



Autorità di Sistema Portuale
dei Mari Tirreno Meridionale
e Ionio

**REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO
DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL
RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE
CIG: 945919784C - CUP: F11J18000050005**

PROGETTO DEFINITIVO

GRUPPO DI PROGETTAZIONE INDICATO

Mandataria:



Mandanti:



Ing. Arturo VELTRI

Progettazione:

HYSOMAR - Ing. Alberto BORSANI (Coordinatore e responsabile delle Integrazioni Specialistiche)
HYSOMAR - (Progettazione generale e marittima)
HYPRO - (Progettazione strutturale, impiantistica, paesaggistica ed ambientale)
Ing. Arturo VELTRI - (Modelli specialistici)

Geologia:

HYPRO - Dott. Giuseppe CERCHIARO

Coordinatore della Sicurezza in fase di Progettazione:

HYSOMAR - Ing. Antonella PASTORE (Coordinamento sicurezza in fase di progettazione)

Gruppo di lavoro:

Ing. Gianluigi FILIPPO (HYSOMAR)
Geom. Alfredo VOMMARO (HYSOMAR)
Ing. Maurizio CARUSO (HYPRO)
Ing. Raffaele CIARDULLO (HYPRO)
Ing. Vincenzo SECRETI (HYPRO)



Appaltatore:

FRANCO GIUSEPPE s.r.l



Elaborato:

STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

CODIFICA

Al 12 - 2022

CODICE DOCUMENTO

1 0,2 S,P R,H 0,2

REV.

0

SCALA

ELABORATO

02.SP.R02

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Giugno 2023	1° EMISSIONE	A. VELTRI	A. PASTORE	A. BORSANI

Visto:

Il Responsabile Unico del Procedimento

Ing. Maria Carmela DE MARIA

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

SOMMARIO

PREMESSA	2
1. ANALISI DEI DATI ONDAMETRICI	3
1.1. Moto ondoso a largo.....	4
1.2. Fetch geografici ed efficaci.....	1
1.3. Correlazioni periodo-altezza d’onda	6
1.4. Propagazione del moto ondoso sottocosta	8
1.5. Clima meteomarino medio sotto costa	25
1.6. Eventi estremi di moto ondoso al largo e sottocosta (onde di progetto)	35
1.7. Flusso energetico del moto ondoso sottocosta	48

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

PREMESSA

Il progetto definitivo presenta tra gli elaborati lo studio meteomarino a firma del Dott. Ing. Guiducci. Suddetto studio ha utilizzato i dati della boa fino alla data della sua redazione (novembre 2008).

Visto che la boa di Crotona ha continuato a funzionare fino al 2014 si è deciso di aggiornare lo studio meteomarini con gli ultimi dati disponibili. Un maggior numero di anni di registrazione permette un corretto calcolo probabilistico per la determinazione delle onde di progetto.

1. ANALISI DEI DATI ONDAMETRICI

Il presente studio riguarda la modellazione del clima meteomarino al largo e sottocosta del paraggio di Crotona.

La corretta determinazione delle onde che investono un paraggio rappresenta una base fondamentale nella progettazione delle opere marittime e per una corretta conoscenza della dinamica evolutiva di un litorale. Ai fini di un corretto dimensionamento delle opere per il porto vecchio di Crotona risulta essenziale la definizione di un clima meteomarino medio sottocosta, in prossimità della zona dei frangenti e di un clima meteomarino estremo, per la caratterizzazione delle onde di progetto ai fini del dimensionamento delle opere.

La prima parte dello studio è relativa alla selezione della boa ondometrica, da cui poter effettuare le analisi delle registrazioni delle serie temporali delle grandezze del moto ondoso (altezza, periodo e direzione di provenienza). In particolare, i dati ondometrici vengono opportunamente filtrati da registrazioni errate e classificati per classi di altezza significativa e settori direzionali di provenienza del moto ondoso.

Inoltre, vengono 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 propagate da largo a sottocosta, con particolare attenzione alla batimetria -10 m, in modo da quantificare precisamente gli effetti della batimetria sull'evoluzione delle grandezze del moto ondoso. La propagazione delle onde viene effettuata attraverso un modello numerico, basato sull'evoluzione spaziale dello spettro d'energia del moto ondoso, che tiene conto degli effetti di shoaling, rifrazione, trasmissione, diffrazione e frangimento.

Sulla base del clima meteomarino al largo, vengono determinate le mareggiate che hanno investito il paraggio di Crotona e viene 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 a livello

progettuale, viene infine effettuata la propagazione delle onde di progetto fino a sottocosta, ai fini del dimensionamento delle opere di difesa costiera.

1.1. Moto ondosso a largo

La caratterizzazione del moto ondosso al largo di Crotona è stata effettuata a partire dall'analisi delle serie storiche registrate dagli ondometri del Tirreno Centro Meridionale della Rete Ondametrica Nazionale (RON) del Sistema Idrografico e Mareografico Nazionale, aventi una sufficiente serie storica di dati e un'esposizione del paraggio simile a quella di Crotona, oggetto del presente studio. In particolare, è stato preso in esame l'ondometro ormeggiato al largo di Crotona.

Lo scopo dell'analisi delle serie storiche dell'ondometro è rivolta a effettuare una modellazione del clima ondosso con una serie di dati più ampia possibile. La boa di Crotona è del tipo Datawell Directional Waverider MKII e registra i dati di moto ondosso a partire dal febbraio del 1999 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Essa è posizionata nel punto di coordinate geografiche pari a: Latitudine 39° 29' 28" e Longitudine 15° 52' 16". Allo stato attuale, le registrazioni a disposizione della boa di Crotona coprono il periodo luglio 1989 – dicembre 2014, che risulta la serie storica attualmente disponibile e, allo stesso tempo, sufficiente per la definizione di un clima meteomarino e per un successivo studio di dinamica costiera di un paraggio. L'unica limitazione nel considerare gli eventi ondosi provenienti da Crotona è legata alla discontinuità temporale degli anni di misurazione, infatti, vi sono diversi buchi nella serie temporale. Pertanto, nell'analisi degli eventi estremi a prefissato periodo di ritorno, occorre essere cauti nella valutazione delle altezze d'onda significative, H_s , con elevati tempi di ritorno, T .

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA



Figura 1.1 - Boa Datawell Directional Waverider (ondametro di Crotone)

Per la definizione del clima ondoso al largo di Crotone, sono state effettuate le elaborazioni dei dati a partire dalle serie storiche degli ondometri RON che riportano, con cadenza temporale trioraria, altezza d'onda significativa, periodo di picco dello spettro, periodo medio, direzione media di propagazione, temperatura dell'acqua, densità spettrale, direzione media spettrale di propagazione, curtosi, skewness e spread. I dati meteomarini della boa in esame sono stati acquisiti presso il sito www.idromare.it, previa opportuna registrazione.

La durata dello stato di mare per la definizione delle grandezze di cui sopra è pari a circa 20 minuti. I dati delle serie storiche vengono acquisiti normalmente per un periodo di 30 minuti ogni tre ore e con intervalli inferiori nel caso di mareggiate particolarmente significative. In alternativa, le serie storiche vengono fornite agli utenti attraverso appositi bollettini ondametrici trimestrali nel seguente formato:

1992 1 1 0 00 70 40 36 133

1992 1 1 3 00 60 43 36 135

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

1992 1 1 6 00 80 50 39 142

1992 1 1 9 00 70 53 36 179

dove:

la 1^a colonna rappresenta l'anno;la 2^a colonna rappresenta il mese;la 3^a colonna rappresenta il giorno;la 4^a colonna rappresenta l'ora;la 5^a colonna rappresenta una colonna vuota;la 6^a colonna rappresenta l'altezza d'onda significativa (cm);la 7^a colonna rappresenta il periodo di picco (10^{-1} s)l'8^a colonna rappresenta il periodo medio (10^{-1} s)la 9^a colonna rappresenta la direzione media di provenienza (°N).

La serie storica dei dati ondametrici registrati dall'ondametro di Crotona è stata sottoposta a opportuna validazione, attraverso l'eliminazione degli eventi non registrati dalla boa e gli 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 della boa in esame;
- Eliminazione dei dati non registrati della 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;

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore del periodo di picco T_p , 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° , il dato ondametrico 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 ondametrica a causa del malfunzionamento momentaneo della boa.

Una volta effettuati questi controlli, le osservazioni ondametriche 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° (vedi Tabella 1 e Figura 2).

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)													TOTALE
		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	5.75-6.25	
Dir (°N)															
0	10	104.00	910.00	1063.00	837.00	376.00	135.00	38.00	20.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3486
10	20	151.00	1601.00	1426.00	626.00	192.00	78.00	17.00	6.00	1.00	2.00	0.00	0.00	0.00	4100
20	30	186.00	1756.00	832.00	250.00	92.00	20.00	9.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3150
30	40	270.00	1517.00	391.00	104.00	45.00	9.00	2.00	2.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	2341
40	50	327.00	1260.00	191.00	73.00	28.00	11.00	8.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1899
50	60	366.00	955.00	143.00	52.00	24.00	8.00	4.00	1.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	1555
60	70	360.00	780.00	120.00	53.00	30.00	17.00	5.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1367
70	80	416.00	601.00	100.00	59.00	20.00	18.00	8.00	2.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1225
80	90	420.00	469.00	125.00	52.00	32.00	15.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1117
90	100	377.00	533.00	133.00	65.00	37.00	11.00	7.00	5.00	3.00	4.00	0.00	0.00	0.00	1175
100	110	422.00	536.00	159.00	95.00	51.00	17.00	12.00	4.00	3.00	2.00	1.00	0.00	0.00	1302
110	120	449.00	598.00	213.00	117.00	92.00	38.00	29.00	5.00	4.00	5.00	6.00	3.00	0.00	1559
120	130	457.00	744.00	312.00	197.00	172.00	105.00	80.00	38.00	20.00	15.00	8.00	4.00	3.00	2155
130	140	504.00	994.00	482.00	299.00	159.00	149.00	85.00	46.00	34.00	18.00	8.00	4.00	0.00	2783
140	150	579.00	1137.00	557.00	326.00	212.00	117.00	52.00	29.00	16.00	3.00	2.00	0.00	0.00	3030
150	160	651.00	1424.00	721.00	384.00	172.00	66.00	35.00	12.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	3467
160	170	728.00	2031.00	871.00	335.00	108.00	30.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	4107
170	180	698.00	2653.00	998.00	352.00	60.00	4.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	4767
180	190	437.00	2295.00	777.00	178.00	21.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3712
190	200	181.00	1192.00	338.00	61.00	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1780
200	210	48.00	410.00	71.00	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	535
210	220	9.00	75.00	11.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	97
220	230	9.00	22.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33
230	240	9.00	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20
240	250	4.00	6.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11
250	260	6.00	6.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13
260	270	10.00	7.00	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23
270	280	2.00	4.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7
280	290	5.00	3.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

290	300	7.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9
300	310	6.00	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14
310	320	4.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9
320	330	9.00	13.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25
330	340	12.00	18.00	5.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36
340	350	11.00	59.00	22.00	9.00	19.00	12.00	6.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	139
350	360	42.00	217.00	241.00	233.00	168.00	72.00	35.00	10.00	4.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1023
TOTALE		8276	24852	10314	4766	2118	939	437	189	91	58	25	11	3	1	52080

Tabella 1: Numero di apparizioni del moto ondoso al largo di Crotone

Gli eventi caratterizzati da $H_s < 0.25$ m sono stati considerati come calme. Dall'analisi della Tabella 1 si osserva come gli eventi di moto ondoso caratterizzati da elevati valori di altezza d'onda significativa risultano essere compresi nei settori direzionali provenienti prevalentemente da Est (110° - 120° N, 120° - 130° N e 130° - 140° N). I dati di moto ondoso al largo di Crotone sono stati ulteriormente elaborati per le succitate classi d'altezza significativa e settori direzionali di provenienza del moto ondoso, determinando per ciascuno di essi la frequenza semplice di apparizione delle onde (vedi Tabella 2).

Gli stessi risultati ottenuti dai dati di boa di Crotone sono riportati attraverso un istogramma (Figura 1.2), in cui le calme ($H_s < 0.25$ m) sono state separate dagli eventi di moto ondoso ($H_s > 0.25$ m).

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE
PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

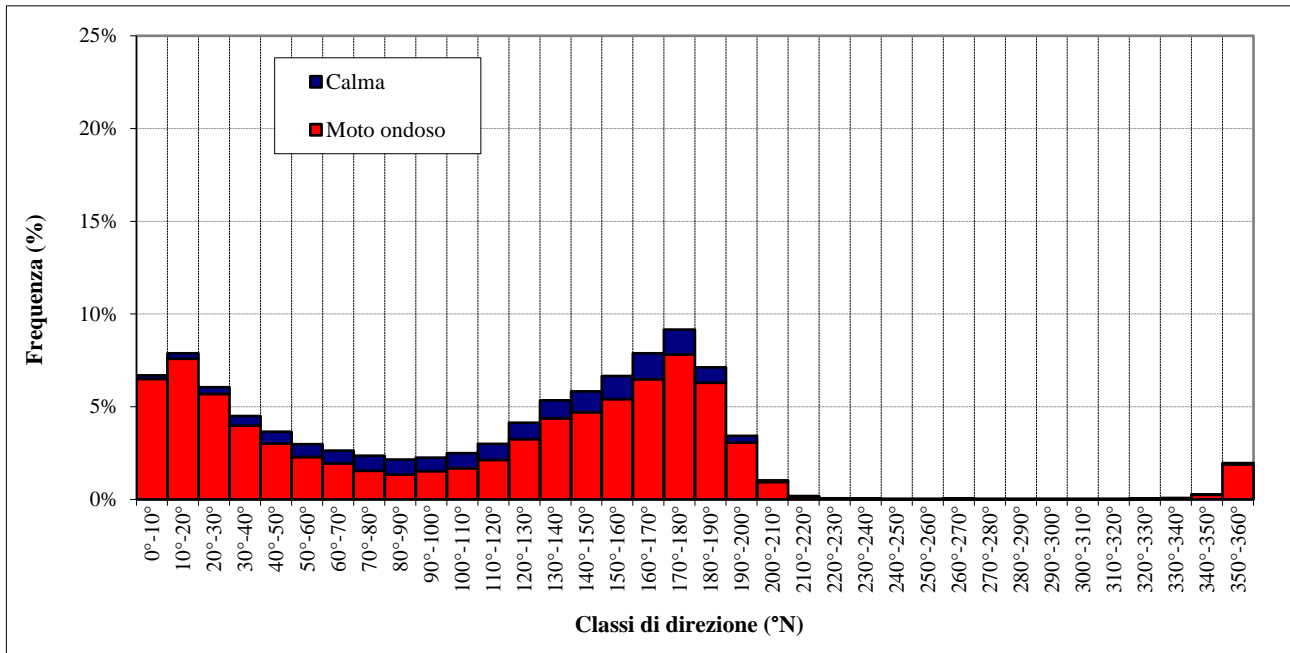


Figura 1.2 - Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Crotone

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)														TOTALE
		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	5.75-6.25	6.25-6.75	
Dir (°N)																
0	10	0.200%	1.747%	2.041%	1.607%	0.722%	0.259%	0.073%	0.038%	0.006%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	6.694%
10	20	0.290%	3.074%	2.738%	1.202%	0.369%	0.150%	0.033%	0.012%	0.002%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	7.873%
20	30	0.357%	3.372%	1.598%	0.480%	0.177%	0.038%	0.017%	0.010%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	6.048%
30	40	0.518%	2.913%	0.751%	0.200%	0.086%	0.017%	0.004%	0.004%	0.000%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	4.495%
40	50	0.628%	2.419%	0.367%	0.140%	0.054%	0.021%	0.015%	0.000%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	3.646%
50	60	0.703%	1.834%	0.275%	0.100%	0.046%	0.015%	0.008%	0.002%	0.000%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.986%
60	70	0.691%	1.498%	0.230%	0.102%	0.058%	0.033%	0.010%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.625%
70	80	0.799%	1.154%	0.192%	0.113%	0.038%	0.035%	0.015%	0.004%	0.000%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.352%
80	90	0.806%	0.901%	0.240%	0.100%	0.061%	0.029%	0.008%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.145%
90	100	0.724%	1.023%	0.255%	0.125%	0.071%	0.021%	0.013%	0.010%	0.006%	0.008%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.256%
100	110	0.810%	1.029%	0.305%	0.182%	0.098%	0.033%	0.023%	0.008%	0.006%	0.004%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	2.500%
110	120	0.862%	1.148%	0.409%	0.225%	0.177%	0.073%	0.056%	0.010%	0.008%	0.010%	0.012%	0.006%	0.000%	0.000%	2.993%
120	130	0.877%	1.429%	0.599%	0.378%	0.330%	0.202%	0.154%	0.073%	0.038%	0.029%	0.015%	0.008%	0.006%	0.000%	4.138%
130	140	0.968%	1.909%	0.925%	0.574%	0.305%	0.286%	0.163%	0.088%	0.065%	0.035%	0.015%	0.008%	0.000%	0.002%	5.344%
140	150	1.112%	2.183%	1.070%	0.626%	0.407%	0.225%	0.100%	0.056%	0.031%	0.006%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	5.818%
150	160	1.250%	2.734%	1.384%	0.737%	0.330%	0.127%	0.067%	0.023%	0.002%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	6.657%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

