COMUNE di SANREMO

PROGETTAZIONE RELATIVA AGLI INTERVENTI DI DIFESA E RIPASCIMENTO DEL LITORALE COMPRESO TRA PIAN DI POMA ED IL LIDO FOCE ODCP N. 558/2018.

CIG: 827861620B



PROGETTO DEFINITIVO ED ESECUTIVO

PROGETTAZIONE MARITTIMA
Analisi meteomarina e della dinamica costiera

CODICE ELABORATO: P E A 1 3 1 V I I I 2 0 0 0 P M R E L 0 1 A

SCALA -

CAPOGRUPPO

HYpro srl — ARTEC ASSOCIATI S.r.l. consulting engineering — DI LIETO & C. S.R.L. SERVIZI DI ARCHEOLOGIA ED APPLICAZIONI TECNOLOGICHE PER I BENI CULTURALI ED IL RILIEVO — BIOL. A. NICASTRO

RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:
Dott. Ing. Vincenzo Secreti

GEOLOGO:
Dott. Geol. Giuseppe Cerchiaro

CSP:
Ing. Vincenzo Ferreri

COORDINAMENTO UNITA' DI PROGETTAZIONE

PROGETTAZIONE IDRAULICA - MARITTIMA	Ing. M. Brocato (AA)
PROGETTAZIONE IDRAULICA - FLUVIALE	Ing. V. Secreti (HY)
STRUTTURE	Ing. G. Civitate (HY)
AMBIENTE E PAESAGGIO	Ing. V. Bonifati (HY)
GEOLOGIA	Geol. G. Cerchiaro (HY)
MONITORAGGI GEOTECNICI	Geol. A. Grispino (HY)
MONITORAGGI AMBIENTALI	Geol. G. Pettinato (HY)
GEOTECNICA	Ing. F. Conte (HY)
CANTIERIZZAZIONE E GESTIONE TERRE	Ing. F. Cocchiero (HY)
STIME E CAPITOLATI	Ing. A.A. Barbagallo (AA)
RILIEVI E INDAGINI	Ing. R. Anastasi (AA)
ARCHEOLOGIA	Dott. M. Di Lieto (DL)
BIOLOGIA MARINA	Dott. A. Nicastro (AN)
PROGETTAZIONE BIM	Ing. R. Nucci (HY)

VISTO DELLA COMMITTENZA:

IL Responsabile Unico del Procedimento
Ing. Danilo Burastero

IL Dirigente del Settore Lavori Pubblici
Ing. Danilo Burastero

REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
A	SETT. 2020	PRIMA EMISSIONE	O. CARUSO	G. CERCHIARO	V. SECRETI

SOMMARIO

1 Introduzione _____ 2
2 Analisi dei dati d'onda _____ 2
3 Trasposizione dei dati di moto ondoso _____ 7
4 Clima meteomarino al largo del paraggio di Sanremo _____ 17
5 Correlazioni periodo-altezza d'onda _____ 20
6 Eventi estremi di moto ondoso al largo (onde di progetto) _____ 22
7 Propagazione del moto ondoso sottocosta _____ 85
8 Clima meteomarino sottocosta _____ 94
9 Clima meteomarino equivalente (onde morfologiche) _____ 100
10 Flusso energetico del moto ondoso sottocosta _____ 102
11 Profondità di chiusura di spiaggia _____ 106
12 Soluzione tecnica proposta _____ 108

1 Introduzione

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

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

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

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

Le grandezze meteomarine al largo di Sanremo sono state opportunamente classificate in classi d'altezza d'onda significativa e direzione di provenienza del moto ondoso. Inoltre, sono state determinate le correlazioni esistenti fra i valori di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco.

Le classi di altezza d'onda associate ai settori direzionali di provenienza delle onde sono state propagate da largo in un punto significativo sottocosta, con particolare attenzione alla batimetrica -10 m, in modo da quantificare precisamente gli effetti delle batimetrie sull'evoluzione delle grandezze del moto ondoso. La propagazione delle onde è stata effettuata attraverso un modello numerico basato sull'evoluzione spaziale dello spettro d'energia del moto ondoso, che tiene conto degli effetti combinati dello shoaling e della rifrazione.

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

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

2 Analisi dei dati d'onda

La caratterizzazione del moto ondoso attraverso grandezze sintetiche rappresentanti stati di mare quali altezza d'onda significativa, H_s, periodo medio, T_m, periodo di picco, T_p, e direzione di provenienza del moto ondoso, Dir, al largo di Sanremo è stata effettuata a partire dal database ERA5 (attivato dal 2019) dell'istituto meteorologico dell'ECMWF (European Centre

for Medium-Range Weather Forecasts). Si tratta di dati di moto ondoso ricostruiti, attraverso il modello di calcolo spettrale WAM, da dati meteorologici, in particolare da quelli di vento. I dati d'onda sono ricostruiti, sull'intero pianeta, in una serie di punti uniformemente distribuiti con un intervallo di 0.5° geografici e con intervallo temporale di 1 h. Tale database copre un lasso temporale che va dal 1° gennaio del 1979 al 31 dicembre 2018, per un totale di 350640 dati. Il nodo dei dati ERA5 di moto ondoso considerato al largo di Sanremo presenta le seguenti coordinate latitudine 43.50 e longitudine 8.00, e risulta corrispondere ad una profondità di 2480 m. In Figura 1 viene riportata la griglia di punti nel mar Mediterraneo del dataset ERA5 dell'ECMWF dove i punti in rosso sono quelli relativi alla condizione di acque profonde.



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

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

- Elimazione dei cosiddetti "outliers", rappresentati da stati di mare caratterizzati da valori di H_s, T_m e T_p eccessivamente elevati e non compatibili con l'esposizione in mare aperto del nodo o della boa in esame;
- Eliminazione dei dati non registrati dal nodo o dalla boa, presenti nelle serie storiche registrati come dati pari a 0.
- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore di altezza d'onda significativa, che deve essere inferiore a 1.5 m;
- Controllo tra 2 rilevazioni ondametriche successive della variazione del valore del periodo di picco, che deve essere inferiore a 5 s;
- Se vengono riscontrate le 2 succitate condizioni su H_s e T_p, ma la direzione di provenienza dell'evento ondoso tra 2 rilevazioni risulta maggiore di 30°, il dato d'onda può essere considerato valido;
- Controllo per ogni evento registrato della ripidità massima compatibile dell'onda in acque profonde ($d/L_p > 0.5$, essendo d la profondità e L_p la lunghezza di picco dell'onda) con il limite di stabilità geometrico; per ogni registrazione, deve essere verificato che:

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

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

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

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

Sulla base di tali preliminari verifiche sui dati ondosi grezzi ricostruiti dal nodo ERA5 dell'ECMWF, gli eventi ondosi da considerare per le successive modellazioni meteomarine sono pari a 350640. Pertanto, il rendimento η, espressi in %, del nodo ERA5 nel periodo 1979-2018 risulta pari a:

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

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

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

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

In Figura 3 sono state riportate, sotto forma di diagramma polare, le frequenze di apparizione delle classi di altezza d'onda significativa suddivise in settori direzionali di 10°. Gli eventi ondosi aventi H_s > 4 m sono stati raggruppati in una stessa classe in modo da avere una visualizzazione grafica più chiara. Si evince che il settore direzionale 220°-230°N rappresenta quello cui competono il maggior numero di eventi di moto ondoso.

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)													
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	3.75-4.25	4.25-4.75	4.75-5.25	5.25-5.75	5.75-6.25	TOTALE
Dir (°N)															
0	10	333	523	347	113	58	7	2	0	0	0	0	0	0	1383
10	20	464	975	612	377	232	73	42	21	2	0	0	0	0	2798
20	30	554	2057	2389	2261	1828	989	565	184	95	14	1	0	0	10937
30	40	862	4558	5829	4404	2937	1374	436	168	44	24	4	4	0	20644
40	50	750	5391	4960	3405	1403	488	120	39	6	5	2	0	0	16569
50	60	877	4965	3846	1800	696	180	36	12	2	1	0	0	0	12415
60	70	1013	5278	3306	1281	295	90	11	1	0	0	0	0	0	11275
70	80	1157	5277	2578	768	199	62	14	1	0	0	0	0	0	10056
80	90	1231	4955	1769	560	162	23	7	0	0	0	0	0	0	8707
90	100	1420	4390	1237	420	167	15	10	1	0	0	0	0	0	7660
100	110	1294	3783	1058	274	76	32	6	1	0	0	0	0	0	6524
110	120	1254	3209	612	149	55	13	5	1	0	0	0	0	0	5298
120	130	1208	2489	466	117	89	7	1	1	0	0	0	0	0	4378
130	140	958	1966	457	101	63	7	3	0	0	0	0	0	0	3555
140	150	1000	1781	358	87	39	6	3	4	0	0	0	0	0	3278
150	160	968	1834	408	106	34	6	12	2	0	0	0	0	0	3370
160	170	1090	2069	492	114	59	19	7	0	0	0	0	0	0	3850
170	180	1172	2654	690	227	71	19	9	0	0	0	0	0	0	4842
180	190	1535	3395	1245	388	182	40	6	0	0	0	0	0	0	6791
190	200	2095	5879	2195	806	335	112	43	18	3	6	1	0	0	11493
200	210	3131	11189	4082	1525	463	130	33	19	13	5	0	0	0	20590
210	220	5671	21650	6614	2048	640	174	53	6	2	0	0	0	0	36858
220	230	8497	26596	9833	3851	1510	486	141	30	6	0	0	0	0	50950
230	240	6541	17966	12530	6782	3328	1732	693	211	64	10	0	0	0	49857
240	250	2631	6297	3955	2740	2095	1612	1030	493	186	49	9	6	8	21111
250	260	1325	2119	740	386	297	269	274	169	31	8	2	0	0	5620

260	**270**	669	1013	353	125	89	52	26	8	0	0	0	0	0	**2335**
270	**280**	461	582	213	60	21	4	0	0	0	0	0	0	0	**1341**
280	**290**	318	445	162	60	12	2	0	0	0	0	0	0	0	**999**
290	**300**	250	336	117	31	11	1	0	0	0	0	0	0	0	**746**
300	**310**	229	288	92	28	11	2	0	0	0	0	0	0	0	**650**
310	**320**	195	278	103	33	4	2	1	0	0	0	0	0	0	**616**
320	**330**	225	277	110	47	10	2	0	0	0	0	0	0	0	**671**
330	**340**	251	280	137	49	10	3	0	0	0	0	0	0	0	**730**
340	**350**	229	344	166	44	4	5	1	0	0	0	0	0	0	**793**
350	**360**	296	393	166	66	22	5	1	1	0	0	0	0	0	**950**
TOTALE		**52154**	**157481**	**74227**	**35633**	**17507**	**8043**	**3591**	**1391**	**454**	**122**	**19**	**10**	**8**	**350640**

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

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)												
		calme	**0.25-0.75**	**0.75-1.25**	**1.25-1.75**	**1.75-2.25**	**2.25-2.75**	**2.75-3.25**	**3.25-3.75**	**3.75-4.25**	**4.25-4.75**	**4.75-5.25**	**5.25-5.75**	**5.75-6.25**	**TOTALE**
Dir (°N)															
0	**10**	0.0950%	0.1492%	0.0990%	0.0322%	0.0165%	0.0020%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.394%
10	**20**	0.1323%	0.2781%	0.1745%	0.1075%	0.0662%	0.0208%	0.0120%	0.0060%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.798%
20	**30**	0.1580%	0.5866%	0.6813%	0.6448%	0.5213%	0.2821%	0.1611%	0.0525%	0.0271%	0.0040%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	3.119%
30	**40**	0.2458%	1.2999%	1.6624%	1.2560%	0.8376%	0.3919%	0.1243%	0.0479%	0.0125%	0.0068%	0.0011%	0.0011%	0.0000%	5.888%
40	**50**	0.2139%	1.5375%	1.4146%	0.9711%	0.4001%	0.1392%	0.0342%	0.0111%	0.0017%	0.0014%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	4.725%
50	**60**	0.2501%	1.4160%	1.0969%	0.5133%	0.1985%	0.0513%	0.0103%	0.0034%	0.0006%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	3.541%
60	**70**	0.2889%	1.5052%	0.9428%	0.3653%	0.0841%	0.0257%	0.0031%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	3.216%
70	**80**	0.3300%	1.5050%	0.7352%	0.2190%	0.0568%	0.0177%	0.0040%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	2.868%
80	**90**	0.3511%	1.4131%	0.5045%	0.1597%	0.0462%	0.0066%	0.0020%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	2.483%
90	**100**	0.4050%	1.2520%	0.3528%	0.1198%	0.0476%	0.0043%	0.0029%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	2.185%
100	**110**	0.3690%	1.0789%	0.3017%	0.0781%	0.0217%	0.0091%	0.0017%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	1.861%
110	**120**	0.3576%	0.9152%	0.1745%	0.0425%	0.0157%	0.0037%	0.0014%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	1.511%
120	**130**	0.3445%	0.7098%	0.1329%	0.0334%	0.0254%	0.0020%	0.0003%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	1.249%
130	**140**	0.2732%	0.5607%	0.1303%	0.0288%	0.0180%	0.0020%	0.0009%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	1.014%
140	**150**	0.2852%	0.5079%	0.1021%	0.0248%	0.0111%	0.0017%	0.0009%	0.0011%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.935%
150	**160**	0.2761%	0.5230%	0.1164%	0.0302%	0.0097%	0.0017%	0.0034%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.961%
160	**170**	0.3109%	0.5901%	0.1403%	0.0325%	0.0168%	0.0054%	0.0020%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	1.098%
170	**180**	0.3342%	0.7569%	0.1968%	0.0647%	0.0202%	0.0054%	0.0026%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	1.381%
180	**190**	0.4378%	0.9682%	0.3551%	0.1107%	0.0519%	0.0114%	0.0017%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	1.937%
190	**200**	0.5975%	1.6766%	0.6260%	0.2299%	0.0955%	0.0319%	0.0123%	0.0051%	0.0009%	0.0017%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	3.278%
200	**210**	0.8929%	3.1910%	1.1642%	0.4349%	0.1320%	0.0371%	0.0094%	0.0054%	0.0037%	0.0014%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	5.872%
210	**220**	1.6173%	6.1744%	1.8863%	0.5841%	0.1825%	0.0496%	0.0151%	0.0017%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	10.512%
220	**230**	2.4233%	7.5850%	2.8043%	1.0983%	0.4306%	0.1386%	0.0402%	0.0086%	0.0017%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	14.531%
230	**240**	1.8654%	5.1238%	3.5735%	1.9342%	0.9491%	0.4940%	0.1976%	0.0602%	0.0183%	0.0029%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	14.219%
240	**250**	0.7503%	1.7959%	1.1279%	0.7814%	0.5975%	0.4597%	0.2937%	0.1406%	0.0530%	0.0140%	0.0026%	0.0017%	0.0023%	6.021%
250	**260**	0.3779%	0.6043%	0.2110%	0.1101%	0.0847%	0.0767%	0.0781%	0.0482%	0.0088%	0.0023%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	1.603%
260	**270**	0.1908%	0.2889%	0.1007%	0.0356%	0.0254%	0.0148%	0.0074%	0.0023%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.666%
270	**280**	0.1315%	0.1660%	0.0607%	0.0171%	0.0060%	0.0011%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.382%
280	**290**	0.0907%	0.1269%	0.0462%	0.0171%	0.0034%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.285%
290	**300**	0.0713%	0.0958%	0.0334%	0.0088%	0.0031%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.213%
300	**310**	0.0653%	0.0821%	0.0262%	0.0080%	0.0031%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.185%
310	**320**	0.0556%	0.0793%	0.0294%	0.0094%	0.0011%	0.0006%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.176%
320	**330**	0.0642%	0.0790%	0.0314%	0.0134%	0.0029%	0.0006%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.191%
330	**340**	0.0716%	0.0799%	0.0391%	0.0140%	0.0029%	0.0009%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.208%
340	**350**	0.0653%	0.0981%	0.0473%	0.0125%	0.0011%	0.0014%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.226%
350	**360**	0.0844%	0.1121%	0.0473%	0.0188%	0.0063%	0.0014%	0.0003%	0.0003%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.271%
TOTALE		14.8739%	44.9124%	21.1690%	10.1623%	4.9929%	2.2938%	1.0241%	0.3967%	0.1295%	0.0348%	0.0054%	0.0029%	0.0023%	100.000%

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

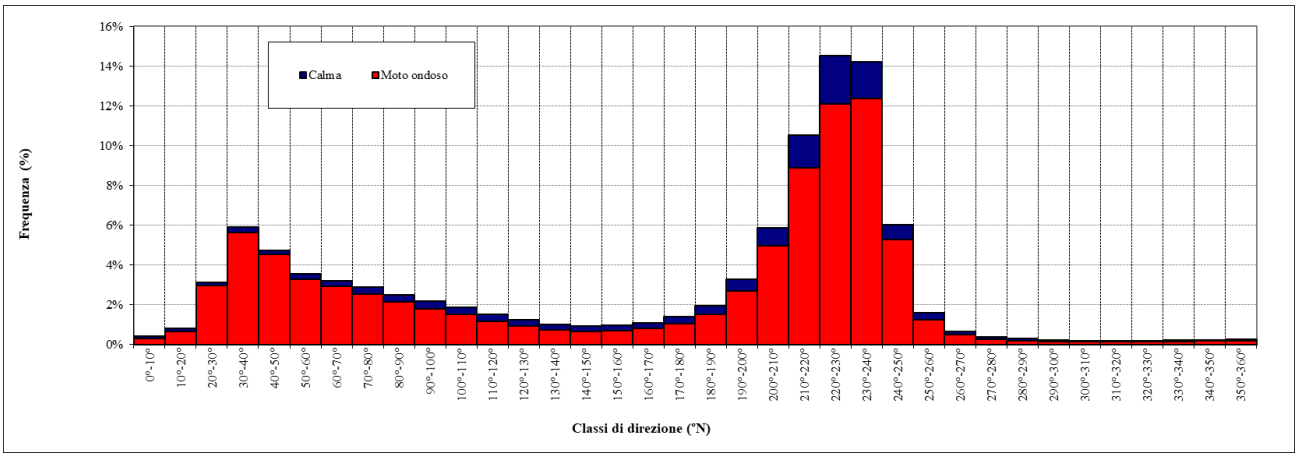


Figura 2: Percentuali di apparizione del moto ondoso in corrispondenza del nodo ERA5

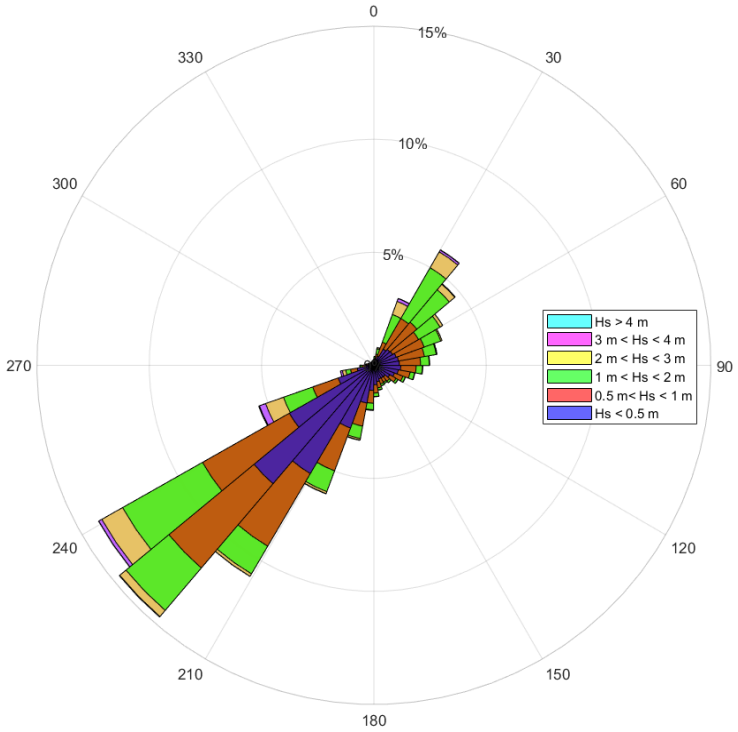


Figura 3: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso in corrispondenza del nodo ERA5

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

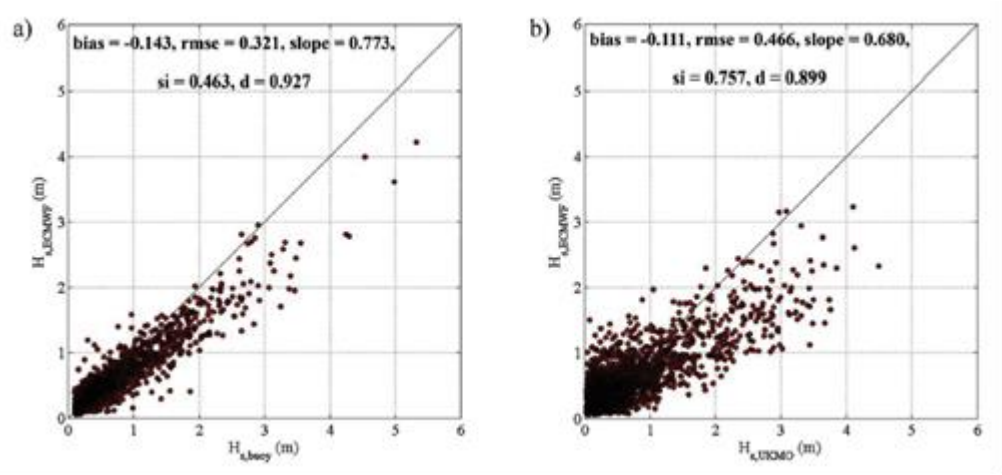


Figura 4: Validazione dei dati d'onda ECMWF per il mar Tirreno

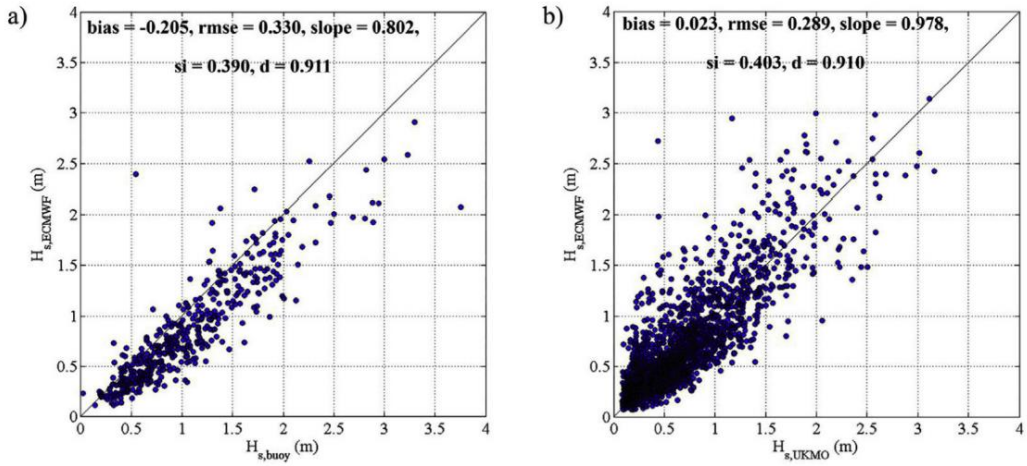


Figura 5: Validazione dei dati d'onda ECMWF per il mar Ionio

3 Trasposizione dei dati di moto ondoso

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

In generale, per la definizione del clima di moto ondoso di un paraggio, la fonte attuale di dati più completa e attendibile è costituita dalle serie storiche di misure dedotte dai database dell'ECMWF attraverso i dati dell'ERA5, che risultano avere serie temporali più estese e recenti rispetto a quelli della rete RON. Tuttavia, in ragione del numero limitato di nodi dell'ECMWF presenti al largo delle coste italiane, il più delle volte il sito di interesse, pur ricadendo nella stessa area geografica, è spesso situato in una posizione decentrata rispetto al tratto di mare "sotteso" dal nodo di ricostruzione. Da qui, nasce l'esigenza di ricorrere a un metodo che consenta di "trasporre" geograficamente le misure del moto ondoso dal punto di misura a quello di interesse. Nel caso in esame, partendo dalle serie storiche dei dati di moto ondoso registrati dal nodo ERA 5 occorre determinare quale sia il clima meteomarino al largo del paraggio di Sanremo, che non risulta disporre di misure dirette di moto ondoso.

Il cosiddetto metodo della trasposizione geografica delle misure di moto ondoso, proposto da Contini e De Girolamo (1998), viene applicato per consentire il trasferimento dei dati di altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco. Inoltre, un metodo empirico, applicato dai ricercatori del Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari, viene

utilizzato per la determinazione della direzione di provenienza del moto ondoso nell'area di interesse, a partire dalla direzione del moto ondoso registrata dal nodo ERA5.

