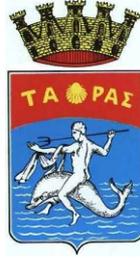


**REGIONE PUGLIA**  
**PROVINCIA DI TARANTO**  
**COMUNE DI TARANTO**



**PROGETTO DEFINITIVO**

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE IN AREA SIN DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO GALLEGGIANTE (OFFSHORE) DELLA POTENZA DI 100 MW CON ANNESSO IMPIANTO DI PRODUZIONE DI IDROGENO VERDE DA 25 MW, IMPIANTO DI MITILCOLTURA E STRUTTURE RELATIVE AL TURISMO SOSTENIBILE**

ELABORATO:

**PR15**

**STUDIO METEOMARINO**

PROPONENTE:

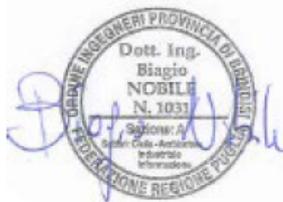


**FLOATING MAR PICCOLO**

M FLOATING MAR PICCOLO  
 SRL P.zza Fontana 6, Milano  
 20122, MI  
 P.I. : 13013890960

ELABORATO DA:

**ing. Biagio NOBILE**  
 (Ordine Ingegneri di Brindisi n. 1031)



**ATECH**  
**INGEGNERIA PER L'AMBIENTE**

Via Caduti di Nassiriya, 55 - 70124 - Bari Tel. 080 3219948

Dott. Ing. Alessandro Antezza  
 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Bari n. 10743



Visto:

il DIRETTORE TECNICO  
 Dott. Ing. Orazio Triccapo  
 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Bari n.4985



0	NOV 2023		A.A.	O.T.	Elaborato Descrittivo
EM./REV.	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE

**“PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE IN AREA SIN DI UN  
IMPIANTO FOTOVOLTAICO GALLEGGIANTE (OFFSHORE)  
DELLA POTENZA DI 100 MW CON ANNESSO IMPIANTO DI  
PRODUZIONE DI IDROGENO VERDE DA 25MW, IMPIANTO DI  
MITILICOLTURA E STRUTTURE RELATIVE AL TURISMO  
SOSTENIBILE”**

## ***STUDIO METEOMARINO***

Redatto da:

**ing. Biagio NOBILE**

(Ordine Ingegneri di Brindisi n. 1031)



ottobre 2023

---

## INDICE

1	PREMESSA .....	3
2	VARIAZIONI DEL LIVELLO MEDIO MARE .....	6
	2.1 MAREA ASTRONOMICA.....	6
	2.2 MAREA METEREologica .....	6
	2.3 SERIE STORICA DATI DI MAREA DELLA STAZIONE RMN DI TARANTO	8
3	CLIMA ANEMOMETRICO.....	15
	3.1 LA STAZIONE ANEMOMETRICA DI TARANTO .....	16
	3.2 FREQUENZE DATI STAGIONALI.....	19
	3.3 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DEI DATI DI VENTO ..	26
4	MOTO ONDOSI ALL'INTERNO DEL MAR PICCOLO .....	29
	4.1 IL MODELLO MATEMATICO MIKE 21 SW .....	30
	4.2 GRIGLIA DI CALCOLO .....	31
	4.3 PIANI D'ONDA .....	33
5	CORRENTI DI CIRCOLAZIONE ALL'INTERNO DEL MAR PICCOLO .....	36
	5.1 IL MODELLO MATEMATICO MIKE 21 HD .....	36
	ALLEGATO 1 – DESCRIZIONE TECNICA DEL CODICE DI CALCOLO MIKE 21 ...	45

---

## 1 PREMESSA

Il presente **Studio Meteomarino** è stato redatto nell'ambito della richiesta di concessione demaniale marittima avanzata dalla proponente **M FLOATING MAR PICCOLO srl** per un **“Progetto per la realizzazione in area SIN di un impianto fotovoltaico galleggiante (OFFSHORE) della potenza di 100 MW con annesso impianto di produzione di idrogeno verde da 25MW, impianto di mitilicoltura e strutture relative al turismo sostenibile”**.

Il progetto integrato è caratterizzato da una polivalenza funzionale in quanto prevede la realizzazione dei seguenti impianti:

- impianto fotovoltaico offshore e relative opere di connessione;
- piattaforme galleggianti ad uso turistico e ricreativo;
- impianto long – line (mitilicoltura);
- impianto per la produzione di *Idrogeno Verde*;
- area di interscambio per la mobilità sostenibile.

In riferimento alle opere a mare, il progetto prevede installazione di pannelli fotovoltaici su strutture offshore ubicate in un'area marina di circa 90ha all'interno del I Seno del Mar Piccolo di Taranto. Come evidenziato nello stralcio planimetrico della figura 1, l'energia prodotta dall'impianto off-shore, raggiunge attraverso la posa di un cavidotto interrato la Stazione Elettrica Utente in prossimità della Stazione Terna. Il tracciato del cavidotto, subisce una deviazione/stacco, con la funzione di alimentare una Stazione per la produzione di *Idrogeno Verde*.

Lo specchio acqueo oggetto di interesse è posizionato nel I° Seno del Mar Piccolo di Taranto in zona prospiciente la costa, in corrispondenza dello specchio del mare compreso tra le Prese a Mare dello stabilimento ex ILVA e la foce del fiume Galeso. Nello specchio acqueo le batimetrie oscillano tra -2.5m ed i -11m slmm, con punte di -12÷13m in corrispondenza della zona di sbocco del Citro Galese.

Il fondale si presenta perfettamente pianeggiante e privo di asperità rocciose; si riscontrano, infatti, fondali di tipo molle, incoerente, misto di sabbia fine e sabbia grossolana, con presenza di fango limoso e con granulometria dei sedimenti a livello 0-50 cm che, secondo la classificazione granulometrica di Shepard, risulta essere a cavallo tra Limo sabbioso e Sabbia argillosa.



**Figura 1 – Planimetria generale degli interventi.**

Nella figura 2 è riportato l'inquadramento di dettaglio su ortofoto delle opere a mare con la rappresentazione dei campi fotovoltaici (in viola), delle piattaforme galleggianti turistiche (nero) e delle aree interessate dall'impianto di mitilicoltura (rosa).

L'impianto fotovoltaico sarà formato da 18 campi di diverse dimensioni composti da unità base galleggianti; ogni "UNIT" prevede 2 galleggianti in HDPE (polietilene ad alta densità), un telaio metallico in alluminio o in acciaio inox, 4 pannelli fotovoltaici. I galleggianti sono ancorati ad appositi corpi morti poggiati sul fondale attraverso un sistema di cavi e dispositivi in grado di assecondare le variazioni di livello dell'acqua.

Le piattaforme galleggianti turistiche saranno pedonali e ciclabili, ed attrezzate per attività indirizzate alla collettività di ogni fascia di età, da quelle ludico ricreative a quelle sportive e culturali; anche nelle suddette aree saranno inseriti pannelli fotovoltaici come sistema di ombreggiamento delle aree sottostanti ed alberi eolici.

Lungo i canali tra i vari campi fotovoltaici destinati alla navigazione dei mezzi per le attività di ispezione e manutenzione delle apparecchiature, sarà altresì previsto

la installazione di impianto di mitilicoltura tipo Long-line per la captazione e il pre-ingrasso del seme di mitili.



**Figura 2** – Planimetria di dettaglio delle opere a mare.

Per quanto attiene alle analisi effettuate nel presente studio, nel seguito è riportata la ricostruzione del clima anemometrico del paraggio in esame e, sulla base di determinate condizioni di vento ottenute, è stata stimata l'agitazione ondosa e le correnti di circolazione in corrispondenza dello specchio acqueo di intervento.

---

## **2 VARIAZIONI DEL LIVELLO MEDIO MARE**

Le variazioni del livello marino possono essere distinte tra escursioni di marea dovute alle forze attrattive del sistema Terra-Sole (marea astronomica), ed escursioni di marea dovute a sbalzi barici ed altri effetti meteorologici (marea meteorologica). Nei successivi paragrafi sono state analizzate, sinteticamente ed in maniera separata, le suddette componenti per il paraggio di Taranto.

L'analisi di dettaglio delle escursioni del livello marino per l'area di Taranto, e specificatamente per il bacino interno del Mar Piccolo, è stata eseguita sulla base dei dati registrati dalla stazione meteo ubicata presso il molo S. Eligio del porto turistico di Taranto; la suddetta stazione di misurazione appartiene alla Rete Mareografica Nazionale (RMN), gestita dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

### **2.1 MAREA ASTRONOMICA**

Le escursioni del livello medio marino possono essere desunte dalle previsioni di marea per il Porto di Taranto contenute nelle tavole di marea pubblicate a cura dell'Istituto Idrografico della Marina Militare di Genova. Dalle tabelle di marea definite per i vari anni si ricava una escursione massima pari a circa 0.35m; il massimo e il minimo dislivello astronomico prevedibile risultano essere pertanto pari rispettivamente a circa +0.18m e -0.18m rispetto al livello medio mare.

### **2.2 MAREA METEOROLOGICA**

La marea meteorologica può essere valutata come somma di due differenti contributi: 1) sovrizzo barico  $S_b$ , dovuto a variazioni di pressione atmosferica; 2) sovrizzo da vento  $S_v$ , generato dal campo di vento.

Per il sito di Taranto può essere considerata un'escursione barica compresa tra 980 mbar e 1045 mbar. Negli ultimi 12 anni di misure presso la stazione RMN di Taranto, il minimo registrato è di 984 mbar nel 2014, mentre il massimo è di 1041 mbar nel 2020. Rispetto alla pressione atmosferica media di 1013 mbar, ne consegue quindi un'escursione del sovrizzo barico  $S_b$  compresa tra -0.33m e +0.32m slmm.

Anno	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
$P_{atm\ min}$	1033	1035	1033	1036	1033	1037	1034	NR	NR	1030	1041	1035	1037
$P_{atm\ max}$	990	996	987	984	993	984	986	NR	NR	986	999	995	994

**Tabella 2.2.1** – Massimi e minimi barici presso la stazione RMN di Taranto (periodo 2010-2022).

Con l'espressione *wind set-up* si indica il sovralzo del livello del mare sottocosta dovuto all'azione del vento; esso è dovuto all'accumulo di acqua sottocosta per azione dei venti foranei permanenti.

La valutazione del *wind set-up* a seguito di fenomeni meteorici gravosi è di fondamentale importanza specie se ad esso si accompagnano moti ondososi violenti; bisogna tuttavia evidenziare che i valori che esso generalmente assume risultano essere rilevanti solo in presenza di particolari situazioni geografiche e topografiche.

Si deve segnalare la possibilità che si verifichi anche il fenomeno opposto, ossia l'abbassamento del livello per azione di vento spirante da terra verso il mare (*wind set-down*), ma esso è di scarso interesse ai fini degli studi costieri.

Come si è detto, il *wind set-up* dipende oltre che, naturalmente, dalle caratteristiche dell'evento meteorologico, ovvero velocità di traslazione del vento, durata, lunghezza del percorso sopra la massa marina, e forma delle isobare, anche da alcuni parametri geomorfologici come la forma e la dimensione del bacino marino, l'estensione della piattaforma continentale (isobata -200m), nonché dalla configurazione e dalla rugosità del fondo.

Il sovralzo che si verifica a seguito di una perturbazione, può essere valutato utilizzando modelli di calcolo, oppure effettuando considerazioni statistiche partendo da osservazioni dirette effettuate su un sufficiente periodo di tempo.

Il calcolo del massimo sovralzo di vento  $S_v$ , in prima approssimazione, può essere effettuato mediante una nota formulazione analitica implicita (PODIS, 2005):

$$S_v = \frac{K_p L_p U^2}{g (D - d - S)} \ln \left( \frac{D}{d + S} \right) \quad (2.2.1)$$

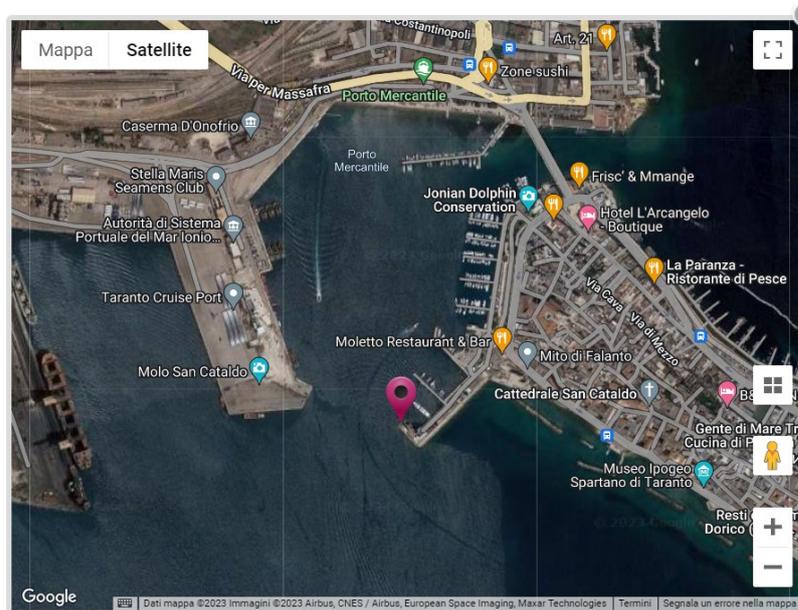
- dove:
- U è la velocità del vento persistente (m/s);
  - D è la profondità della piattaforma continentale (-200m);
  - d è la profondità ove si calcola il sovralzo (m);
  - $L_p$  è la distanza tra d e D nella direzione del vento (m);
  - g è l'accelerazione di gravità (9.81m/s<sup>2</sup>);
  - $K_p$  è un coefficiente pari a  $3 \times 10^{-6}$ .

Nel paraggio di Taranto la piattaforma continentale (-200m) si trova a circa 11.5km dalla costa; considerando l'azione di un vento costante diretto verso la costa con velocità di 30 m/s, in corrispondenza di un punto in corrispondenza della linea di riva, quindi alla profondità di 0.0m, si ricava un innalzamento del livello del mare pari a circa 0.08m.

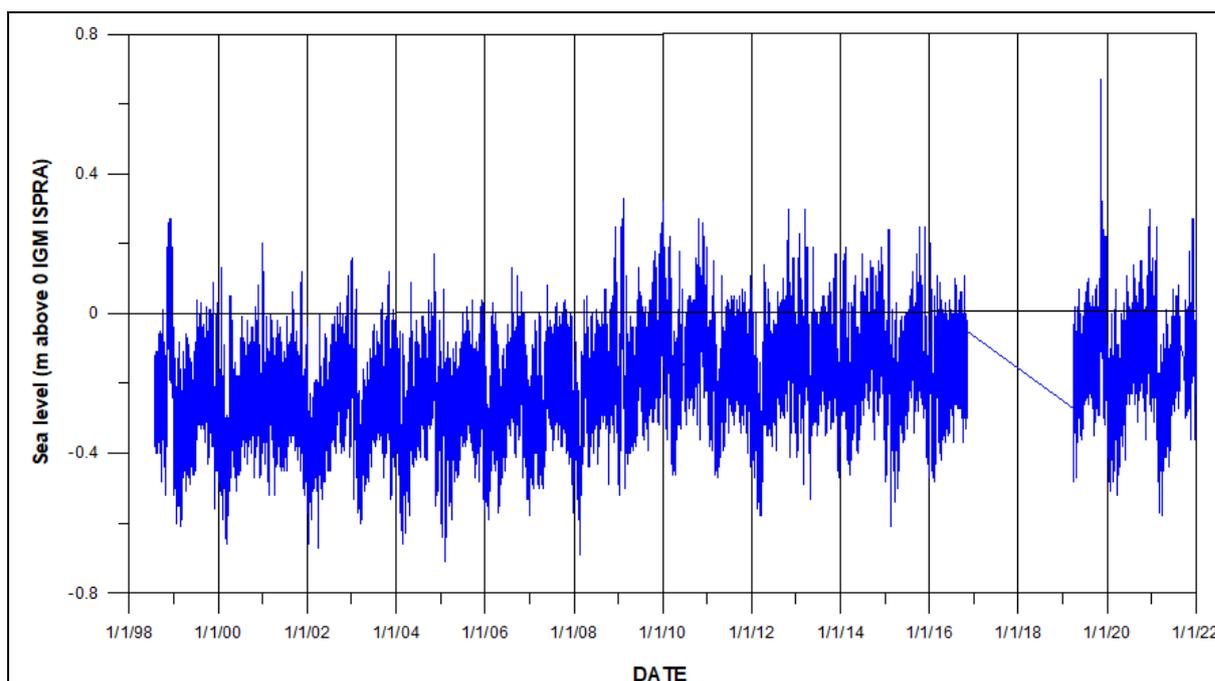
### 2.3 SERIE STORICA DATI DI MAREA DELLA STAZIONE RMN DI TARANTO

La stazione mareografica RMN di Taranto è ubicata presso il molo S. Eligio del porto turistico di Taranto (figura 2.3.1), in corrispondenza del punto di coordinate geografiche:  $40^{\circ} 28' 32.17''$  N LAT  $17^{\circ} 13' 25.55''$  E LON

Sul sito dell'ISPRA ([www.mareografico.it](http://www.mareografico.it)) è possibile scaricare i dati di marea registrati rispetto allo zero IGM, ovvero alla quota del livello medio mare misurata dal mareografo di Genova nel 1942; nell'ambito del presente studio sono stati analizzati i dati di marea riferiti al periodo 25 luglio 1998 – 31 dicembre 2021 (figura 2.3.2).



