



Il Commissario Straordinario del Governo  
per il recupero e la valorizzazione dell'ex carcere borbonico  
dell'isola di Santo Stefano - Ventotene

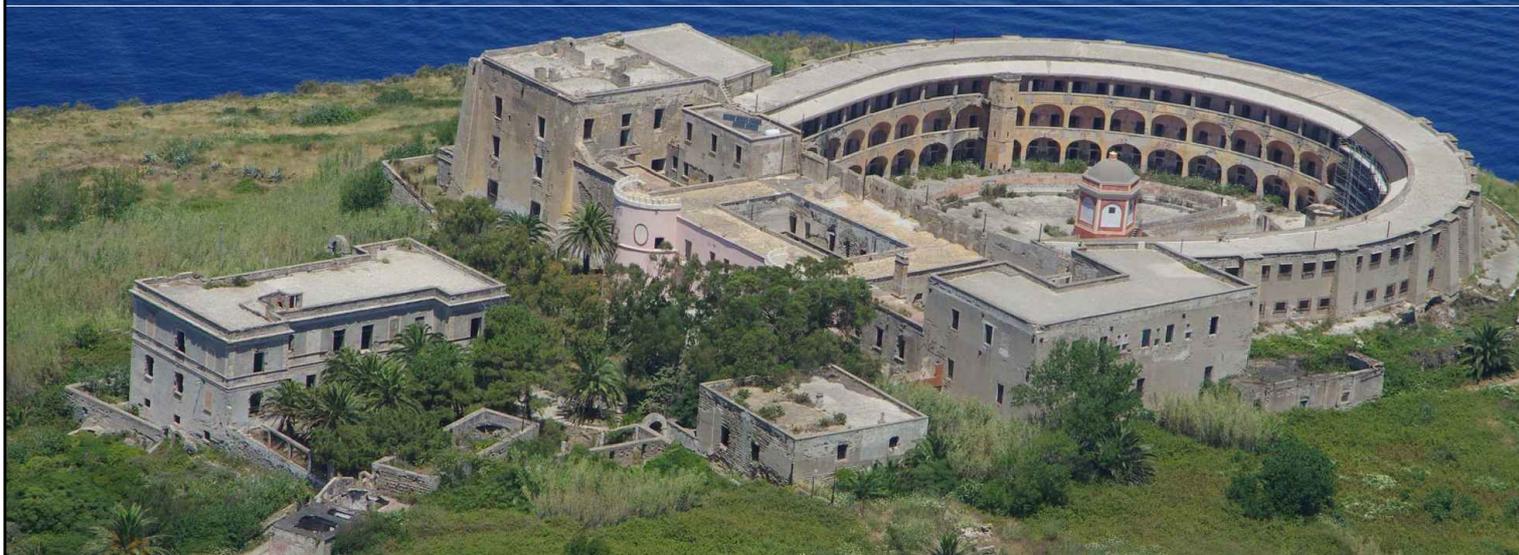


Comune di Ventotene  
REGIONE LAZIO

**CONTRATTO ISTITUZIONALE DI SVILUPPO**

**RECUPERO E RIFUNZIONALIZZAZIONE EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI SANTO STEFANO VENTOTENE**

*Intervento n. 3 'Realizzazione/adeguamento degli approdi all'isola di Santo Stefano'*



**STAZIONE APPALTANTE**



Agenzia nazionale per l'attrazione  
degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA

**Funzione Servizi di Ingegneria**

ATTIVITA' TECNICHE  
Beni Culturali e Architettura  
Arch. Rosa di NUZZO

**INVITALIA S.p.a.:** Soggetto Attuatore in ottemperanza agli artt. 3 e 8 del Contratto Istituzionale di Sviluppo  
"Recupero e rifunionalizzazione ex carcere borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene"

**RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:** Dott. Ing. ENRICO FUSCO

**COORDINAMENTO PROGETTAZIONE:** Dott. Arch. Rosa di NUZZO

**PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA**  
Dott. Arch. Massimo BARAGLI

**PROGETTAZIONE STRUTTURALE**  
Dott. Ing. Letterio SONNESSA

**PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME**  
Dott. Ing. Daniele BENOTTI

**RELAZIONE GEOLOGICA**  
Dott. Geol. Vincenzo GUIDO

**PROGETTAZIONE IMPIANTI**  
Dott. Ing. Pierluigi ROSATI  
Dott. Ing. Osvaldo PITORRI

**PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA**  
Dott. Ing. Nunzio LAURO

**PROGETTAZIONE AMBIENTALE e PROCEDURE VIA-Vinca**  
Dott. Luca DI NARDO

**COMPUTI E STIME**  
Geom. Luigino D'ANGELANTONIO

**RELAZIONE ARCHEOLOGICA:** ASPSP Servizi Archeologici snc, Dott.ssa Laura SANNA e Francesco TIBONI

**GRUPPO DI LAVORO INTERNO**

**PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA:**  
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR  
Dott. Arch. Lucia PACITTO

**PROGETTAZIONE STRUTTURALE:**  
Dott. Ing. Mario D'AMATO  
Dott. Ing. Francesco DI LAURO

**PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:**  
Dott. Ing. Leonardo GUALCO

**PROGETTAZIONE IMPIANTI:**  
Sig. Ennio REGNICOLI

**RILIEVI E RESTITUZIONE GRAFICA:**  
Geom. Gennaro DI MARTINO  
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

**PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA**  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

**SUPPORTO TECNICO OPERATIVO**

**PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:**  
3TI Progetti Italia - Ingegneria Integrata SpA  
Dott. Ing. Stefano Luca POSSATI

**PROGETTAZIONE AMBIENTALE e PROCEDURE VIA-Vinca:**  
SETIN Servizi tecnici Infrastrutture s.r.l.  
Dott. Alessandro PIAZZI

**PROGETTAZIONE GEOTECNICA:**  
STUDIO TECNICO ASSOCIATO - SINTESI  
Dott. Ing. Germano GUIDUCCI

**INDAGINI GEOGNOSTICHE :**  
Geodes Laboratori  
Dott.ssa M. Gabriella BEVILACQUA

**INDAGINI E RILEVAZIONI AMBIENTALI,  
ARCHEOLOGICHE E STRUMENTALI A MARE :**  
Enviroconsult srl - Dott. Ing. Roberto SAGGIOMO

**INDAGINI SULLE STRUTTURE :**  
ICS Centro Sperimentale di Ingegneria Srl  
Dott. Ing. Giuseppe MONTELLA

**PROGETTO DEFINITIVO**

| ELABORATO                             |      | DATA                           | NOME       | FIRMA            |
|---------------------------------------|------|--------------------------------|------------|------------------|
| Opere Marittime<br>Studio Meteomarino |      | REDATTO                        | 05-03-2021 | 3TI              |
|                                       |      | VERIFICATO                     | 05-03-2021 | BENOTTI          |
|                                       |      | APPROVATO                      | 05-03-2021 | Rosa di NUZZO    |
|                                       |      | DATA                           | 05-03-2021 | CODICE BREVE     |
|                                       |      | SCALA                          | -          |                  |
| REVISIONE                             | DATA | AGGIORNAMENTI                  |            | <b>OM-RT0001</b> |
| Rev. 1                                |      | CODICE ELABORATO               |            |                  |
| Rev. 2                                |      | 2017E037INV-02-D-OM-RT0001     |            |                  |
| Rev. 3                                |      | CODICE FILE                    |            |                  |
|                                       |      | 2017E037INV-02-D-OM-RT0001.dwg |            |                  |

**Contratto Istituzionale di Sviluppo per il recupero e la rifunzionalizzazione dell'“Ex carcere borbonico dell'isola di Santo Stefano – Ventotene” - Delibera CIPE n. 3 del 1° maggio 2016, pubblicata nella G.U.R.I. del 13 agosto 2016, n. 139, “Fondo sviluppo e coesione 2014-2020: Piano stralcio - Cultura e Turismo – (articolo 1, comma 703, lettera d) legge n. 190/2014”**



***Accordo Operativo tra il Ministero per i beni e le Attività Culturali e per il Turismo e l'Agenzia Nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA per la realizzazione delle attività di soggetto attuatore del CIS per il RECUPERO E LA RIFUNZIONALIZZAZIONE DELL'“EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI S. STEFANO-VENTOTENE”***

**RIF. ALLEGATO A – PROGRAMMA DEGLI INTERVENTI**

**Intervento n. 3 – Realizzazione/adeguamento degli approdi all'Isola di Santo Stefano**

## SOMMARIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Analisi dei dati d'onda .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Trasposizione dei dati di moto ondoso .....</b>                              | <b>11</b> |
| <b>4</b> | <b>Clima meteomarinò al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano.....</b> | <b>24</b> |
| <b>5</b> | <b>Correlazioni periodo-altezza d'onda .....</b>                                | <b>27</b> |
| <b>6</b> | <b>Eventi estremi di moto ondoso al largo (onde di progetto).....</b>           | <b>30</b> |

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <br>Agenzia nazionale per l'attrazione<br>degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA | 2017E037INV-02-D-OM-RT0001 |
|   | Rev. 0                     |
|   | Pag. 3 di 35               |

## 1 Introduzione

Il presente studio riguarda la modellazione del clima meteomarinico al largo e sottocosta del paraggio dell'Isola di Santo Stefano.

La corretta determinazione delle onde che investono un paraggio rappresenta una base fondamentale nella conoscenza della dinamica evolutiva di un litorale e nella eventuale progettazione di interventi di difesa costiera. Ai fini di una successiva modellazione della morfodinamica del litorale dell'Isola di Santo Stefano e dei possibili interventi di difesa dall'erosione dell'area in esame, risulta essenziale la definizione di un clima meteomarinico sottocosta, in prossimità della zona dei frangenti, input per la modellazione futura dell'evoluzione della linea di riva, e di un clima meteomarinico estremo, per la caratterizzazione delle onde di progetto ai fini del dimensionamento delle opere di difesa costiera.

La prima parte dello studio è relativa alla selezione dei dati d'onda da cui poter effettuare le analisi delle registrazioni delle serie temporali delle grandezze sintetiche del moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco, e direzione media di provenienza del moto ondoso). In particolare, i suddetti parametri di moto ondoso sono stati opportunamente filtrati da registrazioni errate e classificati per classi di altezza significativa e settori direzionali di provenienza del moto ondoso.

Successivamente, i dati d'onda dedotti dal modello atmosferico dell'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) sono stati trasferiti al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano, attraverso il metodo empirico della trasposizione geografica, che consente la determinazione dei valori di altezza e periodo nell'area oggetto di studio e, attraverso un altro approccio empirico, la determinazione della deviazione angolare che subiscono le onde nel trasferimento da un paraggio a un altro. Le analisi sono state effettuate in base all'esposizione geografica dei paraggi all'azione dei venti foranei attraverso la determinazione dei fetch geografici ed efficaci.

Così come per i dati estrapolati dal punto di ricostruzione del moto ondoso dell'ECMWF, le grandezze meteomarine al largo dell'Isola di Santo Stefano sono state opportunamente classificate in classi d'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza del moto ondoso. Inoltre, sono state determinate le correlazioni esistenti fra i valori di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco.

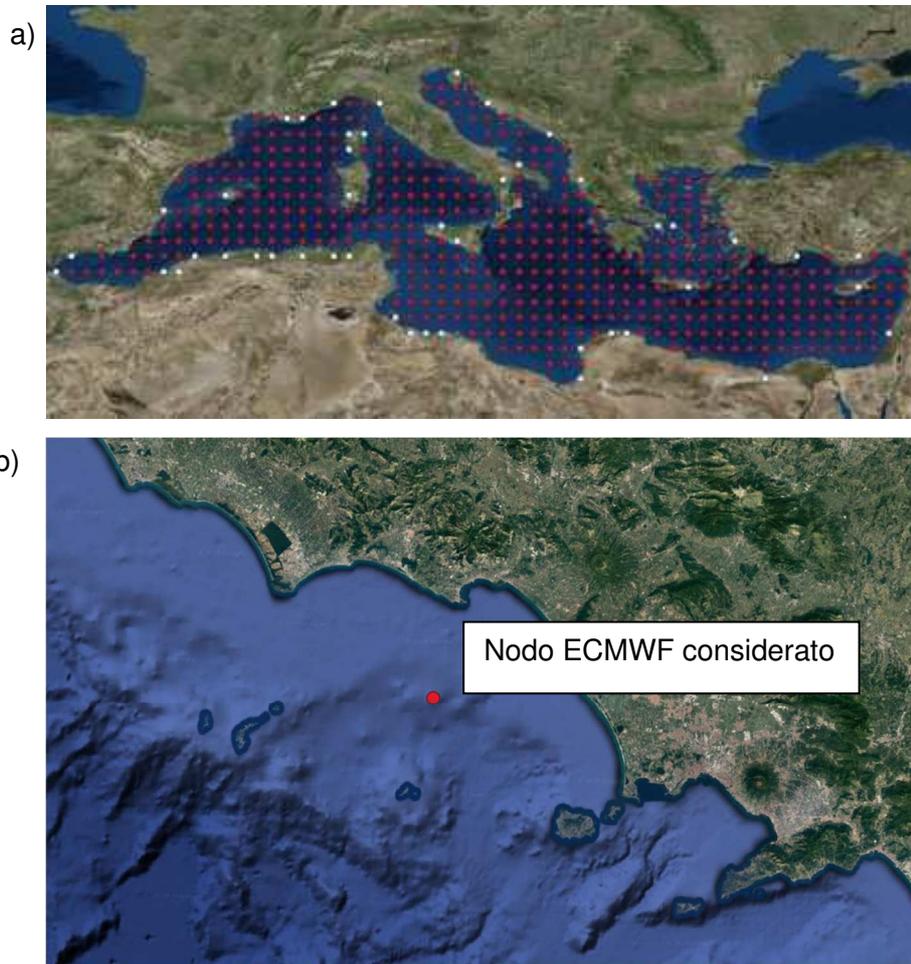
Le classi di altezza d'onda associate ai settori direzionali di provenienza delle onde sono state propagate da largo in un punto significativo sottocosta, con particolare attenzione alla batimetrica -8.5 m, in modo da quantificare precisamente gli effetti delle batimetrie sull'evoluzione delle grandezze del moto ondoso. La propagazione delle onde è stata effettuata attraverso un modello numerico basato sull'evoluzione spaziale dello spettro d'energia del moto ondoso, che tiene conto degli effetti combinati dello shoaling e della rifrazione.