160	170	1.398%	3.900%	1.672%	0.643%	0.207%	0.058%	0.002%	0.002%	0.002%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	7.886%
170	180	1.340%	5.094%	1.916%	0.676%	0.115%	0.008%	0.000%	0.000%	0.000%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	9.153%
180	190	0.839%	4.407%	1.492%	0.342%	0.040%	0.008%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	7.127%
190	200	0.348%	2.289%	0.649%	0.117%	0.015%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	3.418%
200	210	0.092%	0.787%	0.136%	0.012%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	1.027%
210	220	0.017%	0.144%	0.021%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.186%
220	230	0.017%	0.042%	0.000%	0.000%	0.000%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.063%
230	240	0.017%	0.021%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.038%
240	250	0.008%	0.012%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.021%
250	260	0.012%	0.012%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.025%
260	270	0.019%	0.013%	0.012%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.044%
270	280	0.004%	0.008%	0.000%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.013%
280	290	0.010%	0.006%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.017%
290	300	0.013%	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%	0.017%
300	310	0.012%	0.015%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.027%
310	320	0.008%	0.010%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.017%
320	330	0.017%	0.025%	0.006%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.048%
330	340	0.023%	0.035%	0.010%	0.000%	0.000%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.069%
340	350	0.021%	0.113%	0.042%	0.017%	0.036%	0.023%	0.012%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.267%
350	360	0.081%	0.417%	0.463%	0.447%	0.323%	0.138%	0.067%	0.019%	0.008%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	1.964%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

TOTALE	15.891%	47.719%	19.804%	9.151%	4.067%	1.803%	0.839%	0.363%	0.175%	0.111%	0.048%	0.021%	0.006%	0.002%	100.000%
--------	---------	---------	---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	----------

Tabella 2: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Crotone

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

In Figura 1.3 sono state riportate, sotto forma di diagramma polare, le frequenze di apparizione delle classi di altezza d'onda significativa suddivise in questo caso, per maggiore accuratezza, in settori direzionali di 10°. Gli eventi ondosi aventi $H_s > 4$ m sono stati raggruppati in una stessa classe in modo da avere una visualizzazione grafica più chiara.

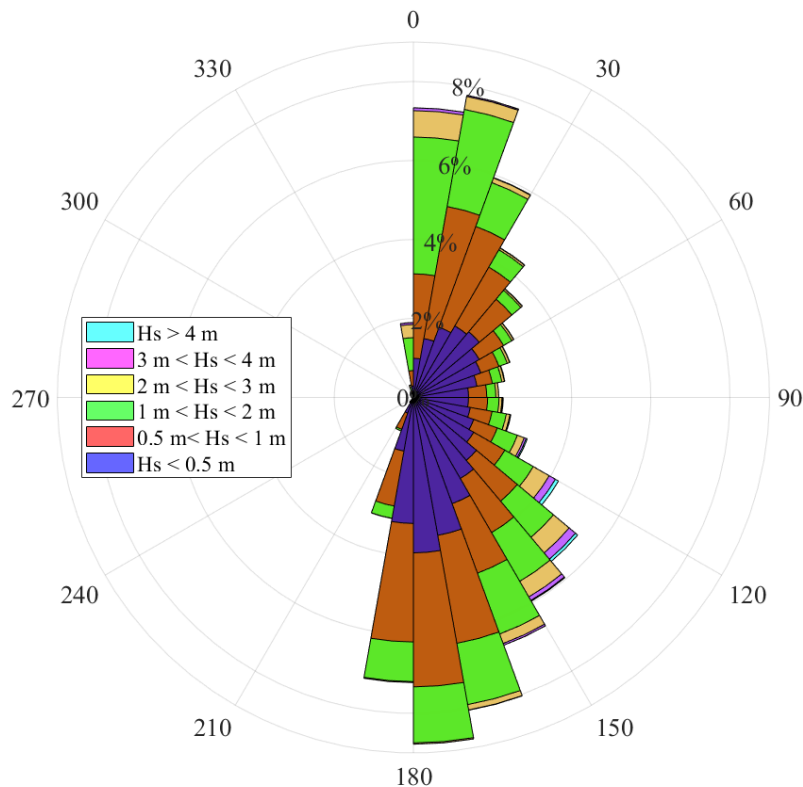


Figura 1.3 - Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso al largo di Crotone

1.2. Fetch geografici ed efficaci

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;

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

- 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 ondametriche;
- propagazione da largo a riva di stati di mare.



Figura 1.4 - Localizzazione della boa ondametrica reale (Crotona)

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

In Figura 5 sono indicati i fetch geografici relativi al transetto costiero di Crotona. In Figura 6 sono invece indicati i fetch efficaci ottenuti per il paraggio di Crotona.

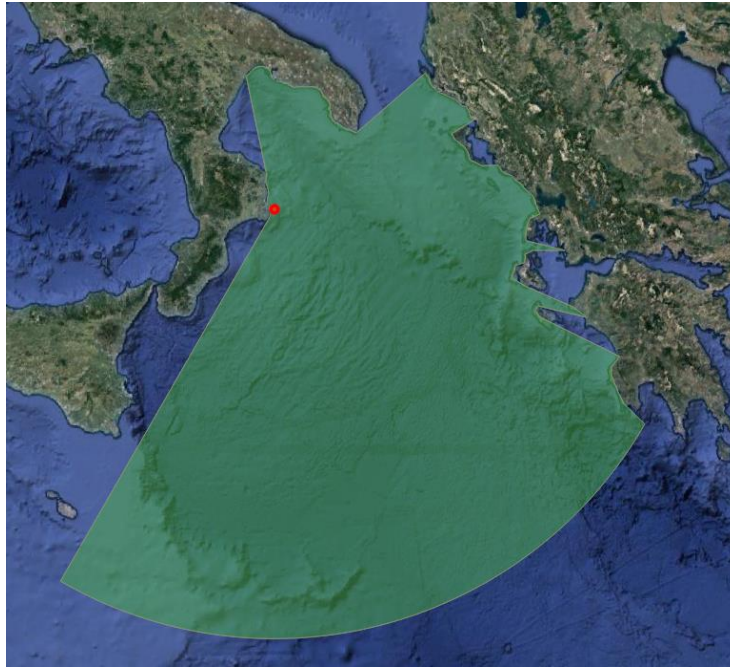


Figura 1.5 - Tracciamento dei fetch geografici per il paraggio di Crotona

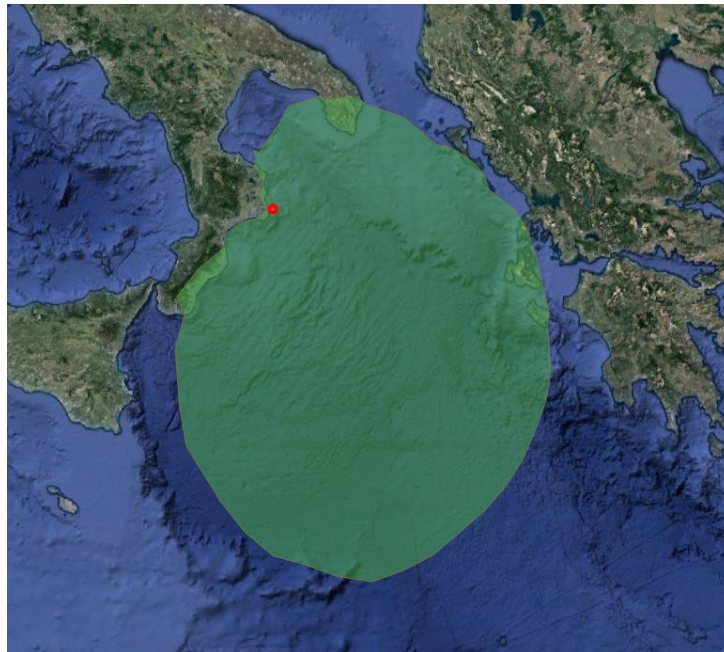


Figura 1.6 - Tracciamento dei fetch efficaci per il paraggio di Crotona

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

Il settore di traversia 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 1.7).

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA



Figura 1.7 - Individuazione del settore di traversia del paraggio di Crotona

Per il paraggio in esame il settore di traversia, sui cui spirano i venti che possono creare significative agitazioni ondose, è compreso tra 350°N e 210°N, per un'ampiezza angolare pari a 220°.

1.3. Correlazioni periodo-altezza d'onda

Partendo ora dall'analisi dei dati di boa di Crotona e per i dati di moto ondoso trasposti al largo del paraggio di Crotona, selezionati per la successiva determinazione del clima meteomarino sottocosta, è stato possibile costruire la correlazione tra l'altezza d'onda significativa a 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 cui corrispondono, sulla base di opportune correlazioni, i valori del periodo.

La formulazione matematica scelta risulta del tipo:

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

dove:

T è il periodo dell'onda, espresso in s;

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

α e β 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

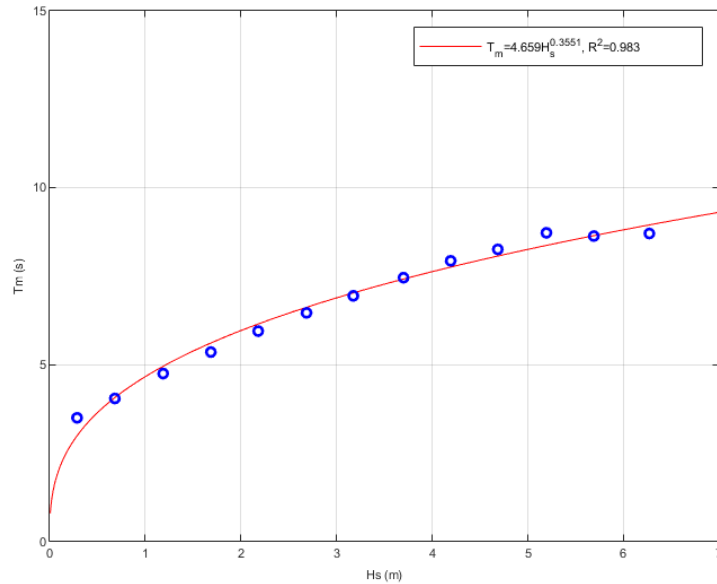
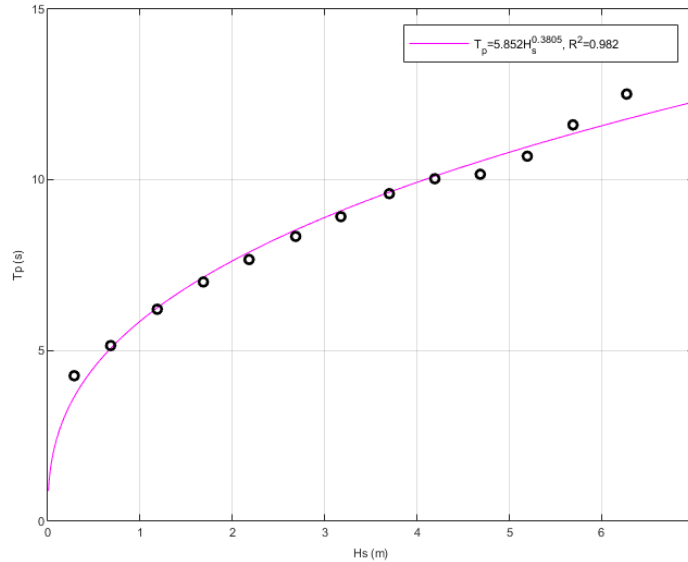
alla i-esima onda come $T_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{s=1}^m T_{sj} * b_s}{m}$, espresso in s.

Una volta calcolato il periodo d'onda T_i per ciascuna altezza d'onda H_{si}, è stata cercata la regressione fra i valori di T_i e i valori di H_{si}. Le elaborazioni effettuate hanno consentito di determinare per i dati di Crotona e per quelli relativi a Crotona differenti valori dei coefficienti di regressione. Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportate,

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

rispettivamente, la regressione fra l'altezza significativa e il periodo medio e fra altezza significativa e il periodo di picco per i dati al largo del paraggio di Crotona.

**Figura 1.8 - Curva di regressione Hs-Tm per Crotona****Figura 1.9 - Curva di regressione Hs-Tp per Crotona**

1.4. Propagazione del moto ondoso sottocosta

La corretta descrizione delle trasformazioni che le onde subiscono in prossimità della costa risulta essere di estrema importanza per la comprensione dei processi di idrodinamica e morfodinamica costiera e per l'eventuale progettazione o verifica di opere marittime a difesa dei litorali.

L'onda, nella sua propagazione da largo verso riva, subisce modifiche di forma, altezza, direzione e celerità. Le caratteristiche delle onde variano a causa di fenomeni quali lo shoaling, la rifrazione, la diffrazione, la riflessione e il frangimento, associati a fenomeni non-lineari dovuti alle interazioni fra le stesse onde e tra le onde e le correnti. Il trasporto di massa liquida legato al frangimento genera inoltre delle correnti che possono avere intensità notevoli e che influiscono in maniera importante sull'evoluzione dei litorali.

