



AUTORITÀ PORTUALE
DEL LEVANTE

Porti di Bari, Barletta, Monopoli

Autorità Portuale del Levante
Piazzale C. Colombo n. 1, 70122 Bari
Telefono +39 080 5788532 | Fax +39 080 5245449

Avviso Pubblico per la Realizzazione e Gestione di un Approdo Turistico presso il Molo Margherita del Porto di Monopoli



PROGETTO PRELIMINARE: RELAZIONE TECNICA IDRAULICO-MARITTIMA

PROGETTISTI

ROTONDO INGEGNERI ASSOCIATI
via S. Amatore 9/a – Cellamare (BA)
Ing. Francesco ROTONDO

Ing. Biagio NOBILE

(Idraulica Marittima)
via G. Mameli 15 – Bari

PROPONENTI

NA.P.I. s.r.l.
VIROMARE s.r.l.

COLLABORATORE

Arch. Claudio N. Biancofiore
via M. D'Azeglio 1 – Bari

RT

Comune di Monopoli

(Provincia di Bari)

PROGETTO PRELIMINARE

***“RELAZIONE IDRAULICO – MARITTIMA PER LA
REALIZZAZIONE DI UN APPRODO TURISTICO
ALL’INTERNO DEL BACINO DEL PORTO DI MONOPOLI”***

Bari, aprile 2012

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

INDICE

<u>PREMESSA</u>	2
<u>1. CARATTERISTICHE GENERALI DEL SITO E DEL MOTO ONDOSO</u>	4
<u>1.1. Inquadramento geografico e morfologico del paraggio</u>	4
<u>1.2. Settore di traversia e fetch del paraggio</u>	7
<u>2. RICOSTRUZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO</u>	11
<u>2.1. Metodo diretto</u>	11
<u>2.2. Elaborazione dei dati ondametrici</u>	12
<u>2.3. Relazione tra altezza d'onda e periodo di picco</u>	18
<u>2.4. Eventi estremi di moto ondoso al largo</u>	19
<u>2.5. Clima meteomarino equivalente del paraggio</u>	26
<u>2.6. Profondità di chiusura</u>	28
<u>3. MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA</u>	30
<u>3.1. Generalità</u>	30
<u>3.2. Il modello matematico SWAN</u>	30
<u>3.3. Griglie di calcolo</u>	32
<u>3.4. Propagazione sottocosta degli eventi estremi di moto ondoso</u>	36
<u>3.5. Agitazione ondosa all'interno del bacino portuale</u>	39
<u>4. VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO</u>	43

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

PREMESSA

La presente relazione idraulico – marittima è stata redatta nell'ambito del progetto preliminare per la realizzazione di un approdo turistico all'interno del bacino portuale del porto di Monopoli.

Il progetto in parola (figura 1) prevede la sistemazione lungo il lato interno del Molo Margherita di tre pontili galleggianti con la realizzazione di circa 152 posti barca complessivi per l'ormeggio di imbarcazioni da diporto di lunghezza variabile tra 8.5 e 21 metri; il presente progetto prevede anche la realizzazione di un area attrezzata per il rifornimento delle imbarcazioni da realizzarsi all'estremità superiore della Banchina della Solfatara.

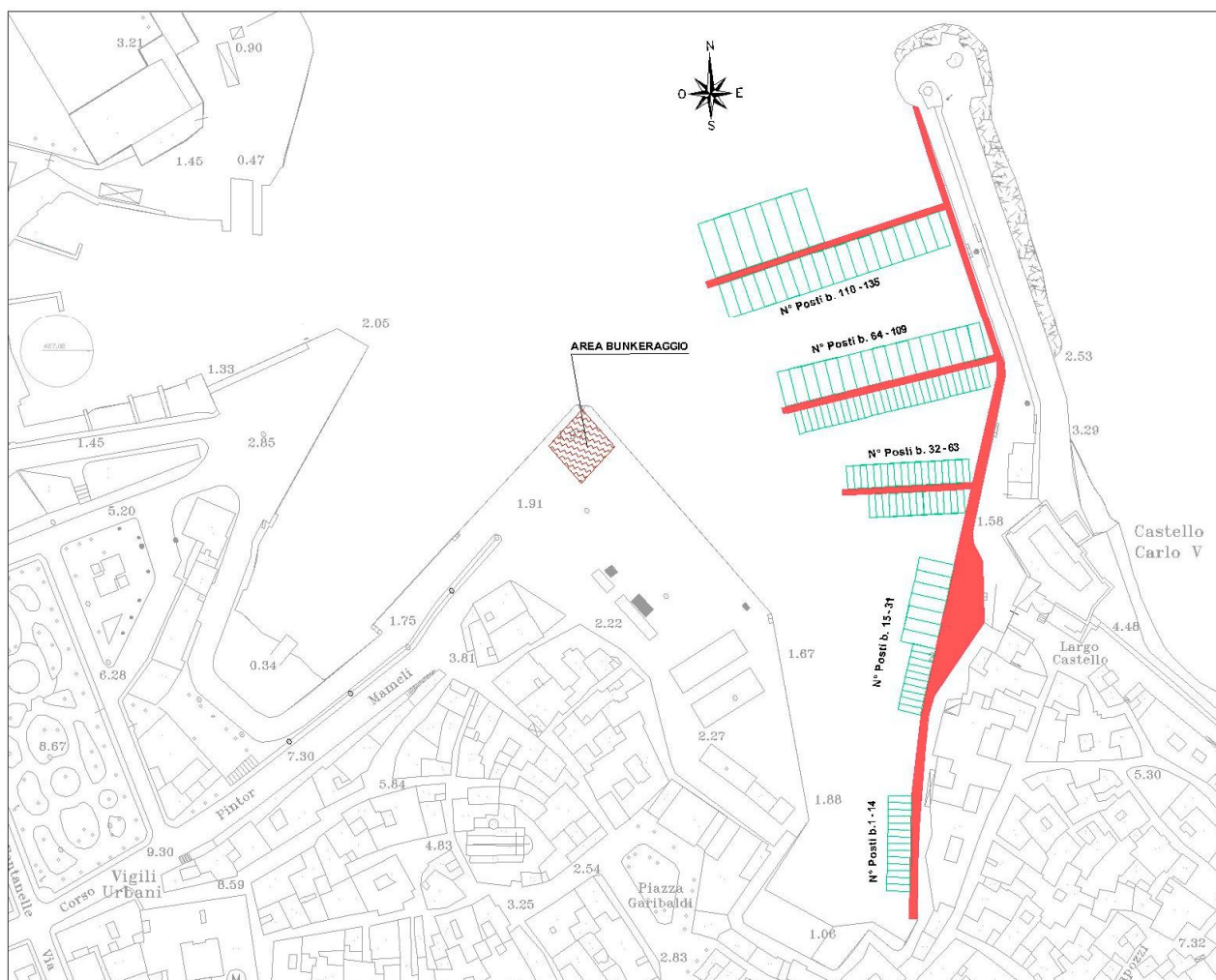


Figura 1: planimetria di progetto.

Nel presente studio è stato ricostruito il clima meteomarinico al largo di Monopoli attraverso l'elaborazione delle registrazioni della boa ondometrica RON posta al largo del paraggio in esame; attraverso idonei modelli matematici sono state quindi analizzate le trasformazioni che le onde

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

subiscono quando si propagano verso riva attraverso l'elaborazione di piani d'onda che riproducono l'andamento dei raggi d'onda dal largo fino alla costa.

Note le caratteristiche delle mareggiate incidenti in prossimità dell'imboccatura portuale, si è proceduto quindi allo studio dell'agitazione ondosa all'interno dello specchio acqueo protetto analizzando le condizioni ondose residue generate dalle onde al largo aventi tempo di ritorno T_r pari a 50 anni.

1. CARATTERISTICHE GENERALI DEL SITO E DEL MOTO ONDOSO

1.1. Inquadramento geografico e morfologico del paraggio

Il porto di Monopoli è ubicato lungo la costa meridionale del territorio della provincia di Bari (figura 1.1.1).

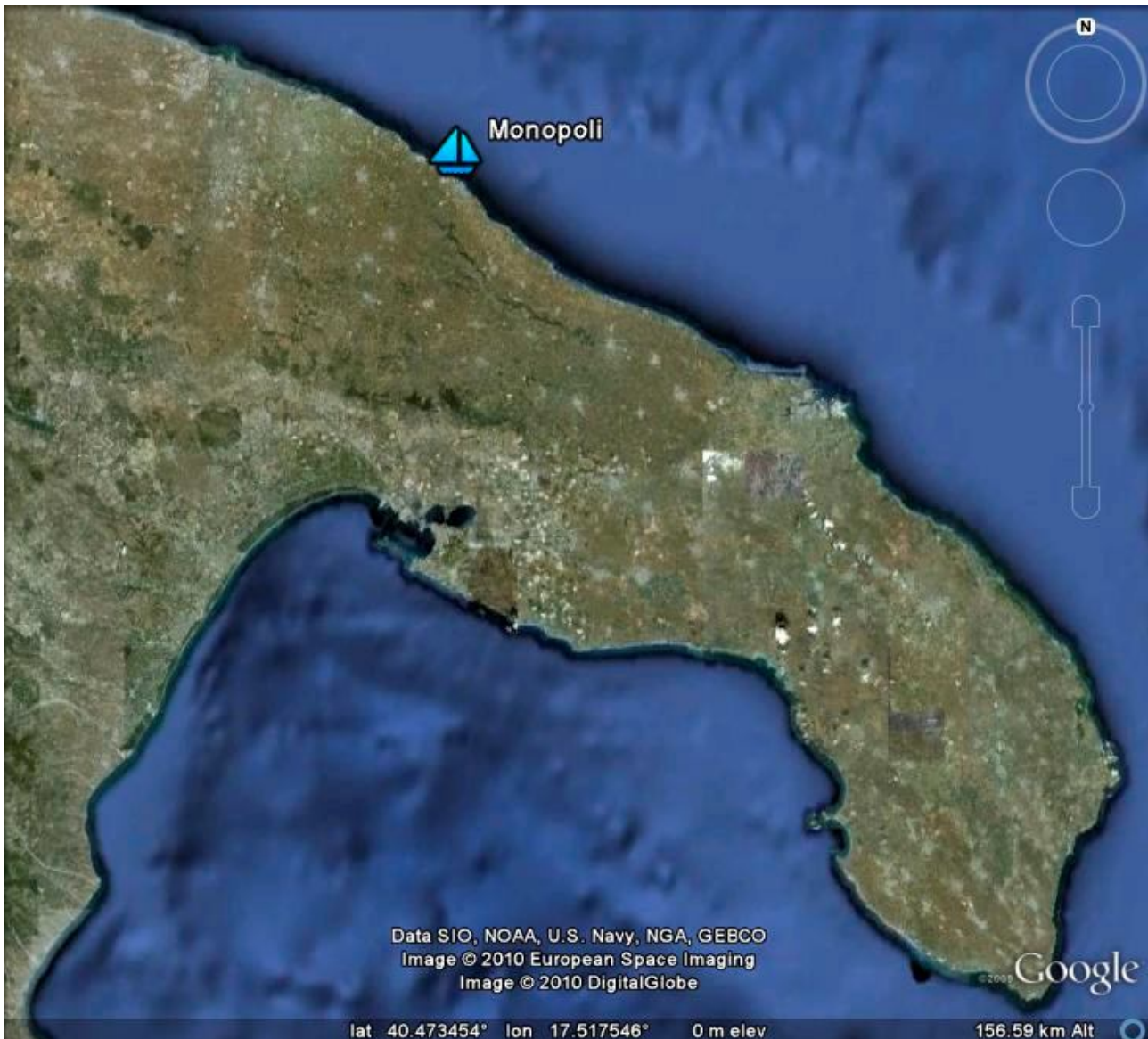


Figura 1.1.1: inquadramento territoriale.

Nell'ambito del *Piano Regionale delle Coste*, approvato dalla Regione Puglia con delibera n. 2273 del 13/10/2011 (Boll. Uff. Regione Puglia n. 174 del 09/11/2011) in base alla L.R. n. 17 del 23/06/2006, il litorale pugliese è stato suddiviso in sette unità fisiografiche, dove ciascuna unità definisce un tratto di litorale delimitato da due sezioni attraverso le quali non vi è scambio

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

longitudinale di sedimenti; ciascuna unità fisiografica, quindi, si evolve autonomamente rispetto ai tratti limitrofi.

Il porto di Monopoli ricade all'interno della unità fisiografica principale denominata "U.F. 3" che si estende dal molo di sottoflutto del porto di Bari fino a Punta Penne (Brindisi) per una lunghezza complessiva di circa 184 km.; il porto di Monopoli costituisce altresì il limite di separazione tra le due sub – unità in cui è stata ulteriormente suddivisa l'unità fisiografica su indicata.

Il litorale in prossimità dell'abitato di Monopoli è contraddistinto da costa bassa rocciosa, con presenza di varie tipologie di profilo: digradante sub - orizzontale o inclinato, continuo o terrazzato; il litorale non presenta tratti di costa sabbiosi o ciottolosi, fino alla località di Capitolo ubicata a circa 6km a sud.

Il *Piano Regionale delle Coste* ha individuato su tutta la fascia demaniale della costa pugliese differenti livelli di criticità all'erosione dei litorali e differenti livelli di sensibilità ambientale associata alle peculiarità territoriali del contesto.

La criticità all'erosione è stata definita in funzione di tre indicatori che individuano la tendenza evolutiva storica del litorale, la tendenza evolutiva recente e lo stato di conservazione dei sistemi dunali; la criticità all'erosione viene distinta in elevata, media e bassa.

La sensibilità ambientale è stata definita in funzione di una molteplicità di indicatori che rappresentano lo stato fisico della fascia costiera (comprendente l'area demaniale e il suo contesto territoriale di riferimento), in relazione al sistema delle norme di tutela che ne sottolineano la valenza ambientale; la sensibilità ambientale viene distinta in elevata, media e bassa.

Nella figura 1.1.2 è riportata la classificazione della costa in base ai criteri fissati dal *Piano Regionale delle Coste*. Il tratto di costa in esame è stato classificato con una criticità all'erosione di ordine basso essendo costituito da costa rocciosa stabile; per quanto riguarda la sensibilità ambientale si distinguono i tratti limitrofi all'area portuale con sensibilità media, mentre l'area portuale ha sensibilità bassa. In entrambi i casi le Norme Tecniche di



Figura 1.1.2: classificazione del litorale riportata nel Piano Regionale delle Coste.

Relazione idraulico marittima per la realizzazione di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli

Attuazione del Piano non prevedono in tali zone particolari restrizioni d'uso se non l'attività di monitoraggio che avvalorati a livello locale la classificazione effettuata su base regionale.

Uno strumento ampiamente utilizzato per l'inquadramento geomorfologico dei litorali italiani è l'*Atlante Italiano delle Spiagge* (1997), compilato da ricercatori afferenti a diverse sedi universitarie e con il finanziamento del CNR. L'*Atlante Italiano delle Spiagge* dà un quadro omogeneo di tutti i litorali italiani; esso è costituito da 108 fogli in scala 1:100.000 compilati in un intervallo temporale che va dal 1981 al 1995; il porto di Monopoli ricade è riportato nel foglio n. 190 dell'*Atlante* (figura 1.1.3).