**Figura 2.3.1 – Stazione RMN di Taranto c/o molo S. Eligio.**



**Figura 2.3.2** – Livelli registrati dalla stazione RMN di Taranto (luglio 1998 – dicembre 2021).

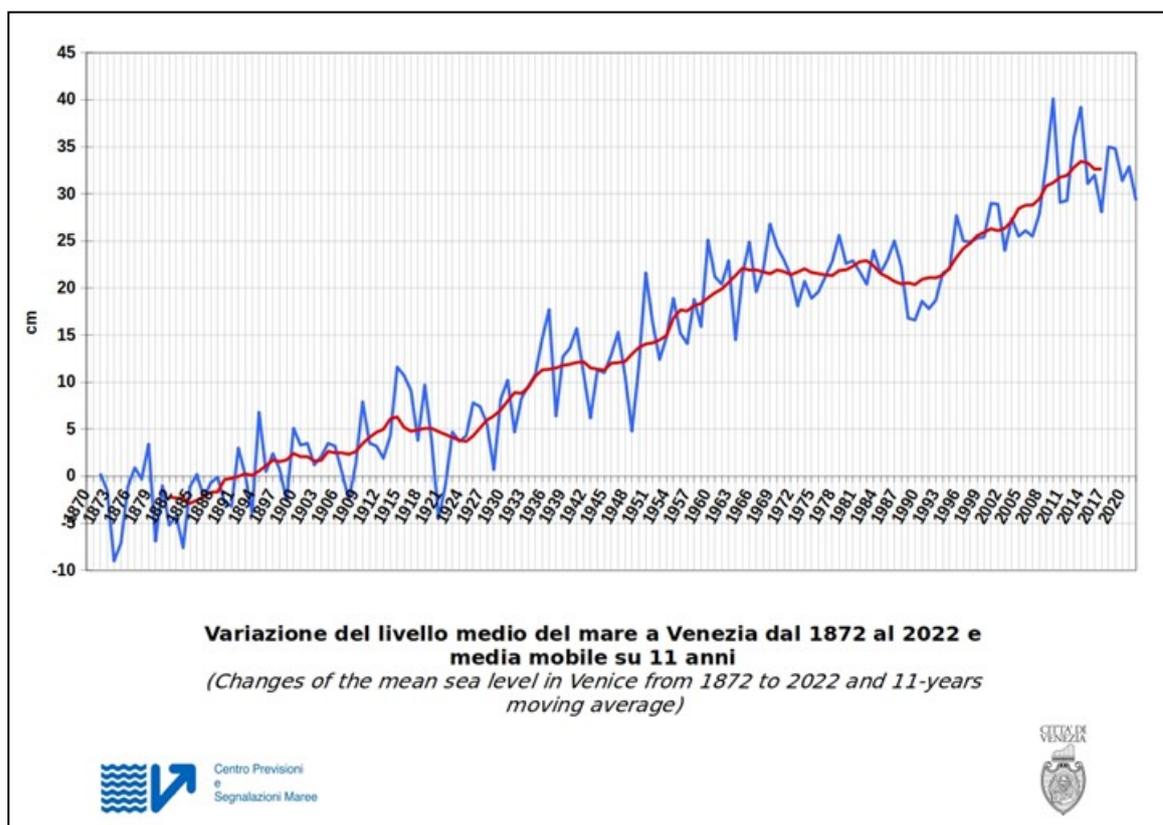
Il livello del mare nel Mediterraneo, ed in particolare in Adriatico, mostra ampie fluttuazioni interannuali e pluriennali, principalmente a causa delle condizioni meteorologiche (Raicich, 2003).

Dalla figura 2.3.3, nella quale è riportato il livello medio mare registrato dal mareografo della stazione di Venezia, si osservano delle fluttuazioni temporali non trascurabili, legate a cambiamenti periodici dei fattori ambientali.

Nel corso dell'ultimo secolo, da quando sono disponibili misure di livello continue e affidabili, si è potuto rilevare come ad esempio il livello relativo RSLR (*Relative Sea Level Rise*) del Mare Adriatico sia aumentato tra  $0.5 \pm 0.2$ mm/anno e  $1.2 \pm 0.1$ mm/anno (Marcos e Tsimplis, 2008; Raicich, 2003), mentre nel Nord Adriatico il mareografo di Venezia ha registrato una variazione di  $2.5 \pm 0.1$ mm/anno anche a causa della subsidenza indotta da interventi antropici.

Nel periodo 2007 - 2009 si è osservato un improvviso aumento del livello medio mare nel Mar Mediterraneo, come riportato da Tsimplis et al. (2013) e Landerer e Volkov (2013), e come si nota dalla figura 2.3.3. Tutti i mareografi ubicati lungo le coste adriatiche e ioniche hanno fatto registrare simili incrementi con punte di circa 150mm nell'Adriatico settentrionale unitamente ad un netto incremento di eventi estremi con diversi eventi alluvionali. Proprio a causa di questi ultimi avvenimenti, al

fine di definire il livello medio mare attuale e stimare gli eventi estremi, come detto nel presente studio è stata analizzata la serie storica dei livelli registrati dalla stazione mareografica di Taranto (figura 2.3.2).



**Figura 2.3.3** - Livello medio mare registrato dal mareografo della stazione di Venezia.

Dall'analisi della figura 2.3.2 si può rilevare come il campo di variazione dei livelli è di circa 50cm; il livello varia mediamente tra +0.2m IGM e -0.40m IGM, con poche eccezioni. Il valore massimo di +0.67m IGM è stato registrato il 13/11/2019 alle ore 14:00, il valore minimo di -0.71m IGM è stato registrato il 10/02/2005 alle ore 21:20. Dalla figura 2.3.2 si nota che nel paraggio in esame il livello medio mare ha una forte variazione stagionale; infatti, nei primi mesi dell'anno si ha un netto abbassamento del livello medio mare. In riferimento alla figura 2.3.2 si può inoltre evidenziare come il livello medio mare misurato dalla stazione RMN di Taranto sia inferiore allo zero IGM.

Nel presente studio è stata effettuata un'elaborazione dei valori registrati dal mareografo di Taranto al fine di determinare il valore del livello medio mare annuale;

nello specifico il calcolo è stato ottenuto a partire dai dati osservati con l'applicazione di filtri numerici (Doodson, 1954) come illustrato nel Volume I del IOC *“Manual on Sea Level Measurement and Interpretation”* (Unesco, Intergovernmental Oceanographic Commission, 1985 e 2006). Nella tabella seguente sono riportati i valori medi annuali ricavati dalle serie temporali rilevate, considerando l'anno meteorologico che inizia il 01 settembre e termina il 31 agosto, al fine di evitare la scissione della stagione invernale.

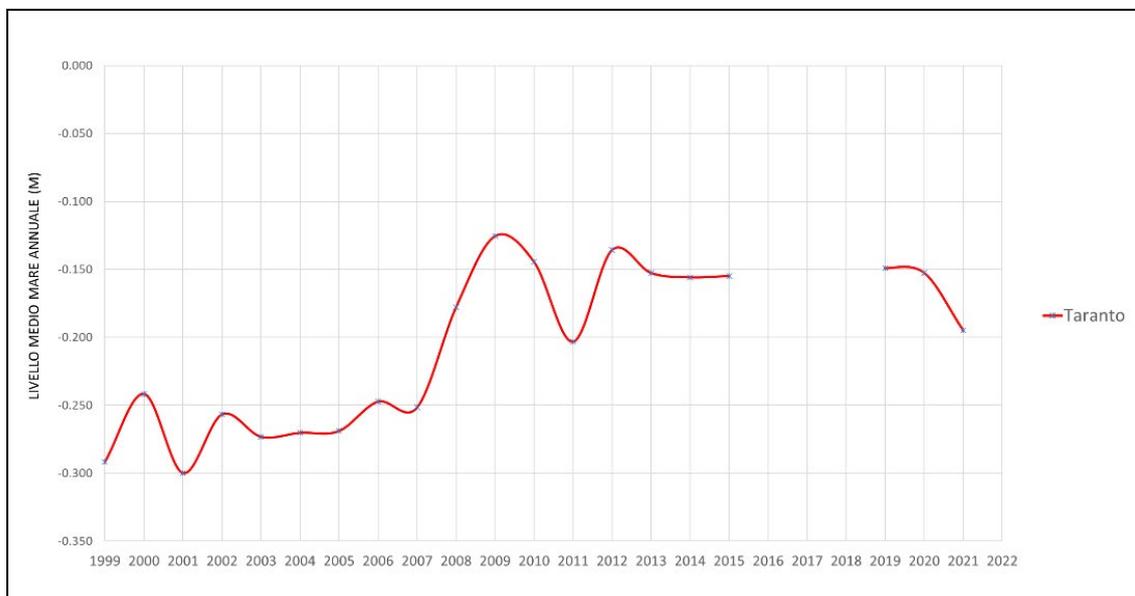
<b>Anno</b>	<b>Livello medio (m)</b>	<b>Anno</b>	<b>Livello medio (m)</b>
<b>1999</b>	-0.292	<b>2011</b>	-0.203
<b>2000</b>	-0.243	<b>2012</b>	-0.136
<b>2001</b>	-0.300	<b>2013</b>	-0.153
<b>2002</b>	-0.258	<b>2014</b>	-0.156
<b>2003</b>	-0.274	<b>2015</b>	-0.155
<b>2004</b>	-0.270	<b>2016</b>	0.000
<b>2005</b>	-0.269	<b>2017</b>	0.000
<b>2006</b>	-0.245	<b>2018</b>	0.000
<b>2007</b>	-0.254	<b>2019</b>	-0.149
<b>2008</b>	-0.177	<b>2020</b>	-0.152
<b>2009</b>	-0.124	<b>2021</b>	-0.195
<b>2010</b>	-0.146		

**Tabella 2.3.1 – Livelli medi annuali – stazione RMN Taranto (m).**

L'analisi dei livelli medi annuali nella stazione di Taranto (figura 2.3.4) mostra un generalizzato aumento del livello a partire dal 2008 con differenze tra il 2007 e il 2009 dell'ordine della decina di centimetri. L'andamento riferito all'anno 2011 registra una diminuzione dei livelli fin quasi a raggiungere i dati precedenti il 2009, cui è seguito nel 2012 un nuovo aumento del livello medio mare tuttora in corso. Ciò è in accordo con Tsimplis et al. (2013) e Landerer e Volkov (2013); infatti, in entrambi gli studi, gli autori riportano un improvviso aumento del livello medio del mare che è stato correlato alla forzante a larga scala North Atlantic Oscillation (NAO) che induce l'ingresso di grandi masse d'acque nel Mar Mediterraneo.

La statistica degli eventi estremi è stata condotta sulla serie dati acquisiti dalla stazione mareografica di Taranto. L'analisi è stata condotta sulla serie storica costituita dai dati di livello registrati con cadenza pari a 10minuti e dai dati di livello registrati e corretti rispetto al livello medio mare dell'anno considerato, e sui residui

meteorologici. I dati di livello osservati, come precedentemente descritto, risultano essere costituiti dalla somma dei contributi derivanti dal livello medio mare locale, dalla marea astronomica e dalla cosiddetta marea meteorologica.



**Figura 2.3.4 – Livelli medi annuali - stazione RMN Taranto.**

I risultati qui presentati forniscono una stima della distribuzione di probabilità degli eventi estremi del livello osservato, del livello corretto e del residuo meteorologico utilizzando una *Distribuzione Generalizzata di Pareto (GPD)* applicata alle due serie tronche costituite dai 5 valori massimi registrati in ogni anno estrapolati dalle due serie storiche di riferimento (tabella 2.3.2).

Tempo di ritorno (anni)	5	10	50	100
Livello osservato (m)	0.2169	0.2941	0.443	0.496
Livello corretto (m)	0.4876	0.5945	0.7281	0.7574

**Tabella 2.3.2 – Statistica degli eventi estremi.**

In riferimento al livello medio mare per la stazione mareografica di Taranto, nel *“Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici”*, edito a novembre 2012 a cura dell’ISPRA, è riportato che il Imm di Taranto si attesta a **-0.2562m** al di sotto del riferimento IGM; in tale studio l’analisi è stata effettuata sui livelli misurati con intervallo temporale di 10 minuti nel periodo compreso fra il primo gennaio 2000 e il 30 novembre 2009.

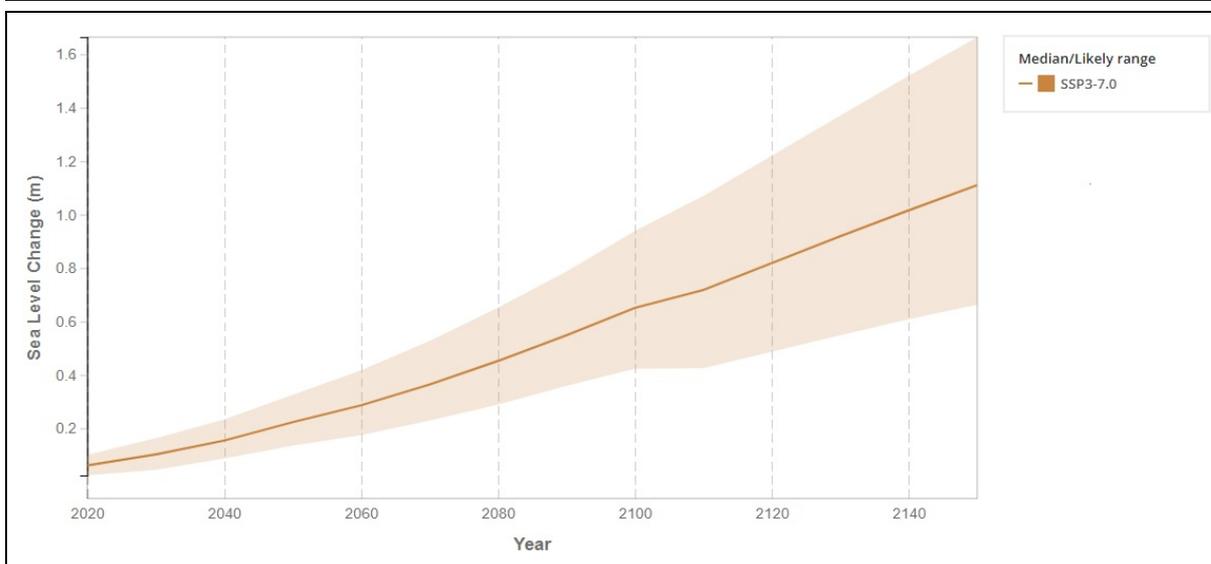
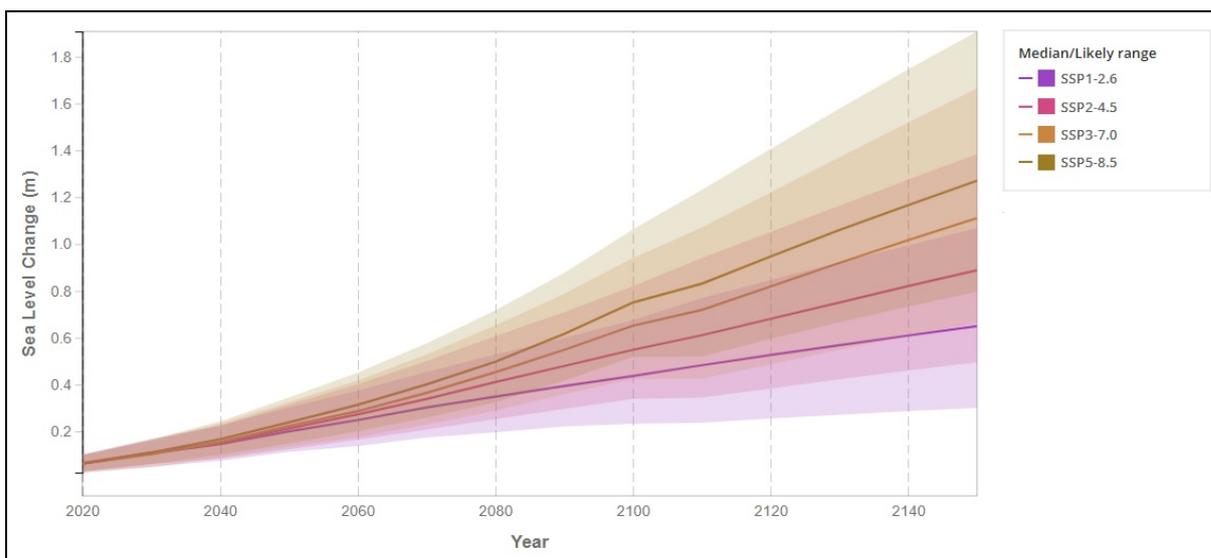
---

Occorre evidenziare, tuttavia, che le misurazioni effettuate successivamente al 2009 restituiscono un valore medio del livello mare pari a circa **-0.15m** IGM, ovvero un innalzamento di circa 10cm rispetto al riscontro degli anni precedenti. Tale variazione può essere legata alla errata taratura dello strumento di misurazione conseguente alla sostituzione del sensore del mareografo RMN avvenuta appunto in data 05/12/2009, ovvero essere legata all'innalzamento del livello medio mare determinato dai cambiamenti climatici.

Relativamente a quest'ultimo aspetto, la comunità scientifica internazionale è pressoché unanimemente concorde nell'affermare che l'incremento dei gas serra sta modificando il clima del pianeta in modo tale da innescare una risalita del livello del mare su scala globale. Gli scenari individuati dai modelli per l'ultimo decennio sono stati addirittura superati dai fatti: il mare (a livello globale) è risalito con tassi superiori a quanto ci si attendeva qualche anno fa.

I prevedibili scenari di variazione del livello marino sono stati analizzati nel dettaglio nell'ambito del programma del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Le stime ottenute nell'ambito del più recente aggiornamento AR6 (Sixth Assessment Report) sono riportate nel portale “*Sea level change della NASA*” e possono essere ricavati mediante il “*Sea Level Projection Tool*” (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>) per diverse zone del mondo. Nelle figure seguenti sono riportate le proiezioni dell'incremento del livello del mare a Taranto nei prossimi 130 anni per diversi scenari RCP (*Representative Concentration Pathways*): SSP1-2.6 Basso, SSP2-4.5 Intermedio, SSP3-7.0 Alto e SSP5-8.5 Molto Alto.

Dalle figure si può osservare come la stima dell'incremento del livello del mare dal 2020 al 2100 oscilla tra valori di +0.44m per lo scenario più ottimistico (SSP1-2.6) e di +0.75m per quello peggiore (SSP5-8.5). In riferimento alle opere in progetto, ipotizzando una vita utile di circa 50 anni e nelle condizioni di cui allo scenario SSP3-7.0 (Alto), si ricava che alla data 2070 si attende un incremento del livello medio mare pari a circa **+0.36m**.



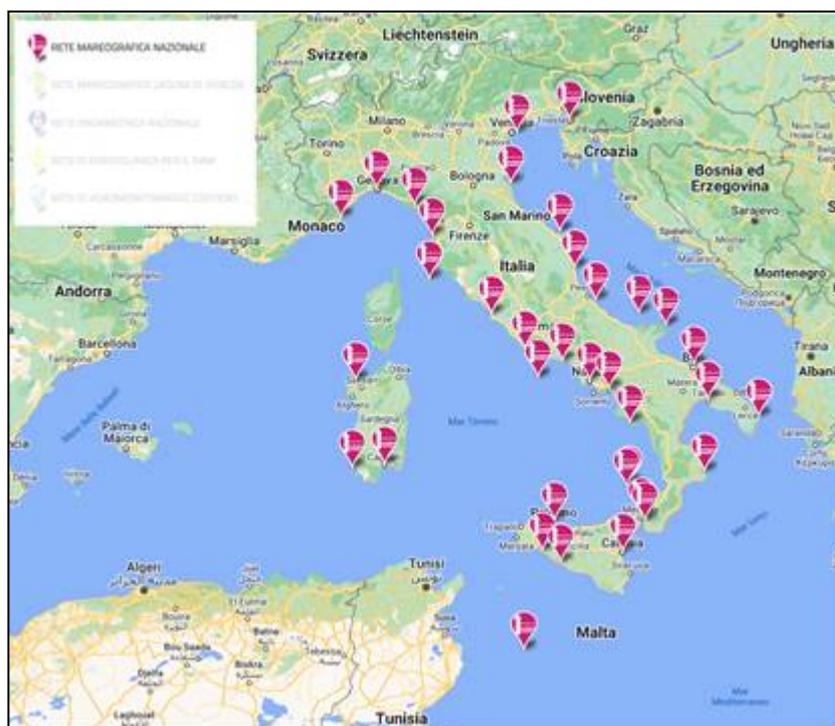
**Figura 2.3.5** – Proiezioni del sollevamento del livello marino relativamente al paraggio di Taranto per i prossimi 130 anni (al 2150) riportate nel rapporto IPCC AR6.