Sulla base del clima meteomarinò al largo, sono state determinate le mareggiate che hanno investito il paraggio dell'Isola di Santo Stefano ed è stata successivamente effettuata l'analisi degli eventi estremi di moto ondoso per differenti settori direzionali, ai fini della determinazione delle onde di progetto a prefissato tempo di ritorno. Per i tempi di ritorno più significativi, ovvero 10, 25, 50 e 100 anni, è stata quindi effettuata la propagazione delle onde di progetto nel punto sottocosta in esame, ai fini di eventuali dimensionamenti e verifiche delle opere di difesa costiera previste.

Ai fini di una successiva analisi morfologica e morfodinamica del tratto litoraneo dell'Isola di Santo Stefano, invece, vengono calcolate le onde di modellazione sottocosta, i flussi energetici del moto ondoso sottocosta e la profondità di chiusura di spiaggia.

## 2 Analisi dei dati d'onda

La caratterizzazione del moto ondoso attraverso grandezze sintetiche rappresentanti stati di mare quali altezza d'onda significativa,  $H_s$ , periodo medio,  $T_m$ , periodo di picco,  $T_p$ , e direzione di provenienza del moto ondoso,  $Dir$ , al largo dell'Isola di Santo Stefano è stata effettuata a partire dal database ERA5 (attivato dal 2019) dell'istituto meteorologico dell'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Si tratta di dati di moto ondoso ricostruiti, attraverso il modello di calcolo spettrale WAM, da dati meteorologici, in particolare da quelli di vento. I dati d'onda sono ricostruiti, sull'intero pianeta, in una serie di punti uniformemente distribuiti con un intervallo di  $0.5^\circ$  geografici e con intervallo temporale di 1 h. Tale database copre un lasso temporale che va dal 1° gennaio del 1979 al 31 dicembre 2019, per un totale di 359400 dati. Il nodo dei dati ERA5 di moto ondoso considerato al largo dell'Isola di Santo Stefano presenta le seguenti coordinate latitudine 41 e longitudine 13.50. In Figura 1 viene riportata la griglia di punti nel mar Mediterraneo del dataset ERA5 dell'ECMWF dove i punti in rosso sono quelli relativi alla condizione di acque profonde.



**Figura 1: a) Distribuzione spaziale dei punti di ricostruzione del moto ondoso con il modello WAM nel mar Mediterraneo fornito dall'ECMWF**

**b) ubicazione del nodo ECMWF considerato.**

Le serie storiche dei dati d'onda dedotti dal dataset ERA5 sono stati sottoposti ad un'opportuna validazione, attraverso l'eliminazione degli eventi non registrati e degli eventi considerati anomali. In particolare, sono stati adottati i seguenti criteri di validazione dei dati:

- Eliminazione dei cosiddetti "outliers", rappresentati da stati di mare caratterizzati da valori di  $H_s$ ,  $T_m$  e  $T_p$  eccessivamente elevati e non compatibili con l'esposizione in mare aperto del nodo o della boa in esame;
- Eliminazione dei dati non registrati dal nodo o dalla boa, presenti nelle serie storiche registrati come dati pari a 0.
- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore di altezza d'onda significativa, che deve essere inferiore a 1.5 m;

- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore del periodo di picco, che deve essere inferiore a 5 s;
- Se vengono riscontrate le 2 succitate condizioni su  $H_s$  e  $T_p$ , ma la direzione di provenienza dell'evento ondoso tra 2 rilevazioni risulta maggiore di  $30^\circ$ , il dato d'onda può essere considerato valido;
- Controllo per ogni evento registrato della ripidità massima compatibile dell'onda in acque profonde ( $d/L_p > 0.5$ , essendo  $d$  la profondità e  $L_p$  la lunghezza di picco dell'onda) con il limite di stabilità geometrico; per ogni registrazione, deve essere verificato che:

$$\frac{H_s \cdot 2 \cdot \pi}{9.81 \cdot T_p^2} < 0.1$$

- Controllo per ogni evento registrato della non eccessiva differenza fra i valori di periodo di picco e di periodo medio; per ogni registrazione, deve essere verificato che:

$$\frac{T_p}{T_m} < 2$$

- Controllo delle eventuali ripetizioni della singola registrazione d'onda.

Sulla base di tali preliminari verifiche sui dati ondosi grezzi ricostruiti dal nodo ERA5 dell'ECMWF, gli eventi ondosi da considerare per le successive modellazioni meteomarine sono pari a 359400. Pertanto, il rendimento  $\eta$ , espressi in %, del nodo ERA5 nel periodo 1979-2019 risulta pari a:

$$\eta_{ERA5} = \frac{n. \text{dati filtrati}}{n. \text{dati grezzi}} \cdot 100 = 100 \%$$

Tale risultato evidenzia l'affidabilità dei dati dedotti dal nodo ERA5.

Pertanto, le osservazioni ondose filtrate sono state ordinate per classi di altezza d'onda significativa pari a 0.5 m e per settori direzionali di provenienza del moto ondoso pari a  $10^\circ$ . Gli eventi caratterizzati da  $H_s < 0.25$  m sono stati considerati come calme.

I dati di moto ondoso in corrispondenza del nodo ERA5 sono stati ulteriormente elaborati per le succitate classi d'altezza significativa e settori direzionali di provenienza del moto ondoso, determinando per ciascuno di essa la frequenza semplice di apparizione delle onde (vedi Tabella 2). Gli stessi risultati ottenuti dai dati del nodo ERA5 sono riportati (Figura 2) attraverso un istogramma in cui le calme ( $H_s < 0.25$  m) sono state separate dagli eventi di moto ondoso ( $H_s > 0.25$  m).

In Figura 3 sono state riportate, sotto forma di diagramma polare, le frequenze di apparizione delle classi di altezza d'onda significativa suddivise in settori direzionali di  $10^\circ$ . Gli eventi ondosi aventi  $H_s > 4$  m sono stati raggruppati in una stessa classe in modo da avere una visualizzazione grafica più chiara. Si evince che

i settori direzionali di 260°-270° e 270°-280°N rappresentano quelli cui competono il maggior numero di eventi di moto ondoso.

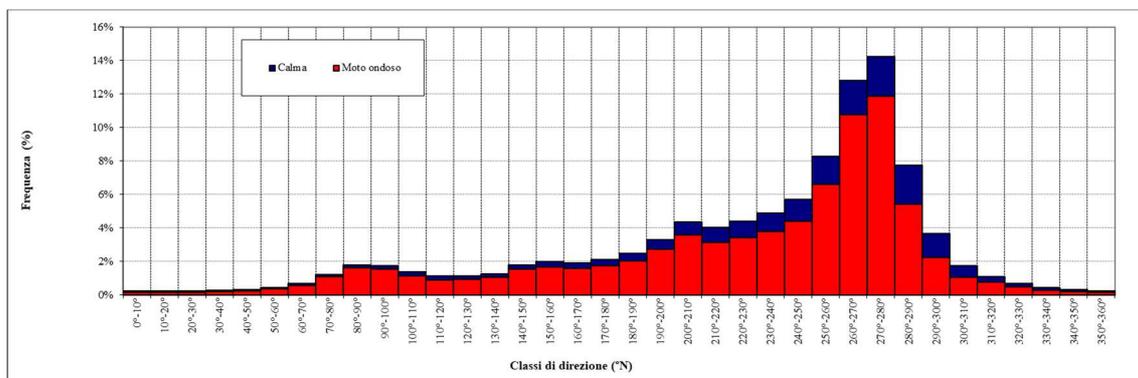
|          |     | Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               | TOTALE |               |
|----------|-----|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|---------------|
|          |     | calme  | 0.25-<br>0.75 | 0.75-<br>1.25 | 1.25-<br>1.75 | 1.75-<br>2.25 | 2.25-<br>2.75 | 2.75-<br>3.25 | 3.25-<br>3.75 | 3.75-<br>4.25 | 4.25-<br>4.75 | 4.75-<br>5.25 | 5.25-<br>5.75 | 5.75-<br>6.25 | 6.25-<br>6.75 |        | 6.75-<br>7.25 |
| Dir (°N) |     |  |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |        |               |
| 0        | 10  | 288  | 395           | 67            | 19            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 769           |
| 10       | 20  | 250  | 433           | 66            | 10            | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 760           |
| 20       | 30  | 264  | 490           | 92            | 13            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 859           |
| 30       | 40  | 261  | 553           | 82            | 10            | 4             | 3             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 913           |
| 40       | 50  | 272  | 659           | 150           | 22            | 2             | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 1106          |
| 50       | 60  | 400  | 880           | 260           | 56            | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 1598          |
| 60       | 70  | 410  | 1299          | 559           | 115           | 34            | 2             | 3             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 2422          |
| 70       | 80  | 514  | 2072          | 1299          | 360           | 78            | 18            | 18            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 4359          |
| 80       | 90  | 625  | 3490          | 1846          | 371           | 46            | 13            | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 6392          |
| 90       | 100 | 763  | 3726          | 1465          | 324           | 32            | 4             | 3             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 6317          |
| 100      | 110 | 849  | 2861          | 937           | 201           | 45            | 11            | 5             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 4909          |
| 110      | 120 | 875  | 2156          | 810           | 179           | 26            | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 4048          |
| 120      | 130 | 772  | 2212          | 826           | 213           | 45            | 4             | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 4073          |
| 130      | 140 | 743  | 2437          | 885           | 285           | 65            | 22            | 6             | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 4444          |
| 140      | 150 | 880  | 3176          | 1470          | 554           | 175           | 97            | 22            | 11            | 4             | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 6391          |
| 150      | 160 | 1071   | 3526          | 1559          | 640           | 198           | 70            | 10            | 5             | 3             | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 7084          |
| 160      | 170 | 1194   | 3505          | 1349          | 592           | 180           | 57            | 26            | 1             | 4             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 6908          |
| 170      | 180 | 1323   | 3922          | 1519          | 547           | 188           | 42            | 8             | 8             | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 7559          |
| 180      | 190 | 1558   | 4686          | 1696          | 622           | 220           | 65            | 14            | 8             | 2             | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 8873          |
| 190      | 200 | 2167   | 6348          | 2101          | 793           | 333           | 67            | 39            | 17            | 9             | 4             | 1             | 0             | 0             | 0             | 0      | 11879         |
| 200      | 210 | 2827   | 8482          | 2820          | 996           | 320           | 86            | 57            | 22            | 6             | 2             | 3             | 2             | 0             | 0             | 0      | 15623         |
| 210      | 220 | 3136   | 6823          | 2555          | 1020          | 502           | 232           | 82            | 39            | 7             | 2             | 2             | 0             | 0             | 0             | 0      | 14400         |
| 220      | 230 | 3459   | 6350          | 3069          | 1536          | 766           | 330           | 146           | 93            | 42            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 15791         |
| 230      | 240 | 3849   | 7598          | 3374          | 1547          | 640           | 303           | 109           | 63            | 25            | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 17510         |
| 240      | 250 | 4667   | 9681          | 3286          | 1576          | 721           | 312           | 133           | 50            | 28            | 5             | 2             | 0             | 0             | 0             | 0      | 20461         |
| 250      | 260 | 6061   | 13873         | 5196          | 2422          | 1084          | 645           | 285           | 105           | 45            | 14            | 6             | 3             | 2             | 0             | 0      | 29741         |
| 260      | 270 | 7366   | 20957         | 8962          | 4623          | 2133          | 1129          | 476           | 220           | 72            | 39            | 7             | 2             | 3             | 1             | 5      | 45995         |
| 270      | 280 | 8563   | 26715         | 9997          | 3412          | 1347          | 689           | 288           | 115           | 46            | 24            | 11            | 1             | 2             | 2             | 0      | 51212         |
| 280      | 290 | 8413   | 16019         | 2268          | 652           | 255           | 138           | 45            | 13            | 5             | 4             | 0             | 2             | 0             | 0             | 0      | 27814         |
| 290      | 300 | 5162   | 6580          | 966           | 277           | 123           | 53            | 10            | 3             | 4             | 3             | 1             | 2             | 0             | 0             | 0      | 13184         |
| 300      | 310 | 2415   | 3014          | 578           | 167           | 53            | 7             | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 6236          |
| 310      | 320 | 1186   | 1885          | 669           | 110           | 17            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 3867          |
| 320      | 330 | 668  | 1305          | 373           | 42            | 2             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 2390          |
| 330      | 340 | 518  | 855           | 172           | 21            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 1566          |
| 340      | 350 | 349  | 616           | 114           | 11            | 1             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 1091          |
| 350      | 360 | 325  | 441           | 75            | 15            | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0             | 0      | 856           |
| TOTALE   |     | 74443  | 180020        | 63512         | 24353         | 9638          | 4402          | 1789          | 774           | 304           | 105           | 33            | 12            | 7             | 3             | 5      | 359400        |

