Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Elaborazione dati meteomarini da modelli numerici ad alta risoluzione, con analisi del potenziale energetico e delle mareggiate estreme lungo le coste del Mediterraneo

F. Arena, V. Laface, G. Malara,
A. Romolo, A. Viviano

DICEAM

NOEL
Natural Ocean Engineering Laboratory
www.noel.unirc.it

Report RdS/2013/137

ELABORAZIONE DATI METEOMARINI DA MODELLI NUMERICI AD ALTA RISOLUZIONE, CON ANALISI DEL POTENZIALE ENERGETICO E DELLE MAREGGIATE ESTREME LUNGO LE COSTE DEL MEDITERRANEO

F. Arena, V. Laface, G. Malara, A. Romolo, A. Viviano (Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Energia, dell'Ambiente e dei Materiali)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2012
Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente
Progetto: Studi e valutazione sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso
Obiettivo: Ottimizzazione di dispositivi U-OWC in funzione dello stato del mare
Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Elaborazione di dati meteomarini da modelli ad alta risoluzione in prossimità di aree portuali e ottimizzazione di dispositivi U-OWC"*
Responsabile scientifico ENEA: Dr. Gianmaria Sannino
Responsabile scientifico Università Mediterranea di Reggio Calabria: Prof. Felice Arena

Si ringrazia la società WAVENERGY.IT s.r.l., Spin Off dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria per il supporto fornito nella redazione della parte II del rapporto, sui dispositivi REWEC3.

Indice

SOMMARIO 4

ELABORAZIONE DATI METEOMARINI DA MODELLI NUMERICI AD ALTA RISOLUZIONE E DEFINIZIONE DEGLI STATI DI MARE LUNGO LE COSTE DEL MEDITERRANEO. 5

I.1 DISTRIBUZIONE OMNIDIREZIONALE DELL'ALTEZZA SIGNIFICATIVA P(HS>H) 5
I.2 MAREGGIATA 11
I.3 MODELLO DELLA MAREGGIATA TRIANGOLARE EQUIVALENTE 11
I.4 DURATE DELLE MAREGGIATE: REGRESSIONE BASI-ALTEZZE 11
I.5 PERIODO DI RITORNO R(H_s>H) 13
I.6 PERSISTENZA MEDIA D_M(H) 13
I.7 FLUSSO DI ENERGIA ONDOSA NEI PUNTI IN ESAME 20
I.8 DISTRIBUZIONE DIREZIONALE DELL'ALTEZZA SIGNIFICATIVA P(H_s>H; $\theta_1<\theta<\theta_2$) 20
I.9 PERIODO DI RITORNO DIREZIONALE R(H_s>H; $\theta_1<\theta<\theta_2$) 23

