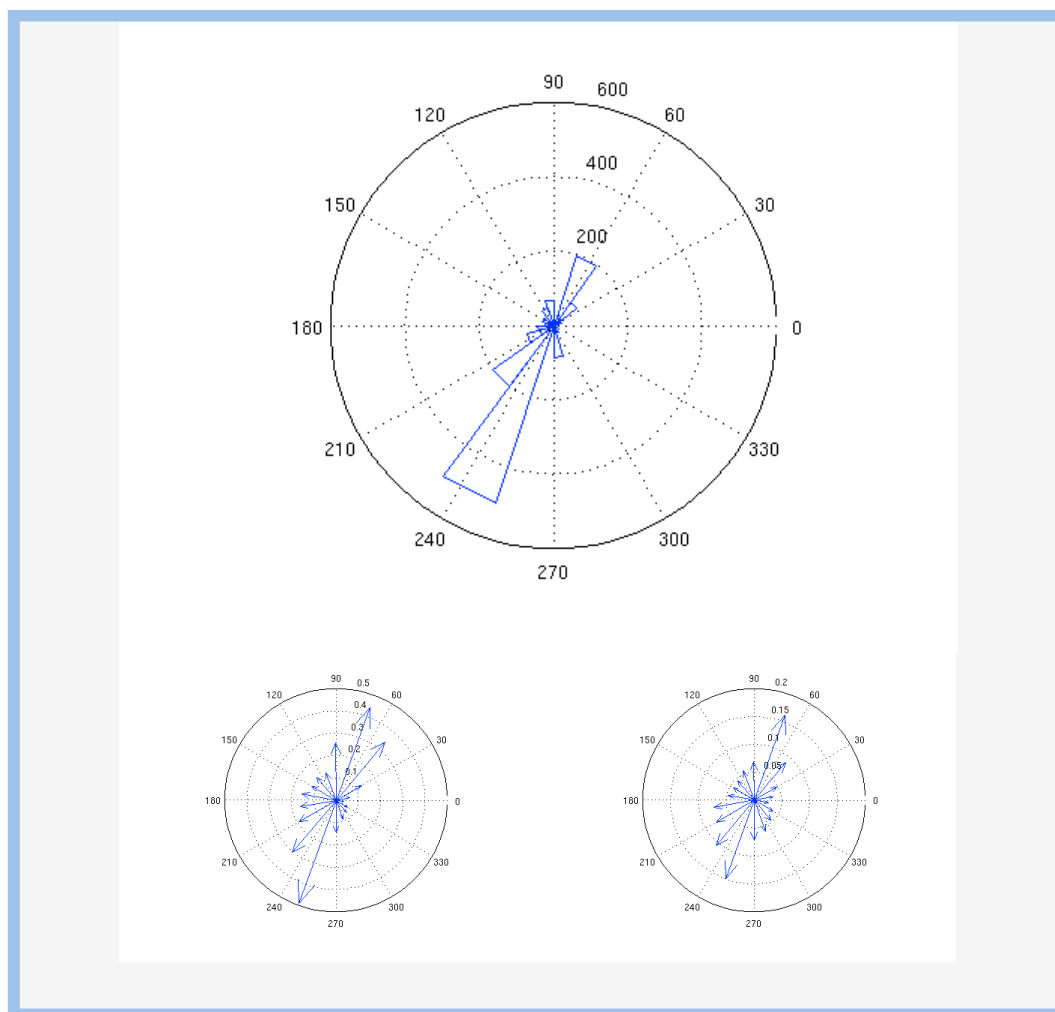


Figura 16. Statistiche dati correntometrici ottenuti da modello numerico per l'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione di provenienza.

- **ANALISI CORRENTOMETRICA**

Sempre forzando il modello accoppiato onda-corrente descritto nel paragrafo 3.2.1 sulla griglia di calcolo di figura 2, 3 e 4 mediante i campi di vento prodotti dal modello meteorologico dell'ECMWF per l'anno 2006, è stata simulata con un passo temporale pari a 40 secondi la circolazione bidimensionale delle acque nell'area di indagine. La caratterizzazione idrodinamica del paraggio di interesse, è stata effettuata mediante l'estrazione della serie temporale di velocità

barotropiche per l'intero periodo considerato nel punto A di coordinate 39° 14' 21" N – 08° 20' 36" E, con frequenza esaoraria e successiva analisi statistica.

In figura 16, pannello superiore, è riportata la distribuzione di frequenza della corrente mediata sulla colonna d'acqua, in relazione alla direzione di percorrenza secondo il sistema di riferimento Cartesiano, ottenuta analizzando l'intero set annuale di dati.

Come si può notare, le direzioni prevalenti sono i 60°, ovvero corrente in direzione Nord-Est e i 240°, ovvero corrente in direzione Sud.-Ovest. Queste 2 direzioni rappresentano le circolazione generata rispettivamente dai venti di Libeccio (60°) e dai venti di Maestrale (240°). La deviazione della corrente media rispetto alle direzioni dei venti principali è dovuta a diversi fattori i di cui principali sono: l'effetto batimetrico, ovvero la tendenza del flusso medio ad orientarsi parallelamente rispetto le isobate e, in modo minor gli effetti indotti dalla forza di Coriolis.

Dai dati aggregati risulta che la corrente barotropica ha per 67% dei casi direzione Sud-Ovest, per il 21% dei casi direzione Nord-Est e per il restante 12% una direzione variabile tra si settori Orientali e Occidentali.

Per quanto riguarda le intensità cella corrente in relazione alle diverse direzioni, in figura 16, pannelli inferiori, sono riportate le intensità massime e medie sempre secondo il sistema cartesiano di riferimento.

Dal pannello sinistro si nota come i valori massimi di velocità simulati sono stati dell'ordine dei 0.5 m/s e in direzione Sud-Est e quindi indotti da venti di Maestrale. Per quanto riguarda le correnti generate dai venti di Libeccio si nota un picco massimo di circa 0.45 m/s nell'intervallo tra i 60° e i 90°. Per quanto riguarda le altre direzioni i massimi di intensità sono stati sempre inferiori ai 0.2-0.3 m/s. Dal pannello destro si nota come le intensità medie delle correnti nell'area di indagine siano mediamente inferiori a 0.15–0.2 m/s con valori massimi per i settori di Sud-Ovest (corrente di Maestrale) e Nord-Est (corrente di Libeccio).

Anche in questo caso, un'ulteriore analisi statistica è stata effettuata suddividendo il set di dati in relazione alle diverse stagioni ottenendo 4 distinti sub-set per i quali sono stati analizzati sia la distribuzione di frequenza sia le intensità massime e medie delle correnti barotropiche.

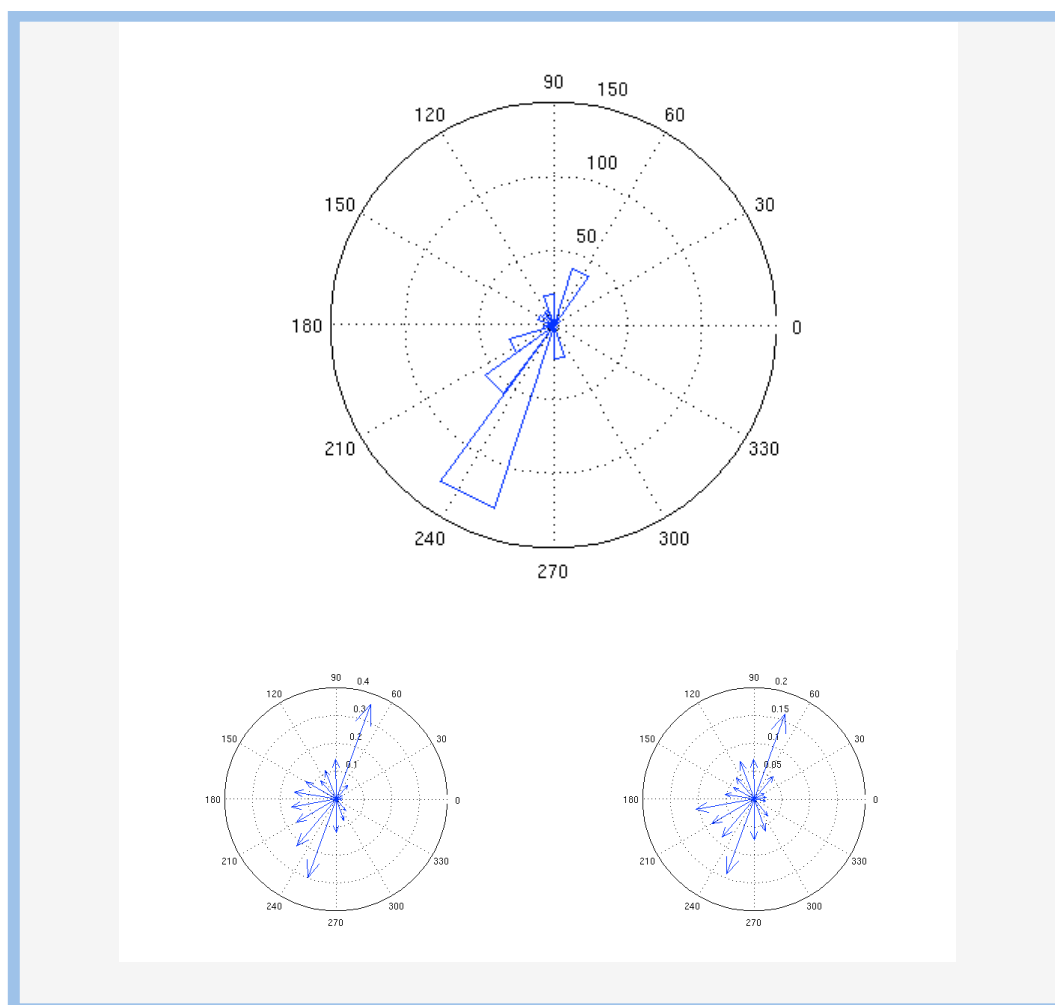


Figura 17. Statistiche dati correntometrici ottenuti da modello numerico per la stagione primaverile dell'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione di provenienza; intensità media della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione di provenienza.

In figura 17 sono riportati i diagrammi polari ottenuti per il primo sub-set rappresentativo la stagione primaverile che comprende i mesi di Marzo, Aprile e Maggio. Come si può notare, anche per la parte correntometrica, la variabilità meteorologica del periodo considerato è ben rappresentata dai risultati ottenuti che mettono in luce come le direzioni prevalenti del moto ondoso siano quelle tipicamente indotte dai venti di Maestrale (240°) e Libeccio (60°).