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

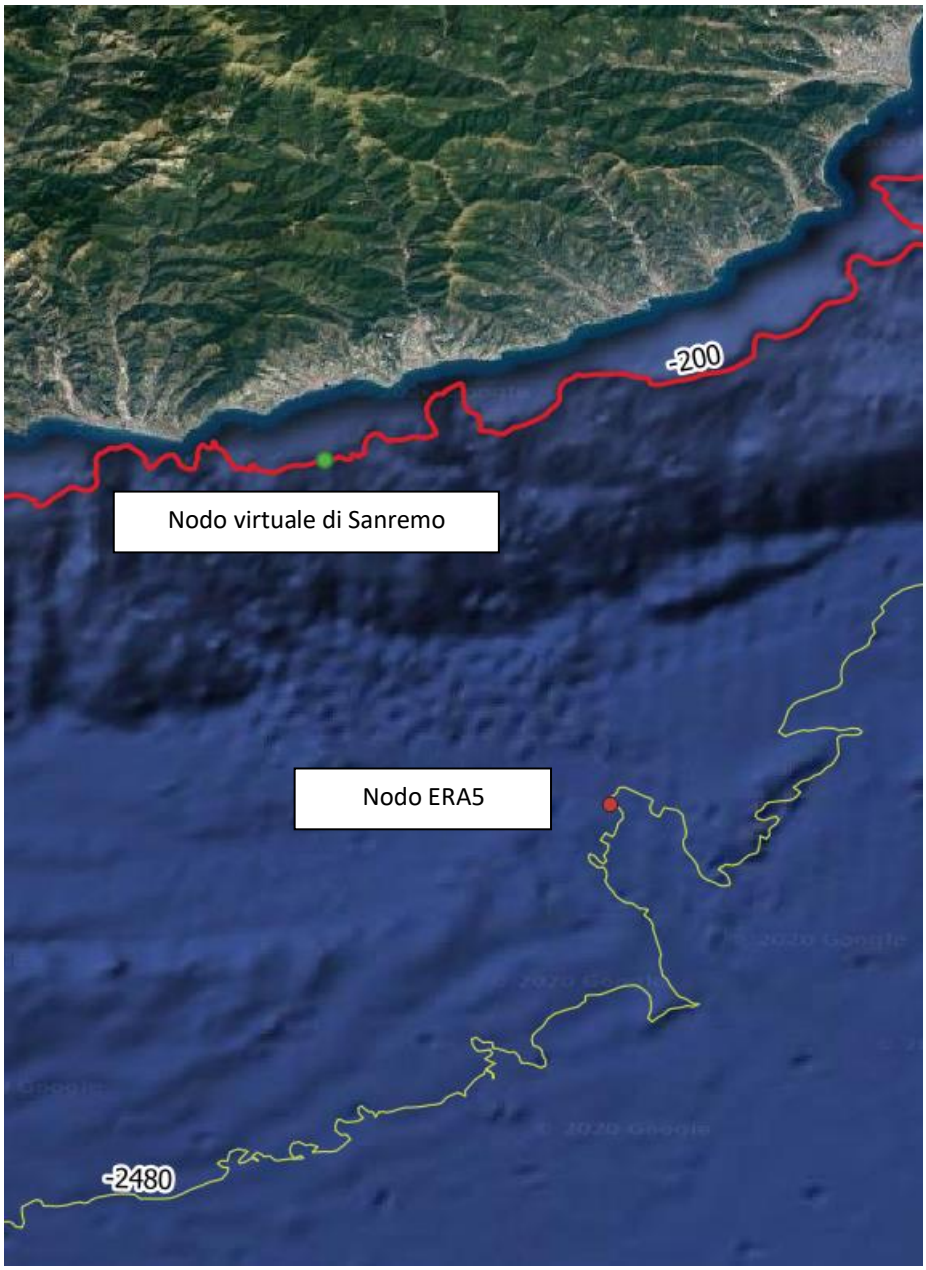


Figura 6: Localizzazione del nodo ERA5 e di quello virtuale (Sanremo)

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

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

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

dove:

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

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

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

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

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

dove:

- Fe,w è la lunghezza del fetch efficace relativa alla direzione ϕw;
- Fi è la lunghezza del fetch geografico relativa alla direzione i-esima ϕi;
- ϕw è la direzione media (riferita al Nord geografico) di possibile provenienza del vento;
- $\phi w - \theta \le \phi i \le \phi w + \theta$ rappresenta la direzione i-esima (riferita al Nord geografico) relativa a un settore di ampiezza 2θ considerato nell'intorno della direzione ϕw (il metodo di Saville prevede un valore di θ = 45° mentre quello di Seymour fa riferimento ad un valore di θ = 90°);

- θ è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso;
- n è il termine esponenziale definito in funzione della legge di distribuzione direzionale degli spettri di moto ondoso che caratterizzano il sito in esame (solitamente, si assume n = 2 per studi meteomarini effettuati nei mari italiani).

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

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

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

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

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



Figura 7: Tracciamento dei fetch geografici per il paraggio di Sanremo



Figura 8: Tracciamento dei fetch efficaci per il paraggio di Sanremo



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



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

Nelle seguenti Tabelle 3 e 4 sono mostrati, rispettivamente, i valori dei fetch geografici, Fg, ed efficaci, Fe, espressi in km, per il paraggio di Sanremo e per il nodo ERA5.

Direzione (°N)	Fg (km)	Fe (km)
5	6	6
10	6.4	6.2
15	6.9	6.4
20	9.1	6.7
25	13.9	7.1
30	19.9	7.6
35	24.7	8.2
40	33.5	9.1
45	43.5	10.4
50	51.8	12.3
55	64.4	15.1
60	77.2	19.7
65	88	127.5
70	103.1	141.6
75	116.9	150.3
80	130.6	160.4
85	141.5	186.5
90	156	198.4

Direzione (°N)	Fg (km)	Fe (km)
185	353.5	500
190	373.5	500
195	389.2	500
200	396.7	500
205	395.5	500
210	388.9	500
215	381.6	500
220	361.5	500
225	336.4	500
230	317.3	500
235	282.5	500
240	246.7	110.3
245	225.1	109.3
250	188.9	72.8
255	154.6	53.5
260	134.3	52.8
265	103.6	36.2
270	76.8	26.5

95	162.7	202.8	275	61.2	21.4
100	167.6	205.3	280	40.2	19.3
105	179.8	217.6	285	23.7	17.1
110	181.1	233.6	290	18.8	11.1
115	176.6	237.6	295	15	8.3
120	185.2	183.5	300	12.6	7.3
125	186.5	448.2	305	10.4	6.5
130	182.3	157.5	310	8.7	5.9
135	197.2	168.3	315	7.6	5.6
140	202.6	161.9	320	6.8	5.5
145	206.8	161.1	325	6.2	5.4
150	229.3	157.2	330	5.8	5.4
155	240.2	157.1	335	5.5	5.5
160	251.4	167.3	340	5.4	5.5
165	276.9	212	345	5.4	5.7
170	293.1	327.2	350	5.5	5.8
175	310.5	330.5	355	5.6	5.8
180	335.5	500	360	5.8	5.9

Tabella 3: Valori dei fetch geografici, Fg, ed efficaci, Fe, per il paraggio di Sanremo

Direzione (°N)	Fg (km)	Fe (km)	Direzione (°N)	Fg (km)	Fe (km)
5	54	41.2	185	327.2	500
10	71.4	43.6	190	350.5	500
15	64.5	47.5	195	375.5	500
20	71.1	53.9	200	391.4	500
25	92.8	78.2	205	409.9	500
30	84.7	101.2	210	425.3	500
35	93	117.8	215	423.2	500
40	115.6	123.7	220	423.8	500
45	108.6	128.7	225	412.3	500
50	117	131.4	230	394.5	500
55	136.4	142.6	235	379.8	500
60	132.4	145.1	240	351.9	500
65	140.4	149.2	245	323	500
70	153.4	156.6	250	303.9	500
75	151	178	255	270.6	425.3
80	154.9	185.7	260	238.4	110.4
85	156.1	187.6	265	218.2	108
90	157.2	186.9	270	185.6	90.6
95	158.7	191.1	275	156.3	83
100	157	202.8	280	138.5	74.5
105	155.1	211.8	285	112.3	70.3
110	154.3	211.9	290	90.5	68.7

115	150.3	209.4	295	77.7	63.3
120	146.9	126.6	300	61.6	56.4
125	147.3	129	305	53.5	52.3
130	145.8	135.7	310	50	48.9
135	147.9	139.9	315	47.1	47.9
140	156.2	127	320	44.8	45.9
145	165.2	124.9	325	42.8	41.6
150	180.6	121.2	330	41.4	39.5
155	194.9	122.7	335	40.5	39.4
160	212.5	133	340	40.2	39
165	236.2	151.9	345	41.2	38.5
170	256	291.2	350	43.2	38.6
175	279.8	299.8	355	54	39
180	307.7	272.9	360	49.5	39.7

Tabella 4: Valori dei fetch geografici, Fg, ed efficaci, Fe, in corrispondenza del nodo ERA5

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

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

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

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

I coefficienti di trasposizione per l'altezza d'onda significativa, $C_1 = \left(\frac{F_e^{\ P}}{F_e^{\ O}}\right)^{\frac{1}{2}}$, per il periodo medio, $C_2 = \left(\frac{F_e^{\ P}}{F_e^{\ O}}\right)^{\frac{1}{3}}$, e per il periodo di picco, $C_3 = C_2$, sono stati messi a confronto con la direzione di provenienza del moto ondoso nel caso di trasferimento geografico dei dati dal nodo ERA5 al largo di Sanremo (Figura 11).

Dall'analisi della Figura 11 si evince una diminuzione generale dell'altezza d'onda significativa (C_1<1) e del periodo medio e di quello di picco (C_2<1) per tutte le direzioni di provenienza del moto ondoso, tranne quelle comprese fra 90°N e 200°N, dove i valori di H_s, T_m e T_p si mantengono stabili o con valori dei coefficienti di trasposizione lievemente superiori a 1.

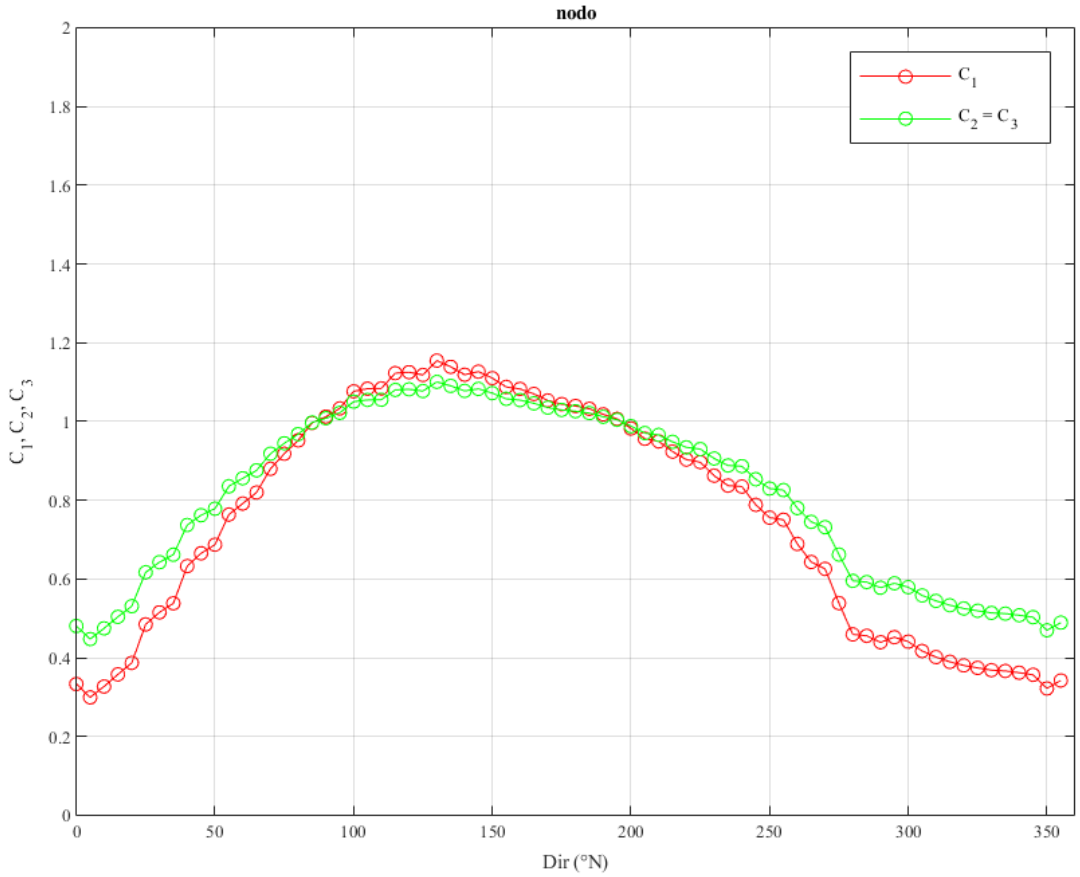


Figura 11: Coefficienti di trasposizione in funzione della direzione di provenienza del moto ondoso (ERA5 – Sanremo)

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

Si rende quindi necessario introdurre delle relazioni finalizzate alla correzione della direzione del vento per tenere conto del fatto che il trasferimento di energia dal vento al mare dipende anche dalla distribuzione direzionale dei fetch. Si può quindi pensare di assegnare allo stato di mare una direzione calcolata come media pesata delle direzioni rispetto alla lunghezza del fetch geografico. Si ipotizza che il trasferimento di energia avvenga in un settore di ampiezza variabile tra $\pm$ 45° intorno la direzione media del vento e che la funzione di trasferimento dell'energia sia rappresentabile da una potenza ennesima del coseno. In particolare, si può osservare che il trasferimento di energia si riduce lungo le direzioni più lontane da quella di provenienza, mentre aumenta lungo le direzioni a cui competono i fetch più estesi. Di conseguenza, le onde generate da venti spiranti da direzioni prossime ai limiti del settore di traversia tendono a propagarsi lungo direzioni più interne.

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

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

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

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

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

θ è l'ampiezza del settore di possibile provenienza del moto ondoso, valutato in questo caso pari a 45°;

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

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

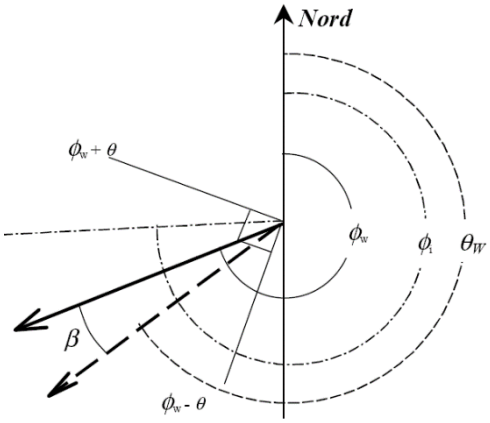


Figura 12: Schema di riferimento, convenzioni e simboli relativi alle direzioni del vento e del moto ondoso

Nella Figura 13 viene mostrata la correlazione fra le direzioni del moto ondoso fra il nodo ERA5 e la boa virtuale di Sanremo.

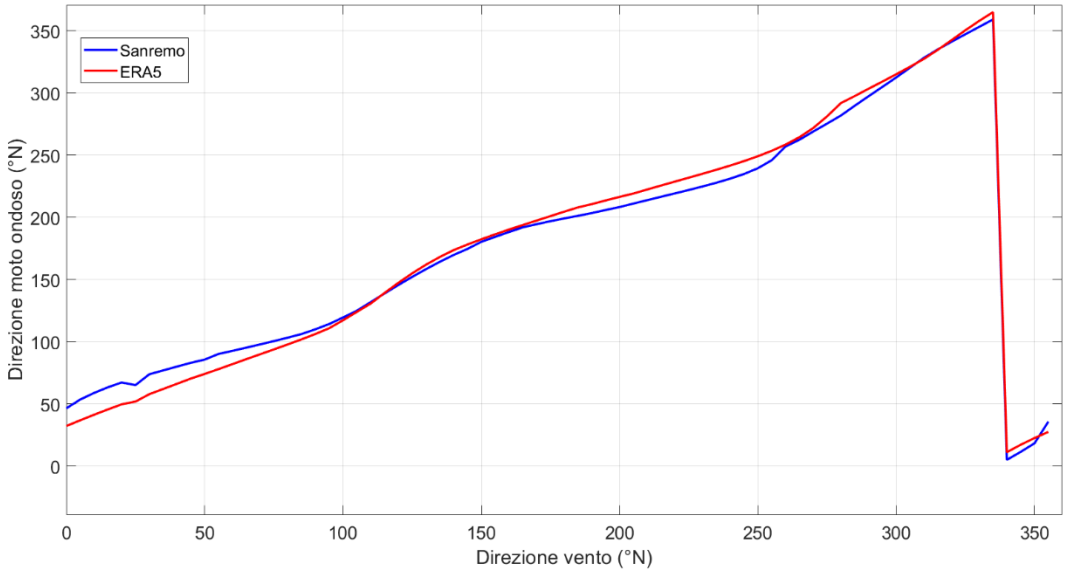


Figura 13: Variazione della direzione del moto ondoso rispetto a quella vento (ERA5-Sanremo)

L'entità della variazione che subisce la direzione di provenienza del moto ondoso durante la trasposizione geografica dell'evento ondoso dal nodo ERA5 a quello virtuale al largo di Sanremo è mostrata nella Figura 14.

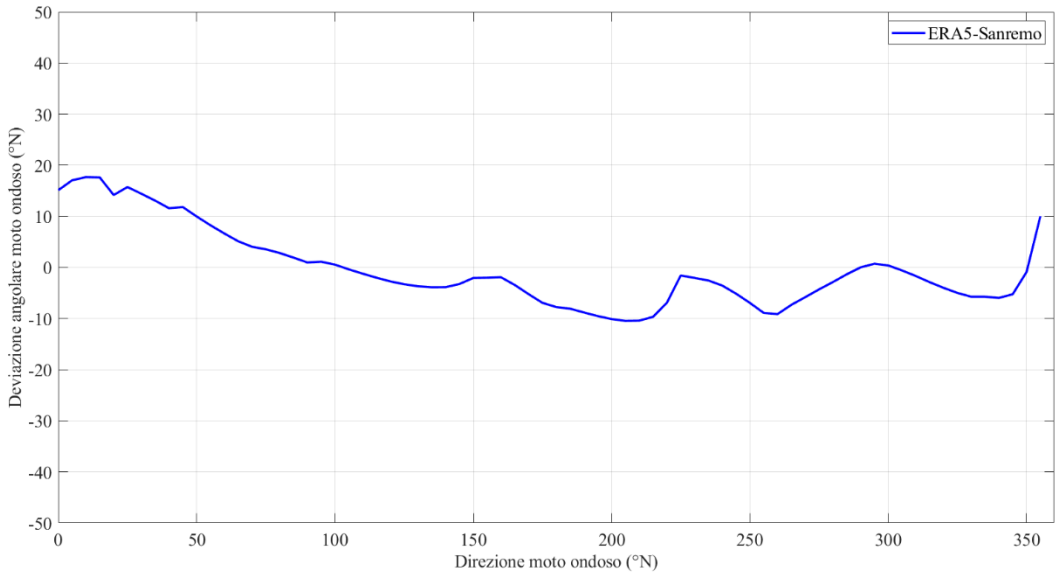


Figura 14: Variazione della deviazione angolare del moto ondoso fra il nodo ERA5 e la boa virtuale di Sanremo

4 Clima meteomarino al largo del paraggio di Sanremo

L'applicazione del metodo della trasposizione geografica dei dati di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco) dal nodo ERA5 alla boa virtuale posta al largo del paraggio di Sanremo e del metodo per il calcolo delle direzioni del moto ondoso consente la determinazione del clima meteomarino al largo del paraggio in esame, con riferimento agli eventi ricadenti nel settore di traversia. Esso rappresenta un settore angolare comprendente tutte la direzioni da cui si presumano possano provenire le agitazioni ondose determinate dai venti foranei. L'arco di circonferenza comprendente tutte le direzioni da cui possono provenire i venti foranei nel paraggio in esame è stato ottenuto considerando le possibili direzioni

di provenienza delle onde sulla base della particolare esposizione del paraggio (Figura 15). Per il paraggio in esame il settore di traversia, su cui spirano i venti che possono creare significative agitazioni ondose, è compreso tra 60°N e 240°N, per un'ampiezza angolare pari a 180°. La scelta dell'ampiezza del settore di traversia è dettata dal fatto che, ampliando eventualmente tale settore, le onde risultano essere abbastanza sub-parallele alla costa e pertanto subiscono elevati abbattimenti per effetto del fenomeno della rifrazione nella loro propagazione sottocosta e quindi risultano essere ininfluenti nei riguardi dell'evoluzione morfodinamica del litorale e nella determinazione delle onde di progetto.

La totalità degli eventi di moto ondoso nel settore di traversia al largo di Sanremo risulta essere il 78.84 % delle registrazioni del nodo ERA5 che sono effettuate nell'intero settore angolare 0°-360°N.

Per gli stati di mare al largo di Sanremo dedotti dal nodo ERA5, gli eventi totali all'interno del settore di traversia, afferenti al periodo 1979-2018, risultano 276455, di cui 49862 eventi di calma, caratterizzati da $H_s < 0.25$ m, che rappresentano il 18 % degli eventi totali nel settore.

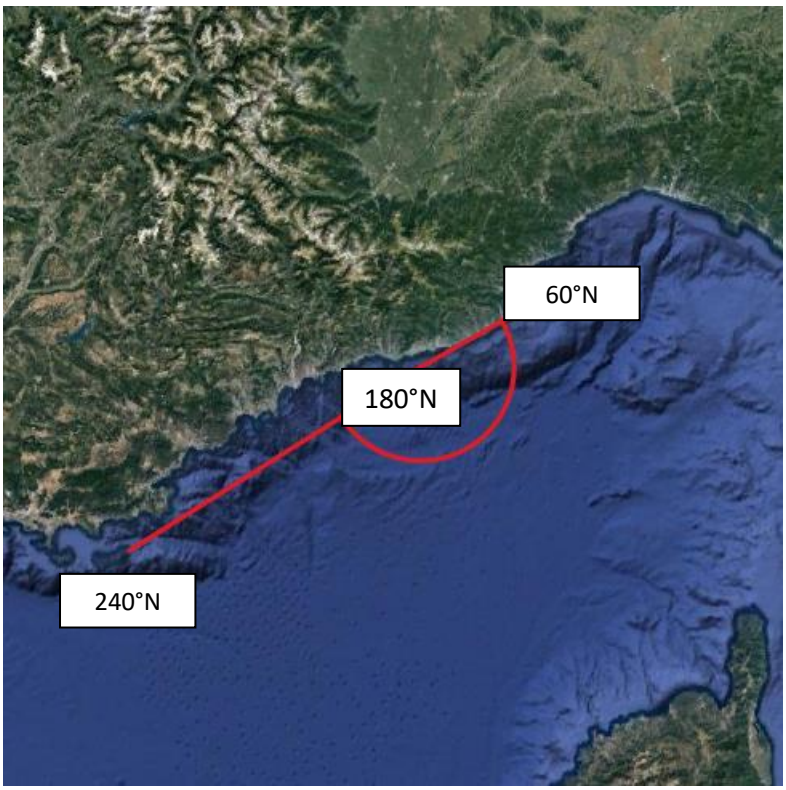


Figura 15: Individuazione del settore di traversia del paraggio di Sanremo

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

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)											
		calme	0.25- 0.75	0.75- 1.25	1.25- 1.75	1.75- 2.25	2.25- 2.75	2.75- 3.25	3.25- 3.75	3.75- 4.25	4.25- 4.75	4.75- 5.25	TOTALE
Dir (°N)													
60	**70**	2455	9309	4701	1230	202	21	5	0	0	0	0	**17923**
70	**80**	1693	6702	3044	754	181	42	4	0	0	0	0	**12420**
80	**90**	1607	6440	2327	665	163	26	7	0	0	0	0	**11235**
90	**100**	1374	4584	1425	490	202	26	10	1	0	0	0	**8112**

100	**110**	1271	4431	1336	409	120	42	17	5	1	0	0	**7632**
110	**120**	1184	3718	824	223	90	38	5	2	1	0	0	**6085**
120	**130**	915	2469	624	179	105	38	3	1	0	0	0	**4334**
130	**140**	759	1830	443	116	53	16	4	3	0	0	0	**3224**
140	**150**	718	1538	379	110	42	15	3	5	2	0	0	**2812**
150	**160**	901	2108	498	154	51	22	15	7	0	0	0	**3756**
160	**170**	1428	3389	848	264	85	31	8	4	0	0	0	**6057**
170	**180**	1602	3803	1325	443	201	48	9	1	0	0	0	**7432**
180	**190**	2290	6420	2418	888	371	117	47	16	4	6	1	**12578**
190	**200**	3585	11867	4094	1437	392	112	29	21	6	4	0	**21547**
200	**210**	4396	14649	4044	1191	354	88	23	0	1	0	0	**24746**
210	**220**	4539	13454	3514	1038	243	64	8	2	0	0	0	**22862**
220	**230**	10734	25004	8996	3409	1202	313	74	12	0	0	0	**49744**
230	**240**	8411	20528	12666	6838	3455	1471	446	124	12	5	0	**53956**
TOTALE		**49862**	**142243**	**53506**	**19838**	**7512**	**2530**	**717**	**204**	**27**	**15**	**1**	**276455**

Tabella 5: Numero di apparizioni del moto ondoso al largo di Sanremo (dal nodo ERA5)

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)											
		calme	**0.25-0.75**	**0.75-1.25**	**1.25-1.75**	**1.75-2.25**	**2.25-2.75**	**2.75-3.25**	**3.25-3.75**	**3.75- 4.25**	**4.25- 4.75**	**4.75- 5.25**	**TOTALE**
Dir (°N)													
60	**70**	0.888%	3.367%	1.700%	0.445%	0.073%	0.008%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	6.483%
70	**80**	0.612%	2.424%	1.101%	0.273%	0.065%	0.015%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	4.493%
80	**90**	0.581%	2.329%	0.842%	0.241%	0.059%	0.009%	0.003%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	4.064%
90	**100**	0.497%	1.658%	0.515%	0.177%	0.073%	0.009%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.934%
100	**110**	0.460%	1.603%	0.483%	0.148%	0.043%	0.015%	0.006%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	2.761%
110	**120**	0.428%	1.345%	0.298%	0.081%	0.033%	0.014%	0.002%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	2.201%
120	**130**	0.331%	0.893%	0.226%	0.065%	0.038%	0.014%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	1.568%
130	**140**	0.275%	0.662%	0.160%	0.042%	0.019%	0.006%	0.001%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	1.166%
140	**150**	0.260%	0.556%	0.137%	0.040%	0.015%	0.005%	0.001%	0.002%	0.001%	0.000%	0.000%	1.017%
150	**160**	0.326%	0.763%	0.180%	0.056%	0.018%	0.008%	0.005%	0.003%	0.000%	0.000%	0.000%	1.359%
160	**170**	0.517%	1.226%	0.307%	0.095%	0.031%	0.011%	0.003%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	2.191%
170	**180**	0.579%	1.376%	0.479%	0.160%	0.073%	0.017%	0.003%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	2.688%
180	**190**	0.828%	2.322%	0.875%	0.321%	0.134%	0.042%	0.017%	0.006%	0.001%	0.002%	0.000%	4.550%
190	**200**	1.297%	4.293%	1.481%	0.520%	0.142%	0.041%	0.010%	0.008%	0.002%	0.001%	0.000%	7.794%
200	**210**	1.590%	5.299%	1.463%	0.431%	0.128%	0.032%	0.008%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	8.951%
210	**220**	1.642%	4.867%	1.271%	0.375%	0.088%	0.023%	0.003%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	8.270%
220	**230**	3.883%	9.045%	3.254%	1.233%	0.435%	0.113%	0.027%	0.004%	0.000%	0.000%	0.000%	17.994%
230	**240**	3.042%	7.425%	4.582%	2.473%	1.250%	0.532%	0.161%	0.045%	0.004%	0.002%	0.000%	19.517%
TOTALE		18.036%	51.452%	19.354%	7.176%	2.717%	0.915%	0.259%	0.074%	0.010%	0.005%	0.000%	100.000%