La propagazione del clima ondoso da largo verso riva in corrispondenza del paraggio di Crotona è stata effettuata con il modello numerico SWAN, acronimo di Simulating WAVes Nearshore, la cui implementazione è stata sviluppata dal Dipartimento di Meccanica dei Fluidi del Politecnico di Delft (Olanda). Lo SWAN permette di ottenere stime reali dei parametri d'onda in aree costiere, laghi ed estuari una volta note le condizioni del fondo, del vento e delle correnti. In particolare, il modello simula lo sviluppo degli spettri d'onda che viaggiano da acque profonde verso acque poco profonde, come nel caso del moto ondoso che si propaga verso riva.

Nel modello SWAN sono rappresentati i seguenti processi di propagazione d'onda:

- Propagazione lungo lo spazio geografico;
- Rifrazione dovuta a variazioni del fondale marino e della corrente;
- Shoaling dovuto a variazioni del fondale marino e della corrente;
- Bloccaggio e riflessione da parte di correnti in direzione opposta;
- Trasmissione, bloccaggio o riflessione da parte di ostacoli.

Inoltre, nello SWAN vengono rappresentati i seguenti processi di generazione e dissipazione d'onda:

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

- Generazione dovuta al vento;
- Dissipazione dovuta alla rottura in cresta (whitecapping);
- Dissipazione dovuta alla rottura d’onda indotta dalla profondità;
- Dissipazione dovuta all’attrito sul fondo;
- Interazioni onda-onda (quadruple e triple);
- Diffrazione a tergo di ostacoli.

Tale modello può essere utilizzato in condizioni sia stazionarie sia non stazionarie, considerando coordinate sia cartesiane (nel caso di piccole scale) sia sferiche (nel caso di piccole e grandi scale).

Nel modello SWAN le onde sono descritte attraverso la densità d’azione spettrale dell’onda bidimensionale anche quando sono presenti fenomeni non lineari (a esempio nella zona dei frangenti). La ragione fondamentale per l’utilizzo dello spettro anche in condizioni fortemente non lineari è che, anche in tali condizioni, è possibile definire con buona accuratezza la distribuzione spettrale del momento del secondo ordine delle onde (sebbene esso non è sufficiente per descrivere le onde da un punto di vista statistico). Lo spettro utilizzato in SWAN è la densità d’azione spettrale $N(\sigma, \theta)$ anziché la densità di energia spettrale $E(\sigma, \theta)$ poiché, in presenza di correnti, la densità d’azione spettrale viene conservata, mentre non lo è la densità d’energia.

Le variabili indipendenti sono la frequenza relativa σ e la direzione d’onda θ (la direzione normale alla cresta dell’onda di ogni componente spettrale). La densità d’azione è funzione della densità d’energia e della frequenza relativa:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

Nella presente modellazione, l’evoluzione dello spettro d’onda è descritta attraverso la seguente equazione del bilancio d’azione spettrale valida per coordinate cartesiane, che rappresenta l’equazione fondamentale di tutta la teoria dello SWAN:

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial z} c_z N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

In tale equazione il primo termine di sinistra rappresenta la variazione della densità d'azione spettrale rispetto al tempo; il secondo, il terzo e il quarto termine rappresentano la propagazione dell'azione nello spazio geografico (con le velocità di propagazione c_x , c_y e c_z riferite, rispettivamente, alle direzioni x , y e z); il quinto termine rappresenta la variazione della frequenza relativa dovuta alle variazioni di profondità e delle correnti (con la velocità di propagazione c_σ riferita allo spazio delle frequenze σ); il sesto termine, l'ultimo dei termini di sinistra dell'equazione, rappresenta la rifrazione indotta dalla profondità e dalla corrente (con la velocità di propagazione c_θ riferita allo spazio delle direzioni d'onda θ). Le espressioni per descrivere tali velocità di propagazione sono date dalla teoria dell'onda lineare di Stokes al 1° ordine. Il termine S , che è comunque funzione della frequenza e delle direzioni d'onda ($S = f(\sigma, \theta)$), presente nei termini a destra dell'equazione del bilancio d'azione spettrale, rappresenta il termine sorgente rispetto agli effetti della generazione, della dissipazione e delle interazioni non lineari onda-onda.

Se il modello SWAN viene utilizzato per mari con secche o su scala oceanica, l'equazione fondamentale del bilancio d'azione spettrale in coordinate sferiche può essere scritta nella forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_\lambda N + (\cos \varphi)^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} c_\varphi \cdot \cos \varphi \cdot N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma}$$

dove λ rappresenta la longitudine e φ la latitudine.

Nel modello SWAN il trasferimento di energia alle onde da parte del vento viene descritto attraverso un meccanismo di risonanza e un meccanismo di ritorno. Il termine sorgente di tali meccanismi è comunemente descritto come la somma di crescite lineari ed esponenziali, attraverso l'equazione:

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + B \cdot E(\sigma, \theta)$$

dove i coefficienti A e B sono funzione della direzione e della frequenza d'onda e anche della direzione e della velocità del vento.

Gli effetti delle correnti sono descritti nello SWAN attraverso l'utilizzo della velocità e della direzione del vento locale.

Il termine A è descritto attraverso la relazione data da Cavaleri e Malanotte - Rizzoli (1981), mentre per il termine B in tale modello vengono utilizzate due differenti espressioni. La prima è dovuta a Snyder riscalata da Komen in termini di velocità d'attrito U^* . Il coefficiente di resistenza per collegare U^* alla trasmissione della velocità del vento a 10 m d'altezza rispetto al L.M.M., U_{10} , è dato da Wu (1982). La seconda relazione di B è fornita da Janssen (1991) e descrive in modo esplicito l'interazione tra vento e onde considerando gli effetti dello strato limite dell'atmosfera e considerando l'estensione della scabrezza della superficie del mare. Il corrispondente gruppo di equazioni è risolto con una procedura iterativa da Mastenbroek (1993).

La dissipazione di energia dell'onda viene rappresentata dalla somma di tre diversi contributi:

- Whitecapping (fenomeno di rottura nella cresta dell'onda): $S_{ds,w}(\sigma, \theta)$;
- Attrito del fondo: $S_{ds,b}(\sigma, \theta)$;
- Rottura indotta dalla profondità: $S_{ds,br}(\sigma, \theta)$.

Il whitecapping è principalmente controllato dalla ripidezza delle onde. Attualmente, nelle operazioni riguardanti modelli d'onda di terza generazione come lo SWAN, le formule per descrivere il whitecapping sono basate su un modello a impulso (Hansselmann, 1974):

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \cdot \tilde{\sigma} \cdot \frac{k}{\tilde{k}} \cdot E(\sigma, \theta)$$

dove Γ è un coefficiente dipendente dalla ripidezza dell'onda, k è il numero d'onda mentre \tilde{k} e $\tilde{\sigma}$ indicano rispettivamente una frequenza media e un numero d'onda

medio.

Komen ha stimato il valore di Γ col concludere il bilancio d'energia delle onde in condizioni pienamente sviluppate. Ciò implica che tale valore dipende dalla formula della trasmissione di energia da parte del vento che viene utilizzata. La prima formulazione è dovuta a Komen e viene considerata quando viene utilizzato il coefficiente B di Komen per il vento. La seconda espressione è un adattamento di questa espressione basata su Janssen e viene considerata quando viene utilizzato il coefficiente B di Janssen per il vento. Alcuni studiosi hanno dimostrato che, utilizzando tali formule, i risultati dipendono in maniera critica dalla scelta di un'alta frequenza limite che viene utilizzata per la coda dello spettro.

Un'altra formula utilizzata per la definizione del whitecapping è basata sul Metodo di Ripidezza Aggiuntivo (Cumulative Steepness Method) che viene definito come segue:

$$S_{st}(\sigma, \theta) = \int_0^{\sigma} \int_0^{2\pi} k^2 \cdot |\cos(\theta - \theta')|^m \cdot E(\sigma, \theta) \cdot d\sigma \cdot d\theta$$

dove m è un coefficiente che regola la dipendenza direzionale. Nella computazione, si suppone che tale coefficiente sia pari a 1 se è dominante il meccanismo di deformazione, sia minore di 1 se sono presenti altri meccanismi. Nello SWAN tale valore è posto pari a 0 come default. Ne consegue che la nuova formula per il whitecapping è espressa nella seguente forma:

$$S_{wc}^{st}(\sigma, \theta) = -C_{wc}^{st} \cdot S_{st}(\sigma, \theta) \cdot E(\sigma, \theta)$$

dove C_{wc}^{st} è un coefficiente sintonizzabile.

La dissipazione di energia indotta dalla profondità può essere causata dall'attrito del fondo, dal movimento del fondo, dalla percolazione e dalla dispersione presenti a causa della irregolarità del fondo. Per mari con secche e fondi sabbiosi, il meccanismo dominante sembra essere l'attrito sul fondo, che può essere rappresentato con l'espressione:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \cdot \frac{\sigma^2}{g^2 \cdot \sinh^2(k \cdot d)} \cdot E(\sigma, \theta)$$

dove C_{bottom} rappresenta il coefficiente di attrito del fondo. Per definire tale costante in modo empirico esistono una serie di modelli che danno buoni risultati in molte condizioni differenti, sempre che sia stato scelto il valore opportuno (differente per mari gonfi e ventosi), come a esempio una formulazione non lineare basata sulla resistenza proposta da Hasselmann e Collins (1968), semplificato in seguito da Collins (1972), e una formulazione più complicata caratterizzata da modelli basati sulla viscosità dei vortici, sviluppata da Madsen e Weber (1991). Considerando le ampie variazioni delle condizioni del fondo nelle aree costiere (materiale del fondo, estensione della scabrosità del fondo, altezza delle increspature ecc.) non si può dare preferenza ad alcun modello.

Per questa ragione, nello SWAN sono stati considerati i più semplici di questi modelli: il modello empirico JONSWAP di Hasselmann (1973), il modello di resistenza di Collins (1972) e il modello basato sulla viscosità dei vortici di Madsen (1989).

Il processo della rottura dell'onda indotta dalla profondità è ancora scarsamente compreso e si conosce poco circa la sua modellazione spettrale. Al contrario, la dissipazione totale (a es. integrata su tutto lo spettro) dovuta a questo tipo di rottura dell'onda può essere ben modellata con la dissipazione di un cavallone in un campo casuale. Le osservazioni di laboratorio mostrano come la forma di uno spettro inizialmente unimodale, che si propaga lungo semplici profili di spiaggia, è abbastanza indifferente a tale tipo di rottura. Ciò ha portato alcuni studiosi a formulare una versione spettrale del modello della dissipazione del cavallone che, includendo anche le direzioni, viene descritto nello SWAN nel modo seguente:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} \cdot E(\sigma, \theta)$$

in cui E_{tot} è l'energia totale dell'onda e D_{tot} , valore che risulta negativo, è la stima della dissipazione dell'energia totale dovuta alla rottura dell'onda. Se si aggiunge una dipendenza quadratica sulla frequenza si avrà un evidente effetto sui risultati dati dallo

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

SWAN. IL valore di D_{tot} dipende in modo particolare dal parametro di rottura $\gamma = H_{max}/d$, dove H_{max} è la massima altezza d’onda possibile relativa alla profondità d . Nel modello SWAN è possibile considerare sia un valore costante ($\gamma = 0.73$), sia un valore variabile di tale costante.

SWAN può inoltre stimare l’onda trasmessa oltre una struttura (eventualmente lineare) come un frangiflutti, uno sbarramento. In tal modo, un ostacolo influirà sul campo d’onda in due modi: per prima cosa ridurrà l’altezza d’onda lungo tutto il campo e, poi, causerà la diffrazione vicino ai suoi limiti. In campi d’onda con piccole creste, irregolari, sembra che gli effetti della diffrazione siano trascurabili a eccezione di una zona di estensione non più di una o due lunghezze d’onda posta in prossimità dell’ostacolo. Conseguentemente, il modello può trascurare le onde in prossimità dell’ostacolo se lo spettro direzionale delle onde in arrivo non è troppo limitato. Poiché gli ostacoli hanno un’area trasversale troppo piccola per essere risolta con la griglia di fondo nello SWAN, un ostacolo sarà modellato come una linea. Se la cima del frangiflutti ha un’altezza tale da poter esser superata dalle onde, il coefficiente di trasmissione, K_t , definito come il rapporto tra l’altezza d’onda (significativa) al di sotto dell’ostacolo e l’altezza d’onda (significativa) al di sopra dell’ostacolo, è funzione dell’altezza d’onda e della differenza fra l’altezza dell’ostacolo e il livello dell’acqua.

L’espressione di K_t è fornita da Goda (1967):

$$k_t = 0.5 \cdot \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2\alpha} \cdot \left(\frac{F}{H_i} + \beta \right) \right) \right) \quad \text{per} \quad -\beta - \alpha < \frac{F}{H_i} < \alpha - \beta$$

dove $F = h-d$ è il bordo libero della barriera, H_i è l’altezza d’onda significativa incidente nella zona al di sopra dell’ostacolo, h è l’altezza della cima dell’ostacolo al di sopra del livello di riferimento (come riferimento si può considerare anche il livello del fondo), d è il livello d’acqua medio sempre relativo al riferimento mentre i coefficienti α e β sono funzioni della forma della barriera.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

L'espressione precedente è stata ricavata sperimentalmente considerando solo onde incidenti in direzione normale all'ostacolo. Ne consegue che, poiché non esistono dati disponibili circa onde incidenti in direzione obliqua, si assume che il coefficiente di trasmissione non dipende dalla direzione dell'onda incidente. Un altro fenomeno da considerare è un cambiamento della frequenza dell'onda, dal momento che spesso il processo al di sopra della barriera è fortemente non lineare. Date le poche informazioni in merito, anche in questo caso nello SWAN si assume che le frequenze rimangono immutate anche al di sopra dell'ostacolo.

Per ciò che riguarda le interazioni non lineari fra le diverse onde, in acque profonde le interazioni quaduple onda-onda dominano l'evoluzione dello spettro. Esse trasferiscono l'energia d'onda dal picco dello spettro verso frequenze più basse (spostando in tal modo la frequenza di picco verso valori più bassi) e verso frequenze più elevate (dove l'energia viene dissipata attraverso il fenomeno del whitecapping). In acque poco profonde, invece, le interazioni triple onda-onda trasferiscono l'energia dalle frequenze più basse verso quelle più alte. Il calcolo delle interazioni quaduple viene eseguito dallo SWAN con la Discrete Interaction Approximation (DIA) di Hasselmann (1985), che produce buoni risultati per quanto riguarda la descrizione delle caratteristiche fondamentali dello sviluppo dello spettro d'onda. Il calcolo delle interazioni triple viene eseguito nello SWAN con la Lumped Triad Approximation (LTA), che fornisce ottimi risultati nel descrivere le principali caratteristiche del trasferimento di energia dal principale picco dello spettro alle super-armoniche.