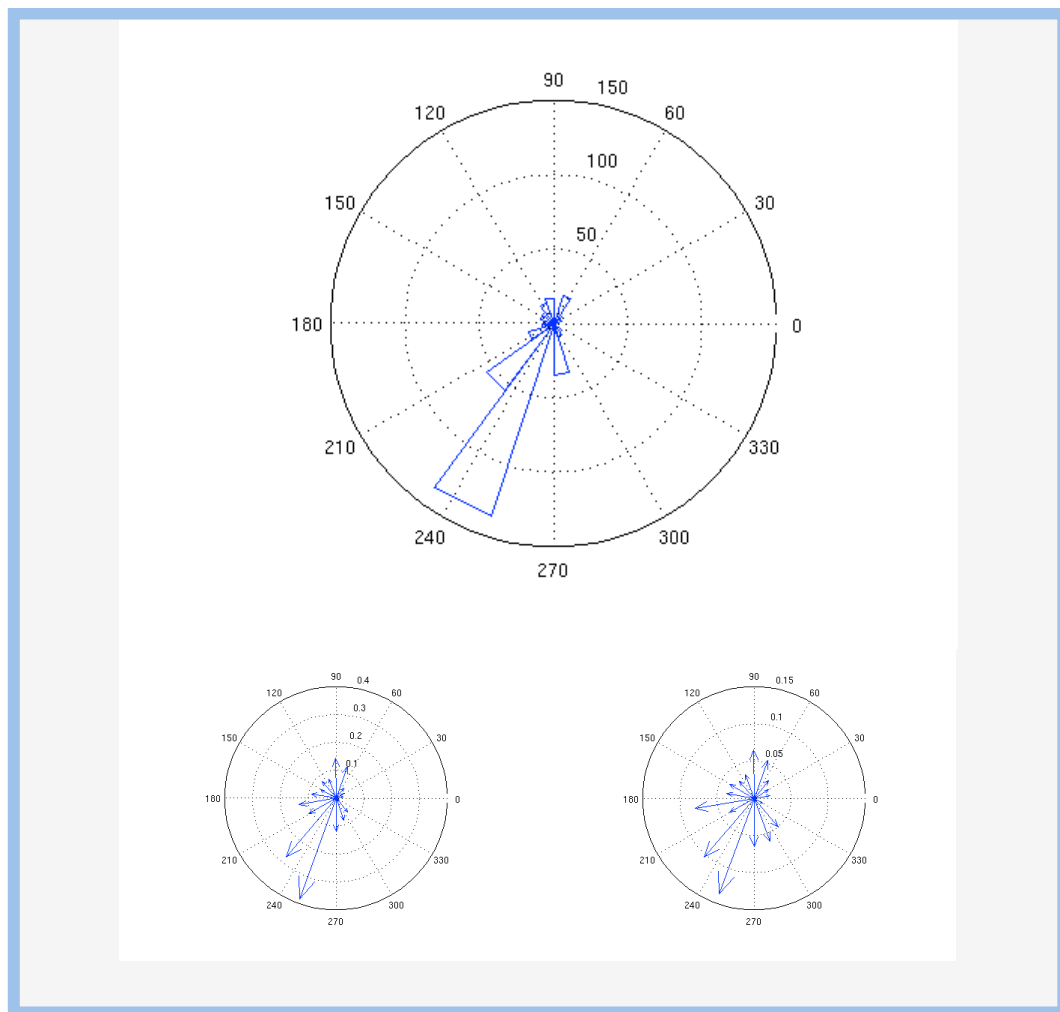


Figura 18. Statistiche dati correntometrici ottenuti da modello numerico per la stagione estiva dell'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione di provenienza.

I dati aggregati relativi a questo periodo presentano una distribuzione statistica simile a quella ottenuta per il moto ondoso e caratterizzata da una maggior

presenza di corrente in direzione Sud-Ovest circa 75% del totale e una minor , ma significativa presenza di correnti in direzione Nord-Est, circa il 12%. Per quanto riguarda le velocità delle correnti in relazione alla direzione di percorrenza, in figura 17, pannelli inferiori, sono riportate le intensità massime e medie sempre secondo il sistema cartesiano di riferimento.

Dal pannello sinistro, si nota come i valori massimi durante il periodo primaverile siano dell'ordine dei 0.35 m/s con valori superiori per le correnti dirette verso Nord-Est e generate dai venti di Libeccio rispetto a quelle in direzione Sud-Ovest generate dai venti di Maestrale, che raggiungono valori massimi inferiori ai 0.3 m/s. Le intensità medie delle velocità delle correnti non superano i 0.15 m/s con valori superiori per le correnti generate dai venti di Libeccio e Maestrale.

In figura 18 sono riportati i risultati ottenuti per il periodo da Giugno a Agosto, rappresentativo della stagione estiva. Come per la stagione primaverile, anche durante la stagione estiva, si nota, pannello superiore, come vi sia una spiccata predominanza di una circolazione delle acque generata da venti di Maestrale e una ridotta presenza di correnti generate da venti di Libeccio e da venti provenienti dagli altri quadranti. Anche in questo caso, come per il moto ondoso (paragrafo 4.1.1), i risultati rispecchiano la distribuzione anemometria del periodo considerato (figura 8) per il quale si ha un'abbondanza di venti di Maestrale a scapito sia dei regimi di Libeccio e Scirocco. I dati aggregati per i 3 mesi considerati indicano come , l'89 % degli eventi sono caratterizzati correnti generate da venti di Maestrale e il rimanente suddiviso per gli altri settori. Per quanto riguarda le intensità massime delle velocità barotropiche raggiunte in questo periodo, pannello inferiore sinistro di figura 18, sono stati registrati valori pari a circa 0.4 m/s per le direzioni di percorrenza Sud-Ovest, correnti generate da venti di Maestrale, mentre valori massimi di poco superiori ai 0.1 m/s per le correnti indotte dai venti di Libeccio. I valori medi ottenuti per il periodo di indagine, pannello destro, sono per entrambi i settori sempre inferiori ai 0.15 m/s con valori superiori per i settori di Sud-Ovest.

In figura 19 sono riportati i risultati ottenuti per il periodo da Settembre a Novembre, rappresentativo della stagione autunnale. Dalla distribuzione di frequenza si nota la presenza delle 2 principali direzioni della corrente rappresentative delle circolazioni indotte dai regimi di Maestrale e Libeccio. In particolare, i dati aggregati mettono in luce come per i risultati ondametrici una suddivisione della distribuzione delle classi di frequenza tra queste 2 direzioni principali con valori di 43% di eventi rappresentativi di correnti generate da venti di Nord-Ovest (Maestrale), 38% di eventi rappresentativi di correnti generate da venti di provenienza Sud-Ovest (Libeccio) .

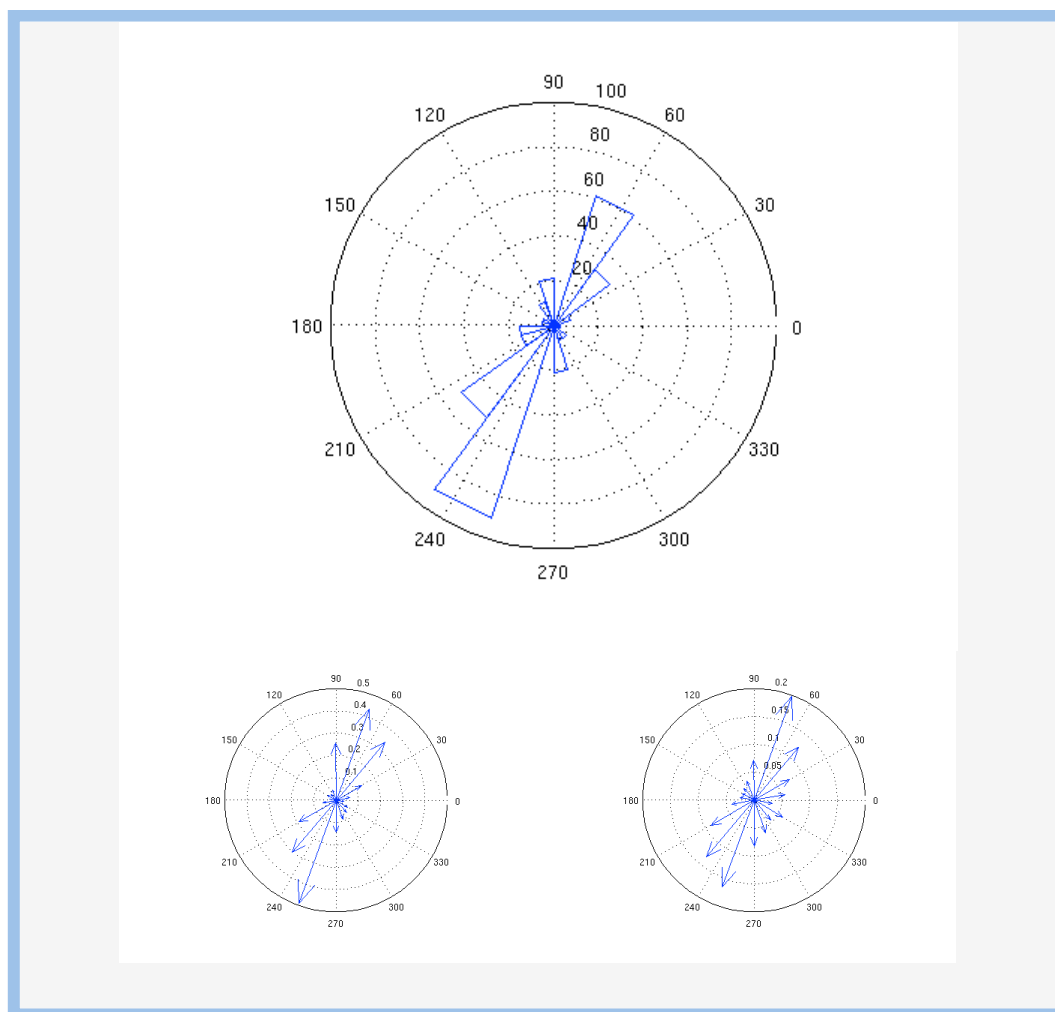


Figura 19. Statistiche dati correntometrici ottenuti da modello numerico per la stagione autunnale dell'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione di provenienza.

Dalle analisi sulle intensità massime delle velocità simulate, pannello inferiore sinistro, si nota come durante questo periodo si registrano i massimi assoluti dell'intero anno con valori dell'ordine dei 0.5 m/s in corrispondenza della direzione di percorrenza dei 250° rappresentativa della circolazione indotta da venti di Maestrale. Per quanto riguarda la circolazione indotta dai venti di Libeccio le intensità massime risultano mediamente inferiori rispetto a quelle indotte dal Maestrale con valori dell'ordine dei 0.45 m/s.