Tabella 6: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Sanremo (dal nodo ERA5)

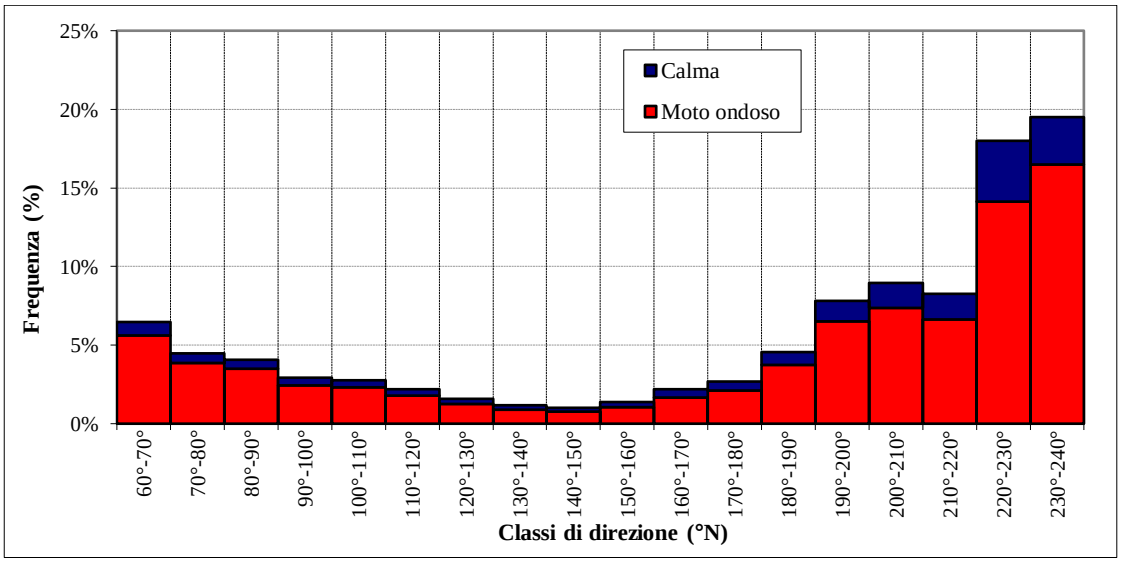


Figura 16: Percentuali di apparizione del moto ondoso al largo di Sanremo (dal nodo ERA5)

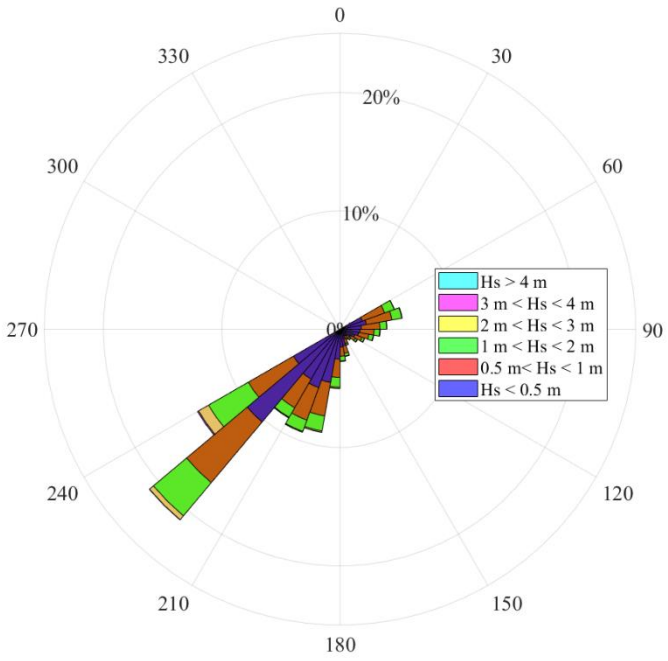


Figura 17: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso al largo di Sanremo (dal nodo ERA)

5 Correlazioni periodo-altezza d'onda

Partendo ora dall'analisi dei dati d'onda ERA5 e per i dati di moto ondoso trasposti al largo del paraggio di Sanremo, selezionati per la successiva determinazione del clima meteomarino sottocosta, è stato possibile costruire la correlazione tra l'altezza d'onda significativa al largo e i corrispondenti valori di periodo medio e di picco. Tali correlazioni risultano utili ai fini dell'individuazione degli eventi ondosi che occorre propagare sottocosta. Essi sono suddivisi per classi di altezza d'onda significativa a cui corrispondono, sulla base di opportune correlazioni, i valori del periodo (medio o di picco).

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

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

dove:

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

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

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

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

Nelle Figure 18 e 19 sono riportate, rispettivamente, le regressioni fra l'altezza significativa e il periodo medio e fra altezza significativa e il periodo di picco per i dati al largo del paraggio di Sanremo, con i relativi valori del coefficiente di correlazione R^2.

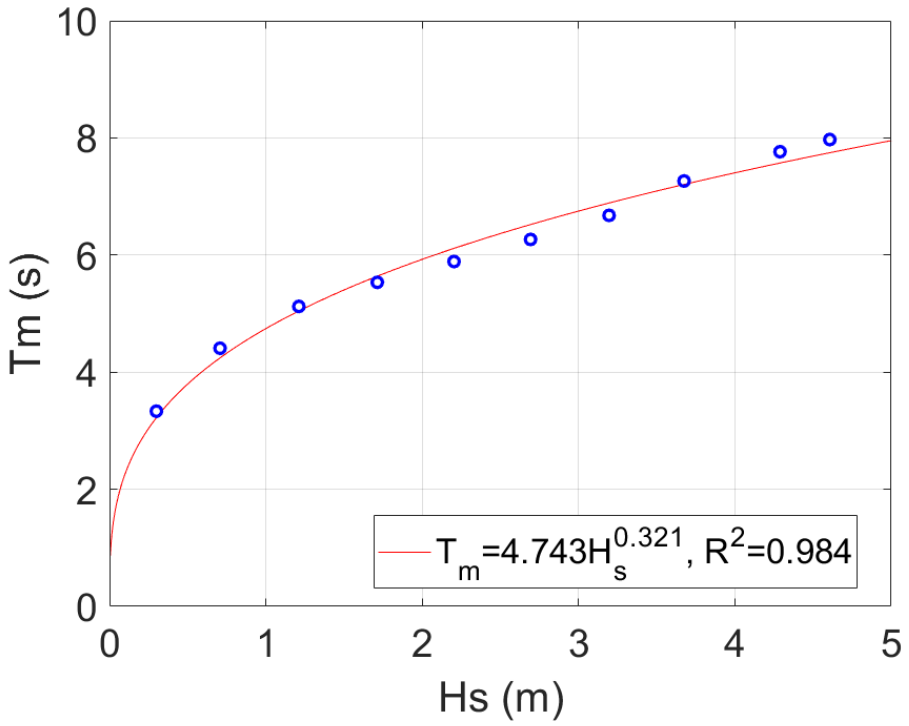


Figura 18: Curva di regressione H_s-T_m per il nodo al largo di Sanremo

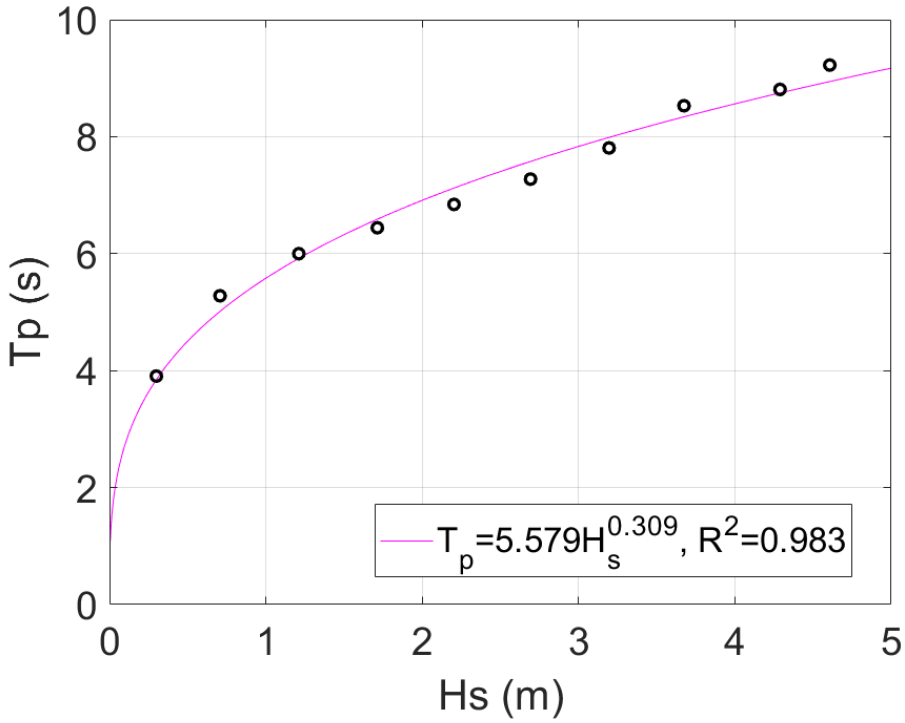


Figura 19: Curva di regressione H_s-T_p per il nodo al largo di Sanremo

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

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

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

L'individuazione dell'onda di progetto necessita la conoscenza delle caratteristiche delle mareggiate che si sono verificate nel paraggio considerato. L'approccio probabilistico porta alla determinazione di un valore di altezza significativa, H_s, in funzione del periodo di ritorno, T. Il periodo di registrazione dei dati di moto ondoso di input, ovvero quelli relativi ai 40 anni di dati dedotti dal nodo ERA5, risulta affidabile per la determinazione degli eventi estremi aventi tempi di ritorno elevati, cioè pari a circa 3 volte la durata degli anni di osservazione (onde di progetto associate ad un valore massimo di T pari a 120 anni). Partendo pertanto dalle serie storiche dei dati di moto ondoso trasposti al largo del paraggio di Sanremo (dai dati del nodo ERA5) riguardanti le altezze d'onda significative e la loro direzione di provenienza, è stata effettuata un'operazione di "estrazione" dalla popolazione dei dati, volta alla determinazione di un campione di eventi (altezze massime al culmine della mareggiata) omogenei e statisticamente indipendenti.

A tal fine, è stato assunto che l'agitazione della superficie libera possa essere considerata una mareggiata quando l'altezza significativa supera una determinata soglia, sulla base delle analisi delle mareggiate osservate per le boe italiane della RON (Corsini et al., 2002; Cavalieri et al., 2004), per un periodo di tempo significativo, considerato almeno di durata pari a 6 ore, e quando le direzioni di provenienza degli stati di mare rimangano confinati entro un settore angolare di massimo 30° (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. Sulla base dell'indicazione dell'Atlante delle onde nei mari italiani dell'APAT (Corsini et al., 2002), è stata fissata una soglia di altezza d'onda significativa relative a 6 settori direzionali di riferimento, definiti ogni 30° e afferenti al settore di traversia in esame (Sanremo). In particolare, Hs_{soglia}= 2 m per i settori 60°- 90°N, 90°-120°N, 120°-150°N, 150°-180°N, 180°-210°N e 210°-240°N.

Settore 60°-90°		Settore 90°-120°		Settore 120°-150°		Settore 150°-180°		Settore 180°-210°		Settore 210°-240°	
Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)	Dir (°N)	Hs (m)
69.13	2.03	93.04	2.03	120.17	2.26	152.41	2.32	180.86	2.18	210.85	2.47
71.49	2.06	91.96	2.10	121.85	2.18	155.16	3.32	181.84	2.54	213.70	2.57
67.70	2.14	90.95	2.18	122.39	2.14	153.12	3.43	180.58	2.45	215.30	2.63
67.94	2.25	91.24	2.36	123.58	2.07	152.40	3.51	181.64	2.32	215.47	2.60
68.34	2.57	92.68	2.38	120.34	2.20	151.94	3.56	182.38	2.20	215.44	2.52
67.65	2.81	93.21	2.40	123.80	2.17	150.52	3.60	182.99	2.09	215.04	2.40
76.42	2.63	93.87	2.44	124.69	2.11	150.65	3.15	183.14	2.00	214.16	2.26
76.01	2.51	94.90	2.40	126.02	2.12	155.07	3.00	183.36	3.22	213.22	2.10
75.20	2.39	95.61	2.34	126.87	2.14	152.61	2.27	182.88	3.08	212.00	2.05
74.10	2.30	96.04	2.25	127.29	2.16	159.40	3.07	182.55	2.94	211.62	2.15
74.65	2.19	95.64	2.16	126.95	2.19	157.83	3.11	182.26	2.80	211.72	2.21
75.69	2.10	96.60	2.03	126.54	2.22	157.19	3.10	182.17	2.67	212.59	2.22
75.55	2.25	99.60	2.18	126.27	2.26	156.08	3.09	183.29	2.56	213.17	2.16
74.67	2.44	99.57	2.55	126.33	2.30	156.76	3.01	180.11	2.79	214.62	2.07
73.73	2.44	100.78	2.77	126.85	2.29	158.13	2.90	180.77	2.80	212.58	2.10
73.57	2.38	101.97	2.83	127.62	2.25	159.46	2.77	181.18	2.80	213.25	2.24
72.89	2.31	102.47	2.72	124.07	2.07	158.95	2.18	181.43	2.77	213.59	2.40
71.67	2.26	102.65	2.58	124.34	2.08	159.15	2.41	181.33	2.82	213.67	2.53
73.42	2.02	103.12	2.04	123.86	2.09	159.04	3.18	183.31	3.13	213.22	2.62
75.25	2.01	102.83	2.27	123.88	2.54	156.32	3.23	185.74	2.00	212.61	2.67
73.94	2.04	102.35	2.35	127.14	2.49	157.91	2.89	186.39	2.08	212.35	2.63
73.11	2.06	102.27	2.27	128.64	2.45	159.52	2.80	186.41	2.08	212.46	2.53
72.80	2.06	102.72	2.17	128.77	2.43	160.35	2.72	185.88	2.10	212.93	2.40
73.67	2.04	103.04	2.07	128.43	2.39	159.99	2.55	185.37	2.21	213.62	2.25
73.79	2.04	102.89	2.42	128.22	2.33	158.89	2.45	185.48	2.35	214.24	2.08
71.78	2.08	104.37	2.45	128.20	2.26	156.67	2.35	186.24	2.41	210.83	2.39
71.91	2.06	105.72	2.48	128.23	2.19	163.34	2.11	187.01	2.39	212.11	2.51
78.67	2.03	106.39	2.53	128.26	2.12	160.99	2.93	187.85	2.34	212.90	2.57
77.24	2.15	105.42	2.59	128.27	2.06	159.25	2.56	185.27	2.01	213.47	2.58
76.73	2.25	103.86	2.66	126.32	2.78	160.17	2.44	185.04	2.09	214.09	2.58
77.03	2.31	103.65	2.71	125.50	2.37	160.74	2.33	184.92	2.19	214.85	2.55
77.35	2.32	104.58	2.75	124.47	2.30	160.33	2.23	185.17	2.27	211.69	2.67
77.81	2.30	106.45	2.78	127.79	2.21	165.69	2.08	185.91	2.31	214.66	2.77
78.16	2.28	105.29	2.89	126.55	2.41	165.15	2.12	186.78	2.30	215.27	2.56
77.88	2.24	106.46	3.22	126.13	2.40	165.99	2.10	187.84	2.27	214.81	2.45

76.85	2.18	105.41	3.10	128.64	2.27	166.29	2.08	183.48	2.20	214.60	2.36
78.83	2.88	105.27	2.97	131.92	2.31	165.60	2.10	184.88	2.36	214.82	2.30
77.64	2.99	104.72	2.88	128.74	2.35	163.30	2.12	185.67	2.47	215.45	2.24
76.93	2.97	103.22	2.81	129.31	2.25	174.52	2.02	186.27	2.54	210.77	2.62
76.21	2.87	102.26	2.75	129.88	2.21	173.95	2.11	186.98	2.58	212.10	2.66
76.06	2.09	106.49	2.64	128.84	2.17	172.42	2.24	187.59	2.62	213.30	2.54
76.71	2.00	115.02	2.60	132.18	2.76	173.47	2.38	186.99	2.72	214.05	2.42
		114.53	2.41	131.95	2.34	174.09	2.58	186.17	2.84	214.36	2.30
		110.88	2.49	129.77	2.29	174.17	2.77	185.39	3.00	213.96	2.18
		111.02	2.70	131.48	2.40	176.03	2.04	186.38	3.09	213.45	2.07
		110.63	2.90	132.61	2.36	175.63	2.08	187.12	3.29	211.20	3.70
		110.78	3.12	130.79	2.35	175.33	2.15	187.98	3.55	213.27	3.48
		111.02	3.27	131.97	2.32	175.45	2.20	187.41	3.05	214.27	3.20
		111.29	2.61	140.61	2.62	175.30	2.24	185.99	3.17	215.09	2.99
		119.68	2.31	142.02	2.55	176.18	2.34	184.68	3.30	215.18	2.73
		117.37	2.43	142.84	2.48	178.60	2.27	183.91	3.37	213.05	2.58
		115.77	2.55	142.86	2.41	174.48	2.19	183.62	3.37	211.93	2.48
		115.10	2.57	142.82	2.34	174.73	2.34	183.20	3.30	225.15	2.49
		114.92	2.32	142.44	2.29	175.89	2.47	185.39	2.44	223.21	2.41
		117.27	2.23	141.40	2.26	176.07	2.53	186.15	3.27	222.80	2.37
		119.05	2.15	139.88	2.25	176.63	2.60	187.71	3.25	223.26	2.24
				142.22	2.32	176.79	2.56	187.46	3.21	223.54	2.08
				142.91	3.78	177.29	2.54	187.12	3.13	223.32	2.02
				140.22	3.75	178.24	2.59	187.18	3.01	222.92	2.03
				139.33	3.67	179.28	2.67	187.53	2.83	222.29	2.05
				143.81	3.47	174.75	2.29	187.80	2.65	221.87	2.08
				140.54	2.14	175.14	2.28	187.89	3.58	222.18	2.08
				139.92	2.10	175.17	2.21	186.91	3.76	222.39	2.05
						175.20	2.19	186.71	3.96	221.75	2.02
						175.06	2.28	186.93	4.14	221.47	2.01
						176.11	2.38	187.22	4.31	225.11	2.01
						177.05	2.37	187.74	4.60	223.92	2.05
						178.13	2.32	186.83	4.69	222.64	2.10
								187.70	2.75	221.77	2.17
								189.09	2.68	221.52	2.24
								189.91	2.61	221.78	2.29
								190.30	2.55	222.62	2.33
								190.53	2.48	223.77	2.34
								190.89	2.39	224.83	2.30
								191.24	2.30	225.60	2.20
								191.63	2.21	221.78	2.12
								191.88	2.13	221.61	2.24
								192.00	2.05	222.02	2.33
								188.32	2.23	222.75	2.36

188.73	2.31	223.73	2.37
188.84	2.35	224.67	2.34
188.92	2.37	225.43	2.27
188.97	2.37	225.65	2.17
188.79	2.35	225.46	2.05
188.41	2.30	220.96	2.10
187.89	2.26	221.24	2.25
187.57	2.22	222.78	2.22
188.82	2.21	223.65	2.17
190.83	2.21	223.22	2.13
191.31	2.17	223.50	2.16
191.68	2.12	225.44	2.17
192.24	3.60	225.23	2.09
191.22	3.55	224.78	2.17
190.52	3.44	223.87	2.19
189.83	3.33	223.14	2.22
189.19	3.24	223.31	2.29
188.58	3.15	223.41	2.36
188.10	3.05	223.58	2.45
187.85	2.94	224.30	2.53
187.95	2.82	224.68	2.59
188.23	2.70	225.49	2.68
188.59	2.59	225.67	2.54
188.88	2.49	224.50	2.36
189.14	2.40	223.25	2.20
189.30	2.31	221.82	2.07
189.42	2.24	222.44	2.48
189.44	2.16	224.06	2.56
189.25	2.09	224.69	2.61
188.71	2.03	224.61	2.80
190.79	2.67	224.69	2.82
190.24	3.04	224.91	2.82
190.18	3.34	225.15	2.81
190.09	3.54	225.15	2.78
189.97	3.65	224.65	2.73
190.68	3.71	223.57	2.66
191.67	3.69	222.85	2.59
189.23	2.18	222.71	2.52
190.49	2.38	222.97	2.45
192.16	2.13	223.51	2.36
191.63	2.11	224.53	2.27
191.62	2.09	225.75	2.81
192.03	2.07	224.00	2.83
190.99	2.09	223.19	2.86

190.61	2.31	222.81	2.89
190.38	2.39	223.57	2.95
190.69	2.47	225.28	3.00
191.47	2.53	225.39	2.66
192.01	2.58	224.89	2.48
191.78	2.54	222.33	2.68
192.18	2.51	223.84	2.64
191.97	2.19	225.34	2.59
191.12	2.08	225.80	2.16
190.48	2.00	225.17	2.09
189.34	2.03	224.10	2.04
188.49	2.13	222.90	2.20
188.00	2.26	222.58	2.27
188.70	2.43	223.54	2.37
190.66	2.65	225.09	2.50
191.97	2.77	223.16	2.04
192.08	2.61	223.33	2.22
192.39	2.55	223.24	2.36
190.30	2.16	223.06	2.47
190.07	2.37	223.11	2.53
190.24	2.50	223.87	2.55
189.76	2.51	225.12	2.54
188.69	2.51	222.56	2.06
187.48	2.56	221.61	2.39
187.75	3.53	220.96	2.58
188.01	3.49	221.42	2.57
188.80	3.40	222.45	2.52
189.58	3.26	221.73	2.31
189.34	3.07	221.92	2.26
188.52	2.95	224.39	2.24
187.78	2.94	221.15	2.65
189.18	2.32	222.71	2.76
187.92	3.19	224.03	2.81
187.86	3.14	225.01	2.84
187.52	2.42	225.68	2.86
187.92	2.28	225.58	2.05
188.39	2.16	221.75	2.33
188.98	2.06	223.14	2.43
189.71	2.07	224.48	2.49
188.81	2.16	225.12	2.52
188.02	2.30	224.98	2.50
187.75	2.49	224.70	2.46
188.39	2.71	224.68	2.38
188.96	2.90	224.98	2.93

188.84	3.05	221.00	2.06
188.56	3.22	221.39	2.16
188.20	3.38	221.76	2.26
187.41	4.43	221.90	2.35
187.71	4.53	221.49	2.33
187.40	4.79	221.71	2.31
189.71	4.64	223.22	2.34
190.86	4.30	224.14	2.32
191.81	3.99	224.66	2.25
193.84	2.04	224.83	2.16
194.59	2.02	224.87	2.06
194.78	2.00	225.57	2.79
195.04	2.02	223.46	2.87
195.55	2.04	221.68	3.00
196.10	2.05	221.69	3.15
196.36	2.03	222.67	3.25
196.44	2.01	224.43	3.29
192.40	2.02	224.67	3.22
193.13	2.11	224.77	3.22
193.76	2.16	221.71	2.16
194.10	2.13	222.06	2.27
194.68	2.12	223.95	2.33
195.56	2.11	225.89	2.31
196.60	2.08	225.54	2.06
192.52	2.59	224.87	2.15
192.99	2.44	225.00	2.28
193.11	2.31	221.23	2.84
193.04	2.23	221.57	2.81
192.69	2.17	221.36	2.68
192.58	2.14	221.27	2.15
192.61	2.11	221.75	2.09
192.60	2.04	222.34	2.03
192.21	4.43	230.35	2.01
195.13	4.43	229.84	2.08
196.10	4.17	229.37	2.17
196.00	3.92	229.72	2.29
196.36	3.75	230.35	2.36
196.93	3.59	229.10	2.11
194.09	2.08	227.46	2.18
192.40	2.30	225.99	2.25
192.15	3.61	227.36	2.38
193.13	3.57	229.69	2.34
194.07	3.58	230.11	2.23
195.29	3.68	228.83	2.27

196.13	3.63	227.99	2.27
196.78	3.49	227.77	2.24
192.26	2.73	228.00	2.17
193.14	3.05	227.99	2.03
195.53	3.23	230.04	2.35
196.43	3.24	228.80	2.38
196.87	2.78	227.79	2.38
196.62	2.68	227.13	2.35
196.53	2.57	226.96	2.31
196.60	2.79	227.31	2.25
196.69	2.65	228.03	2.22
197.00	2.56	228.65	2.14
194.64	2.53	229.27	2.08
196.71	2.15	229.71	2.05
196.06	2.14	228.39	2.01
195.45	2.12	229.88	2.24
194.91	2.10	229.04	2.29
194.24	2.08	228.97	2.35
193.16	2.08	229.49	2.37
192.61	2.07	229.65	2.26
193.17	2.05	229.79	2.12
192.50	2.06	230.33	2.27
193.10	2.20	228.19	2.36
196.79	2.49	226.47	2.43
196.49	2.06	225.53	2.43
193.96	2.07	226.14	2.34
193.52	2.54	227.94	2.31
192.43	2.45	230.05	2.30
194.26	2.09	227.02	2.20
192.77	2.43	228.24	2.25
193.66	2.38	229.09	2.28
194.56	2.37	229.61	2.27
195.05	2.38	229.85	2.20
195.85	2.40	230.02	2.08
196.85	2.38	225.63	2.11
197.19	2.38	225.96	2.20
197.62	2.36	226.18	2.21
198.00	2.32	226.26	2.26
198.28	2.28	227.96	2.35
198.49	2.23	230.02	2.35
198.68	2.16	229.69	2.48
198.91	2.09	229.31	2.22
199.08	2.02	228.13	2.17
202.04	2.09	227.45	2.16

201.11	2.09	227.39	2.13
199.53	2.09	227.36	2.04
197.39	2.13	229.35	2.18
197.80	3.01	228.65	2.40
199.94	3.12	228.46	2.44
200.96	3.04	228.38	2.37
201.60	2.93	228.28	2.26
202.08	2.82	227.95	2.13
201.89	2.31	227.72	2.01
201.25	2.30	225.81	2.12
200.26	2.31	227.33	2.18
199.14	2.36	228.57	2.20
198.14	2.47	229.63	2.21
197.30	2.60	230.36	2.19
201.31	2.02	229.49	2.10
201.00	2.07	228.30	2.13
200.70	2.10	227.86	2.20
200.48	2.12	227.56	2.25
200.34	2.14	227.09	2.22
200.33	2.16	226.76	2.14
200.49	2.17	226.70	2.05
200.86	2.18	227.24	2.55
201.42	2.18	228.70	2.67
197.13	3.30	229.39	2.70
197.43	3.15	229.82	2.75
197.45	3.00	230.30	2.82
197.43	2.85	229.69	2.80
197.43	2.72	229.68	3.13
197.51	2.60	229.30	3.14
197.69	2.48	229.43	3.18
197.95	2.37	230.33	3.23
198.22	2.25	230.12	2.01
198.50	2.15	230.02	2.29
198.78	2.04	228.90	2.27
197.19	3.18	227.70	2.28
197.74	3.12	227.46	2.30
197.92	3.06	228.12	2.28
197.84	2.99	229.62	2.25
197.57	2.93	226.05	2.14
197.24	2.85	227.70	2.13
197.89	2.41	228.77	2.09
200.12	2.33	229.26	2.05
201.64	2.38	229.67	2.02
201.04	2.32	230.42	2.21