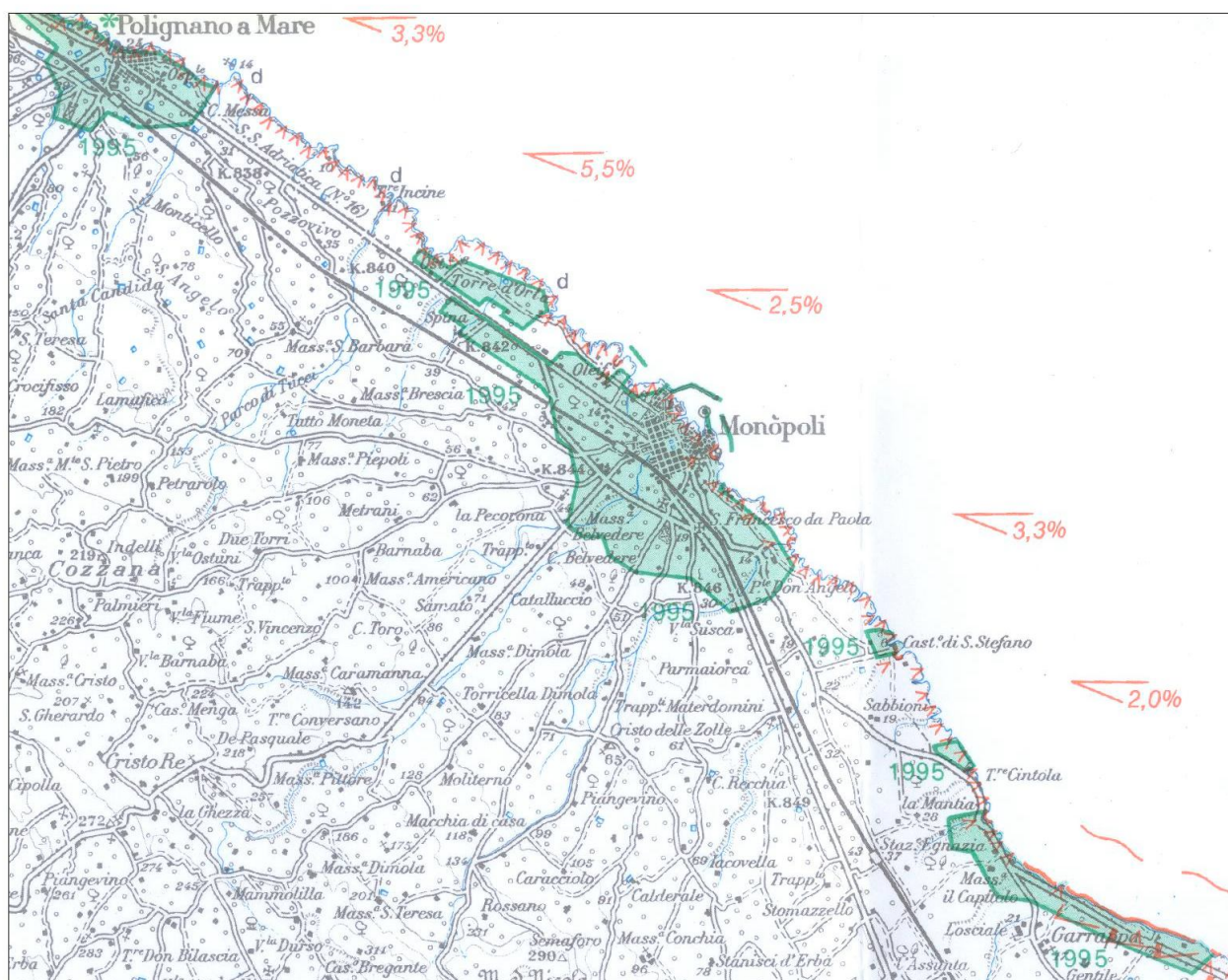


Figura 1.1.3: inquadramento geomorfologico – *Atlante delle Spiagge Italiane* (CNR 1997).

Dall'analisi della figura si evidenzia che il litorale in prossimità del porto di Monopoli è indicato costituito da costa alta rocciosa con alcuni brevi tratti caratterizzati da spiaggia ghiaiosa al piede; non sono indicate aree in erosione, mentre sono riportati alcuni tratti in prossimità dell'abitato di Monopoli, sia a Nord che a Sud, difesi con opere di protezione longitudinali aderenti. La pendenza

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

media della spiaggia sommersa (dalla linea di battigia all'isobata di 5m) è variabile ed è compresa tra 2.5% e 3.3% nello specchio acqueo antistante l'area portuale. Non è indicato un verso prevalente del trasporto solido longitudinale.

1.2. Settore di traversia e fetch del paraggio

Come è noto, il settore di traversia di un paraggio A è dato dall'arco di circonferenza di centro A che comprendente tutte le direzioni da cui possono provenire le agitazioni ondose determinate dai venti foranei.

Il settore di traversia geografico del paraggio di Monopoli (figura 1.2.1) comprende tutte le direzioni tra 300°N e 130°N.

A partire da un punto fissato al largo del paraggio di Monopoli sono stati tracciati i fetch geografici, dove per fetch geografico si intende la distesa di mare libero entro cui il vento spira con velocità e direzione costanti; il fetch geografico, quindi, rappresenta la porzione di mare, nella direzione del vento, sulla quale può avvenire la



Figura 1.2.1: inquadramento del paraggio.

generazione del moto ondoso a opera dell'azione esercitata dal vento. Nella tabella 1.2.1 è riportato il valore dei fetch geografici misurati in corrispondenza delle varie direzioni di provenienza dei venti foranei; la distribuzione dei fetch presenta quattro zone ben distinte:

- il settore compreso tra 290°N e 315°N è caratterizzato da fetch dell'ordine di 140km, limitati dal promontorio del Gargano;
- alle direzioni 320°N e 325°N competono i fetch più sviluppati, circa 650km, che si estendono fino alla costa veneta;
- dalla direzione 330°N alla direzione 125°N i fetch risultano limitati dalle coste iugoslave e albanesi;
- i fetch dalle direzioni 130°N a 285°N, sono limitati dalle coste pugliesi.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

DIR. (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)	DIR. (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)	DIR. (°N)	FETCH GEOGRAFICI (km)
0	190	120	255	240	13
5	188	125	234	245	13
10	192	130	68	250	14
15	190	135	56	255	15
20	186	140	40	260	15
25	180	145	35	265	17
30	179	150	31	270	20
35	182	155	29	275	23
40	180	160	26	280	35
45	180	165	21	285	53
50	175	170	20	290	106
55	183	175	17	295	134
60	190	180	16	300	137
65	190	185	17	305	130
70	179	190	16	310	128
75	174	195	15	315	136
80	165	200	13	320	608
85	166	205	13	325	620
90	168	210	11	330	418
95	163	215	11	335	242
100	163	220	11	340	203
105	165	225	11	345	217
110	175	230	11	350	212
115	190	235	12	355	208

Tabella 1.2.1: fetch geografici nel paraggio di Monopoli.

Oltre al fetch geografico è stato calcolato anche il valore del fetch efficace che viene introdotto per considerare sia l'effetto della larghezza del fetch, sia l'effetto della dispersione direzionale dell'energia dell'onda sullo sviluppo e propagazione dell'onda. L'uso dei fetch efficaci è particolarmente appropriato nei mari di dimensioni ridotte sottoposti a perturbazioni ondose di lunga durata.

I fetch efficaci $F_{e,w}$ sono stati calcolati ogni 5 gradi, utilizzando la relazione:

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

in cui:

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

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

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

Nella figura 1.2.2 sono stati rappresentati i valori dei fetch efficaci e geografici; il settore di traversia efficace, se si considera un valore minimo del fetch pari a 100km, risulta compreso nell'intervallo $289^\circ\text{N} - 116^\circ\text{N}$.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

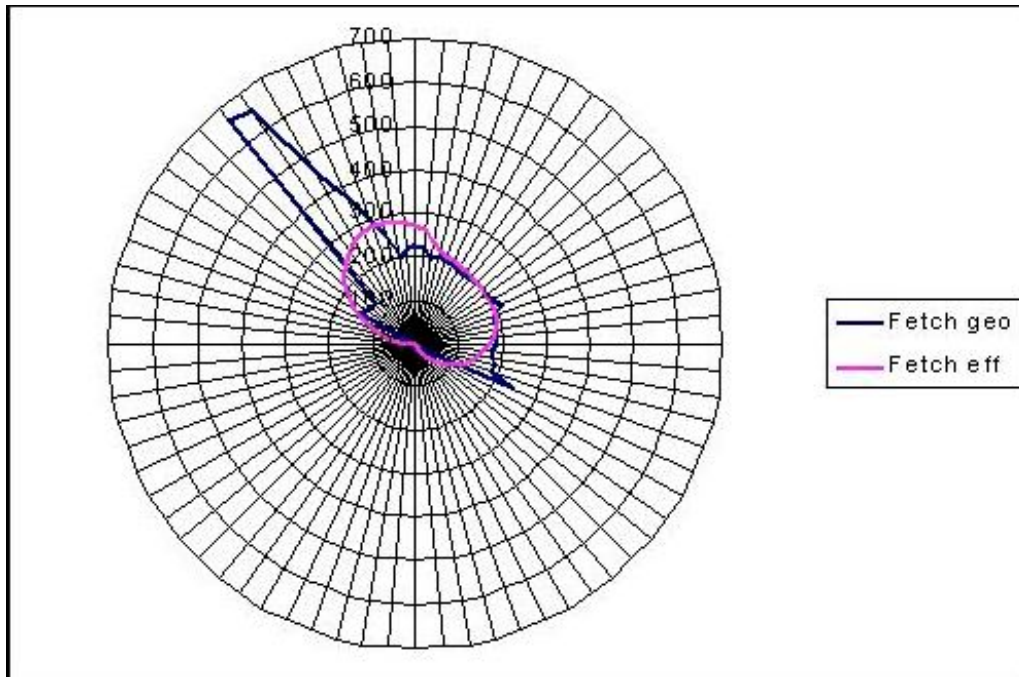


Figura 1.2.2: distribuzione dei fetch geografici e efficaci.

2. RICOSTRUZIONE DEL CLIMA METEOMARINO AL LARGO

Per ricavare la ricostruzione storica delle mareggiate al largo di un paraggio possono essere adottati sia metodi indiretti, a partire dai dati di ventosità, sia metodi diretti, a partire da misure dirette. In entrambi i casi è necessario disporre di serie storiche e alle procedure di tipo statistico necessarie per la ricostruzione del clima ondoso medio.

Per la determinazione del clima meteomarinografico diretto essendo disponibili i dati registrati nello stesso paraggio in esame.

2.1. Metodo diretto.

Per la determinazione del clima meteomarinografico diretto sono stati registrati dalla boa ondometrica ormeggiata nel porto di Monopoli e dalla boa ondometrica RON nel basso Adriatico.

La Rete Ondometrica Nazionale (R.O.N.), le cui boe sono dislocate lungo le coste italiane (figura 2.1.1), è attualmente gestita dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT). Le boe ondometriche attualmente registrano in continuo, le misure vengono elaborate e restituite a cadenza semioraria. Le serie storiche rilevate dal 1989 al 2007 sono attualmente disponibili sul sito www.idromare.com.

L'importanza di tali dati risiede nella continuità e nel buon rendimento con cui sono stati acquisiti. I dati durante il periodo di acquisizione sono stati



Figura 2.1.1: ubicazione delle boe del RON.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

acquisiti dalla boa con regolarità, ad eccezione del 2007 (figura 2.1.2), per cui la percentuale di dati mancanti risulta pari al 14.31% di tutte le osservazioni (tabella 2.1.1).

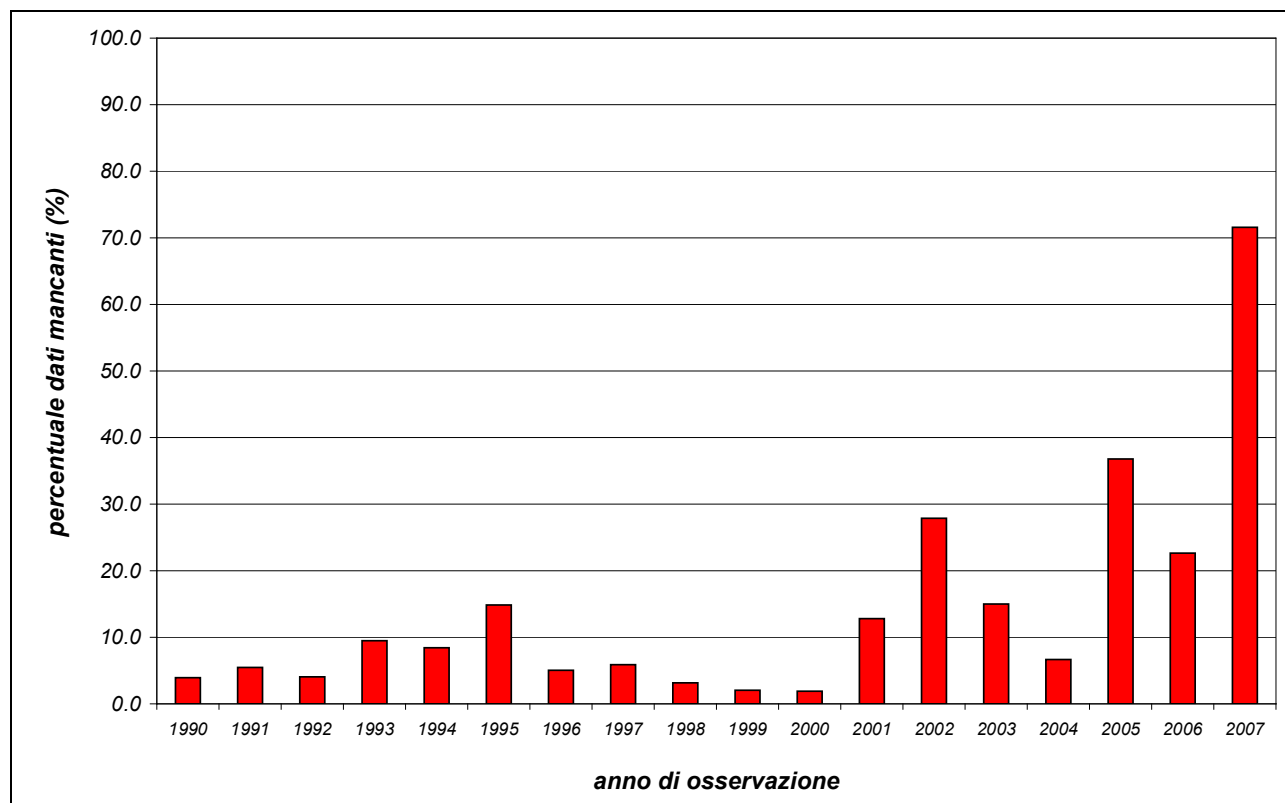


Figura 2.1.2: percentuale dei dati mancanti della boa di Monopoli.

PERIODO DI OSSERVAZIONE	TOTALE DATI	DATI NON VALIDI	% DATI NON VALIDI	DATI VALIDI
1990 - 2007	52592	7525	14.31%	45067

Tabella 2.1.1: caratteristiche della boa di Monopoli.

2.2. Elaborazione dei dati ondametrici

La prima operazione che è stata effettuata sui rilievi ondametrici della boa di Monopoli è il calcolo delle frequenze di apparizione dei singoli stati di mare registrati dalla boa classificati per direzione di provenienza ed intensità. Nella tabella 2.2.1 sono riportati i risultati ottenuti ordinando le mareggiate per classi di altezza d'onda di 1.0m e per settori di provenienza di 30°, avendo assunto che le altezze d'onda inferiori a 0.25m sono calme; i dati elaborati sono stati rappresentati graficamente nel diagramma polare di figura 2.2.1 (percentuale di apparizione – direzione – intensità) e nel grafico di figura 2.2.2 (percentuale di apparizione – classe di altezza d'onda).