Il primo passo nello studio di propagazione del clima ondoso da largo verso riva con il modello SWAN ha riguardato la preparazione di una griglia di calcolo innestata sulla batimetria in corrispondenza del paraggio di Crotona. La modellazione del fondale marino è stata realizzata sulla base dei rilievi batimetrici della cartografia GEBCO e da rilievi di dettaglio fatti recentemente sotto costa nella zona della spiaggia attiva (emersa e sommersa) del tratto di costa del comune di Crotona interessato dall'intervento, effettuando in seguito un'interpolazione per triangolazione sulle batimetriche rilevate per avere tutti i valori di tutte le profondità nella griglia di calcolo considerata. Al fine di coprire in maniera significativa tutta l'area interessata allo studio meteomarino, è stata

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

utilizzata una prima serie di simulazioni utilizzando una griglia di calcolo rettangolare avente dimensioni 6500 m in lunghezza e di 6900 m in larghezza, avente un numero pari rispettivamente a 260 maglie e 276 maglie, aventi ciascuna dimensioni 25 m x 25 m, che si estendono a partire da profondità di circa 200 m, nella condizione di acque profonde ($d/L > 0.5$) per tutti gli attacchi ondosi, fino a terra.

In Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale in corrispondenza del litorale di Crotona, posizionato a Sud. Sono inoltre evidenziate, con differenti colori, le linee batimetriche determinate.

Sui limiti della griglia di calcolo lato mare (Nord, Sud e Ovest) sono state effettuate le propagazioni del moto ondoso da largo a sottocosta, con particolare attenzione al clima ondoso in corrispondenza di un punto sottocosta rappresentativo del tratto costiero oggetto di studio, posto alla batimetrica -5 m, ai fini della modellazione della dinamica evolutiva del litorale. Le onde propagate con lo SWAN vengono definite da un valore di altezza d'onda, H_s , di periodo di picco, T_p , e di direzione di provenienza rispetto al Nord cartografico ricadenti nel settore di traversia 170° - 290° N del paraggio di Crotona.

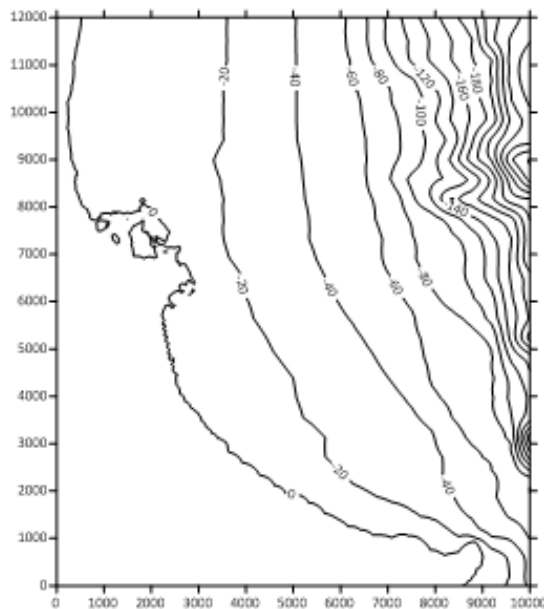


Figura 1.10 - Evidenziazione della griglia di calcolo generale e delle principali batimetriche per il paraggio in esame di Crotona

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

Nelle propagazioni effettuate con lo SWAN è stato utilizzato un classico spettro di tipo Jonswap con γ (coefficiente di picco dello spettro) = 3.3, assumendo un range di direzioni spettrali pari a 180° , una frequenza minima dello spettro $f_1 = 0.01$ Hz e una frequenza massima $f_2 = 0.5$ Hz. Il frangimento del moto ondoso per raggiunto limite di profondità è stato definito nell'input del programma in base al rapporto limite $H_s/d = 0.78$, in cui d è la profondità.

Sulla base delle batimetrie rilevate dalla carta nautica, è stata effettuata una modellazione del fondale marino attraverso un'interpolazione per triangolazione su tutti i nodi della griglia di calcolo.

In Figura 20 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale ($x = 6500$ m e $y = 6900$ m), posizionata in corrispondenza di un'ampia fascia del litorale di Crotona. Sono inoltre evidenziate le principali linee batimetriche determinate attraverso l'analisi delle carte nautiche. Le successive Figure 21 e 22 mostrano invece alcune visualizzazioni 3D della batimetria del fondale marino, con evidenziazione in Figura 22 dell'ampiezza delle mesh quadrate adottate (25 m * 25 m).

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

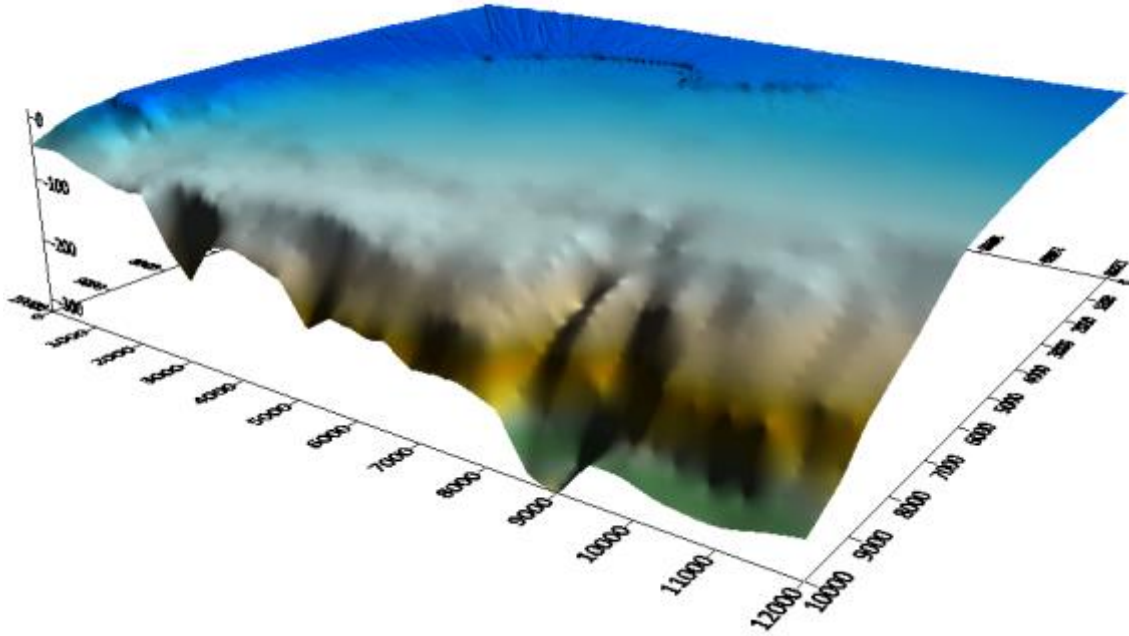


Figura 1.11 - Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale (vista da Nord-Ovest)

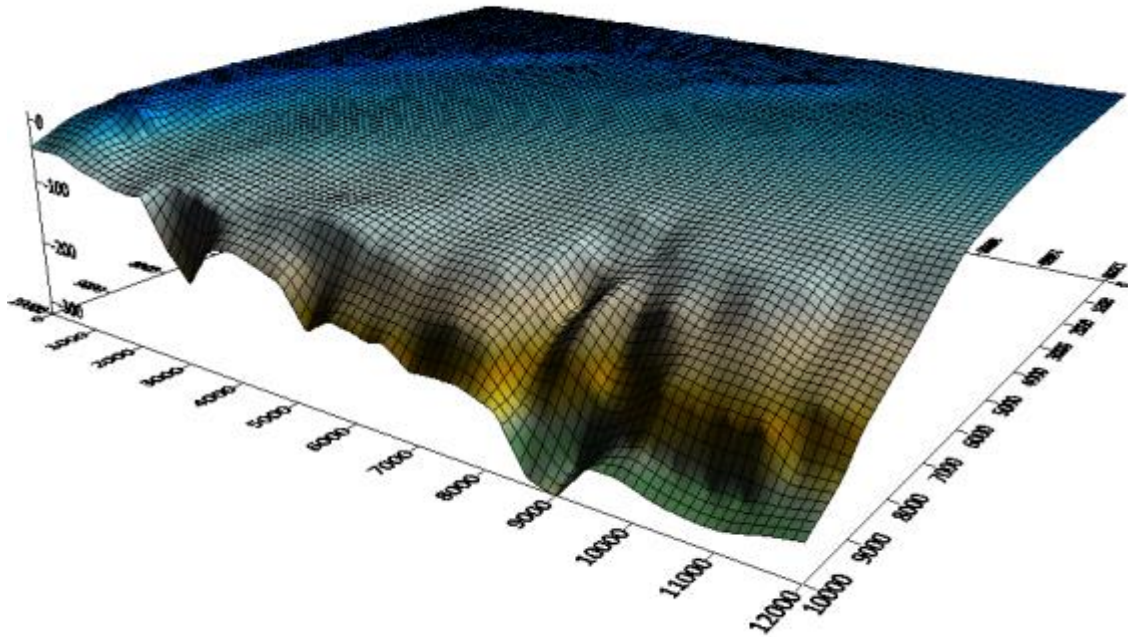


Figura 1.12 - Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale, con evidenziazione delle mesh adottate (vista da Nord)

Nelle successive Figure dalla Fig. 24 alla Fig. 28 sono riportati, a scopo esemplificativo, una serie di grafici relativi ai risultati delle simulazioni effettuate con il modello di propagazione del moto ondoso SWAN da largo a riva nel dominio di calcolo considerato. In particolare, è stato selezionato l'evento ondoso estremo del settore direzionale più significativo, con T (tempo di ritorno) = 50 anni, che risulta un tipico periodo per la progettazione di difese costiere quali barriere frangiflutto e pennelli. Esso è caratterizzato al largo, nella condizione indisturbata di acque profonde ($d/L > 0.5$), dai seguenti valori (vedi paragrafo relativo alla determinazione degli eventi estremi):

- $H_s = 5.61$ m, $T_p = 11.28$ s e $Dir = 125^\circ N$.

Gli output grafici delle simulazioni effettuate sulla griglia generale, avente dimensione 10000 m * 12000 m, fanno riferimento al sistema di coordinate cartesiano xyz , dove x rappresenta la coordinata diretta verso la costa, y la coordinata ortogonale a essa e z la coordinata verticale, diretta lungo la profondità.

In particolare, per l’attacco ondoso considerato i grafici fanno riferimento a:

- profondità del fondale, con indicazione delle linee batimetriche principali (segnalate ogni circa 5 m a partire circa dalla - 200 m) e della linea di riva, comprendente i raggi d’onda, rappresentati come linee di flusso, relativi alla direzione di propagazione del moto ondoso, al fine di evidenziare gli effetti rifrattivi del moto ondoso nella sua propagazione verso riva i vettori per effetto dell’incidenza dei fronti d’onda posti a differenti profondità (Figura 24); in particolare, il valore della direzione del moto ondoso, Dir ($^{\circ}N$), che risulta ortogonale alle creste d’onda, viene calcolata secondo la relazione (Kuyt et al., 1988):

$$Dir = \arctan \left[\frac{\int \sin(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right]$$

dove $E(\sigma, \theta)$ rappresenta la densità spettrale.

- distribuzione spaziale tridimensionale su tutto il dominio di calcolo dell’altezza d’onda significativa, H_s (m), nel sistema di coordinate xyz , al fine di comprendere il fenomeno di abbattimento dell’altezza d’onda per effetto di shoaling e rifrazione a causa della progressiva diminuzione di profondità (Figura 25) il valore di H_s viene determinato dal modello attraverso la relazione:

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

dove $E(\omega, \theta)$ rappresenta la varianza della densità spettrale e ω la frequenza angolare.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa, H_s (m) (Figura 26);
- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo del periodo medio dell'onda, T_m (s) (Figura 27), determinato secondo la relazione:

$$T_m = 2\pi \frac{\iint \omega^{-1} E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo della lunghezza d'onda, L (m) (Figura 28); essa viene valutata secondo la seguente relazione:

$$L = 2\pi \left(\frac{\iint k^p E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint k^{p-1} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right)^{-1}$$

dove il coefficiente p viene solitamente posto pari a 1.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

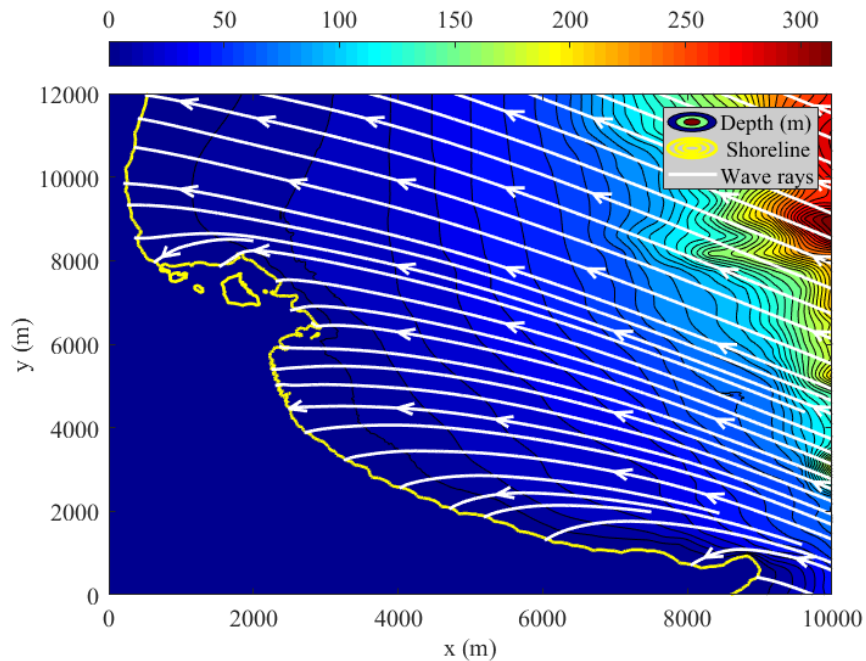


Figura 1.13 - Profondità del fondale e raggi d'onda relativi alla propagazione del moto ondoso su tutto il dominio di calcolo

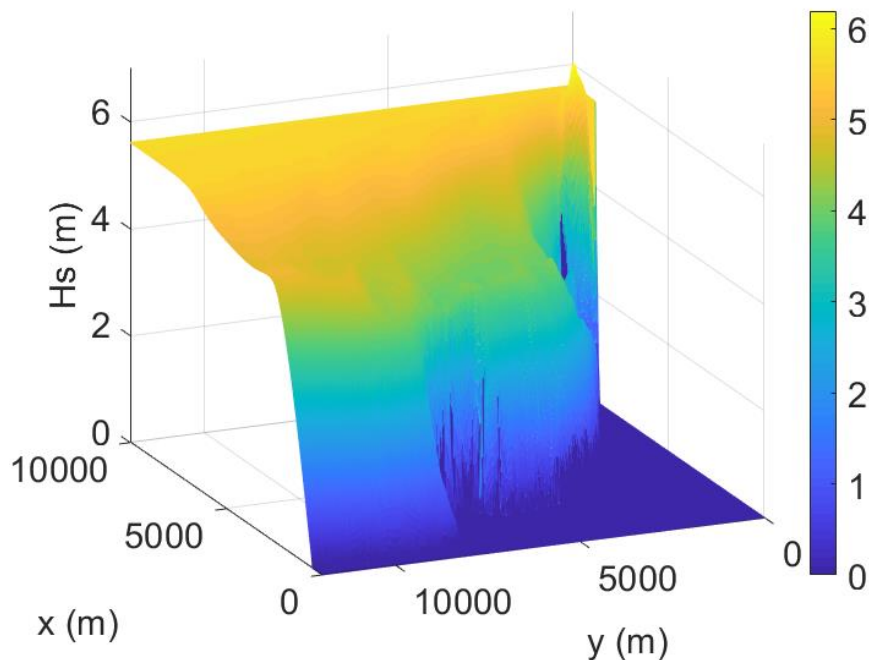


Figura 1.14 - Distribuzione spaziale 3D su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa, H_s (m)