**Tabella 1: Numero di apparizioni del moto ondoso in corrispondenza del nodo ERA5**

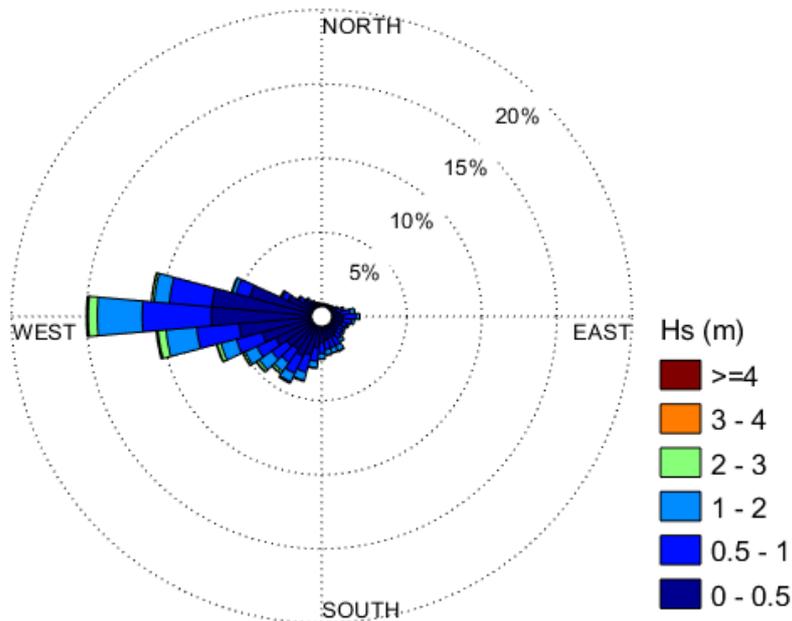
|          |    | Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |        |
|----------|----|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|
|          |    | calme  | 0.25-<br>0.75 | 0.75-<br>1.25 | 1.25-<br>1.75 | 1.75-<br>2.25 | 2.25-<br>2.75 | 2.75-<br>3.25 | 3.25-<br>3.75 | 3.75-<br>4.25 | 4.25-<br>4.75 | 4.75-<br>5.25 | 5.25-<br>5.75 | 5.75-<br>6.25 | 6.25-<br>6.75 | 6.75-<br>7.25 | TOTALE |
| Dir (°N) |    |  |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |        |
| 0        | 10 | 0.080%   | 0.110%        | 0.019%        | 0.005         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.21%  |
| 10       | 20 | 0.070%   | 0.120%        | 0.018%        | 0.003         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.21%  |
| 20       | 30 | 0.073%   | 0.136%        | 0.026%        | 0.004         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.24%  |
| 30       | 40 | 0.073%   | 0.154%        | 0.023%        | 0.003         | 0.001         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.25%  |
| 40       | 50 | 0.076%   | 0.183%        | 0.042%        | 0.006         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.31%  |
| 50       | 60 | 0.111%   | 0.245%        | 0.072%        | 0.016         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.44%  |
| 60       | 70 | 0.114%   | 0.361%        | 0.156%        | 0.032         | 0.009         | 0.001         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.67%  |
| 70       | 80 | 0.143%   | 0.577%        | 0.361%        | 0.100         | 0.022         | 0.005         | 0.005         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.21%  |
| 80       | 90 | 0.174%   | 0.971%        | 0.514%        | 0.103         | 0.013         | 0.004         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.78%  |
| 90       | 0  | 0.212%   | 1.037%        | 0.408%        | 0.090         | 0.009         | 0.001         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.76%  |
| 10       | 11 | 0.236%   | 0.796%        | 0.261%        | 0.056         | 0.013         | 0.003         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.37%  |
| 11       | 12 | 0.243%   | 0.600%        | 0.225%        | 0.050         | 0.007         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.13%  |
| 12       | 13 | 0.215%   | 0.615%        | 0.230%        | 0.059         | 0.013         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.13%  |
| 13       | 14 | 0.207%   | 0.678%        | 0.246%        | 0.079         | 0.018         | 0.006         | 0.002         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.24%  |
| 14       | 15 | 0.245%   | 0.884%        | 0.409%        | 0.154         | 0.049         | 0.027         | 0.006         | 0.003         | 0.001         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.78%  |
| 15       | 16 | 0.298%   | 0.981%        | 0.434%        | 0.178         | 0.055         | 0.019         | 0.003         | 0.001         | 0.001         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.97%  |
| 16       | 17 | 0.332%   | 0.975%        | 0.375%        | 0.165         | 0.050         | 0.016         | 0.007         | 0.000         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 1.92%  |
| 17       | 18 | 0.368%   | 1.091%        | 0.423%        | 0.152         | 0.052         | 0.012         | 0.002         | 0.002         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 2.10%  |
| 18       | 19 | 0.434%   | 1.304%        | 0.472%        | 0.173         | 0.061         | 0.018         | 0.004         | 0.002         | 0.001         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 2.47%  |
| 19       | 20 | 0.603%   | 1.766%        | 0.585%        | 0.221         | 0.093         | 0.019         | 0.011         | 0.005         | 0.003         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 3.31%  |
| 20       | 21 | 0.787%   | 2.360%        | 0.785%        | 0.277         | 0.089         | 0.024         | 0.016         | 0.006         | 0.002         | 0.001         | 0.001         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 4.35%  |
| 21       | 22 | 0.873%   | 1.898%        | 0.711%        | 0.284         | 0.140         | 0.065         | 0.023         | 0.011         | 0.002         | 0.001         | 0.001         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 4.01%  |
| 22       | 23 | 0.962%   | 1.767%        | 0.854%        | 0.427         | 0.213         | 0.092         | 0.041         | 0.026         | 0.012         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 4.39%  |

|               |    |        |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|---------------|----|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0             | 0  |        |        |        | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     |        |
| 23            | 24 |        |        |        | 0.430 | 0.178 | 0.084 | 0.030 | 0.018 | 0.007 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 1.071% | 2.114% | 0.939% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 4.87%  |
| 24            | 25 |        |        |        | 0.439 | 0.201 | 0.087 | 0.037 | 0.014 | 0.008 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 1.299% | 2.694% | 0.914% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 5.69%  |
| 25            | 26 |        |        |        | 0.674 | 0.302 | 0.179 | 0.079 | 0.029 | 0.013 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 1.686% | 3.860% | 1.446% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 8.28%  |
| 26            | 27 |        |        |        | 1.286 | 0.593 | 0.314 | 0.132 | 0.061 | 0.020 | 0.011 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |        |
| 0             | 0  | 2.050% | 5.831% | 2.494% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 12.80% |
| 27            | 28 |        |        |        | 0.949 | 0.375 | 0.192 | 0.080 | 0.032 | 0.013 | 0.007 | 0.003 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 2.383% | 7.433% | 2.782% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 14.25% |
| 28            | 29 |        |        |        | 0.181 | 0.071 | 0.038 | 0.013 | 0.004 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 2.341% | 4.457% | 0.631% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 7.74%  |
| 29            | 30 |        |        |        | 0.077 | 0.034 | 0.015 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 1.436% | 1.831% | 0.269% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 3.67%  |
| 30            | 31 |        |        |        | 0.046 | 0.015 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 0.672% | 0.839% | 0.161% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 1.74%  |
| 31            | 32 |        |        |        | 0.031 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 0.330% | 0.524% | 0.186% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 1.08%  |
| 32            | 33 |        |        |        | 0.012 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 0.186% | 0.363% | 0.104% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 0.66%  |
| 33            | 34 |        |        |        | 0.006 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 0.144% | 0.238% | 0.048% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 0.44%  |
| 34            | 35 |        |        |        | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 0.097% | 0.171% | 0.032% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 0.30%  |
| 35            | 36 |        |        |        | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |        |
| 0             | 0  | 0.090% | 0.123% | 0.021% | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | 0.24%  |
| <b>TOTALE</b> |    | 20.713 | 50.089 | 17.672 | 6.776 | 2.682 | 1.225 | 0.498 | 0.215 | 0.085 | 0.029 | 0.009 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 100.00 |
|               |    | %      | %      | %      | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %     | %      |

**Tabella 2: Percentuali di apparizione del moto ondoso in corrispondenza del nodo ERA5**



**Figura 2: Percentuali di apparizione del moto ondoso in corrispondenza del nodo ERA5**



**Figura 3: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso in corrispondenza del nodo ERA5**

L'affidabilità dei dati ECMWF è stata valutata in diverse pubblicazioni scientifiche. Per esempio, Aristodemo e Algieri Ferraro (2018) nell'articolo "Feasibility of WEC installations for domestic and public electrical supplies: A case study off the Calabrian coast" hanno confrontato i dati del modello matematico ECMWF (modello Operational) con i dati RON e del UK Met Office (UKMO) sia per il tirreno che per lo ionio. Con riferimento all'altezza d'onda significativa,  $H_s$ , nella Figura 4 e Figura 5 viene mostrato il succitato confronto effettuato tra i dati del modello ECMWF e le boe RON e tra i dati del modello ECMWF e i dati del modello UKMO. All'interno della figura vengono riportati la distorsione del campione (bias), l'errore quadratico medio (rmse), la pendenza della retta di regressione (slope), l'indice di dispersione (si) e l'indice di Willmott (d).

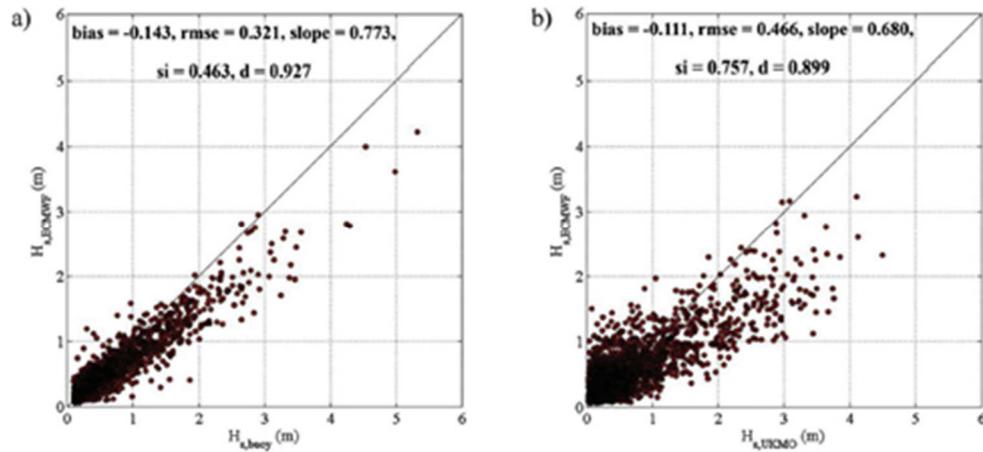


Figura 4: Validazione dei dati d'onda ECMWF per il mar Tirreno

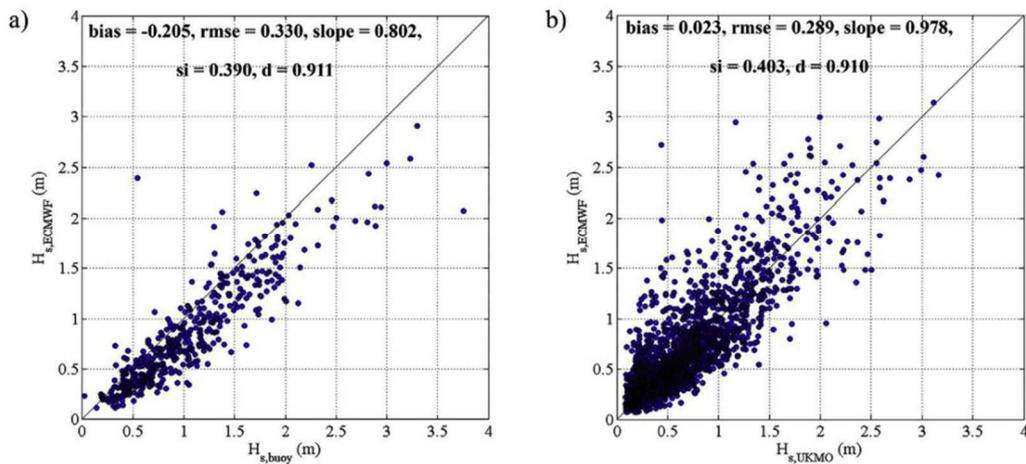


Figura 5: Validazione dei dati d'onda ECMWF per il mar Ionio

### 3 Trasposizione dei dati di moto ondoso

La definizione del clima di moto ondoso al largo di un paraggio risulta fondamentale per impostare gran parte degli studi che vengono eseguiti nel campo dell'ingegneria costiera e, più in generale, delle costruzioni marittime.