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

Dall'analisi registrazioni effettuate risulta che il settore di traversia del paraggio è costituito dalle direzioni comprese tra NNO e ESE. La massima frequenza di apparizione spetta alle mareggiate provenienti da NNO che fanno registrare una percentuale del 23.53%. Le mareggiate da ESE costituiscono il 14.19% dei dati registrati, mentre le mareggiate da Nord raggiungono il 13.85% di tutte le osservazioni. Le onde da Est sono piuttosto frequenti nel paraggio con una frequenza del 10.81%, mentre le onde da NNE e ENE fanno registrare percentuali tra il 7.74% e il 8.99%.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.50 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	4.58	7.20	1.65	0.36	0.06	0.00	13.85
30	2.59	4.05	0.91	0.16	0.03	0.00	7.74
60	2.72	4.63	1.26	0.33	0.04	0.01	8.99
90	5.04	5.48	0.25	0.04	0.00	0.00	10.81
120	3.51	10.15	0.52	0.01	0.00	0.00	14.19
150	0.37	0.57	0.02	0.00	0.00	0.00	0.96
180	0.21	0.24	0.01	0.00	0.00	0.00	0.46
210	0.21	0.19	0.02	0.00	0.00	0.00	0.42
240	0.16	0.21	0.01	0.00	0.00	0.00	0.38
270	0.19	0.25	0.02	0.00	0.00	0.00	0.46
300	0.50	1.20	0.14	0.02	0.00	0.00	1.86
330	5.63	15.58	2.04	0.26	0.02	0.00	23.53
TOT	25.71	49.75	6.85	1.18	0.15	0.01	83.65

Tabella 2.2.1: percentuali annuali di apparizione del moto ondoso ordinate per classi di altezza d'onda e per direzione.

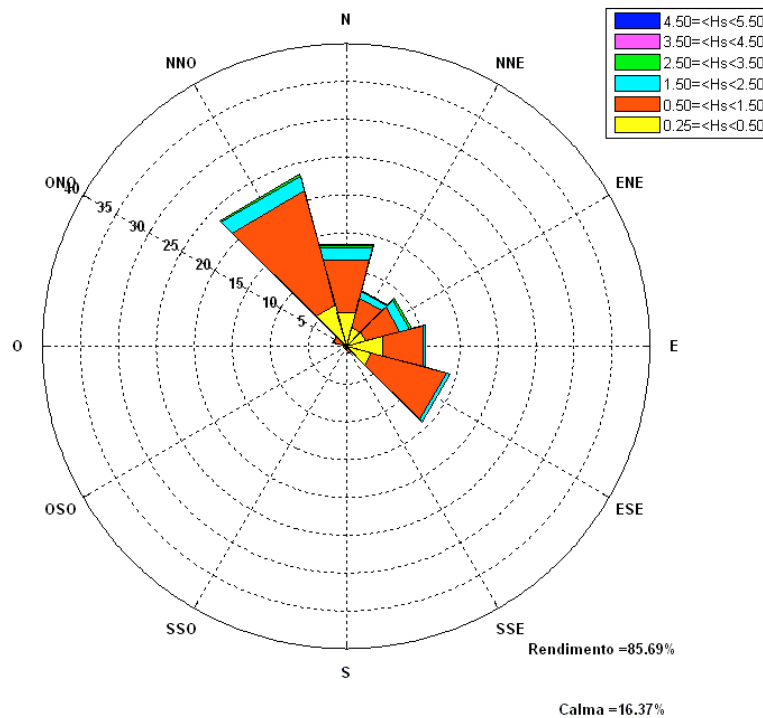


Figura 2.2.1: frequenze di apparizione annuali.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

Se si classificano le onde secondo l'altezza significativa (figura 2.2.2) si osserva che le onde con altezza significativa minore di 0.5m rappresentano il 25.71% di tutte le osservazioni, mentre le onde con altezza compresa tra 0.5 e 1.5m costituiscono il 49.75% delle registrazioni e sono le mareggiate più frequenti. Risulta, inoltre, che il 6.8% delle osservazioni compete ad onde con altezza compresa tra 1.5 e 2.5m. Le mareggiate con altezza compresa tra 2.5 e 3.5m sono poco frequenti nel paraggio e fanno registrare una percentuale del 1.18%. E' stato anche osservato che lo 0.16% delle onde registrate nel paraggio ha altezza maggiore di 3.5m.

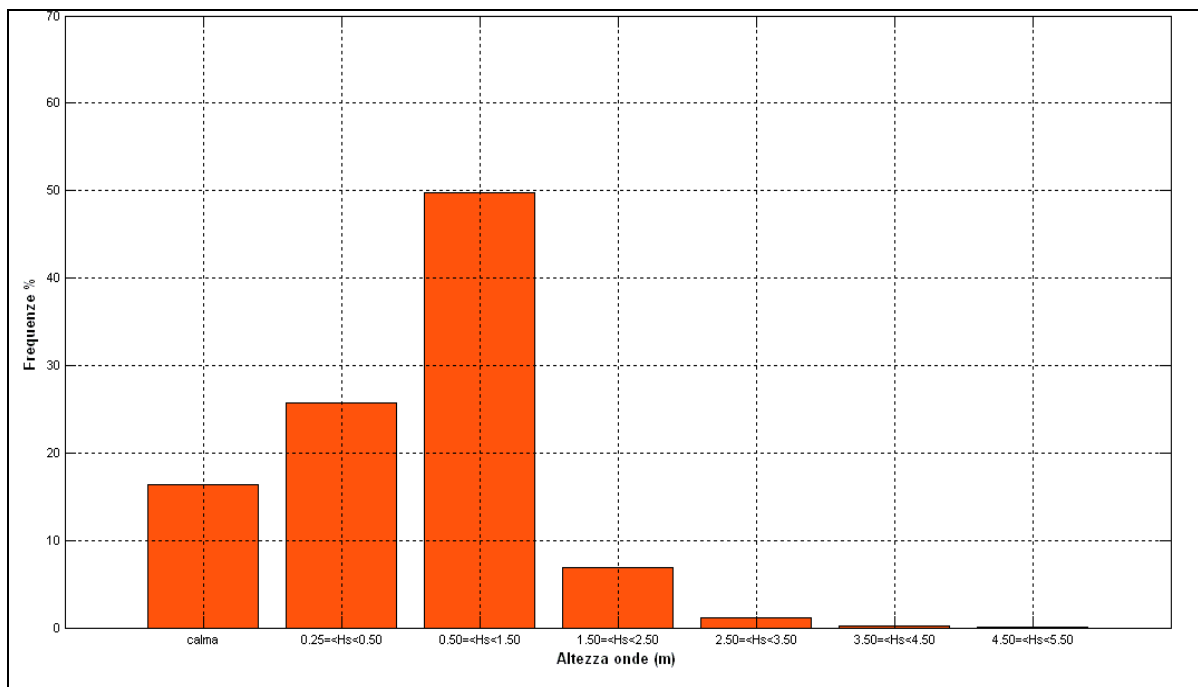


Figura 2.2.2: frequenze di apparizione annuali delle classi di altezza d'onda.

Nella tabella 2.2.2 ed in figura 2.2.3 i dati ondometrici della boa di Monopoli sono stati ordinati per periodo di picco e per direzione di provenienza della mareggiata. Dall'analisi dei dati si osserva che la frequenza di apparizione maggiore spetta alle onde con periodo compreso tra 3 e 7 secondi (67.68%); le onde con periodo di picco minore di 3 secondi rappresentano il 3.06% del totale, mentre le onde con periodo maggiore di 7 secondi costituiscono il 12.87%.

Nelle tabelle da 2.2.3 a 2.2.6 sono state riportate le percentuali di apparizione del moto ondoso suddivise per le quattro stagioni; le frequenze di apparizione stagionale sono state rappresentate nei grafici di figura 2.2.4.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

dir (°N)	periodo di picco T_p (s)						totale
	$T_p < 2.0$	$2.0 \leq T_p \leq 3.0$	$3.0 \leq T_p \leq 5.0$	$5.0 \leq T_p \leq 7.0$	$7.0 \leq T_p \leq 8.0$	$T_p \geq 8.0$	
0	0.01	0.23	5.64	5.72	1.33	0.91	13.84
30	0.00	0.08	2.48	3.53	1.00	0.62	7.71
60	0.00	0.09	2.26	4.20	1.50	0.93	8.98
90	0.00	0.63	4.31	3.90	1.06	0.91	10.81
120	0.00	0.53	6.71	5.43	1.02	0.49	14.18
150	0.00	0.14	0.34	0.26	0.09	0.14	0.97
180	0.00	0.09	0.11	0.10	0.03	0.14	0.47
210	0.00	0.06	0.08	0.09	0.03	0.16	0.42
240	0.00	0.03	0.10	0.09	0.03	0.13	0.38
270	0.00	0.04	0.14	0.13	0.03	0.11	0.45
300	0.00	0.17	0.77	0.59	0.09	0.25	1.87
330	0.02	0.94	10.97	9.73	1.11	0.76	23.53
TOT	0.03	3.03	33.91	33.77	7.32	5.55	83.61

Tabella 2.2.2: percentuali annuali di apparizione del moto ondoso ordinate per periodo di picco e per direzione.

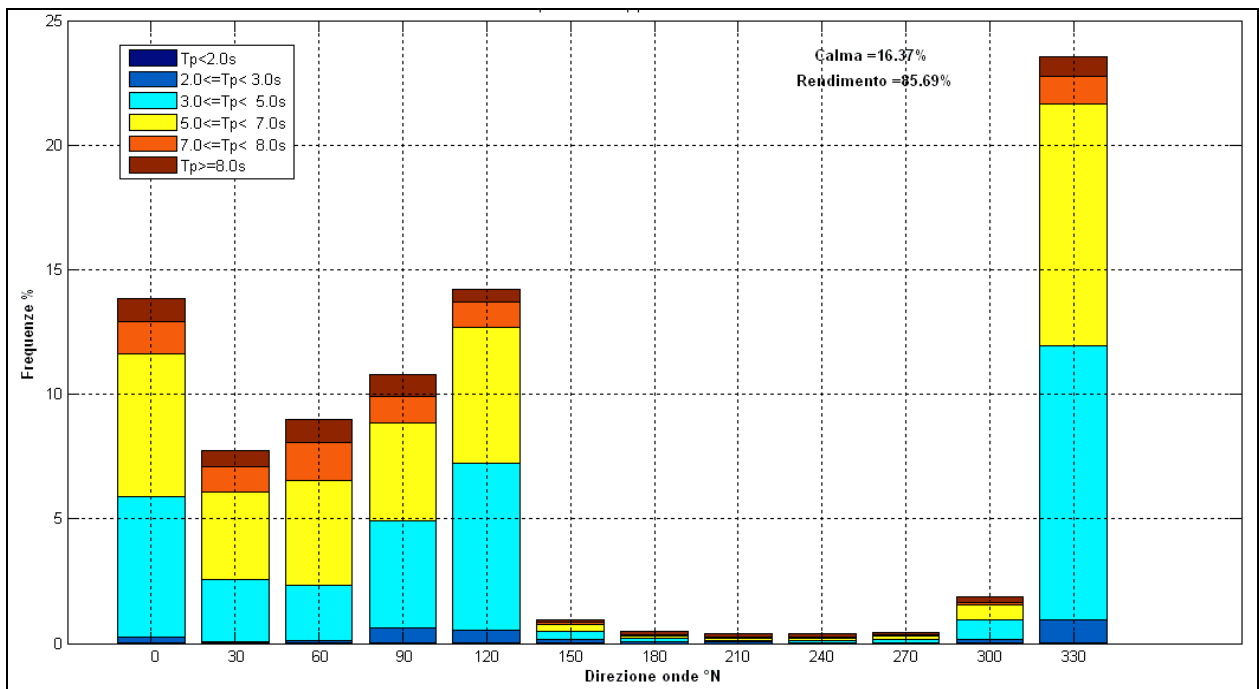


Figura 2.2.3: classificazione delle onde per periodo di picco e per direzione del moto ondoso.

Se si analizzano i dati ondometrici registrati su base stagionale si osserva che:

- in inverno le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (21.20%) e da N (19.18%); le direzioni da NNE, da ENE, da Est e da ESE fanno registrare percentuali tra il 9.80% ed il 12.13%; il 54.88% delle onde ha altezza compresa tra 0.5 e 1.5m, mentre le onde di altezza superiore a 2.5m costituiscono il 2.90% delle osservazioni totali stagionali;
- in primavera le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da NNO (25.60%), seguite dalle onde da ESE (16.49%) e dalle onde da Est (11.29%); durante la

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

stagione primaverile si registra la più alta percentuale di onde di altezza inferiore a 0.5m (30.36%);

- in estate le frequenze di apparizione maggiori provengono da NNO (32.42%), seguite dalle onde da Nord (13.50%); le altezze d'onda registrate in questa stagione risultano di modesta entità ed infatti le onde con altezza inferiore a 0.5m, comprese le calme, costituiscono il 53.30% del totale delle osservazioni stagionali;
- in autunno le frequenze di apparizione maggiori spettano alle mareggiate da ESE (19.04%), mentre si riduce di molto la frequenza delle onde da NNO (14.83%) rispetto agli altri riferimenti stagionali; significativo è il valore della percentuale di onde di altezza superiore a 2.5m pari a 1.99%.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.5 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	3.64	10.66	3.79	0.89	0.20	0.00	19.18
30	2.15	5.51	1.83	0.27	0.04	0.00	9.80
60	2.17	6.22	2.58	0.68	0.09	0.02	11.76
90	4.60	6.65	0.38	0.04	0.00	0.00	11.67
120	2.31	9.17	0.64	0.01	0.00	0.00	12.13
150	0.34	0.62	0.05	0.01	0.00	0.00	1.02
180	0.12	0.21	0.01	0.00	0.01	0.00	0.35
210	0.11	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
240	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
270	0.19	0.28	0.01	0.00	0.00	0.00	0.48
300	0.41	1.02	0.25	0.02	0.00	0.00	1.70
330	3.41	14.38	2.79	0.55	0.06	0.01	21.20
TOT	19.56	54.88	12.33	2.47	0.40	0.03	89.67

Tabella 2.2.3: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione invernale.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.5 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	4.62	4.37	0.61	0.09	0.02	0.00	9.71
30	2.67	2.40	0.40	0.03	0.00	0.00	5.50
60	3.01	2.29	0.34	0.03	0.00	0.00	5.67
90	6.23	4.99	0.07	0.00	0.00	0.00	11.29
120	4.73	11.40	0.36	0.00	0.00	0.00	16.49
150	0.35	0.47	0.03	0.00	0.00	0.00	0.85
180	0.25	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36
210	0.22	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31
240	0.17	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.28
270	0.11	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.29
300	0.69	1.57	0.09	0.03	0.01	0.00	2.39
330	7.31	16.50	1.62	0.16	0.01	0.00	25.60
TOT	30.36	44.44	3.56	0.34	0.04	0.00	78.74

Tabella 2.2.4: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione primaverile.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.5 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	6.61	6.33	0.54	0.02	0.00	0.00	13.50
30	3.10	3.07	0.12	0.00	0.00	0.00	6.29
60	2.34	2.50	0.19	0.00	0.00	0.00	5.03
90	4.32	2.08	0.04	0.00	0.00	0.00	6.44
120	3.41	5.44	0.01	0.00	0.00	0.00	8.86
150	0.23	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60
180	0.16	0.15	0.00	0.02	0.00	0.00	0.33
210	0.12	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26
240	0.12	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.20
270	0.16	0.17	0.02	0.00	0.00	0.00	0.35
300	0.54	1.52	0.08	0.01	0.00	0.00	2.15
330	8.63	21.54	2.14	0.11	0.00	0.00	32.42
TOT	29.74	43.38	3.15	0.16	0.00	0.00	76.43

Tabella 2.2.5: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione estiva.

dir (°N)	altezza significativa Hs (m)						totale
	0.25 - 0.50	0.5 - 1.50	1.50 - 2.50	2.50 - 3.50	3.50 - 4.50	4.50 - 5.50	
0	3.43	7.69	1.80	0.47	0.03	0.00	13.42
30	2.40	5.32	1.33	0.32	0.07	0.00	9.44
60	3.30	7.60	2.02	0.62	0.08	0.01	13.63
90	4.95	8.25	0.50	0.11	0.00	0.00	13.81
120	3.50	14.45	1.06	0.02	0.01	0.00	19.04
150	0.57	0.82	0.02	0.00	0.00	0.00	1.41
180	0.30	0.49	0.03	0.00	0.00	0.00	0.82
210	0.38	0.46	0.06	0.00	0.00	0.00	0.90
240	0.24	0.56	0.03	0.00	0.00	0.00	0.83
270	0.29	0.38	0.03	0.00	0.01	0.00	0.71
300	0.34	0.71	0.16	0.01	0.00	0.00	1.22
330	3.04	9.88	1.68	0.23	0.00	0.00	14.83
TOT	22.74	56.61	8.72	1.78	0.20	0.01	90.06

Tabella 2.2.6: percentuali di apparizione del moto ondoso durante la stagione autunnale.