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

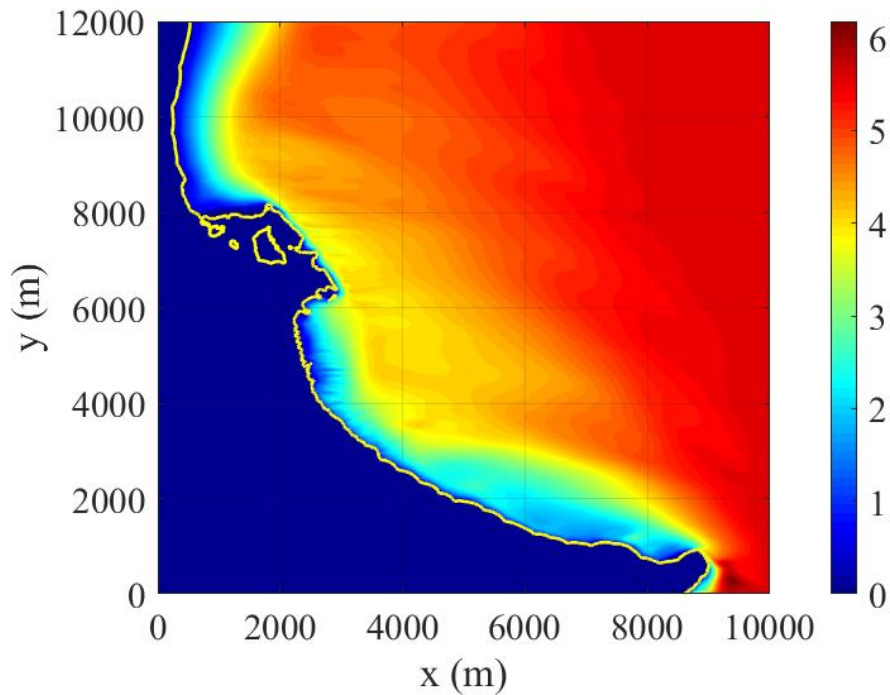


Figura 1.15 - Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, H_s (m)

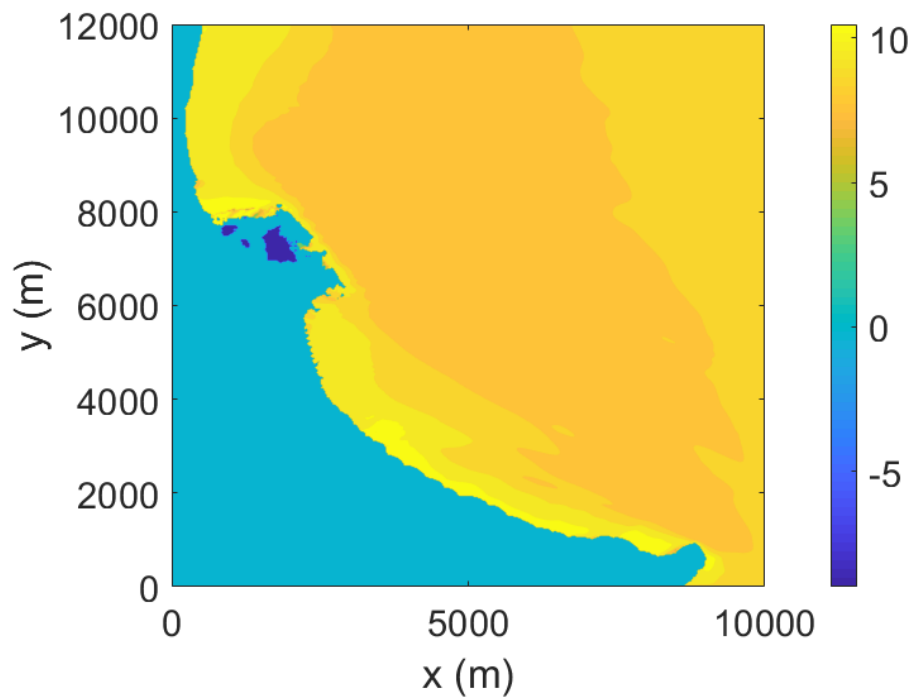


Figura 1.16 - Distribuzione spaziale bidimensionale del periodo medio dell'onda, T_m (s)

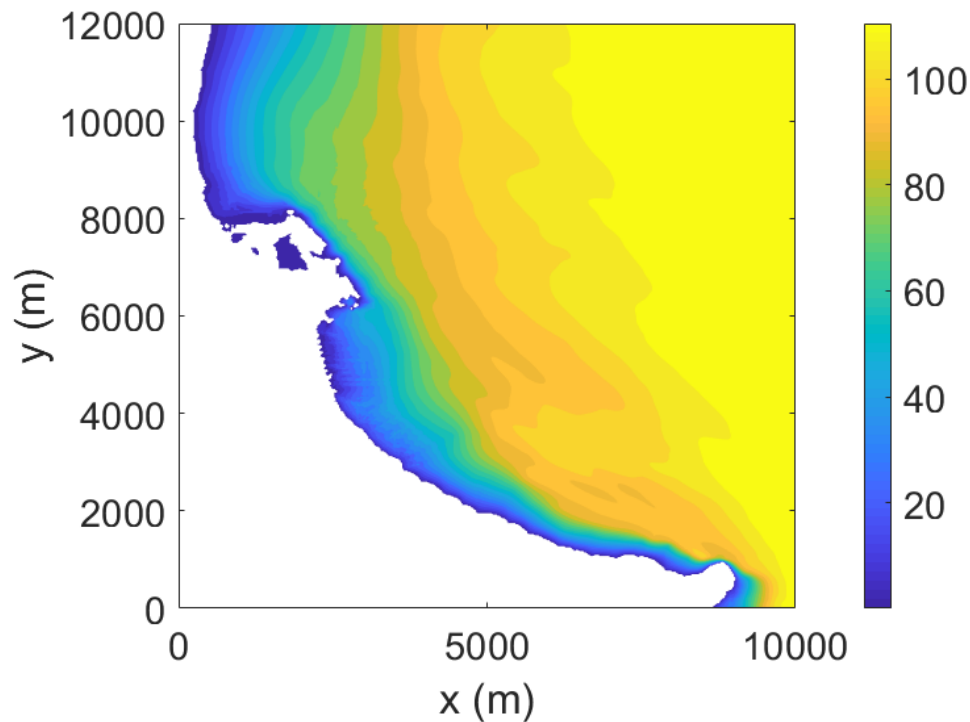


Figura 1.17 - Distribuzione spaziale bidimensionale della lunghezza d'onda, L (m)

Nei diversi grafici mostrati nelle precedenti Figure, le grandezze d'onda in esame (direzione, altezza significativa, periodo medio, lunghezza e celerità) evidenziano le seguenti caratteristiche:

- Progressiva rotazione delle direzioni di propagazione del moto ondoso, i cui raggi d'onda tendono a disporsi ortogonalmente alla linea di riva per effetto della rifrazione;
- Progressiva diminuzione dell'altezza d'onda significativa, dalla condizione di acque profonde al limite della condizione di acque intermedie ($0.04 < d/L < 0.5$), e successivo lieve innalzamento dell'altezza d'onda significativa, dalla condizione di acque basse ($d/L < 0.04$) fino al limite di frangimento delle onde per raggiunto limite di profondità;
- Variabilità minima del periodo medio dell'onda da largo verso riva sul dominio di calcolo;

- Progressiva diminuzione da largo verso riva della lunghezza d'onda e, di conseguenza, progressivo rallentamento del moto ondoso, descritto dall'abbattimento dei valori della celerità dell'onda.

Occorre infine osservare che il periodo di picco, T_p , risulta una grandezza invariante del moto ondoso nella sua propagazione da largo fino al frangimento per raggiunto limite di profondità. La dissipazione energetica associata all'onda fa sì che esso risulti variabile nella cosiddetta surf zone (fascia costiera compresa fra la profondità di frangimento e la linea di riva).

1.5. Clima meteomarino medio sotto costa

Sulla base delle simulazioni numeriche effettuate con il modello SWAN, in Tabella 9 viene mostrato il clima meteomarino medio ricavato sottocosta, corrispondente al punto sottocosta di riferimento per le successive analisi, posizionato circa alla batimetrica -10. Il clima ondoso è stato suddiviso per classi di direzioni medie di provenienza del moto ondoso ricadenti all'interno del settore di traversia del paraggio di Crotona (350° - 210° N) e caratterizzate da uno specifico valore di classe d'altezza d'onda H_s , a partire da 0.5 m, e dai rispettivi valori di T_m e T_p , determinati attraverso le correlazioni altezza - periodo calcolate in precedenza.

Nella Tabella 9 relativa al clima ondoso medio sotto costa vengono mostrati, oltre ai nuovi valori di direzione, altezza e periodo, anche il valore di $\Delta\alpha$, che rappresenta l'entità della rotazione angolare prodotta dai raggi d'onda nella loro propagazione da largo a riva, il valore di ΔH_s , espresso in %, che rappresenta l'entità della variazione del moto ondoso nella sua propagazione da largo al punto sottocosta considerato.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

CLIMA ONDOSI MEDIO AL LARGO				CLIMA ONDOSI MEDIO SOTTOCOSTA					
DIR (°N)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	$\Delta\alpha$ (°)	DIR (°N)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	ΔHs (%)
5	0.5	3.64	4.50	3.42	8.42	0.46	3.11	4.50	7%
5	1	4.66	5.85	8.56	13.56	0.84	4.00	5.85	16%
5	1.5	5.38	6.83	12.90	17.90	1.19	4.65	6.83	21%
5	2	5.96	7.62	16.64	21.64	1.56	5.24	7.62	22%
5	2.5	6.45	8.29	19.95	24.95	1.95	5.81	8.29	22%
5	3	6.88	8.89	22.48	27.48	2.31	6.30	8.89	23%
5	3.5	7.27	9.43	25.03	30.03	2.77	6.87	9.43	21%
5	4	7.62	9.92	26.82	31.82	3.18	7.31	9.92	20%
15	0.5	3.64	4.50	2.13	17.13	0.48	3.14	4.50	5%
15	1	4.66	5.85	6.38	21.38	0.88	4.06	5.85	12%
15	1.5	5.38	6.83	10.17	25.17	1.24	4.71	6.83	17%
15	2	5.96	7.62	13.39	28.39	1.63	5.30	7.62	19%
15	2.5	6.45	8.29	16.19	31.19	2.04	5.87	8.29	19%
15	3	6.88	8.89	18.31	33.31	2.42	6.33	8.89	19%
15	3.5	7.27	9.43	20.48	35.48	2.90	6.89	9.43	17%
15	4	7.62	9.92	21.99	36.99	3.33	7.31	9.92	17%
15	4.5	7.95	10.37	23.49	38.49	3.79	7.78	10.37	16%
25	0.5	3.64	4.50	1.40	26.40	0.48	3.16	4.50	4%
25	1	4.66	5.85	4.74	29.74	0.91	4.12	5.85	9%
25	1.5	5.38	6.83	7.81	32.81	1.31	4.82	6.83	13%
25	2	5.96	7.62	10.42	35.42	1.73	5.44	7.62	13%
25	2.5	6.45	8.29	12.70	37.70	2.18	6.02	8.29	13%
25	3	6.88	8.89	14.39	39.39	2.59	6.48	8.89	14%
25	3.5	7.27	9.43	16.11	41.11	3.10	7.02	9.43	11%
35	0.5	3.64	4.50	0.93	35.93	0.49	3.18	4.50	3%
35	1	4.66	5.85	3.32	38.32	0.93	4.18	5.85	7%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

35	1.5	5.38	6.83	5.62	40.62	1.36	4.91	6.83	9%
35	2	5.96	7.62	7.59	42.59	1.82	5.56	7.62	9%
35	2.5	6.45	8.29	9.35	44.35	2.30	6.14	8.29	8%
35	3	6.88	8.89	10.62	45.62	2.74	6.60	8.89	9%
35	3.5	7.27	9.43	11.91	46.91	3.27	7.13	9.43	7%
35	4.5	7.95	10.37	13.76	48.76	4.18	7.97	10.37	7%
45	0.5	3.64	4.50	0.57	45.57	0.49	3.18	4.50	2%
45	1	4.66	5.85	2.12	47.12	0.94	4.21	5.85	6%
45	1.5	5.38	6.83	3.68	48.68	1.39	4.97	6.83	7%
45	2	5.96	7.62	5.04	50.04	1.87	5.62	7.62	6%
45	2.5	6.45	8.29	6.25	51.25	2.38	6.22	8.29	5%
45	3	6.88	8.89	7.15	52.15	2.83	6.67	8.89	6%
45	4	7.62	9.92	8.74	53.74	3.83	7.58	9.92	4%
55	0.5	3.64	4.50	0.27	55.27	0.49	3.18	4.50	2%
55	1	4.66	5.85	1.07	56.07	0.95	4.22	5.85	5%
55	1.5	5.38	6.83	1.95	56.95	1.41	4.99	6.83	6%
55	2	5.96	7.62	2.76	57.76	1.90	5.65	7.62	5%
55	2.5	6.45	8.29	3.50	58.50	2.41	6.25	8.29	4%
55	3	6.88	8.89	4.08	59.08	2.87	6.70	8.89	4%
55	3.5	7.27	9.43	4.69	59.69	3.42	7.22	9.43	2%
55	4.5	7.95	10.37	5.59	60.59	4.32	8.05	10.37	4%
65	0.5	3.64	4.50	-0.01	64.99	0.49	3.18	4.50	2%
65	1	4.66	5.85	0.06	65.06	0.95	4.21	5.85	5%
65	1.5	5.38	6.83	0.26	65.26	1.41	4.99	6.83	6%
65	2	5.96	7.62	0.52	65.52	1.89	5.65	7.62	5%
65	2.5	6.45	8.29	0.81	65.81	2.41	6.25	8.29	4%
65	3	6.88	8.89	1.05	66.05	2.86	6.71	8.89	5%
65	3.5	7.27	9.43	1.32	66.32	3.42	7.22	9.43	2%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