In generale, per la definizione del clima di moto ondoso di un paraggio, la fonte attuale di dati più completa e attendibile è costituita dalle serie storiche di misure dedotte dai database dell'ECMWF attraverso i dati dell'ERA5, che risultano avere serie temporali più estese e recenti rispetto a quelli della rete RON. Tuttavia, in ragione del numero limitato di nodi dell'ECMWF presenti al largo delle coste italiane, il più delle volte

|   |                            |
|---|----------------------------|
| <br>Agenzia nazionale per l'attrazione<br>degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA | 2017E037INV-02-D-OM-RT0001 |
|   | Rev. 0                     |
|   | Pag. 12 di 35              |

il sito di interesse, pur ricadendo nella stessa area geografica, è spesso situato in una posizione decentrata rispetto al tratto di mare “sotteso” dal nodo di ricostruzione. Da qui, nasce l’esigenza di ricorrere a un metodo che consenta di “trasporre” geograficamente le misure del moto ondoso dal punto di misura a quello di interesse. Nel caso in esame, partendo dalle serie storiche dei dati di moto ondoso registrati dal nodo ERA 5 occorre determinare quale sia il clima meteomarinico al largo del paraggio dell’Isola di Santo Stefano, che non risulta disporre di misure dirette di moto ondoso.

Il cosiddetto metodo della trasposizione geografica delle misure di moto ondoso, proposto da Contini e De Girolamo (1998), viene applicato per consentire il trasferimento dei dati di altezza d’onda significativa, periodo medio e periodo di picco. Inoltre, un metodo empirico, applicato dai ricercatori del Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari, viene utilizzato per la determinazione della direzione di provenienza del moto ondoso nell’area di interesse, a partire dalla direzione del moto ondoso registrata dal nodo ERA5.

L’ipotesi di base del metodo della trasposizione geografica consiste nel supporre che le stesse condizioni di vento (velocità e direzione) che hanno determinato le condizioni di moto ondoso registrate abbiano interessato anche l’area di generazione situata al largo del sito di interesse. Il metodo consiste nel determinare la corrispondenza tra le direzioni, le altezze e i periodi del moto ondoso relativi al punto di misura (nodo ERA5) e quello di interesse (nodo virtuale dell’Isola di Santo Stefano), che risulta un punto ottimale per la modellazione meteomarinica media ed estrema per il tratto litoraneo in esame (Figura 6).



**Figura 6: Localizzazione del nodo ERA5 e di quello virtuale (Isola di Santo Stefano)**

Le leggi che permettono di calcolare l'altezza d'onda significativa  $H_s$  e il periodo medio  $T_m$  in funzione della lunghezza del fetch efficace e della velocità del vento sono le seguenti (Shore Protection Manual, 1984):

$$\frac{gH_s}{u_A^2} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left( \frac{gF_e}{u_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{gT_m}{u_A} = 2.857 \cdot 10^{-1} \left( \frac{gF_e}{u_A^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

dove:

$u_A$  è il fattore di velocità del vento ("wind stress factor"), dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota +10 m s.l.m.;

$F_e$  è il fetch efficace relativo a una prefissata direzione geografica.

Per le analisi meteomarine di un paraggio e la definizione dell'esposizione geografica di una stazione di misura del moto ondoso o di un sito costiero, occorre determinare i fetch geografici ed efficaci. Per fetch si intende la lunghezza della porzione di mare sulla quale può avvenire la generazione del moto ondoso a opera dell'azione esercitata dal vento. In bacini come il Mediterraneo, l'individuazione dei fetch può essere eseguita facendo ricorso al concetto di "fetch geografico" che indica la distanza geografica tra il punto di interesse e la terra più vicina in relazione a una prefissata direzione. Nel Mediterraneo, in particolare, essendo questo assimilabile a un bacino chiuso, si considera ai fini applicativi una distanza massima del fetch geografico pari a 500 km (Noli, 2004).

Ai fini della determinazione delle grandezze del moto ondoso a partire dai dati di vento e per poter determinare le grandezze del moto ondoso da un paraggio a un altro, è necessario determinare i valori dei fetch efficaci sulla base dei valori dei fetch geografici individuati. Il fetch efficace viene introdotto per considerare l'effetto della larghezza del fetch e della dispersione direzionale dell'energia dell'onda sullo sviluppo e propagazione dell'onda. Il valore del fetch efficace relativo a una determinata direzione è funzione dei valori dei fetch geografici associati alle direzioni contigue a quella considerata. In questo modo, i fetch efficaci consentono di tener conto del fatto che il moto ondoso viene generato non solo nella direzione lungo la quale spira il vento ma anche in tutte le direzioni comprese in un settore di  $\pm 90^\circ$  rispetto alla direzione media di azione del vento. Di conseguenza, la lunghezza dei fetch efficaci risulta essere diversa da quella dei fetch geografici. Il calcolo dei fetch efficaci, effettuato ogni  $5^\circ$ , può essere eseguito in base alla seguente relazione:

$$F_{e,w} = \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos^{n+1}(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} \cos^n(\phi_i - \phi_w)}$$

dove:

- $F_{e,w}$  è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione  $\phi_w$ ;
- $F_i$  è la lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima  $\phi_i$ ;
- $\phi_w$  è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento;

- $\phi_w - \vartheta \leq \phi_i \leq \phi_w + \vartheta$  rappresenta la direzione  $i$ -esima (riferita al Nord geografico) relativa a un settore di ampiezza  $2\vartheta$  considerato nell'intorno della direzione  $\phi_w$  (il metodo di Saville prevede un valore di  $\vartheta = 45^\circ$  mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di  $\vartheta = 90^\circ$ );
- $\vartheta$  è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso;
- $n$  è il termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente, si assume  $n = 2$  per studi meteomarini effettuati nei mari italiani).

L'equazione precedente deriva dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso nota come metodo S.M.B. (Sverdrup, Munk e Bretschneider, 1947) e dai suoi successivi aggiornamenti (Saville, 1954; Seymour, 1977; Smith, 1991).

La definizione dei fetch geografici ed efficaci costituisce uno dei punti fondamentali degli studi meteomarini. Infatti, i valori dei fetch possono essere utilizzati nelle seguenti analisi:

- definizione preliminare dei settori di traversia principali e secondari per il sito di interesse;
- determinazione della correlazione tra direzione di provenienza del vento e quella del moto ondoso generato;
- ricostruzione indiretta del moto ondoso sulla base di misure anemometriche;
- trasposizione geografica di misure ondometriche;
- propagazione da largo a riva di stati di mare.

In Figura 7 sono indicati i fetch geografici relativi al transetto costiero al largo dell'Isola di Santo Stefano. Invece, in Figura 8 sono invece indicati i fetch efficaci ottenuti per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano attraverso l'applicazione della formula di Saville.

In Figura 9 e Figura 10 sono indicati, rispettivamente, i fetch geografici ed efficaci tracciati per il nodo ERA5.



**Figura 7: Tracciamento dei fetch geografici per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano**



**Figura 8: Tracciamento dei fetch efficaci per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano**



**Figura 9: Tracciamento dei fetch geografici in corrispondenza del nodo ERA5**



**Figura 10: Tracciamento dei fetch efficaci in corrispondenza del nodo ERA5**

Nella seguente Tabella 3 e Tabella 4 sono mostrati, rispettivamente, i valori dei fetch geografici, Fg, ed efficaci, Fe, espressi in km, per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano e per il nodo ERA5.

| Direzione (°N) | Fg (km) | Fe (km) | Direzione (°N) | Fg (km) | Fe (km) |
|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|
| 5              | 46.1    | 45      | 185            | 274.3   | 293.1   |
| 10             | 44.9    | 44.3    | 190            | 262.4   | 313.3   |
| 15             | 44.6    | 43.6    | 195            | 279.6   | 316.1   |
| 20             | 44.4    | 48      | 200            | 285.3   | 500     |
| 25             | 44.2    | 50.5    | 205            | 271.1   | 3.6     |
| 30             | 44.1    | 51.2    | 210            | 289     | 3.6     |
| 35             | 44.1    | 50.7    | 215            | 298     | 3.2     |
| 40             | 44.2    | 50.2    | 220            | 283.3   | 5.6     |
| 45             | 44.3    | 49.2    | 225            | 300.6   | 500     |
| 50             | 44.5    | 48.4    | 230            | 310.4   | 500     |
| 55             | 45.2    | 47.7    | 235            | 294.5   | 500     |
| 60             | 44.6    | 47.2    | 240            | 297.6   | 500     |
| 65             | 45.1    | 47.4    | 245            | 301.7   | 367.3   |
| 70             | 45.2    | 47.9    | 250            | 284.5   | 347.4   |
| 75             | 48.5    | 48.9    | 255            | 286     | 333.6   |
| 80             | 56.1    | 50.3    | 260            | 305.4   | 328.9   |
| 85             | 62.1    | 51      | 265            | 300.4   | 308.5   |
| 90             | 73.6    | 51      | 270            | 287.4   | 314.1   |
| 95             | 87.6    | 51.7    | 275            | 281.2   | 324.1   |
| 100            | 99.4    | 47.6    | 280            | 264.9   | 41.9    |
| 105            | 116.8   | 36      | 285            | 244.4   | 42.2    |
| 110            | 134.3   | 36.5    | 290            | 234.1   | 355     |
| 115            | 148     | 72.9    | 295            | 221     | 355.2   |
| 120            | 169.8   | 229.4   | 300            | 206.9   | 367.3   |
| 125            | 186.8   | 262.9   | 305            | 192.8   | 395.3   |
| 130            | 200.4   | 291.3   | 310            | 178.4   | 270.1   |
| 135            | 221.7   | 327.3   | 315            | 166.7   | 257.1   |
| 140            | 234.6   | 317.7   | 320            | 147.7   | 85.3    |
| 145            | 243.5   | 347.2   | 325            | 132.4   | 56.9    |
| 150            | 261     | 331.8   | 330            | 129     | 54      |

|     |       |       |     |       |      |
|-----|-------|-------|-----|-------|------|
| 155 | 275.3 | 277   | 335 | 111.2 | 53.3 |
| 160 | 280.6 | 268.1 | 340 | 94.3  | 53.1 |
| 165 | 286.9 | 320.2 | 345 | 86.6  | 52.4 |
| 170 | 277.8 | 315.7 | 350 | 67.3  | 51.4 |
| 175 | 262.6 | 4     | 355 | 55.6  | 50   |
| 180 | 273   | 3.8   | 360 | 50    | 47.4 |

**Tabella 3: Valori dei fetch geografici, Fg, ed efficaci, Fe, per il paraggio dell'Isola di Santo Stefano**

| Direzione (°N) | Fg (km) | Fe (km) | Direzione (°N) | Fg (km) | Fe (km) |
|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|
| 5              | 26.9    | 24.9    | 185            | 340.1   | 311.7   |
| 10             | 26.7    | 24.5    | 190            | 326.9   | 23.4    |
| 15             | 26.6    | 24.1    | 195            | 342     | 23      |
| 20             | 26.7    | 24.3    | 200            | 366.4   | 500     |
| 25             | 26.9    | 28.6    | 205            | 351.6   | 500     |
| 30             | 27.3    | 30.8    | 210            | 360.9   | 500     |
| 35             | 27.8    | 32.1    | 215            | 373.2   | 500     |
| 40             | 28.3    | 32.9    | 220            | 355.4   | 500     |
| 45             | 29      | 33.2    | 225            | 354.7   | 500     |
| 50             | 29.8    | 33.5    | 230            | 367.2   | 500     |
| 55             | 30.6    | 33.9    | 235            | 352.3   | 500     |
| 60             | 31.5    | 34.1    | 240            | 345.7   | 500     |
| 65             | 32.5    | 34.4    | 245            | 357.5   | 368.7   |
| 70             | 33.6    | 34.9    | 250            | 341.5   | 346.1   |
| 75             | 35.1    | 35.4    | 255            | 327.6   | 47.6    |
| 80             | 36.3    | 36.2    | 260            | 325.8   | 45      |
| 85             | 40.6    | 37.4    | 265            | 306     | 317.5   |
| 90             | 42.3    | 39.1    | 270            | 286.7   | 312.1   |
| 95             | 43.2    | 41.4    | 275            | 276.7   | 333.1   |
| 100            | 60.3    | 44.3    | 280            | 256.4   | 358.5   |
| 105            | 68.3    | 47.8    | 285            | 237.1   | 350.6   |
| 110            | 77.7    | 49.7    | 290            | 223.1   | 355.7   |
| 115            | 102.1   | 51.3    | 295            | 205.6   | 355.6   |

|     |       |       |     |       |       |
|-----|-------|-------|-----|-------|-------|
| 120 | 111.2 | 85.9  | 300 | 187.9 | 372.8 |
| 125 | 126.9 | 50.1  | 305 | 173   | 88.3  |
| 130 | 154.2 | 44    | 310 | 157.4 | 42.7  |
| 135 | 164.9 | 41.8  | 315 | 140.2 | 40.4  |
| 140 | 183.6 | 331.4 | 320 | 116.1 | 38.8  |
| 145 | 207.4 | 354.6 | 325 | 99.1  | 37.8  |
| 150 | 213.8 | 346.9 | 330 | 81.3  | 36.3  |
| 155 | 234.7 | 345.2 | 335 | 62.7  | 34.9  |
| 160 | 246.5 | 335.1 | 340 | 52.2  | 33.2  |
| 165 | 259.4 | 339   | 345 | 40.4  | 31.5  |
| 170 | 290.1 | 335.8 | 350 | 29.1  | 29.5  |
| 175 | 289   | 333.8 | 355 | 27.8  | 26.8  |
| 180 | 305.5 | 325.6 | 360 | 27.2  | 25.5  |