Relazione idraulico marittima per la realizzazione di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli

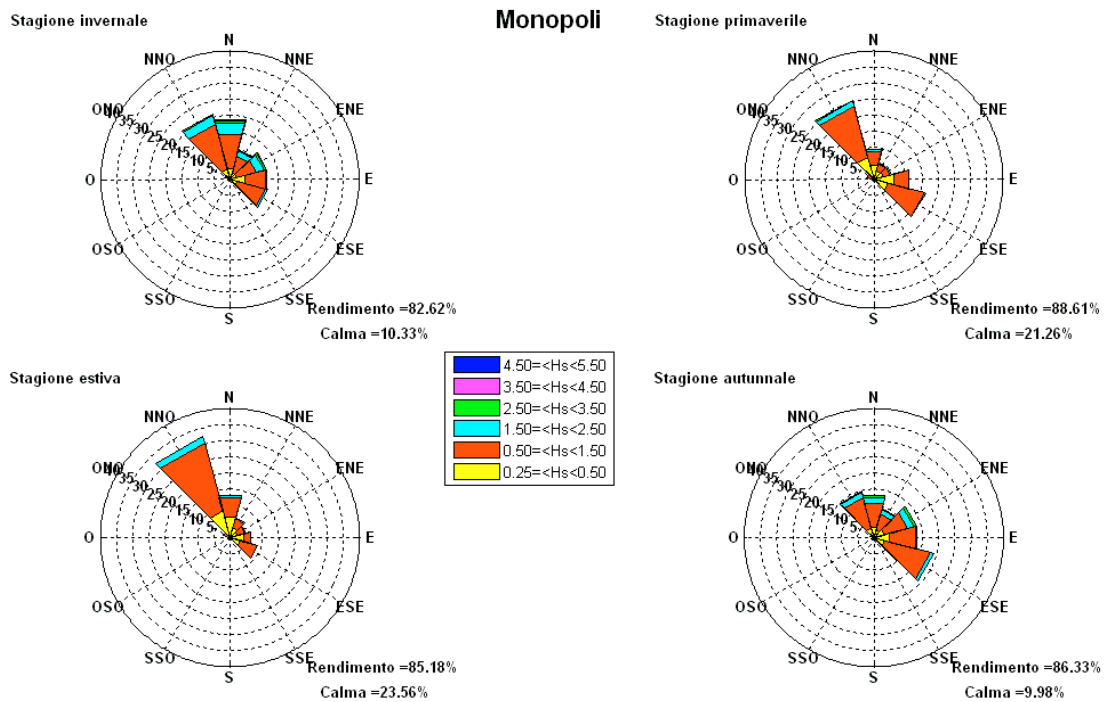


Figura 2.2.4: frequenze di apparizione stagionali.

2.3. Relazione tra altezza d'onda e periodo di picco

La correlazione tra l'altezza d'onda al largo e periodo di picco corrispondente è stata individuata attraverso l'analisi dei dati ricostruiti adottando la seguente formulazione matematica:

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

dove:

- T è il periodo dell'onda espresso in secondi;
- H_s è l'altezza d'onda significativa espressa in metri;
- α, β sono dei coefficienti di correlazione.

I dati d'onda sono stati suddivisi per altezze congruenti, fissando un fattore di soglia pari a 0.25m, 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 allora il periodo riferito alla i -esima onda come:

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

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

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} . I valori dei coefficienti di regressione sono riportati in figura 2.3.1 per il periodo di picco T_p e per il periodo medio T_m .

Con questi coefficienti sono stati calcolati i valori dei periodi di picco relativi alle onde variabili fra 0.5m e 6.0m, separate da intervalli discreti di 0.5m (tabella 2.3.1).

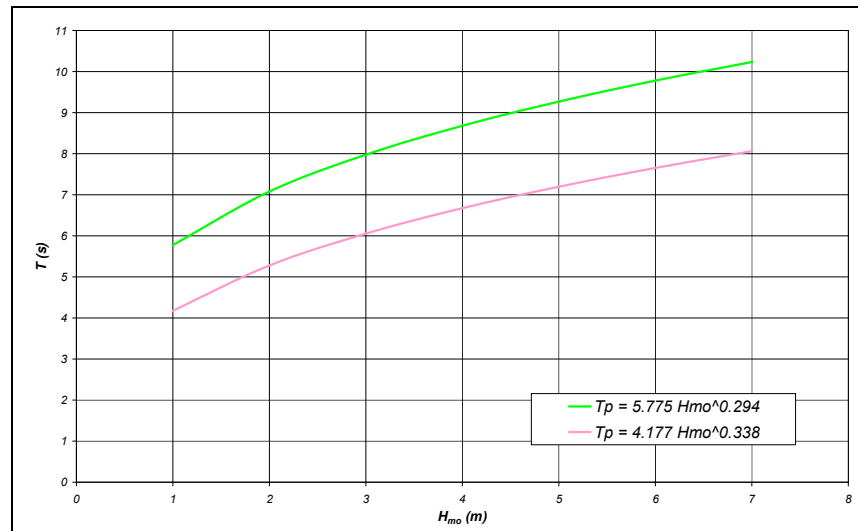


Figura 2.3.1: curva di regressione altezza - periodo di picco.

H (m)	T_p (s)
0.5	4.71
1.0	5.78
1.5	6.51
2.0	7.08
2.5	7.56
3.0	7.98
3.5	8.35
4.0	8.68
4.5	8.99
5.0	9.27
5.5	9.53
6.0	9.78

Tabella 2.3.1: andamento di altezza e periodo di picco al largo.

2.4. Eventi estremi di moto ondoso al largo

Ai fini della progettazione di una struttura è necessario conoscere l'altezza d'onda massima cui essa sarà sottoposta nel suo tempo di vita. Trattandosi di eventi stocastici, le altezze d'onda non possono essere calcolate con metodi deterministici e quindi il margine di incertezza dei risultati ottenuti è insito nel problema stesso. I metodi probabilistici in uso consistono nella ricerca di una legge di distribuzione rappresentativa del campione di dati disponibile ed in una successiva estrapolazione di detta legge fino a tempi di ritorno congrui con l'importanza e le esigenze dello studio.

Per tempo di ritorno T_r si intende l'intervallo temporale fra due eventi di uguale intensità, ovvero, nel caso specifico, il tempo in cui una data altezza d'onda possa essere eguagliata o superata una sola volta.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

Ovviamente, maggiori sono i tempi di ritorno considerati, maggiore deve essere la dimensione del campione analizzato, per non incorrere in una scarsa attendibilità dei risultati; sono generalmente accettate previsioni che superano di due o massimo tre volte la serie storica a disposizione.

Nel nostro caso il periodo di registrazione dei dati di moto ondoso (boa di Monopoli, 1990 - 2007, 18 anni) risulta sufficientemente lungo e affidabile per la determinazione degli eventi estremi che caratterizzano il paraggio in questione.

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.

Al fine di determinare le altezze d'onda significative a prefissato T_r , si fa riferimento al metodo di Goda (1988), basato sulle seguenti ipotesi:

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

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

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

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

dove:

$F(H_s \leq \hat{H}_s)$ è la probabilità che H_s non superi il valore di soglia di altezza significativa, \hat{H}_s ;

B è il parametro del sito;

A è il parametro di scala;

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

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 4 differenti distribuzioni a lungo termine di Weibull.

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

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

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

in cui:

- $F(H_s \leq H_{sm})$ rappresenta la probabilità che l' m -esima altezza significativa non venga superata;
- H_{sm} è l' m -esimo valore del campione delle altezze significative;
- m rappresenta il numero degli eventi presenti nella classe di altezze d'onda significative considerate;
- NT è il numero totale di tutti gli eventi presi in esame.

Per tutte le 5 distribuzioni (FT-I e Weibull con $k = 0.75, 1.00, 1.40$ e 2.00), sono stati considerati gli eventi con altezza al culmine della mareggiata superiore ad una soglia prefissata H_T (metodologia POT - *Atlante dei Mari Italiani*). I parametri A e B sono stati determinati verificando l'adattabilità ai dati delle 5 funzioni, attraverso un'analisi di regressione lineare effettuata con il metodo dei minimi quadrati e considerando le distribuzioni che offrono il più alto grado di correlazione.

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

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

dove:

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

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

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

- 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).

Il calcolo delle onde estreme è stato effettuato applicando il metodo POT sia all'intero paraggio, sia a ciascuno dei tre settori angolari in cui la traversia è stata suddivisa. La partizione del settore di traversia è quella riportata nell'*Atlante dei Mari Italiani* (tabella 2.4.1), determinata sulla base della distribuzione geografica dei fetch, della frequenza di apparizione degli eventi ondosi e della direzione di provenienza dei picchi di mareggiata.

A ciascuno settore di traversia è stata assegnata una diversa soglia H_T per la selezione della serie tronca (tabella 2.4.1).

	H_T (m)
I settore: 310° - 10°	2.5
II settore: 10° - 70°	2.5
III settore: 70° - 130°	2.0
paraggio	3.0

Tabella 2.4.1: valori di soglia adottati per l'applicazione del metodo POT.

Tra le varie leggi di distribuzione esaminate è stata utilizzata la legge di distribuzione di Weibull che risulta essere quella che meglio si adatta ad interpretare la serie storica delle altezze d'onda significativa di valore superiore a quello delle soglie prefissate H_T . Nella tabella 2.4.2 sono riportati i parametri delle legge di distribuzione adottata suddivisi per ciascun settore di traversia; tali parametri sono stati ricavati con il metodo dei momenti.

	k	A	B
I settore: 310° - 10°	1.40	0.7059	2.4628
II settore: 10° - 70°	1.40	0.9455	2.3406
III settore: 70° - 130°	0.75	0.3191	2.051
paraggio	1.40	0.6804	2.9293

Tabella 2.4.2: parametri della legge di distribuzione di Weibull.

Nella tabella 2.4.3 sono riportate le massime altezze significative al largo, relative all'intero paraggio, calcolate con la distribuzione di Weibull (figura 2.4.2) per assegnati tempi di ritorno T_r .

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s \max}$ (m)	T_p (s)
100	5.35	9.46
75	5.26	9.41
50	5.14	9.34
25	4.93	9.23
20	4.86	9.19
10	4.63	9.06
5	4.39	8.92
1	3.75	8.52

Tabella 2.4.3: eventi estremi relativi all'intero paraggio.

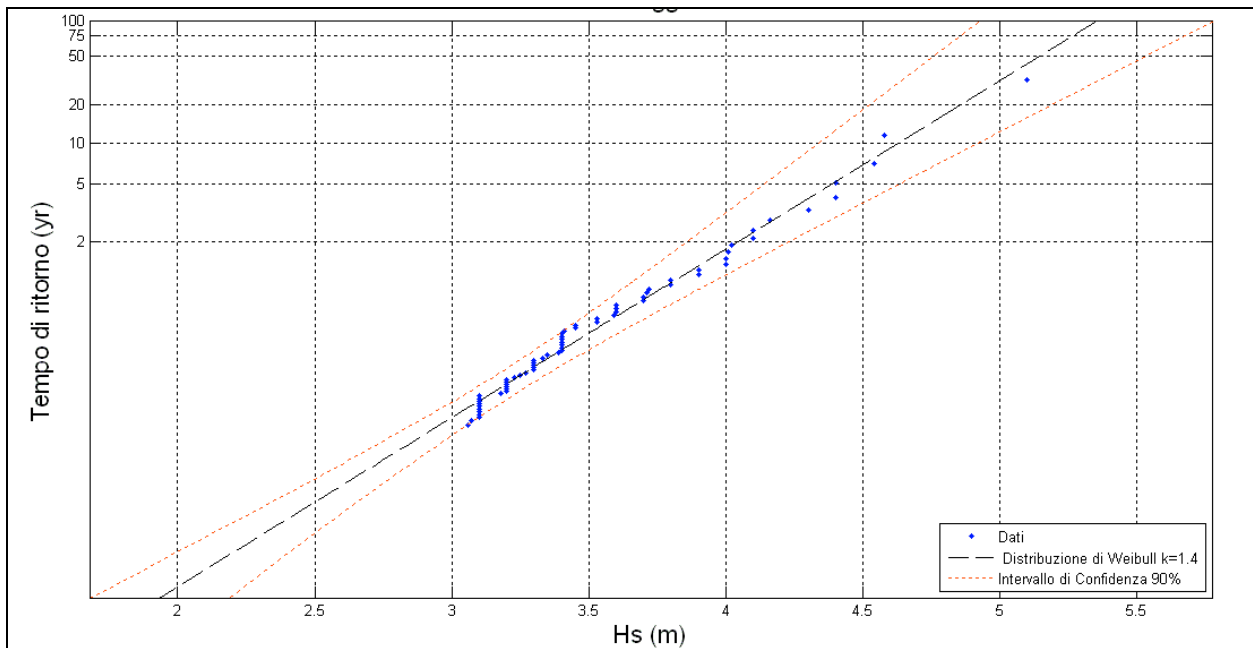


Figura 2.4.2: valori estremi di altezza d'onda nell'intero paraggio (distribuzione di Weibull).

La tabella 2.4.4 riporta le massime altezze significative relative al I settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 310°N-10°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 2.4.3.

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s \max}$ (m)	T_p (s)
100	5.00	9.27
75	4.91	9.22
50	4.79	9.15
25	4.56	9.02
20	4.49	8.98
10	4.26	8.84
5	4.01	8.69
1	3.35	8.24

Tabella 2.4.4: eventi estremi relativi al I settore di traversia 310°N - 10°N.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

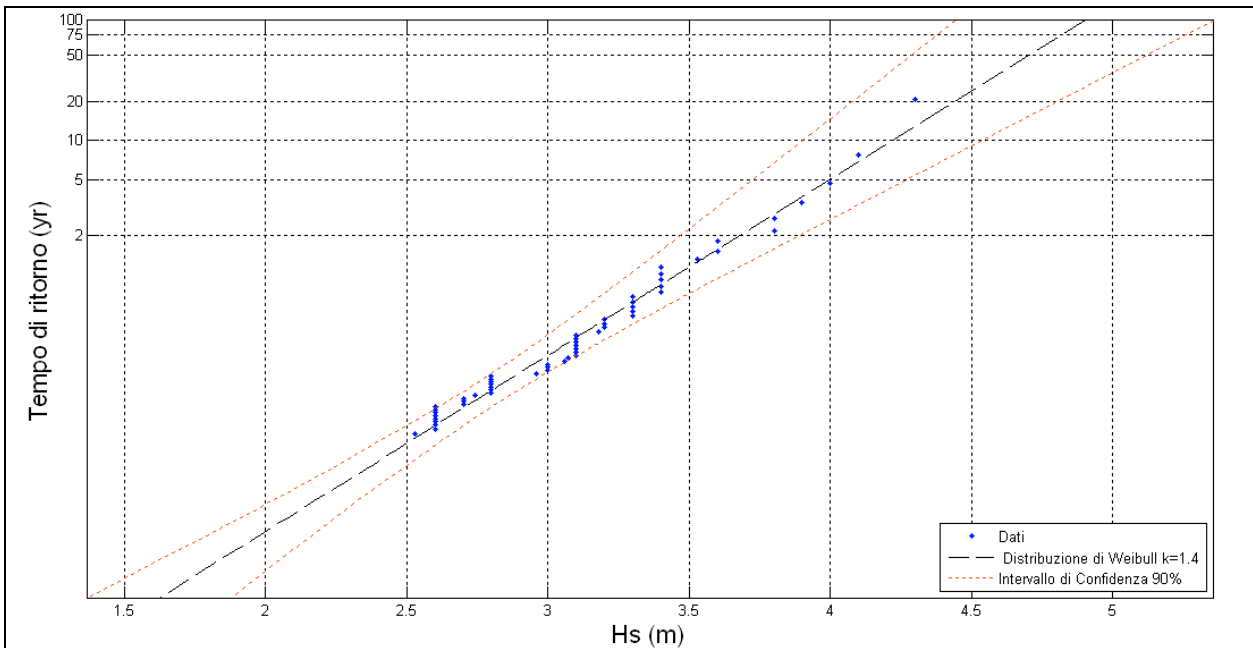


Figura 2.4.3: valori estremi di altezza d'onda nel I settore di traversia (distribuzione di Weibull).