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 36

Sommario

Il presente rapporto è stato elaborato a partire dai dati di moto ondoso nel Mar Mediterraneo, forniti dal modello di onde WAM (WAve prediction Model, WAMDI-Group 1988) sviluppato dall'ENEA. Il WAM è un modello di onda di terza generazione, e nello specifico è stata adottata una risoluzione spaziale di 1/16°, corrispondente a circa 5-7 km.
Tali dati, forniti da ENEA, sono stati elaborati per 31 punti dislocati lungo le coste del Mar Mediterraneo. Nello specifico, sono stati considerati i punti 1-11 nel Nord Africa, i punti 12-13 lungo le coste asiatiche sul Mediterraneo, il punto 14 nella Turchia, e verso l'Europa i punti 15-18. Infine, i punti 19-31 sono dislocati lungo le coste europee che si affacciano sul Mediterraneo. Per ciascuno dei 31 punti vengono analizzate serie temporali di 10 anni dei livelli di altezza significativa, periodi di picco e direzioni di propagazione.
Le analisi hanno riguardato due aspetti fondamentali per la progettazione di dispositivi per lo sfruttamento dell'energia ondosa posti in mare: *i*) le analisi di eventi estremi; *ii*) le analisi di clima ondoso in una fissata località. Le prime sono di interesse per la progettazione strutturale e la stabilità globale dei diversi possibili dispositivi di sfruttamento, le seconde sono fondamentali per le stime di potenziale energetico in un'assegnata località e, quindi, per l'ottimizzazione degli impianti per la conversione dell'energia ondosa incidente.
Analisi similari sono state condotte nell'ambito del report RdS/2012/ 231, nel quale le elaborazioni erano state limitate a tre sole località poste lungo il perimetro costiero Italiano. Si trattava di punti in prossimità delle località di Genova, Pantelleria e Porto Pischera. Nel presente report, le indagini sono state estese a un numero considerevole di punti al fine di ottenere una mappatura sia di potenziale energetico che di eventi estremi all'interno dell'intero perimetro costiero del Mare Mediterraneo.
Dall'analisi del potenziale energetico, si ricava che i 3 punti più significativi dal punto di vista energetico nel bacino del Mediterraneo sono: il punto 30 (costa nord-occidentale della Sardegna, Italia - è il punto a maggiore potenziale energetico di tutto il Mediterraneo), il punto 25 (Francia) ed il punto 28 (ad ovest della Corsica, Francia) (vedi Figura 1 per la localizzazione dei punti).
Per tali punti, infine, sono state fatte delle elaborazioni direzionali sia della probabilità di superamento dell'altezza significativa che del periodo di ritorno di una mareggiata in cui l'altezza significativa massima eccede la soglia *h*, con direzione delle onde compresa in un prefissato settore di traversia.

Elaborazione dati meteomarini da modelli numerici ad alta risoluzione, con analisi del potenziale energetico e delle mareggiate estreme lungo le coste del Mediterraneo.

Al fine di esaminare il potenziale energetico ed il clima ondoso lungo le coste del Mare Mediterraneo, si sono identificati 31 punti lungo l'intero perimetro costiero, incluse le principali isole.
Le Figure 1-6 riportano la localizzazione di tali punti. Le Figure 1 e 2 riportano i punti nelle aree 1 e 2, nel Nord Africa (punti 1-11) e le coste asiatiche sul Mediterraneo (punti 12-13). La Figura 3 riporta i punti della zona 3, dalla Turchia (punto 14) verso l'Europa (punti 15-18). Le Figure 4-6 riportano alcuni punti lungo le coste europee che si affacciano sul Mediterraneo (punti 19-31).
Per ciascuno di tali punti si è proceduto all'analisi dei livelli di altezza significativa omnidirezionale (a prescindere, cioè, dalla direzione di propagazione delle onde) e delle storie temporali delle mareggiate. L'analisi delle mareggiate consente di determinare la mareggiata triangolare equivalente associata a ciascuna mareggiata vera. Viene poi determinato il periodo di ritorno delle mareggiate estreme in ciascun paraggio.
Si procede poi, nei 31 punti in esame, all'analisi del potenziale energetico, al fine di determinare, lungo le aree costiere del Mediterraneo, le aree più significative per il possibile sfruttamento dell'energia ondosa.
Infine, si procede all'analisi direzionale dei dati di moto ondoso, per i punti più rappresentativi dal punto di vista energetico. L'analisi degli eventi estremi, risulta di interesse primario per la realizzazione di dispositivi per la produzione di energia ondosa, in quanto tali valori estremi rappresentano i dati di riferimento per la progettazione di tali dispositivi (stabilità globale) e delle strutture di supporto.