200.50	2.32	226.44	2.03
199.72	2.42	226.22	2.14
199.25	2.59	226.18	2.24
199.17	2.77	226.11	2.33
200.29	2.91	226.27	2.42
200.90	2.87	226.25	2.49
200.90	2.78	227.27	2.58
200.78	2.66	228.39	2.68
200.90	2.55	228.82	2.73
201.03	2.43	229.33	2.81
201.85	2.55	229.74	2.98
200.54	2.83	228.70	2.81
201.82	2.24	227.23	2.74
201.24	2.19	226.09	2.81
200.64	2.15	225.54	2.30
200.03	2.13	226.65	2.18
199.43	2.12	225.92	2.01
198.85	2.13	227.60	2.02
198.21	2.10	227.41	2.24
197.48	2.12	227.63	2.40
200.02	2.78	227.39	2.40
201.48	2.95	226.33	2.29
201.23	3.00	225.83	2.39
200.66	2.99	227.81	2.70
200.02	2.96	230.32	3.15
199.56	2.91	225.85	2.44
199.20	2.85	225.82	2.33
199.00	2.79	225.77	2.20
199.14	2.74	225.82	2.54
200.03	2.72	226.66	2.67
200.62	2.68	227.75	2.75
201.00	2.66	229.11	2.76
201.74	2.66	230.28	2.72
201.88	2.59	230.38	3.14
201.57	2.49	229.22	3.15
201.16	2.45	228.01	3.14
200.78	2.39	226.43	3.15
200.48	2.32	225.58	3.16
200.13	2.27	225.88	3.20
199.46	2.22	226.54	3.26
198.59	2.18	227.57	3.29
198.04	2.13	228.52	3.26
197.60	2.08	229.26	3.15
198.93	2.63	229.92	3.01

198.79	2.12	226.14	2.67
207.40	2.06	227.72	2.76
203.78	2.23	228.42	2.78
204.24	2.17	228.85	2.75
207.67	2.20	229.37	2.67
207.23	2.02	229.84	2.57
205.90	2.03	230.25	2.44
204.89	2.04	226.70	2.17
203.98	2.03	227.33	2.44
203.78	2.05	227.27	2.62
205.47	2.10	226.83	2.66
203.45	2.01	226.57	2.70
203.13	2.65	226.92	2.78
203.10	2.58	228.38	2.82
202.88	2.68	229.62	2.77
203.19	2.64	230.33	2.66
203.40	2.60	230.06	2.36
203.90	2.56	229.26	2.22
204.99	2.52	228.30	2.09
206.53	2.49	230.30	2.29
202.88	2.12	229.17	2.32
203.67	2.11	228.24	2.30
204.33	2.28	227.21	2.25
205.05	2.24	226.47	2.19
205.77	2.19	226.08	2.12
206.60	2.14	226.27	2.07
207.62	2.09	226.70	2.00
203.22	2.13	226.34	2.12
203.59	2.13	230.19	2.36
203.91	2.12	228.74	2.43
204.09	2.10	228.40	2.43
204.17	2.07	228.90	2.46
204.15	2.03	229.08	2.52
203.88	2.01	229.50	2.59
203.59	2.01	230.07	2.64
203.33	2.02	230.40	2.70
203.20	2.04	230.31	2.78
202.91	2.06	230.04	2.72
203.35	2.06	229.81	2.51
203.56	2.05	229.64	2.38
203.45	2.04	229.57	2.24
203.24	2.02	229.69	2.11
207.47	2.09	225.78	2.73
207.68	2.12	226.27	2.67

207.51	2.26	226.62	2.58
207.25	2.42	226.64	2.47
206.57	2.55	226.26	2.35
205.99	2.60	225.79	2.23
205.32	2.58	225.49	2.10
204.61	2.58	227.88	2.40
204.45	2.62	226.71	2.52
204.80	2.65	226.52	2.67
204.82	2.60	226.33	2.80
203.46	2.43	226.03	2.97
203.76	2.38	225.57	3.07
205.28	2.31	225.89	3.06
206.82	2.25	226.38	2.92
207.31	2.14	226.57	2.75
207.17	2.02	226.85	2.55
205.40	3.04	226.66	2.44
207.15	2.43	227.13	2.39
206.32	2.43	227.17	2.37
205.67	2.41	228.84	2.42
204.99	2.37	226.84	2.52
204.28	2.32	228.13	2.62
203.64	2.27	229.29	2.63
203.08	2.22	230.02	2.57
203.20	2.45	229.49	2.41
204.00	2.46	228.82	2.22
204.34	2.44	227.86	2.04
204.12	2.38	227.53	2.09
203.82	2.31	230.04	2.21
203.30	2.25	229.66	2.99
202.96	2.20	229.52	3.16
203.63	2.24	229.93	3.29
207.74	2.34	230.38	3.32
207.48	2.02	230.43	2.37
206.56	2.24	229.91	2.21
205.09	2.29	229.46	2.05
203.55	2.30	227.34	2.21
203.09	2.57	226.84	2.40
203.56	2.66	227.28	2.55
204.74	2.80	228.74	2.63
206.91	2.87	230.38	2.30
		229.38	2.35
		228.48	2.35
		227.82	2.33
		227.85	2.28

228.44	2.43
228.92	2.23
229.15	2.05
227.09	2.01
228.49	2.07
229.19	2.17
229.13	2.27
228.99	2.34
228.77	2.36
229.35	2.37
233.15	2.15
232.63	2.39
231.28	2.59
230.88	2.78
232.90	2.91
234.61	2.90
234.78	2.78
234.61	2.74
230.51	2.29
231.30	2.25
231.88	2.19
232.08	2.12
231.89	2.08
231.14	2.05
230.11	2.05
231.29	2.19
233.41	2.11
231.64	2.35
232.88	2.37
233.15	2.33
232.80	2.23
232.09	2.23
232.97	2.32
234.50	2.78
233.85	2.62
233.55	2.46
233.81	2.31
234.32	2.19
234.29	2.05
231.66	2.01
233.17	2.27
234.24	2.48
234.71	2.42
233.92	2.39

233.29	2.35
232.56	2.31
232.09	2.25
232.23	2.16
232.59	2.03
233.73	2.97
232.53	2.89
231.60	2.81
231.38	2.75
231.93	2.78
233.56	2.88
234.60	2.21
233.68	2.24
232.89	2.28
232.44	2.25
231.88	2.20
231.52	2.16
230.94	2.15
234.81	2.01
234.47	2.21
234.21	2.40
234.46	2.51
234.80	2.23
231.95	2.11
230.42	2.17
234.44	2.41
233.31	2.13
232.54	2.33
232.59	2.41
232.69	2.43
232.36	2.41
231.41	2.34
230.64	2.41
230.75	2.32
230.95	2.26
231.43	2.22
232.41	2.21
233.67	2.17
234.81	2.09
233.05	2.09
232.92	2.21
232.08	2.37
231.39	2.56
230.94	2.70

231.26	2.81
232.15	2.85
233.82	2.85
232.52	2.03
233.21	2.13
233.93	2.19
234.29	2.19
234.52	2.15
234.85	2.09
230.44	2.00
232.06	2.04
233.02	2.08
233.58	2.08
234.06	2.10
234.57	2.10
234.31	2.24
234.66	2.44
234.91	2.67
234.63	2.05
234.21	2.13
234.12	2.16
233.84	2.14
233.60	2.15
233.49	2.17
233.42	2.17
231.94	2.16
231.53	2.26
233.79	2.32
234.34	2.44
233.23	2.43
232.61	2.43
232.55	2.43
233.00	2.43
233.91	2.44
233.99	2.20
233.05	2.29
232.92	2.35
233.24	2.31
233.23	2.18
232.61	2.00
233.18	2.11
232.74	2.23
232.43	2.34
232.71	2.45

233.50	2.51
234.64	2.54
233.72	2.60
231.44	2.63
230.35	2.72
231.48	2.80
231.52	2.72
231.91	2.71
233.50	2.83
234.68	2.56
233.44	2.55
231.94	2.51
230.78	2.52
230.56	2.50
230.79	2.43
231.45	2.33
232.55	2.19
234.63	2.10
234.93	2.33
234.92	2.57
233.35	2.55
232.28	2.60
231.85	2.63
231.57	2.63
232.08	2.66
234.33	2.67
234.51	2.05
234.28	2.21
233.92	2.29
233.58	2.33
233.89	2.35
234.68	2.36
230.08	2.05
230.94	2.04
231.69	2.04
231.91	2.09
231.96	2.13
232.09	2.18
232.29	2.20
232.51	2.16
231.80	2.02
229.97	2.03
231.05	2.10
231.08	2.14

230.10	2.21
230.60	2.55
233.73	2.70
234.63	2.04
233.49	2.14
232.56	2.18
231.46	2.22
230.47	2.25
231.86	2.49
232.62	2.61
233.50	2.67
234.70	2.70
234.81	2.17
233.84	2.08
233.13	2.02
234.84	2.24
234.73	2.20
234.83	2.18
234.61	2.35
234.45	2.37
234.03	2.33
233.27	2.26
232.62	2.17
232.08	2.05
230.38	2.38
232.02	2.43
233.35	2.47
234.16	2.51
234.88	2.58
234.28	2.70
233.43	2.86
233.31	3.02
233.46	3.13
233.88	3.19
234.71	3.25
232.67	3.00
230.83	2.80
230.17	2.63
230.49	2.50
230.74	2.37
231.19	2.25
231.77	2.13
231.83	2.04
231.48	2.03

231.62	2.05
231.95	2.05
232.15	2.05
232.87	2.07
233.74	2.08
234.64	2.04
234.04	2.19
233.49	2.38
233.36	2.48
233.88	2.52
234.36	2.50
234.91	2.49
232.01	2.89
233.41	2.89
233.95	2.83
234.36	2.71
233.96	2.53
232.62	2.33
230.84	2.14
231.40	2.14
231.79	2.29
232.11	2.39
232.37	2.43
232.49	2.45
233.15	2.45
234.16	2.38
234.78	2.10
233.59	2.12
232.50	2.14
232.06	2.09
232.16	2.03
231.96	2.06
230.95	2.31
230.92	3.16
234.06	2.53
233.33	2.64
233.25	2.69
233.53	2.70
233.92	2.67
234.62	2.63
230.57	2.02
232.23	2.21
233.06	2.34
233.64	2.39

234.15	2.37
234.71	2.33
229.95	2.17
230.19	2.11
230.46	2.10
230.14	2.07
230.35	2.09
231.42	2.14
231.29	2.09
230.66	2.08
231.63	2.13
232.41	2.10
233.35	2.05
233.99	2.04
234.22	2.10
234.12	2.14
234.04	2.15
234.31	2.13
230.64	2.34
232.30	2.49
232.82	2.49
233.00	2.46
234.41	2.38
233.57	2.10
231.77	2.09
230.31	2.11
234.25	2.01
233.46	2.06
232.09	2.12
230.56	2.19
231.60	2.14
234.20	2.06
230.69	2.10
231.18	2.30
231.57	2.36
232.04	2.35
232.49	2.24
232.64	2.05
230.51	2.41
230.71	2.09
229.97	2.23
231.84	2.31
233.34	2.37
233.75	2.40

234.19	2.34
231.55	2.11
231.57	2.22
231.38	2.20
230.31	2.20
230.37	2.04
231.57	2.05
233.05	2.06
234.29	2.04
234.22	2.06
234.79	2.25
234.38	2.50
233.63	2.50
233.30	2.48
234.07	2.46
234.88	2.45
230.06	2.38
231.35	2.42
232.58	2.44
233.33	2.40
233.45	2.34
233.08	2.31
232.93	2.36
233.33	2.41
234.26	2.46
233.94	2.28
232.76	2.35
232.17	2.41
231.99	2.45
231.77	2.48
231.60	2.49
231.57	2.47
231.78	2.46
232.26	2.49
232.78	2.51
233.45	2.53
234.30	2.55
233.52	3.65
232.50	3.82
231.97	3.73
230.05	3.44
230.19	2.48
230.51	2.32
230.95	2.19

231.81	2.07
234.79	2.19
233.76	2.22
233.20	2.22
233.17	2.19
233.78	2.13
234.53	2.03
234.31	2.05
234.06	2.30
233.77	2.44
232.62	2.56
232.28	2.81
233.20	2.94
233.62	2.95
233.80	2.95
234.42	2.88
230.18	2.51
231.94	2.62
232.78	2.64
233.11	2.56
232.95	2.40
232.89	2.23
233.05	2.06
231.23	2.67
233.02	2.70
234.40	2.71
234.85	2.66
234.70	2.63
234.25	2.58
233.69	2.52
233.09	2.44
232.50	2.36
231.99	2.26
231.37	2.15
230.52	2.04
234.31	2.96
232.97	3.04
231.42	3.05
230.24	2.82
231.11	2.78
231.97	2.78
232.71	2.77
232.24	2.67
232.31	2.60

232.39	2.61
233.28	2.68
234.02	2.64
234.54	2.56
234.62	2.42
233.84	2.26
232.36	2.10
233.73	2.08
234.81	2.22
233.95	2.17
232.65	2.13
231.81	2.11
231.47	2.06
232.65	2.01
232.44	2.06
231.52	2.15
232.54	2.27
231.02	2.06
232.09	2.07
234.70	2.11
234.67	2.13
233.95	2.19
232.65	2.14
231.47	2.12
230.14	2.10
230.12	2.16
230.55	2.10
230.45	2.03
232.74	2.01
232.81	2.05
232.42	2.09
232.55	2.11
232.24	2.10
231.07	2.07
230.30	2.40
233.28	2.56
234.01	2.58
232.51	2.33
231.33	2.17
231.00	2.08
231.12	2.00
231.23	2.02
230.27	2.38
230.09	3.00

230.78	2.94
231.81	2.83
233.50	2.73
232.98	2.50
233.56	2.45
234.85	2.40
233.06	2.18
234.77	2.38
234.87	2.72
233.81	2.83
233.59	2.92
233.93	2.92
234.80	2.97
234.16	2.79
233.78	2.77
234.71	2.67
233.95	2.24
233.00	2.43
232.82	2.49
232.93	2.45
233.09	2.33
233.03	2.26
233.24	2.02
230.71	2.44
231.95	2.50
233.63	2.55
234.77	2.48
234.56	2.28
233.37	2.06
234.81	2.20
234.17	2.18
233.58	2.18
233.17	2.16
232.99	2.12
233.35	2.07
233.39	2.00
232.75	2.40
234.51	2.47
234.08	2.40
233.41	2.38
232.37	2.30
231.49	2.24
231.94	2.19
233.30	2.14

231.04	2.22
231.47	2.26
231.65	2.31
231.96	2.35
230.95	2.58
230.27	2.75
230.10	3.16
230.29	3.02
230.41	2.84
230.35	2.65
230.04	2.46
234.39	2.01
232.93	2.08
231.53	2.11
230.32	2.13
230.84	2.29
232.44	2.28
233.32	2.17
233.95	2.03
231.02	2.06
230.91	2.16
231.80	2.25
232.96	2.26
233.66	2.18
233.58	2.07
230.49	2.57
233.05	2.53
233.71	2.37
234.57	2.20
232.82	2.19
231.27	2.20
230.53	2.10
231.44	2.20
232.10	2.29
233.01	2.41
233.42	2.51
233.60	2.57
233.94	2.55
234.85	2.17
234.58	2.23
234.53	2.29
233.63	2.36
233.19	2.46
232.21	2.50

231.17	2.53
230.99	2.57
231.87	2.57
232.89	2.52
233.84	2.46
233.59	2.28
232.58	2.11
231.99	2.05
231.34	2.06
230.73	2.17
230.91	2.35
230.98	2.50
231.31	2.61
231.93	2.66
233.11	2.71
233.75	2.66
233.68	2.58
234.78	2.50
234.69	2.17
233.51	2.13
232.28	2.16
231.99	2.18
233.11	2.21
234.41	2.17
234.43	2.02
233.81	2.70
232.46	2.63
233.25	2.75
233.95	2.89
233.61	2.99
232.97	3.02
232.86	3.03
233.22	3.06
234.03	3.14
234.85	2.40
233.96	2.26
233.27	2.14
232.86	2.04
231.77	2.24
232.81	2.24
231.92	2.13
231.34	2.06
231.80	2.07
232.03	2.09

231.84	2.08
231.75	2.07
231.67	2.03
238.72	3.13
238.77	3.15
238.07	3.22
237.36	3.27
237.21	3.28
237.71	3.26
238.51	3.24
237.42	3.19
237.09	3.26
237.31	3.39
238.41	3.14
237.30	2.96
236.92	2.80
237.74	2.64
234.77	2.21
237.02	2.22
238.72	2.20
238.92	2.19
238.44	2.24
237.06	2.22
236.21	2.18
235.89	2.12
235.57	2.02
234.09	2.33
235.17	2.65
236.22	2.95
237.07	3.22
237.57	3.53
238.29	3.86
236.24	2.03
235.92	2.12
236.24	2.13
236.75	2.13
236.76	2.12
236.81	2.17
237.88	2.25
238.67	2.26
238.47	2.33
237.10	2.37
236.19	2.34
235.91	2.28

235.99	2.19
236.04	2.09
234.12	2.48
235.06	2.50
234.74	2.60
234.63	2.76
235.60	2.83
237.34	2.87
238.85	2.85
238.18	2.17
237.27	2.08
238.62	2.37
237.28	2.33
235.29	2.28
234.78	2.29
236.63	2.41
238.73	2.51
234.85	2.03
236.29	2.08
237.26	2.14
237.77	2.17
237.85	2.17
237.76	2.13
237.47	2.07
238.76	3.73
238.01	3.77
237.73	3.76
237.45	3.62
237.41	3.44
237.78	3.24
238.67	3.03
235.01	3.01
235.72	3.21
236.54	3.23
236.57	3.13
236.14	2.97
235.40	2.80
235.10	2.66
235.67	2.53
237.27	2.43
238.29	2.39
236.78	2.45
235.21	2.53
234.16	2.59

235.76	2.48
237.63	2.36
234.58	2.62
235.68	2.62
236.14	2.55
235.99	2.52
235.78	2.49
235.38	2.44
237.41	2.11
237.61	2.28
237.87	2.43
238.41	2.56
238.51	3.00
237.97	2.85
237.25	2.67
236.54	2.51
236.24	2.38
236.01	2.25
235.85	2.13
235.41	2.01
238.65	2.26
237.94	2.55
237.60	2.68
237.68	2.74
237.85	2.77
237.51	2.72
236.54	2.60
235.56	2.44
234.86	2.26
234.27	2.09
238.91	2.93
238.66	2.95
238.43	2.92
238.51	2.88
238.74	2.85
238.93	2.84
238.95	2.84
238.84	3.02
237.61	2.98
236.37	2.97
235.20	2.99
234.07	3.00
234.68	3.00
236.52	3.09

237.55	3.14
237.79	3.14
237.74	3.11
237.05	3.05
236.30	3.03
236.11	3.05
236.88	3.10
237.51	3.14
237.61	3.16
237.69	3.13
237.68	3.06
237.40	2.98
237.49	2.95
237.94	2.93
238.25	2.81
238.57	2.65
237.96	2.09
236.89	2.14
236.10	2.20
235.79	2.22
235.70	2.22
235.43	2.20
234.71	2.19
234.38	2.09
234.65	2.53
237.73	2.56
238.83	2.71
237.14	2.73
236.51	2.62
235.79	2.40
237.42	2.47
238.13	2.76
236.81	3.01
236.79	3.18
237.39	3.33
238.18	3.29
238.74	3.26
234.54	2.07
234.35	2.20
234.29	2.33
234.42	2.42
235.96	2.39
238.79	2.42
234.16	2.19

234.57	2.26
234.96	2.35
235.03	2.42
234.44	2.46
234.34	2.53
236.90	2.60
238.45	2.65
238.24	2.72
237.83	2.79
237.65	2.74
236.85	2.55
237.29	2.41
238.15	2.29
235.21	2.13
236.53	2.44
237.50	2.56
238.21	2.63
238.88	2.64
237.33	2.52
236.25	2.32
235.47	2.06
234.12	2.51
234.50	2.48
234.30	2.50
234.16	2.58
234.31	2.72
235.64	2.71
236.93	2.60
237.62	2.46
238.74	2.35
234.60	2.25
235.41	2.28
234.71	2.31
234.41	2.29
234.74	2.25
235.17	2.17
235.82	2.10
237.02	2.02
238.86	2.10
238.39	2.22
237.97	2.33
237.19	2.42
236.29	2.48
234.88	2.46

234.01	2.42
234.26	2.35
234.54	2.18
236.62	2.13
236.25	2.54
235.51	2.68
235.22	2.69
235.73	2.64
236.31	2.58
236.78	2.52
237.02	2.47
237.60	2.38
238.09	2.23
238.12	2.08
235.25	2.01
234.00	2.31
235.03	2.30
236.49	2.34
237.69	2.31
238.49	2.20
238.59	2.06
236.33	2.04
236.23	2.07
236.32	2.05
236.03	2.01
235.84	2.01
235.55	2.03
234.31	2.08
234.70	2.39
235.84	2.54
236.19	2.65
236.11	2.80
235.43	2.90
235.64	3.01
235.58	3.04
235.94	3.04
238.44	3.08
234.42	3.01
235.17	3.11
236.08	3.08
236.79	2.94
236.82	2.77
236.13	2.61
235.52	2.44

234.99	2.25
234.64	2.07
238.21	2.09
237.98	2.16
238.48	2.22
238.34	2.24
237.69	2.17
237.36	2.12
237.36	2.11
237.58	2.09
238.37	2.06
238.77	2.58
237.33	2.62
235.23	2.61
234.67	3.00
236.49	3.13
238.36	3.27
238.22	3.62
238.76	2.08
237.69	2.29
236.64	2.41
235.28	2.52
235.19	2.73
236.84	2.80
237.68	2.22
237.94	2.46
238.18	2.62
238.53	2.68
238.82	2.59
238.53	2.41
238.07	2.25
238.32	2.19
237.22	2.02
238.49	2.08
238.43	2.16
237.34	2.19
236.79	2.26
236.59	2.28
236.31	2.29
235.93	2.29
235.17	2.24
234.20	2.17
234.05	2.20
235.54	2.20

236.63	2.14
237.52	2.16
236.23	2.02
236.89	2.11
237.47	2.19
237.93	2.27
238.49	2.36
238.55	2.53
237.18	2.53
235.03	2.52
234.40	2.08
234.53	2.15
234.64	2.20
234.49	2.24
234.59	2.27
235.14	2.28
235.94	2.23
236.80	2.17
237.79	2.11
238.63	2.01
234.35	2.78
234.53	2.63
234.37	2.57
234.21	2.59
234.60	2.66
235.32	2.70
236.00	2.71
236.49	2.69
236.78	2.66
237.68	2.63
238.78	2.62
236.18	2.57
236.18	3.14
236.35	3.49
236.49	3.60
236.75	3.55
237.31	3.44
238.15	3.29
238.68	3.15
238.32	2.98
236.13	2.74
234.27	2.64
234.42	2.14
234.80	2.38

235.64	2.53
236.70	2.57
237.60	2.50
238.83	2.41
234.14	2.49
234.55	2.60
234.70	2.59
233.96	2.66
234.46	2.65
235.86	2.61
237.98	2.52
234.24	3.66
234.34	3.62
235.15	3.60
235.49	3.49
235.32	3.35
234.66	3.23
234.68	3.22
235.52	3.27
235.47	3.28
237.00	3.34
238.84	3.37
238.15	2.78
237.67	2.89
237.58	2.99
237.79	3.01
238.07	2.91
238.20	2.79
237.56	2.03
237.96	2.30
238.41	2.52
238.80	2.64
238.61	2.28
238.31	2.45
238.10	2.67
238.08	2.90
238.09	3.08
237.94	3.20
237.77	3.26
237.69	3.27
237.76	3.26
238.03	3.26
237.29	3.05
236.87	2.82

236.96	2.68
237.40	2.67
237.89	2.79
238.32	2.96
238.90	3.15
238.92	2.40
238.32	2.25
238.21	2.13
238.46	2.03
234.34	2.96
235.34	3.05
234.54	3.04
234.61	2.97
234.99	2.77
236.87	2.52
238.87	2.39
238.81	2.45
235.70	2.21
234.94	2.32
234.43	2.35
234.66	2.35
235.56	2.29
236.46	2.18
236.83	2.03
235.18	2.92
235.66	3.05
236.04	3.09
235.82	3.02
235.51	2.96
235.99	2.99
237.00	3.05
237.72	3.02
238.32	2.94
238.68	2.89
238.74	2.73
235.00	2.11
234.51	2.20
234.19	2.25
234.04	2.26
234.22	2.20
234.44	2.27
233.97	2.30
234.79	2.61
236.30	2.63

238.00	2.60
238.88	2.52
238.27	2.31
237.56	2.36
238.42	2.41
238.50	2.39
236.63	2.44
235.26	2.58
235.75	3.27
238.44	3.22
238.33	2.50
238.13	2.44
237.92	2.32
237.63	2.19
237.32	2.07
234.54	2.72
235.54	2.87
236.30	2.97
237.02	3.02
237.68	3.03
238.36	3.02
238.69	3.09
237.65	2.21
238.60	2.45
237.35	2.28
236.19	2.27
235.76	2.25
235.60	2.28
235.70	2.37
236.05	2.48
236.55	2.58
237.07	2.68
237.11	2.77
237.11	2.82
237.42	3.00
237.24	2.99
236.94	3.08
237.20	3.22
237.52	3.29
237.37	3.25
237.29	3.17
237.44	3.04
237.73	2.90
238.11	2.77