La tabella 2.4.5 riporta le massime altezze significative relative al II settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 10°N-70°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 2.4.4.

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s \max}$ (m)	T_p (s)
100	5.60	9.58
75	5.49	9.53
50	5.31	9.43
25	5.01	9.27
20	4.91	9.22
10	4.59	9.04
5	4.25	8.84
1	3.33	8.23

Tabella 2.4.5: eventi estremi relativi al II settore di traversia 10°N - 70°N.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

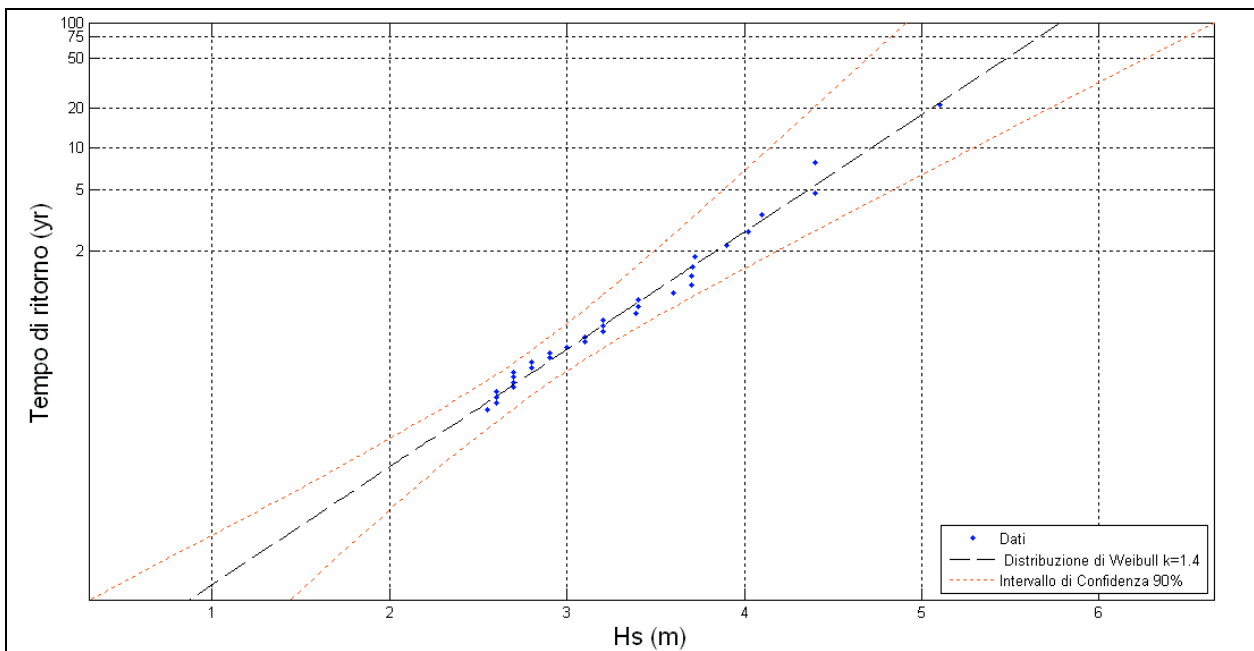


Figura 2.4.4: valori estremi di altezza d'onda nel II settore di traversia (distribuzione di Weibull).

La tabella 2.4.6 riporta le massime altezze significative relative al III settore di traversia adottato, compreso tra le direzioni 70°N-130°N, e calcolate con la distribuzione di Weibull rappresentata in figura 2.4.5.

Tempo di ritorno (anni)	$H_{s \max}$ (m)	T_D (s)
100	4.46	8.96
75	4.25	8.84
50	3.98	8.67
25	3.53	8.37
20	3.39	8.27
10	2.99	7.97
5	2.62	7.67
1	2.05	7.13

Tabella 2.4.6: eventi estremi relativi al III settore di traversia 70°N - 130°N.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

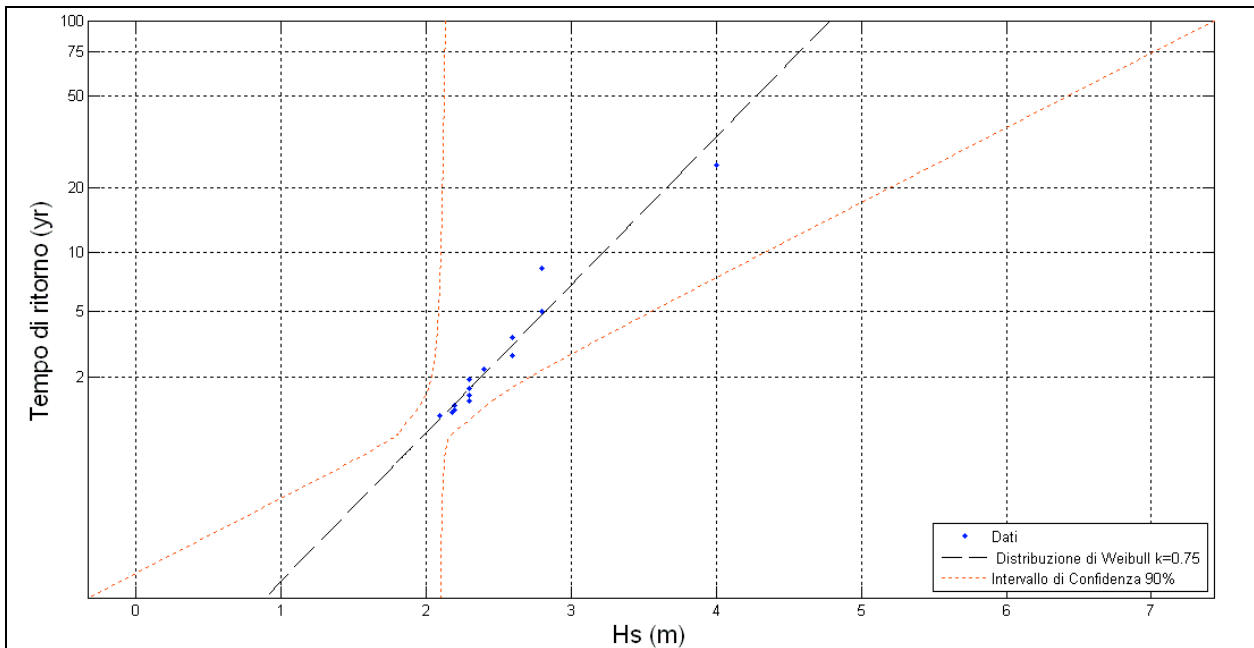


Figura 2.4.5: valori estremi di altezza d'onda nel III settore di traversia (distribuzione di Weibull).

Nella successiva tabella 2.4.7 sono stati stralciati dalle tabelle precedenti i valori di altezza d'onda, suddivisi per settore di traversia, associati al tempo di ritorno pari a 50 anni; i valori di altezza d'onda sottocosta corrispondenti saranno utilizzati per verificare le condizioni di agibilità delle banchine adibite per l'approdo delle imbarcazioni da diporto nell'ambito dello studio dell'agitazione ondosa residua all'interno del bacino portuale.

settore di traversia	Tempo di ritorno 50 anni		
	$H_{s \max}$ (m)	T_p (s)	L_0 (m)
310° - 10°N	4.01	8.69	117.83
10° - 70°N	4.25	8.84	121.92
70° - 130°N	2.62	7.67	91.74

Tabella 2.4.7: eventi estremi con $T_r=50$ anni suddivisi per le singole direzioni.

I valori massimi di altezza d'onda al largo si riferiscono al settore di traversia centrale compreso tra le direzioni 10°N e 70°N, seguiti dai valori relativi al I settore di traversia (310°N – 10°N).

2.5. Clima meteomarinario equivalente del paraggio

Oltre alla modellazione del clima meteomarinario medio al largo, risulta utile conoscere ai fini della caratterizzazione della dinamica dei litorali in esame, il clima meteomarinario equivalente annuale, ovvero la cosiddetta onda di modellazione o morfologica.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

Il clima meteomarinico equivalente è stato valutato ricavando per ciascuna delle direzioni prescelte e per l'intero paraggio la mareggiata energeticamente equivalente all'intera serie storica disponibile. L'onda di modellazione è caratterizzata da un'altezza d'onda H ed un periodo d'onda T , rappresentativi del contenuto energetico per il settore considerato. Tale onda è in grado di indurre effetti sul litorale equivalenti a quelli indotti da tutte le onde sulla base delle quali è stata calcolata. L'altezza d'onda energeticamente equivalente per ciascuna direzione è stata calcolata con la relazione:

$$H_s = \sqrt{\frac{\sum_i H_{Si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i}{\sum_i T_{pi} \cdot t_i}}$$

in cui la sommatoria è estesa al numero di mareggiate che compete a ciascuna direzione considerata e H_{Si} , T_{pi} e t_i sono rispettivamente l'altezza significativa, il periodo di picco e la durata di ciascuna mareggiata.

Analogamente il periodo da associare alla suddetta altezza d'onda è stato ricavato come media pesata dei periodi delle singole mareggiate rispetto alle relative durate secondo la relazione:

$$T_p = \frac{\sum_i T_{pi} \cdot t_i}{\sum_i t_i}$$

Per quanto riguarda l'individuazione dell'onda caratterizzante l'intero paraggio, si considerano ovviamente tutte le mareggiate calcolate nell'intero settore di traversia procedendo al calcolo dell'altezza e del periodo con la stessa metodologia innanzi descritta. In questo caso però si è reso necessario anche il calcolo della direzione di provenienza della mareggiata equivalente. A tale scopo, il flusso di energia è stato trattato come un vettore, le cui componenti hanno consentito di ricavare la direzione media con la seguente relazione:

$$\phi = \arctan \left[\frac{\sum_i H_{Si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i \cdot \sin \theta_i}{\sum_i H_{Si}^2 \cdot T_{pi} \cdot t_i \cdot \cos \theta_i} \right]$$

Dallo studio del clima meteomarinico medio del paraggio risulta che alla direzione ENE compete l'altezza d'onda energeticamente equivalente più elevata (1.25m), con una frequenza di apparizione pari al 10.7%; le mareggiate equivalente da NNO (1.02m), da ESE (0.87m) e da Nord (1.14m) sono le più frequenti con percentuali di apparizione pari rispettivamente a 28.1%, 17.0% e 16.6%.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

L'onda caratteristica dell'intero paraggio ha un'altezza di 1.01m, periodo pari a 5.75s e direzione di provenienza 20°N (tabella 2.5.1).

direzione (°N)	H_s (m)	T_p (s)
0	1.14	5.80
30	1.10	6.15
60	1.25	6.23
90	0.74	5.52
120	0.87	5.25
150	0.72	6.75
180	0.87	10.25
210	0.60	10.57
240	0.77	10.48
270	0.77	9.37
300	0.94	7.24
330	1.02	5.35
PARAGGIO 20	1.01	5.75

Tabella 2.5.1: onde equivalenti annue.

Le onde di modellazione sono in genere utilizzate per ottenere informazioni quali – quantitative sul trasporto solido costiero; si dimostra infatti che i flussi di energia per unità di lunghezza della cresta delle onde sono proporzionali, attraverso diversi fattori, al trasporto solido longitudinale.

2.6. Profondità di chiusura

E' stato eseguito il calcolo teorico della cosiddetta profondità di chiusura, o profondità di moto attivo dei sedimenti, che delimita lato mare la fascia litoranea interessata dal trasporto solido e da apprezzabili modifiche dei fondali per effetto di fenomeni di deposito o di erosione.

A tal fine è stata applicata la nota formula di Hallermaier che lega questa profondità all'altezza d'onda significativa superata 12 ore all'anno secondo la formula:

$$h_c = 2,28 H_0 - 10,9 H_{so}^2 / L_0$$

o quella modificata da Berkemeier:

$$h_c = 1,75 H_0 - 9,2 H_{so}^2 / L_0$$

dove:

- H_{so} rappresenta l'altezza d'onda significata al largo superata in media 12 ore/anno pari a circa 3.72m (figura 2.6.1);
- $L_0 = gT_m^2 / 2\pi$ è la lunghezza dell'onda di altezza H_0 pari a circa 100.0m;

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

- $T_m = T_p/1.25$ rappresenta il periodo medio dell'onda al largo superata in media 12 ore/anno pari a circa 8.0s.

Applicando la formula di Hallermaier si ottiene una profondità di chiusura h_c pari a circa 6.1m, mentre con la formula di Berkemeier si ottiene un valore minore pari a circa 4.5m.

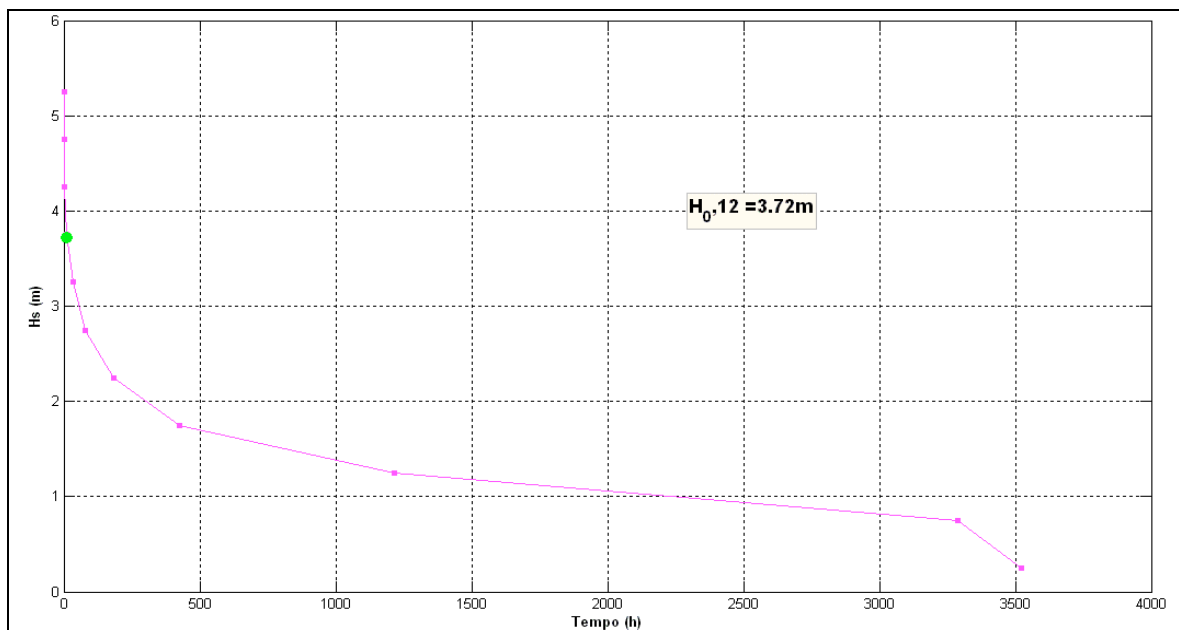


Figura 2.6.1: durate di apparizione delle altezze d'onda al largo di Monopoli.

3. MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

3.1. Generalità

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.

Nella presente relazione attraverso l'applicazione di un idoneo modello matematico sono stati elaborati i piani d'onda che riproducono l'andamento dei raggi d'onda dal largo fino all'imboccatura del porto di Monopoli. Note le condizioni ondose delle mareggiate incidenti le opere foranee portuali, è stata quindi ricavata l'agitazione ondosa all'interno dello specchio acqueo portuale al fine di verificare le condizioni ondose ammissibili per la nautica da diporto.