**Tabella 4: Valori dei fetch geografici,  $F_g$ , ed efficaci,  $F_e$ , in corrispondenza del nodo ERA5**

Indicando con gli apici O e P, rispettivamente, le grandezze relative ai punti di misura (ERA5) e al punto di trasposizione (Isola di Santo Stefano) e fissata una direzione geografica (direzione media da cui spira il vento) alla quale risultano associati i fetch efficaci  $F_e^P$  e  $F_e^O$ , le precedenti relazioni dello Shore Protection Manual permettono di ricavare la ricercata corrispondenza tra le altezze significative,  $H_s$ , e i periodi medi,  $T_m$ , delle onde relative al punto O e al punto P (Contini e De Girolamo, 1998):

$$\frac{H_s^P}{H_s^O} = \left( \frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{T_m^P}{T_m^O} = \left( \frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \frac{T_p^P}{T_p^O} = \left( \frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{3}}$$

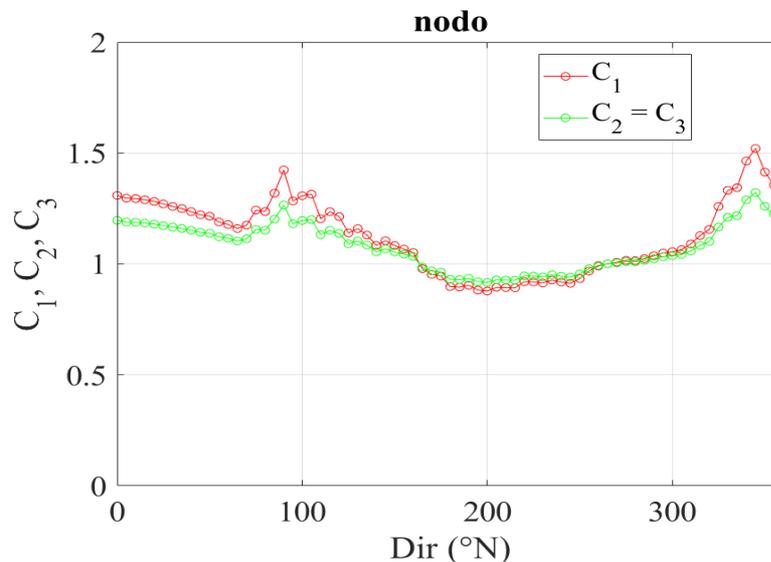
Per ottenere le precedenti relazioni si è supposto che il fattore di velocità del vento,  $u_A$ , sia lo stesso nei due punti al largo messi a confronto (ERA5-Isola di Santo Stefano).

I coefficienti di trasposizione per l'altezza d'onda significativa,  $C_1 = \left( \frac{F_e^P}{F_e^O} \right)^{\frac{1}{2}}$ , per il periodo medio,  $C_2 =$

$\left(\frac{F_e^P}{F_e^O}\right)^{\frac{1}{3}}$ , e per il periodo di picco,  $C_3 = C_2$ , sono stati messi a confronto con la direzione di provenienza

del moto ondoso nel caso di trasferimento geografico dei dati dal nodo ERA5 al largo dell'Isola di Santo Stefano (Figura 11).

Dall'analisi della Figura 11 si evince una diminuzione generale dell'altezza d'onda significativa ( $C_1 < 1$ ) e del periodo medio e di quello di picco ( $C_2 < 1$ ) per le direzioni comprese fra  $165^\circ\text{N}$  e  $265^\circ\text{N}$ , mentre nelle altre direzioni i coefficienti sono maggiori di 1.



**Figura 11: Coefficienti di trasposizione in funzione della direzione di provenienza del moto ondoso (ERA5 – Isola di Santo Stefano)**

Ai fini della determinazione della direzione del moto ondoso al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano, occorre rilevare che il metodo dello Shore Protection Manual (SMB) da cui si determinano indirettamente i dati di moto ondoso dai dati di vento prevede che la direzione di provenienza delle onde sia coincidente con quella del vento. La direzione dell'onda risulta in questo caso la media delle direzioni di tutte le registrazioni che compongono l'evento, pesata rispetto alle intensità, trascurando quindi gli effetti della geometria dell'area di generazione sulla direzione dell'onda.

Si rende quindi necessario introdurre delle relazioni finalizzate alla correzione della direzione del vento per tenere conto del fatto che il trasferimento di energia dal vento al mare dipende anche dalla distribuzione direzionale dei fetch. Si può quindi pensare di assegnare allo stato di mare una direzione calcolata come media pesata delle direzioni rispetto alla lunghezza del fetch geografico. Si ipotizza che il

trasferimento di energia avvenga in un settore di ampiezza variabile tra  $\pm 45^\circ$  intorno la direzione media del vento e che la funzione di trasferimento dell'energia sia rappresentabile da una potenza ennesima del coseno. In particolare, si può osservare che il trasferimento di energia si riduce lungo le direzioni più lontane da quella di provenienza, mentre aumenta lungo le direzioni a cui competono i fetch più estesi. Di conseguenza, le onde generate da venti spiranti da direzioni prossime ai limiti del settore di traversia tendono a propagarsi lungo direzioni più interne.

Lo scarto tra la direzione media del vento e la direzione del moto ondoso che esso genera,  $\beta$ , viene valutato attraverso una relazione empirica basata sugli studi meteomarini effettuati dai ricercatori del Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari:

$$\beta = \arctan \left( \frac{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \sin(\phi_i - \phi_w) \cos^n(\phi_i - \phi_w)}{\sum_{\phi_i = \phi_w - \theta}^{\phi_w + \theta} F_i \cos(\phi_i - \phi_w) \cos^n(\phi_i - \phi_w)} \right)$$

dove  $F_i$  è il fetch geografico valutato lungo le direzioni adiacenti alla direzione media del vento comprese in un settore di ampiezza variabile;

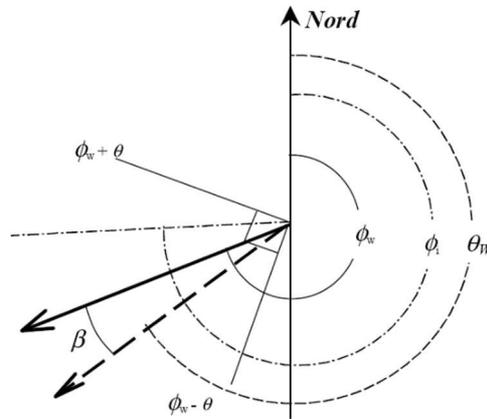
$\phi_w$  è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento;

$\phi_w - \vartheta \leq \phi \leq \phi_w + \vartheta$  rappresenta la direzione  $i$ -esima (riferita al Nord geografico) relativa a un settore di ampiezza  $2\vartheta$  considerato nell'intorno della direzione  $\phi_w$ ;

$\vartheta$  è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso, valutato in questo caso pari a  $45^\circ$ ;

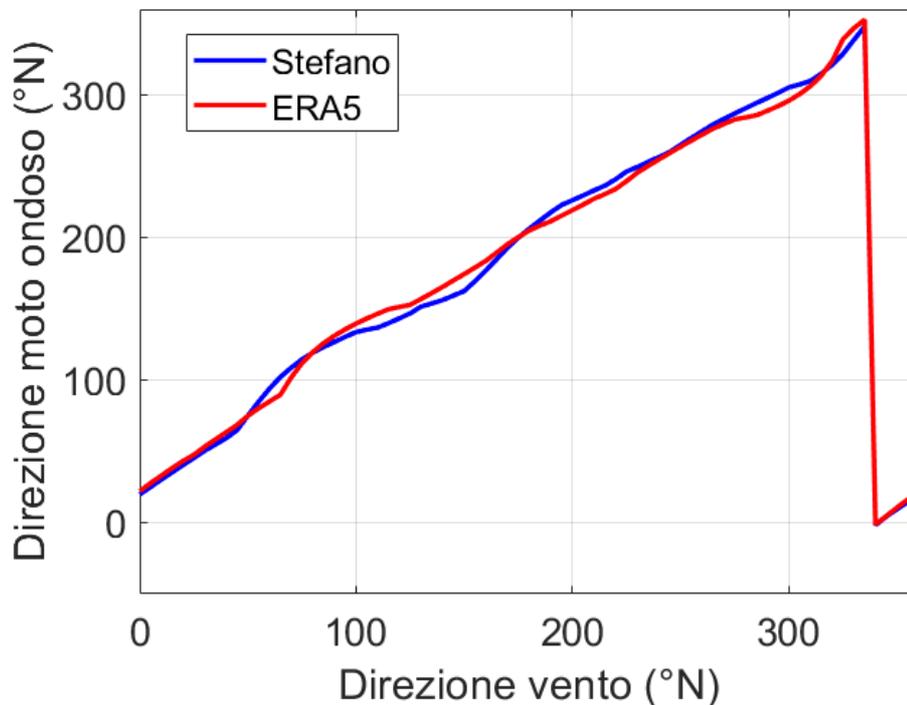
$n$  è l'esponente del coseno, posto in questo caso pari a 2, come nella formula di Saville per il calcolo dei fetch efficaci.

Le grandezze succitate sono mostrate in Figura 12, con riferimento allo schema adottato per le convenzioni degli angoli relativi alle direzioni di provenienza del vento e del moto ondoso rispetto al Nord Cartografico. In particolare,  $\vartheta_w$  rappresenta la direzione di propagazione del moto ondoso.



**Figura 12: Schema di riferimento, convenzioni e simboli relativi alle direzioni del vento e del moto ondoso**

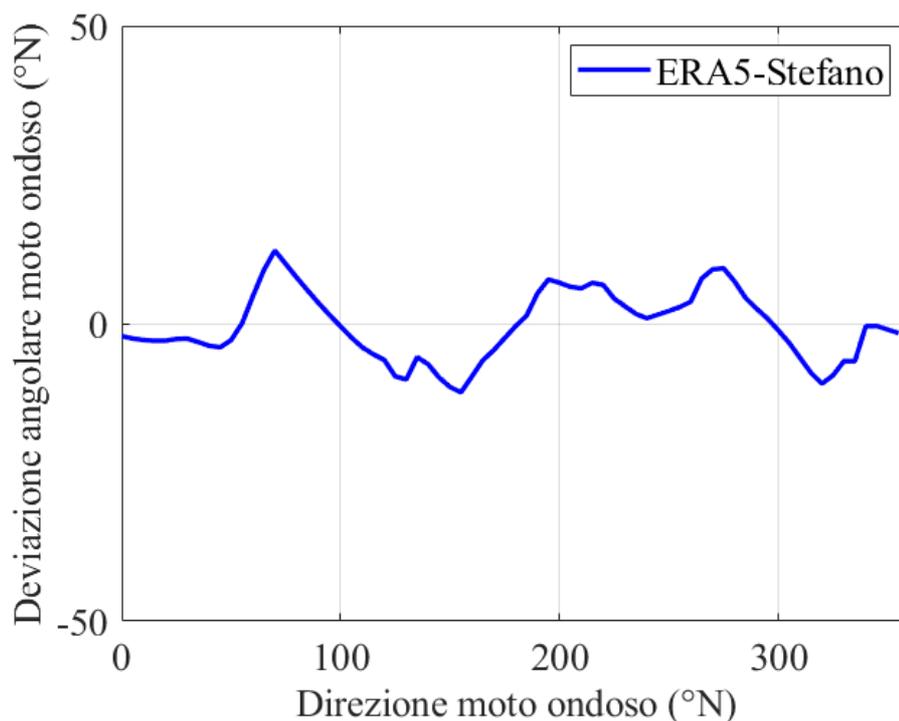
Nella Figura 13 viene mostrata la correlazione fra le direzioni del moto ondoso fra il nodo ERA5 e la boa virtuale dell'Isola di Santo Stefano.