238.46	2.65
238.40	2.52
237.50	2.36
236.50	2.21
235.55	2.10
234.89	2.01
234.24	2.01
234.89	2.14
234.65	2.18
234.29	2.28
234.06	2.39
235.06	2.55
236.59	2.50
237.10	2.44
237.13	2.41
237.84	2.43
238.54	2.43
238.87	2.33
238.45	2.35
238.69	2.46
238.86	2.72
238.71	2.80
238.55	2.89
238.06	3.01
237.26	3.16
236.73	3.33
236.10	3.38
235.11	3.28
235.20	3.21
235.36	3.09
235.33	3.01
235.39	2.95
235.43	2.92
235.11	2.89
234.94	2.91
235.04	2.97
235.19	3.01
235.43	3.02
235.74	3.00
235.06	3.17
235.17	3.11
236.13	3.02
237.45	2.93
238.61	2.82

238.32	2.43
237.46	2.31
236.76	2.21
236.33	2.11
234.19	2.29
235.86	2.23
237.66	2.14
238.79	2.08
237.64	2.06
236.22	2.07
234.83	2.08
234.32	3.26
238.90	2.75
238.62	2.22
235.28	3.00
236.76	2.95
237.45	2.87
236.85	2.75
237.06	2.66
237.96	2.64
238.86	2.72
236.25	2.25
237.53	2.40
236.39	2.45
236.41	2.50
237.01	2.49
238.15	2.46
238.71	2.41
238.86	2.25
238.50	2.19
238.00	2.10
234.16	2.01
235.72	2.15
236.18	2.26
237.11	2.28
237.78	2.20
237.13	2.05
236.19	2.24
235.76	2.42
235.86	2.53
235.97	2.58
235.60	2.61
235.45	2.64
235.07	2.60

234.53	2.54
234.26	2.47
234.14	2.35
234.32	2.19
235.09	2.09
237.09	2.04
234.16	2.53
236.22	2.69
238.18	2.79
238.30	2.29
236.97	2.30
236.80	2.38
237.20	2.48
236.70	2.51
234.67	2.59
235.16	2.02
234.30	2.33
234.82	2.55
235.50	2.48
236.18	2.47
237.86	2.48
238.46	2.09
238.15	2.63
237.31	3.03
236.76	3.27
237.37	3.39
237.76	3.43
238.18	3.45
238.19	3.21
234.31	2.28
234.88	2.26
235.59	2.29
236.48	2.38
236.93	2.44
236.80	2.43
236.45	2.36
236.12	2.25
235.85	2.04
234.38	2.52
234.56	2.47
234.56	2.39
234.88	2.30
235.28	2.20
235.69	2.09

234.23	2.32
235.24	2.35
236.14	2.39
236.50	2.43
236.58	2.41
236.07	2.34
235.17	2.24
234.05	2.16
238.39	2.10
237.53	2.26
237.04	2.39
236.67	2.47
236.69	2.47
237.01	2.37
237.39	2.17
235.16	2.12
235.88	2.14
236.07	2.16
235.38	2.14
234.39	2.09
234.11	2.01
234.76	2.56
236.68	2.58
238.05	2.56
238.68	2.51
238.54	2.41
238.04	2.29
237.29	2.17
236.22	2.08
235.12	2.02
234.58	2.26
236.32	2.30
237.45	2.28
238.90	2.32
238.14	2.32
237.42	2.27
237.24	2.20
237.01	2.10
236.11	2.03
235.23	2.00
234.01	2.18
234.68	2.36
235.51	2.47
236.39	2.51

237.17	2.45
237.64	2.32
237.37	2.18
237.53	2.10
236.99	2.03
234.16	2.41
234.12	2.52
234.50	2.42
235.42	2.35
236.08	2.22
236.31	2.07
234.37	2.49
235.09	2.49
235.54	2.47
235.74	2.43
235.57	2.38
235.00	2.32
234.28	2.30
234.34	2.46
234.86	2.38
235.50	2.34
236.03	2.34
236.53	2.41
237.25	2.51
238.18	2.67
234.98	2.46
236.70	2.54
236.99	2.57
237.01	2.51
236.94	2.39
236.69	2.28
236.55	2.21
236.65	2.16
236.67	2.10
236.31	2.03
234.16	2.24
235.23	2.47
236.48	2.64
236.19	2.56
236.22	2.58
236.56	2.66
236.67	2.66
237.16	2.63
238.50	2.61

235.41	3.33
236.01	3.16
237.41	3.10
238.48	3.02
238.60	2.87
238.77	2.82
238.23	3.00
238.61	2.08
237.13	2.01
237.50	2.08
237.32	2.10
236.95	2.09
236.74	2.09
237.12	2.09
237.63	2.05
234.27	2.19
235.70	2.26
237.20	2.33
238.07	2.34
238.22	2.30
238.46	2.24
236.96	2.02
237.02	2.10
236.99	2.13
236.76	2.10
236.53	2.06
236.34	2.00
236.56	2.24
236.96	2.32
237.06	2.43
237.52	2.56
238.15	2.63
238.84	2.62
237.87	2.11
237.75	2.13
237.35	2.14
236.73	2.10
236.28	2.07
236.25	2.02
238.57	2.02
238.87	2.07
238.73	2.05
237.96	2.11
237.34	2.10

236.68	2.22
235.71	2.49
234.67	2.78
235.99	2.02
236.40	2.37
237.18	2.73
237.95	3.05
238.79	3.32
238.25	2.77
236.99	2.40
235.83	2.15
238.66	2.21
238.89	2.49
238.40	2.85
236.39	3.23
234.30	3.53
234.98	3.36
236.38	3.31
237.40	3.16
238.36	2.99
235.43	2.05
235.65	2.32
235.86	2.60
236.40	2.89
237.06	3.13
238.04	3.25
238.85	3.11
237.45	2.78
236.50	2.46
236.25	2.24
236.96	2.06
235.22	2.18
235.18	2.30
234.92	2.25
234.89	2.25
235.25	2.28
234.73	2.24
234.87	2.26
235.27	2.26
234.66	2.22
234.10	2.24
234.43	2.29
235.37	2.31
236.16	2.36

236.33	2.53
237.55	2.57
238.72	2.56
235.57	2.54
237.13	2.66
237.86	2.77
237.79	2.77
237.10	2.64
236.27	2.44
235.82	2.25
237.21	2.14
234.79	2.05
235.86	2.08
236.55	2.14
237.26	2.19
238.14	2.21
238.83	2.18
238.85	2.15
237.70	2.03
236.56	2.14
237.02	2.20
237.71	2.17
237.96	2.10
237.92	2.04
236.72	2.28
237.82	2.40
237.42	2.34
236.68	2.27
236.44	2.21
236.16	2.11
234.76	2.35
235.88	2.37
237.16	2.43
237.21	2.48
237.68	2.59
238.51	2.64
238.72	2.01
235.55	2.57
236.54	2.67
236.50	2.69
235.46	2.68
235.01	2.96
234.96	2.86
234.12	2.83

234.50	2.47
235.26	2.28
236.25	2.16
237.84	2.05
234.73	2.29
234.44	2.57
234.54	2.72
234.78	2.82
235.21	2.88
234.90	2.96
235.55	3.01
236.92	2.96
238.59	2.84
238.18	2.52
235.57	2.10
235.77	2.37
235.86	2.59
235.90	2.76
235.78	2.84
235.20	2.80
235.34	2.74
235.38	2.64
235.20	2.50
235.14	2.38
235.07	2.26
235.40	2.16
236.31	2.07
238.32	2.09
237.00	2.17
234.86	2.32
236.50	2.34
238.54	2.45
238.88	2.65
237.11	2.48
235.09	2.43
234.18	2.39
234.50	2.41
235.12	2.42
235.41	2.43
236.04	2.44
236.71	2.43
237.82	2.46
236.27	2.02
237.23	2.03

238.07	2.05
238.46	2.08
238.26	2.12
237.57	2.16
235.75	2.12
234.68	2.18
234.04	2.20
235.06	2.19
235.94	2.46
236.58	2.67
236.74	2.78
236.21	2.79
235.75	2.80
235.12	2.86
234.71	2.96
235.17	3.04
235.81	3.09
236.76	3.12
236.27	3.10
235.63	3.09
234.83	2.97
234.21	2.76
235.52	2.03
237.51	2.13
238.50	2.68
237.31	2.54
235.90	2.41
234.15	2.32
235.99	3.32
237.04	3.35
238.42	3.51
238.14	3.38
235.76	2.15
237.51	2.13
238.39	2.09
238.48	2.08
238.38	2.09
237.91	2.23
237.72	2.13
234.88	2.38
236.43	2.36
237.32	2.28
237.69	2.21
237.94	2.16

237.62	2.09
237.12	2.01
234.03	2.59
234.65	2.54
234.94	2.49
235.61	2.47
236.62	2.45
237.78	2.42
238.95	2.39
237.56	2.07
238.31	2.33
238.69	2.46
238.38	2.48
237.80	2.41
236.75	2.31
235.95	2.16
235.25	2.01
237.70	2.11
234.80	2.12
235.27	2.18
235.96	2.27
236.39	2.39
237.51	2.56
234.77	2.04
236.89	2.15
238.51	2.19
237.97	2.13
237.00	2.24
236.49	2.36
236.21	2.41
235.92	2.33
235.05	2.17
237.22	2.30
236.17	2.75
236.09	3.07
236.14	3.14
236.40	3.27
235.74	3.27
234.77	3.13
235.44	3.05
237.63	3.06
234.90	2.74
236.17	2.79
237.30	2.81

238.36	2.81
238.92	2.69
238.09	2.56
237.58	2.48
237.19	2.42
237.13	2.40
237.11	2.36
236.72	2.26
236.45	2.15
236.21	2.03
234.68	2.37
236.09	2.38
235.26	2.34
235.40	2.38
235.75	2.34
235.79	2.24
235.77	2.12
234.16	2.28
235.83	2.25
237.40	2.29
238.68	2.35
238.31	2.25
237.39	2.26
236.66	2.25
236.09	2.23
235.61	2.21
237.83	2.02
237.72	2.28
238.11	2.47
238.63	2.54
238.41	2.49
238.12	2.44
237.49	2.42
236.60	2.36
235.79	2.28
234.92	2.14
234.36	2.71
236.55	2.71
235.40	2.06
235.73	2.24
234.61	2.32
233.96	2.50
233.96	2.52
234.45	2.50

236.14	2.47
238.14	2.40
234.16	2.47
235.28	2.35
235.52	2.23
236.04	2.16
236.14	2.10
237.09	2.08
237.79	2.04
237.89	2.22
236.67	2.38
235.68	2.43
234.55	2.50
234.97	2.60
234.99	2.69
234.59	2.79
234.07	3.23
235.00	3.30
235.99	3.35
235.77	3.25
235.65	3.35
236.30	3.59
237.11	3.66
238.13	3.71
238.76	3.68
235.65	2.07
234.91	2.19
234.49	2.32
234.29	2.43
234.21	2.49
234.24	2.50
234.39	2.48
237.99	3.03
238.22	3.07
238.12	3.01
237.40	3.44
239.56	3.69
238.57	3.15
238.33	2.39
237.79	2.58
239.63	2.46
237.50	2.91
238.97	3.03
238.78	2.18

237.60	2.06
238.74	2.17
239.79	2.32
238.37	2.67
238.94	2.60
239.14	2.49
238.96	2.38
238.33	2.26
237.46	2.15
239.79	2.48
238.47	2.50
237.91	2.58
238.05	2.63
238.26	2.61
238.61	2.57
239.18	2.53
239.60	2.53
239.86	2.57
239.87	2.61
239.38	2.57
239.18	2.44
238.88	2.29
238.72	2.18
239.03	2.12
239.54	2.10
238.91	2.18
239.37	2.26
239.72	2.31
239.74	2.29
239.14	2.19
238.01	2.04
239.94	3.48
238.83	3.53
237.83	3.52
238.01	2.65
238.41	2.45
238.49	2.27
238.34	2.13
237.86	2.02
238.76	2.25
238.29	2.82
238.25	3.02
238.31	3.06
238.50	3.09

238.18	2.99
238.28	2.14
238.58	2.29
238.76	2.40
238.73	2.49
238.80	2.53
239.05	2.51
239.34	2.45
239.57	2.40
239.78	2.36
239.82	2.34
239.56	2.33
238.86	2.34
238.40	2.30
237.84	2.25
238.18	2.09
239.57	2.08
239.66	2.41
239.12	2.59
239.03	2.74
239.21	2.86
238.97	2.98
239.05	3.11
239.98	3.17
239.79	2.06
239.82	2.14
239.64	2.26
239.53	2.40
239.28	2.54
238.73	2.60
238.18	2.64
237.65	2.71
237.45	2.67
237.43	2.67
237.62	2.67
237.42	2.69
237.61	2.78
238.04	2.85
237.80	2.37
238.72	2.26
239.03	2.15
238.49	2.05
239.38	2.54
239.67	2.17

238.88	2.37
238.28	2.30
239.03	2.26
239.70	2.27
239.73	2.13
239.64	2.01
238.97	2.18
238.29	2.41
237.79	3.09
238.44	3.02
238.93	2.89
239.71	2.77
237.44	2.45
238.22	2.71
238.97	2.88
239.47	2.93
239.64	2.93
239.85	2.88
239.56	2.43
239.44	2.53
239.62	2.66
239.48	2.69
239.16	2.63
239.29	2.63
239.60	2.68
239.25	2.65
238.90	2.57
238.46	2.46
238.43	2.34
239.33	2.23
237.72	2.20
238.77	2.38
239.30	2.53
238.98	2.53
238.55	2.45
238.23	2.33
237.60	2.21
238.16	2.02
238.45	2.10
238.74	2.19
239.55	2.26
238.41	2.34
237.96	3.22
238.28	3.35

237.80	3.43
237.71	3.45
238.30	2.11
238.81	2.50
238.75	2.75
238.91	2.89
238.75	2.95
238.33	3.00
238.59	3.10
238.42	3.05
238.37	2.89
238.07	2.66
237.83	2.44
237.58	2.21
237.87	2.57
238.64	2.59
239.21	2.61
239.71	2.62
239.99	2.57
239.77	2.58
239.34	2.53
239.40	2.48
239.24	2.47
238.55	2.48
237.87	2.51
237.82	2.49
238.53	2.40
239.63	2.27
238.90	3.19
239.84	3.14
239.18	2.46
237.50	2.53
238.05	2.53
239.62	2.40
237.45	2.36
238.55	2.30
239.03	2.22
239.28	2.18
239.69	2.18
239.97	2.22
239.77	2.18
238.37	2.00
237.73	2.54
238.22	2.50

238.69	2.43
238.78	2.35
238.15	2.20
237.65	2.11
238.03	3.16
238.62	3.33
239.18	3.47
239.72	3.57
239.84	3.45
239.89	3.30
239.73	2.70
238.88	2.56
237.97	2.41
238.71	2.15
237.74	2.19
237.55	2.36
238.04	2.37
238.87	2.37
239.87	2.39
238.70	2.00
239.82	2.02
239.73	2.22
239.42	2.17
239.37	2.12
239.80	2.08
238.66	2.09
239.78	2.17
239.85	2.26
239.92	2.33
239.49	2.38
239.37	2.43
237.62	2.30
237.53	2.22
239.19	2.95
237.97	2.34
238.10	2.18
239.58	2.25
238.68	2.10
239.09	2.25
239.47	2.36
239.50	2.35
239.85	2.29
239.71	2.18
238.51	2.06

239.47	2.49
239.60	2.44
238.76	2.49
238.29	2.51
237.93	2.46
237.73	2.36
237.72	2.19
237.65	2.24
237.90	2.45
237.92	2.61
237.86	2.70
237.85	2.73
238.00	2.71
238.29	2.65
238.57	2.56
238.33	2.43
237.80	2.31
239.76	2.01
240.00	2.01
238.58	2.00
237.95	3.26
239.10	2.06
237.56	2.32
237.55	2.66
237.44	2.40
239.05	2.40
238.04	2.60
237.64	2.64
237.79	2.60
237.73	2.62
237.69	2.66
237.76	2.69
239.50	2.66
237.77	2.12
239.08	2.05
239.55	2.02
239.93	2.29
239.01	2.25
237.59	2.27
238.02	2.24
239.33	2.18
237.83	2.67
238.99	2.73
239.52	2.77

239.79	2.74
239.68	2.62
239.37	2.48
238.79	2.36
238.57	2.27
237.95	2.21
237.43	2.14
237.62	2.50
238.33	2.79
238.83	2.98
239.11	3.08
239.11	3.08
238.52	2.91
239.46	2.88
237.51	2.17
239.04	2.26
239.47	2.28
238.91	2.23
238.09	2.17
237.62	2.13
237.54	2.11
238.45	2.24
239.36	2.22
237.90	2.20
238.32	2.42
238.68	2.64
238.62	2.81
238.95	2.87
239.11	2.82
238.69	2.67
238.03	2.49
237.84	2.32
237.71	2.14
238.83	2.22
239.22	2.19
239.50	2.19
239.63	2.23
239.66	2.24
239.37	2.26
239.14	2.33
239.24	2.37
239.31	2.34
239.27	2.32
239.69	2.33

238.12	2.14
238.58	2.15
239.84	2.36
239.93	2.85
239.49	2.93
238.52	2.89
239.34	3.05
237.60	2.77
237.46	2.96
238.18	3.04
238.80	3.03
239.19	3.02
239.26	3.05
238.87	3.18
237.82	3.27
237.76	3.26
238.15	3.14
238.95	2.98
239.63	2.80
239.49	2.04
238.04	2.02
237.58	2.59
238.22	3.17
238.43	3.71
238.94	4.20
239.14	4.48
238.90	4.57
238.83	4.56
239.10	4.53
239.62	4.55
238.16	3.35
238.62	3.24
238.77	3.15
239.17	3.12
239.20	3.20
239.15	3.32
238.87	3.37
238.45	3.27
237.86	2.97
237.54	2.07
238.41	2.20
239.27	2.25
239.40	2.23
238.84	2.17

238.11	2.14
237.62	2.12
239.14	2.07
237.71	2.00
238.40	2.33
239.21	2.44
239.82	2.45
237.51	3.15
238.49	3.28
238.96	3.43
237.82	3.53
238.01	3.62
238.42	3.64
238.81	3.58
238.77	3.32
237.61	2.62
239.02	2.74
239.25	2.80
239.31	2.83
239.19	2.75
238.50	2.62
237.98	2.51
237.85	2.41
237.74	2.32
237.64	2.26
237.50	3.78
237.93	3.94
238.15	3.92
238.87	3.88
239.17	3.82
239.85	3.54
239.04	3.22
237.71	2.97
238.18	2.63
239.11	2.49
239.81	2.30
239.59	2.08
238.66	2.42
239.15	2.46
238.12	2.57
237.74	2.51
237.57	2.58
238.27	2.64
239.26	2.62

237.45	2.08
239.18	2.11
238.16	2.59
237.37	3.30
237.51	3.21
239.57	3.18
237.70	2.15
238.12	2.35
238.49	2.41
239.75	2.48
239.28	2.44
238.80	2.27
239.87	2.23
239.92	2.21
239.77	2.37
238.82	2.58
239.10	2.82
238.75	2.68
238.25	2.61
238.39	2.59
238.44	2.56
238.97	2.56
237.94	2.17
237.43	2.48
238.18	2.65
237.82	2.59
237.67	2.33
238.19	2.10
237.99	2.00
239.54	2.07
239.67	2.23
239.53	2.50
238.50	2.26
238.05	2.09
238.13	2.54
238.80	2.22
239.42	2.43
239.71	2.51
239.69	2.46
238.94	2.30
238.24	2.11
237.57	2.67
238.89	2.72
238.70	2.60

238.64	2.40
238.30	2.21
238.05	2.05

Tabella 7: Altezze d'onda massime al culmine della mareggiata e direzioni medie di provenienza al largo di Sanremo (dai dati ERA5)

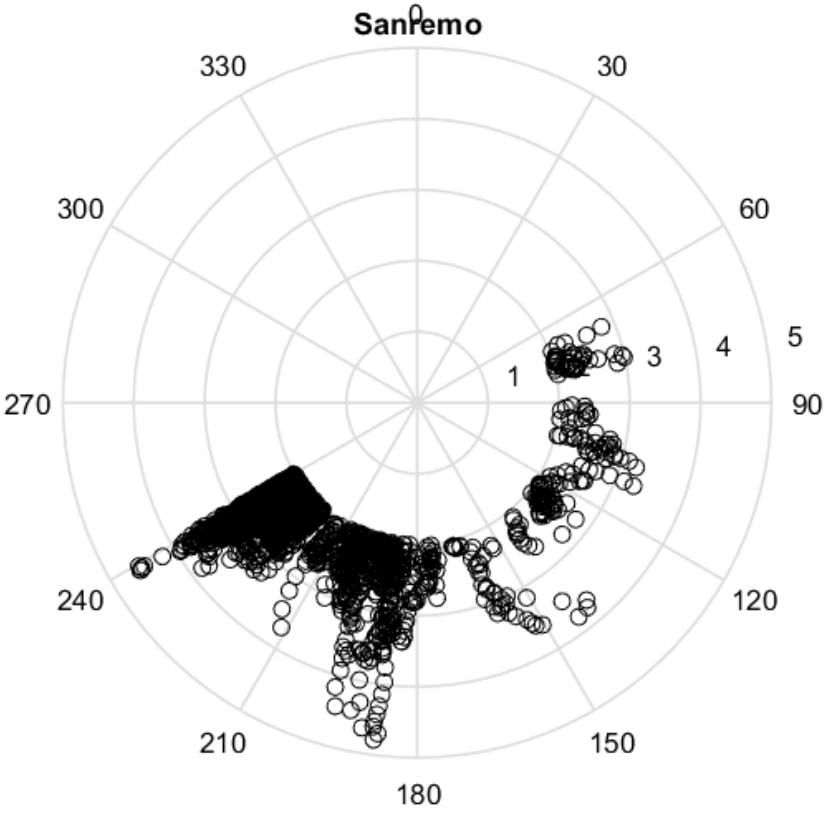


Figura 20: Diagramma polare delle altezze d'onda significative massime al culmine della mareggiata in funzione della direzione media di provenienza al largo di Sanremo (dai dati ERA5)

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

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

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

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

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

dove:

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

B è il parametro del sito;

A è il parametro di scala;

k è il parametro di forma.

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

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

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

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

in cui:

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

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

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

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

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

Per tutte e 5 le distribuzioni (FT-I e Weibull con *k* = 0.75, 1.00, 1.40 e 2.00), sono stati considerati gli eventi a partire da un valore di soglia $\hat{H}_s$, fissato pari a 3 m o 4 m, a secondo del settore direzionale estremo selezionato. I parametri *A* e *B* vengono determinati verificando l'adattabilità ai dati delle 5 funzioni, attraverso un'analisi di regressione lineare effettuata con il metodo dei minimi quadrati. I calcoli sono basati sull'analisi di regressione lineare della relazione:

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

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

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

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

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 alto valore del coefficiente di correlazione, R^2. In Tabella 8 vengono mostrati, per il paraggio al largo di Sanremo, i valori dei coefficienti di correlazioni per le distribuzioni di probabilità adottate, evidenziando quelle distribuzioni che forniscono il valore più elevato di R^2. Tali distribuzioni probabilistiche verranno considerate ai fini della determinazione delle altezze d'onda significative a prefissato tempo di ritorno. In particolare, per i settori 60°-90°N, 150°-180°N e 210°-240°N si considera la distribuzione di Weibull con k = 1.4, per il settore angolare 90°-120°N si considera la distribuzione di Weibull con k = 2, per il settore angolare 120°-150°N si considera la distribuzione di Weibull con k = 0.75 e per il settore angolare 180°-210°N si considera la distribuzione di Weibull con k = 1.

Settore 60°-90°		Settore 90°-120°		Settore 120°-150°	
Distribuzione	R^2	Distribuzione	R^2	Distribuzione	R^2
Gumbel	0.944	Gumbel	0.978	Gumbel	0.796
Weibull k=0.75	0.894	Weibull k=0.75	0.799	Weibull k=0.75	0.908
Weibull k=1	0.953	Weibull k=1	0.903	Weibull k=1	0.874
Weibull k=1.4	0.962	Weibull k=1.4	0.971	Weibull k=1.4	0.806
Weibull k=2	0.932	Weibull k=2	0.995	Weibull k=2	0.728

Settore 150°-180°		Settore 180°-210°		Settore 210°-240°	
Distribuzione	R^2	Distribuzione	R^2	Distribuzione	R^2
Gumbel	0.961	Gumbel	0.966	Gumbel	0.989
Weibull k=0.75	0.846	Weibull k=0.75	0.939	Weibull k=0.75	0.903
Weibull k=1	0.937	Weibull k=1	0.989	Weibull k=1	0.976
Weibull k=1.4	0.976	Weibull k=1.4	0.982	Weibull k=1.4	0.997
Weibull k=2	0.967	Weibull k=2	0.935	Weibull k=2	0.974

Tabella 8: Coefficienti di correlazione per le distribuzioni di probabilità adottate al largo di Sanremo (dai dati ERA5)

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

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

dove:

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

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

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

λ (numero medio degli eventi per anno) = NT/K;

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

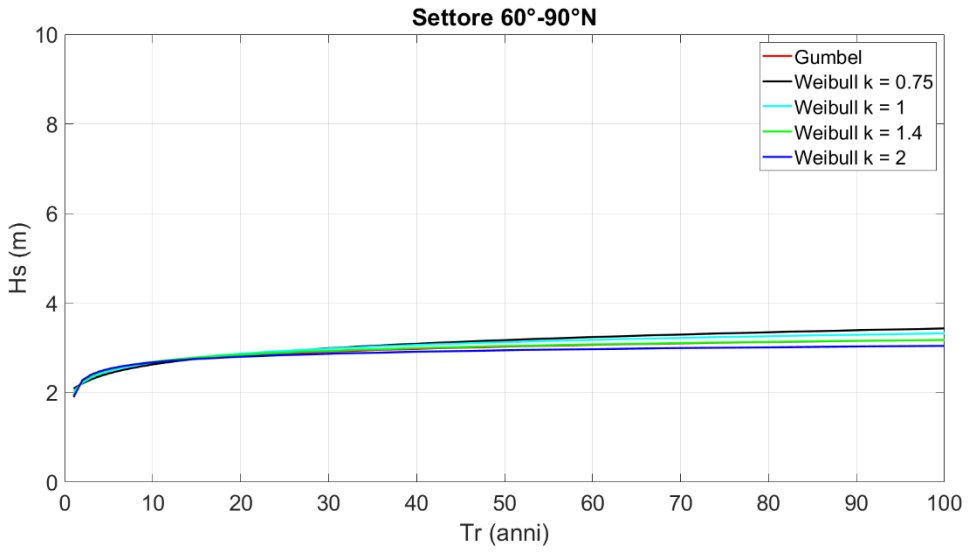
Per i periodi di ritorno più significativi, relativi a T = 10, 25, 50 e 100 anni e per i settori direzionali afferenti al settore di traversia di Sanremo, sono mostrati, rispettivamente, in Tabella 9 i valori di H_s a prefissato tempo di ritorno e i rispettivi valori di periodo medio, T_m, e di periodo di picco, T_p, ottenuti sulla base delle correlazioni altezze-periodi precedentemente determinate.