3.2. Il modello matematico SWAN

La propagazione del clima ondoso da largo verso riva è stata simulata 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. 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;

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

- dissipazione dovuta all'attrito sul fondo;
- interazioni onda-onda (quadruple e triple);
- diffrazione a tergo di ostacoli.

In funzione dei molteplici processi che l'algoritmo di calcolo del modello riesce a simulare, attraverso la sua applicazione nel caso del paraggio di Monopoli è stato possibile riprodurre con buona approssimazione le trasformazioni delle onde dal largo fino alla costa in prossimità dell'imboccatura portuale, nonché determinare l'agitazione ondosa, all'interno dello specchio protetto, determinata dalla trasmissione del moto ondoso a tergo delle opere foranee legata al fenomeno della diffrazione.

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

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

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

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

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

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,

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

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.

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. Nelle propagazioni effettuate con lo SWAN è stato utilizzato uno spettro di tipo Jonswap con γ (coefficiente di picco dello spettro) pari a 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.

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

Nello specifico il modello SWAN è stato applicato per riprodurre le trasformazioni dal largo verso costa delle onde estreme con tempo di ritorno T_r pari a 50 anni per la verifica delle condizioni di agitazione ondosa "limite" all'interno di un bacino portuale destinato alla nautica da diporto.

3.3. Griglie di calcolo

Il primo passo nello studio di propagazione del clima ondoso dal largo verso la riva con il modello SWAN ha riguardato la preparazione di griglie di calcolo ricavate dalla batimetria in corrispondenza del paraggio di Monopoli.

Le quote batimetriche sono state desunte dalle carte nautiche della zona prodotte dall'Istituto Idrografico della Marina. È stata utilizzata la tavola IIM n. 30, in scala 1:100.000; la tavola IIM è

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

stata informatizzata e georeferenziata secondo la rappresentazione conforme di Gauss-Boaga con reticolato piano nel sistema nazionale (Gauss-Boaga) riferito all'ellissoide Roma 40 (figura 3.3.1).

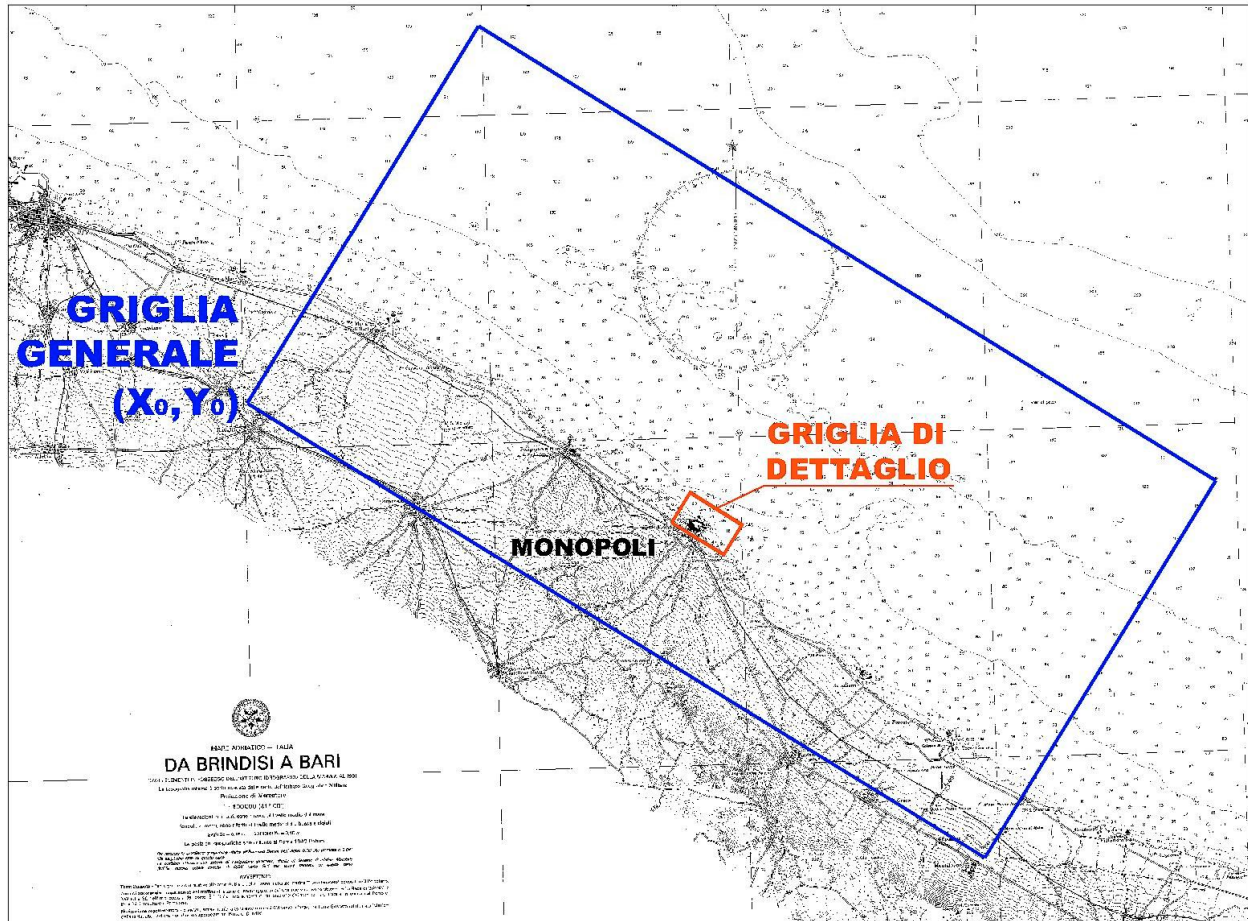


Figura 3.3.1: carta nautica IIM con individuazione delle griglie di calcolo.

Utilizzando un software commerciale di topografia, i punti batimetrici della tavola IIM sono stati opportunamente digitalizzati e quindi, attraverso l'interpolazione per triangolazione delle quote batimetriche, è stato ricostruito il modello digitale della batimetria da cui infine sono stati ricavati i valori di profondità nei nodi di griglie di calcolo prefissate.

Nella zona più prossima alla riva, le informazioni desunte dalla carta nautica IIM sono state integrate con un rilievo batimetrico di dettaglio dell'area portuale riportato in figura 3.3.2 (fonte Autorità Portuale di Bari: www.aplevante.org).

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

Per l'applicazione del modello sono state determinate una griglia generale ed una di dettaglio orientate entrambe con l'asse delle X secondo la direzione 150°N (SSE), e con l'asse Y perpendicolare al primo ed orientato secondo la direzione ENE. La griglia generale, a maglia quadrata con passo di lunghezza pari a 100 m (figura 3.3.1, figura 3.3.3), copre un ampio tratto di mare al fine di poter studiare tutte le mareggiate che investono il litorale in studio.



Figura 3.3.2: batimetria di dettaglio.

Essa è costituita da 251 righe (// asse X) e 491 colonne (// asse Y) ed ha origine nel punto di coordinate Gauss-Boaga 2688460E, 4543340N.

Per gli studi di dettaglio è stata invece definita una griglia a maglia quadrata con passo 5m che copre il tratto di mare immediatamente antistante l'area del porto di Monopoli (figura 3.3.1, figura 3.3.4).

La griglia di dettaglio è costituita da 401 righe e 701 colonne con origine posta alle coordinate 2712476.4E, 4536598N.

Nella tabella 3.3.1 sono sintetizzate le caratteristiche delle griglie batimetriche di calcolo implementate nel modello S.W.A.N.

GRIGLIA	origine		orientamento (°N)	n. righe	n. colonne
	E Gb	N Gb			
generale	2688460	4543340	150	251	491
dettaglio	2712476.4	4536598	150	401	701

Tabella 3.3.1: griglie di calcolo implementate nel modello SWAN.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

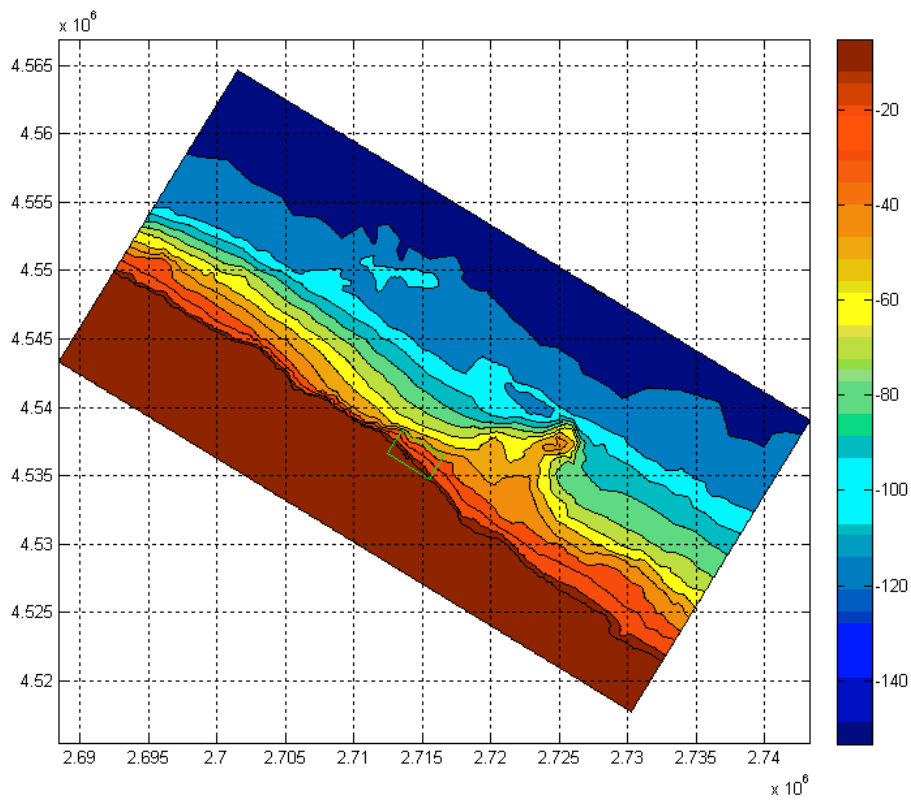


Figura 3.3.3: griglia generale implementata nel modello SWAN.

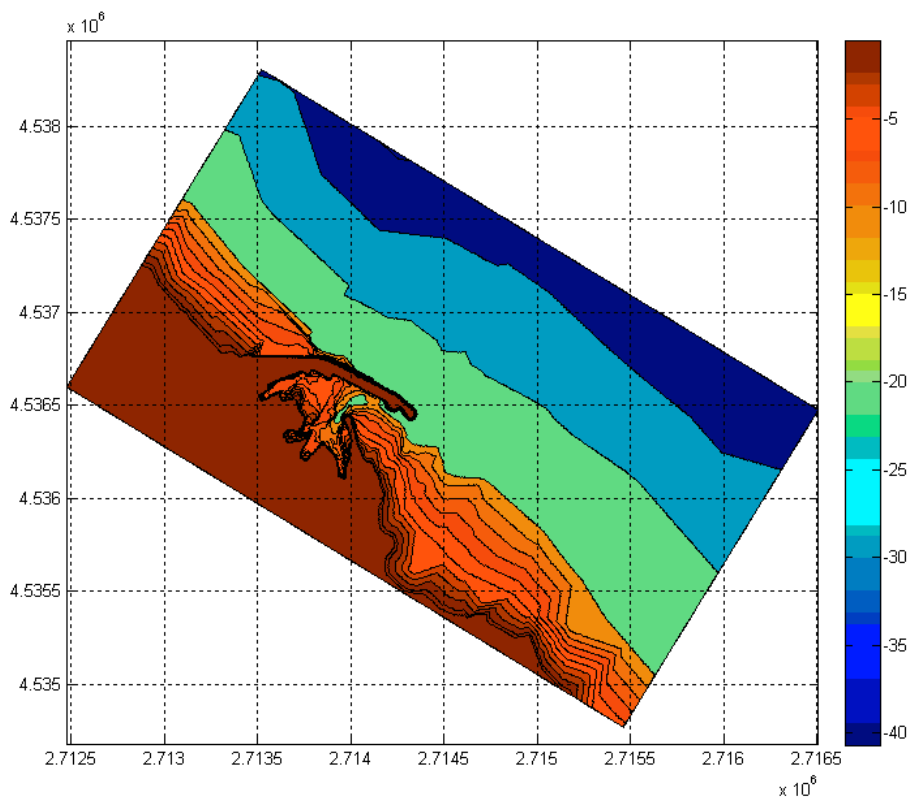


Figura 3.3.4: griglia di dettaglio implementata nel modello SWAN.

3.4. Propagazione sottocosta degli eventi estremi di moto ondoso

La propagazione da largo verso riva degli eventi estremi di moto ondoso associati ai periodi di ritorno più significativi, risulta utile nel dimensionamento e nella verifica delle strutture costiere, in cui sono necessari i valori delle onde di progetto che possono direttamente incidere su di esse.

Nel presente studio sono state propagate le onde con tempo di ritorno T_r pari a 50 anni riportate in tabella 3.4.1; le suddette onde permettono di verificare l'agitazione ondosa residua all'interno del bacino portuale corrispondente alla cosiddetta condizione "limite" riportata nelle *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*, richiamate nel successivo paragrafo.

Tempo di ritorno T_r 50 anni		
dir (°N)	$H_{s\ max}$ (m)	T_p (s)
330	4.79	8.44
0	4.79	8.44
30	5.31	9.53
60	5.31	9.53
90	3.98	8.59

Tabella 3.4.1: eventi estremi di moto ondoso al largo simulati con il modello SWAN.

Le figure da 3.4.1 a 3.4.5 rappresentano le mappe di agitazione ondosa ricostruite con il modello a partire dai valori di altezza d'onda di cui alla tabella precedente.