**Figura 13: Variazione della direzione del moto ondoso rispetto a quella del vento (ERA5-Isola di Santo Stefano)**

L'entità della variazione che subisce la direzione di provenienza del moto ondoso durante la trasposizione

geografica dell'evento ondoso dal nodo ERA5 a quello virtuale al largo dell'Isola di Santo Stefano è mostrata nella Figura 14.



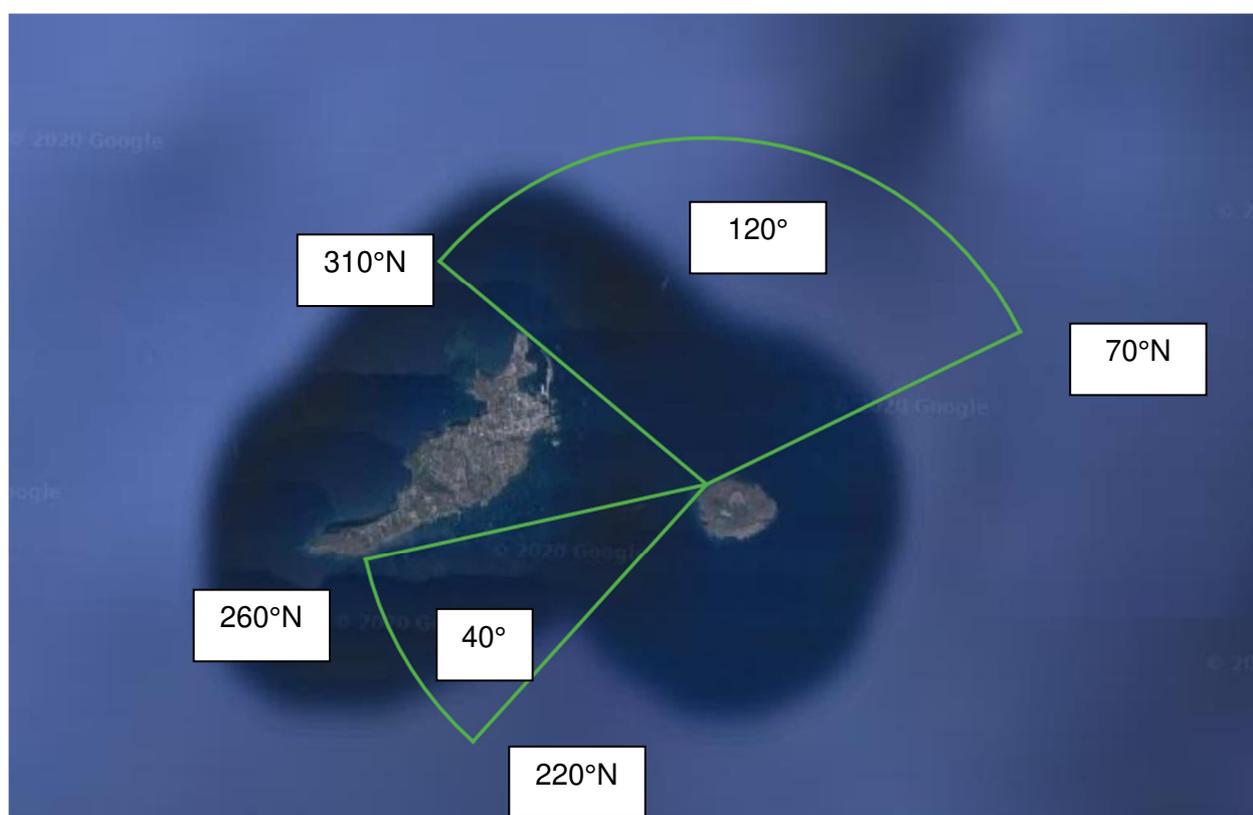
**Figura 14: Variazione della deviazione angolare del moto ondoso fra il nodo ERA5 e la boa virtuale dell'Isola di Santo Stefano**

#### 4 Clima meteomarinò al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano

L'applicazione del metodo della trasposizione geografica dei dati di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco) dal nodo ERA5 alla boa virtuale posta al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano e del metodo per il calcolo delle direzioni del moto ondoso consente la determinazione del clima meteomarinò al largo del paraggio in esame, con riferimento agli eventi ricadenti nel settore di traversia. Esso rappresenta un settore angolare comprendente tutte le direzioni da cui si presumano possano provenire le agitazioni ondose determinate dai venti foranei. L'arco di circonferenza comprendente tutte le direzioni da cui possono provenire i venti foranei nel paraggio in esame è stato ottenuto considerando le possibili direzioni di provenienza delle onde sulla base della particolare esposizione del paraggio (Figura 15). Per il paraggio in esame il settore di traversia, su cui spirano i venti che possono creare significative agitazioni ondose, è compreso tra 310°N e 70°N e tra 220°N e 260°N, per un'ampiezza angolare totale di pari a 160°. La scelta dell'ampiezza del settore di traversia è dettata dal

fatto che, ampliando eventualmente tale settore, le onde risultano essere abbastanza sub-parallele alla costa e pertanto subiscono elevati abbattimenti per effetto del fenomeno della rifrazione nella loro propagazione sottocosta e quindi risultano essere ininfluenti nei riguardi dell'evoluzione morfodinamica del litorale e nella determinazione delle onde di progetto. Si può notare la particolarità del paraggio determinato in quanto il lato Nord-Ovest, ovvero le direzioni comprese tra 260°N e 310°N, risulta protetto dall'isola di Ventotene.

Per gli stati di mare al largo dell'Isola di Santo Stefano dedotti dal nodo ERA5, gli eventi totali all'interno del settore di traversia, afferenti al periodo 1979-2019, risultano 95744, di cui 23306 eventi di calma, caratterizzati da  $H_s < 0.25$  m, che rappresentano il 24.34 % degli eventi totali nel settore.



**Figura 15: Individuazione del settore di traversia del paraggio dell'Isola di Santo Stefano**

In Tabella 5 e in Tabella 6 sono mostrati, rispettivamente, i numeri di apparizione e le percentuali di apparizione del moto ondoso al largo dell'Isola di Santo Stefano, con riferimento alla trasposizione dei dati d'onda ERA5. Come si può osservare dall'istogramma mostrato in Figura 16 e dal diagramma polare mostrato in Figura 17, risulta che, con riferimento alla suddivisione dei settori direzionali effettuati al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano, gli stati di mari più frequenti provengono dai settori 230°-240°N

|               |     | Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m) |              |              |             |             |             |            |            |           |           |           |           |              |
|---------------|-----|--|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
|               |     | calme  | 0.25-0.75    | 0.75-1.25    | 1.25-1.75   | 1.75-2.25   | 2.25-2.75   | 2.75-3.25  | 3.25-3.75  | 3.75-4.25 | 4.25-4.75 | 4.75-5.25 | 5.25-5.75 | TOTALE       |
| Dir (°N)      |     |  |              |              |             |             |             |            |            |           |           |           |           |              |
| 0             | 10  | 189  | 472          | 108          | 41          | 8           | 1           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 819          |
| 10            | 20  | 154  | 440          | 132          | 25          | 7           | 0           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 758          |
| 20            | 30  | 166  | 532          | 145          | 35          | 10          | 2           | 1          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 891          |
| 30            | 40  | 163  | 638          | 195          | 41          | 3           | 3           | 3          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 1046         |
| 40            | 50  | 174  | 567          | 220          | 66          | 12          | 0           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 1039         |
| 50            | 60  | 148  | 425          | 178          | 53          | 8           | 0           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 812          |
| 60            | 70  | 128  | 517          | 231          | 95          | 11          | 0           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 982          |
| 220           | 230 | 4909   | 8003         | 3177         | 1356        | 675         | 266         | 131        | 52         | 6         | 0         | 0         | 0         | 18575        |
| 230           | 240 | 5622   | 9594         | 4276         | 1941        | 762         | 285         | 116        | 71         | 11        | 0         | 0         | 0         | 22678        |
| 240           | 250 | 4791   | 8098         | 2598         | 1203        | 512         | 181         | 69         | 33         | 8         | 1         | 0         | 0         | 17494        |
| 250           | 260 | 5788   | 11413        | 4106         | 1731        | 801         | 479         | 188        | 66         | 23        | 10        | 4         | 1         | 24610        |
| 310           | 320 | 334  | 1044         | 374          | 95          | 11          | 1           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 1859         |
| 320           | 330 | 283  | 863          | 347          | 62          | 17          | 1           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 1573         |
| 330           | 340 | 78   | 331          | 112          | 21          | 6           | 2           | 1          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 551          |
| 340           | 350 | 171  | 659          | 199          | 74          | 11          | 2           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 1116         |
| 350           | 360 | 208  | 543          | 133          | 47          | 10          | 0           | 0          | 0          | 0         | 0         | 0         | 0         | 941          |
| <b>TOTALE</b> |     | <b>23306</b>                                   | <b>44139</b> | <b>16531</b> | <b>6886</b> | <b>2864</b> | <b>1223</b> | <b>509</b> | <b>222</b> | <b>48</b> | <b>11</b> | <b>4</b>  | <b>1</b>  | <b>95744</b> |

**Tabella 5: Numero di apparizioni del moto ondoso al largo dell'Isola di Santo Stefano (dal nodo ERA5)**

|               |     | Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m) |                |                |               |               |               |               |               |               |               |               |               |                |
|---------------|-----|--|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
|               |     | calme  | 0.25-0.75      | 0.75-1.25      | 1.25-1.75     | 1.75-2.25     | 2.25-2.75     | 2.75-3.25     | 3.25-3.75     | 3.75-4.25     | 4.25-4.75     | 4.75-5.25     | 5.25-5.75     | TOTALE         |
| Dir (°N)      |     |  |                |                |               |               |               |               |               |               |               |               |               |                |
| 0             | 10  | 0.197%   | 0.493%         | 0.113%         | 0.043%        | 0.008%        | 0.001%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.86%          |
| 10            | 20  | 0.161%   | 0.460%         | 0.138%         | 0.026%        | 0.007%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.79%          |
| 20            | 30  | 0.173%   | 0.556%         | 0.151%         | 0.037%        | 0.010%        | 0.002%        | 0.001%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.93%          |
| 30            | 40  | 0.170%   | 0.666%         | 0.204%         | 0.043%        | 0.003%        | 0.003%        | 0.003%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 1.09%          |
| 40            | 50  | 0.182%   | 0.592%         | 0.230%         | 0.069%        | 0.013%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 1.09%          |
| 50            | 60  | 0.155%   | 0.444%         | 0.186%         | 0.055%        | 0.008%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.85%          |
| 60            | 70  | 0.134%   | 0.540%         | 0.241%         | 0.099%        | 0.011%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 1.03%          |
| 220           | 230 | 5.127%   | 8.359%         | 3.318%         | 1.416%        | 0.705%        | 0.278%        | 0.137%        | 0.054%        | 0.006%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 19.40%         |
| 230           | 240 | 5.872%   | 10.020%        | 4.466%         | 2.027%        | 0.796%        | 0.298%        | 0.121%        | 0.074%        | 0.011%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 23.69%         |
| 240           | 250 | 5.004%   | 8.458%         | 2.713%         | 1.256%        | 0.535%        | 0.189%        | 0.072%        | 0.034%        | 0.008%        | 0.001%        | 0.000%        | 0.000%        | 18.27%         |
| 250           | 260 | 6.045%   | 11.920%        | 4.289%         | 1.808%        | 0.837%        | 0.500%        | 0.196%        | 0.069%        | 0.024%        | 0.010%        | 0.004%        | 0.001%        | 25.70%         |
| 310           | 320 | 0.349%   | 1.090%         | 0.391%         | 0.099%        | 0.011%        | 0.001%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 1.94%          |
| 320           | 330 | 0.296%   | 0.901%         | 0.362%         | 0.065%        | 0.018%        | 0.001%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 1.64%          |
| 330           | 340 | 0.081%   | 0.346%         | 0.117%         | 0.022%        | 0.006%        | 0.002%        | 0.001%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.58%          |
| 340           | 350 | 0.179%   | 0.688%         | 0.208%         | 0.077%        | 0.011%        | 0.002%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 1.17%          |
| 350           | 360 | 0.217%   | 0.567%         | 0.139%         | 0.049%        | 0.010%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.000%        | 0.98%          |
| <b>TOTALE</b> |     | <b>24.342%</b>                                 | <b>46.101%</b> | <b>17.266%</b> | <b>7.192%</b> | <b>2.991%</b> | <b>1.277%</b> | <b>0.532%</b> | <b>0.232%</b> | <b>0.050%</b> | <b>0.011%</b> | <b>0.004%</b> | <b>0.001%</b> | <b>100.00%</b> |

**Tabella 6: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo dell'Isola di Santo Stefano (dal nodo**

ERA5)