### 3 CLIMA ANEMOMETRICO

Al fine di definire il moto ondoso all'interno del Mar Piccolo di Taranto, in assenza di specifiche strumentazioni e di dati registrati di altezza d'onda disponibili, nel presente studio è stato ricostruito il clima anemometrico del paraggio che è stato quindi utilizzato per la propagazione dei piani d'onda nel suddetto specchio acqueo interno.

Lo studio anemometrico è stato condotto attraverso l'analisi della serie storica della stazione anemometrica ubicata presso il molo S. Eligio del porto turistico di Taranto, in corrispondenza del punto di coordinate UTM – WGS84: 4482906.048 Nord, 688519.329 Est.

La suddetta stazione fa parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN) i cui dati sono pubblicati sul sito *mareografico.it* gestito da ISPRA (figura 3.1). La suddetta stazione è in funzione dal 1998 ed ha funzionato con regolarità ad eccezione di alcuni periodi. La stazione è attualmente equipaggiata con anemometro ultrasonico e rileva i valori di velocità e direzione del vento con cadenza pari a 10 minuti. Fino al 2011 i dati anemometri erano stati registrati con cadenza oraria.



**Figura 3.1** – Ubicazione delle stazioni della Rete Mareografica Nazionale.

In questo studio sono state analizzate le serie storiche dei dati registrati dalla stazione di Taranto dal 1999 fino al 31 dicembre 2022. La tabella seguente riporta i dati salienti delle due serie storiche esaminate.

stazione	periodo di osservazione	cadenza dati
Taranto RMN	1999-2010	1h
Taranto RMN	2011-2022	10'

**Tabella 3.1** - *Caratteristiche delle serie anemometriche analizzate.*

Attraverso l'analisi dei dati registrati a Taranto sono state individuate le direzioni di provenienza dei venti regnanti (venti con più alte frequenze di apparizione), dei venti dominanti (venti di elevata intensità), dei venti prevalenti (venti che combinano l'alta frequenza di apparizione con le alte velocità) e le durate dei periodi di calma che si verificano durante l'anno. Sono stati anche analizzati separatamente i diversi periodi dell'anno, per definire la distribuzione di frequenza dei venti in ogni stagione.

La classificazione dei dati secondo la direzione di provenienza è stata effettuata suddividendo la rosa dei venti in settori di 15°, mentre per l'intensità dei venti si è fatto riferimento alla scala Beaufort. Per ogni settore di 15° prescelto e per ogni classe di intensità, si è provveduto a valutare la frequenza di apparizione. I risultati ottenuti sono stati rappresentati in forma grafica attraverso diagrammi polari, ed in forma tabellare.

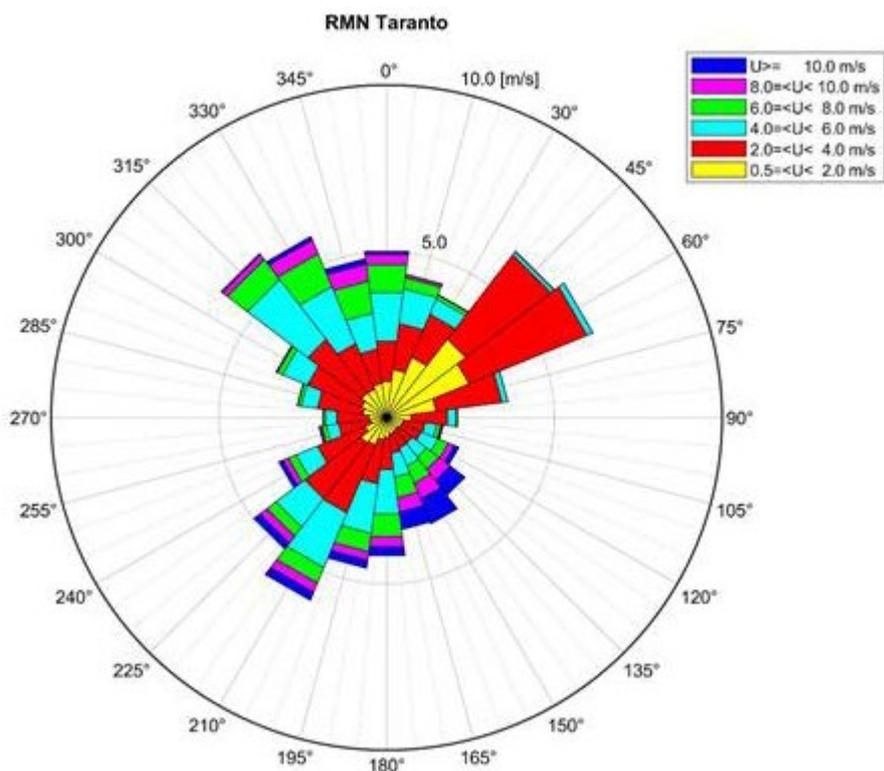
Le indagini sono state effettuate inizialmente per l'intero campione di dati disponibile, ottenendo così il clima anemometrico annuale medio, quindi suddividendo il campione in stagioni, ottenendo così il clima anemometrico stagionale.

Nel seguito si riportano i risultati ottenuti per la stazione esaminata.

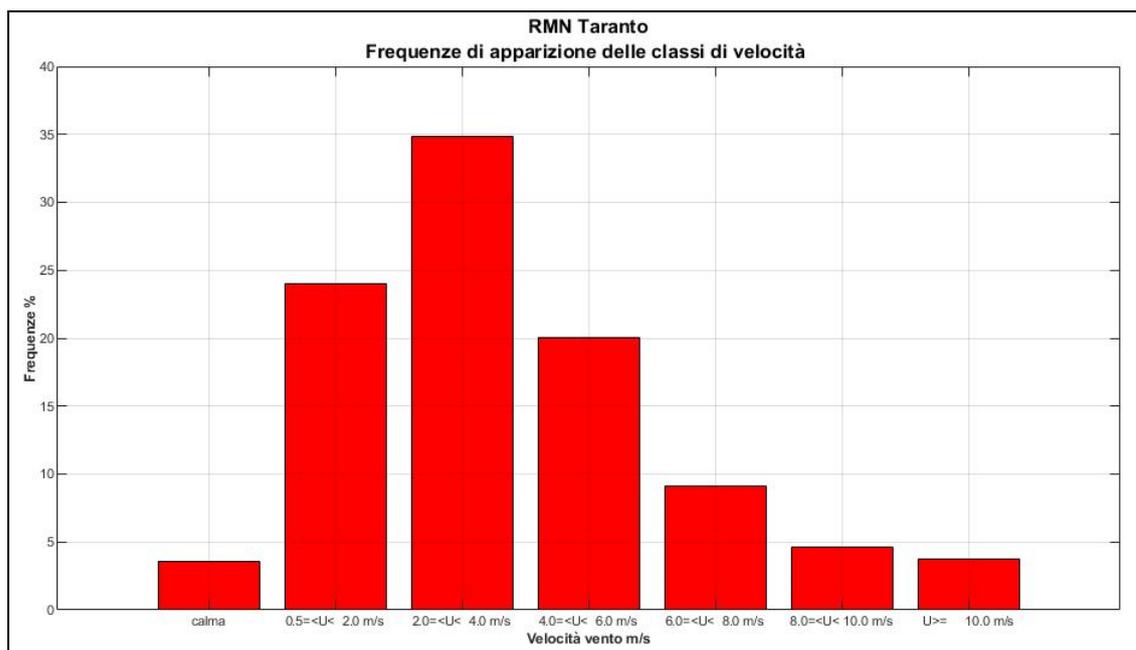
### **3.1 LA STAZIONE ANEMOMETRICA DI TARANTO**

La serie storica analizzata comprende le registrazioni acquisite nel periodo 1999 – 2022. Nel periodo compreso tra il 2016 e il 2018 la stazione non ha funzionato.

Dall’elaborazione statistica della serie completa delle registrazioni (figura 3.1.1 e 3.1.2; tabella 3.1.1) risulta che mediamente in un anno la classe delle calme è poco frequente; esse, infatti, costituiscono il 3.6% dell’intera popolazione.



**Figura 3.1.1 - Frequenze di apparizione annuali.**



**Figura 3.1.2 - Frequenze di apparizione annuali.**

Dir.	Classi di velocità del vento (m/s)					
	0.5-2.0	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	>10.0
0	1.09	1.23	1.47	0.84	0.32	0.09
10	1.46	1.40	1.05	0.34	0.09	0.02
20	1.96	1.41	0.50	0.12	0.02	0.01
30	2.97	3.20	0.12	0.02	0.00	0.00
40	2.66	3.81	0.18	0.01	0.00	0.00
50	1.49	1.98	0.17	0.01	0.00	0.00
60	0.73	1.10	0.26	0.04	0.01	0.00
70	0.50	0.66	0.35	0.13	0.04	0.03
80	0.49	0.63	0.55	0.33	0.19	0.16
90	0.43	0.54	0.53	0.47	0.42	0.56
100	0.47	0.52	0.58	0.57	0.51	0.81
110	0.50	0.59	0.72	0.62	0.44	0.53
120	0.59	0.98	1.35	0.68	0.31	0.27
130	0.67	1.35	1.50	0.56	0.26	0.25
140	0.89	2.21	1.78	0.50	0.30	0.27
150	0.97	2.11	1.08	0.34	0.26	0.23
160	0.70	1.54	0.69	0.25	0.17	0.13
170	0.48	0.97	0.36	0.14	0.06	0.03
180	0.53	0.97	0.34	0.07	0.02	0.00
190	0.71	1.38	0.49	0.10	0.02	0.00
200	0.81	1.75	0.80	0.17	0.04	0.00
210	0.94	2.02	2.27	0.75	0.19	0.04
220	0.93	1.48	1.85	1.07	0.45	0.13
230	1.04	1.04	1.09	0.97	0.51	0.17
240	23.98	34.84	20.05	9.09	4.61	3.74
250	1.09	1.23	1.47	0.84	0.32	0.09
260	1.46	1.40	1.05	0.34	0.09	0.02
270	1.96	1.41	0.50	0.12	0.02	0.01
280	2.97	3.20	0.12	0.02	0.00	0.00
290	2.66	3.81	0.18	0.01	0.00	0.00
300	1.49	1.98	0.17	0.01	0.00	0.00
310	0.73	1.10	0.26	0.04	0.01	0.00
320	0.50	0.66	0.35	0.13	0.04	0.03
330	0.49	0.63	0.55	0.33	0.19	0.16
340	0.43	0.54	0.53	0.47	0.42	0.56
350	0.47	0.52	0.58	0.57	0.51	0.81

**Tabella 3.1.1 - Frequenze di apparizione annuali.**

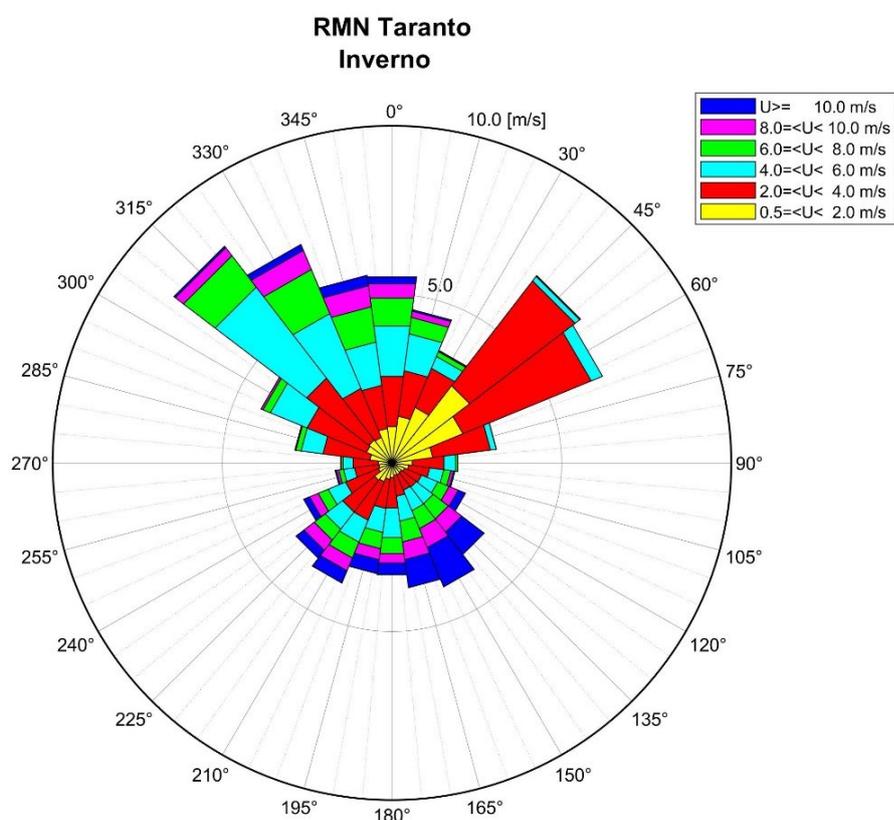
Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risultano 3 diversi gruppi di direzioni (Maestrale 315-330°, Grecale 45-60° e Libeccio 210-225°) che fanno registrare una percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione pari al 5-6%.

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 4 m/s (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 59% della popolazione.

I venti di III e IV classe costituiscono da soli circa il 30% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 8 m/s costituiscono il restante 8.3% del totale. Il paraggio, infatti, risulta interessato da venti di intensità piuttosto bassa e molto raramente sono stati osservati fenomeni anemologici di un certo rilievo. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 8 m/s si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da Scirocco e da Sud, mentre i venti spiranti dalle altre direzioni sono caratterizzati da velocità piuttosto basse.

### 3.2 FREQUENZE DATI STAGIONALI

Dall’analisi dei dati relativi alla stagione invernale (figura 3.2.1 e tabella 3.2.1) risulta che la frequenza delle calme è sostanzialmente omogenea in tutte le stagioni (4% in inverno). Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti provenienti da Maestrale e Grecale che fanno registrare una percentuale di presenze rispetto all’intera popolazione pari al 7-8%.



**Figura 3.2.1 - Frequenze di apparizione invernali.**

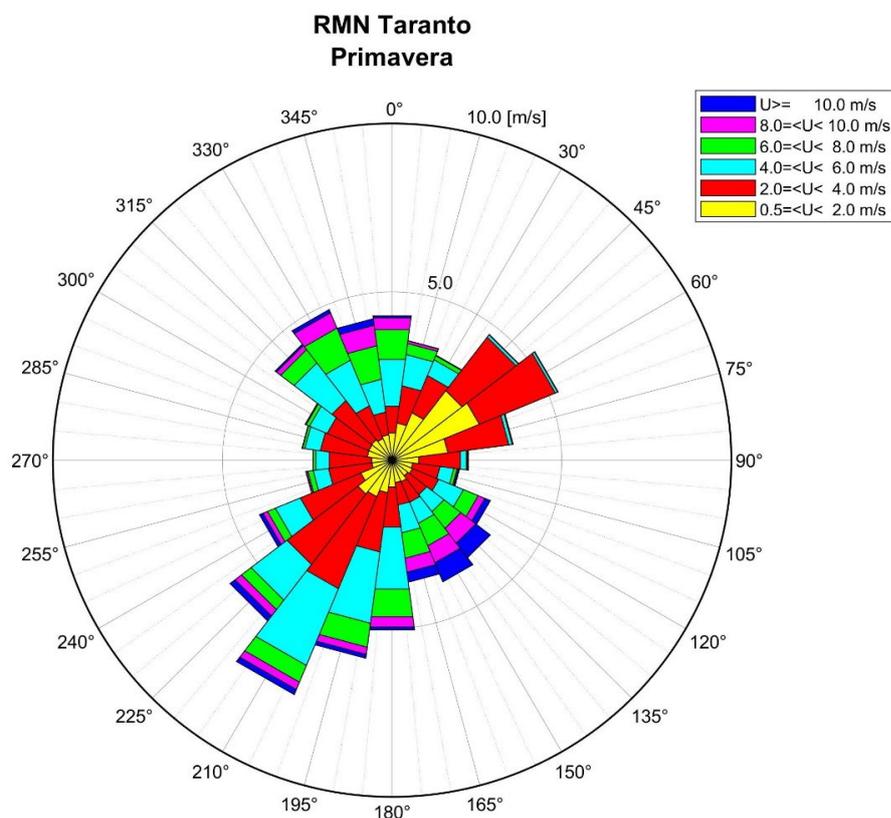
Dir.	Classi di velocità del vento (m/s)
------	------------------------------------

	0.5-2.0	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	>10.0
0	1.08	1.50	1.51	0.84	0.42	0.21
10	1.40	1.36	1.10	0.49	0.18	0.05
20	1.78	1.26	0.38	0.15	0.03	0.01
30	2.89	3.92	0.17	0.02	0.00	0.00
40	2.26	4.09	0.36	0.00	0.00	0.00
50	1.21	1.72	0.17	0.00	0.00	0.00
60	0.60	0.94	0.35	0.06	0.00	0.00
70	0.50	0.62	0.42	0.21	0.08	0.04
80	0.40	0.54	0.52	0.36	0.29	0.23
90	0.35	0.56	0.62	0.57	0.49	0.84
100	0.38	0.50	0.66	0.58	0.61	1.26
110	0.37	0.62	0.75	0.62	0.52	0.84
120	0.43	0.91	0.89	0.48	0.29	0.35
130	0.49	0.88	0.71	0.49	0.33	0.42
140	0.60	1.24	0.71	0.51	0.41	0.40
150	0.65	1.19	0.64	0.41	0.38	0.30
160	0.44	1.05	0.56	0.32	0.27	0.19
170	0.39	0.73	0.33	0.14	0.07	0.04
180	0.41	0.75	0.29	0.06	0.02	0.00
190	0.66	1.39	0.65	0.15	0.02	0.01
200	0.81	1.90	1.17	0.23	0.06	0.01
210	0.86	2.31	3.40	1.17	0.30	0.06
220	0.82	1.57	2.40	1.42	0.61	0.19
230	1.03	1.29	1.30	1.06	0.63	0.32
240	1.08	1.50	1.51	0.84	0.42	0.21
250	1.40	1.36	1.10	0.49	0.18	0.05
260	1.78	1.26	0.38	0.15	0.03	0.01
270	2.89	3.92	0.17	0.02	0.00	0.00
280	2.26	4.09	0.36	0.00	0.00	0.00
290	1.21	1.72	0.17	0.00	0.00	0.00
300	0.60	0.94	0.35	0.06	0.00	0.00
310	0.50	0.62	0.42	0.21	0.08	0.04
320	0.40	0.54	0.52	0.36	0.29	0.23
330	0.35	0.56	0.62	0.57	0.49	0.84
340	0.38	0.50	0.66	0.58	0.61	1.26
350	0.37	0.62	0.75	0.62	0.52	0.84

**Tabella 3.2.1 - Frequenze di apparizione invernali.**

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 4 m/s (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 53% della popolazione. I venti di III e IV classe costituiscono da soli circa il 30% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 8 m/s costituiscono il restante 12% del totale. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 8 m/s si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da Scirocco e da Sud.