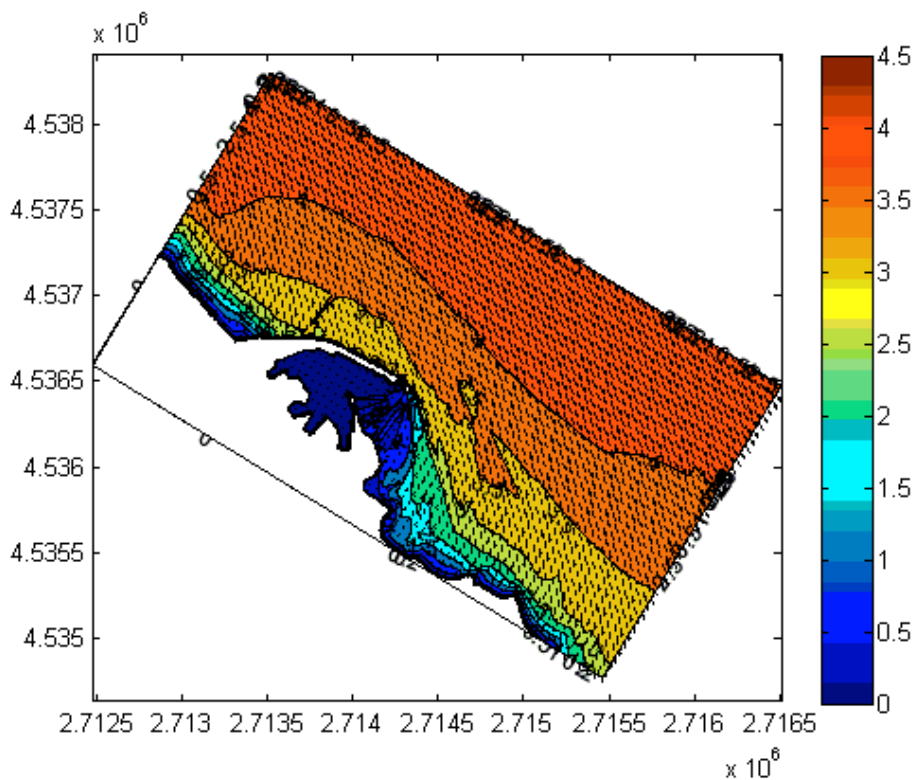


Figura 3.4.1: propagazione del moto ondoso da 330°N – $T_r = 50$ anni – $H_s = 4.79$ m, $T_p = 8.44$ s.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

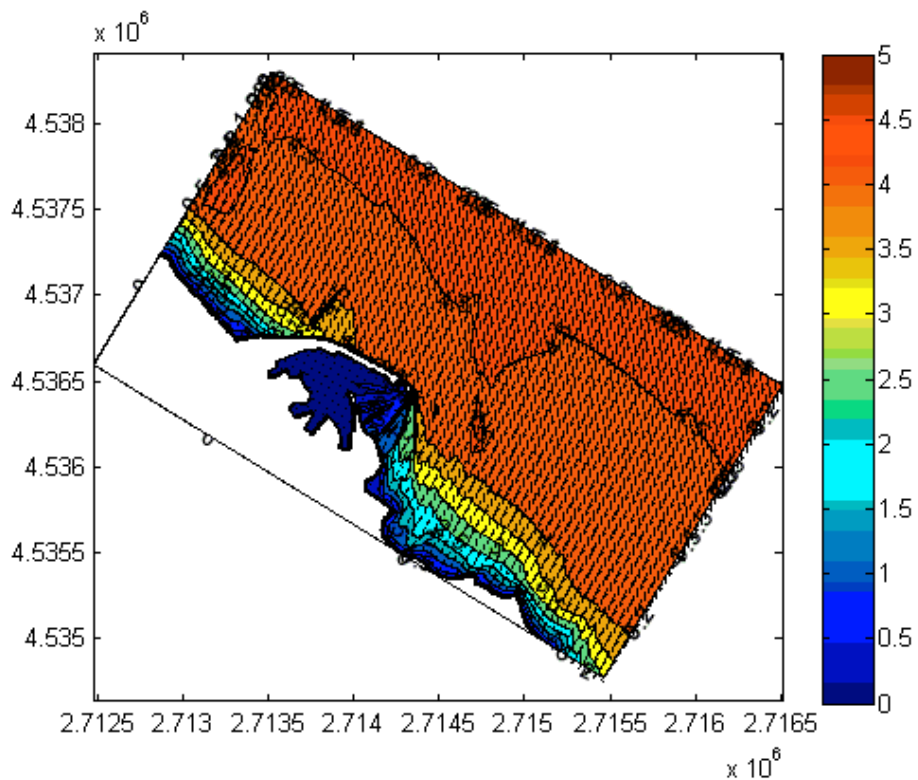


Figura 3.4.2: propagazione del moto ondoso da 0°N - $T_r = 50$ anni - $H_s = 4.79$ m, $T_p = 8.44$ s.

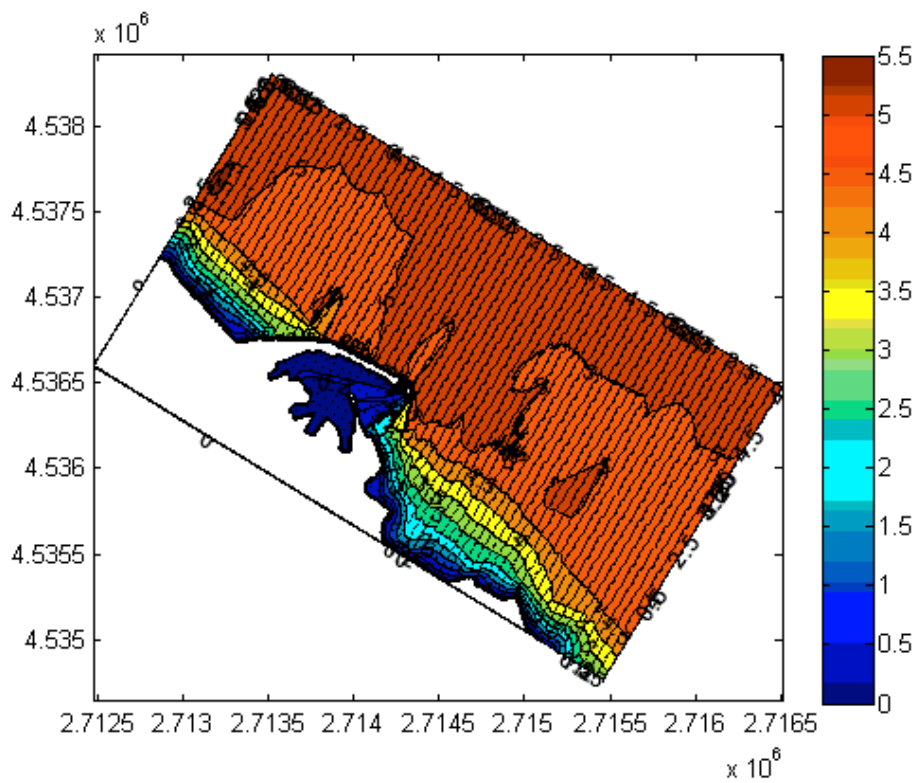


Figura 3.4.3: propagazione del moto ondoso da 30°N - $T_r = 50$ anni - $H_s = 5.31$ m, $T_p = 9.53$ s.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

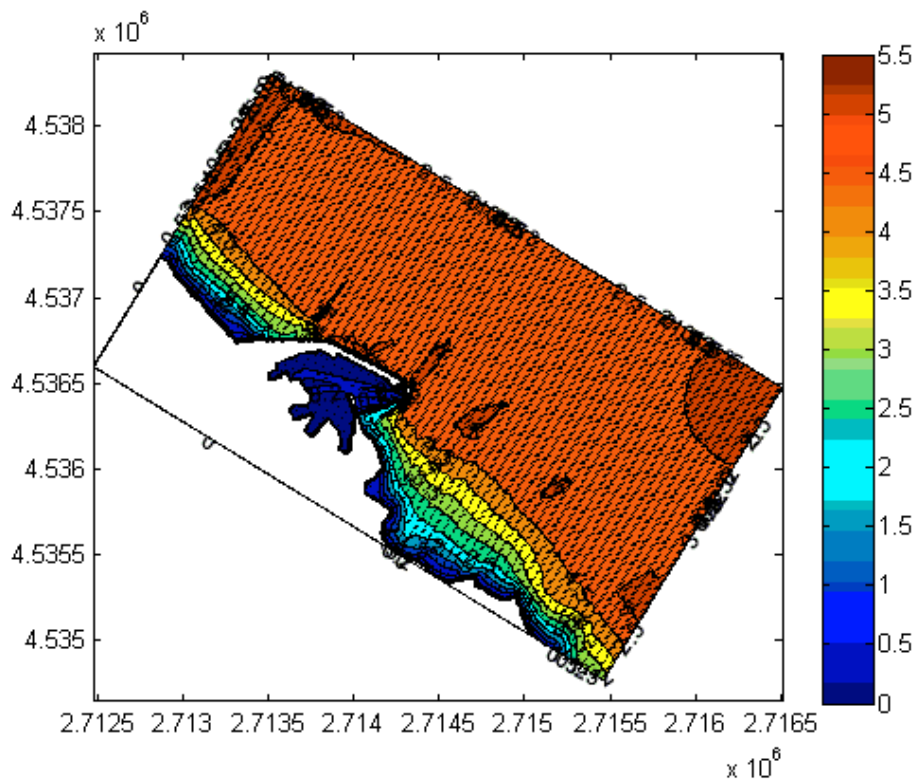


Figura 3.4.4: propagazione del moto ondoso da 60°N - $T_r = 50$ anni - $H_s = 5.31$ m, $T_p = 9.53$ s.

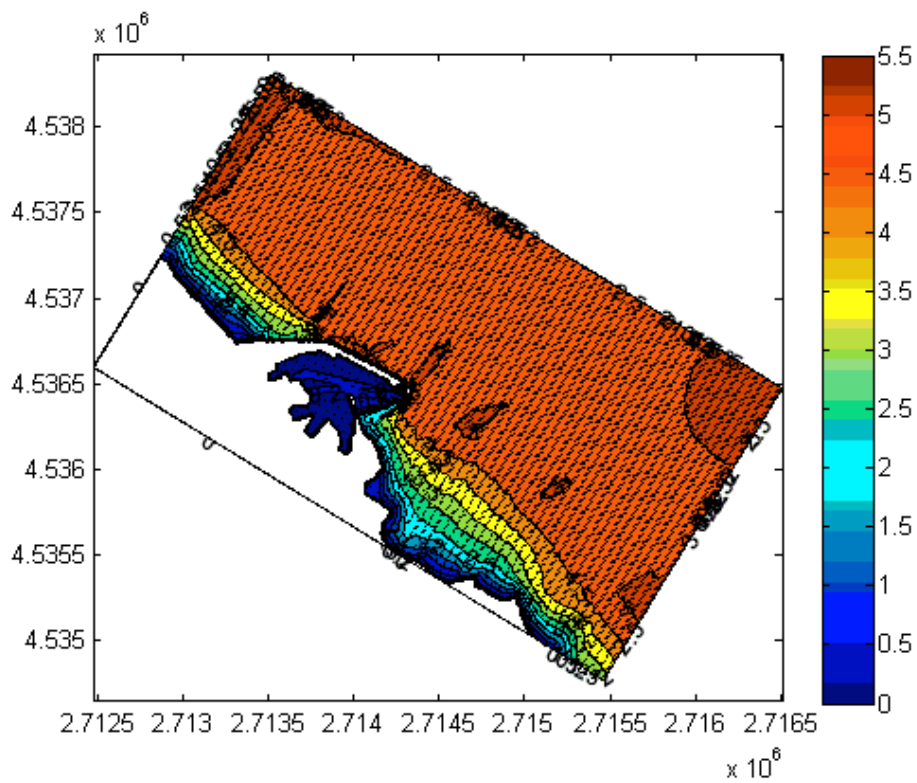


Figura 3.4.5: propagazione del moto ondoso da 90°N - $T_r = 50$ anni - $H_s = 3.98$ m, $T_p = 8.59$ s.

3.5. Agitazione ondosa all'interno del bacino portuale

Per quanto riguarda i valori di altezza d'onda ritenuti ammissibili all'interno di un bacino portuale destinato alla nautica da diporto, in Italia l'Associazione Internazionale Permanente dei Congressi di Navigazione (A.I.P.C.N.) ha sviluppato un documento denominato *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*, approvato dalla III Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. con voto n. 212 del 27/02/2002, in cui sono contenute le prescrizioni con cui redigere i progetti di cui al D.M. del 14 aprile 1998 (G.U. n. 98 del 29 aprile 1998) che riguarda l' "Approvazione dei requisiti per la redazione dei progetti da allegare ad istanze di concessione demaniale marittima per la realizzazione di strutture dedicate alla nautica da diporto".

Nelle *Raccomandazioni tecniche* i valori raccomandati della altezza d'onda significativa ammissibile all'interno del porto sono:

- condizione di "comfort" (particolarmente importante nel caso di porti in cui si prevede la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni): $H_s = 0.15\text{m}$ per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;
- condizione di "sicurezza": $H_s = 0.30\text{m}$ per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;
- condizione "limite": $H_s = 0.50\text{m}$ per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

Nella presente relazione è stata verificata la sola condizione "limite" in quanto non si prevede una presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni essendo lo studio relativo alla realizzazione di un approdo turistico destinato essenzialmente al transito e non allo stazionamento delle imbarcazioni da diporto.

Nel precedente paragrafo sono già state presentate le mappe di agitazione ondosa in prossimità del porto di Monopoli ricavate con il modello SWAN a partire dalle mareggiate al largo con tempo di ritorno T_r pari a 50 anni (figure da 3.4.1 a 3.4.5). Le figure da 3.5.1 a 3.5.5 riproducono le mappe di agitazione ondosa di dettaglio dello specchio acqueo protetto, con la visualizzazione del verso delle onde indicato dalle frecce rappresentate in figura.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

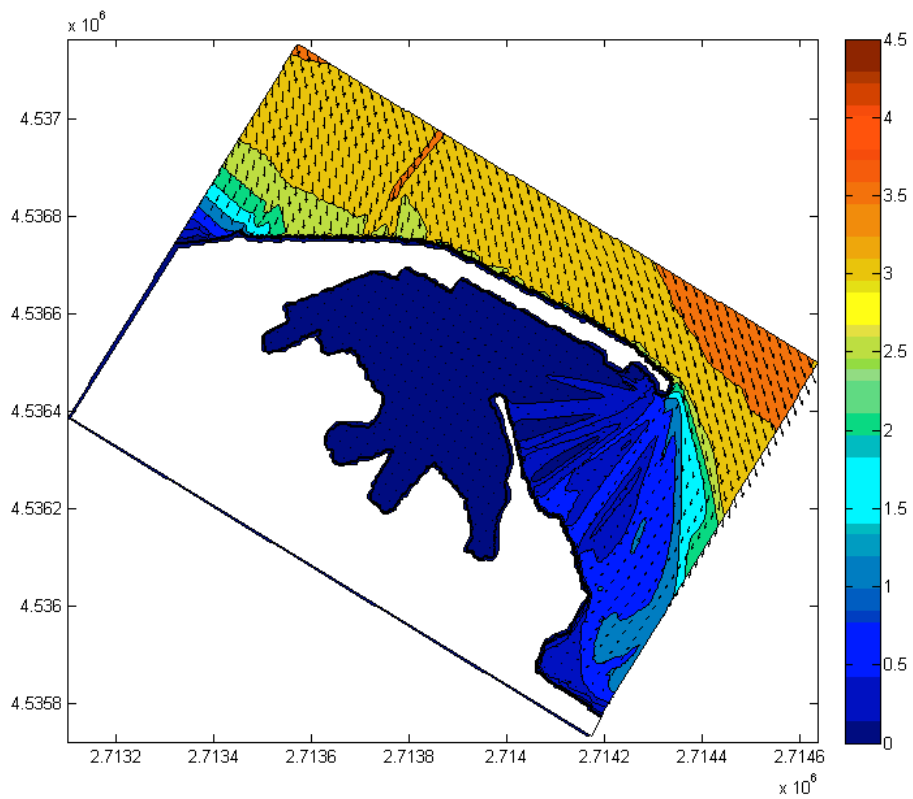


Figura 3.5.1: agitazione interna onda da 330°N – $T_r = 50$ anni – $H_s = 4.79$ m, $T_p = 8.44$ s.