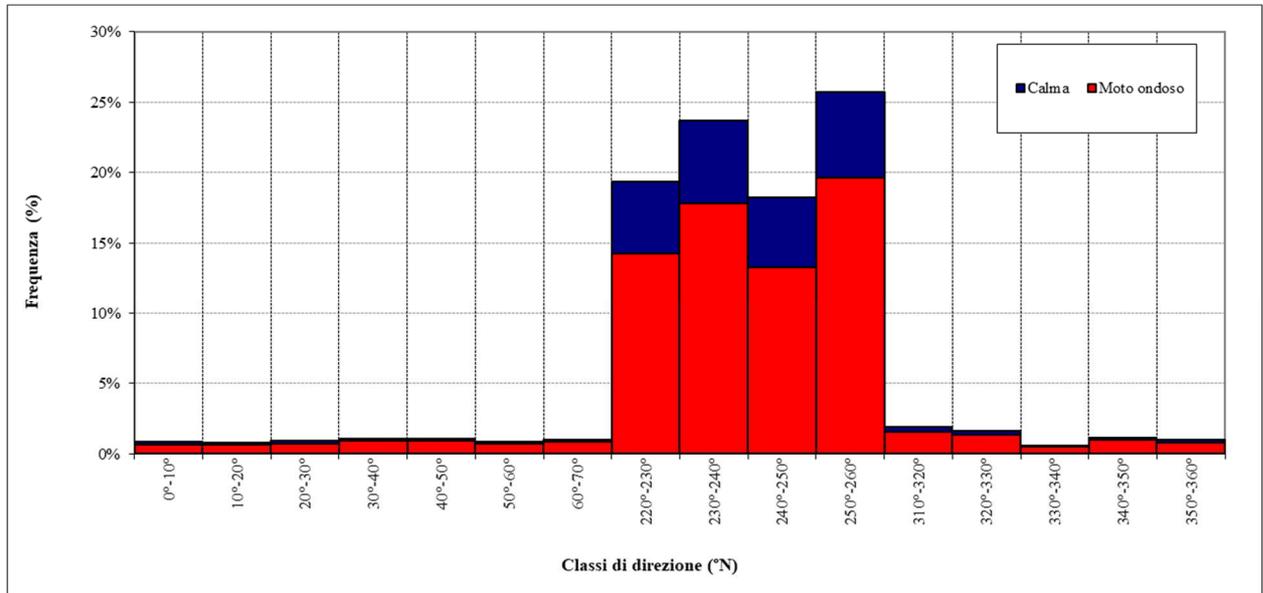


Figura 16: Percentuali di apparizione del moto ondosso al largo dell'Isola di Santo Stefano (dal nodo

ERA5)

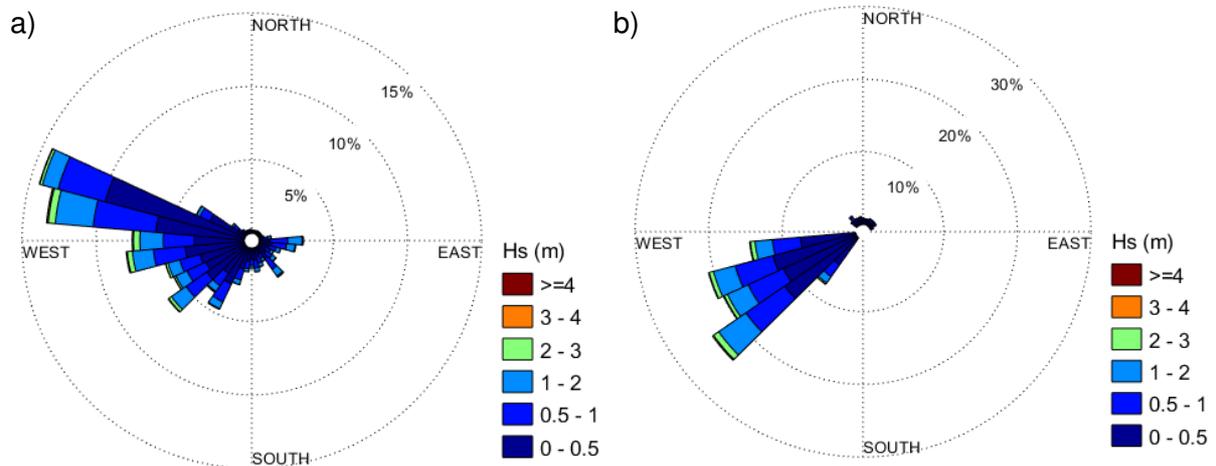


Figura 17: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondosso al largo dell'Isola di Santo Stefano (dal nodo ERA): a) tutte le direzioni b) solo nel settore di traversia

## 5 Correlazioni periodo-altezza d'onda

Partendo ora dall'analisi dei dati d'onda ERA5 e per i dati di moto ondosso trasposti al largo del paraggio

dell'Isola di Santo Stefano, selezionati per la successiva determinazione del clima meteomarinico sottocosta, è stato possibile costruire la correlazione tra l'altezza d'onda significativa al largo e i corrispondenti valori di periodo medio e di picco. Tali correlazioni risultano utili ai fini dell'individuazione degli eventi ondosi che occorre propagare sottocosta. Essi sono suddivisi per classi di altezza d'onda significativa a cui corrispondono, sulla base di opportune correlazioni, i valori del periodo (medio o di picco).

La formulazione matematica scelta è un'espressione di potenza del tipo:

$$T = \alpha \cdot H_s^\beta$$

dove:

T è il periodo dell'onda (medio o di picco), espresso in s;

$H_s$  è l'altezza d'onda significativa, espressa in m;

$\alpha$  e  $\beta$  sono i coefficienti di correlazione.

I dati d'onda sono stati suddivisi per altezze congruenti, fissando un fattore di soglia pari a 0.5 m, indipendentemente dalla direzione di provenienza.

Per ogni altezza d'onda  $H_{si}$  sono state tabulate tutte le n direzioni di provenienza, i corrispondenti n periodi e gli m numeri di apparizione  $b_s$ . Si è ricavato il periodo riferito alla i-esima onda come

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^m T_{sj} \cdot b_s}{m}, \text{ espresso in s.}$$

Una volta calcolato il periodo d'onda  $T_i$  per ogni altezza d'onda  $H_{si}$ , è stata cercata la regressione fra i valori di  $T_i$  e i valori di  $H_{si}$ .

Nella Figura 18 e Figura 19 sono riportate, rispettivamente, le regressioni fra l'altezza significativa e il periodo medio e fra altezza significativa e il periodo di picco per i dati al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano, con i relativi valori del coefficiente di correlazione  $R^2$ .

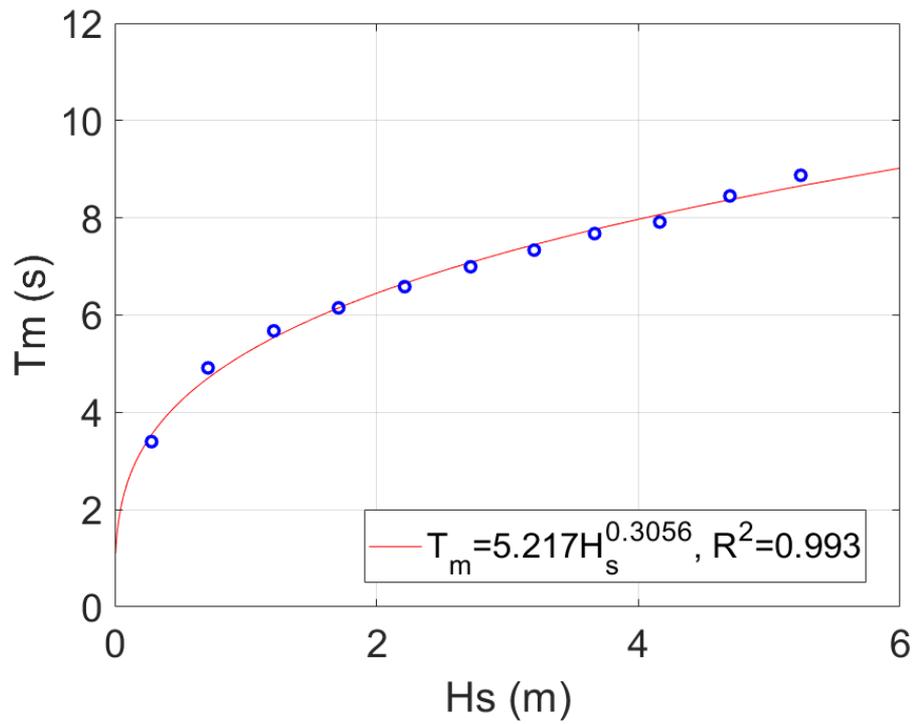


Figura 18: Curva di regressione  $H_s$ - $T_m$  per il nodo al largo dell'Isola di Santo Stefano

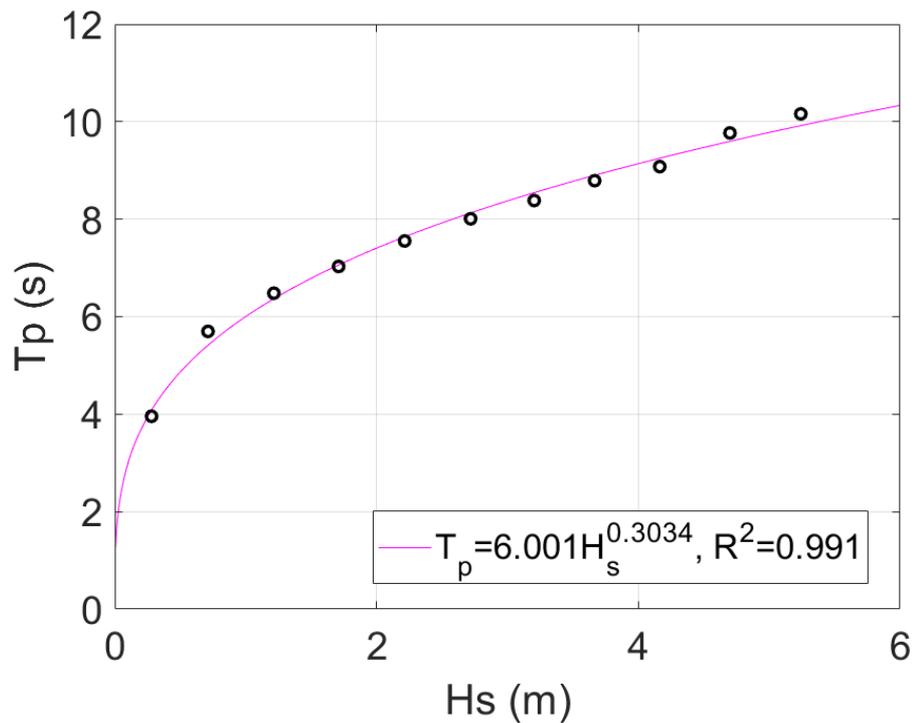


Figura 19: Curva di regressione  $H_s$ - $T_p$  per il nodo al largo dell'Isola di Santo Stefano

## 6 Eventi estremi di moto ondoso al largo (onde di progetto)

Al fine di verificare la stabilità delle opere marittime, è necessario conoscere l'onda di progetto, ossia quel valore dell'altezza d'onda che non sia superato in lunghi periodi di tempo. Ricorrendo a metodi propri dell'analisi probabilistica, la stima dell'altezza d'onda massima probabile è stata condotta secondo il seguente approccio:

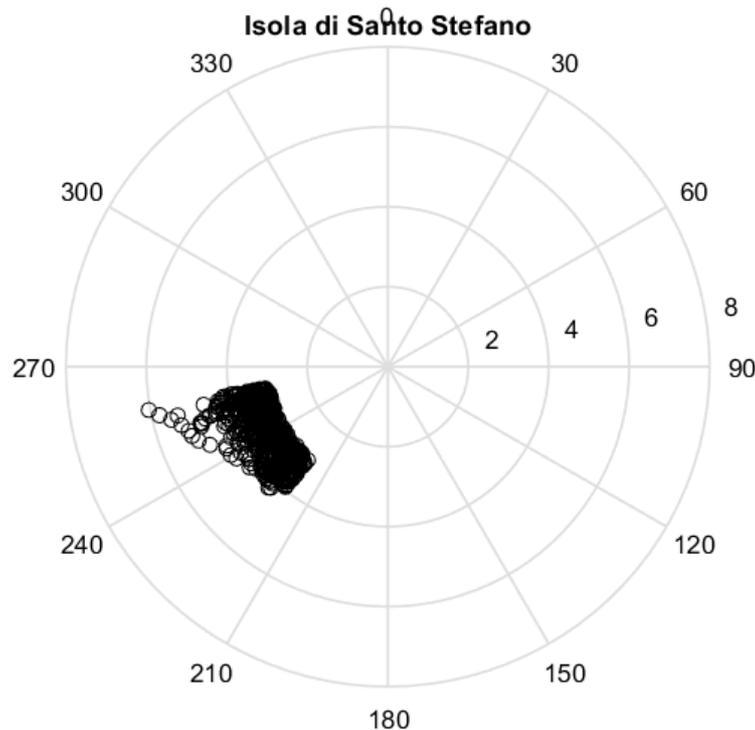
- definizione dell'evento (eccedenze o massimi e quindi il livello di soglia o l'intervallo temporale);
- scelta della distribuzione probabilistica rappresentativa degli eventi statistici (campione degli eventi);
- valutazione del numero degli eventi nella vita presunta dell'opera;
- valutazione della distribuzione di probabilità dell'altezza d'onda massima.