Dall'elaborazione dei dati registrati durante la stagione primaverile (figura 3.2.2 e tabella 3.2.2) risulta che la classe delle calme costituisce il 3.8% dell'intera popolazione.



Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti provenienti da Libeccio che fanno registrare una percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione pari al 6-7%. Le direzioni Maestrale e Grecale fanno registrare percentuali che si aggirano intorno al 5%.

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 4 m/s (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 58% della popolazione.

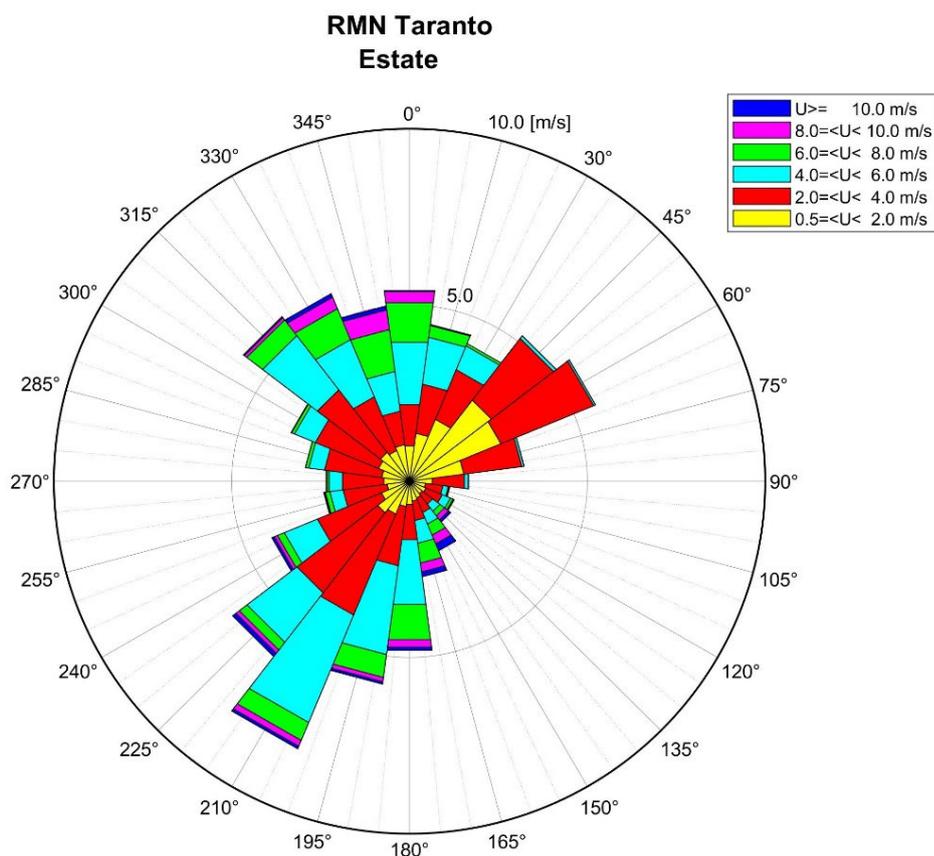
I venti di III e IV classe costituiscono da soli circa il 30% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 8 m/s costituiscono il restante 7% del totale. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 8 m/s si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da Scirocco.

Dir.	Classi di velocità del vento (m/s)					
	0.5-2.0	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	>10.0
0	0.82	0.80	1.41	0.89	0.35	0.06
10	1.11	1.12	0.94	0.33	0.08	0.01
20	1.52	1.20	0.51	0.13	0.02	0.00
30	2.60	2.01	0.09	0.02	0.00	0.00
40	2.79	2.43	0.07	0.01	0.00	0.00
50	1.66	1.81	0.10	0.02	0.00	0.00
60	0.80	1.23	0.18	0.03	0.02	0.01
70	0.62	0.81	0.41	0.10	0.04	0.03
80	0.65	0.84	0.79	0.47	0.21	0.18
90	0.59	0.71	0.64	0.63	0.55	0.54
100	0.70	0.66	0.68	0.72	0.55	0.62
110	0.67	0.67	0.84	0.76	0.42	0.30
120	0.80	1.20	1.86	0.83	0.31	0.08
130	0.98	1.77	2.14	0.72	0.22	0.12
140	1.17	2.96	2.47	0.54	0.24	0.16
150	1.27	2.64	1.33	0.36	0.24	0.19
160	1.00	1.93	0.80	0.25	0.14	0.11
170	0.60	1.29	0.46	0.16	0.05	0.02
180	0.60	1.26	0.40	0.08	0.01	0.00
190	0.74	1.40	0.47	0.07	0.02	0.00
200	0.74	1.33	0.56	0.11	0.03	0.00
210	0.76	1.47	1.41	0.50	0.16	0.05
220	0.70	1.05	1.47	1.03	0.49	0.11
230	0.76	0.68	0.98	1.01	0.61	0.20
240	0.82	0.80	1.41	0.89	0.35	0.06
250	1.11	1.12	0.94	0.33	0.08	0.01
260	1.52	1.20	0.51	0.13	0.02	0.00
270	2.60	2.01	0.09	0.02	0.00	0.00
280	2.79	2.43	0.07	0.01	0.00	0.00
290	1.66	1.81	0.10	0.02	0.00	0.00
300	0.80	1.23	0.18	0.03	0.02	0.01
310	0.62	0.81	0.41	0.10	0.04	0.03
320	0.65	0.84	0.79	0.47	0.21	0.18
330	0.59	0.71	0.64	0.63	0.55	0.54
340	0.70	0.66	0.68	0.72	0.55	0.62
350	0.67	0.67	0.84	0.76	0.42	0.30

**Tabella 3.2.2 - Frequenze di apparizione primaverili.**

Dall'elaborazione dei dati registrati durante la stagione estiva (figura 3.2.3 e tabella 3.2.3) risulta che la classe delle calme costituisce il 3.8% dell'intera popolazione.

Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti provenienti da Libeccio che fanno registrare una percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione pari al 6-8%. Le direzioni Maestrale e Grecale fanno registrare percentuali che si aggirano intorno al 5-6%.



**Figura 3.2.3 - Frequenze di apparizione estive.**

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 4 m/s (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 60% della popolazione.

I venti di III e IV classe costituiscono da soli circa il 31% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 8 m/s costituiscono il restante 4% del totale. Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 8 m/s si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da Tramontana e Scirocco.

Dir.	Classi di velocità del vento (m/s)					
	0.5-2.0	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	>10.0
0	1.01	1.18	1.79	1.13	0.32	0.03
10	1.37	1.41	1.34	0.34	0.03	0.00
20	1.90	1.53	0.73	0.07	0.00	0.00
30	2.90	2.21	0.09	0.00	0.00	0.00
40	2.78	2.83	0.05	0.00	0.00	0.00
50	1.54	1.65	0.06	0.00	0.00	0.00
60	0.65	0.91	0.11	0.01	0.00	0.00
70	0.45	0.50	0.16	0.03	0.01	0.00
80	0.50	0.50	0.25	0.08	0.03	0.01
90	0.45	0.37	0.26	0.16	0.15	0.08

<b>100</b>	0.51	0.45	0.35	0.34	0.27	0.21
<b>110</b>	0.56	0.56	0.65	0.57	0.25	0.14
<b>120</b>	0.66	1.01	1.86	1.00	0.22	0.09
<b>130</b>	0.72	1.70	2.54	0.65	0.12	0.07
<b>140</b>	1.01	3.10	3.30	0.55	0.18	0.08
<b>150</b>	1.13	2.86	1.77	0.27	0.12	0.12
<b>160</b>	0.86	1.95	1.01	0.21	0.10	0.07
<b>170</b>	0.64	1.24	0.38	0.13	0.03	0.02
<b>180</b>	0.73	1.18	0.38	0.06	0.02	0.00
<b>190</b>	0.79	1.62	0.45	0.09	0.01	0.00
<b>200</b>	0.95	1.92	0.63	0.09	0.02	0.00
<b>210</b>	1.04	2.23	1.94	0.56	0.09	0.04
<b>220</b>	0.95	1.65	1.75	0.95	0.35	0.11
<b>230</b>	1.05	0.96	1.14	1.20	0.56	0.12
<b>240</b>	1.01	1.18	1.79	1.13	0.32	0.03
<b>250</b>	1.37	1.41	1.34	0.34	0.03	0.00
<b>260</b>	1.90	1.53	0.73	0.07	0.00	0.00
<b>270</b>	2.90	2.21	0.09	0.00	0.00	0.00
<b>280</b>	2.78	2.83	0.05	0.00	0.00	0.00
<b>290</b>	1.54	1.65	0.06	0.00	0.00	0.00
<b>300</b>	0.65	0.91	0.11	0.01	0.00	0.00
<b>310</b>	0.45	0.50	0.16	0.03	0.01	0.00
<b>320</b>	0.50	0.50	0.25	0.08	0.03	0.01
<b>330</b>	0.45	0.37	0.26	0.16	0.15	0.08
<b>340</b>	0.51	0.45	0.35	0.34	0.27	0.21
<b>350</b>	0.56	0.56	0.65	0.57	0.25	0.14

**Tabella 3.2.3 - Frequenze di apparizione estive.**

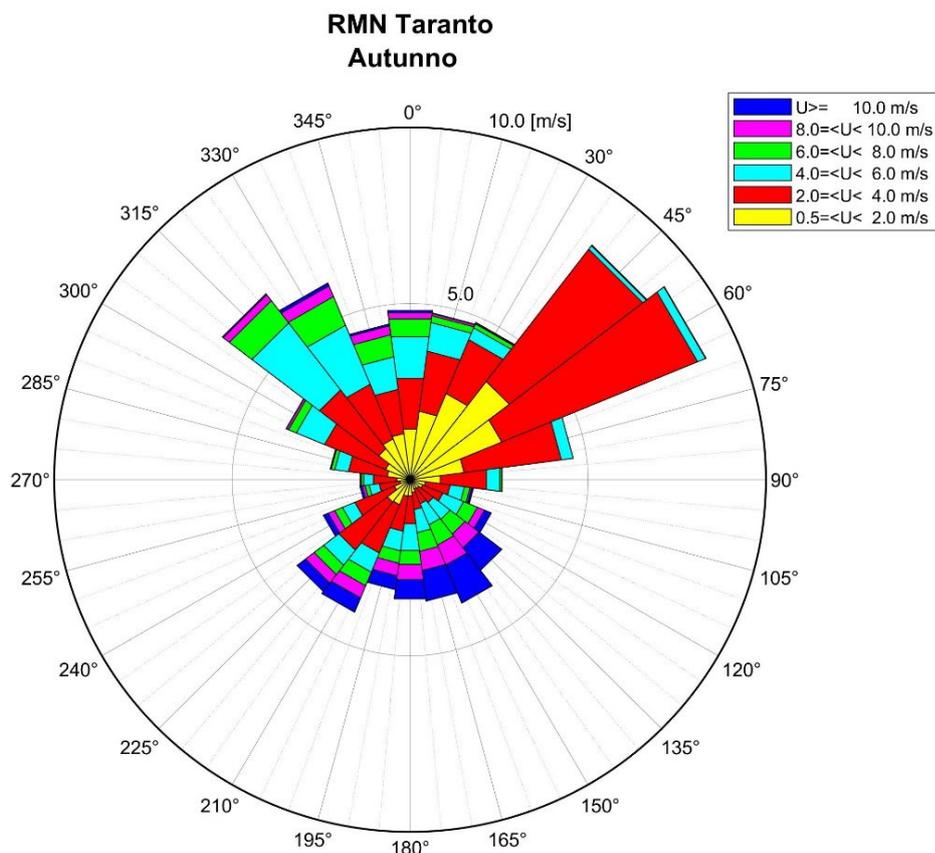
Dall'elaborazione dei dati registrati durante la stagione autunnale (figura 3.2.4 e tabella 3.2.4) risulta che la classe delle calme costituisce circa il 2.8% dell'intera popolazione.

Dalla distribuzione delle frequenze di apparizione dei venti per direzione di provenienza risulta che il maggior numero di osservazioni spetta ai venti provenienti da Grecale che fanno registrare una percentuale di presenze rispetto all'intera popolazione pari al 8-9%. Le direzioni appartenenti a Maestrale fanno registrare percentuali che si aggirano intorno al 6%, mentre le altre direzioni si attestano intorno al 4-5%.

Se si classificano i dati secondo l'intensità si osserva che i venti con velocità minore di 4 m/s (calma, I e II classe Beaufort) rappresentano il 63% della popolazione.

I venti di III e IV classe costituiscono da soli circa il 24% della popolazione, mentre i venti con velocità maggiore di 8 m/s costituiscono il restante 10% del totale.

Se si passa a considerare solo i venti con velocità superiore a 8 m/s si osserva che le frequenze maggiori spettano ai venti da Scirocco.



**Figura 3.2.4 - Frequenze di apparizione autunnali.**

Dir.	Classi di velocità del vento (m/s)					
	0.5-2.0	2.0-4.0	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	>10.0
0	1.45	1.45	1.19	0.51	0.18	0.07
10	1.96	1.72	0.82	0.20	0.06	0.02
20	2.65	1.66	0.36	0.12	0.03	0.01
30	3.52	4.73	0.12	0.02	0.00	0.00
40	2.79	5.96	0.24	0.01	0.00	0.00
50	1.53	2.76	0.34	0.00	0.00	0.00
60	0.86	1.30	0.38	0.06	0.01	0.00
70	0.44	0.70	0.40	0.16	0.05	0.05
80	0.39	0.61	0.63	0.42	0.22	0.21
90	0.32	0.51	0.60	0.53	0.49	0.81
100	0.29	0.46	0.65	0.62	0.61	1.17
110	0.37	0.49	0.66	0.54	0.55	0.88
120	0.46	0.81	0.77	0.40	0.43	0.55
130	0.47	1.01	0.56	0.35	0.36	0.40
140	0.77	1.49	0.59	0.42	0.37	0.44
150	0.80	1.72	0.54	0.34	0.30	0.30
160	0.48	1.20	0.38	0.24	0.19	0.15
170	0.29	0.58	0.29	0.12	0.08	0.06
180	0.38	0.66	0.28	0.07	0.02	0.02

<b>190</b>	0.65	1.10	0.39	0.10	0.02	0.00
<b>200</b>	0.75	1.86	0.86	0.24	0.06	0.01
<b>210</b>	1.11	2.10	2.39	0.80	0.22	0.03
<b>220</b>	1.25	1.68	1.81	0.88	0.33	0.09
<b>230</b>	1.32	1.26	0.93	0.63	0.26	0.06
<b>240</b>	1.45	1.45	1.19	0.51	0.18	0.07
<b>250</b>	1.96	1.72	0.82	0.20	0.06	0.02
<b>260</b>	2.65	1.66	0.36	0.12	0.03	0.01
<b>270</b>	3.52	4.73	0.12	0.02	0.00	0.00
<b>280</b>	2.79	5.96	0.24	0.01	0.00	0.00
<b>290</b>	1.53	2.76	0.34	0.00	0.00	0.00
<b>300</b>	0.86	1.30	0.38	0.06	0.01	0.00
<b>310</b>	0.44	0.70	0.40	0.16	0.05	0.05
<b>320</b>	0.39	0.61	0.63	0.42	0.22	0.21
<b>330</b>	0.32	0.51	0.60	0.53	0.49	0.81
<b>340</b>	0.29	0.46	0.65	0.62	0.61	1.17
<b>350</b>	0.37	0.49	0.66	0.54	0.55	0.88

**Tabella 3.2.4** - Frequenze di apparizione autunnali.

### 3.3 ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DEI DATI DI VENTO

L'analisi dei venti estremi è stata effettuata al fine di studiare la generazione e la propagazione del moto ondoso nell'area oggetto dell'intervento. A tal fine, sono stati valutati gli eventi anemologici con definito tempo di ritorno per tutti i settori di provenienza del vento.

Considerata la ridotta lunghezza temporale della serie, per l'individuazione degli eventi impiegati nell'analisi, si è scelto di eseguire una analisi del tipo “*Peak Over Threshold*” (POT) individuando una serie di eventi indipendenti sopra una determinata soglia.

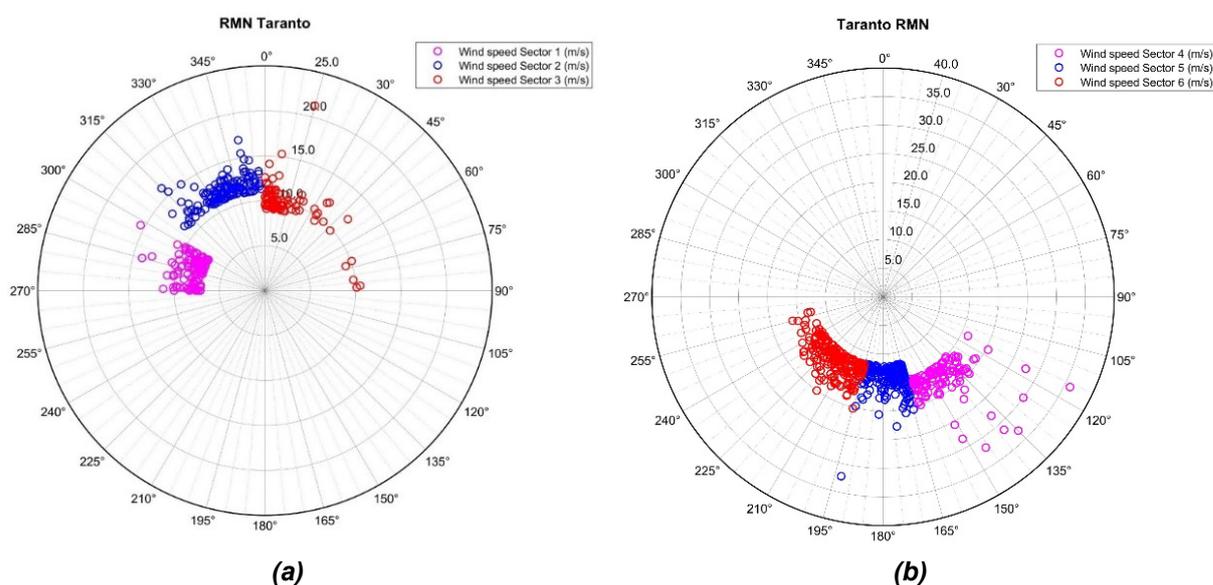
L'analisi sopra soglia è stata eseguita su 6 diversi sub-settori individuati sulla base delle elaborazioni dei dati di vento (distribuzione delle velocità massime e delle registrazioni). Per ciascun settore sono stati individuati all'interno della serie storica gli eventi massimi verificandone l'indipendenza.