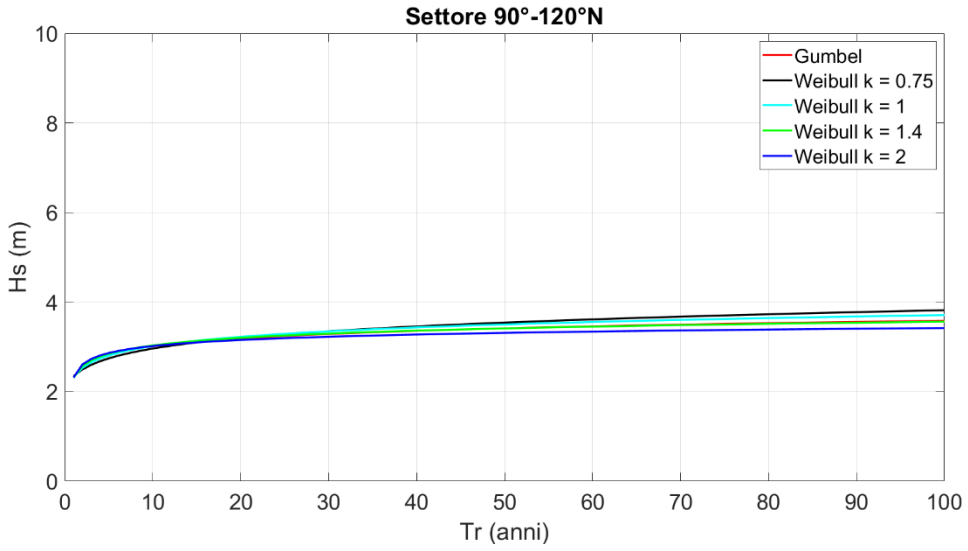
	Settore 60°-90°			Settore 90°-120°			Settore 120°-150°		
T (anni)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)
10	2.69	6.52	7.57	3.02	6.76	7.85	3.00	6.75	7.83
25	2.89	6.67	7.75	3.19	6.89	7.98	3.41	7.03	8.15
50	3.04	6.78	7.86	3.31	6.97	8.07	3.75	7.25	8.39
100	3.18	6.88	7.97	3.42	7.04	8.16	4.11	7.47	8.63

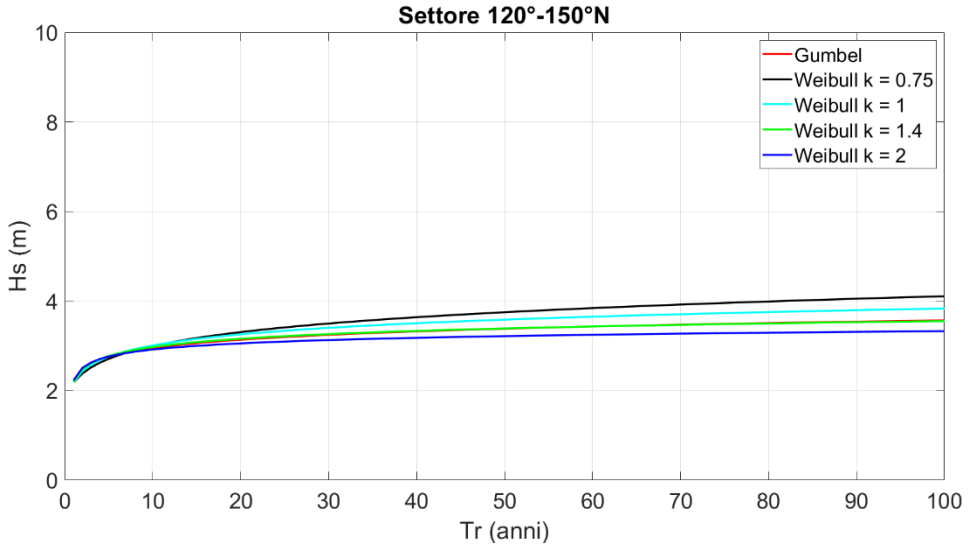
	Settore 150°-180°			Settore 180°-210°			Settore 210°-240°		
T (anni)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)	Hs (m)	Tm (s)	Tp (s)
10	3.32	6.97	8.08	4.58	7.73	8.92	4.30	7.58	8.75
25	3.62	7.17	8.30	5.08	7.99	9.21	4.63	7.76	8.96
50	3.84	7.30	8.45	5.46	8.18	9.42	4.88	7.89	9.10
100	4.04	7.43	8.59	5.84	8.36	9.62	5.12	8.01	9.24

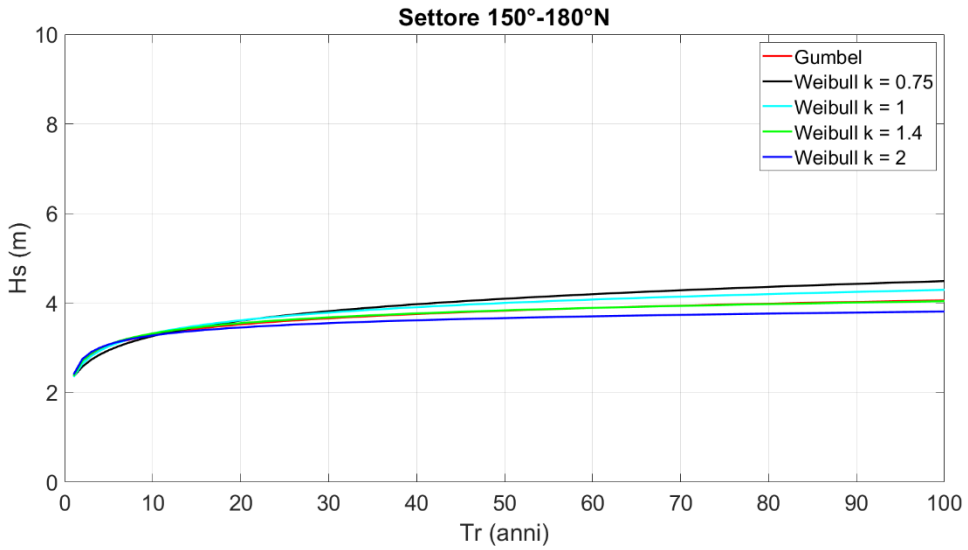
Tabella 9: Eventi estremi direzionali a prefissato tempo di ritorno al largo del paraggio di Sanremo (dai dati ERA5)

La Figura 21 mostra gli andamenti delle altezze d'onda significative in funzione del periodo di ritorno per i diversi settori direzionali considerati al largo di Sanremo 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 e l'altezza d'onda significativa al culmine della mareggiata.




Settore 90°-120°N
Gumbel
Weibull k = 0.75
Weibull k = 1
Weibull k = 1.4
Weibull k = 2
Hs (m)
Tr (anni)


Settore 120°-150°N
Gumbel
Weibull k = 0.75
Weibull k = 1
Weibull k = 1.4
Weibull k = 2
Hs (m)
Tr (anni)


Settore 150°-180°N
Gumbel
Weibull k = 0.75
Weibull k = 1
Weibull k = 1.4
Weibull k = 2
Hs (m)
Tr (anni)

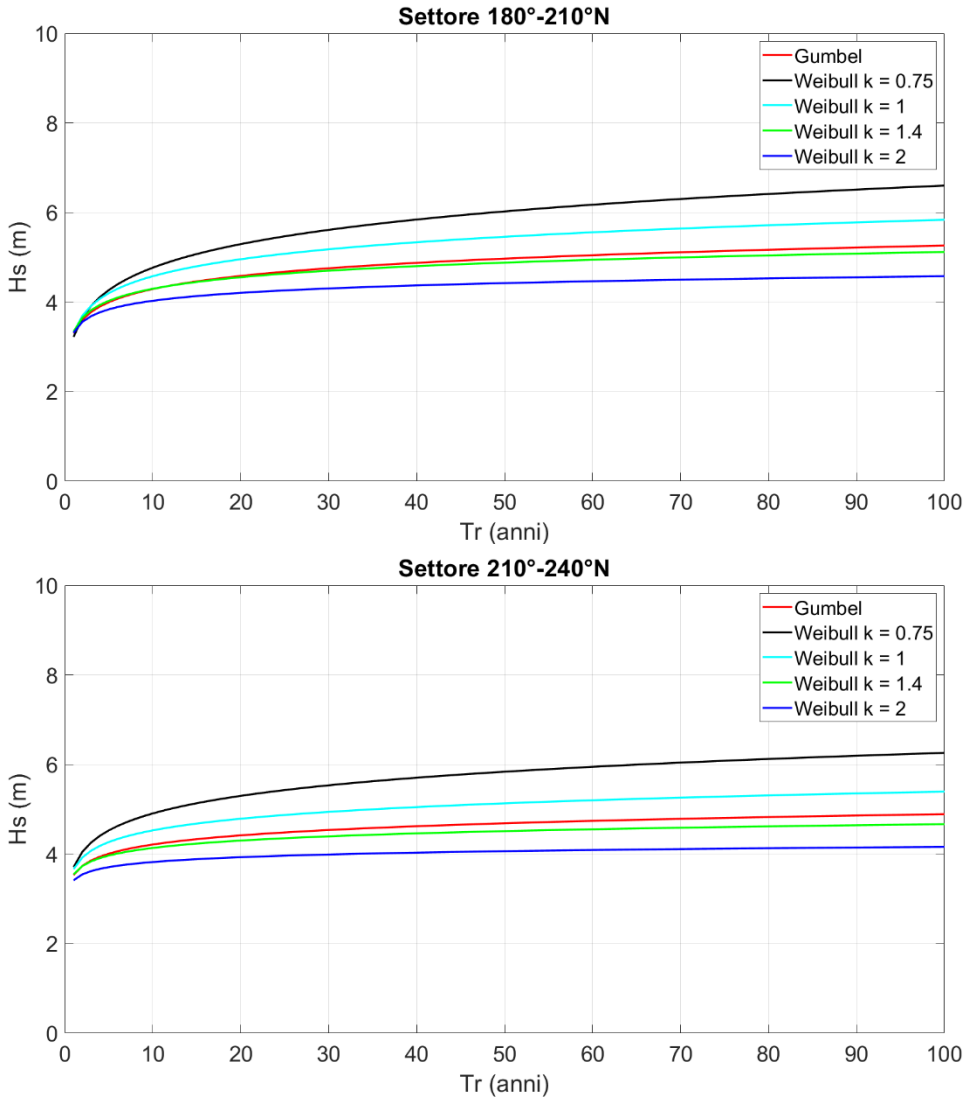


Figura 21: Variazione dell'altezza significativa, Hs (m), in funzione del periodo di ritorno per differenti settori direzionali al largo del paraggio di Sanremo (dai dati ERA5)

7 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 Sanremo dai dati ERA5 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 dell'Università di Delft (Paesi Bassi). 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:

- 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 sia 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:

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

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.

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 Sanremo. La modellazione del fondale marino è stata realizzata sulla base dei rilievi batimetrici della Carta Batimetrica Generale degli Oceani (GEBCO - General Bathymetric Chart of the Ocean, www.gebco.net) aggiornata al 2019 e relativa al tratto di costa di Sanremo, effettuando in seguito un'interpolazione per triangolazione sulle batimetriche rilevate per avere tutti i valori di tutte le profondità nella griglia di calcolo considerata. Occorre osservare che tale rappresentazione batimetrica degli oceani e dei mari del mondo è attualmente operante sotto gli auspici dell'Organizzazione idrografica internazionale e della Commissione oceanografica intergovernativa dell'UNESCO, e nacque con lo scopo di preparare una serie di carte geografiche, a copertura globale, rappresentanti l'andamento del fondale marino, soprattutto ad uso scientifico. Le mappe edite dalla GEBCO, nel corso degli anni, sono diventate le carte di riferimento della batimetria degli oceani a livello globale.

Al fine di coprire in maniera significativa tutta l'area interessata allo studio meteomarino, è stata utilizzata una griglia di calcolo rettangolare avente dimensioni 5000 m in lunghezza e di 6800 m in altezza, avente un numero pari rispettivamente a 200 celle (201 nodi) e 272 celle (273 nodi), aventi ciascuna dimensioni 25 m x 25 m ($\Delta x = \Delta y = 25$ m), che si estendono a partire da profondità di circa 240 m, nella condizione di acque profonde ($d/L > 0.5$) per tutti gli attacchi ondosi, fino alla terraferma. In Figura 22 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale in corrispondenza del litorale di Sanremo, posizionato a Ovest. Sono evidenziati i punti sottocosta, alla batimetrica -10 m, per le analisi meteomarine sottocosta.



Figura 22: Evidenziazione della griglia di calcolo generale, delle principali batimetriche e del punto sottocosta considerato

Sui limiti della griglia di calcolo lato mare (Sud,Ovest ed Est) sono state effettuate le propagazioni del moto ondoso da largo a sottocosta, con particolare attenzione al clima ondoso in corrispondenza del punto sottocosta rappresentativo del tratto costiero oggetto di studio, posti circa alla batimetrica -10 m, ai fini per la modellazione della dinamica evolutiva del litorale e della progettazione di opere costiere antierosione. 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 60°-240°N del paraggio di Sanremo. Nelle propagazioni effettuate con lo SWAN è stato utilizzato uno 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.

In Figura 23 sono mostrati i limiti della griglia di calcolo generale (x = 5000 m e y = 6800 m), posizionata in corrispondenza di un'ampia fascia del litorale di Sanremo. Sono inoltre evidenziate le principali linee batimetriche determinate attraverso l'analisi della cartografia GEBCO.

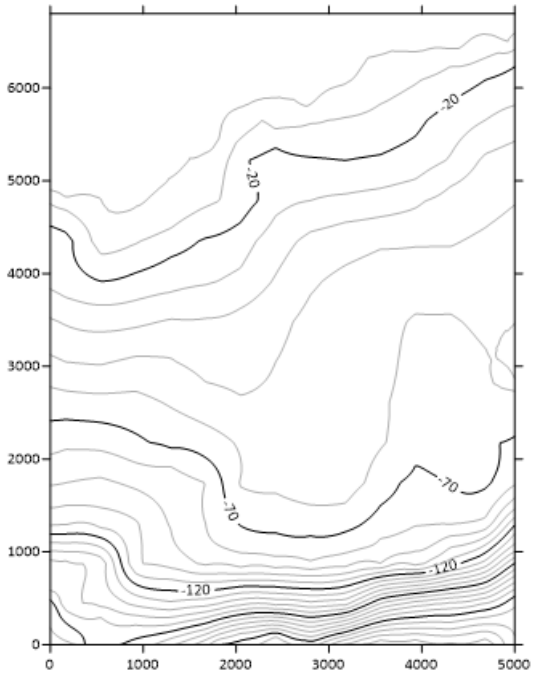


Figura 23: Visualizzazione bidimensionale delle principali batimetriche all'interno della griglia di calcolo

Nella seguente Figura 24 è mostrata una visualizzazione 3D della batimetria del fondale marino, situata all'interno della griglia di calcolo. La successiva Figura 25 mostra invece una visualizzazione 3D della batimetria del fondale marino, con evidenziazione dell'ampiezza delle mesh quadrate adottate (25 m x 25 m).

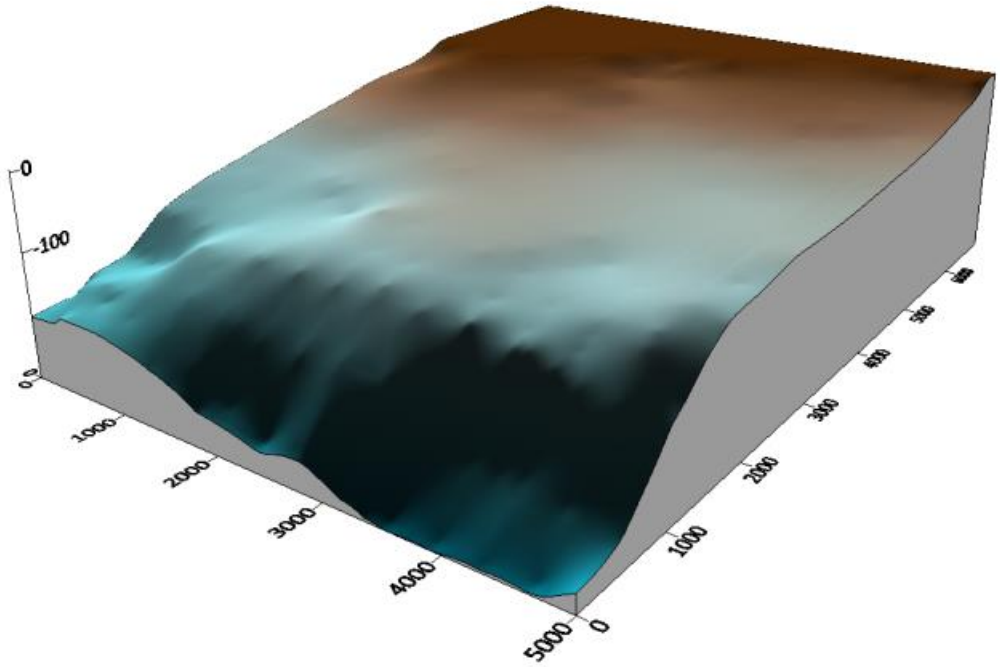


Figura 24: Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale

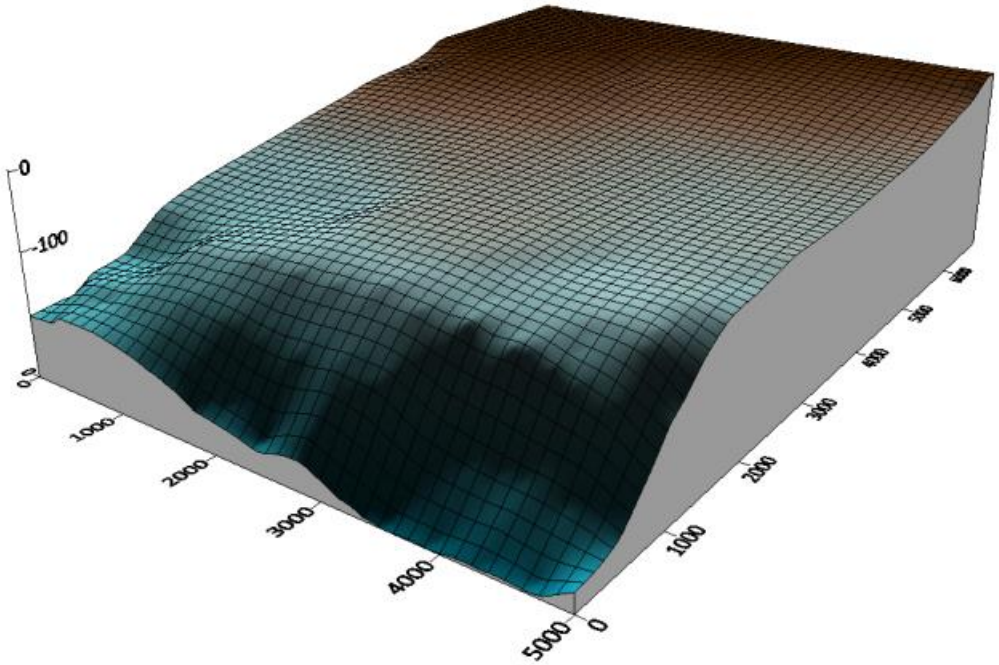


Figura 25: Visualizzazione 3D della batimetria all'interno della griglia generale, con evidenziazione delle mesh adottate

Nelle successive Figure 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 omnidirezionale, con T (tempo di ritorno) = 50 anni (vedi paragrafo relativo alla determinazione degli eventi estremi). Esso è caratterizzato al largo, nella condizione indisturbata di acque profonde (d/L > 0.5), dai seguenti valori:

- H_s = 5.84 m, T_p = 9.62 s e Dir = 195°N;

Gli output grafici delle simulazioni effettuate sulla griglia generale, avente dimensione 5000 m * 6800 m, fanno riferimento al sistema di coordinate cartesiano *xy*, dove *x* rappresenta la coordinata diretta verso la costa, *y* la coordinata ortogonale ad 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 5 m a partire circa dalla -500 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 (Figura 26); in particolare, il valore della direzione del moto ondoso, Dir (°N), che risulta ortogonale alle creste d'onda, viene calcolata nello SWAN 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 27) 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.

- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa, H_s (m) (Figura 28);
- distribuzione spaziale bidimensionale su tutto il dominio di calcolo del periodo medio dell'onda, T_m (s) (Figura 29), 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 30); 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 è posto pari a 1.

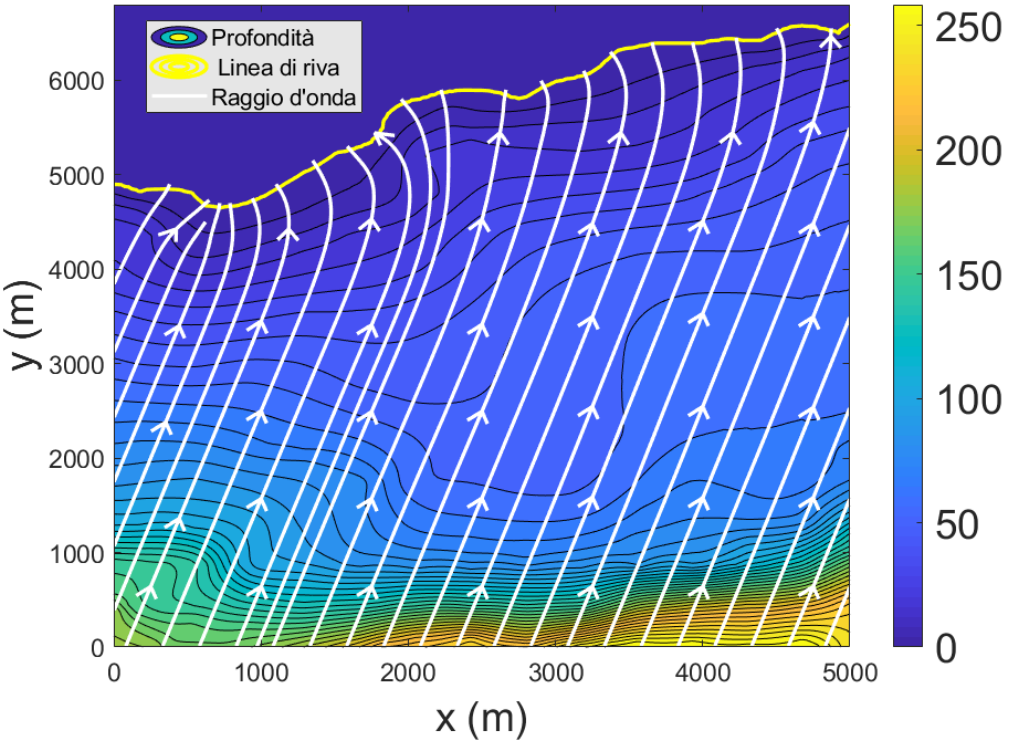


Figura 26: Profondità del fondale e raggi d'onda relativi alla propagazione del moto ondoso su tutto il dominio di calcolo (onda di progetto con T = 50 anni).