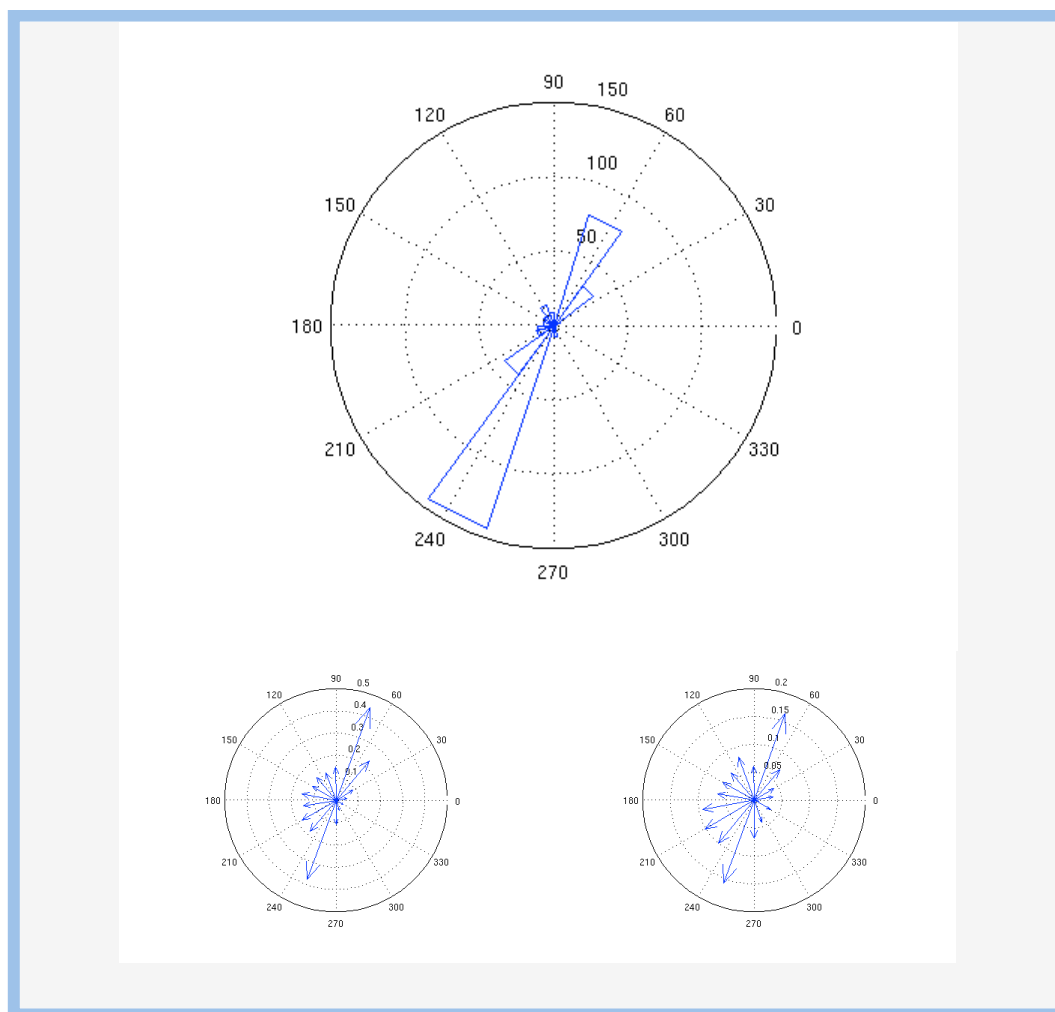


Figura 20. Statistiche dati correntometrici ottenuti da modello numerico per la stagione invernale dell'anno 2006: distribuzione di frequenza degli eventi in relazione alla direzione di provenienza; intensità massima della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione dei provenienza; intensità media della corrente orizzontale mediata sulla colonna d'acqua espressa in m/s in relazione alla direzione di provenienza.

Per quanto riguarda i valori medi si nota come le medie si attestano su intensità sempre inferiori al 0.2 m/s, tuttavia superiori ai valori riscontrati per i periodi estivo e primaverile. Come per il moto ondoso, anche per quanto riguarda le velocità barotropiche, il periodo autunnale registra i massimi assoluti e i valori medi maggiori.

Infine, il periodo selezionato è il periodo invernale, dal mese di Dicembre al mese di Febbraio.

In figura 20, pannello superiore sono riportati i risultati dell'analisi di frequenza degli eventi. Come si nota dal diagramma polare anche in questo caso, come per il precedente s ha una quasi equa

distribuzione degli eventi tra le direzioni di Nord-Ovest e Sud-Est. Dai dati aggregati risulta infatti che il 50% degli eventi considerati sia generato da venti di Libeccio mentre un 30% sia caratterizzato da moto ondoso originato da venti di Maestrale.

Per quanto riguarda le intensità massime riscontrate in tale periodo si ha una maggiore energia concentrata nelle direzioni rappresentative delle correnti generate dai venti di Libeccio con velocità massime dell'ordine dei 0.45 m/s, mentre le velocità massime delle correnti generate dai venti Maestrale sono in questo caso inferiori ai 9, con valori quasi del 0.4 m/s.

Per quanto riguarda i valori medi delle velocità delle correnti, anche in questo caso, sono dell'ordine dei 0.15 m/s con valori analoghi sia per le direzioni Sud-Ovest (Maestrale) che per le direzioni Nord-Est (Libeccio) e sempre superiori a quelli riscontrati per gli altri settori.

- **ANALISI DEI PROCESSI DI TRASPORTO**

Utilizzando il modello accoppiato onda-corrente e trasporto, è stata simulata per l'intero anno 2006 la dinamica di trasporto e deposizione dei fecal pellets prodotti e dei mangimi utilizzati nell'ambito dell'attività prevista di maricoltura.

Come anticipato, nel paragrafo 2.1 le caratteristiche fisiche dei rifiuti organici e dei mangimi utilizzabili non sono note per la specie ittica considerata, conseguentemente la simulazione stata effettuata assumendo tipologie di escrementi e di mangimi caratteristiche degli allevamenti di spigole e orate, con l'eccezione dell'introduzione come ulteriore tipologia di mangime di pesci azzurri di piccola taglia, nella fattispecie, sarde.

Le quantità di particelle e la relativa densità di sostanza organica ad esse associate, utilizzate per simulare il processo di dispersione e la deposizione delle diverse classi di pellets e mangimi sono state scelte in modo arbitrario, come discusso nel paragrafo 2.3.

Mediante rilasci con frequenza giornaliera, nei 4 punti previsti (paragrafo 2.3), sono stati riprodotti per ogni particella simulata i processi di trasporto orizzontale ad opera della corrente media, del vento e del moto ondoso e i processi di sprofondamento modulati dai diversi pesi specifici che caratterizzano le componenti considerate.

In particolare, ad ogni passo temporale pari a 40 secondi, il modello numerico è in grado di integrare nello spazio tri-dimensionale il percorso seguito da ogni particella fino alla deposizione sul fondale.

Al momento della deposizione, si assume, visto le ragguardevoli profondità dell'area in esame, che la particella, a prescindere dal suo peso specifico, non risenta degli effetti di risospensione o di trasporto al fondo.

Ad ogni intervallo temporale, la quantità di particelle depositatesi viene aggiornata in modo tale da ottenere come risultato finale una mappa di distribuzione relativa del flusso di sostanza organica nei sedimenti.

Tale dato, in questo studio reso dimensionale dalla mancanza di informazioni specifiche riguardo la tipologia e quantità di mangimi utilizzati, permette comunque l'individuazione della posizione e dell'estensione dell'area soggetta ad accumulo della sostanza organica prodotta dall'attività di maricoltura.

In figura 21 si riporta quindi, la distribuzione relativa espressa in modo adimensionale su scala normalizzata del flusso di sostanza organica medio annuale dovuto all'attività di maricoltura.

Si nota come la posizione di massimo accumulo, area rossa sia genericamente spostata di poche centinaia di metri rispetto al centro del quadrilatero costituito dai 4 punti di rilascio (cerchi verdi). Inoltre si può notare come l'estensione massima sia di poco superiore all'area compresa dagli stessi punti considerati con una distanza massima di 500 metri circa dal centro del quadrilatero formato dai punti di rilascio.

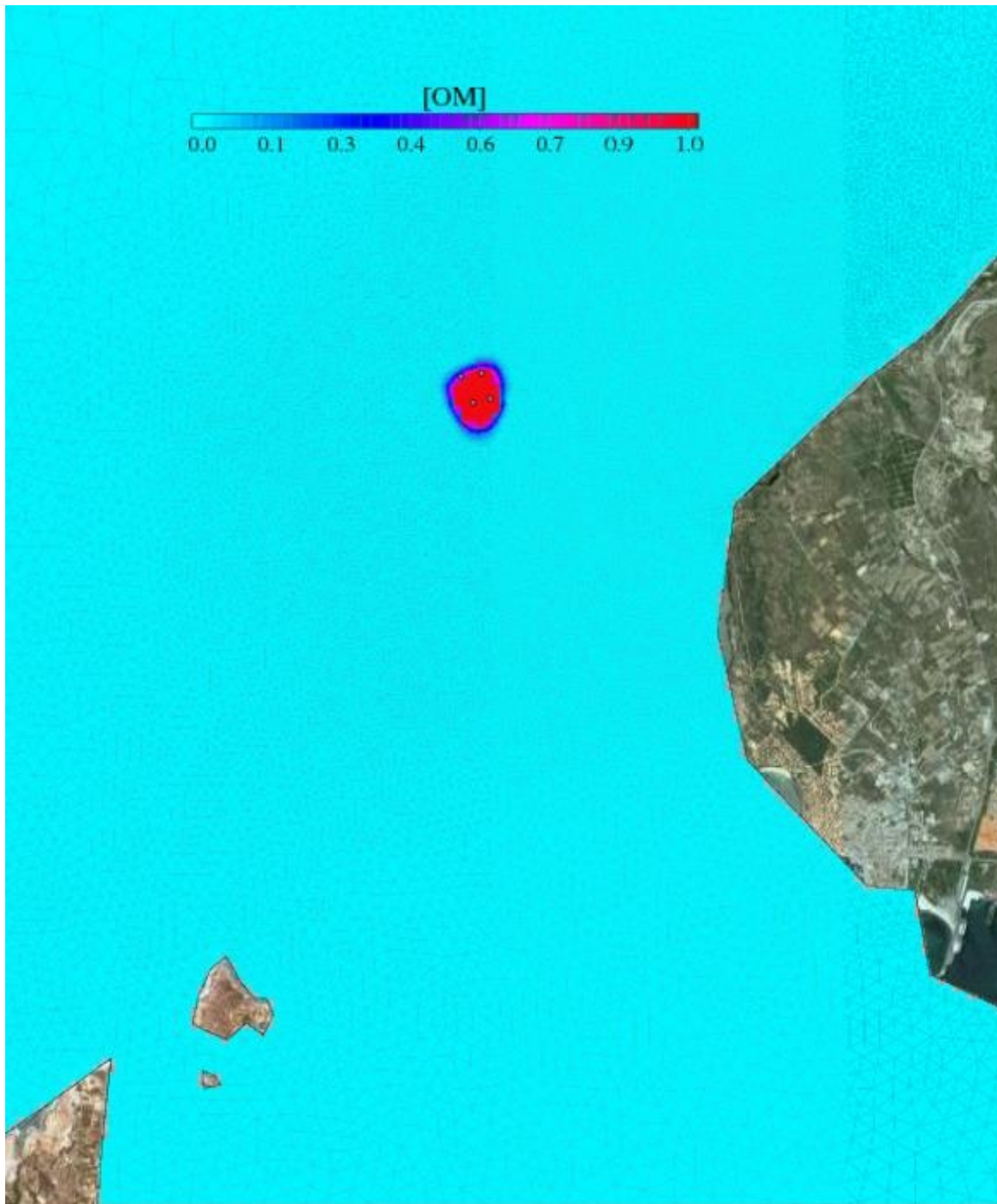


Figura 21. Distribuzione relativa del flusso di sostanza organica nei sedimenti espresso in unità adimensionale a seguito del funzionamento degli impianti di acquicoltura durante l'intero anno 2006.

- **SCENARIO CON VENTO DI MAESTRALE**

Al fine di valutare in dettaglio quali siano le caratteristiche ondametriche, correntometriche del paraggio di interesse, nonché la dinamica del processo di trasporto e deposizione della sostanza organica in relazione all'azione del vento di Maestrale, è stata effettuata una simulazione sintetica in cui è stata considerata come condizione forzante un vento di Maestrale di intensità pari a 20 m/s. Tale valore di intensità, superiore al massimo individuato per l'anno 2006, è stato scelto al fine di effettuare un'analisi per estremi che possa garantire di individuare i limiti della potenziale area di deposizione delle particelle prodotte dall'attività di acquicoltura. Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalla simulazione effettuata.