75	0.5	3.64	4.50	-0.29	74.71	0.49	3.18	4.50	3%
75	1	4.66	5.85	-0.94	74.06	0.94	4.20	5.85	6%
75	1.5	5.38	6.83	-1.42	73.58	1.39	4.96	6.83	7%
75	2	5.96	7.62	-1.74	73.26	1.87	5.62	7.62	7%
75	2.5	6.45	8.29	-1.97	73.03	2.37	6.21	8.29	5%
75	3	6.88	8.89	-2.10	72.90	2.81	6.66	8.89	6%
75	3.5	7.27	9.43	-2.22	72.78	3.36	7.18	9.43	4%
75	4.5	7.95	10.37	-2.33	72.67	4.26	8.01	10.37	5%
85	0.5	3.64	4.50	-0.56	84.44	0.49	3.18	4.50	3%
85	1	4.66	5.85	-1.91	83.09	0.93	4.18	5.85	7%
85	1.5	5.38	6.83	-3.08	81.92	1.37	4.92	6.83	9%
85	2	5.96	7.62	-3.99	81.01	1.82	5.56	7.62	9%
85	2.5	6.45	8.29	-4.75	80.26	2.30	6.14	8.29	8%
85	3	6.88	8.89	-5.27	79.74	2.73	6.58	8.89	9%
95	0.5	3.64	4.50	-0.93	94.07	0.48	3.17	4.50	3%
95	1	4.66	5.85	-2.96	92.04	0.92	4.16	5.85	8%
95	1.5	5.38	6.83	-4.78	90.22	1.34	4.88	6.83	11%
95	2	5.96	7.62	-6.28	88.72	1.78	5.50	7.62	11%
95	2.5	6.45	8.29	-7.54	87.46	2.23	6.05	8.29	11%
95	3	6.88	8.89	-8.44	86.56	2.63	6.48	8.89	12%
95	3.5	7.27	9.43	-9.37	85.63	3.11	6.98	9.43	11%
95	4	7.62	9.92	-9.99	85.01	3.52	7.35	9.92	12%
95	4.5	7.95	10.37	-10.62	84.39	3.94	7.75	10.37	12%
105	0.5	3.64	4.50	-1.77	103.23	0.48	3.17	4.50	4%
105	1	4.66	5.85	-4.49	100.51	0.91	4.15	5.85	9%
105	1.5	5.38	6.83	-6.96	98.05	1.31	4.85	6.83	13%
105	2	5.96	7.62	-8.97	96.04	1.73	5.45	7.62	14%
105	2.5	6.45	8.29	-10.70	94.30	2.15	5.98	8.29	14%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

105	3	6.88	8.89	-11.95	93.05	2.52	6.39	8.89	16%
105	3.5	7.27	9.43	-13.25	91.75	2.97	6.87	9.43	15%
105	4	7.62	9.92	-14.14	90.86	3.36	7.23	9.92	16%
105	4.5	7.95	10.37	-15.05	89.96	3.76	7.62	10.37	16%
105	5	8.25	10.80	-15.97	89.03	4.20	8.10	10.80	16%
115	0.5	3.64	4.50	-3.71	111.29	0.46	3.17	4.50	8%
115	1	4.66	5.85	-7.06	107.94	0.87	4.14	5.85	13%
115	1.5	5.38	6.83	-10.14	104.86	1.25	4.82	6.83	17%
115	2	5.96	7.62	-12.62	102.38	1.64	5.41	7.62	18%
115	2.5	6.45	8.29	-14.78	100.22	2.03	5.93	8.29	19%
115	3	6.88	8.89	-16.32	98.68	2.38	6.33	8.89	21%
115	3.5	7.27	9.43	-17.92	97.08	2.79	6.80	9.43	20%
115	4	7.62	9.92	-19.05	95.96	3.15	7.14	9.92	21%
115	4.5	7.95	10.37	-20.19	94.81	3.52	7.51	10.37	22%
115	5	8.25	10.80	-21.36	93.64	3.94	7.97	10.80	21%
115	5.5	8.53	11.19	-22.22	92.78	4.27	8.37	11.19	22%
125	0.5	3.64	4.50	-7.20	117.80	0.42	3.16	4.50	17%
125	1	4.66	5.85	-11.02	113.98	0.78	4.12	5.85	22%
125	1.5	5.38	6.83	-14.63	110.37	1.12	4.80	6.83	26%
125	2	5.96	7.62	-17.55	107.45	1.46	5.38	7.62	27%
125	2.5	6.45	8.29	-20.05	104.95	1.81	5.91	8.29	27%
125	3	6.88	8.89	-21.82	103.18	2.12	6.31	8.89	29%
125	3.5	7.27	9.43	-23.67	101.33	2.49	6.78	9.43	29%
125	4	7.62	9.92	-24.96	100.04	2.81	7.12	9.92	30%
125	4.5	7.95	10.37	-26.26	98.74	3.15	7.48	10.37	30%
125	5	8.25	10.80	-27.56	97.44	3.54	7.90	10.80	29%
125	5.5	8.53	11.19	-28.51	96.49	3.86	8.24	11.19	30%
125	6	8.80	11.57	-29.50	95.50	4.16	8.62	11.57	31%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

135	0.5	3.64	4.50	-12.18	122.82	0.34	3.17	4.50	32%
135	1	4.66	5.85	-16.24	118.76	0.63	4.11	5.85	37%
135	1.5	5.38	6.83	-20.30	114.70	0.91	4.78	6.83	40%
135	2	5.96	7.62	-23.70	111.30	1.19	5.37	7.62	41%
135	2.5	6.45	8.29	-26.56	108.44	1.48	5.92	8.29	41%
135	3	6.88	8.89	-28.58	106.42	1.75	6.34	8.89	42%
135	3.5	7.27	9.43	-30.65	104.35	2.07	6.84	9.43	41%
135	4	7.62	9.92	-32.06	102.94	2.34	7.20	9.92	41%
135	4.5	7.95	10.37	-33.48	101.53	2.63	7.57	10.37	42%
135	5	8.25	10.80	-34.85	100.15	2.97	7.99	10.80	41%
135	5.5	8.53	11.19	-35.83	99.17	3.26	8.30	11.19	41%
135	6.5	9.06	11.93	-37.91	97.09	3.89	9.03	11.93	40%
145	0.5	3.64	4.50	-18.43	126.57	0.24	3.15	4.50	52%
145	1	4.66	5.85	-22.97	122.03	0.45	4.07	5.85	55%
145	1.5	5.38	6.83	-27.61	117.39	0.64	4.75	6.83	58%
145	2	5.96	7.62	-31.40	113.60	0.85	5.39	7.62	58%
145	2.5	6.45	8.29	-34.67	110.33	1.08	5.99	8.29	57%
145	3	6.88	8.89	-36.96	108.04	1.29	6.48	8.89	57%
145	3.5	7.27	9.43	-39.21	105.79	1.55	7.04	9.43	56%
145	4	7.62	9.92	-40.73	104.27	1.78	7.45	9.92	55%
145	4.5	7.95	10.37	-42.23	102.77	2.02	7.88	10.37	55%
145	5	8.25	10.80	-43.64	101.36	2.31	8.36	10.80	54%
155	0.5	3.64	4.50	-28.67	126.33	0.10	3.20	4.50	79%
155	1	4.66	5.85	-34.51	120.49	0.21	4.37	5.85	79%
155	1.5	5.38	6.83	-39.25	115.75	0.34	5.35	6.83	77%
155	2	5.96	7.62	-43.07	111.93	0.50	6.20	7.62	75%
155	2.5	6.45	8.29	-46.24	108.76	0.67	6.97	8.29	73%
155	3	6.88	8.89	-48.41	106.60	0.84	7.57	8.89	72%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

155	3.5	7.27	9.43	-50.36	104.64	1.06	8.21	9.43	70%
155	4	7.62	9.92	-51.69	103.31	1.24	8.68	9.92	69%
155	4.5	7.95	10.37	-53.02	101.98	1.44	9.17	10.37	68%
165	0.5	3.64	4.50	-41.23	123.77	0.03	3.37	4.50	94%
165	1	4.66	5.85	-47.04	117.96	0.09	5.22	5.85	91%
165	1.5	5.38	6.83	-51.63	113.37	0.18	6.49	6.83	88%
165	2	5.96	7.62	-54.94	110.06	0.29	7.37	7.62	85%
165	2.5	6.45	8.29	-57.58	107.42	0.43	8.09	8.29	83%
165	3	6.88	8.89	-59.40	105.60	0.57	8.64	8.89	81%
165	3.5	7.27	9.43	-60.90	104.10	0.74	9.17	9.43	79%
165	4	7.62	9.92	-61.97	103.03	0.89	9.56	9.92	78%
165	4.5	7.95	10.37	-63.07	101.93	1.05	9.98	10.37	77%
175	0.5	3.64	4.50	-51.60	123.40	0.01	3.53	4.50	98%
175	1	4.66	5.85	-59.11	115.89	0.04	6.19	5.85	96%
175	1.5	5.38	6.83	-62.95	112.05	0.11	7.24	6.83	93%
175	2	5.96	7.62	-65.66	109.34	0.20	7.94	7.62	90%
175	2.5	6.45	8.29	-67.85	107.15	0.32	8.55	8.29	87%
175	4.5	7.95	10.37	-72.46	102.54	0.85	10.28	10.37	81%
185	0.5	3.64	4.50	-66.38	118.62	0.00	6.11	4.50	99%
185	1	4.66	5.85	-69.93	115.07	0.03	6.85	5.85	97%
185	1.5	5.38	6.83	-72.80	112.20	0.08	7.51	6.83	94%
185	2	5.96	7.62	-75.14	109.86	0.16	8.12	7.62	92%
185	2.5	6.45	8.29	-76.92	108.08	0.25	8.68	8.29	90%
195	0.5	3.64	4.50	-76.59	118.41	0.00	6.50	4.50	100%
195	1	4.66	5.85	-79.47	115.53	0.02	7.24	5.85	98%
195	1.5	5.38	6.83	-80.84	114.16	0.06	7.69	6.83	96%
195	2	5.96	7.62	-82.01	112.99	0.12	8.15	7.62	94%
205	0.5	3.64	4.50	-74.84	130.16	0.01	4.65	4.50	97%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

205	1	4.66	5.85	-77.56	127.44	0.04	5.79	5.85	96%
205	1.5	5.38	6.83	-80.16	124.84	0.08	6.53	6.83	95%
215	0.5	3.64	4.50	-83.92	131.08	0.01	4.45	4.50	98%
215	1	4.66	5.85	-86.59	128.41	0.03	5.47	5.85	97%
215	1.5	5.38	6.83	-88.01	127.00	0.04	5.97	6.83	97%
215	2	5.96	7.62	-88.42	126.59	0.05	6.31	7.62	97%
215	2.5	6.45	8.29	-88.64	126.36	0.06	6.59	8.29	98%
215	3	6.88	8.89	-88.83	126.17	0.06	6.82	8.89	98%
215	3.5	7.27	9.43	-89.04	125.96	0.07	7.12	9.43	98%
215	4	7.62	9.92	-89.18	125.82	0.07	7.36	9.92	98%
215	4.5	7.95	10.37	-89.31	125.69	0.07	7.60	10.37	98%

Tabella 3: Clima ondoso medio a largo e sottocosta (-10 m) per il paraggio di Crotona

In generale, l'incidenza tendenzialmente ortogonale delle direzioni di propagazione del moto ondoso rispetto alle batimetriche fa sì che le onde mutino in altezza e direzione soprattutto per il fenomeno dello shoaling. In questo caso, risulta così minimizzato l'effetto della rifrazione delle onde poiché i fronti d'onda viaggiano a profondità non molto variabili fra di loro. Si osserva, inoltre, che le direzioni di propagazione delle onde per i diversi settori angolari analizzati tendono sostanzialmente a disporsi normalmente al litorale, o meglio i fronti d'onda tendono a disporsi parallelamente alla linea di riva. In Tabella 10 e in Tabella 11 sono mostrati per il paraggio di Crotona, rispettivamente, i numeri di apparizione e le percentuali di apparizione del moto ondoso alla profondità di circa -10 m nel punto rappresentativo sotto costa considerato.

Nella Figura 34 in forma di istogramma e nella Figura 35 sotto forma di diagramma polare (escludendo gli eventi di calma con $H_s < 0.25$ m) vengono mostrate le percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta per il paraggio di Crotona. Circa il 48% degli eventi risultano prevalentemente provenire dai soli 4 settori direzionali 110° - 120° N e 120° - 130° N, a causa degli effetti dei fenomeni di shoaling e rifrazione connessi al moto ondoso nella sua propagazione verso riva, che fanno sì che la

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

direzione del moto ondoso si avvicini alla direzione normale al litorale. Il 25.38 % degli eventi sottocosta risulta provenire dal solo settore angolare 110°-120°N.

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)										TOTALE
		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	
Dir (°N)												
0	10	104	910	0	0	0	0	0	0	0	0	1014
10	20	151	1601	1900	0	0	0	0	0	0	0	3652
20	30	186	1756	2884	568	135	38	0	0	0	0	5567
30	40	270	1517	391	342	98	26	29	1	2	0	2676
40	50	327	1260	191	177	45	11	5	2	1	0	2019
50	60	366	955	143	52	52	19	12	1	1	0	1601
60	70	360	780	120	53	30	17	5	2	0	2	1369
70	80	416	601	100	59	20	22	8	2	0	1	1229
80	90	420	469	125	52	80	22	5	3	7	0	1183
90	100	377	533	133	211	17	41	28	20	14	3	1377
100	110	503	642	424	697	288	92	28	0	0	0	2674
110	120	7854	2814	1296	0	0	0	0	0	0	0	11964
120	130	9264	1551	0	0	0	0	0	0	0	0	10815
TOTALE		20598	15389	7707	2211	765	288	120	31	25	6	47140

Tabella 4: Numero di apparizioni del moto ondoso nel punto sottocosta (-10 m) per il paraggio di Crotone

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)										TOTALE
		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	
Dir (°N)												
0	10	0.22%	1.93%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.15%
10	20	0.32%	3.40%	4.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	7.75%

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

20	30	0.39%	3.73%	6.12%	1.20%	0.29%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	11.81%
30	40	0.57%	3.22%	0.83%	0.73%	0.21%	0.06%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	5.68%
40	50	0.69%	2.67%	0.41%	0.38%	0.10%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	4.28%
50	60	0.78%	2.03%	0.30%	0.11%	0.11%	0.04%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	3.40%
60	70	0.76%	1.65%	0.25%	0.11%	0.06%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	2.90%
70	80	0.88%	1.27%	0.21%	0.13%	0.04%	0.05%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	2.61%
80	90	0.89%	0.99%	0.27%	0.11%	0.17%	0.05%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	2.51%
90	100	0.80%	1.13%	0.28%	0.45%	0.04%	0.09%	0.06%	0.04%	0.03%	0.01%	2.92%
100	110	1.07%	1.36%	0.90%	1.48%	0.61%	0.20%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	5.67%
110	120	16.66%	5.97%	2.75%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	25.38%
120	130	19.65%	3.29%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	22.94%
TOTALE		43.70%	32.65%	16.35%	4.69%	1.62%	0.61%	0.25%	0.07%	0.05%	0.01%	100.00%

Tabella 5: Percentuali di apparizione del moto ondoso nel punto sottocosta (-10 m) per il paraggio di Crotone