Per il settore di 270°÷300°N (Ponente) è stata fissata una soglia di 7m/s e sono stati individuati 127 eventi; per il settore di 300°÷360°N (Maestrale-Tramontana) è stata fissata una soglia di 11m/s e sono stati individuati 133 eventi; per il settore di 0°÷90°N (Tramontana-Grecale), infine, è stata fissata una soglia di 9m/s e sono stati individuati 95 eventi.

Per il settore di 90°÷165°N (Levante-Scirocco) è stata fissata una soglia di 15 m/s e sono stati individuati 133 eventi; per il settore di 165°÷195°N (Mezzogiorno) è stata fissata una soglia di 12m/s e sono stati individuati 193 eventi, mentre per il

settore di 195°÷270°N (Libeccio) è stata fissata una soglia di 12m/s e sono stati individuati 209 eventi.

Di seguito si riporta la distribuzione degli eventi massimi individuati per i sei settori in funzione della direzione di provenienza. Si osserva che gli eventi caratterizzati dai valori più elevati di velocità provengono dai quadranti meridionali, in particolare dal settore di Scirocco. In riferimento ai settori settentrionali i venti più intensi provengono dal settore di Maestrale-Tramontana ed è altresì da evidenziare la presenza di un evento da Grecale particolarmente intenso.



**Figura 3.3.1 - Osservazioni anemologiche selezionate per l'analisi degli eventi estremi: a) quadranti I e IV; b) quadranti II e III.**

L'analisi statistica è stata condotta successivamente utilizzando le distribuzioni di Weibull con  $k = 0.75, 1.00, 1.40$  e  $2.00$ . I parametri della distribuzione sono stati determinati verificando l'adattabilità ai dati delle 4 funzioni, attraverso un'analisi di regressione lineare effettuata con il metodo dei minimi quadrati e considerando le distribuzioni che offrono il più alto grado di correlazione.

Nella tabella seguente sono riportati i parametri della legge di distribuzione adottata relativi al settore di provenienza del moto ondoso esaminato; tali parametri sono stati ricavati con il metodo dei momenti.

Direzione	k	A	B
Settore I: 270° - 300°	1.00	1.4025	6.9948
Settore II: 300° - 360°	1.00	1.1031	11.0558
Settore III: 0° - 90°	0.75	0.9841	9.1965
Settore IV: 90° - 165°	0.75	2.3091	15.2576
Settore V: 165° - 195°	1.00	2.4152	12.0124
Settore V: 195° - 270°	1.40	2.6683	11.7298

*Tabella 3.3.1 - Parametri della legge di distribuzione di Weibull.*

Nella tabella seguente sono riportate le velocità del vento calcolate per assegnati tempi di ritorno  $T_r$ , relative ai settori angolari esaminati.

Tempo di ritorno (anni)	Settore I U (m/s)	Settore II U (m/s)	Settore III U (m/s)	Settore IV U (m/s)	Settore V U (m/s)	Settore VI U (m/s)
100	15.79	18.02	19.88	42.22	28.17	22.19
50	14.82	17.26	18.26	38.35	26.50	21.41
25	13.85	16.50	16.71	34.64	24.82	20.61
20	13.53	16.25	16.23	33.48	24.28	20.35
10	12.56	15.48	14.78	29.99	22.61	19.50
5	11.59	14.72	13.43	26.70	20.93	18.62

*Tabella 3.3.2 - Eventi estremi di velocità del vento U relativi ai diversi settori esaminati.*

---

## **4 MOTO ONDOSO ALL'INTERNO DEL MAR PICCOLO**

Nel presente capitolo è riportato lo studio con cui sono state determinate le condizioni ondose in corrispondenza dello specchio acqueo di intervento, a seguito dell'elaborazione di piani d'onda ottenuti attraverso l'applicazione di un idoneo modello matematico.

Per la definizione dei piani d'onda occorre considerare che il Mar Piccolo di Taranto è un bacino acqueo interno che si estende per poco più di 20 km<sup>2</sup>, a nord della città di Taranto. È suddiviso in due seni di forma ellittica; il primo seno comunica con il Mar Grande attraverso due varchi (il canale navigabile ed il canale di Porta Napoli), mentre il secondo seno è poco più grande del primo ed è più interno.

Nel bacino del Mar Piccolo sfociano brevi corsi d'acqua costeggiati da preziosi ambienti umidi; da depressioni imbutiformi dei fondali di entrambi i seni, inoltre, sgorgano sorgenti sottomarine di fredda acqua ipogea, chiamate localmente citri; queste sorgenti, oltre ad assumere un ruolo fondamentale nel regolare la temperatura delle acque dell'intero bacino, influenzano anche la salinità, che è di poco inferiore a quella del mare aperto.

Data la modesta larghezza dei varchi di comunicazione con il Mar Grande, e considerato che lo stesso Mar Grande, pur essendo costituito da un bacino più esteso del Mar Piccolo, risulta a sua volta abbastanza protetto rispetto alle mareggiate esterne, l'agitazione ondosa che si instaura nel Mar Piccolo non risente delle condizioni ondose esterne ed è quasi esclusivamente connessa al vento spirante che incide direttamente sul suo piccolo specchio acqueo interno.

Nel Mar Piccolo, del resto, l'area di generazione del moto ondoso ha uno sviluppo lineare (fetch) dell'ordine di 2-3km, per cui in definitiva i valori di altezza d'onda che si generano all'interno del Mar Piccolo sono molto ridotti, praticamente trascurabili.

Ad ogni modo, al fine di fornire una stima dei valori di altezza d'onda che si possono avere in corrispondenza dello specchio acqueo di intervento, nel seguito sono stati sviluppati **i piani d'onda generati all'interno del Mar Piccolo** conseguenti a fissate condizioni anemologiche spiranti sullo specchio acqueo interno.

---

#### **4.1 IL MODELLO MATEMATICO MIKE 21 SW**

Per l'elaborazione dei piani d'onda è stato utilizzato il modello matematico **MIKE 21 SW** (Spectral Waves), sviluppato dal Danish Hydraulic Institute (DHI). Il codice di calcolo simula la crescita, la trasformazione e la dissipazione di onde corte e onde lunghe in aree costiere. In particolare, il MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

La prima formulazione è basata sulla “*wave action conservation equation*” sviluppata da Komen et al. (1994) e Young (1999). La seconda è basata su una parametrizzazione della “*wave action conservation equation*” introdotta nel dominio delle frequenze.

Le equazioni di base sono formulate sia nelle coordinate cartesiane, per domini di calcolo a scala limitata, sia nelle coordinate polari per applicazioni a larga scala. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base è effettuata utilizzando l'approccio ai volumi finiti, attraverso l'utilizzo di una *mesh* di calcolo non strutturata.

Nel presente lavoro è stata adottata la formulazione “*fully spectral*” che include i fenomeni fisici di seguito elencati:

- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni del fondale;
- diffrazione;
- riflessione semplice.

Il *MIKE 21 SW* è utilizzato per la valutazione del clima ondoso off-shore ed in aree costiere, per scopi previsionali e analisi storiche. Una tipica applicazione di SW è il supporto alla progettazione di un'opera costiera o portuale, partendo dalla disponibilità di dati meteomarini off-shore (boe ondometriche o modelli a larga scala) individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.

---

Il processo di propagazione dell'onda si risolve considerando l'equazione di bilancio dell'energia associata al moto ondoso che tiene in conto i diversi contributi: la variazione nel tempo, la propagazione nello spazio, la variazione nella direzione, la variazione nel dominio delle frequenze e i termini sorgente. I termini sorgente sono fenomeni fisici che contribuiscono alla variazione dell'energia del moto ondoso sia in senso negativo sia in senso positivo. I termini sorgente negativi sono i fenomeni che hanno una funzione dissipativa, come quelli sopra elencati, i termini positivi sono invece quelli che svolgono una funzione di accrescimento, come la generazione del moto ondoso per effetto del vento.

Il modello *MIKE 21 SW* descrive l'evoluzione delle caratteristiche delle onde (altezza, periodo, direzione e forma spettrale) nella propagazione dal largo verso riva in seguito ai fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, di frangimento, di diffrazione, di interazione tra le onde e di whitecapping. Le simulazioni effettuate con *MIKE 21 SW* permettono di ottenere una dettagliata rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo, con particolare attenzione alla zona più prossima alla costa, laddove la risoluzione spaziale della *mesh* di calcolo può essere infittita per ottenere un migliore dettaglio delle condizioni di morfodinamica instaurate dal moto ondoso incidente.

L'applicazione del modello prevede la definizione di una griglia di base rappresentativa della batimetria del paraggio; l'output del modello consiste nella definizione delle condizioni ondose in ciascun nodo della griglia di calcolo fissata espresse in termini di altezza d'onda, periodo e direzione.

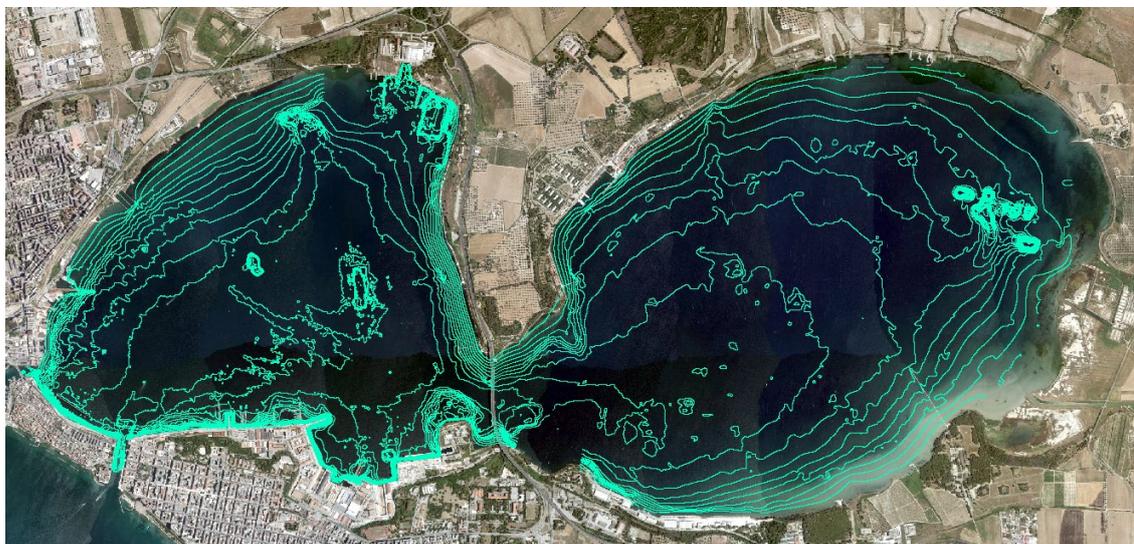
Per ulteriori informazioni relative al modello di calcolo MIKE 21 SW si rimanda all'Allegato 1 in coda alla presente relazione.

## **4.2 GRIGLIA DI CALCOLO**

Il primo passo nello studio di propagazione del clima ondoso effettuato con il modello *MIKE 21 SW* ha riguardato la preparazione della griglia di calcolo ricavata dalla batimetria in corrispondenza del paraggio di intervento.

A tale scopo è stata estratta la mappa batimetrica del Mar Piccolo di Taranto consultabile dal sito <https://www.navionics.com> (figura 4.2.1); successivamente le curve batimetriche sono state opportunamente digitalizzate e georeferenziate, quindi è stato ricavato il modello digitale dei fondali in formato ASCII (figura 4.2.2) che è

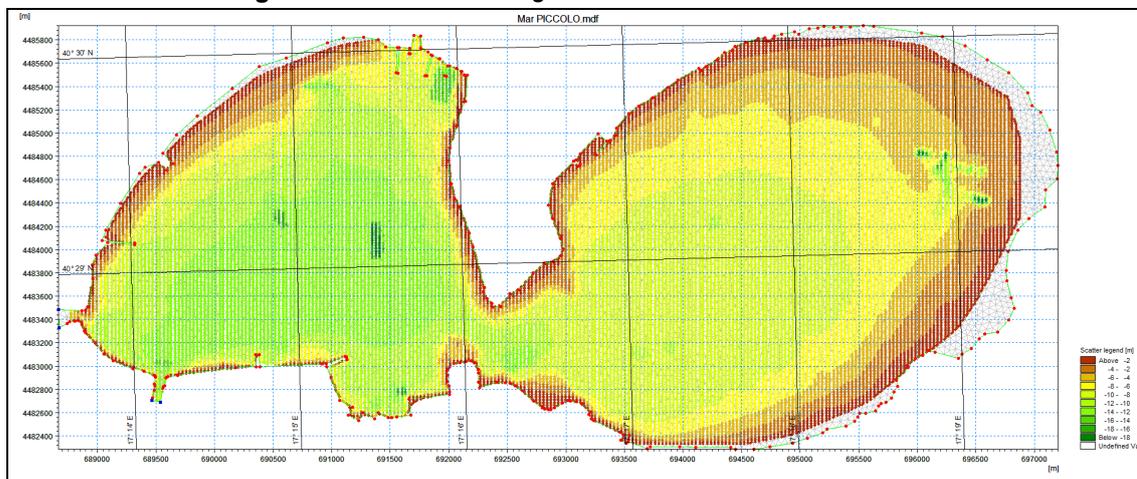
stato importato nel modello MIKE 21 SW ottenendo la griglia di calcolo di tutto il Mar Piccolo riportata nella figura 4.2.3.



**Figura 4.2.1 – Curve batimetriche nel Mar Piccolo (fonte <https://www.navionics.com>).**



**Figura 4.2.2 – Modello digitale dei fondali nel Mar Piccolo.**



**Figura 4.2.3 - Griglia batimetrica generale implementata nel modello MIKE 21 SW.**

### 4.3 PIANI D’ONDA

Per quanto riguarda le condizioni di vento simulate nei piani d’onda sviluppati, è stata considerata una vita utile delle opere pari a 50 anni, per cui sono stati implementati i valori di velocità del vento di cui alla tabella seguente (cfr. tab. 3.3.2).

settore di provenienza		dir (°N)	tempo di ritorno 50 anni
			velocità vento (m/s)
I	(270°N - 300°N)	285	14.82
II	(300°N - 360 °N)	330	17.26
III	(0°N - 90 °N)	45	18.26
IV	(90°N - 165 °N)	135	38.35
V	(165°N - 195 °N)	180	26.50
VI	(195°N - 270 °N)	225	21.41

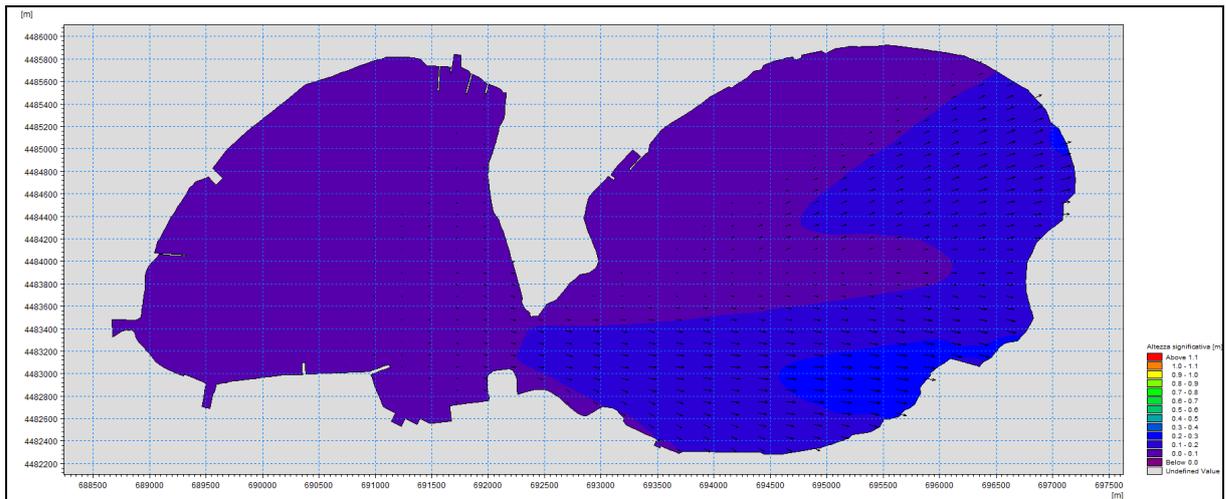
**Tabella 4.3.1** – Valori di velocità del vento implementati nel modello MIKE 21 SW.

Come riportato nella tabella precedente, si rappresenta che per il settore I (270 - 300 °N) è stato propagato un vento con direzione 285°N, per il settore II (300 - 360 °N) è stato propagato un vento con direzione 330°N, per il settore III (0 - 90 °N) è stato propagato un vento con direzione 45°N, per il settore IV (90 - 165 °N) è stato propagato un vento con direzione 135°N, per il settore V (165 - 195 °N) è stato propagato un vento con direzione 180°N, ed infine per il settore VI (195 - 270 °N) è stato propagato un vento con direzione 225°N.

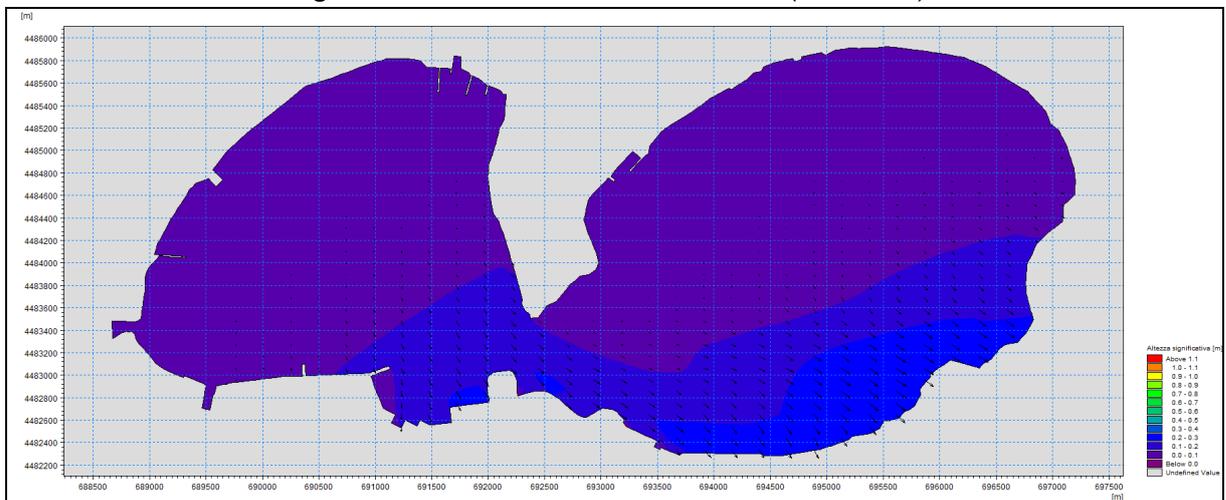
Nelle successive figure sono riportate le mappe di agitazione ondosa interna relative alle condizioni ondose riportate nella tabella precedente.