In figura 22 è rappresentata la distribuzione della WHS e la direzione di propagazione del moto ondoso generato dal vento di Maestrale. Si può notare come la WHS massima simulata per l'area sia propriamente in corrispondenza ai 4 punti di rilascio (circoli verdi) e raggiunga valori ragguardevoli anche superiori ai 4.1 metri.

Per quanto riguarda la direzione del moto ondoso, questa, per l'area di interesse è di circa 330° secondo il sistema di riferimento cartesiano. Si può notare inoltre come il vento di Maestrale sia in grado di generare un moto ondoso vigoroso in tutta l'area di indagine ad esclusione dei tratti di mare compresi tra l'isola di San Pietro e l'isola di Sant'Antioco.

Per quanto riguarda la circolazione delle acque indotta dal vento di Maestrale, in figura 23 si riporta la distribuzione della corrente barotropica (mediata sulla colonna d'acqua), generata dal vento di Maestrale e dal moto ondoso.

Dai risultati si nota come in prossimità dei 4 punti considerati (circoli verdi) si registri un'intensificazione del flusso in direzione Sud-Ovest i cui effetti si riverberano sull'area di indagine con un aumento dell'intensità media della corrente che nello specifico raggiunge anche valori di 0.7 m/s. La direzione del campo di moto è prevalentemente quella precedentemente individuata dei 240° che caratterizza gli eventi di Maestrale.

Il vento di Maestrale genera un flusso meridionale che interessa tutta l'area di indagine, trasportando acque di origine litoranea verso l'area di indagine che defluiscono in parte verso Sud a ridosso dell'isola di San Pietro e in parte verso Sud-Ovest oltre l'isola di San Pietro.

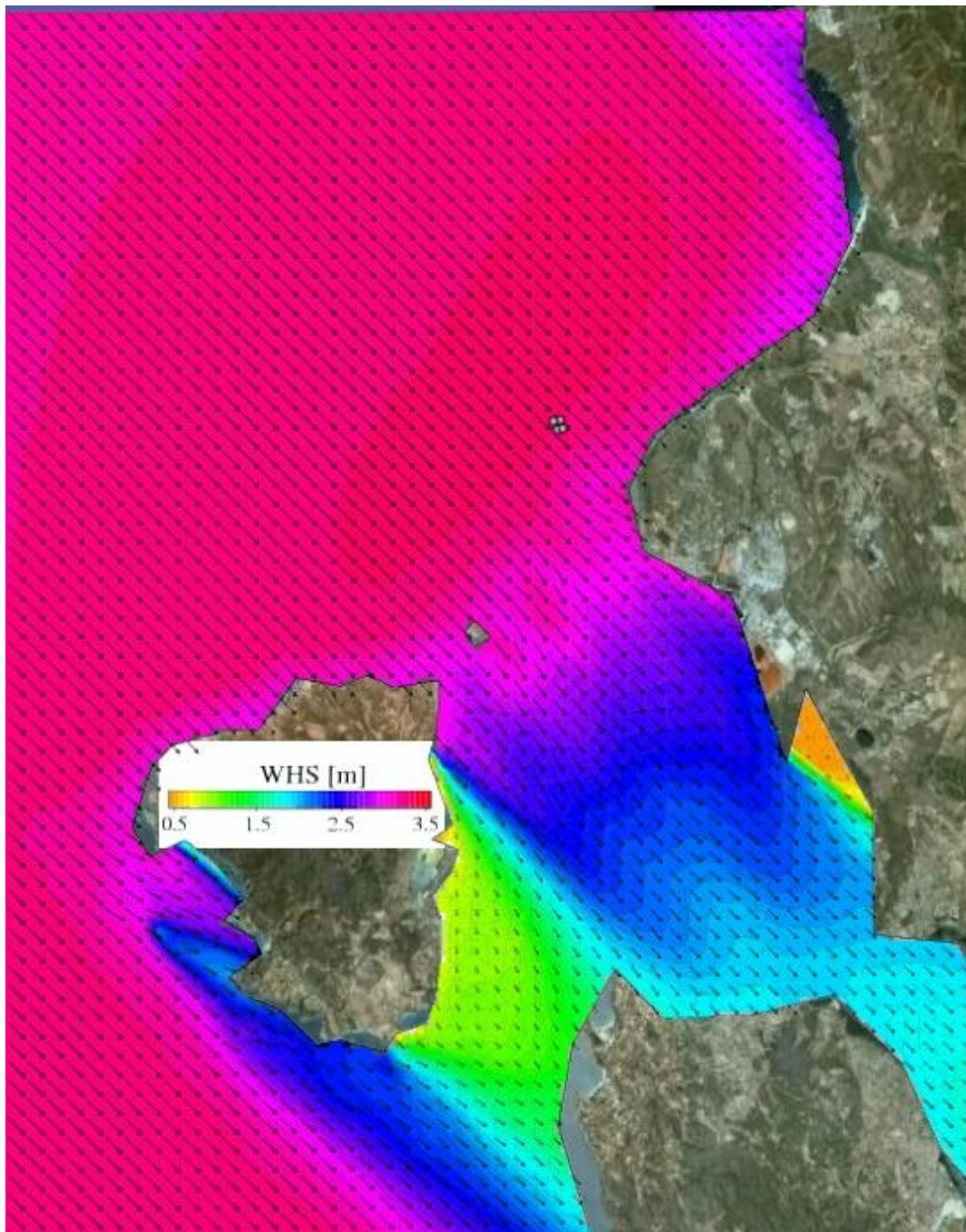


Figura 22. Distribuzione dell'altezza significativa del moto ondoso (WHS) espressa in metri durante un evento di Maestrale della durata di 96 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

Si nota come in prossimità dei capi esterni dell'isola di San Pietro e del canale di Sant'Antioco si riscontrano intensificazioni del flusso dovuti principalmente all'effetto Bernoulli.

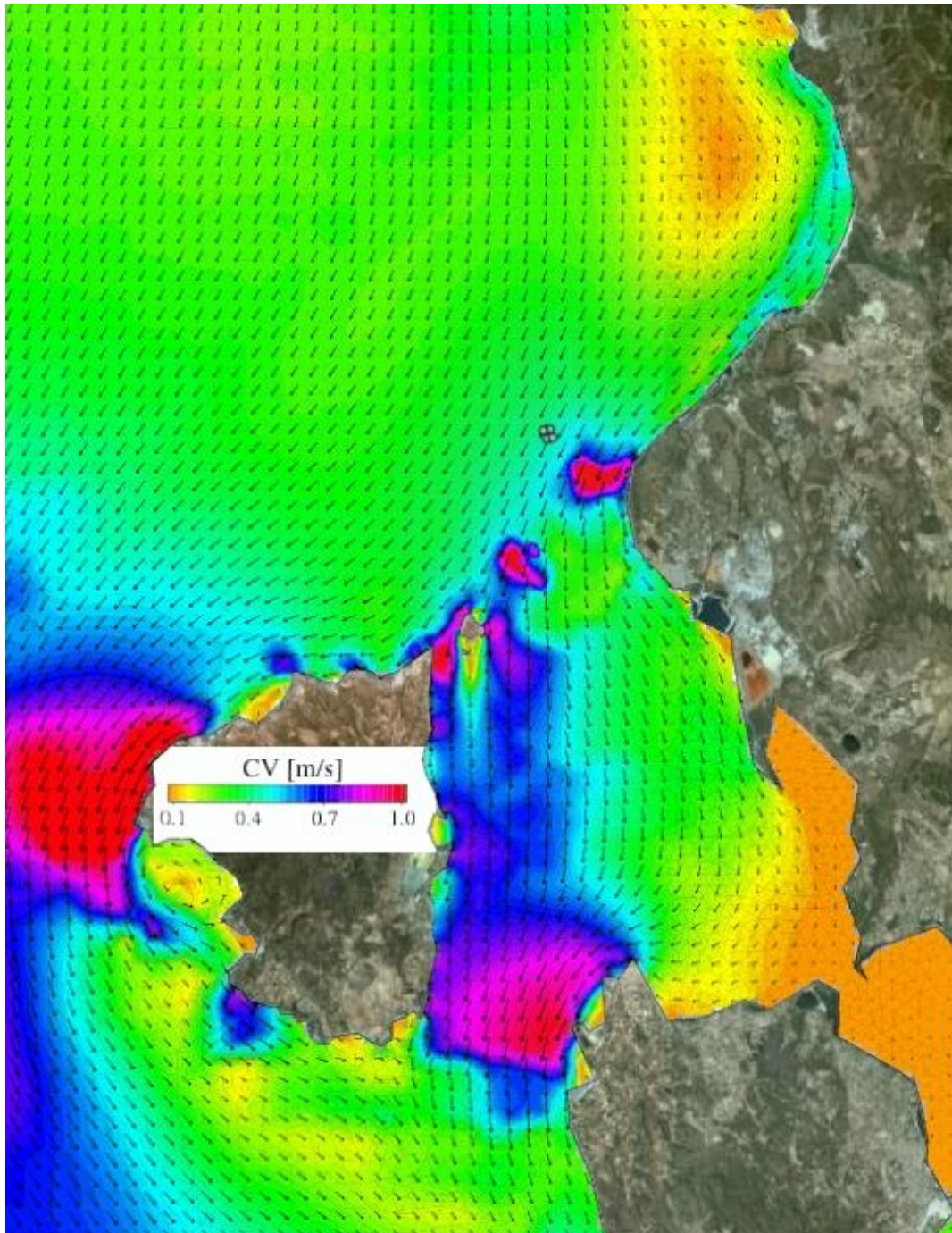


Figura 23. Distribuzione dell'intensità e direzione della corrente media sulla colonna d'acqua espressa in m/s durante un evento di Maestrale della durata di 96 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

Si considerino infine i risultati ottenuti dalla simulazione dei processi di trasporto e deposizione delle particelle di sostanza organica prodotte dall'attività di maricoltura.