I.1 Distribuzione omnidirezionale dell'altezza significativa P(Hs>h)

La $P(H_s>h)$ rappresenta la probabilità che l'altezza significativa sia maggiore di una fissata soglia h in una certa località. Tale probabilità viene determinata a partire dai dati d'onda significativa, assumendo una distribuzione teorica. In genere, nel Mare Mediterraneo, i dati vengono bene interpretati da una distribuzione di tipo Weibull a due parametri, del tipo (Arena e Barbaro, 1999; Boccotti, 2000; Arena, 2004):

$$P(H_s > h) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w}\right)^u\right]$$

Il parametro u è un parametro di forma adimensionale, mentre w è un fattore di scala, espresso in metri se H_s è in metri. In termini probabilistici, maggiore è w, maggiori saranno i valori di altezza significativa nella località fissata (a parità di u).
I parametri u e w si determinano a partire dai dati di altezza significativa, che vengono rappresentati su una carta probabilistica Weibull.
La Figura 7 riporta la $P(H_s>h)$ nei 31 punti in esame, su diagramma Weibull, che riporta in ascissa $\ln(H_s)$ ed in ordinata $\ln \ln [1/ P(H_s>h)]$.
Si noti che i dati tendono a disporsi lungo una retta, e di conseguenza la distribuzione Weibull a 2 parametri interpreta efficacemente i dati.
I valori dei parametri u e w [m] sono riportati nella Tabella 1.

Mappa dei punti analizzati

Figura 1. Localizzazione dei punti analizzati .

Figura 2. Localizzazione dei punti analizzati .

Figura 3. Localizzazione dei punti analizzati .

Figura 4. Localizzazione dei punti analizzati .

Figura 5. Localizzazione dei punti analizzati .

Figura 6. Localizzazione dei punti analizzati .