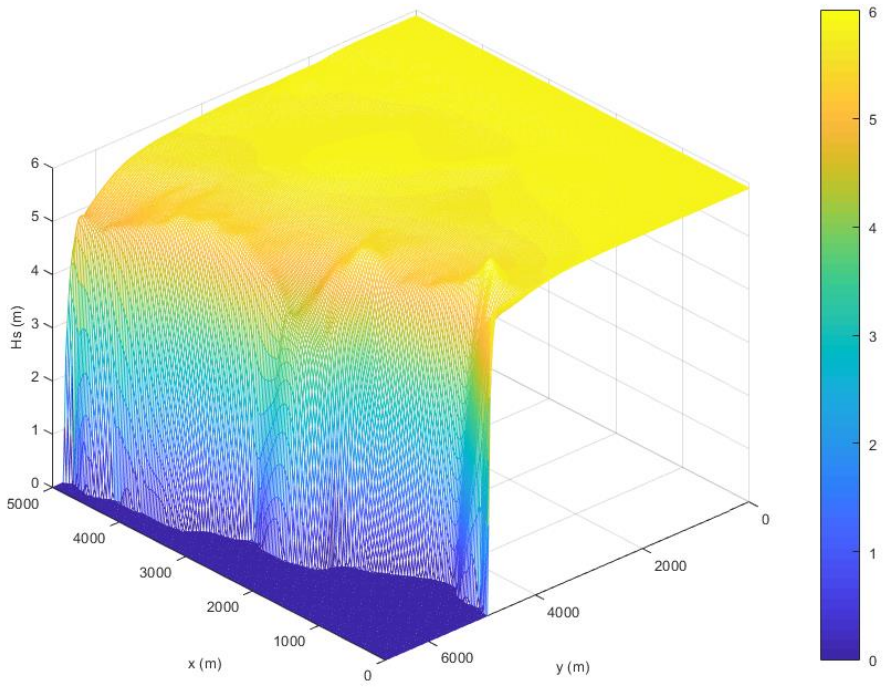


Figura 27: Distribuzione spaziale 3D su tutto il dominio di calcolo dell'altezza d'onda significativa, Hs (m) (onda di progetto con T = 50 anni)

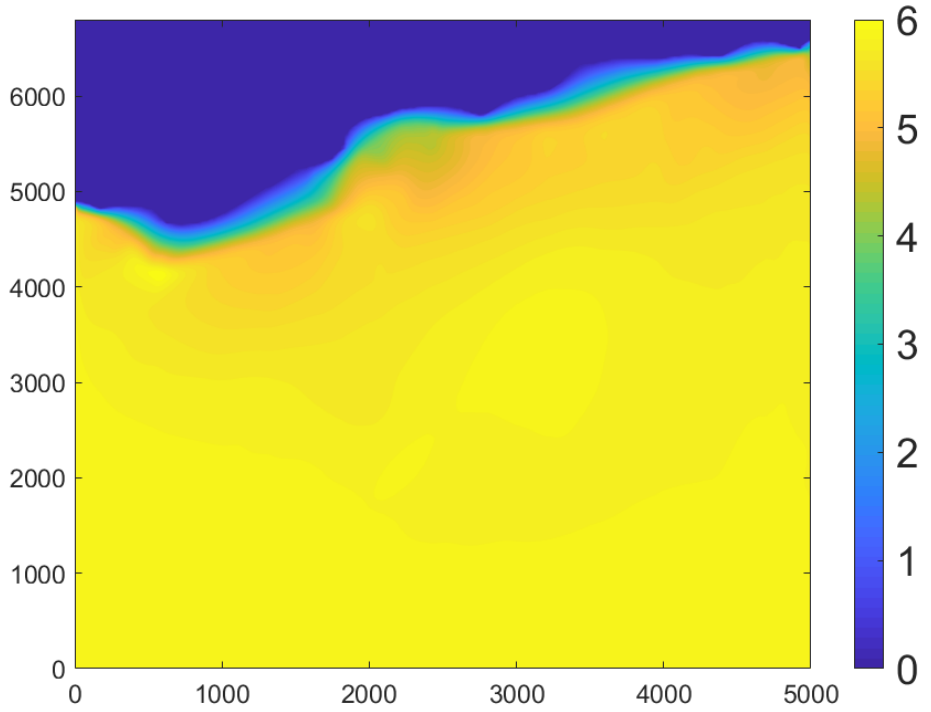


Figura 28: Distribuzione spaziale bidimensionale dell'altezza d'onda significativa, Hs (m) (onda di progetto con T = 50 anni)

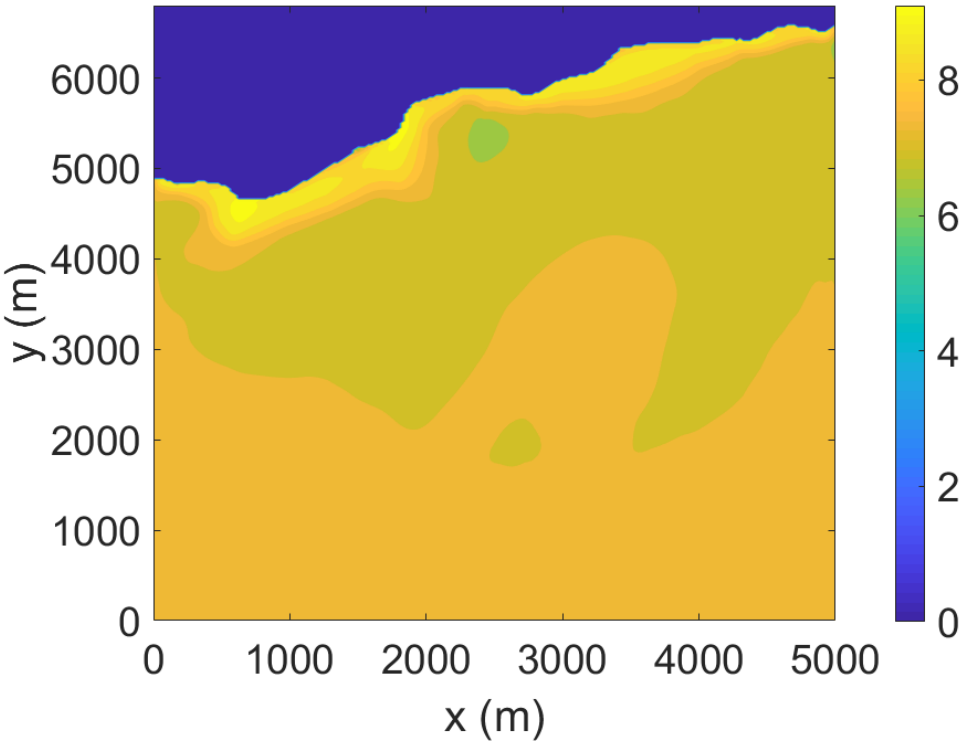


Figura 29: Distribuzione spaziale bidimensionale del periodo medio dell'onda, Tm (s) (onda di progetto con T = 50 anni)

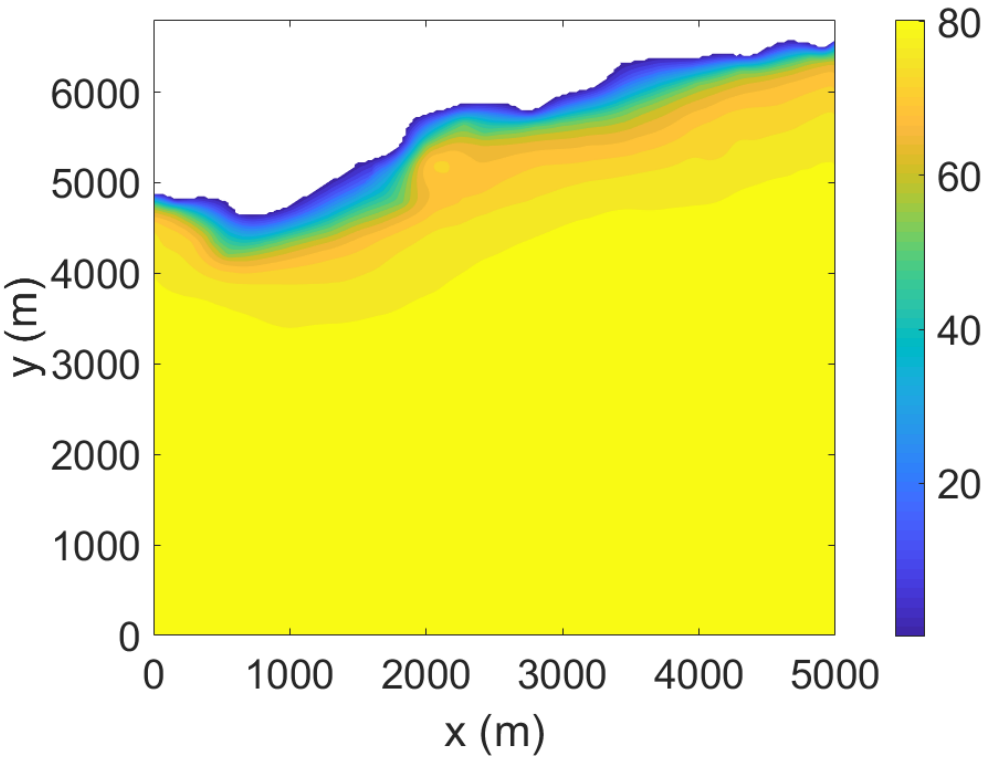


Figura 30: Distribuzione spaziale bidimensionale della lunghezza d'onda, L (m) (onda di progetto con T = 50 anni)

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

8 Clima meteomarino sottocosta

Sulla base delle simulazioni numeriche effettuate con il modello SWAN viene mostrato il clima meteomarino ricavato sottocosta. Nella Tabella 10 sono 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 sottocosta, e il

valore di ΔH_s, espresso in %, che rappresenta l'entità dell'abbattimento o, in rari casi, di innalzamento dell'altezza d'onda significativa nella sua propagazione da largo verso riva.

CLIMA ONDOSO AL LARGO				CLIMA ONDOSO SOTTOCOSTA (-10 m)					
Dir (°N)	H_s (m)	T_m (s)	T_p (s)	$\Delta\alpha$ (°)	Dir (°N)	H_s (m)	T_m (s)	T_p (s)	ΔH_s (%)
65	0.5	3.80	4.50	31.30	96.30	0.16	2.89	4.50	69%
65	1	4.74	5.58	41.63	106.63	0.33	3.93	5.58	67%
65	1.5	5.40	6.32	48.16	113.16	0.54	4.74	6.32	64%
65	2	5.93	6.91	52.41	117.41	0.76	5.38	6.91	62%
65	2.5	6.37	7.40	55.64	120.64	1.03	6.00	7.40	59%
65	3	6.75	7.83	57.85	122.85	1.27	6.47	7.83	58%
75	0.5	3.80	4.50	22.89	97.89	0.24	2.83	4.50	52%
75	1	4.74	5.58	31.84	106.84	0.47	3.68	5.58	53%
75	1.5	5.40	6.32	37.93	112.93	0.72	4.36	6.32	52%
75	2	5.93	6.91	42.06	117.06	0.97	4.91	6.91	52%
75	2.5	6.37	7.40	45.43	120.43	1.27	5.48	7.40	49%
75	3	6.75	7.83	47.70	122.70	1.54	5.92	7.83	49%
85	0.5	3.80	4.50	16.04	101.04	0.32	2.84	4.50	36%
85	1	4.74	5.58	23.75	108.75	0.60	3.59	5.58	40%
85	1.5	5.40	6.32	29.15	114.15	0.88	4.16	6.32	42%
85	2	5.93	6.91	32.94	117.94	1.16	4.63	6.91	42%
85	2.5	6.37	7.40	36.23	121.23	1.47	5.14	7.40	41%
85	3	6.75	7.83	38.42	123.42	1.75	5.52	7.83	42%
95	0.5	3.80	4.50	10.67	105.67	0.38	2.91	4.50	23%
95	1	4.74	5.58	17.32	112.32	0.70	3.60	5.58	30%
95	1.5	5.40	6.32	21.99	116.99	1.00	4.10	6.32	33%
95	2	5.93	6.91	25.33	120.33	1.30	4.51	6.91	35%
95	2.5	6.37	7.40	28.35	123.35	1.62	4.94	7.40	35%
95	3	6.75	7.83	30.38	125.38	1.91	5.27	7.83	36%
95	3.5	7.09	8.21	32.49	127.49	2.25	5.67	8.21	36%
105	0.5	3.80	4.50	6.96	111.96	0.43	2.99	4.50	15%
105	1	4.74	5.58	12.65	117.65	0.77	3.66	5.58	23%
105	1.5	5.40	6.32	16.65	121.65	1.09	4.13	6.32	27%
105	2	5.93	6.91	19.49	124.49	1.40	4.50	6.91	30%
105	2.5	6.37	7.40	22.10	127.10	1.74	4.90	7.40	30%
105	3	6.75	7.83	23.86	128.86	2.03	5.19	7.83	32%
105	3.5	7.09	8.21	25.74	130.74	2.38	5.53	8.21	32%
105	4	7.40	8.56	27.16	132.16	2.70	5.85	8.56	33%
115	0.5	3.80	4.50	4.49	119.49	0.45	3.06	4.50	10%
115	1	4.74	5.58	9.23	124.23	0.82	3.74	5.58	18%
115	1.5	5.40	6.32	12.57	127.57	1.16	4.20	6.32	23%
115	2	5.93	6.91	14.92	129.92	1.48	4.56	6.91	26%
115	2.5	6.37	7.40	17.06	132.06	1.83	4.93	7.40	27%
115	3	6.75	7.83	18.50	133.50	2.13	5.19	7.83	29%
115	3.5	7.09	8.21	20.03	135.03	2.48	5.52	8.21	29%
115	4	7.40	8.56	21.18	136.18	2.81	5.80	8.56	30%
125	0.5	3.80	4.50	2.93	127.93	0.46	3.10	4.50	7%

125	1	4.74	5.58	6.66	131.66	0.85	3.80	5.58	15%
125	1.5	5.40	6.32	9.26	134.26	1.21	4.27	6.32	19%
125	2	5.93	6.91	11.09	136.09	1.54	4.62	6.91	23%
125	2.5	6.37	7.40	12.77	137.77	1.91	4.99	7.40	24%
125	3	6.75	7.83	13.86	138.86	2.22	5.25	7.83	26%
125	3.5	7.09	8.21	15.02	140.02	2.58	5.56	8.21	26%
135	0.5	3.80	4.50	1.87	136.87	0.47	3.13	4.50	6%
135	1	4.74	5.58	4.54	139.54	0.88	3.85	5.58	12%
135	1.5	5.40	6.32	6.43	141.43	1.25	4.33	6.32	17%
135	2	5.93	6.91	7.72	142.72	1.60	4.69	6.91	20%
135	2.5	6.37	7.40	8.88	143.88	1.98	5.06	7.40	21%
135	3	6.75	7.83	9.64	144.64	2.30	5.32	7.83	23%
135	3.5	7.09	8.21	10.45	145.45	2.68	5.63	8.21	23%
145	0.5	3.80	4.50	1.08	146.08	0.48	3.14	4.50	5%
145	1	4.74	5.58	2.71	147.71	0.89	3.89	5.58	11%
145	1.5	5.40	6.32	3.85	148.85	1.28	4.38	6.32	15%
145	2	5.93	6.91	4.60	149.60	1.64	4.75	6.91	18%
145	2.5	6.37	7.40	5.27	150.27	2.03	5.12	7.40	19%
145	3	6.75	7.83	5.69	150.69	2.37	5.38	7.83	21%
145	3.5	7.09	8.21	6.13	151.13	2.76	5.68	8.21	21%
145	4	7.40	8.56	6.44	151.44	3.12	5.93	8.56	22%
155	0.5	3.80	4.50	0.41	155.41	0.48	3.15	4.50	4%
155	1	4.74	5.58	1.01	156.01	0.90	3.91	5.58	10%
155	1.5	5.40	6.32	1.37	156.37	1.30	4.41	6.32	13%
155	2	5.93	6.91	1.58	156.58	1.67	4.78	6.91	17%
155	2.5	6.37	7.40	1.74	156.74	2.07	5.16	7.40	17%
155	3	6.75	7.83	1.82	156.82	2.41	5.41	7.83	20%
155	3.5	7.09	8.21	1.89	156.89	2.81	5.72	8.21	20%
165	0.5	3.80	4.50	-0.26	164.74	0.48	3.15	4.50	4%
165	1	4.74	5.58	-0.70	164.30	0.91	3.91	5.58	9%
165	1.5	5.40	6.32	-1.11	163.89	1.30	4.41	6.32	13%
165	2	5.93	6.91	-1.44	163.56	1.67	4.78	6.91	17%
165	2.5	6.37	7.40	-1.76	163.24	2.07	5.15	7.40	17%
165	3	6.75	7.83	-2.00	163.00	2.41	5.41	7.83	20%
165	3.5	7.09	8.21	-2.26	162.74	2.81	5.72	8.21	20%
175	0.5	3.80	4.50	-1.08	173.92	0.48	3.14	4.50	5%
175	1	4.74	5.58	-2.60	172.40	0.89	3.89	5.58	11%
175	1.5	5.40	6.32	-3.74	171.26	1.28	4.38	6.32	15%
175	2	5.93	6.91	-4.58	170.42	1.64	4.74	6.91	18%
175	2.5	6.37	7.40	-5.38	169.62	2.03	5.11	7.40	19%
175	3	6.75	7.83	-5.92	169.08	2.36	5.37	7.83	21%
175	3.5	7.09	8.21	-6.51	168.49	2.75	5.68	8.21	21%
185	0.5	3.80	4.50	-2.27	182.73	0.47	3.11	4.50	7%
185	1	4.74	5.58	-4.89	180.11	0.86	3.82	5.58	14%
185	1.5	5.40	6.32	-6.71	178.29	1.23	4.31	6.32	18%
185	2	5.93	6.91	-8.02	176.98	1.58	4.68	6.91	21%
185	2.5	6.37	7.40	-9.25	175.75	1.96	5.06	7.40	22%
185	3	6.75	7.83	-10.10	174.90	2.29	5.33	7.83	24%

185	3.5	7.09	8.21	-11.03	173.97	2.67	5.65	8.21	24%
185	4	7.40	8.56	-11.72	173.29	3.03	5.92	8.56	24%
185	4.5	7.69	8.88	-12.30	172.70	3.35	6.15	8.88	26%
185	5	7.95	9.17	-12.94	172.07	3.72	6.43	9.17	26%
195	0.5	3.80	4.50	-4.11	190.89	0.45	3.05	4.50	11%
195	1	4.74	5.58	-7.78	187.22	0.81	3.72	5.58	19%
195	1.5	5.40	6.32	-10.36	184.65	1.15	4.19	6.32	23%
195	2	5.93	6.91	-12.20	182.80	1.48	4.58	6.91	26%
195	2.5	6.37	7.40	-13.88	181.12	1.85	4.98	7.40	26%
195	3	6.75	7.83	-15.05	179.95	2.16	5.27	7.83	28%
195	3.5	7.09	8.21	-16.30	178.70	2.54	5.63	8.21	27%
195	4	7.40	8.56	-17.24	177.76	2.89	5.94	8.56	28%
195	4.5	7.69	8.88	-18.03	176.97	3.21	6.21	8.88	29%
205	0.5	3.80	4.50	-6.87	198.13	0.41	2.95	4.50	18%
205	1	4.74	5.58	-11.43	193.57	0.73	3.58	5.58	27%
205	1.5	5.40	6.32	-14.77	190.23	1.03	4.05	6.32	31%
205	2	5.93	6.91	-17.22	187.78	1.33	4.45	6.91	33%
205	2.5	6.37	7.40	-19.43	185.57	1.68	4.89	7.40	33%
205	3	6.75	7.83	-20.97	184.03	1.98	5.22	7.83	34%
205	4	7.40	8.56	-23.76	181.24	2.68	6.00	8.56	33%
215	0.5	3.80	4.50	-10.89	204.11	0.36	2.84	4.50	29%
215	1	4.74	5.58	-16.17	198.83	0.62	3.44	5.58	38%
215	1.5	5.40	6.32	-20.18	194.82	0.88	3.92	6.32	41%
215	2	5.93	6.91	-23.25	191.75	1.15	4.34	6.91	43%
215	2.5	6.37	7.40	-25.99	189.01	1.45	4.82	7.40	42%
215	3	6.75	7.83	-27.92	187.08	1.73	5.21	7.83	42%
215	3.5	7.09	8.21	-29.87	185.13	2.06	5.69	8.21	41%
225	0.5	3.80	4.50	-16.36	208.64	0.28	2.76	4.50	43%
225	1	4.74	5.58	-22.41	202.60	0.50	3.38	5.58	50%
225	1.5	5.40	6.32	-26.96	198.05	0.72	3.87	6.32	52%
225	2	5.93	6.91	-30.50	194.50	0.94	4.34	6.91	53%
225	2.5	6.37	7.40	-33.65	191.35	1.19	4.87	7.40	52%
225	3	6.75	7.83	-35.89	189.11	1.43	5.32	7.83	52%
225	3.5	7.09	8.21	-38.09	186.91	1.73	5.87	8.21	51%
235	0.5	3.80	4.50	-23.37	211.63	0.21	2.77	4.50	58%
235	1	4.74	5.58	-30.39	204.61	0.38	3.47	5.58	62%
235	1.5	5.40	6.32	-35.39	199.61	0.55	4.04	6.32	63%
235	2	5.93	6.91	-39.19	195.81	0.73	4.57	6.91	63%
235	2.5	6.37	7.40	-42.51	192.49	0.94	5.16	7.40	62%
235	3	6.75	7.83	-44.90	190.10	1.15	5.66	7.83	62%
235	3.5	7.09	8.21	-47.18	187.82	1.40	6.27	8.21	60%
235	4	7.40	8.56	-48.79	186.21	1.64	6.81	8.56	59%
235	4.5	7.69	8.88	-50.12	184.88	1.88	7.29	8.88	58%

Tabella 10: Clima ondoso al largo e sottocosta (-10 m) per il paraggio di Sanremo (punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 5625 m, y = 2250 m)

In Tabella 11 e in Tabella 12 sono mostrati in corrispondenza del paraggio di Sanremo i numeri di apparizione e le percentuali di apparizione del moto ondoso alla profondità di circa -10 m nel punto avente coordinate x = 5625 m e y = 2250 m nel dominio di calcolo relativo alla propagazione ondosa. In forma di istogramma nella Figura 31 e sotto forma di diagramma polare (escludendo gli eventi di calma con $H_s < 0.25$ m) in Figura 32 vengono mostrate le percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta. Gli eventi di moto ondoso che caratterizzano il clima ondoso sottocosta sono suddivisi ogni 10° all'interno del settore angolare 60°-240°N. Gli eventi risultano ricadere prevalentemente nei settori direzionali 200°-210°N (23.34 %) e 190-200°N (20.71 %).

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)								
		calme	0.25- 0.75	0.75- 1.25	1.25- 1.75	1.75- 2.25	2.25- 2.75	2.75- 3.25	3.25- 3.75	TOTALE
Dir (°N)										
60	70	2455	0	0	0	0	0	0	0	**2455**
70	80	1693	0	0	0	0	0	0	0	**1693**
80	90	1607	0	0	0	0	0	0	0	**1607**
90	100	17385	0	0	0	0	0	0	0	**17385**
100	110	1271	21096	0	0	0	0	0	0	**22367**
110	120	1184	11558	3037	0	0	0	0	0	**15779**
120	130	915	2469	1477	557	34	1	0	0	**5453**
130	140	759	1830	1246	105	84	8	1	0	**4033**
140	150	718	1538	495	205	16	8	0	0	**2980**
150	160	901	2108	498	205	37	18	14	0	**3781**
160	170	1428	3389	848	349	79	17	5	0	**6115**
170	180	1602	3803	2213	1015	146	84	14	7	**8884**
180	190	2290	6420	7949	1128	142	1	0	0	**17930**
190	200	3585	47776	5904	0	0	0	0	0	**57265**
200	210	4396	60120	0	0	0	0	0	0	**64516**
210	220	25067	0	0	0	0	0	0	0	**25067**
220	230	10734	0	0	0	0	0	0	0	**10734**
230	240	8411	0	0	0	0	0	0	0	**8411**
TOTALE		**42189**	**162107**	**23667**	**3564**	**538**	**137**	**34**	**7**	**276455**

Tabella 11: Numero di apparizioni del moto ondoso nel punto sottocosta per il paraggio di Sanremo (punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 5625 m, y = 2250 m)

		Classi di altezza d'onda significativa, Hs (m)							
		calme	0.25-0.75	0.75-1.25	1.25-1.75	1.75-2.25	2.25-2.75	2.75-3.25	3.25-3.75	TOTALE
Dir (°N)										
60	70	0.888%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.888%
70	80	0.612%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.612%
80	90	0.581%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.581%
90	100	6.289%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	6.289%
100	110	0.460%	7.631%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	8.091%
110	120	0.428%	4.181%	1.099%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	5.708%
120	130	0.331%	0.893%	0.534%	0.201%	0.012%	0.000%	0.000%	0.000%	1.972%
130	140	0.275%	0.662%	0.451%	0.038%	0.030%	0.003%	0.000%	0.000%	1.459%
140	150	0.260%	0.556%	0.179%	0.074%	0.006%	0.003%	0.000%	0.000%	1.078%
150	160	0.326%	0.763%	0.180%	0.074%	0.013%	0.007%	0.005%	0.000%	1.368%
160	170	0.517%	1.226%	0.307%	0.126%	0.029%	0.006%	0.002%	0.000%	2.212%
170	180	0.579%	1.376%	0.800%	0.367%	0.053%	0.030%	0.005%	0.003%	3.214%
180	190	0.828%	2.322%	2.875%	0.408%	0.051%	0.000%	0.000%	0.000%	6.486%
190	200	1.297%	17.282%	2.136%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	20.714%
200	210	1.590%	21.747%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	23.337%
210	220	9.067%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	9.067%
220	230	3.883%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	3.883%
230	240	3.042%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	3.042%
TOTALE		15.261%	58.638%	8.561%	1.289%	0.195%	0.050%	0.012%	0.003%	100.000%

Tabella 12: Percentuali di apparizione del moto ondoso nel punto sottocosta per il paraggio di Sanremo (punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 5625 m, y = 2250 m)

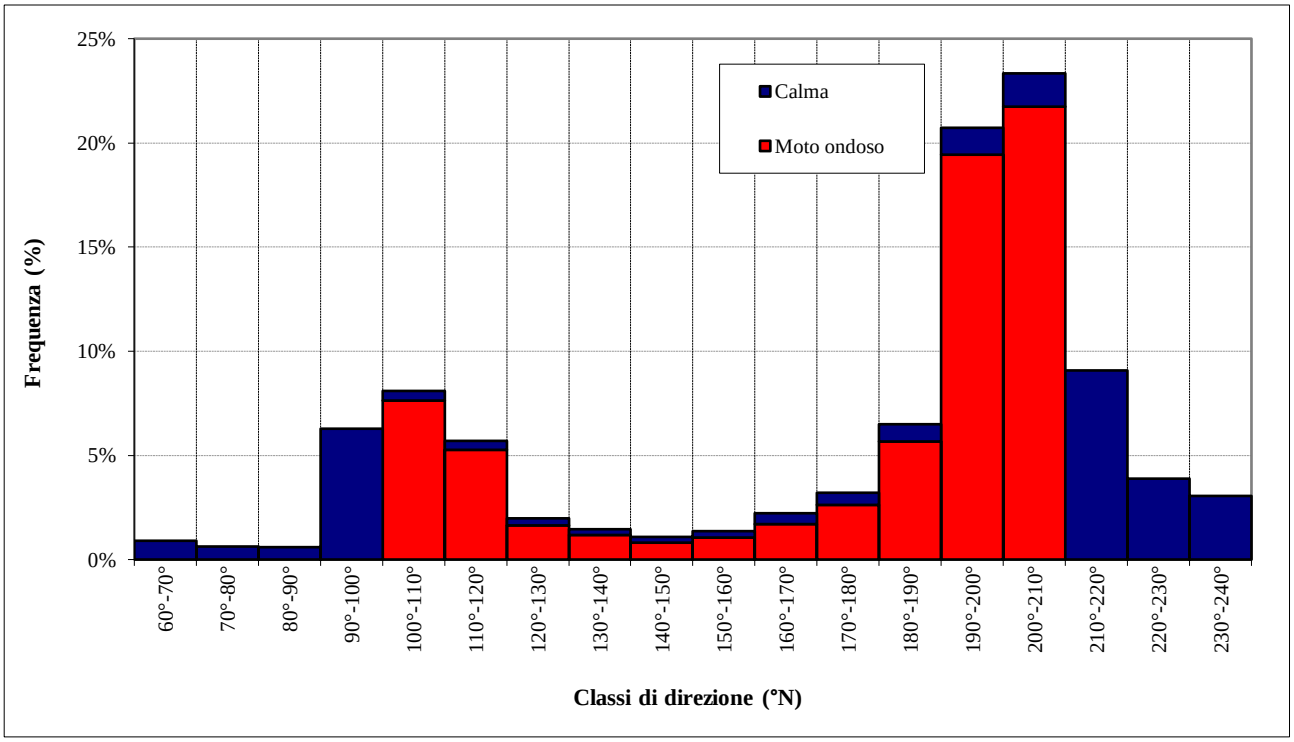


Figura 31: Istogramma relativo alle percentuali di apparizione del moto ondoso sottocosta per Sanremo (punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 5625 m, y = 2250 m)

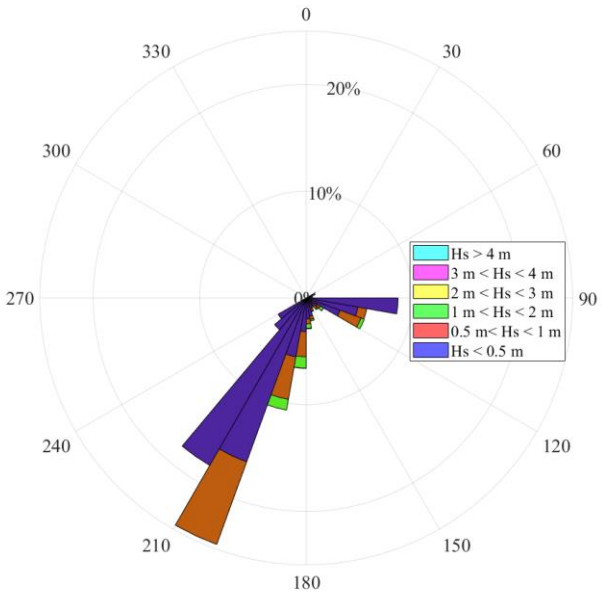


Figura 32: Diagramma polare delle frequenze di apparizione degli eventi di moto ondoso sottocosta per Sanremo (punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 5625 m, y = 2250 m)

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 degli eventi estremi di moto ondoso associati ai periodi di ritorni più significativi (T = 10, 25, 50 e 100 anni). Ciò risulta utile nel 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 13 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 per il punto sottocosta in esame. Dall'analisi dei risultati si osserva un progressivo abbattimento delle altezze d'onda significative estreme da largo a sottocosta all'aumentare del tempo di ritorno.