Dall’analisi delle figure si evince che i venti spiranti dal I e dal IV quadrante (figure 4.3.1 – 4.3.2 – 4.3.3) determinano condizioni ondose assolutamente trascurabili in corrispondenza dello specchio acqueo di intervento, con valori di altezza d’onda dell’ordine dei 10cm.

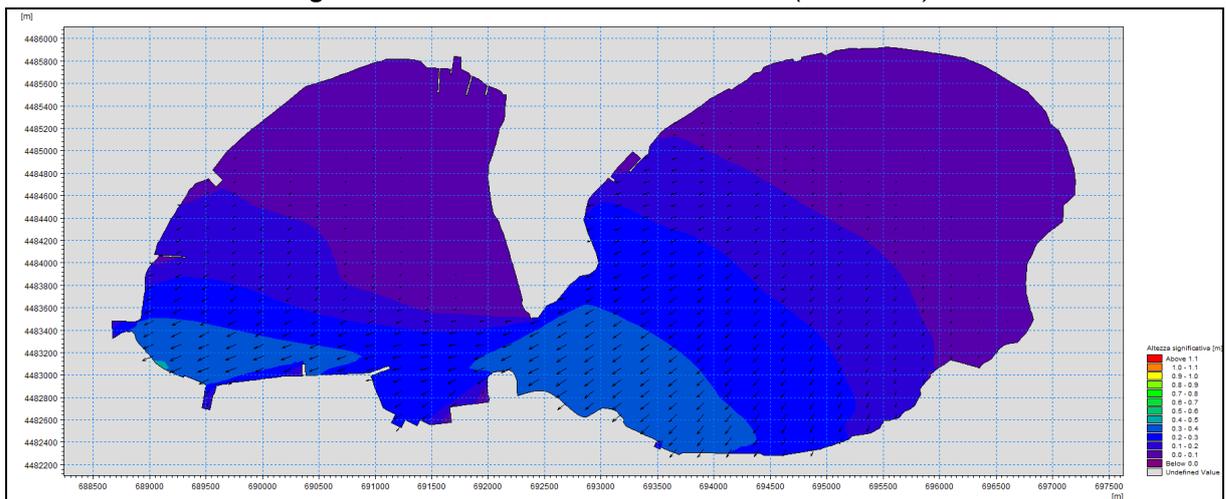
I venti spiranti dal II e dal III quadrante (figure 4.3.1 – 4.3.2 – 4.3.3) instaurano un moto ondoso decisamente più sostenuto nella zona interessata dal progetto; nello specifico le simulazioni effettuate hanno determinato che il vento da SSE (135°N) avente  $T_r$  50 anni comporta un’altezza d’onda di poco inferiore ad 1 metro, il vento da Sud (180°N) comporta un’altezza d’onda fino a circa 80cm, ed infine il vento da SSO (225 °N) comporta un’altezza d’onda fino a circa 40cm.



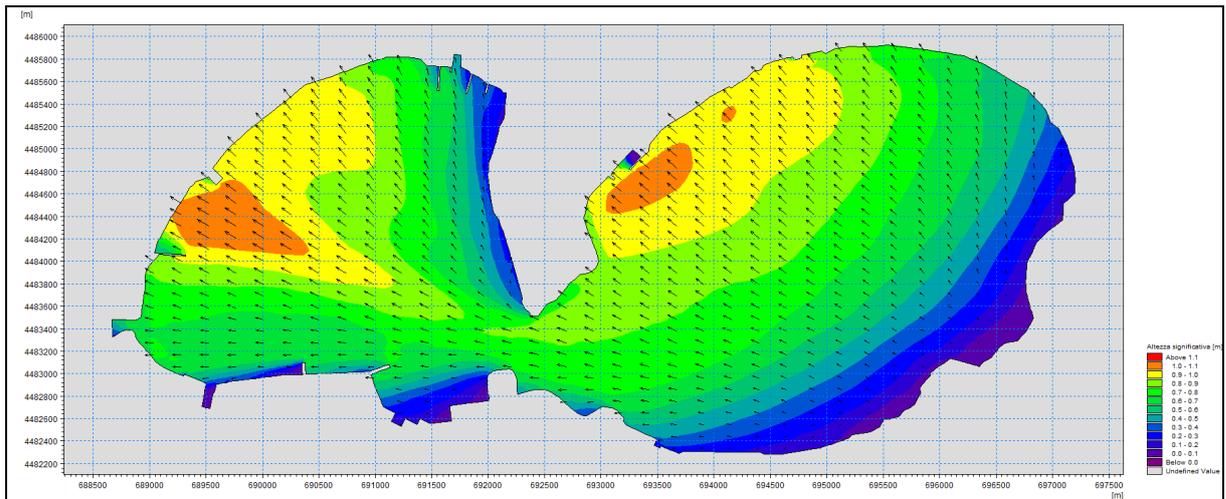
**Figura 4.3.1 – Settore I - Vento da 285°N (Tr 50 anni).**



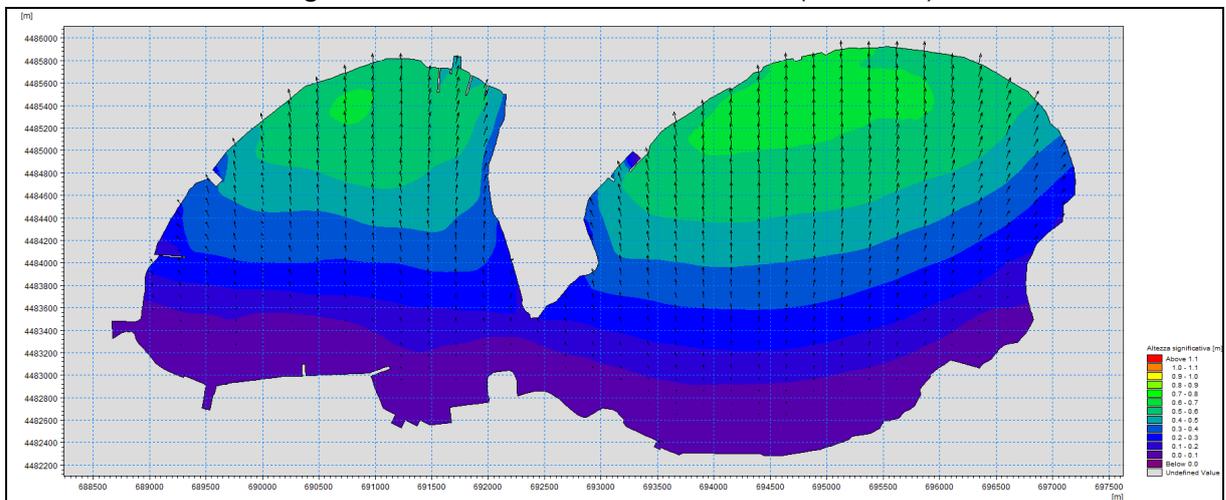
**Figura 4.3.2 – Settore II - Vento da 330°N (Tr 50 anni).**



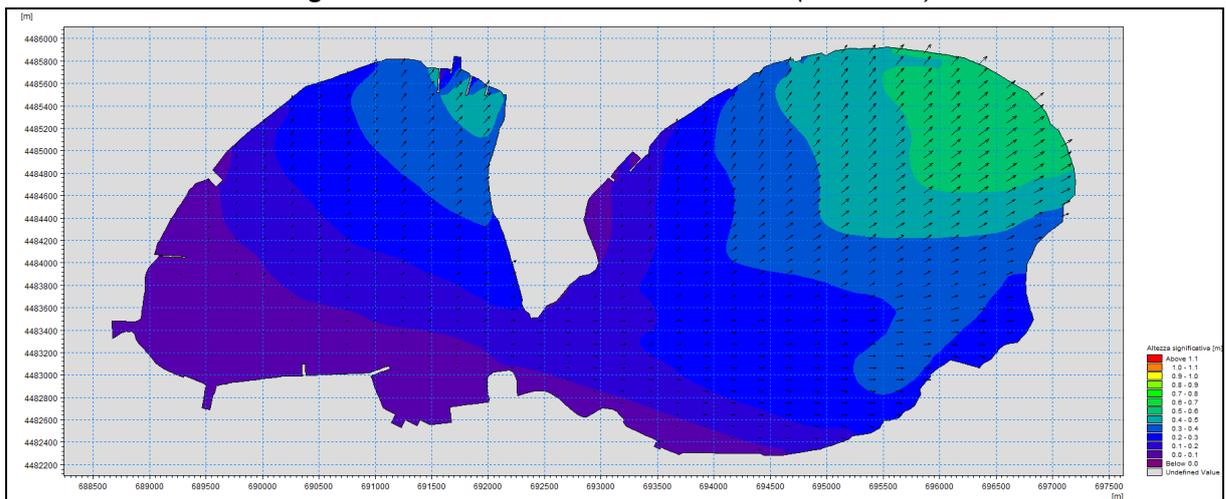
**Figura 4.3.3 – Settore III - Vento da 45°N (Tr 50 anni).**



**Figura 4.3.4 – Settore IV - Vento da 135°N (Tr 50 anni).**



**Figura 4.3.5 – Settore V - Vento da 180°N (Tr 50 anni).**



**Figura 4.3.6 – Settore VI - Vento da 225°N (Tr 50 anni).**

## 5 CORRENTI DI CIRCOLAZIONE ALL'INTERNO DEL MAR PICCOLO

Nel presente capitolo è stato ricostruito il regime delle correnti di circolazione all'interno del Mar Piccolo di Taranto attraverso l'utilizzo di un idoneo modello matematico in grado di riprodurre gli effetti determinati dalle forzanti di vento e di marea.

Nello specifico è stato utilizzato il modello di circolazione **MIKE 21 HD**, sviluppato presso il DHI (Danish Hydraulic Institute). Il MIKE 21 HD è un sistema di modellazione numerica che viene utilizzato per la simulazione di flussi a superficie libera in differenti aree di applicazione (ad esempio oceani, regioni costiere, estuari, laghi), variabili sotto diverse condizioni, prendendo in considerazione variazioni di densità, batimetria, forze esterne come fattori meteorologici, maree, correnti ed altre condizioni idrografiche.

Le principali caratteristiche del modello impiegato nel presente studio sono le seguenti:

- i punti computazionali sono stati inseriti in una griglia con maglia quadrata;
- la differenziazione orizzontale rispetto al tempo è esplicita, mentre la differenziazione verticale è di tipo implicito;
- il modello è a superficie libera e passo temporale discreto;
- fa riferimento alle equazioni di stato.

### 5.1 IL MODELLO MATEMATICO MIKE 21 HD

Il modello idrodinamico MIKE 21 HD risolve le equazioni, dipendenti dal tempo, della conservazione della massa e della quantità di moto nelle tre dimensioni, ossia le equazioni di Reynolds e Navier-Stokes, in cui il flusso è decomposto in quantità medie e fluttuazioni turbolente, così come segue:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \end{cases}$$

in cui tutte le variabili sono medie temporali,  $u_i$  rappresenta la velocità nella direzione  $x_i$ ,  $p$  è la pressione fluida,  $\rho$  la densità,  $\tau_{ij}$  il tensore degli sforzi viscosi definito come segue:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

con  $\mu$  la viscosità dinamica, ed infine  $\overline{\rho u'_i u'_j}$  è il tensore degli sforzi di Reynolds, che non può essere espresso esattamente in funzione delle variabili di flusso medie bensì va relazionato a quantità note attraverso un modello di turbolenza. In tale fase il modello tiene conto della turbolenza attraverso il parametro della viscosità turbolenta (*eddy viscosity*) secondo Boussinesq, che mette in relazione le tensioni di Reynolds con il campo della velocità media.

La formula che tiene conto della viscosità turbolenta  $E$  in relazione al campo delle velocità è la seguente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ h E \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h E \frac{\partial u}{\partial y} \right\}$$

dove  $u$  è la velocità nella direzione  $x$  ed  $h$  è la profondità dell'acqua.

Per quanto riguarda il presente studio, al coefficiente di viscosità turbolenta  $E$  è stato assegnato un valore variabile nel tempo in funzione del gradiente di velocità secondo la seguente formulazione di Smagorinsky:

$$E = C_s^2 \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

dove  $u$ ,  $v$  sono le componenti della velocità media nelle direzioni  $x$  e  $y$ ,  $\Delta$  è il passo della griglia di calcolo, e  $C_s$  è una costante che nel presente studio è stata fissata pari a 0.5.

Nel modulo idrodinamico HD l'effetto indotto dall'attrito del fondo sulle correnti di circolazione è calcolato attraverso la seguente formula:

$$B_r = \frac{g u |u|}{C^2}$$

in cui  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $u$  è la velocità e  $C$  è il numero di Chezy. Il numero di Chezy  $C$  è collegato al numero di Manning  $M$  attraverso la seguente formula:

$$C = M h^{1/6}$$

dove  $h$  è la profondità. Nelle simulazioni effettuate al parametro di Manning è stato assegnato un valore costante pari a  $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , consigliato in letteratura.

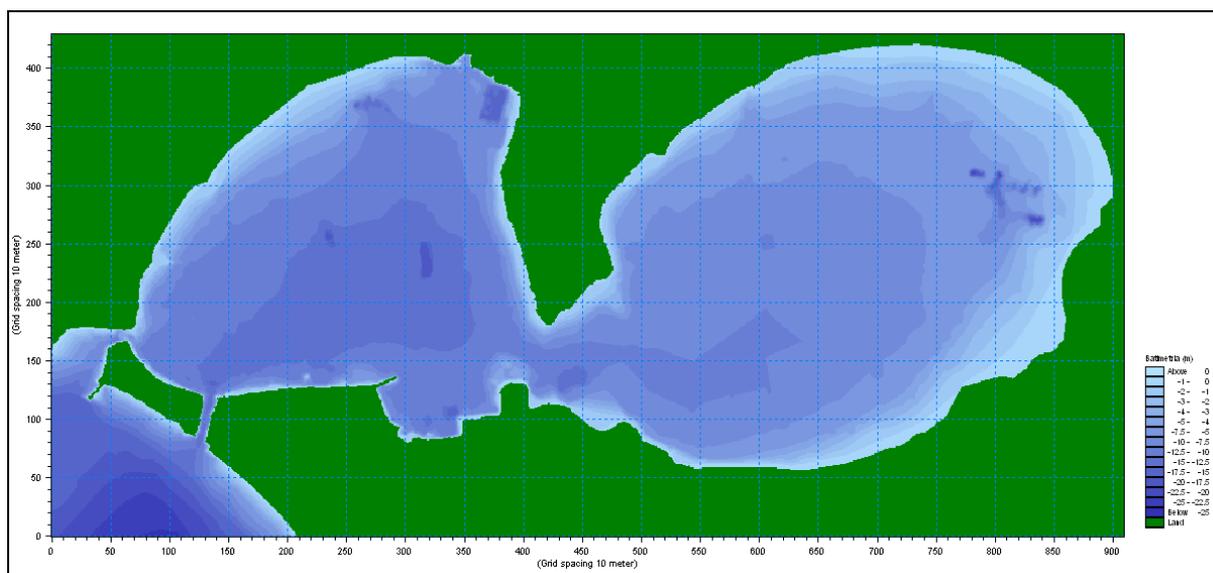
Per quanto riguarda la tensione tangenziale dovuta al vento, nel modulo idrodinamico HD adottato viene calcolata tramite la formula:

$$\tau = C_D \rho_a W^2$$

in cui al coefficiente di drag  $C_D$  viene assegnato un valore pari a  $2.6 \cdot 10^{-3}$ , la densità dell'aria  $\rho_a$  è assunta pari a  $1.247 \text{ kg m}^{-3}$  ed a  $W$  vengono assegnati i valori della velocità del vento relativi ad una distanza di 10 m sulla superficie del mare.

La salinità, la temperatura e la pressione nel modello idrodinamico HD sono correlate alla densità del corpo recettore attraverso la relazione dell'UNESCO (UNESCO 1981). Nelle simulazioni effettuate sono state considerate condizioni uniformi di temperatura sulla colonna d'acqua, e nello specifico è stata simulata la condizione termica invernale, ossia temperatura costante sulla colonna d'acqua pari a circa  $15^\circ\text{C}$ ; in riferimento alla salinità delle acque marine è stato adottato un valore costante pari a 38.65 psu.

Il modello matematico è stato applicato su un dominio di calcolo costituito da una griglia con maglia quadrata di passo 10m x 10m rappresentativa della batimetria e della costa in prossimità dell'area in esame (figura 5.1.1).



**Figura 5.1.1 – Dominio batimetrico di calcolo implementato nel modello MIKE 21 HD.**

La griglia di calcolo del fondale è stata estratta dalla mappa batimetrica del Mar Piccolo di Taranto consultabile dal sito <https://www.navionics.com> (cfr. figura 4.2.1). Nello specifico è stata predisposta una griglia di calcolo XY a maglia quadrata avente origine nel punto di coordinate UTM33WGS84 pari a (688200E, 4481720N), composta da 430 righe (// asse X) e 910 colonne (// asse Y).

Le simulazioni sono state condotte in ambiente baroclino impiegando come meccanismi forzanti la forza rotazionale terrestre, una marea di tipo semidiurno e la tensione tangenziale indotta da venti di intensità e direzione differenti.

In particolare, sono state determinate le mappe di circolazione superficiale in condizioni di marea sinusoidale di ampiezza A pari a 15 cm (altezza H = 30 cm) e periodo di 12 ore. L'andamento della marea viene valutato dal programma come variazione sinusoidale dell'elevazione della superficie tramite la formula:

$$Value = ref.level + \frac{1}{2} range \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{N \cdot \Delta t - Phase}{Period}\right)$$

dove N è il numero di steps temporali (43200) e  $\Delta t$  (6s) lo step temporale; lo stesso valore è usato su tutti i punti della griglia lungo i contorni aperti del dominio.