Analisi omnidirezionale

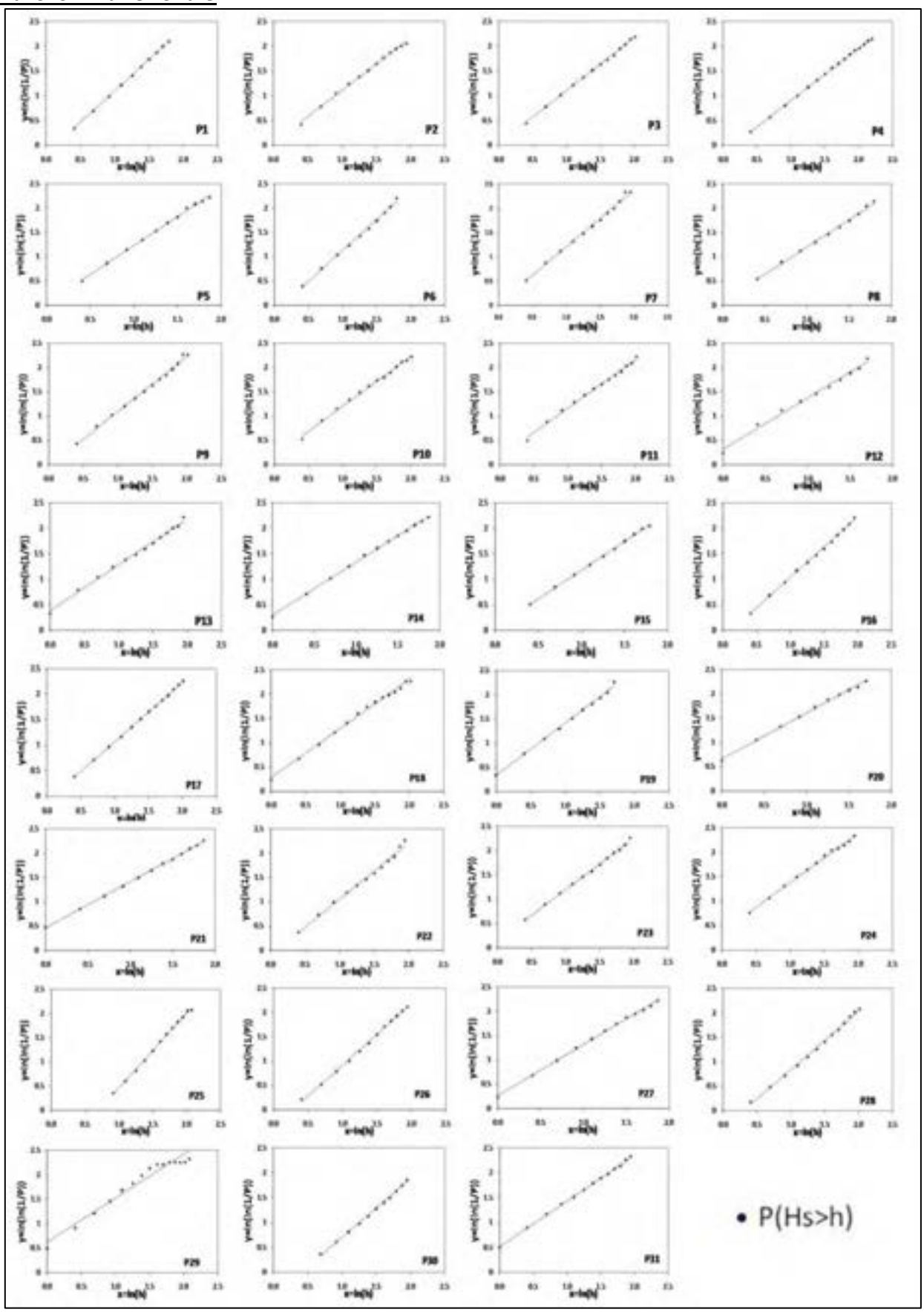

Figura 7. Distribuzione omnidirezionale dell'altezza significativa $P(H_s>h)$ per ogni punto analizzato .

Point	$h_{s\ media}(m)$	$h_{S\ crit}(m)$	$h_{s\ max}(m)$	u	$w(m)$	$a_{10}(m)$	$b_{10}(h)$	K_1	K_2
1	1.09	1.64	6.39	1.27	1.15	4.18	112.61	0.718	0.292
2	1.10	1.66	8.20	1.06	0.96	4.40	98.42	0.864	0.083
3	1.07	1.61	8.42	1.07	0.98	4.29	116.16	0.708	0.25
4	1.22	1.83	11.34	1.06	1.16	5.32	101.25	1.033	-0.07
5	1.01	1.52	6.69	1.19	0.97	3.89	104.19	0.906	0.005
6	1.10	1.65	6.48	1.28	1.12	4.21	100.54	0.826	0.141
7	1.06	1.59	7.11	1.18	0.98	3.97	107.40	0.756	0.193
8	1.06	1.58	6.90	1.13	1.07	3.90	110.48	0.815	0.155
9	1.13	1.69	7.71	1.13	1.03	4.30	121.21	0.732	0.207
10	1.08	1.63	7.71	1.02	0.84	3.87	119.63	0.876	0.076
11	1.12	1.68	8.35	1.00	0.86	4.07	113.56	1.088	-0.1
12	0.91	1.36	5.71	1.05	0.74	3.31	114.01	0.934	0.004
13	0.88	1.31	7.10	0.90	0.66	3.79	103.73	1.022	-0.06
14	0.84	1.27	6.92	1.04	0.75	3.78	95.58	0.815	0.179
15	1.01	1.52	6.54	1.13	0.95	4.03	114.03	0.77	0.181
16	1.15	1.72	7.48	1.19	1.14	4.55	106.13	0.972	-0.02
17	1.08	1.62	8.41	1.17	1.09	4.59	97.34	0.941	0
18	0.84	1.26	8.21	1.01	0.76	3.78	95.21	0.954	0.001
19	0.75	1.12	6.06	1.08	0.73	3.49	86.68	0.857	0.125
20	0.57	0.86	5.75	0.95	0.50	2.93	93.36	0.899	-0.03
21	0.67	1.00	6.76	0.95	0.62	3.48	95.26	1.07	-0.12
22	1.09	1.64	7.46	1.16	1.09	4.77	96.47	1.028	-0.06
23	0.89	1.33	7.38	1.06	0.88	4.28	92.66	0.945	0
24	0.77	1.15	7.02	1.01	0.69	3.64	80.73	1.086	-0.09
25	1.39	2.08	8.69	1.55	2.02	5.34	114.63	0.637	0.43
26	1.23	1.85	9.09	1.27	1.32	4.64	141.07	0.519	0.569
27	0.86	1.29	6.58	1.05	0.78	3.55	103.36	0.705	0.286
28	1.25	1.88	7.93	1.20	0.74	5.55	96.41	0.959	0.001
29	0.65	0.98	8.27	0.90	0.50	3.04	95.84	0.839	0.073
30	1.40	2.10	10.27	1.18	1.50	6.14	97.10	1.031	0.04
31	0.68	1.02	7.47	0.92	0.58	3.34	98.20	0.832	0.137