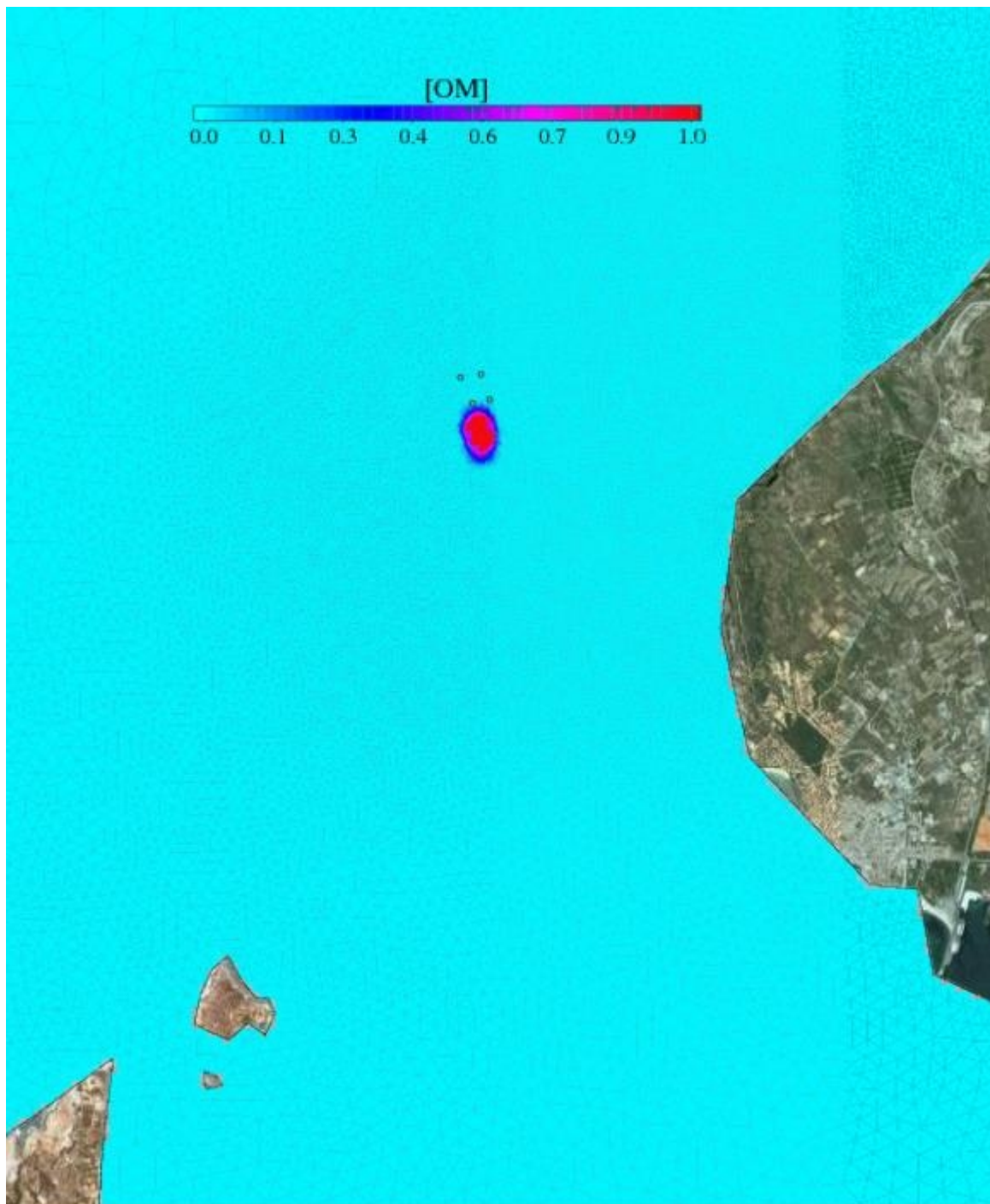


Figura 24. Distribuzione relativa del flusso di sostanza organica nei sedimenti espresso in unità adimensionale a seguito del funzionamento degli impianti di acquicoltura durante un'evento di Maestrone della durata di 96 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

Come per la simulazione annuale, sono state scelte sia il numero di particelle sia la densità di sostanza organica ad esse associata in modo arbitrario. Durante i 4 giorni di simulazione prevista, il rilascio delle particelle è stato effettuato dopo 72 ore dall'inizio della simulazione, all'inizio del 3

giorno al fine di garantire un trasporto delle particelle ad opera del flusso di intensità massima raggiungibile per lo scenario considerato. In figura 24 si riporta la distribuzione relativa del flusso di sostanza organica nei sedimenti così come ottenuto dai risultati modellistici.

Si nota come, la posizione dell'area di deposizione sia spostato verso Sud di alcune centinaia di metri rispetto il quadrilatero costituito dai punti di rilascio. Si nota come la maggior parte della sostanza organica depositata al fondo, area rossa, sia all'interno di un raggio di circa 500 metri dal centro dell'area di rilascio con un limite di estensione meridionale pari a circa 700 metri dalla zona del rilascio.

- **SCENARIO CON VENTO DI LIBECCIO**

Quando un vento di Libeccio dell'intensità massima di 20 m/s modulata secondo l'andamento descritto nel paragrafo 2.3 agisce sull'area di indagine per un periodo pari a 96 ore, il campo d'onda da esso generato è descritto in figura 25.

Si nota come l'area in corrispondenza dei punti del rilascio (circoli verdi) sia influenzata dall'effetto "maschera" indotto dalla presenza dell'isola di San Pietro, che parzialmente riduce il flusso di energia in direzione Nord-Est.

Tuttavia nonostante tale riduzione, i processi di diffrazione sono in grado di far confluire nell'area indicata una ragguardevole quantità di energia rappresentata da WHS dell'ordine dei 3 metri.

Per quanto riguarda la direzione di propagazione, questa influenzata sia dai processi di rifrazione che di diffrazione presenta una inclinazione di circa 30° rispetto all'asse delle ascisse, deviando di circa 15° rispetto alla direzione del vento.

Per quanto riguarda le caratteristiche del moto ondoso nell'area di interesse, si nota come il vento di Libeccio, a parità di intensità non sia in grado di generare WHS di valori superiori a quelle generate dal vento di Maestrale. Questo è dovuto principalmente al fatto che il vento di Libeccio presenta un fetch di azione limitato rispetto al vento di Maestrale. Tuttavia, il vento di Libeccio riesce a generare un moto ondoso con WHS pari a 2-3 metri in tutto il paraggio di interesse ad esclusione di ridotte aree a ridosso delle isole di San Pietro e Sant'Antioco.

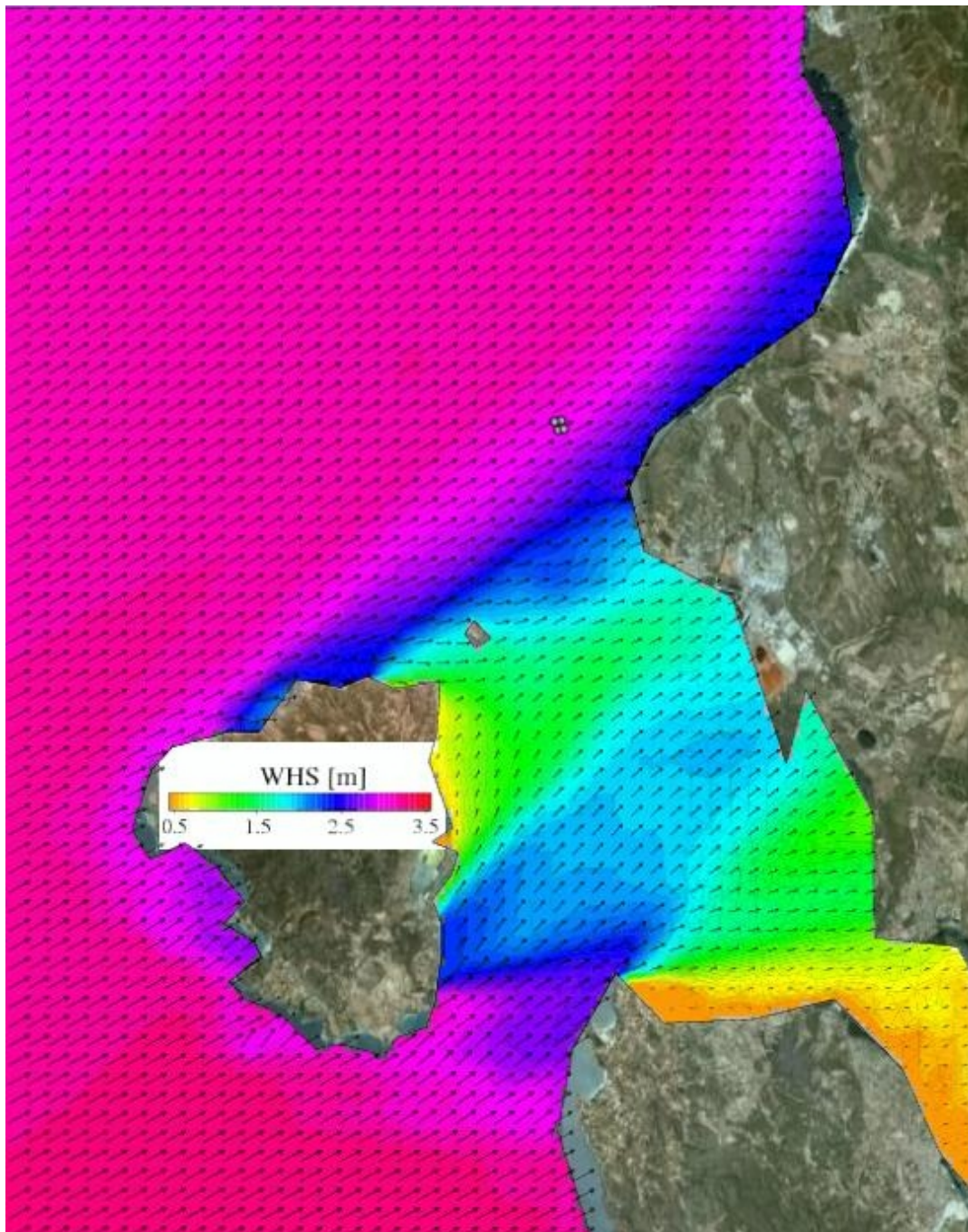


Figura 25. Distribuzione dell'altezza significativa del moto ondoso (WHS) espressa in metri durante un evento di libeccio della durata di 96 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

Per quanto riguarda la circolazione delle acque indotta dall'azione del vento di Libeccio, in figura 26 è riportata la distribuzione della velocità barotropica nell'area di indagine.