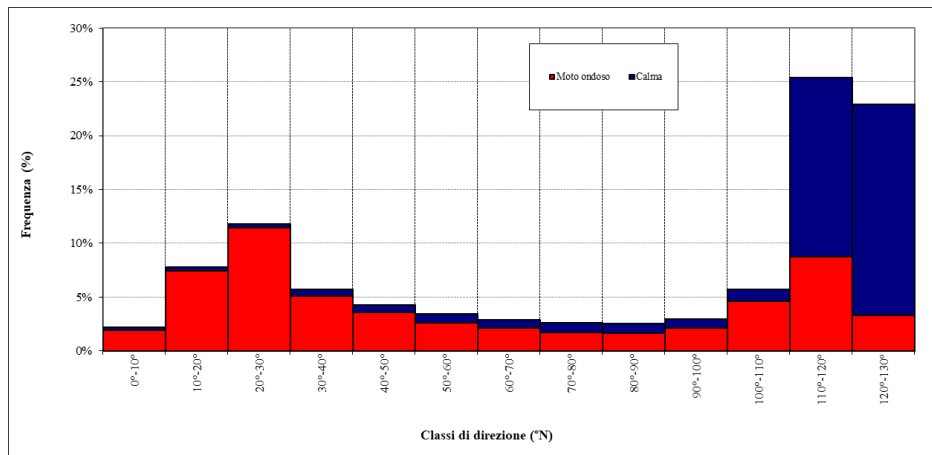


Figura 1.18 - Istogrammi relativi alle percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta (-10 m) per il paraggio di Crotone

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

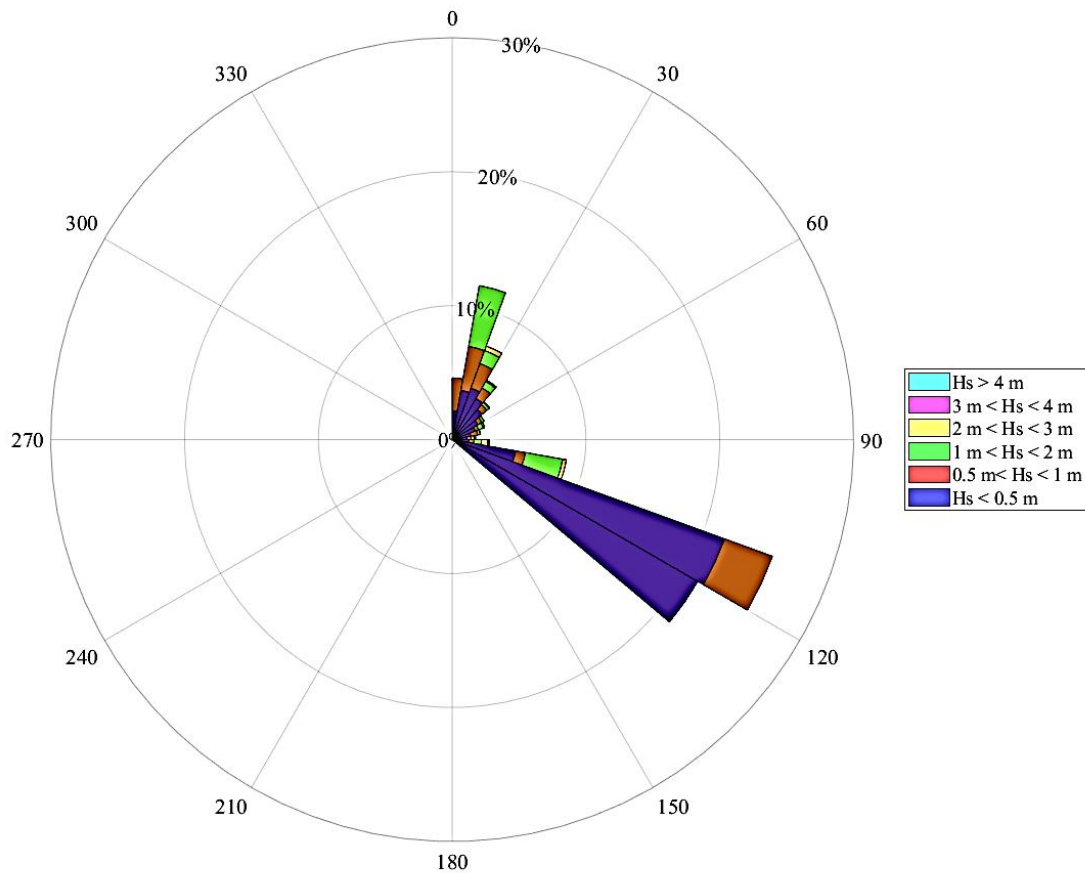


Figura 1.19 - Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso sottocosta (-10 m) per il paraggio di Crotone

1.6. Eventi estremi di moto ondoso al largo e sottocosta (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);

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

- 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 della 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 risulta affidabile per la determinazione degli eventi estremi aventi tempi di ritorno non particolarmente lunghi, cioè pari a circa 3 volte la durata degli anni di osservazione.

Partendo dalle serie storica dei dati di moto ondoso al largo del paraggio di Crotona riguardanti le altezze d’onda significative e la loro direzione di provenienza, ricavati dalla trasposizione geografica dei dati registrati dall’ondametro di Crotona, 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, posta pari a 2.5 m, 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° (Corsini et al., 2002). La durata della mareggiata è quindi individuata da due 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.

In particolare, dall’analisi della serie dei valori di altezza d’onda significativa, H_s , al largo del paraggio di Crotona sono state individuati 151 eventi di mareggiata afferenti al settore di traversia in esame (350°-210°N), per come mostrato in Tabella 12. Il maggior numero di mareggiate e quelle aventi frequenza maggiore è risultato provenire

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

principalmente dai settori angolari 110°-140°N con 74 eventi e dal settore 140°-170°N con 41 eventi.

Settore 20°-50°		Settore 50°-80°		Settore 80°-110°		Settore 110°-140°		Settore 140°-170°		Settore 170°-210°	
Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)
29.33	4.00	68.00	3.10	96.00	2.90	127.67	3.50	153.00	2.80	170.50	4.70
25.50	2.70	68.33	3.10	101.80	2.90	117.50	2.70	164.50	3.90		
25.00	4.50	54.67	4.60	97.56	4.50	125.35	4.60	144.33	2.80		
32.50	3.10	59.67	3.20	98.50	3.30	124.90	5.60	153.50	4.30		
30.00	3.30	63.00	3.00	94.50	3.20	133.40	3.10	153.40	3.10		
40.00	3.50	58.00	2.70	94.00	2.79	125.67	4.00	151.00	4.80		
28.00	2.83	62.00	2.60	85.15	2.74	128.71	3.70	146.30	3.90		
37.10	2.90	63.00	2.80	97.10	4.78	136.00	3.20	150.50	3.30		
40.40	2.93	74.50	2.93	100.20	3.24	122.33	4.20	140.75	4.50		
		60.30	3.31	105.08	4.25	122.00	3.70	146.44	4.10		
		69.55	3.16	103.78	3.12	113.67	5.40	145.00	3.00		
				108.75	3.76	135.17	4.60	143.00	2.60		
				108.20	2.68	138.50	2.60	155.00	3.90		
				99.30	3.05	130.50	2.70	145.00	3.40		
				103.45	2.81	131.73	4.60	151.62	4.20		
						129.50	5.00	149.67	2.90		
						127.92	5.20	144.75	2.90		
						131.50	3.10	145.00	3.30		
						129.29	5.20	149.75	3.20		
						134.00	3.10	150.10	3.70		
						134.17	3.90	145.75	4.10		
						133.80	4.20	144.25	3.00		
						124.75	3.40	148.22	3.30		
						126.40	3.00	151.33	3.00		
						137.00	4.90	154.50	3.29		
						132.40	3.00	144.53	3.47		
						135.50	3.50	150.93	3.78		
						128.15	4.50	146.91	4.25		
						126.11	4.60	140.60	3.71		
						112.75	5.50	142.73	4.40		
						133.44	3.90	143.05	3.08		
						131.17	2.80	148.17	3.20		
						135.40	3.30	143.95	2.91		

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

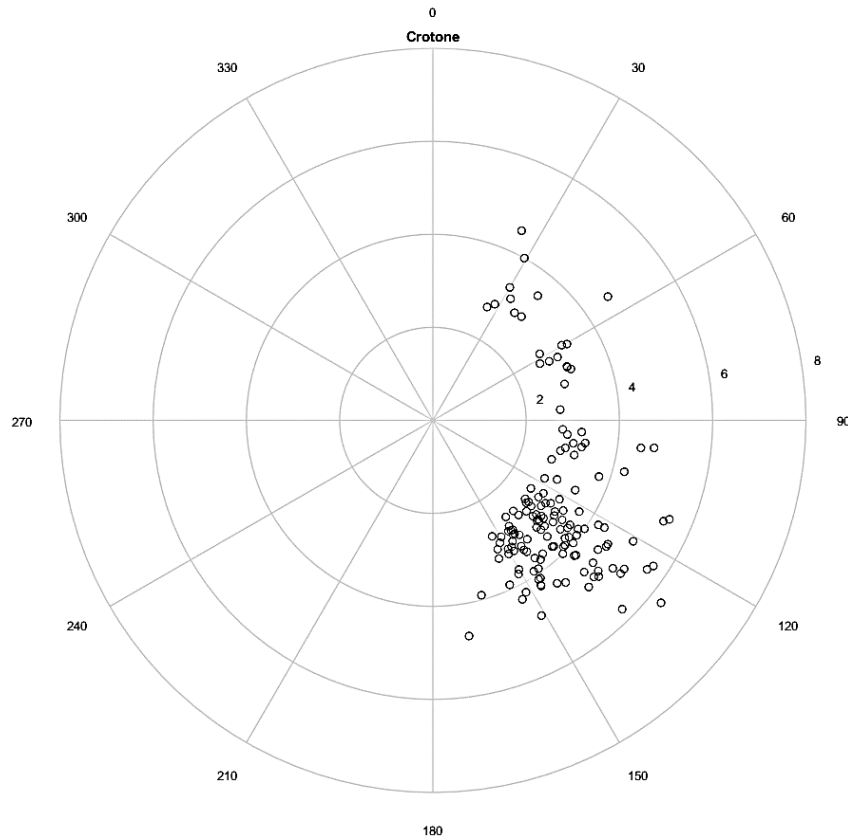
02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

131.83	3.80	143.58	3.68
133.50	3.30	146.83	4.23
127.38	3.70	146.67	3.11
134.25	2.80	145.80	2.88
130.50	2.60	141.63	3.26
115.50	2.95	142.40	3.78
125.20	3.09	144.62	3.91
136.22	3.75	144.62	3.91
130.63	3.60		
126.90	3.89		
133.39	4.22		
133.60	3.15		
122.00	3.20		
130.70	3.85		
136.70	3.73		
122.09	4.34		
134.28	4.82		
131.23	4.00		
116.17	3.40		
132.41	4.80		
130.35	3.38		
133.36	4.89		
137.95	2.74		
135.00	5.74		
123.54	2.84		
128.20	3.31		
124.85	2.56		
128.35	2.96		
131.57	3.17		
121.19	5.02		
135.83	4.00		
126.84	3.27		
128.73	6.27		
123.52	5.67		
133.85	2.97		
126.07	2.80		
128.66	3.95		
131.55	2.67		
126.07	2.80		

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

128.66	3.95
131.55	2.67

Tabella 6: Altezze d'onda massime al culmine della mareggiata e direzioni medie di provenienza**Figura 1.20 - Diagramma polare delle altezze d'onda significative massime al culmine della mareggiata in funzione della direzione media di provenienza**

Gli eventi estremi di moto ondoso da determinare sono stati fatti afferire, pertanto, a 2 settori direzionali (110° - 140° N e 140° - 170° N), afferenti del settore di traversia del paraggio di Crotona. Al fine di determinare le altezze d'onda significative a prefissato 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;

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

- 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 a 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 2.5 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 posizionarli 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) 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 2.5 m. 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 la variabile ridotta y_m si calcola trasformando logaritmicamente le espressioni delle probabilità di non superamento, $F(H_s \leq H_{sm})$, ottenendo per le due distribuzioni selezionate:

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

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

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

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 il più alto valore del coefficiente di correlazione, R^2 .

Tali distribuzioni probabilistiche verranno considerate ai fini della determinazione delle altezze d'onda significative a prefissato tempo di ritorno. In

Settore 110°-140°		Settore 140°-170°		Omnidirezionale	
Distribuzione	R ²	Distribuzione	R ²	Distribuzione	R ²
Gumbel	0.973	Gumbel	0.952	Gumbel	0.981
Weibull k=0.75	0.828	Weibull k=0.75	0.766	Weibull k=0.75	0.869
Weibull k=1	0.927	Weibull k=1	0.875	Weibull k=1	0.955
Weibull k=1.4	0.981	Weibull k=1.4	0.949	Weibull k=1.4	0.991
Weibull k=2	0.986	Weibull k=2	0.977	Weibull k=2	0.980

Tabella 7 vengono mostrati, per il paraggio al largo di Crotona, i valori dei coefficienti di correlazioni per le distribuzioni di probabilità adottate, evidenziando quelle distribuzioni che forniscono il valore più elevato di R^2 . In particolare, per i due settori analizzati è

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

stato trovato che la distribuzione di Weibull con $k = 2$ presenta il maggiore valore di R^2 , mentre se si considerano tutti i settori angolari è stato trovato che la distribuzione di Weibull con $k = 1.4$ presenta il maggiore valore di R^2 . Tali distribuzioni sono state quindi considerate nei successivi calcoli per la determinazione delle onde di progetto.

Settore 110°-140°		Settore 140°-170°		Omnidirezionale	
Distribuzione	R^2	Distribuzione	R^2	Distribuzione	R^2
Gumbel	0.973	Gumbel	0.952	Gumbel	0.981
Weibull k=0.75	0.828	Weibull k=0.75	0.766	Weibull k=0.75	0.869
Weibull k=1	0.927	Weibull k=1	0.875	Weibull k=1	0.955
Weibull k=1.4	0.981	Weibull k=1.4	0.949	Weibull k=1.4	0.991
Weibull k=2	0.986	Weibull k=2	0.977	Weibull k=2	0.980

Tabella 7: Coefficienti di correlazione per le distribuzioni di probabilità adottate, al largo di Crotone

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 a un periodo di ritorno T ;

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

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

$$K \text{ (lunghezza della registrazione dei dati di moto ondoso).}$$

Per i periodi di ritorno più significativi, relativi a $T = 1, 5, 10, 20, 50$ e 100 anni e per i settori direzionali afferenti al settore di traversia di Crotona, in Tabella 8 sono mostrati, rispettivamente, 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 determinati. I valori maggiori delle onde estreme sono relativi al settore angolare omnidirezionale.