Per quanto riguarda la durata del periodo di simulazione adottato, la condizione di stazionarietà viene raggiunta in tempi brevi. Kuzmic *et al.* (1985) e Orlic *et al.* (1986) hanno rilevato che il periodo temporale caratteristico di un comportamento transitorio del modello sia pari a due giorni di simulazione. Nelle elaborazioni di simulazione effettuate è stato fissato un periodo di simulazione pari a 3 giorni, a partire dalle ore 12.00 del primo giorno, con uno step temporale di integrazione  $\Delta t=6sec$ , partendo da una condizione di quiete.

Per quanto riguarda le condizioni anemologiche, sono stati simulati i venti riportati nella tabella seguente riferiti al tempo di ritorno 5 anni (cfr. tab. 3.3.2).

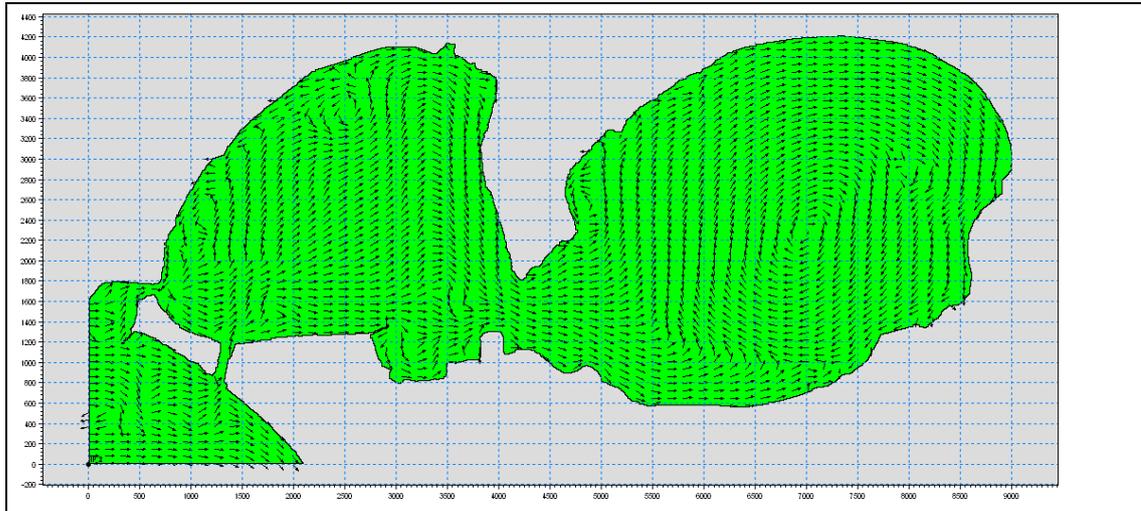
direzione		tempo di ritorno 5 anni
		velocità vento (m/s)
<b>NNO</b>	<b>330 °N</b>	14.72
<b>NE</b>	<b>45 °N</b>	13.43
<b>SE</b>	<b>135 °N</b>	26.70
<b>Sud</b>	<b>180 °N</b>	20.93

**Tabella 5.1.1** – Condizioni di vento implementate nel modello MIKE 21 HD.

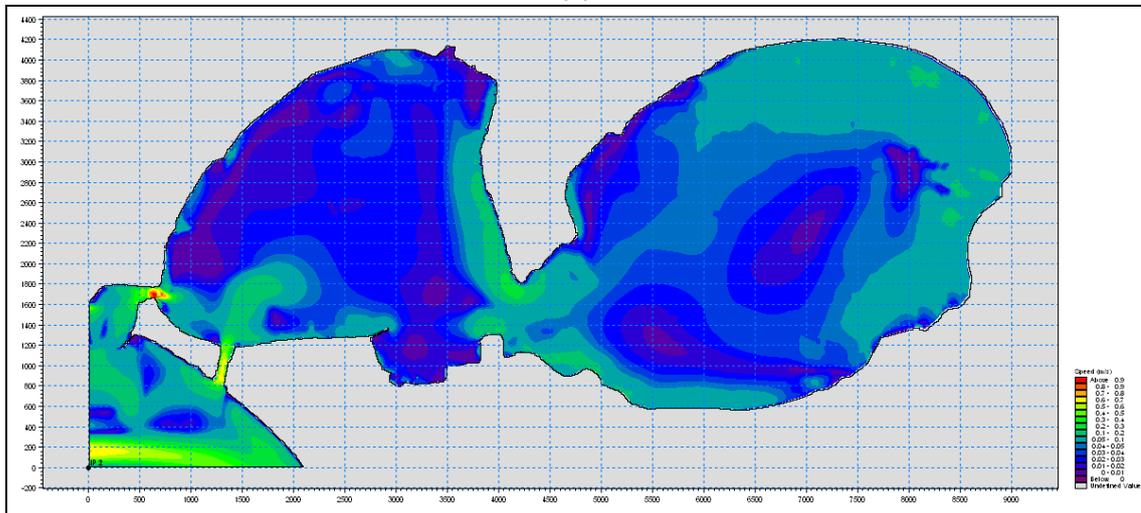
Nelle figure seguenti sono illustrati i risultati delle simulazioni effettuate con il modello MIKE 21 HD. Per ciascuna condizione di vento è stato rappresentato l'andamento dei vettori-direzione delle correnti di circolazione che si instaurano (a), ed il relativo campo dei valori delle velocità (b).

Nei due seni interni del Mar Piccolo si instaurano strutture vorticose molto variabili in funzione delle condizioni di vento incidenti. La posizione ed il verso dei vortici varia sensibilmente da un caso all'altro senza che siano segnalate particolari condizioni di stazionarietà.

Le velocità di circolazione sono modeste ( $< 0.1 \div 0.2$  m/s) ad eccezione dei valori riscontrati in corrispondenza dei varchi di collegamento con il Mar Grande, strettamente connessi con i movimenti di massa legati ai cicli di marea.

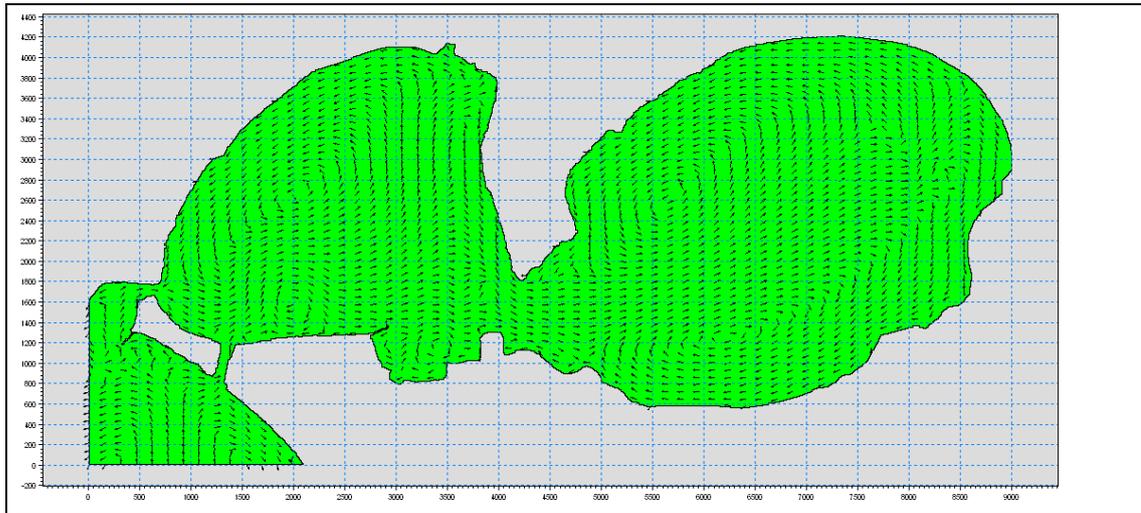


(a)

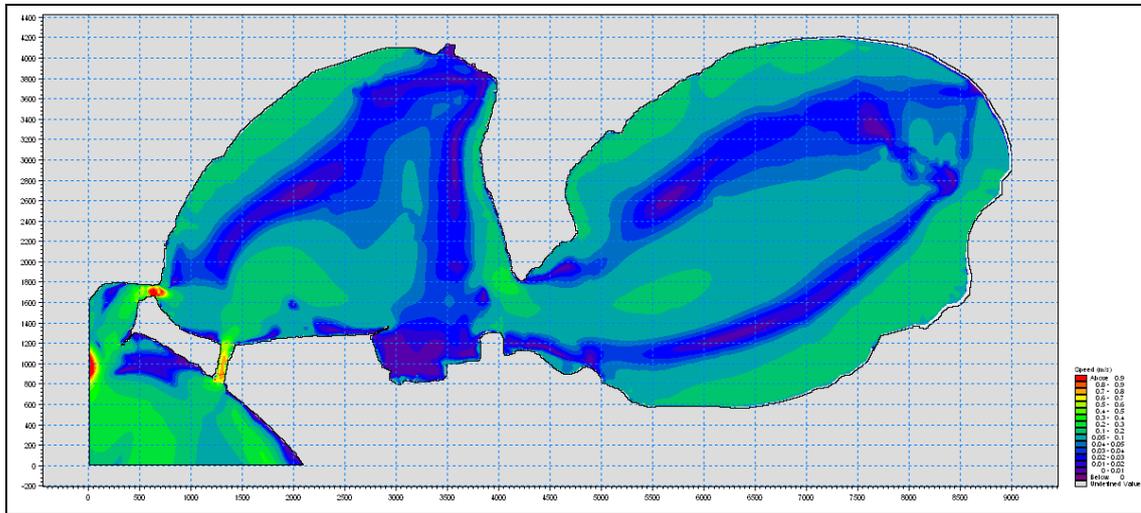


(b)

Figura 5.1.2 – Correnti di circolazione: vento da NNO –  $w = 14.72$  m/s.

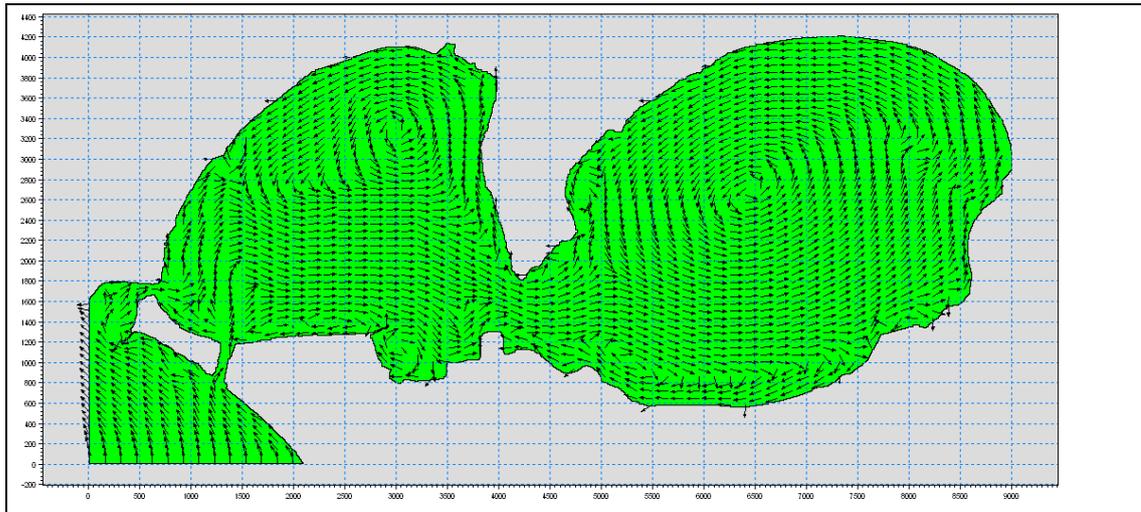


(a)

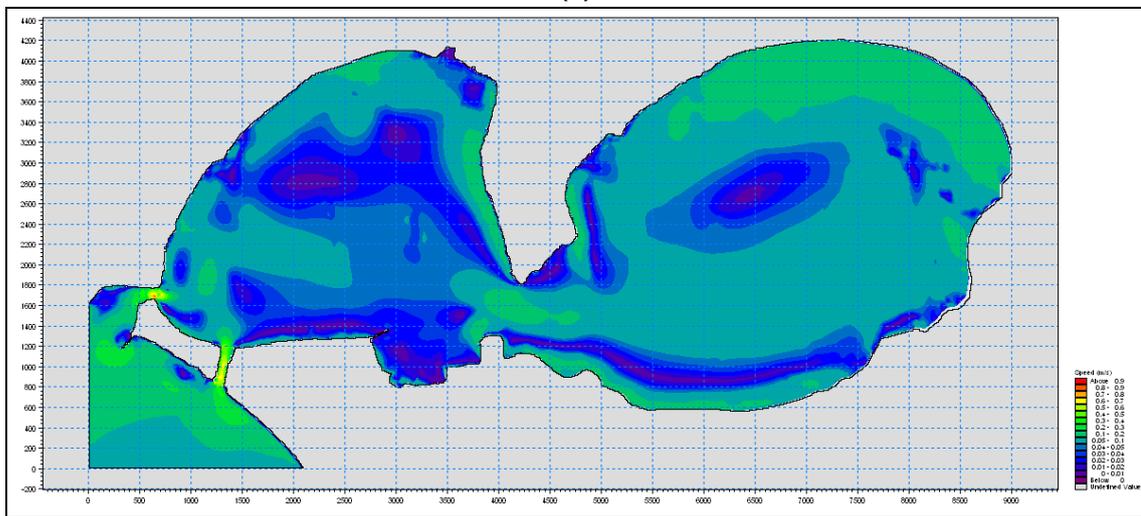


(b)

Figura 5.1.3 – Correnti di circolazione: vento da NE –  $w = 13.43$  m/s.

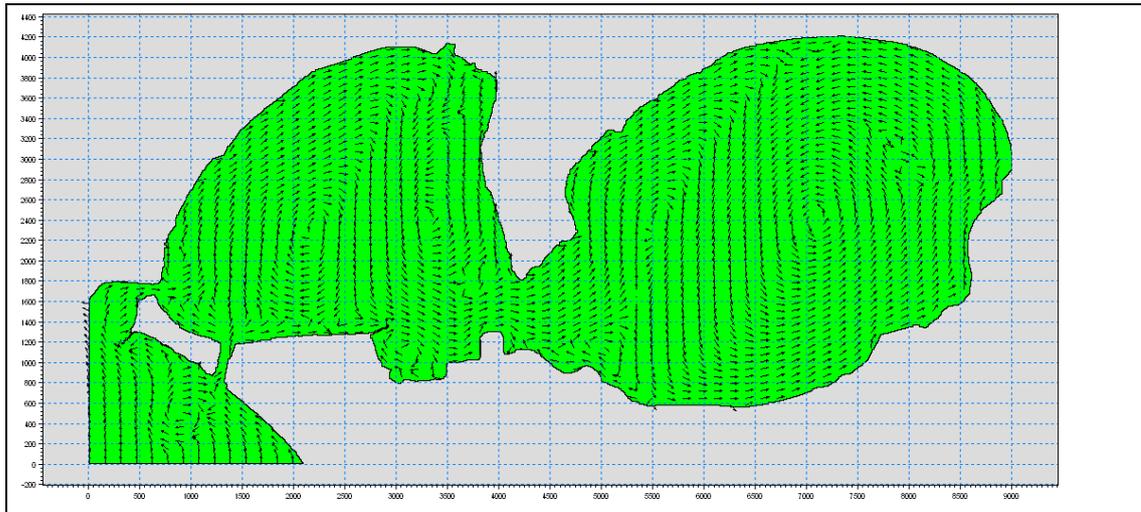


(a)

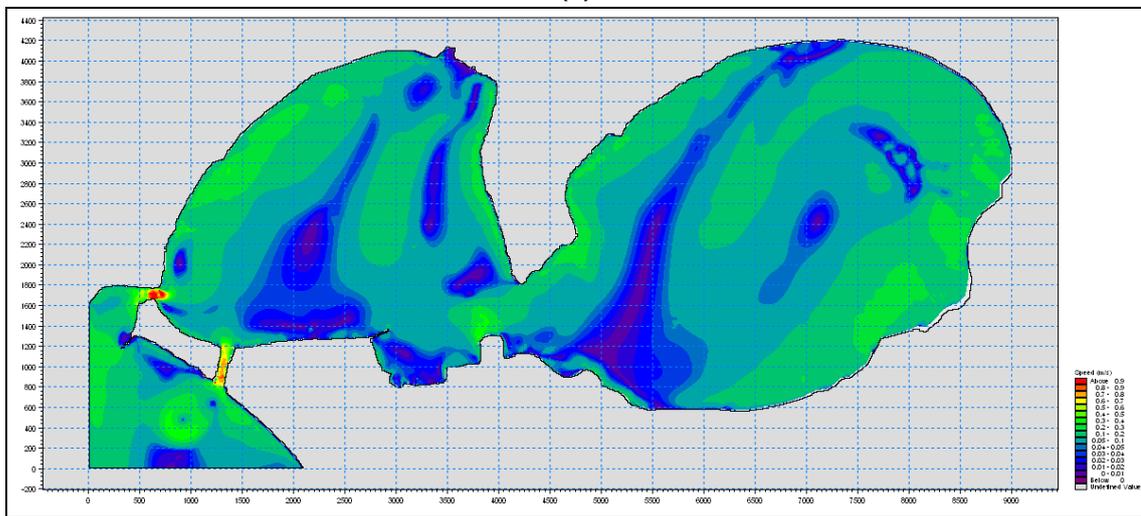


(b)

Figura 5.1.4 – Correnti di circolazione: vento da SE –  $w = 26.70$  m/s.



(a)



(b)

Figura 5.1.5 – Correnti di circolazione: vento da Sud –  $w = 20.93$  m/s.

Consulenza: **Atech srl**

Proponente: **M FLOATING MAR PICCOLO srl**

*“Progetto per la realizzazione in area SIN di un impianto fotovoltaico galleggiante (OFFSHORE) della potenza di 100 MW con annesso impianto di produzione di idrogeno verde da 25MW, impianto di mitilicoltura e strutture relative al turismo sostenibile”*

---

## **ALLEGATO 1 – DESCRIZIONE TECNICA DEL CODICE DI CALCOLO MIKE 21**

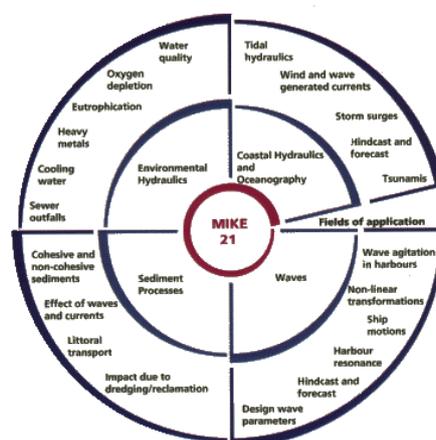
## PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero “21” che contraddistingue il codice, indica proprio la bidimensionalità nel piano (“2”) e la monodimensionalità lungo la verticale (“1”).

Il sistema modellistico è stato sviluppato per applicazioni complesse in aree costiere, mare aperto ed in corrispondenza di estuari. Tuttavia, essendo un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero, può essere anche applicato per la simulazione di fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi. I principali campi di applicazione sono:

- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi;
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi di impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento



---

più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.

Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- **SINGLE GRID** (Griglia singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- **MULTIPLE GRID** (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- **FLEXIBLE MESH** (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- **CURVILINEAR** (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l'utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3. Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

---

## MODULO D'ONDA SW

MIKE 21 SW rappresenta lo stato dell'arte tra i modelli numerici spettrali di nuova generazione per vento ed onde sviluppato da DHI. Il codice di calcolo simula la crescita, la trasformazione e la dissipazione di onde corte e onde lunghe in aree costiere e offshore.

MIKE 21 SW comprende due differenti formulazioni:

- fully spectral formulation;
- directional decoupled parametric formulation.

La prima è basata sulla “*wave action conservation equation*” sviluppata da Komen et al. (1994) e Young (1999). La seconda, è basata su una parametrizzazione della “*wave action conservation equation*” introdotta nel dominio delle frequenze. Le equazioni di base sono formulate sia nelle coordinate cartesiane, per domini di calcolo a scala limitata, sia nelle coordinate polari per applicazioni a larga scala. La discretizzazione spaziale delle equazioni di base è effettuata utilizzando l'approccio ai volumi finiti, attraverso l'utilizzo di una mesh di calcolo non strutturata.

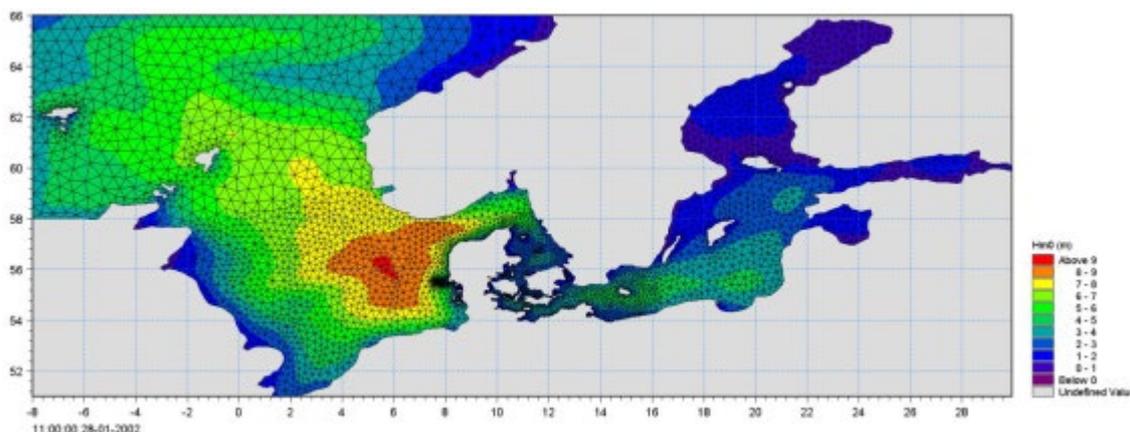
Il modello, nella formulazione “*fully spectral*”, include i seguenti fenomeni fisici:

- crescita dell'onda per effetto del vento;
- interazione non lineare tra onde;
- dissipazione dovuta al white capping;
- dissipazione dovuta all'attrito col fondo;
- frangimento dell'onda su profondità limitate;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche;
- effetto delle variazioni del fondale;
- diffrazione;
- riflessione semplice.

MIKE 21 SW è utilizzato per la valutazione del clima ondoso off-shore ed in aree costiere, per scopi previsionali e analisi storiche. Una tipica applicazione di SW è il supporto alla progettazione di un'opera costiera o portuale, partendo dalla disponibilità di dati meteo marini off-shore (boe ondamiche o modelli a larga scala), individuando il clima ondoso ordinario sotto costa o le condizioni estreme di progetto.



MIKE 21 SW è inoltre utilizzato, sempre a supporto della progettazione di un’opera costiera, come strumento di base del calcolo sia delle correnti sia del trasporto solido litoraneo indotti dall’azione del moto ondoso. I campi di corrente e di trasporto sono infatti determinati, a partire dai campi di radiation stress forniti in output da MIKE 21 SW, mediante l’utilizzo di altri moduli del pacchetto MIKE21.



## ***EQUAZIONI DEL MODELLO SW***

### **Fully spectral formulation**

L’equazione alla base di MIKE 21 SW è la “*wave action balance equation*”, sviluppata in coordinate cartesiane e sferiche. Tale equazione, in coordinate cartesiane, è indicata di seguito:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma}$$

dove:  $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$  è la “density action”,  
 $t$  è il tempo,  
 $\bar{x} = (x, y)$  rappresenta le coordinate cartesiane,  
 $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$  è la velocità di propagazione di gruppo delle onde in quattro dimensioni  $(x, y, \theta, \sigma)$ ,  
 $S$  è il termine di generazione di energia.

Le celerità dell’onda sono date dalle equazioni della cinematica lineare:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} + \bar{U}$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla_{\bar{x}} d \right) - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right)$$

dove  $s$  ed  $m$  sono le coordinate spaziali rispettivamente parallele e perpendicolari alla direzione di propagazione dell’onda  $\theta$ ,  $d$  è la profondità,  $\bar{k}$  è il vettore del numero di onde di magnitudo  $k$ ,  $\bar{U}$  è il vettore di velocità di corrente.

Il termine di generazione,  $S$ , a secondo membro della “*wave action balance equation*” è dato da:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Dove  $S_{in}$  rappresenta il trasferimento di quantità di moto dovuta al vento,  $S_{nl}$  il contributo dovuto all’interazione non lineare tra onde,  $S_{ds}$  la dissipazione dovuta al white capping,  $S_{bot}$  la dissipazione dovuta all’attrito col fondo e  $S_{surf}$  la dissipazione dovuta al frangimento.

Il contributo del vento è basato sulla quasi-linear theory of wind-wave generation (Janssen’s 1989, 1991), dove la quantità di moto trasferita dal vento alla superficie libera non dipende solo dalle tensioni del vento ma anche dallo stato di mare stesso. Il contributo legato all’interazione non lineare tra onde è approssimato mediante l’approccio DIA (Hasselmann et al. 1985). Il termine di generazione relativo alla dissipazione da white capping è basato sulla teoria di Hasselmann (1974) e

Janssen (1989). La dissipazione dovuta all'attrito col fondo è modellata usando l'approccio di Johnson e Kofoed-Hansen (2000), che dipende dal moto ondoso e dalle caratteristiche dei sedimenti. Il frangimento è basato sull'approccio di Battjes e Janssen (1978) e Eldeberky e Battjes (1996).

### **Directional decupled parametric formulation**

Questa formulazione del modello è basata su una parametrizzazione della “*wave action balance equation*” (Holthuijsen 1989) nel dominio delle frequenze introducendo come variabile dipendente il momento di ordine zero e di ordine uno. Le equazioni quindi diventano le seguenti:

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1$$

dove:  $m_0(x, y, \theta)$  e  $m_1(x, y, \theta)$  sono rispettivamente i momenti di ordine zero e ordine uno della “*action spectrum*”;

$N(x, y, \sigma, \theta)$ ,  $T_0(x, y, \theta)$  e  $T_1(x, y, \theta)$  sono i termini di generazione basati sulla action spectrum.

I momenti  $m_n(x, y, \theta)$  sono definiti dall'equazione:

$$m_n(x, y, \theta) = \int_0^\infty \omega^n N(x, y, \omega, \theta) d\omega$$

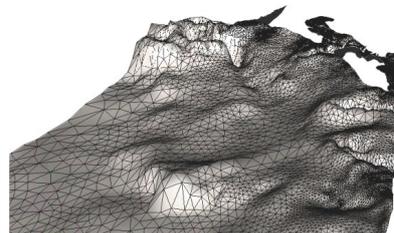
I termini di generazione  $T_0$  e  $T_1$  tengono conto dell'effetto del vento (solo per la modalità stazionaria) attraverso una relazione empirica (Johnson 1998) della dissipazione di energia dovuta all'attrito col fondo e al frangimento, e dell'effetto di interazione onde-correnti.

### **TECNICHE DI SOLUZIONE**

La discretizzazione spaziale e spettrale è effettuata utilizzando un metodo ai volumi finiti con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è

discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il dominio delle frequenze può essere discretizzato sia in maniera lineare che logaritmica.

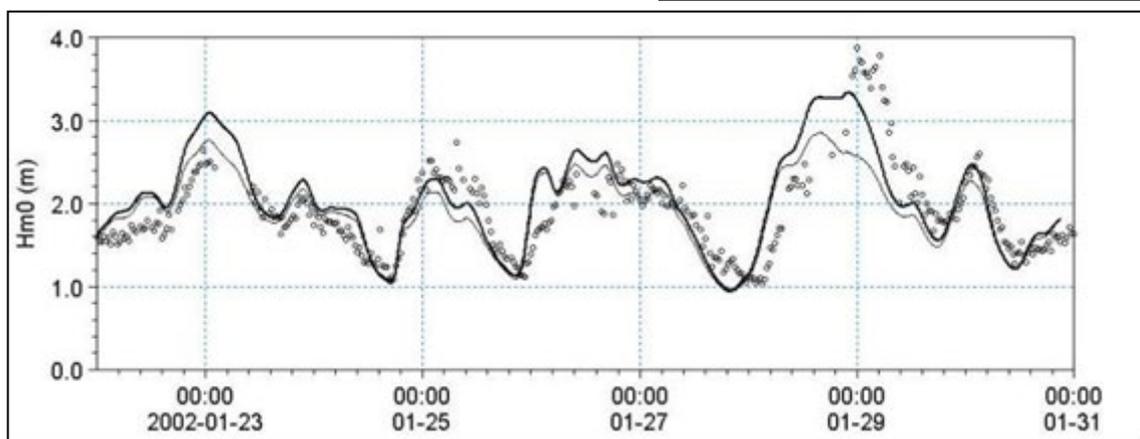
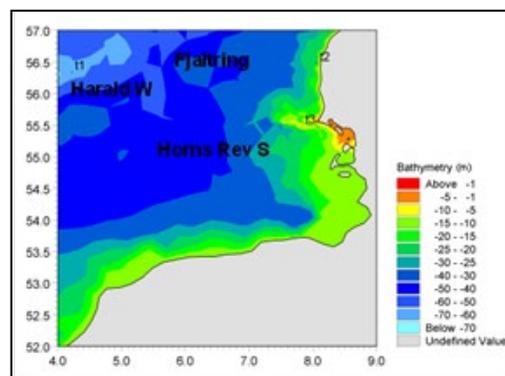
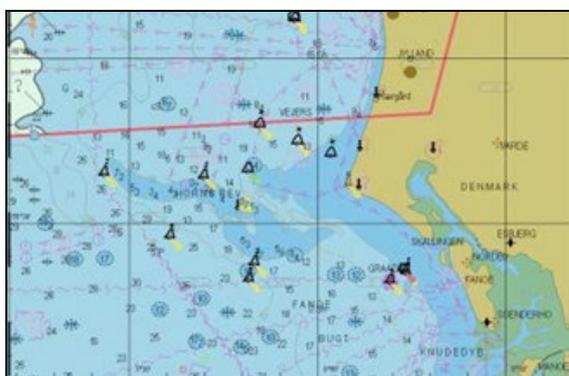
La discretizzazione nel dominio temporale è fatta mediante time-steps, la propagazione della “wave action” è fatta attraverso un metodo esplicito in multi-frequenza.



### **INPUT AL MODELLO SW**

I dati di input da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

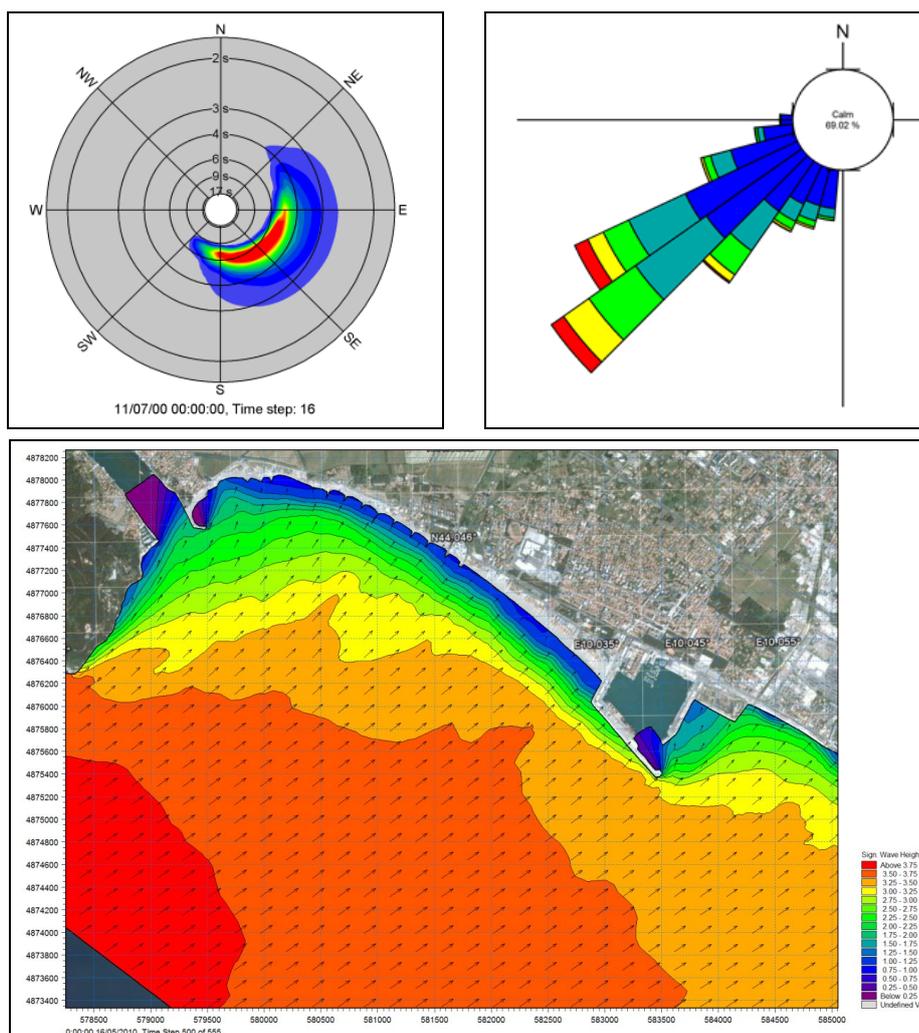
- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- scelta del tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).



### **OUTPUT DEL MODELLO SW**

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh e per ciascun time step, si dividono essenzialmente nelle seguenti categorie.

- parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa  $H_{m0}$ , periodo di picco  $T_p$ , Periodo medio  $T_{01}$ , periodo di zero up crossing  $T_{02}$ , Periodo dell'energia  $T_{-10}$ , Direzione di picco PWD, Direzione media MWD, Deviazione standard direzionale  $\sigma$ , Tensore dei radiation stress  $S_{xx}$   $S_{xy}$   $S_{yy}$ . Se il modello è utilizzato in modalità fully spectral, ciascuna delle variabili sopra riportate possono essere suddivise in componente swell e wind sea. La divisione può essere effettuata mediante l'introduzione di una soglia fissa o dinamica;
- output spettrali: spettro combinato frequenza-direzione, spettro direzionale, spettro di frequenza.



---

## **MODULO IDRODINAMICO HD**

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

I risultati di una simulazione MIKE 21 HD possono essere usati come input per la simulazione di fenomeni fisici strettamente dipendenti dagli aspetti idrodinamici:

- trasporto di sostanze disciolte/sospese in acqua, modulo AD e modulo “Mud Transport”;
- trasporto solido di materiale non coesivo, modulo ST;
- qualità delle acque ed idroecologia, modulo ECO Lab.

## **EQUAZIONI DEL MODELLO HD**

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

### Equazione di conservazione della massa

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$  = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$  = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$  = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$  = coefficiente di scabrezza di Chezy;

$G$  = accelerazione di gravità;

$f(V)$  = fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$  = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$  = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$  = pressione atmosferica;

$\rho_w$  = densità dell'acqua;

$x,y$  = coordinate spaziali;

$t$  = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

$S_{xx}, S_{xy}, S_{yy}$  = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio  $\tau$  che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y. La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

- 1) dipendente dal flusso locale

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E \frac{\partial p}{\partial y} \right)$$

- 2) oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hE \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale,  $\Delta$  è la dimensione spaziale della griglia e  $c_s$  è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} hE \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ( $m^3/s/m$ ) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva ( $m^3/s$ ) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

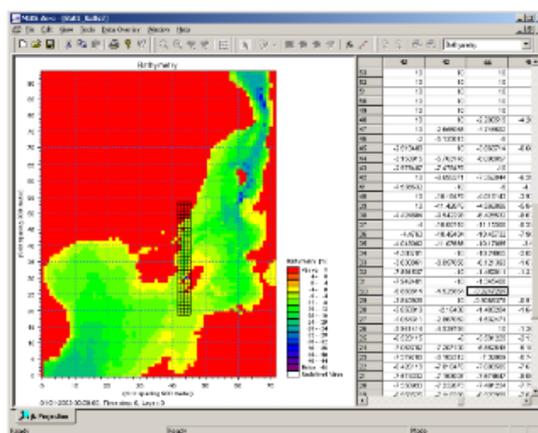
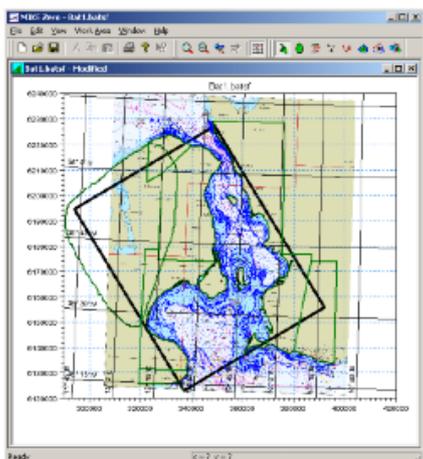
La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di

stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni plano-altimetriche della batimetria.

Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione “griglia multipla-nested grid”, che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

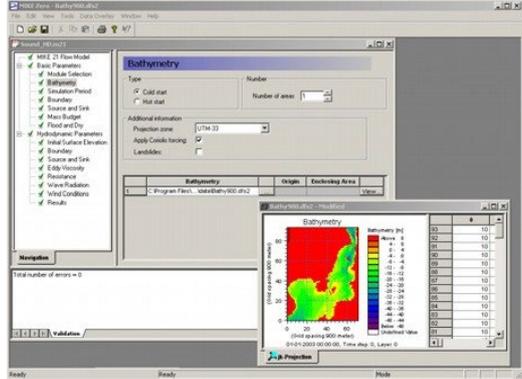
Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall’algoritmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



**INPUT AL MODELLO HD**

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);



- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).

### **OUTPUT DEL MODELLO HD**

I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