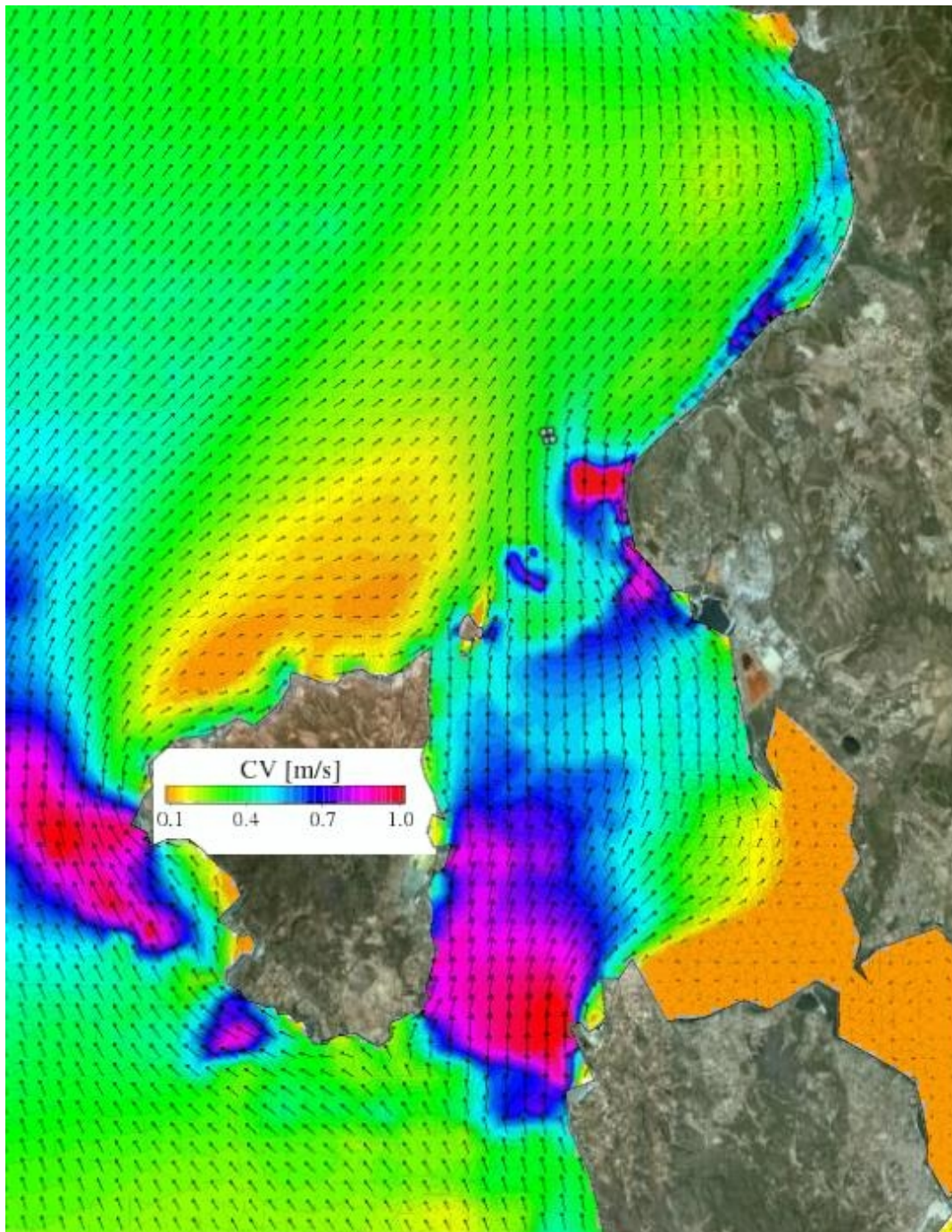


Figura 26. Distribuzione dell'intensità e direzione della corrente media sulla colonna d'acqua espressa in m/s durante un evento di maestrale della durata di 96 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

Analogamente al caso precedente, si nota l'intensificazione del flusso in corrispondenza dei punti del rilascio (circoli verdi) generato dalla presenza del Capo Altano e dalla riduzione delle batimetriche.

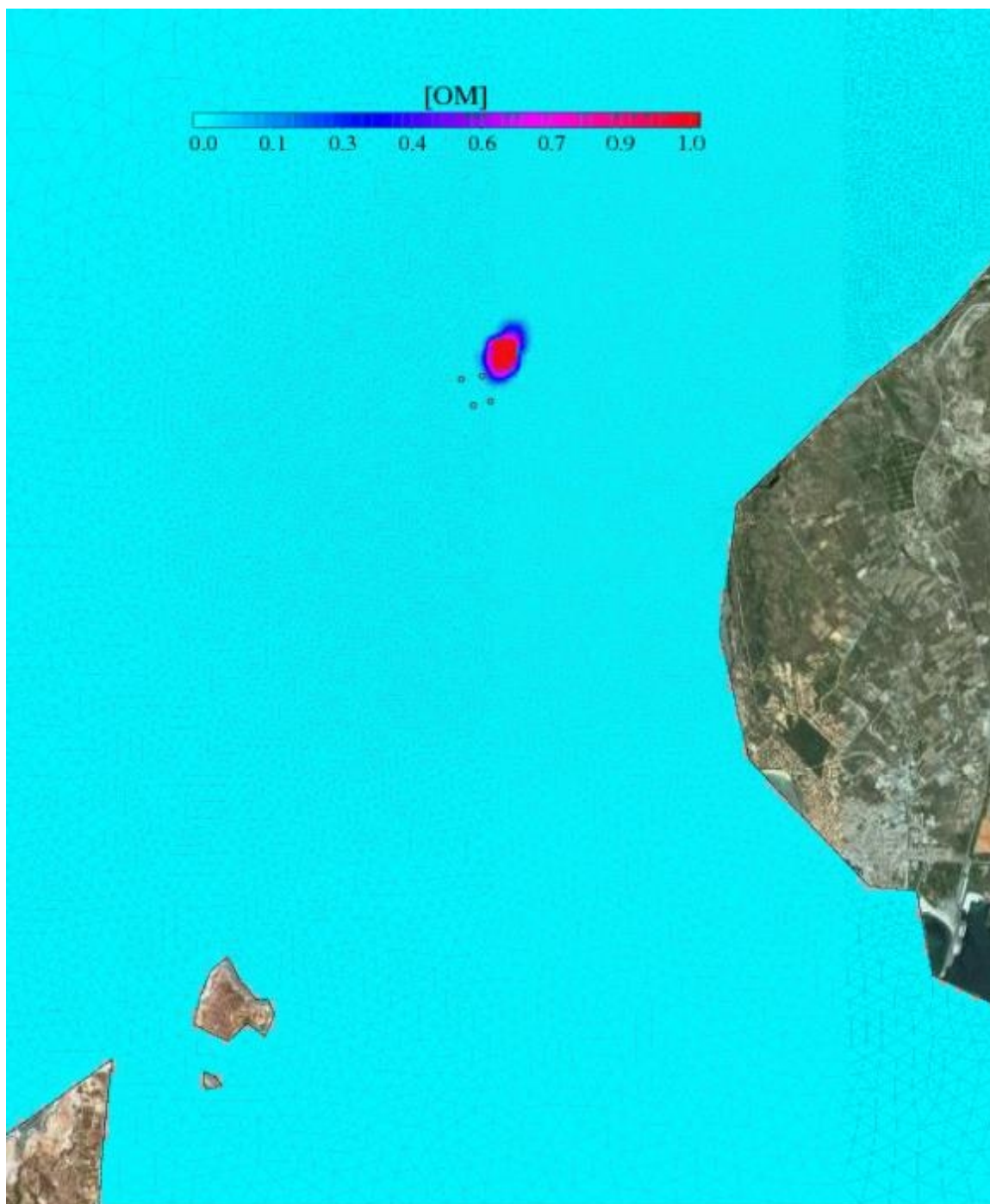


Figura 27. Distribuzione relativa del flusso di sostanza organica nei sedimenti in unità dimensionale a seguito del funzionamento degli impianti di acquicoltura durante un evento di libeccio della durata di 96 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

In questo caso, le intensità della corrente simulate sono dell'ordine dei 0.5 m/s.

Per quanto riguarda la direzione del flusso questa è pari a circa 60° rispetto l'asse delle ascisse secondo il sistema di riferimento cartesiano.

Analizzando la circolazione generale nel paraggio di interesse si nota come il vento di Libeccio generi una corrente mediamente Settentrionale che suddivisa in 2 flussi circonda l'isola di San Pietro intensificandosi in prossimità del canale di Sant'Antioco e della parte esterna dell'isola stessa.

Si ricongiunge poi in corrispondenza dell'Isola Piana per defluire intensificandosi all'altezza di Capo Altano verso l'area di interesse e convogliando le masse d'acqua meridionali verso Nord mediante una corrente costiera.

Si considerino infine i risultati ottenuti dalla simulazione dei processi di trasporto e deposizione delle particelle di sostanza organica prodotte dall'attività di maricoltura.

Come per lo scenario precedente, durante i 4 giorni di simulazione prevista, il rilascio delle particelle è stato effettuato dopo 72 ore dall'inizio della simulazione, all'inizio del 3 giorno.

In figura 27 si riporta la distribuzione relativa del flusso di sostanza organica nei sedimenti. Si nota come, la posizione dell'area di deposizione sia spostato verso Nord-Est di alcune centinaia di metri rispetto il quadrilatero costituito dai punti di rilascio.

Si nota come la maggior parte della sostanza organica depositata al fondo, area rossa, sia all'interno di un raggio di circa 400 metri dal centro dell'area di rilascio con un limite di estensione meridionale pari a circa 650 metri dalla zona del rilascio.

- **SCENARIO CON VENTO DI SCIROCCO**

Quando un vento di Scirocco dell'intensità massima di 20 m/s modulata secondo l'andamento descritto nel paragrafo 2.3 agisce sull'area di indagine per un periodo pari a 96 ore, il campo d'onda da esso generato è descritto in figura 28.

Si nota come per l'area in corrispondenza dei punti del rilascio (circoli verdi) la WHS sia di pochi cm e mai sopra il metro.

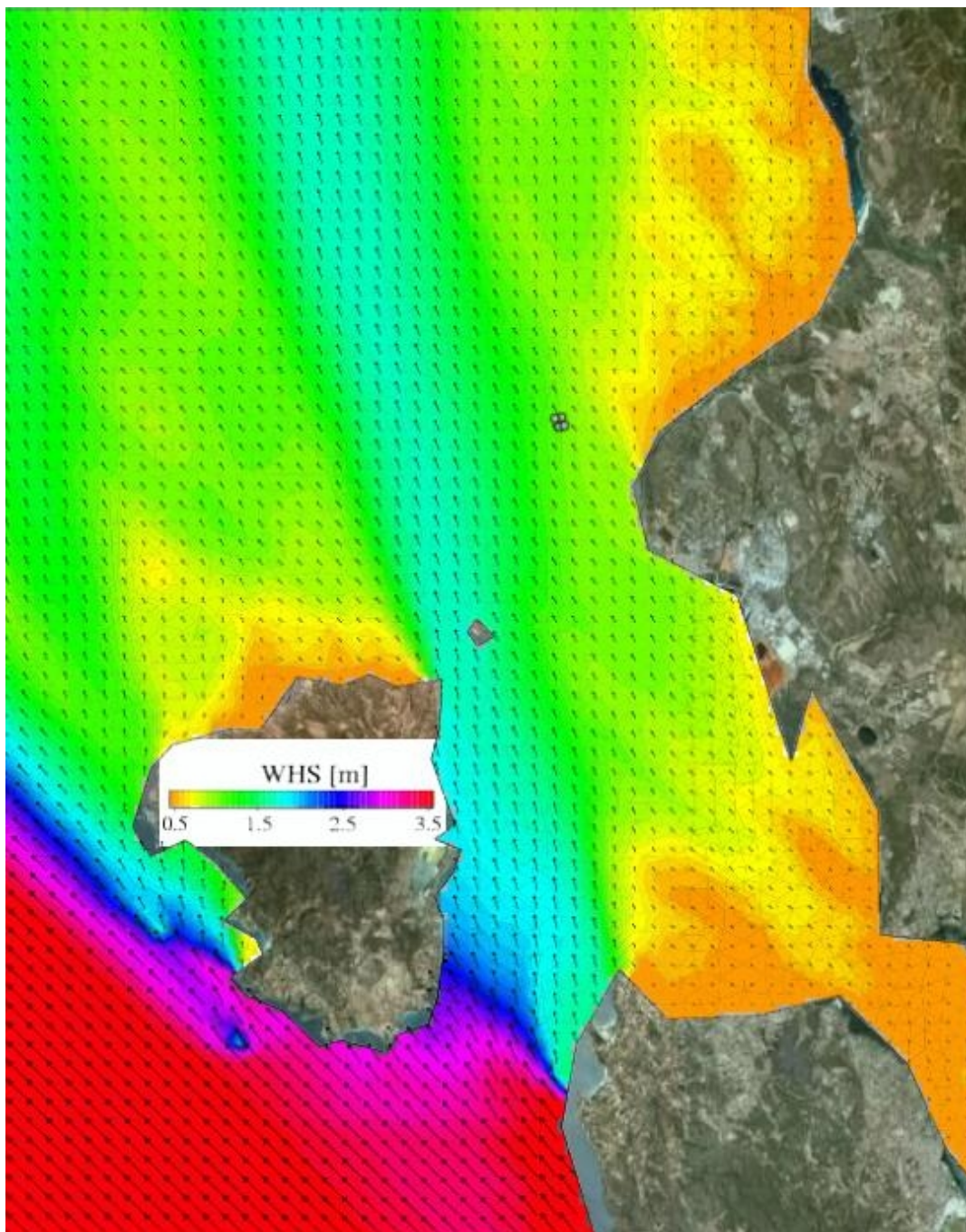


Figura 28. Distribuzione dell'altezza significativa del moto ondoso (WHS) espressa in metri al termine di un evento di scirocco della durata di 48 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

Questo è dovuto alla mancanza di un fetch significativo per i venti da terra in quest'area. Inoltre, analizzando le caratteristiche del campo d'onda per tutto il paraggio di interesse, si nota come solo la parte a Sud dell'Isola di San Pietro sia caratterizzata da WHS ragguardevoli superiori anche ai 3.5 metri.