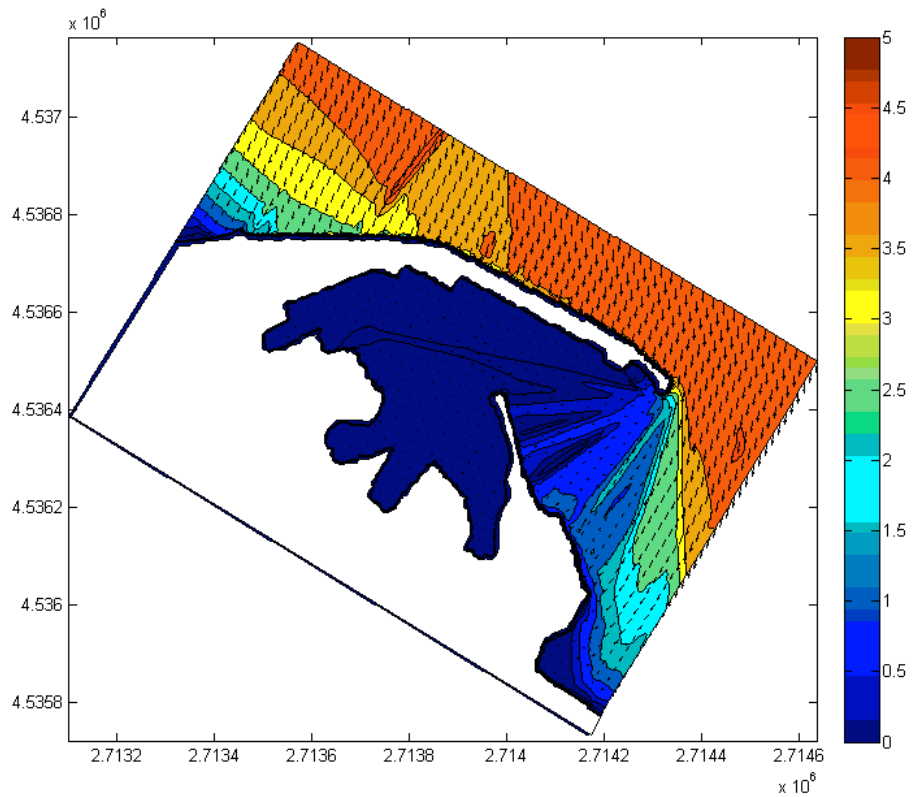


Figura 3.5.2: agitazione interna onda da 0°N - $T_r = 50$ anni – $H_s = 4.79$ m, $T_p = 8.44$ s.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

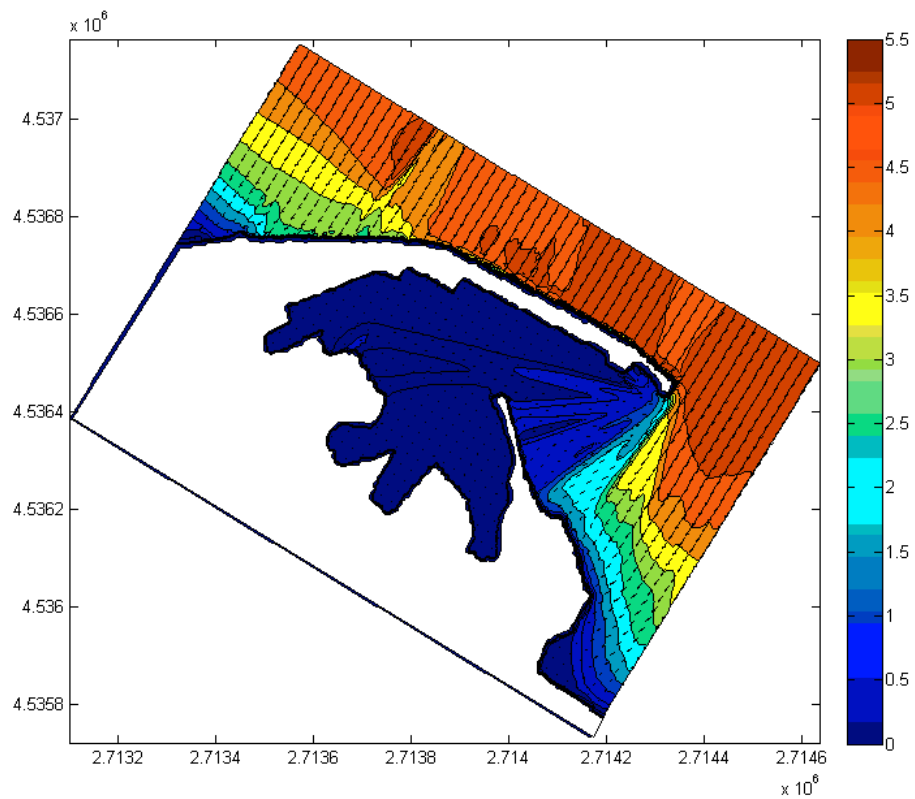


Figura 3.5.3: agitazione interna onda da 30°N - $T_r = 50$ anni - $H_s = 5.31$ m, $T_p = 9.53$ s.

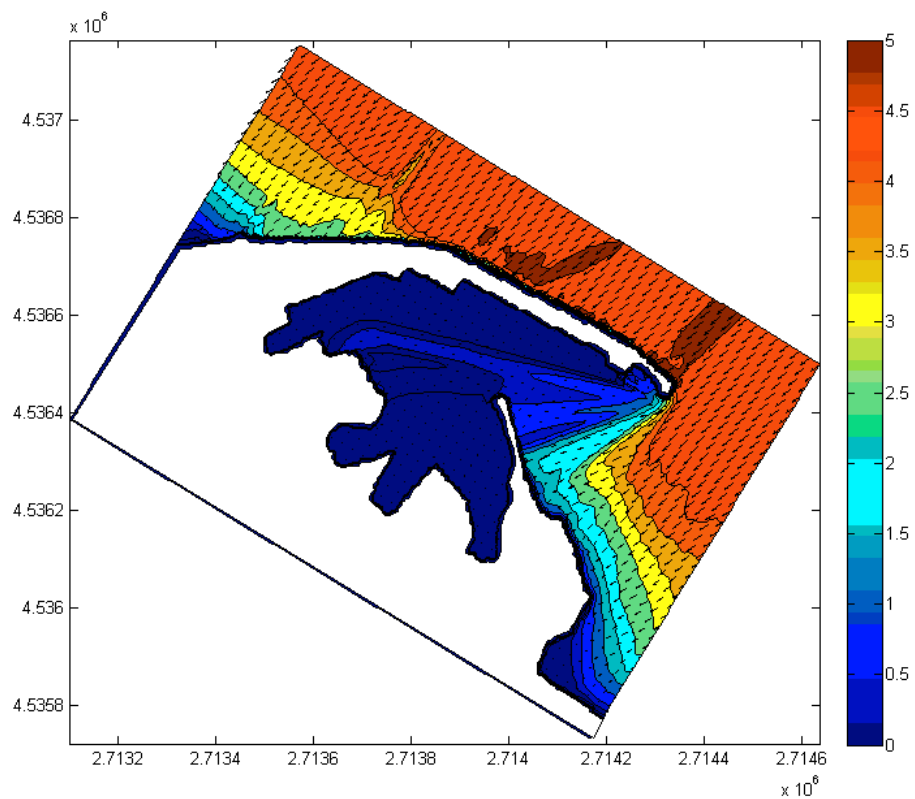


Figura 3.5.4: agitazione interna onda da 60°N - $T_r = 50$ anni - $H_s = 5.31$ m, $T_p = 9.53$ s.

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

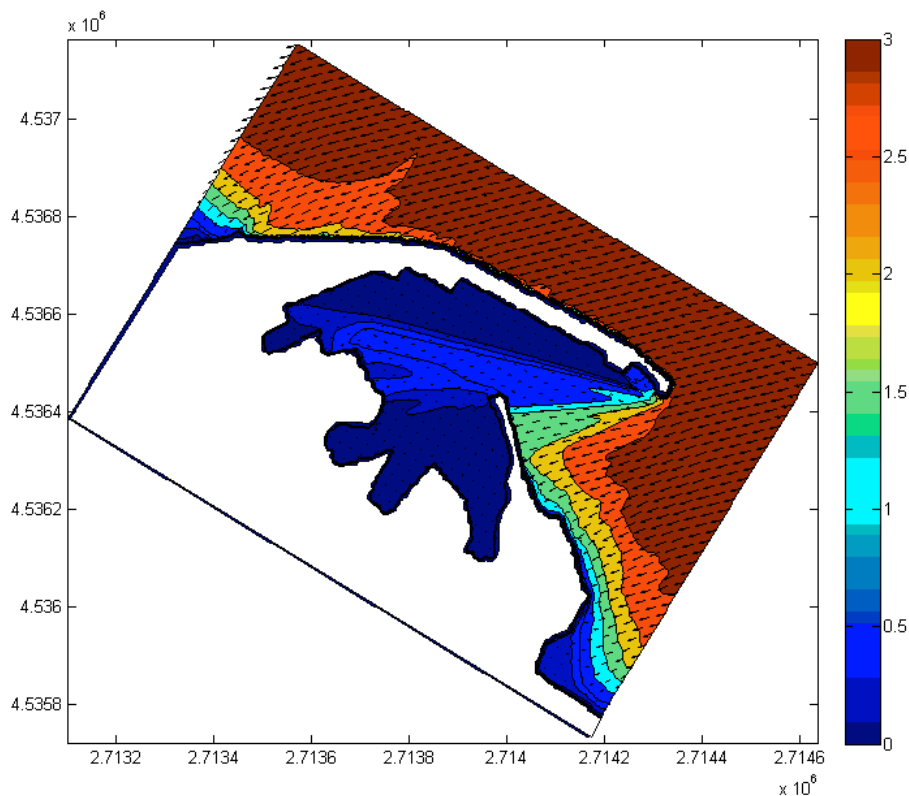


Figura 3.5.5: agitazione interna onda da 90°N - $T_r = 50$ anni - $H_s = 3.98$ m, $T_p = 8.59$ s.

L'analisi delle figure indica che, nello specchio acqueo portuale in cui è prevista la realizzazione degli ormeggi per l'approdo delle imbarcazioni da diporto (lato interno del molo Margherita), la condizione "limite" $H_s \leq 0.50$ m è sempre verificata per ciascuna delle mareggiate simulate nel modello SWAN.

Nel dettaglio si deve rilevare che le mareggiate da ENE e da Est determinano una maggiore agitazione residua all'interno del bacino a causa di un fronte ondoso entrante che raggiunge anche altezze d'onda pari a 0.5m, interessando però il solo tratto banchinato di Punta del Trave; le mareggiate con direzione al largo da NNO, Nord e NNE presentano a loro volta aree caratterizzate da altezze d'onda prossime a 0.5m solo in corrispondenza dell'imboccatura portuale, mentre del tutto trascurabile è l'agitazione ondosa residua nella zona interna del porto.

4. VARIAZIONI DEL LIVELLO MARINO

Le variazioni a breve termine del livello marino, periodiche e non, sono imputabili oltre che alla marea astronomica anche all'azione del vento e della pressione atmosferica (marea meteorologica), alle variazioni stagionali della densità dell'acqua marina, ed anche al sovrizzo d'onda presente sulla battigia durante le mareggiate.

Nel Mar Adriatico le escursioni del livello del mare sono di fatto modeste. La stima della marea astronomica (ampiezze e tempi di marea) può essere effettuata in base alle tavole di marea pubblicate annualmente dall'Ufficio Idrografico della Marina Militare.

Nel corso del presente studio sono stati analizzati anche i valori di marea acquisiti dall'ISPRA, registrati ad intervalli di 10 minuti dal mareografo del porto di Bari (figura 4.1). Tali valori, riferiti l.m.m. del mareografo di Genova del 1942, mostrano che il fenomeno dell'alta marea nel paraggio indagato produce un innalzamento del livello del mare sino a valori massimi pari a circa 45cm sopra il livello medio mare; viceversa, la bassa marea può produrre un abbassamento sino a circa 55cm sotto il l.m.m.

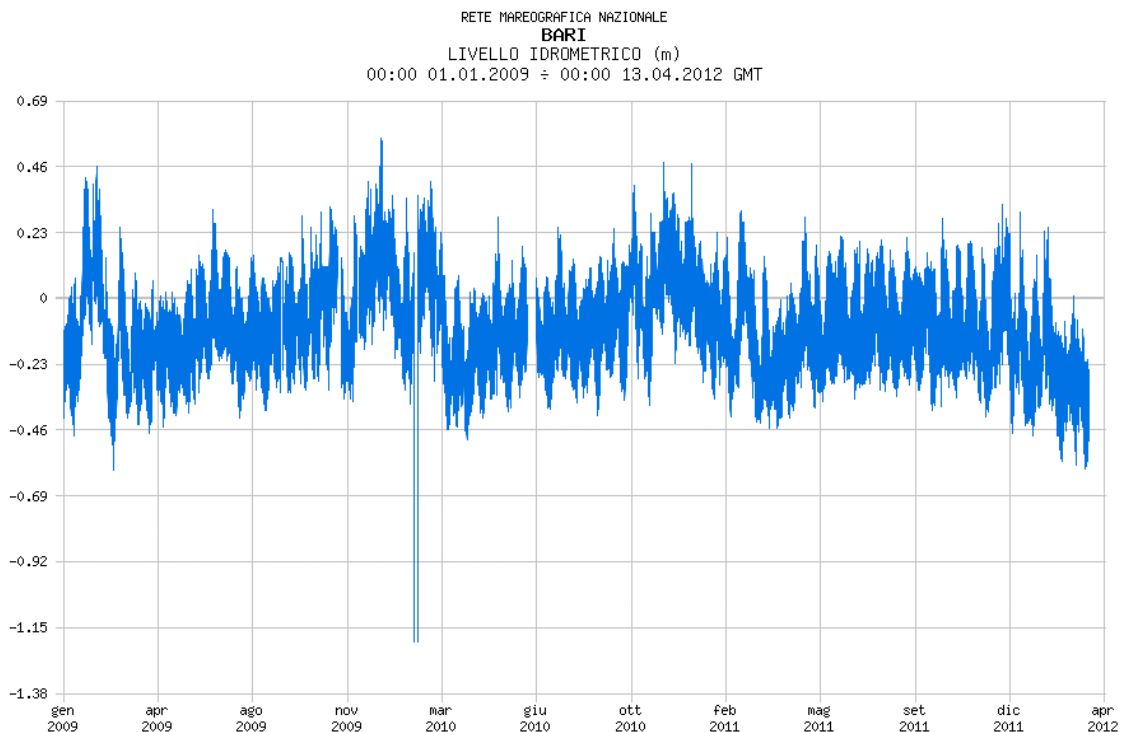


Figura 4.1: serie storica mareografo di Bari (01/01/2009 – 13/04/2012).

**Relazione idraulico marittima per la realizzazione
di un approdo turistico all'interno del bacino del porto di Monopoli**

Si deve segnalare, inoltre, che, come accertato da numerosi studi presenti in letteratura tecnica, il livello medio mare del Mediterraneo ha subito un innalzamento di circa 10 cm nell'ultimo secolo. Senza avventurarsi nella disamina delle cause che hanno determinato tale innalzamento e, soprattutto, senza avere la pretesa di affermare che tale innalzamento sia indice del futuro trend di crescita, il dato fornito deve essere tenuto ben presente nella programmazione di futuri interventi.

Nel Mediterraneo centrale il contributo che può essere fornito da variazioni della pressione atmosferica risulta dello stesso ordine di grandezza delle escursioni di marea. Un abbassamento barico di 1 mb rispetto al valore normale (1013 mb) produce un innalzamento di circa 1 cm del livello marino e viceversa.

Il sovrizzo di vento è dovuto all'accumulo d'acqua sottocosta per azione di venti foranei permanenti. La valutazione dell'innalzamento per gli eventi meteorici gravosi è particolarmente importante perchè in genere si accompagna ai moto ondosi più violenti. Può verificarsi anche il fenomeno opposto di abbassamento, per azione di vento spirante da terra verso il mare, ma esso è di scarso interesse ai fini degli studi costieri.

Per quanto riguarda l'innalzamento del livello medio mare causato da eventi meteorici (sovrizzo barico e sovrizzo di vento), non si dispone di strumenti di calcolo certi. Si deve però segnalare che gli studi disponibili in letteratura tecnica dimostrano che tali sopralzi assumono valori notevoli solo in particolari situazioni geografiche e con singolari combinazioni di pressione atmosferica e vento.

Nell'ambito dell'evoluzione del moto ondoso dal largo fino alla linea di riva, si devono tenere ben presenti alcuni fenomeni tipici della regione compresa fra la linea di riva e la zona dei frangenti. Tali fenomeni, specie nella zona di battigia, determinano un innalzamento notevole del livello medio mare che, ovviamente, produce una riduzione della superficie di spiaggia emersa. Tale innalzamento, noto con il nome di set up, viene valutato dal modello di simulazione per ogni raggio d'onda indagato.

Per una completa caratterizzazione del territorio costiero è ovviamente importante considerare tutte le variazioni quasi-statiche del livello marino e non solo quelle legate alla presenza di mareggiate.

La sovrapposizione di tutti gli effetti innanzi introdotti è essenziale sia nella pianificazione degli interventi nella fascia costiera che per valutare il rischio di overtopping, ovvero dell'acqua che passa al di sopra di infrastrutture costiere.