T (anni)	Settore 110°-140°			Settore 140°-170°			Omnidirezionale		
	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)
1	2.03	5.99	7.66	2.46	6.41	8.24	4.58	8.00	10.44
5	3.94	7.58	9.86	3.62	7.36	9.55	5.61	8.59	11.28
10	4.56	7.98	10.42	4.00	7.62	9.91	6.01	8.81	11.58
25	5.20	8.36	10.96	4.38	7.88	10.27	6.51	9.06	11.94
50	5.61	8.59	11.28	4.63	8.03	10.49	6.87	9.24	12.19
100	5.97	8.79	11.55	4.86	8.17	10.68	7.22	9.40	12.42

Tabella 8: Eventi estremi direzionali a prefissato tempo di ritorno al largo del paraggio di Crotona

La Figura 37 mostra gli andamenti delle altezze d'onda significative in funzione del periodo di ritorno per i 4 diversi settori direzionali considerati al largo di Crotona e 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

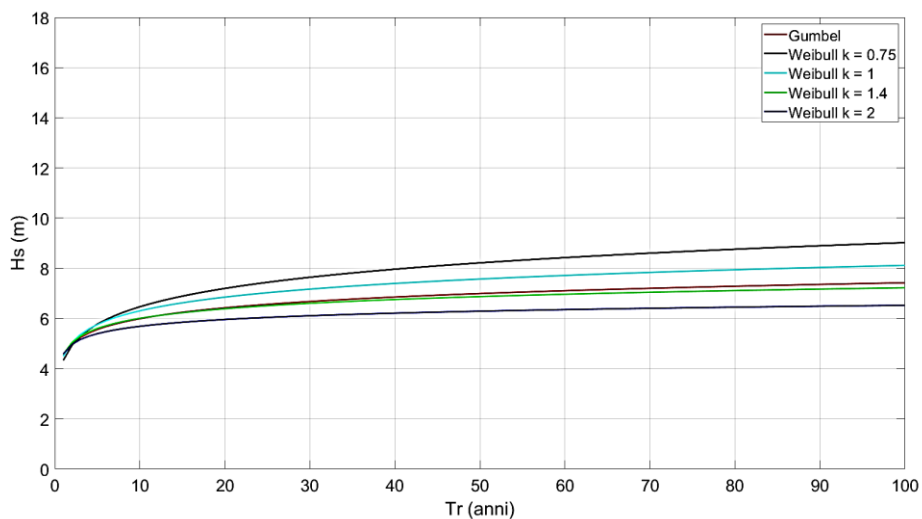
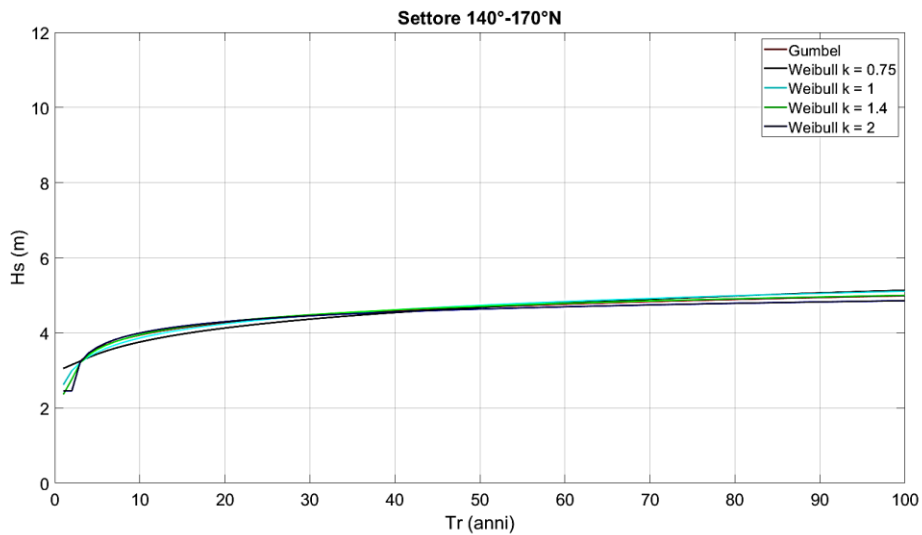
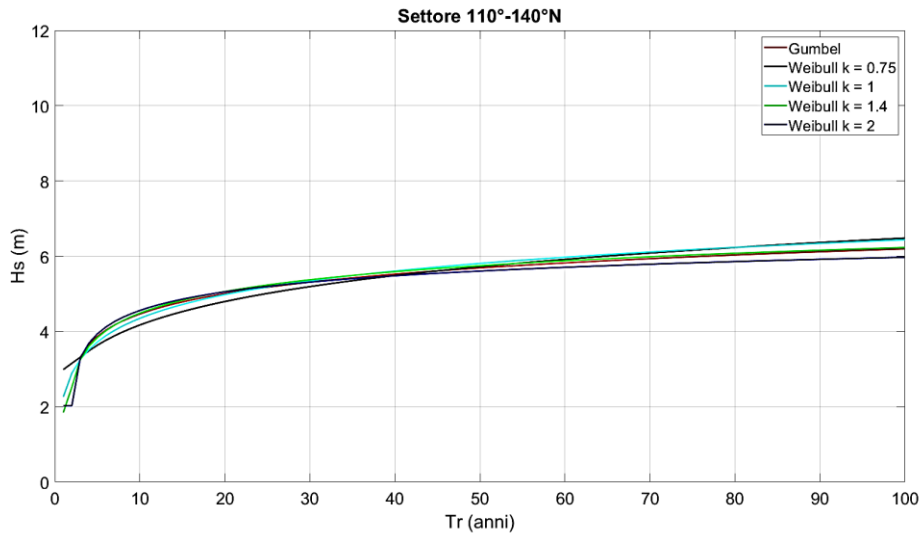
“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

e l'altezza d'onda significativa al culmine della mareggiata (Weibull con $k = 2$, $k=1$, $k = 1.4$ e $k=1$).

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA



“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

Figura 37: Variazione dell'altezza significativa, H_s (m), in funzione del periodo di ritorno per differenti settori direzionali al largo del paraggio di Crotone

Oltre alla propagazione del clima ondoso da largo verso riva, comprendente le diverse classi di altezza d'onda significativa suddivise per differenti settori direzionali, è stata effettuata attraverso il modello SWAN la propagazione da largo a sottocosta, fino al punto sottocosta rappresentativo posto alla batimetrica -10 m, degli eventi estremi di moto ondoso associati ai periodi di ritorno più significativi ($T = 25$ e 50 anni). Ciò risulta indispensabile per il dimensionamento e nella verifica delle strutture di difesa costiera dall'erosione, in cui sono necessari i valori delle onde di progetto che possono direttamente incidere su di esse.

La Tabella 9 illustra i risultati della propagazione effettuata con il modello numerico SWAN per gli eventi estremi direzionali di moto ondoso associati ai periodi di ritorno più significativi a livello di progettazione delle opere di difesa costiera dall'erosione ($T = 25$ e 50 anni).

T (anni)	H_s (m)	T_m (s)	T_p (s)	DIR (°N)	$\Delta\alpha$ (°)	DIR (°N)	H_s (m)	T_m (s)	T_p (s)	ΔH_s (%)
25	5.20	8.36	10.96	125	-27.96	97.04	3.68	8.04	10.96	29.31
50	5.61	8.59	11.28	125	-28.73	96.27	3.93	8.32	11.28	29.98
25	4.38	7.88	10.27	155	-52.72	102.28	1.39	9.05	10.27	68.34
50	4.63	8.03	10.49	155	-53.37	101.63	1.50	9.31	10.49	67.56
25	6.51	9.06	11.94	110	-21.09	88.91	4.95	9.49	11.94	23.97
50	6.87	9.24	12.19	110	-21.68	88.32	5.11	9.90	12.19	25.58

Tabella 9: Eventi estremi direzionali di moto ondoso sottocosta con $T = 25$ e 50 anni (-10 m)

Dall'analisi dei risultati di tale tabella, si osserva un progressivo abbattimento del gradiente delle altezze d'onda significative estreme da largo verso riva all'aumentare del tempo di ritorno.

Le rotazioni delle direzioni di propagazione tendono a essere più accentuate per il settore direzionale 140°-170°N con valori inferiori di H_s per i tempi di ritorno di riferimento.

1.7. Flusso energetico del moto ondoso sottocosta

La direzione risultante del flusso energetico del moto ondoso sottocosta lungo un litorale è indispensabile per le considerazioni sul regime della dinamica litoranea. Infatti, la componente longitudinale del trasporto solido può essere correlata alla componente longitudinale del flusso di energia del moto ondoso al frangimento.

Quando ci si riferisce al solo flusso di energia del moto ondoso frangente, cioè in assenza di elementi che consentono di calibrare la dipendenza funzionale tra le due quantità appena richiamate, si è soliti fare riferimento al trasporto solido potenziale, in quanto il coefficiente di correlazione tra le due quantità appena richiamate risulta essere funzione di alcuni parametri che possono essere individuati solo sulla base della conoscenza storica dell'evoluzione planimetrica del litorale e delle caratteristiche dei sedimenti effettivamente presenti.

In pratica, la conoscenza della componente longitudinale del flusso di energia del moto ondoso frangente implica la conoscenza del “motore” dei sedimenti (trasporto potenziale); l'effettivo trasporto solido ovviamente dipende sia dalla disponibilità dei sedimenti, sia dalle caratteristiche che ne determinano la mobilità. Pertanto, la conoscenza di una adeguata serie storica relativa alla componente longitudinale del flusso di energia delle onde al frangimento (trasporto potenziale) consente di determinare in modo accurato il verso del trasporto solido medio annuo, mentre fornisce solo una stima della sua effettiva quantità. Tuttavia, tale stima risulta di fondamentale importanza, in quanto consente di eseguire numerose considerazioni di interesse applicativo e gestionale.

A tal fine, risulta preliminarmente necessario ricostruire il clima ondoso poco oltre la linea di frangenti lungo una serie di punti considerati rappresentativi del litorale in esame.

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

Per ciascun punto è così possibile determinare, per ogni stato di mare ricostruito, il flusso di energia, P , del moto ondoso per unità di fronte d'onda. Successivamente, per ciascuna direzione di provenienza, è possibile determinare il valore medio del flusso energetico del moto ondoso, P_m , degli stati di mare ricadenti nel settore di traversia. Nel calcolo, in genere, si escludono gli eventi caratterizzati da un'altezza significativa inferiore ai 50 cm, in quanto dal punto di vista energetico, e quindi della capacità di modellazione della spiaggia, si possono ritenere trascurabili. In Tabella 16 sono mostrati i valori del flusso energetico totale e medio annuo per il punto di riferimento sottocosta per il tratto litoraneo di Crotona in esame. In Figura 38 e in Figura 39 sono mostrati i diagrammi polari del flusso energetico totale e medio annuo sottocosta per Crotona.

DIR (°N)	H _s (m)	P (W/m)	P _m (W/m)
5	0.5	97.73	5.43
15	0.5	171.95	9.55
15	1	1126.06	62.56
25	0.5	188.65	10.48
25	1	1730.39	96.13
25	1.5	942.12	52.34
25	2	459.09	25.51
25	2.5	225.14	12.51
35	0.5	162.97	9.05
35	1	234.14	13.01
35	1.5	558.27	31.02
35	2	318.23	17.68
35	2.5	141.11	7.84
35	3	235.99	13.11
35	3.5	11.34	0.63
35	4	30.01	1.67
45	0.5	135.36	7.52
45	1	114.37	6.35

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

45	1.5	288.93	16.05
45	2	146.13	8.12
45	2.5	59.70	3.32
45	3	40.69	2.26
45	3.5	22.68	1.26
45	4	15.00	0.83
55	0.5	102.60	5.70
55	1	85.63	4.76
55	1.5	84.88	4.72
55	2	168.86	9.38
55	2.5	103.12	5.73
55	3	97.65	5.43
55	3.5	11.34	0.63
55	4	15.00	0.83
65	0.5	83.80	4.66
65	1	71.88	3.99
65	1.5	86.92	4.83
65	2	99.18	5.51
65	2.5	96.08	5.34
65	3	43.65	2.43
65	3.5	25.19	1.40
65	4.5	45.75	2.54
75	0.5	64.57	3.59
75	1	59.90	3.33
75	1.5	96.76	5.38
75	2	66.12	3.67
75	2.5	124.34	6.91
75	3	69.85	3.88
75	3.5	25.19	1.40
75	4.5	22.87	1.27
85	0.5	50.38	2.80

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

85	1	74.85	4.16
85	1.5	84.88	4.72
85	2	259.78	14.43
85	2.5	119.40	6.63
85	3	40.69	2.26
85	3.5	34.02	1.89
85	4	105.03	5.84
95	0.5	57.26	3.18
95	1	79.67	4.43
95	1.5	346.03	19.22
95	2	56.20	3.12
95	2.5	231.72	12.87
95	3	244.46	13.58
95	3.5	251.90	13.99
95	4	242.11	13.45
95	4.5	68.62	3.81
105	0.5	68.97	3.83
105	1	253.90	14.11
105	1.5	1137.77	63.21
105	2	935.22	51.96
105	2.5	499.31	27.74
105	3	227.86	12.66
115	0.5	302.22	16.79
115	1	768.09	42.67
125	0.5	166.58	9.25

Tabella 16: Flusso d'energia ondosa totale e medio annuo sottocosta per il paraggio di Crotone

“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”

02.SP.R02 – STUDIO METEOMARINO A LARGO E SOTTOCOSTA

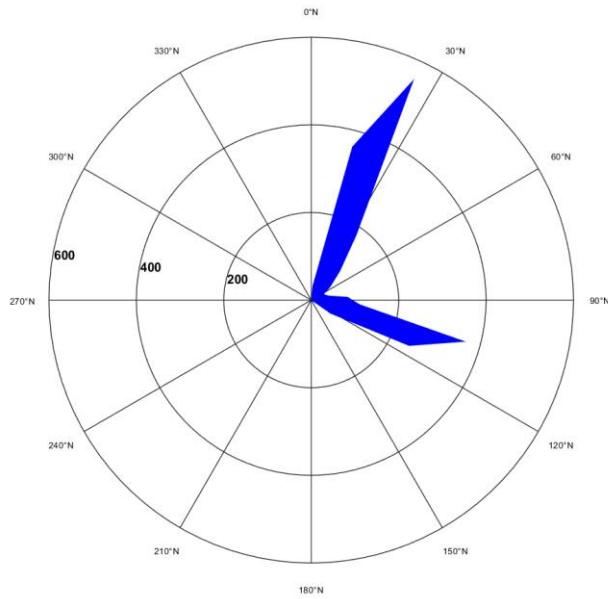


Figura 1.21 - Flusso d'energia ondosa totale sottocosta per il paraggio di Crotona

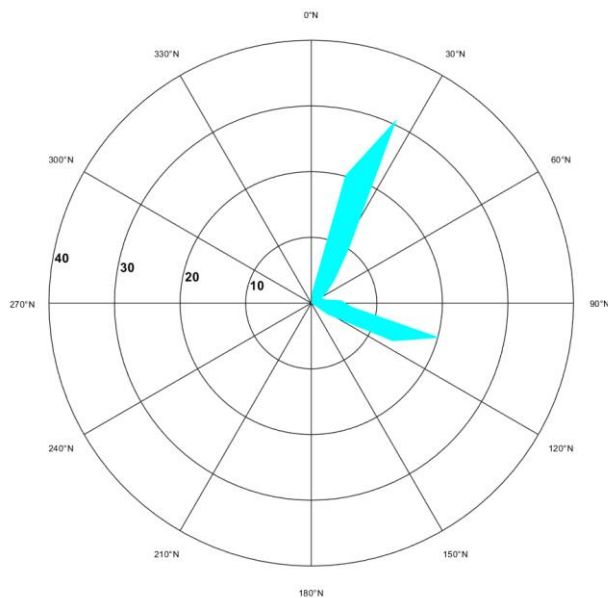


Figura 1.22 - Flusso d'energia medio annuale sottocosta per il paraggio di Crotona