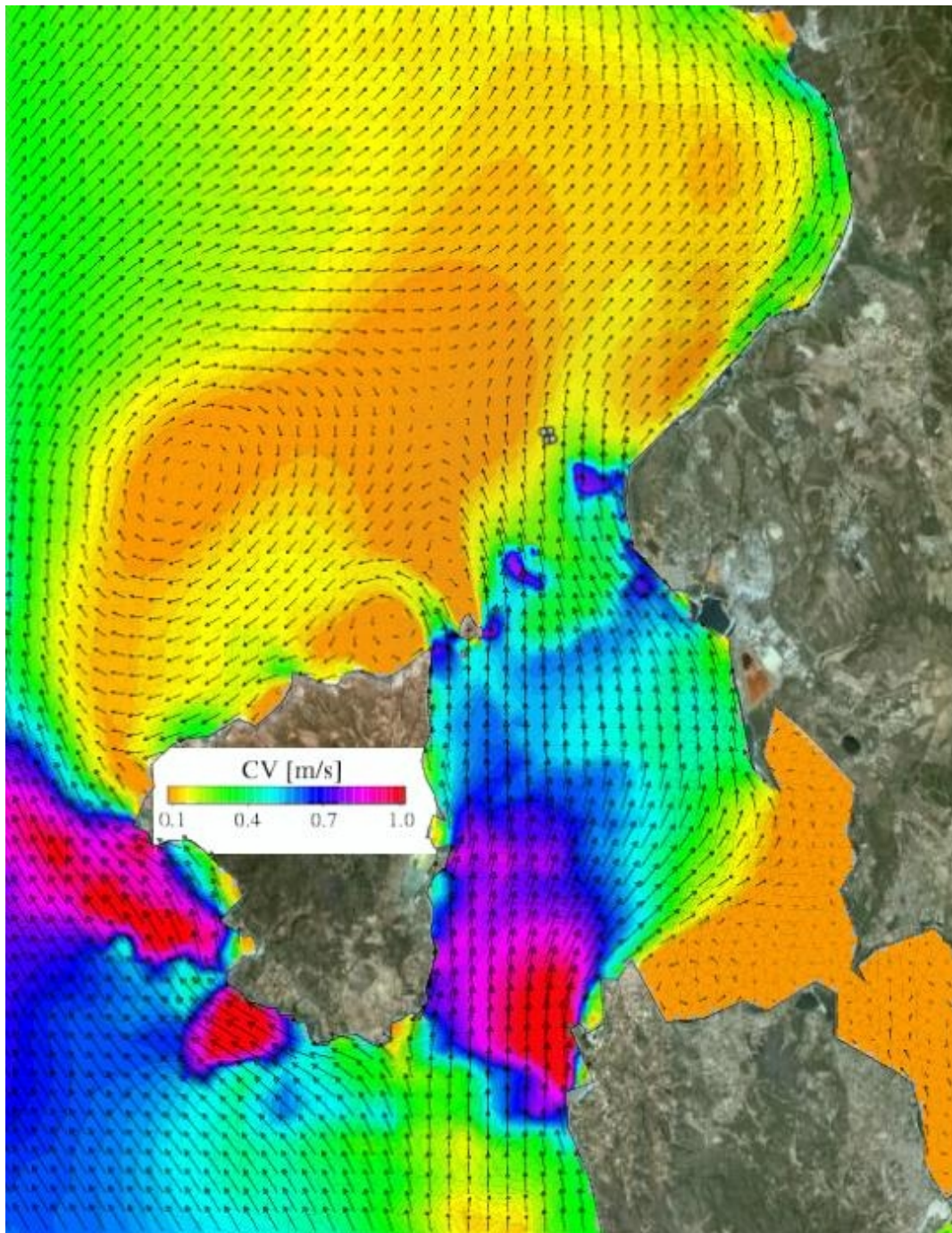


Figura 29. Distribuzione dell'intensità e direzione della corrente media sulla colonna d'acqua espressa in m/s durante un evento di maestrale della durata di 48 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

Per quanto riguarda la circolazione delle acque indotta dall'azione del vento di Scirocco, in figura 29 è riportata la distribuzione della velocità barotropica nell'area di indagine. In questo caso si nota come per l'area compresa dai 4 punti di riferimento (circoli verdi) le velocità barotropiche

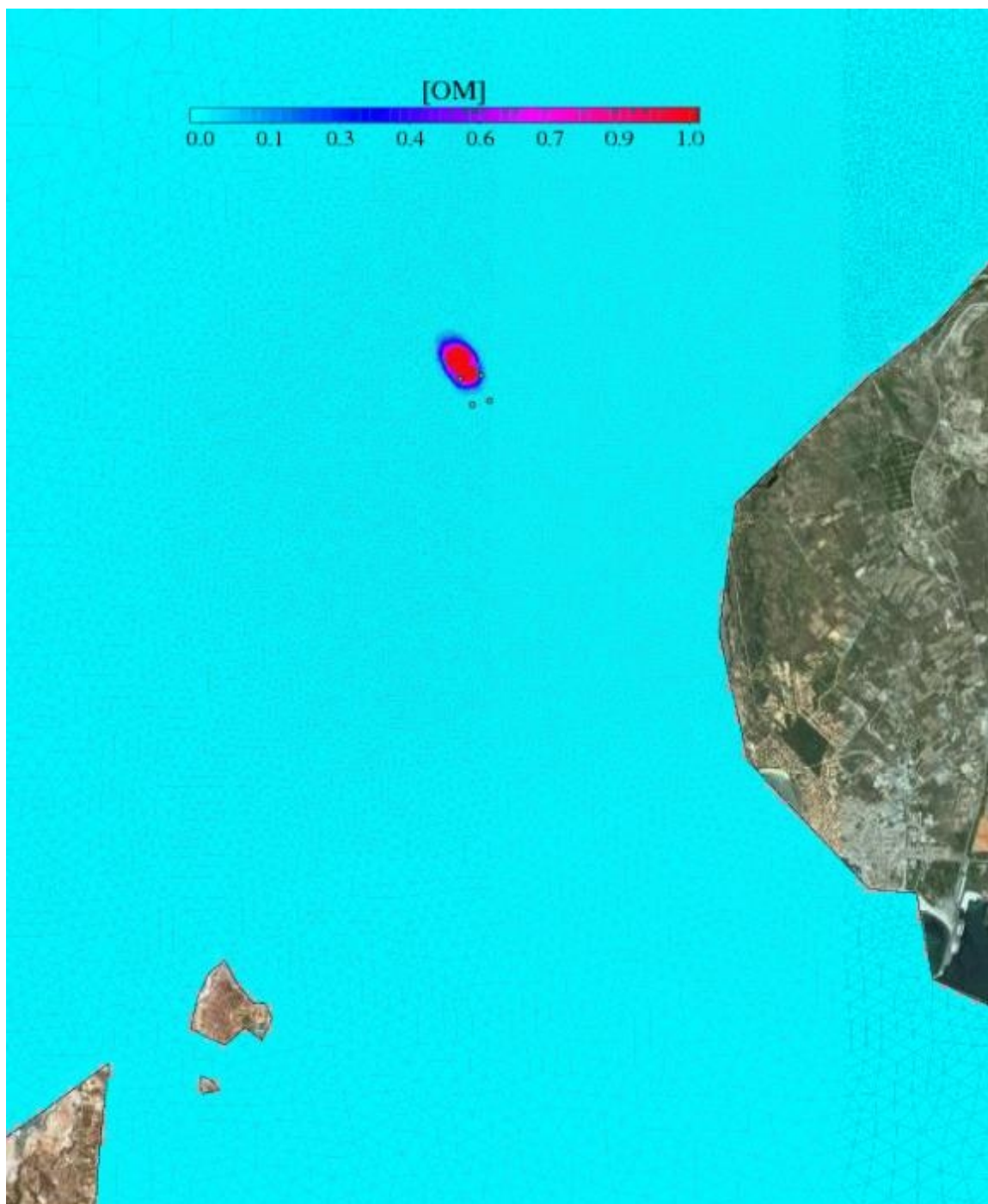


Figura 30. Distribuzione relativa del flusso di sostanza organica nei sedimenti espresso in unità dimensionale a seguito del funzionamento degli impianti di acquicoltura durante un evento di scirocco della durata di 48 ore con raffiche di intensità massima pari a 20 m/s.

non siano mai superiori ai 0.2 m/s nonostante sia sempre presente l'intensificazione del flusso in prossimità di Capo Altano.

Per quanto riguarda la direzione della corrente questa presenta un'inclinazione di circa 90° rispetto all'asse delle ascisse.

Da un'analisi generalizzata della circolazione delle acque nel paraggio di interesse risulta che il flusso principale proveniente da Sud sia suddiviso anche in questo caso in 2 tronconi uno incanalato all'interno del canale di Sant'Antioco l'altro esterno all'Isola di San Pietro con relative intensificazioni in prossimità del canale e dell'isola stessa.

Tuttavia in questo caso, la riunificazione delle linee fluide non avviene in prossimità dell'isola piana ma nella parte esterna ad Ovest dell'Isola di San Pietro successivamente alla formazione di circolazioni inerziali di tipo vorticoso a ridosso dell'Isola stessa. Quindi, le acque che passano in prossimità dei punti di riferimento sono di esclusiva provenienza dal flusso meridionale incanalatosi attraverso il canale di Sant'Antioco.

Come per il caso precedente, a Nord dell'area di interesse si crea una corrente costiera settentrionale tuttavia, in questo caso di minor intensità.

Si considerino infine i risultati ottenuti dalla simulazione dei processi di trasporto e deposizione delle particelle di sostanza organica prodotte dall'attività di maricoltura.

Come per i precedenti scenari, durante i 4 giorni di simulazione prevista, il rilascio delle particelle è stato effettuato dopo 72 ore dall'inizio della simulazione, all'inizio del 3 giorno.

In figura 30 si riporta la distribuzione relativa del flusso di sostanza organica nei sedimenti. Si nota come, la posizione dell'area di deposizione sia spostato verso Sud-Ovest di poche centinaia di metri rispetto il quadrilatero costituito dai punti di rilascio.