		LARGO				SOTTOCOSTA (-10 m)					
T (anni)	**Settore**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**Da (°)**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**DHs (%)**
10	60°-90°N	75	2.69	6.52	7.57	46.31	121.31	1.37	5.65	7.37	49.05%
25	60°-90°N	75	2.89	6.67	7.75	47.25	122.25	1.48	5.83	7.37	48.99%
50	60°-90°N	75	3.04	6.78	7.86	47.87	122.87	1.56	5.96	8.39	48.61%
100	60°-90°N	75	3.18	6.88	7.97	48.51	123.51	1.65	6.10	8.39	48.09%
T (anni)	**Settore**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**Da (°)**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**DHs (%)**
10	90°-120°N	105	3.02	6.76	7.85	23.96	128.96	2.04	5.20	7.37	32.23%
25	90°-120°N	105	3.19	6.89	7.98	24.59	129.59	2.16	5.31	8.39	32.46%
50	90°-120°N	105	3.31	6.97	8.07	25.05	130.05	2.24	5.40	8.39	32.34%
100	90°-120°N	105	3.42	7.04	8.16	25.50	130.50	2.32	5.48	8.39	32.16%
T (anni)	**Settore**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**Da (°)**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**DHs (%)**
10	120°-150°N	135	3.00	6.75	7.83	9.64	144.64	2.30	5.32	7.37	23.23%
25	120°-150°N	135	3.41	7.03	8.15	10.33	145.33	2.61	5.57	8.39	23.59%
50	120°-150°N	135	3.75	7.25	8.39	10.78	145.78	2.86	5.76	8.39	23.66%
100	120°-150°N	135	4.11	7.47	8.63	11.13	146.13	3.10	5.92	8.39	24.55%
T (anni)	**Settore**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**Da (°)**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**DHs (%)**
10	150°-180°N	165	3.32	6.97	8.08	-2.17	162.83	2.66	5.61	8.39	19.97%
25	150°-180°N	165	3.62	7.17	8.30	-2.31	162.69	2.90	5.79	8.39	19.85%
50	150°-180°N	165	3.84	7.30	8.45	-2.39	162.61	3.07	5.90	8.39	20.09%
100	150°-180°N	165	4.04	7.43	8.59	-2.46	162.54	3.20	5.98	8.39	20.79%
T (anni)	**Settore**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**Da (°)**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**DHs (%)**
10	180°-210°N	195	4.58	7.73	8.92	-18.15	176.85	3.27	6.25	8.39	28.62%
25	180°-210°N	195	5.08	7.99	9.21	-19.02	175.98	3.63	6.59	9.56	28.43%
50	180°-210°N	195	5.46	8.18	9.42	-19.65	175.35	3.92	6.88	9.56	28.19%
100	180°-210°N	195	5.84	8.36	9.62	-20.17	174.83	4.16	7.15	9.56	28.74%
T (anni)	**Settore**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**Da (°)**	**DIR (°N)**	**Hs (m)**	**Tm (s)**	**Tp (s)**	**DHs (%)**
10	210°-240°N	225	4.30	7.58	8.75	-40.42	184.58	2.16	6.62	8.39	49.72%
25	210°-240°N	225	4.63	7.76	8.96	-41.31	183.70	2.35	6.94	9.56	49.40%
50	210°-240°N	225	4.88	7.89	9.10	-41.94	183.06	2.50	7.20	9.56	48.78%
100	210°-240°N	225	5.12	8.01	9.24	-42.55	182.45	2.66	7.46	9.56	48.02%

Tabella 13: Eventi estremi direzionali di moto ondoso sottocosta con T = 10, 25. 50 e 100 anni (-10 m) (punto di coordinate nel dominio di calcolo: x = 5625 m, y = 2250 m)

9 Clima meteomarino equivalente (onde morfologiche)

Oltre alla modellazione del clima meteomarino al largo e sottocosta del paraggio di Sanremo, risulta utile conoscere, ai fini della caratterizzazione della dinamica del litorale in esame, in corrispondenza del punto sottocosta, il clima meteomarino equivalente annuale, ovvero le cosiddette onde di modellazione o morfologiche. Le analisi sono state effettuate a partire

dall'analisi al largo delle serie di storiche del moto ondoso ottenute dalla trasposizione geografica dei dati ERA5 e dalla propagazione del clima meteomarino alla batimetrica - 10 m, in cui tutte le onde propagate con il modello SWAN non sono ancora frante per raggiunto limite di profondità.

L'onda di modellazione è caratterizzata da un'altezza d'onda, H_e, e da un periodo d'onda, T_e, rappresentative del contenuto energetiche per il settore considerato. Tale onda è in grado in indurre effetti sul litorale equivalenti a quelli indotti da tutte le onde sulla base delle quali è stata calcolata. Inoltre, in dipendenza dagli eventi selezionati per il calcolo, è possibile determinare l'onda di modellazione dell'anno statistico medio, attraverso una risultante annuale.

Derivando dalle serie di misure al largo e sottocosta dei paraggi di studio le coppie dei valori H_{si} e T_{pi} relative all'i-esimo tra gli N eventi di moto ondoso compresi in un dato settore di provenienza, l'onda di modellazione può essere determinata risolvendo il seguente sistema di due equazioni (Noli e Franco, 1989; De Girolamo e Di Risio, 2002):

$$\vec{F} = \left(\overrightarrow{H_e^{\,2} \cdot T_e}\right) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \overrightarrow{H_{si}^{\,2} \cdot T_{pi}}$$

$$R = \frac{H_e}{T_e^{\,2}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{H_{si}}{T_{pi}^{\,2}}$$

dove $\vec{F}$ è la risultante del vettore del flusso di energia e R è la ripidità media delle onde.

In particolare, sulla base delle due precedenti equazioni, l'onda di modellazione è definita da un'altezza e da un periodo forniti dalle seguenti espressioni:

$$H_e = \left(|F|^2 \cdot R\right)^{\frac{1}{5}} = \left[\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} H_{si}^{\,2} \cdot T_{pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{H_{si}}{T_{pi}^{\,2}}\right]^{\frac{1}{5}}$$

$$T_e = \frac{|F|}{H_e^{\,2}} = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} H_{si}^{\,2} \cdot T_{pi}}{\left[\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} H_{si}^{\,2} \cdot T_{pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \frac{H_{si}}{T_{pi}^{\,2}}\right]^{\frac{2}{5}}}$$

dove il modulo del flusso energetico totale, $|F| = \sqrt{F_E + F_N}$, essendo F_E e F_N, rispettivamente, le componenti del vettore del flusso energetico totale lungo la direzione O-E (Ovest-Est) e lungo la direzione S-N (Sud-Nord).

In particolare, i valori delle componenti F_E e F_N risultano:

$$F_E = F\,sen(\alpha) \qquad \text{e} \qquad F_E = F\cos(\alpha)$$

essendo α la direzione di propagazione del singolo stato di mare registrato.

Per ciò che riguarda la direzione di provenienza dell'onda di modellazione annuale e direzionale, θ, pari a quella del vettore del flusso di energia, è stata applicata la seguente relazione, tenendo conto dei quadranti di esposizione del moto ondoso:

$$\theta = \arctan\left(\frac{F_E}{F_N}\right)$$

La durata delle onde di modellazione può essere calcolata facendo riferimento al numero di eventi *N* estratti dalla serie storica, tenendo conto che i dati di partenza ERA5 in esame sono a carattere orario. Si evidenzia inoltre che nei calcoli delle onde di modellazione è possibile escludere gli eventi caratterizzati da un'altezza d'onda significativa, H_s, inferiore a 0.5 m, in quanto dal punto di vista energetico, e quindi della capacità di "modellare" la spiaggia, si possono ritenere trascurabili.
In Tabella 14 sono mostrati i risultati relativi alle onde di modellazione annuali nel punto sottocosta in esame (-10 m).
Dall'analisi dei risultati ottenuti, l'onda di modellazione del paraggio in corrispondenza del punto sottocosta presenta:

	H_e (m)	T_e (s)	Dir (°N)
Paraggio	0.80	6.24	174.53

Tabella 14: Onda di modellazione

10 Flusso energetico del moto ondoso sottocosta

L'energia totale, E, posseduta da un sistema di onde progressive può essere suddivisa in una componente di energia potenziale, E_p, e in una componente di energia cinetica, E_c. L'energia è generalmente espressa come media temporale per unità di superficie valutata su un'intera lunghezza d'onda. In base alla teoria di Stokes al 1° ordine, si ottiene che la densità media dell'energia totale del moto ondoso, espressa in N/m, è pari a:

$$E = E_p + E_c = \frac{1}{16}\gamma H^2 + \frac{1}{16}\gamma H^2 = \frac{1}{8}\gamma H^2$$

dove:

γ (peso specifico dell'acqua salata) ≈ 10104 N/m^3;

H è l'altezza d'onda.

Si definisce flusso di energia, P, espresso in W/m, di un'onda progressiva per unità di lunghezza di fronte d'onda, il prodotto dell'energia totale, E, per la celerità di gruppo dell'onda:

$$P = Ec_g = Enc$$

essendo:

c_g la celerità di gruppo;

n (funzione di dispersione) = $\frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{senh(2kd)}\right)$;

k (numero d'onda) = $2\pi/L$;

d (profondità del fondale marino);

c (celerità di propagazione del moto ondoso) = L/T.

Spesso, nella caratterizzazione del clima meteomarino di un paraggio, si ricorre al concetto di flusso di energia introdotto in precedenza. Pertanto, a partire dalla determinazione dei dati d'onda sottocosta del paraggio di Sanremo, è possibile calcolare il flusso energetico ondoso, P, per unità di lunghezza di fronte d'onda. Per ogni settore angolare di provenienza del moto

ondoso, viene determinato il valore medio annuo del flusso d'energia ondosa, P_{mj}, degli stati di mare ricadenti nel settore di traversia del paraggio in esame, attraverso l'espressione:

$$P_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{N}$$

dove:

P_i è il flusso di energia del singolo stato di mare ricostruito;

n è il numero di eventi totali ricostruiti per la singola classe di direzione e provenienza delle onde;

N (numero di anni di ricostruzione del moto ondoso) = 40 anni.

La direzione risultante del flusso energetico del moto ondoso sottocosta lungo un litorale è utile 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. Poiché il coefficiente di correlazione tra le due quantità 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, quando ci si riferisce al solo flusso di energia del moto ondoso frangente, cioè in assenza degli elementi che consentono di calibrare la dipendenza funzionale tra le due quantità, si è soliti fare riferimento al trasporto solido potenziale.

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.

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 ogni direzione di provenienza, è possibile determinare il valore medio del flusso energetico del moto ondoso, P_{mj}, degli stati di mare ricadenti nel settore di traversia.

Nel calcolo, in genere, si escludono gli eventi caratterizzati da un'altezza significativa inferiore a 0.5 m, in quanto dal punto di vista energetico e quindi della capacità di modellazione della spiaggia si possono ritenere trascurabili. In Tabella 15 sono mostrati i valori del flusso energetico totale, P, e medio annuo, P_m, per il punto di riferimento sottocosta per il tratto litoraneo. Nelle Figure 33 e 34 sono mostrati i diagrammi polari del flusso energetico totale e medio annuo sottocosta.

DIR (°N)	H_s (m)	P (W/m)	P_m (W/m)
105	0.5	86.99	2.17
115	0.5	47.66	1.19
115	1	67.17	1.68
125	0.5	10.19	0.25
125	1	33.19	0.83
125	1.5	33.91	0.85

125	2	4.19	0.10
125	2.5	0.21	0.01
135	0.5	7.55	0.19
135	1	27.92	0.70
135	1.5	6.28	0.16
135	2	9.89	0.25
135	2.5	1.57	0.04
135	3	0.29	0.01
145	0.5	6.35	0.16
145	1	11.12	0.28
145	1.5	12.48	0.31
145	2	1.97	0.05
145	2.5	1.70	0.04
155	0.5	8.70	0.22
155	1	11.16	0.28
155	1.5	12.27	0.31
155	2	4.36	0.11
155	2.5	3.53	0.09
155	3	4.11	0.10
165	0.5	13.98	0.35
165	1	19.00	0.48
165	1.5	20.89	0.52
165	2	9.30	0.23
165	2.5	3.33	0.08
165	3	1.47	0.04
175	0.5	15.69	0.39
175	1	49.59	1.24
175	1.5	60.74	1.52
175	2	17.19	0.43
175	2.5	16.45	0.41
175	3	4.11	0.10
175	3.5	2.86	0.07
185	0.5	26.49	0.66
185	1	178.60	4.47
185	1.5	68.68	1.72
185	2	17.49	0.44
185	2.5	0.21	0.01
195	0.5	197.00	4.93
195	1	130.59	3.26
205	1	247.91	6.20

Tabella 15: Flusso d'energia ondosa totale e medio annuo sottocosta

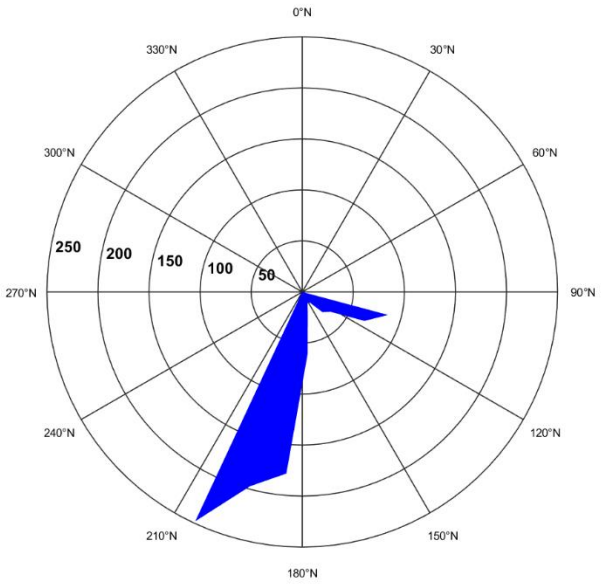


Figura 33: Flusso d'energia ondosa totale sottocosta

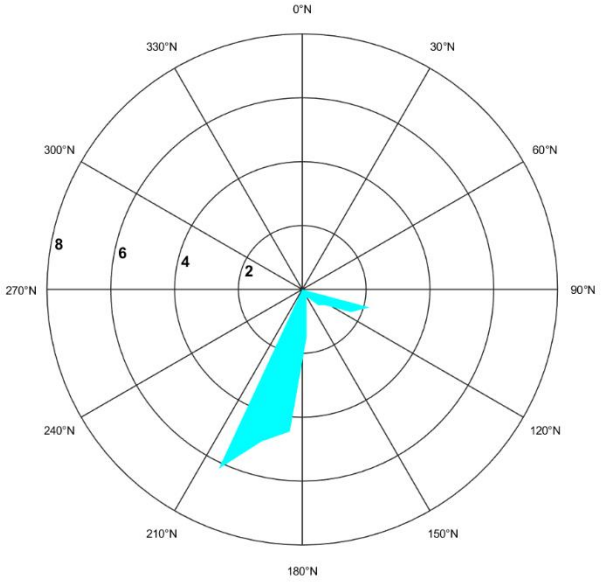


Figura 34: Flusso d'energia medio annuale sottocosta

Il flusso di energia per unità di lunghezza di spiaggia, Ps, espresso in W/m, è esprimibile mediante la seguente espressione:

$$Ps = Enc\cos\alpha$$

dove:

α è l'angolo di inclinazione delle onde rispetto alla normale alla linea di costa.

c_g la celerità di gruppo;

n (funzione di dispersione) = $\frac{1}{2}\left(1+\frac{2kd}{senh(2kd)}\right)$;

k (numero d'onda) = 2π/L;

d (profondità del fondale marino);

c (celerità di propagazione del moto ondoso) = L/T.

La componente longitudinale del vettore del flusso di energia per unità di larghezza di spiaggia, Pls, espressa in W/m, viene espressa attraverso l'equazione:

$$Pls = \frac{1}{2} Encsen(2\alpha) = \frac{1}{2} Psen(2\alpha)$$

L'angolo medio della normale, α_{norm} (°), al litorale rispetto al Nord Cartografico, risulta pari a 155°N.

Si considera, per convenzione, positivo il valore del flusso longshore diretto da Sud a Nord e da Est verso Ovest. La direzione, $\alpha_{energia}$ = 174.53°N è coincidente con la risultante dei flussi energetici sottocosta caratterizzata dalla direzione dall'onda di modellazione annuale. Pertanto, ne conseguono dei valori di α (angolo di inclinazione delle onde rispetto alla normale alla linea di costa), molto simili fra loro, pari a:

$$\alpha_{P1} = \alpha_{energia\ P1} - \alpha_{norm\ P1} = -19.53°N$$

I risultati mostrano un valore del flusso longshore netto medio annuo diretto da Ovest a Est per il punto sottocosta, negativo per convenzione e pari a:

Pls = -11.94 W/m

11 Profondità di chiusura di spiaggia

La profondità di chiusura di una spiaggia risulta la massima profondità del fondale in cui un'onda fa sentire i suoi effetti ai fini del trasporto solido litoraneo.

Il calcolo del suo valore può avvenire tramite la comparazione dei rilievi batimetrici delle medesime sezioni effettuate in anni diversi. In mancanza di queste informazioni, come nel caso del paraggio in esame, si può usare una delle relazioni semi-empiriche riconosciute in letteratura.

In particolare, per il paraggio di Sanremo si è fatto riferimento alla relazione di Hellermeier, secondo cui:

$$h_c = 1.6 H_{0,12}$$

dove:

h_c è la profondità di chiusura;

$H_{0,12}$ è l'altezza d'onda a largo che compare per 12 ore l'anno, nel settore di traversia (345°-135°N) considerato per il paraggio oggetto di studio.

Il valore di $H_{0,12}$ si ricava dall'analisi statistica effettuata sui dati d'onda disponibili al largo di Sanremo (dedotti dal nodo ERA5), calcolando preliminarmente la percentuale di apparizione delle onde relative a tutti gli eventi registrati, *n*:

$$n = \frac{NT}{n_{H\alpha}} = 0.647$$

dove NT (numero totale di stati di mare individuati al largo del paraggio di Sanremo, esclusi gli eventi di calma) = 226593, ed $n_{H\alpha}$ rappresenta il numero di apparizioni che compete all'onda di altezza H_s e direzione α nei 40 anni di osservazione derivanti dalle registrazioni del nodo ERA5, pari a 350400, dato da 40*24*365.

Noto il valore di *n*, si ricava il tempo $t_{H\alpha}$:

$$t_{H\alpha} = n_{oreanno} \cdot n = 5664.8 \text{ ore}$$

essendo $n_{oreanno}$ (numero di ore in un anno) = 8760 ore.

Quindi, si contano tutte le classi d'altezza d'onda significativa determinate al largo di Sanremo, prescindendo dalla direzione e si sommano per tutte le direzioni considerate, determinando il tempo di apparizione totale della singola onda per tutto il settore di traversia, t_H:

$$t_H = \sum_{\alpha=\alpha_1}^{\alpha_2} t_{H\alpha}$$

dove α_1 e α_2 sono le direzioni estreme del settore di traversia.

Noto il valore di t_H è possibile ricavare una relazione fra H_s e t_H costruendo una curva che restituisce i tempi di apparizione di ogni singola onda.

Il valore di $H_{0,12}$ è immediatamente determinato intersecando la curva di apparizione con la retta parallela all'asse delle ascisse e passante per il punto di ordinata *t* = 12 h. In Figura 35 è mostrata la curva di apparizione delle onde per il paraggio di Sanremo. Dall'intersezione fra la curva di apparizione e la retta, si ricava $H_{0,12}$ = 3.35 m (vedi Figura 36) e si determina, attraverso la succitata relazione di Hallermeier, il corrispondente valore della profondità di chiusura, h_c = **5.40 m**.

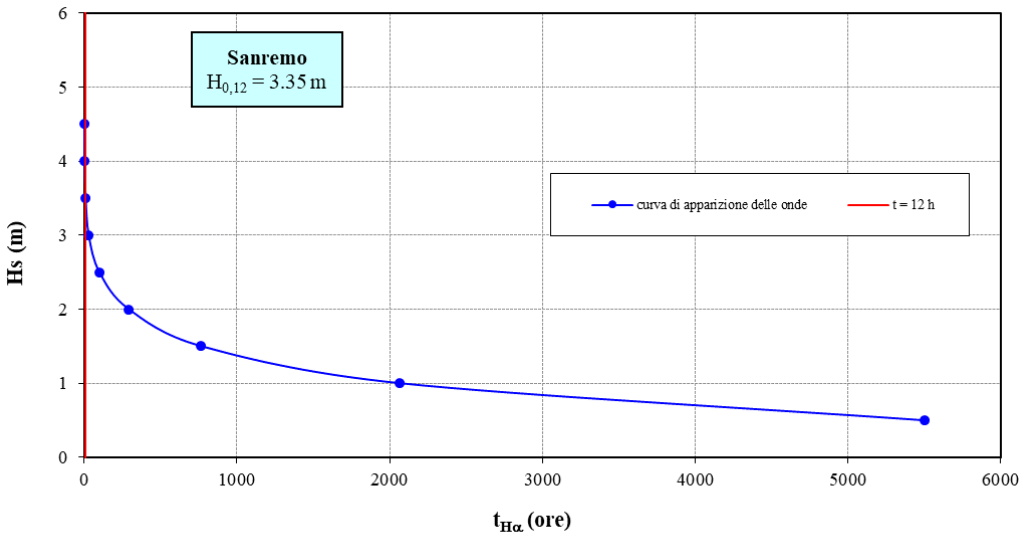


Figura 35: Curva di apparizione delle onde (paraggio di Sanremo)

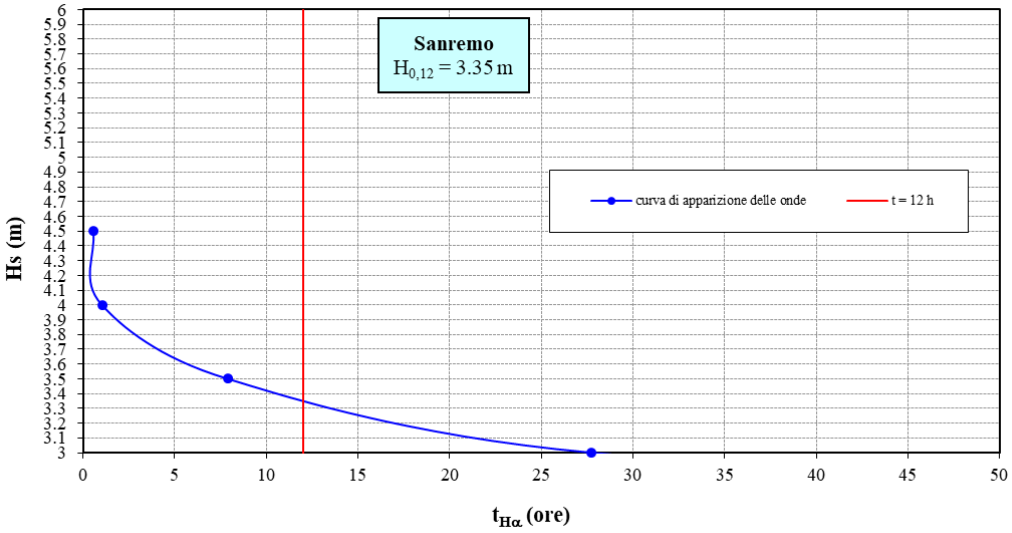


Figura 36: Particolare della curva di apparizione delle onde (paraggio di Sanremo)

12 Soluzione tecnica proposta

Per comprendere la migliore soluzione progettuale da adottare non si può prescindere dalla conoscenza del clima ondoso e dalla esatta determinazione della risultante energetica del moto ondoso. Come illustrato nei paragrafi precedenti:

- Il trasporto solido sulla spiaggia è prevalentemente di tipo long-shore;
- La profondità di chiusura della spiaggia è -5,40 m;
- Non sono presenti torrenti nei pressi dell'area di intervento;

Tali condizioni al contorno suggeriscono l'impiego di opere di protezione di tipo TRASVERSALE (pennelli) poiché il trasporto solido prevalente si verifica LUNGOCOSTA. Il rischio di PERDITA DI SEDIMENTI verso il LARGO è ridottissimo per cui sono sconsigliate opere di difesa di tipo LONGITUDINALE (barriere emerse o sommerse). Infine, per avere un'opera a regime già al suo compimento vi è la necessità di attuare un ripascimento lungo tutto il tratto.
Gli attuali pennelli, presenti lungo il tratto oggetto di intervento, non riescono a svolgere il loro compito perché posizionati ad una batimetrica troppo prossima alla battigia, mentre i nuovi pennelli saranno posti ad una batimetrica di circa -4 m e, quindi, permetteranno di trattenere maggiore materiale senza andare ad interferire in maniera netta con il flusso di sedimenti che avviene all'interno della spiaggia attiva, che è delimitata dalla batimetrica -5,40 m (profondità di chiusura della spiaggia).