L'individuazione dell'onda di progetto necessita la conoscenza delle caratteristiche delle mareggiate che si sono verificate nel paraggio considerato. L'approccio probabilistico porta alla determinazione di un valore di altezza significativa,  $H_s$ , in funzione del periodo di ritorno,  $T$ . Il periodo di registrazione dei dati di moto ondoso di input, ovvero quelli relativi ai 41 anni di dati dedotti dal nodo ERA5, risulta affidabile per la determinazione degli eventi estremi aventi tempi di ritorno elevati, cioè pari a circa 3 volte la durata degli anni di osservazione (onde di progetto associate ad un valore massimo di  $T$  pari a 123 anni).

Partendo pertanto dalle serie storiche dei dati di moto ondoso trasposti al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano (dai dati del nodo ERA5) riguardanti le altezze d'onda significative e la loro direzione di provenienza, è stata effettuata un'operazione di "estrazione" dalla popolazione dei dati, volta alla determinazione di un campione di eventi (altezze massime al culmine della mareggiata) omogenei e statisticamente indipendenti.

A tal fine, è stato assunto che l'agitazione della superficie libera possa essere considerata una mareggiata quando l'altezza significativa supera una determinata soglia, sulla base delle analisi delle mareggiate osservate per le boe italiane della RON (Corsini et al., 2002; Cavalieri et al., 2004), per un periodo di tempo significativo, considerato almeno di durata pari a 6 ore, e quando le direzioni di provenienza degli stati di mare rimangano confinati entro un settore angolare di massimo  $30^\circ$  (Corsini et al., 2002). La durata della mareggiata è quindi individuata da sei attraversamenti della soglia, mentre la misura della sua intensità è data dalla massima altezza d'onda significativa verificatasi in tale durata. La direzione di provenienza della mareggiata viene posta pari alla direzione media registrata durante l'evento. Sulla base dell'indicazione dell'Atlante delle onde nei mari italiani dell'APAT (Corsini et al., 2002), è stata fissata una soglia di altezza d'onda significativa relative a 5 settori direzionali di riferimento, definiti nel settore di traversia in esame

(Isola di Santo Stefano). In particolare,  $H_{s\text{oglia}} = 3$  m per i settori  $0^\circ - 30^\circ\text{N}$ ,  $30^\circ - 70^\circ\text{N}$ ,  $220^\circ - 260^\circ\text{N}$ ,  $310^\circ - 340^\circ\text{N}$  e  $340^\circ - 360^\circ\text{N}$ . I settori angolari  $0^\circ - 30^\circ\text{N}$ ,  $30^\circ - 70^\circ\text{N}$ ,  $310^\circ - 340^\circ\text{N}$  e  $340^\circ - 360^\circ\text{N}$  non presentano eventi di mareggiata. Pertanto, l'analisi degli eventi estremi sarà condotta per il solo settore angolare  $220^\circ - 260^\circ\text{N}$ .



**Figura 20: Diagramma polare delle altezze d'onda significative massime al culmine della mareggiata in funzione della direzione media di provenienza al largo dell'Isola di Santo Stefano (dai dati ERA5)**

Al fine di determinare le altezze d'onda significative a prefissato tempo di ritorno  $T$ , si fa riferimento al metodo di Goda (1988), basato sulle seguenti ipotesi:

- tutte le altezze d'onda significative del campione provengono da una singola popolazione statistica di eventi di mareggiate;
- le altezze d'onda di una mareggiata sono ragionevolmente rappresentate dall'altezza significativa;
- le altezze d'onda estreme facenti parte del campione non sono limitate da qualche fattore fisico, come ad esempio la profondità in acque intermedie o basse.

In particolare, Goda considera le seguenti funzioni di distribuzione a lungo termine:

- $F(H_s \leq \hat{H}_s) = e^{-e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)}}$  distribuzione di Fisher-Tippet I (FT-I o Gumbel)

- $F(H_s \leq \hat{H}_s) = 1 - e^{-e^{-\left(\frac{\hat{H}_s - B}{A}\right)^k}}$  distribuzione di Weibull

dove:

$F(H_s \leq \hat{H}_s)$  è la probabilità che  $H_s$  non superi il valore di soglia di altezza significativa,  $\hat{H}_s$  (in questo caso posto uguale a 3 m);

$B$  è il parametro del sito;

$A$  è il parametro di scala;

$k$  è il parametro di forma.

Il valore di  $k$  viene posto pari a 0.75, 1.00, 1.40 e 2.00. Al variare di tale coefficiente, si esaminano quindi 4 differenti distribuzioni a lungo termine di Weibull.

Il primo passo relativo all'applicazione della metodologia consiste nel prendere i valori di altezza d'onda significativa di input e posizzarli in ordine decrescente. A ogni valore di  $H_s$  viene assegnata una probabilità (plotting position) secondo le espressioni:

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.44}{NT + 0.12} \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I})$$

$$F(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.20 - \frac{0.27}{\sqrt{k}}}{NT + 0.20 + \frac{0.23}{\sqrt{k}}} \quad (\text{secondo la Weibull})$$

in cui:

$F(H_s \leq H_{sm})$  rappresenta la probabilità che l' $m$ -esima altezza significativa non venga superata;

$H_{sm}$  è l' $m$ -esimo valore del campione delle altezze significative;

$m$  (livello del valore dell'altezza significativa) = 1, 2, ..., N, in cui N rappresenta il numero totale delle mareggiate;

$NT$  è il numero totale degli eventi durante la lunghezza della serie storica considerata.

I coefficienti ottimali della distribuzione Fisher-Tippet I (o di Gumbel) i coefficienti della plotting position sono stati ottenuti da Grigorten (1963), mentre quelli relativi alla distribuzione di Weibull sono stati ottenuti da Goda (1988).

Per tutte e 5 le distribuzioni (FT-I e Weibull con  $k = 0.75, 1.00, 1.40$  e  $2.00$ ), sono stati considerati gli eventi a partire da un valore di soglia  $\hat{H}_s$ , fissato pari a 3 m o 4 m, a secondo del settore direzionale estremo

selezionato. I parametri  $A$  e  $B$  vengono determinati verificando l'adattabilità ai dati delle 5 funzioni, attraverso un'analisi di regressione lineare effettuata con il metodo dei minimi quadrati. I calcoli sono basati sull'analisi di regressione lineare della relazione:

$$H_{sm} = \hat{A}y_m + \hat{B}$$

dove  $y_m$  (variabile ridotta) si calcola trasformando logaritmicamente le espressioni delle probabilità di non superamento,  $F(H_s \leq H_{sm})$ , ottenendo per le due distribuzioni selezionate:

$$y_m = -\ln[-\ln F(H_s \leq H_{sm})] \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I})$$

$$y_m = \{-\ln[1 - F(H_s \leq H_{sm})]\}^{1/k} \quad (\text{secondo la Weibull})$$

I valori di  $\hat{A}$  e  $\hat{B}$  rappresentano, rispettivamente, i parametri di scala e di sito ricavati dall'analisi di regressione lineare.

Per la selezione della funzione di distribuzione che meglio si adatta al campione dei dati in esame, con riferimento alle mareggiate afferenti ai diversi settori angolari di provenienza del moto ondoso al largo del paraggio in esame, si considera quella che fornisce l'alto valore del coefficiente di correlazione,  $R^2$ . In Tabella 7 vengono mostrati, per il paraggio al largo dell'Isola di Santo Stefano, i valori dei coefficienti di correlazioni per le distribuzioni di probabilità adottate, evidenziando quelle distribuzioni che forniscono il valore più elevato di  $R^2$ . Tali distribuzioni probabilistiche verranno considerate ai fini della determinazione delle altezze d'onda significative a prefissato tempo di ritorno. In particolare, per il solo settore angolare analizzato,  $220^\circ$ - $260^\circ$ N, si considera la distribuzione di Weibull con  $k = 1$ .

| Settore $220^\circ$ - $260^\circ$ |              |
|-----------------------------------|--------------|
| Distribuzione                     | $R^2$        |
| Gumbel                            | 0.981        |
| Weibull $k=0.75$                  | 0.939        |
| <b>Weibull <math>k=1</math></b>   | <b>0.986</b> |
| Weibull $k=1.4$                   | 0.985        |
| Weibull $k=2$                     | 0.949        |

**Tabella 7: Coefficienti di correlazione per le distribuzioni di probabilità adottate al largo dell'Isola di Santo Stefano (dai dati ERA5)**

Successivamente, i valori dell'altezza d'onda significativa per differenti periodi di ritorno sono calcolati, per le funzioni di probabilità considerate, mediante la seguente espressione:

$$H_{sr} = \hat{A}y_r + \hat{B}$$

dove:

$$y_r = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{\lambda T}\right)\right] \quad (\text{secondo la Fisher-Tippet I});$$

$$y_r = [\ln(\lambda T)]^{1/k} \quad (\text{secondo la Weibull});$$

$H_{sr}$  rappresenta l'altezza d'onda significativa, associata ad un periodo di ritorno  $T$ ;

$\lambda$  (numero medio degli eventi per anno) =  $NT / K$ ;

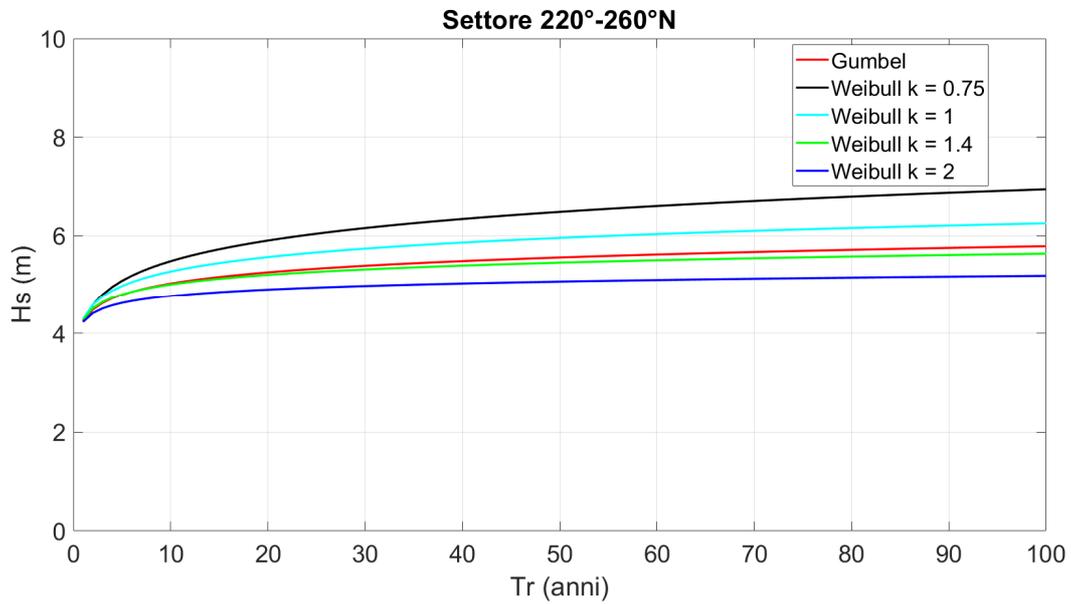
$K$  (lunghezza della registrazione dei dati di moto ondoso).

Per i periodi di ritorno più significativi, relativi a  $T = 10, 25, 50, 100, 150$  e  $200$  anni sono mostrati in Tabella 8 i valori di  $H_s$  a prefissato tempo di ritorno e i rispettivi valori di periodo medio,  $T_m$ , e di periodo di picco,  $T_p$ , ottenuti sulla base delle correlazioni altezze-periodi precedentemente determinate.

| Settore 220°-260° |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|
| T (anni)          | Hs (m) | Tm (s) | Tp (s) |
| 10                | 5.27   | 8.67   | 11.56  |
| 25                | 5.66   | 8.86   | 11.63  |
| 50                | 5.95   | 9.00   | 11.69  |
| 100               | 6.25   | 9.13   | 11.74  |
| 150               | 6.42   | 9.21   | 11.77  |
| 200               | 6.54   | 9.26   | 11.79  |

**Tabella 8: Eventi estremi direzionali a prefissato tempo di ritorno al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano (dai dati ERA5)**

La Figura 21 mostra gli andamenti delle altezze d'onda significative in funzione del periodo di ritorno per le 5 distribuzioni probabilistiche utilizzate. I valori di altezza d'onda significativa presi in considerazione sono, come esposto in precedenza, quelli relativi alla distribuzione probabilistica che offre il maggior valore del grado di correlazione fra la variabile ridotta e l'altezza d'onda significativa al culmine della mareggiata.



**Figura 21: Variazione dell'altezza significativa, Hs (m), in funzione del periodo di ritorno per differenti settori direzionali al largo del paraggio dell'Isola di Santo Stefano (dai dati ERA5)**