Si nota come la maggior parte della sostanza organica depositata al fondo, area rossa, sia all'interno di un raggio di circa 250 metri dal centro dell'area di rilascio con un limite di estensione meridionale pari a circa 400 metri dalla zona del rilascio

CONCLUSIONI

L'acquacoltura è il settore di produzione alimentare con il più rapido tasso di crescita al mondo, e fornisce circa il 45% di tutto il pesce consumato (FAO, 2007). L'attività di maricoltura può però causare alterazioni nell'ambiente marino ricollegabili principalmente all'immissione di notevoli quantità di reflui ad elevato contenuto organico. Lo sviluppo sostenibile dell'acquacoltura, coerentemente con le strategie di protezione dell'ambiente, ha bisogno di un'attenta pianificazione e conoscenza dei problemi derivanti da essa. A tale scopo è necessario creare strumenti per prevenire e minimizzare l'impatto ambientale.

La presente indagine analizza, mediante metodi numerici teorici, le caratteristiche anemometriche, ondometriche e correntometriche dell'area prescelta per la messa in opera di un'attività di maricoltura. Inoltre, sempre mediante modelli numerici viene valutata, in relazione a determinati scenari meteo-marini, l'estensione massima raggiunta dalla sostanza organica rilasciata dagli impianti di acquicoltura prima della deposizione sul fondale, individuando quindi l'areale soggetto ad un potenziale impatto sulle comunità bentoniche.

Lo studio è stato realizzato nel tratto di mare antistante Capo Altano, Sardegna sud-occidentale dove è prevista la realizzazione di un impianto off-shore per l'allevamento intensivo di Tonni. Tale lavoro ha permesso di valutare l'estensione massima raggiunta dalla sostanza organica in funzione delle diverse correnti generate dai regimi di vento prevalenti e di individuare il potenziale impatto sulle comunità bentoniche nell'area di studio.

REFERENZE

- Ackefors H, Enell M, 1990. Discharge nutrients from Swedish fish farming into adjacent sea areas. *Ambio* 19(1): 28– 35.
- Beveridge MCM, 1996. Cage aquaculture. Fishing News Books, Blackwell, Oxford.
- Butz I, Vens-Cappell B, 1982. Organic load from the metabolic products of rainbow trout fed with dry food. In Albaster JS (ed.), Report of the EIFAC Workshop on Fish Farm Effluents. Silkeborg, Denmark, 26-28 May 1981. EIFAC Technical Paper 41: 57-70.
- Chen Y, Beveridge M, Telfer T, 1999. Physical characteristics of commercial pelleted Atlantic salmon feeds and consideration of implications for modeling of waste dispersion through sedimentation. *Aquaculture International* 7, 89– 100.
- Collos Y, Vaquer A, Bibent B, Slawyk G, Garcia N, Souchu P, 1997. Variability in nitrate uptake kinetics of phytoplankton communities in a Mediterranean coastal lagoon. *Estuarine Coastal Shelf Science* 44: 369–375.
- Conway HL, Harrison PJ, 1977. Marine diatoms grown in chemostats under silicate or ammonium limitation. 4. Transient response of *Chaetoceros debilis*, *Skeletonema costatum*, and *Thalassiosira gravida* to a single addition of the limiting nutrient. *Marine Biology* 43: 33– 43.
- Cromey CJ, Nickell TD, Black KD, 2002. DEPOMOD – modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquaculture* 214: 211–239.
- De Gaetano P, Doglioli AM, Magaldi MG, Vassallo P, Fabiano M, 2008. FOAM, a new simple benthic degradative module for the LAMP3D model: an application to a Mediterranean fish farm. *Aquaculture Research* 39: 1229-1242.
- Doglioli AM, Magaldi MG, Vezzulli L, Tucci S, 2004. Development of a numerical model to study the dispersion of wastes coming from a marine fish farm in the Ligurian Sea (Western Mediterranean). *Aquaculture* 231: 215-235.
- Elberizon I, Kelly L, 1998. Settling measurements of parameters critical to modelling benthic impacts of freshwater salmonid cage aquaculture. *Aquaculture Research* 29, 669– 677.
- FAO, 1995. Codice di condotta della FAO per una Pesca Responsabile. . FAO Fisheries and Aquaculture Department. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.

- FAO, 2002. FAOSTAT, Aquaculture Production Quantities 1970–1999. FAO Fisheries and Aquaculture Department. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- FAO, 2007. The state of World fisheries and aquaculture 2006. FAO Fisheries and Aquaculture Department. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Ferrarin, Christian; Umgiesser, Georg; Cucco, Andrea; Hsu, Tai-Wen; Roland, Aron; Amos, Carl L.A, 2008. Development and validation of a finite element morphological model for shallow water basins Coastal Engineering Volume: 55, Issue: 9, pp. 716-731
- Findlay RH, Watling L, 1994. Toward a process level model to predict the effects of salmon net-pen aquaculture on the benthos. In: Hargrave, B. (Ed.), Modeling Benthic Impacts of Organic Enrichment from Marine Aquaculture. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences, 1949: xi + 125 p.
- Findlay RH, Watling L, 1997. Prediction of benthic impact for salmon net-pens based on the balance of benthic oxygen supply and demand. *Marine Ecology Progress Series* 155: 147–157.
- Hall POJ, Anderson LG, Holby O, Kollberg S, Samuelsson M, 1990. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. I. Carbon. *Marine Ecology Progress Series*, 61: 61-73.
- Hall POJ, Holby O, Kollberg S, Samuelsson MO, 1992. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. IV. Nitrogen. *Marine Ecology Progress Series* 89:81-91.
- Hargrave
http://www.ingentaconnect.com/content/klu/wate/1997/00000099/F0040001/00143569;jsessionid=i0hie3vtp6y.alice?format=print - aff_1#aff_1 BT, Phillips
http://www.ingentaconnect.com/content/klu/wate/1997/00000099/F0040001/00143569;jsessionid=i0hie3vtp6y.alice?format=print - aff_1#aff_1 GA, Doucette LI, White MG, Milligan
http://www.ingentaconnect.com/content/klu/wate/1997/00000099/F0040001/00143569;jsessionid=i0hie3vtp6y.alice?format=print - aff_1#aff_1 TG, Wildish DJ, Cranston RE, 1997. Assessing benthic impacts of organic enrichment from marine aquaculture. *Water, Air, and Soil Pollution* 99(1-4): 641-650.
- Holby O, Hall POJ, 1991. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm. II. Phosphorus. *Marine Ecology Progress Series* 70:263-272.

- Holmer M, 1991. Impacts of aquaculture on surrounding sediments: generation of organic-rich sediments. In: De Pauw N and Joyce J (eds), 1991. Aquaculture and the Environment. Aquaculture Society Special Publication 16:155–175.
- Holmer M, Argyrou M, Dalsgaard T, Danovaro R, Diaz-Almela E, Duarte CM, Frederiksen M, Grau http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V6N-4SY5X3V-2&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=e2e2b5ebba3e847a51628cbb20104955_-_aff6#aff6 A, Karakassis I, Marbà N, Mirto http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V6N-4SY5X3V-2&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=e2e2b5ebba3e847a51628cbb20104955_-_aff8#aff8 S, Pérez M, Pusceddu A, Tsapakis M, 2008. Effects of fish farm waste on *Posidonia oceanica* meadows: Synthesis and provision of monitoring and management tools. *Marine Pollution Bulletin* 56(9): 1618-1629.
- Iwama GK, 1991. Interactions between aquaculture and the environment. *Critical Reviews in Environmental Control* 21:177–216.
- Karakassis I, Tsapakis M, Hatziyanni E, 1998. Seasonal variability in sediment profiles beneath fish farm cages in the Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series* 162: 243-252.
- Lall SP, 1991. Digestibility, metabolism and excretion of dietary phosphorus in fish. In: Cowey CB and Cho CYT (Eds.). *Nutritional Strategies and Aquaculture Waste*. University of Guelph, Guelph, Ontario, pp 21-36.
- La Rosa T, Mirto S, Mazzola A, Danovaro R, 2001. Differential responses of benthic microbes and meiofauna to fish-farm disturbance in coastal sediments. *Environmental Pollution* 112: 427–434.
- Lupatsch I, Kissil GW, 1998. Predicting aquaculture waste from gilthead seabream (*Sparus aurata*) culture using a nutritional approach. *Aquatic Living Resources* 11: 265-268.
- Magill SH, Thetmeyer H, Cromey CJ, 2006. Settling velocity of faecal pellets of gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) and sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) and sensitivity analysis using measured data in a deposition model. *Aquaculture* 251: 295– 305.
- Michaelis L, Menten M, 1913. Die Kinetik der Invertinwirkung. *Biochemische Zeitschrift* 49:333-369.

- Mirto S, La Rosa T, Gambi C, Danovaro R, Mazzola A, 2002. Nematode community response to fish-farm impact in the western Mediterranean. *Environmental Pollution* 116: 203–214.
- Munday BW, Eleftheriou A, Kentouri M, Divanach P, 1994. Quantitative statistical analysis of the literature concerning the interaction of the environment and aquaculture – identification of gap and lacks. *Journal of Applied Ichthyology* 10:319-325.
- Naylor RL, Goldburg RJ, Primavera JH, Kautsky N, Beveridge MCM, Clay J, Folke C, Lubchenco J, Mooney H, Troell M, 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405:1017–1024.
- NCC, 1990. Fish farming and Scottish freshwater environment. Nature Conservancy Council, Edinburgh, pp.285.
- National Pollutant Inventory, 2001. Emission estimation technique manual for aggregated emissions from temperate water finfish aquaculture. Environment Australia. Commonwealth of Australia. pp. 32.
- Pearson TH, Black KD, 2000. The environmental impacts of marine fish cage culture. In: Black KD (ed.), 2000. *Environmental Impacts of Aquaculture*, Sheffield Academic Press, Sheffield, pp. 1–31.
- Persson, A., 2000. User Guide to ECMWF Forecast Products. *Meteorological Bulletin* M3.2. ECMWF, Reading, UK.
- Pergent G, Mendez S, Pergent-Martini C, Pasqualini V, 1999. Preliminary data on the impact of fish farming facilities on *Posidonia oceanica* meadows in the Mediterranean. *Oceanologica Acta* 22: 95–107.
- Troell M, Norberg J, 1998. Modelling output and retention of suspended solids in an integrated salmon-mussel culture. *Ecological Modelling* 110: 65–77.
- Umgiesser, G., Canu, D.M., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A Finite element model for the Venice lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems* 51 (1-4), 123-145.
- Umgiesser G., Bergamasco A., 1995. Outline of a Primitive Equations Finite Element Model. *Rapporto e Studi, Istituto Veneto of Scienze, Lettere ed Arti* XII, pp. 291-320.
- Vassallo P, Doglioli AM, Rinaldi F, Beiso I, 2006. Determination of physical behaviour of feed pellets in Mediterranean water. *Aquaculture Research*, 37: 119-126.

- Vezzulli L, Marrale D, Moreno M, Fabiano M, 2003. Sedimentorganic matter and meiofauna community response to long-term fish-farm impact in the Ligurian Sea (Western Mediterranean). *Chemistry in Ecology*, 19: 431-440.
- Vismara R, 1992. *Ecologia Applicata*. 2nd ed. Hoepli, Milano.

RINGRAZIAMENTI

Il progetto rientra all'interno degli accordi di collaborazione con la Fondazione IMC ONLUS. SI ringrazia il direttore Mossone e tutti i ricercatori IMC per la collaborazione oltre al supporto e la gentile concessione all'utilizzo di infrastrutture IMC.