Tabella 1. Altezza significativa media, altezza critica, altezza significativa massima, parametri *u* e *w* della distribuzione omnidirezionale dell'altezza significativa $P(H_s>h)$,
parametri caratteristici a_{10} e b_{10} K_1 e K_2 della regressione base altezze.

I.2 Mareggiata

Una mareggiata viene definita come una successione di stati di mare durante la quale l'altezza significativa H_s eccede una fissata soglia. In generale, una mareggiata inizia quando H_s supera una soglia fissata e finisce quando H_s scende al di sotto di tale soglia per un intervallo di tempo stabilito.

Seguendo la definizione di Boccotti, possiamo definire una mareggiata 'una successione di stati di mare nel corso della quale l'altezza significativa supera una soglia fissata h_{crit} e non scende al di sotto di tale soglia per un intervallo di tempo superiore a 12 ore'. La soglia critica, h_{crit}, dipende dalla località in esame. Boccotti (2000; v. anche Arena e Barbaro, 1999; Arena, 2004) consiglia di utilizzare il valore

$$h_{crit} = 1.5\overline{H_s}$$

che dipende dall'altezza significativa media $\overline{H_s}$ calcolata a partire dalla serie temporale.
I valori dell'altezza significativa media e della soglia critica h_{crit} sono riportati nella Tabella 1, per i 31 punti in esame.

I.3 Modello della mareggiata triangolare equivalente

Il modello della mareggiata triangolare equivalente consente di associare ad ogni mareggiata vera una mareggiata triangolare. L'altezza del triangolo *a* rappresenta l'intensità della mareggiata ed è uguale all'altezza significativa massima nel corso della mareggiata. La base del triangolo *b* rappresenta la durata della mareggiata triangolare , e viene determinata in maniera tale che l'altezza d'onda massima attesa della mareggiata triangolare equivalente risulti uguale a quella della mareggiata vera. L'altezza *a* viene ricavata direttamente dalla serie temporale, mentre la base *b* viene determinata mediante una procedura iterativa. A partire dal valore dell'altezza d'onda massima attesa della mareggiata vera $\overline{H_{\max}}$, e dall'altezza *a* della mareggiata triangolare, si fissa un valore della base della mareggiata triangolare equivalente di tentativo *b'* per calcolare:

$$\overline{H_{\max}}(a,b') = \int_0^{\infty} 1 - \exp\left\{ \frac{b'}{a} \int_0^{a} \frac{\ln\left[1 - P(H; H_s = h)\right]}{\overline{T}(h)} \mathrm{d}h \right\} \mathrm{d}H$$

che rappresenta l'altezza d'onda massima attesa della mareggiata triangolare equivalente di altezza *a* e base *b'*. Una volta calcolato tale valore, se $\overline{H_{\max}}$ della mareggiata vera è maggiore di $\overline{H_{\max}}(a,b')$, la base *b* deve essere maggiore di *b'*; se invece $\overline{H_{\max}} < \overline{H_{\max}}(a,b')$, allora *b*<*b'*.

La Figura 8 riporta la mareggiata più intensa misurata in ciascuno dei 31 punti in esame e la mareggiata triangolare equivalente associata.

I.4 Durate delle mareggiate: regressione basi-altezze

Considerando l'insieme delle *N* mareggiate più intense in una fissata località in un numero fissato di anni di osservazione n_{anni}, con:

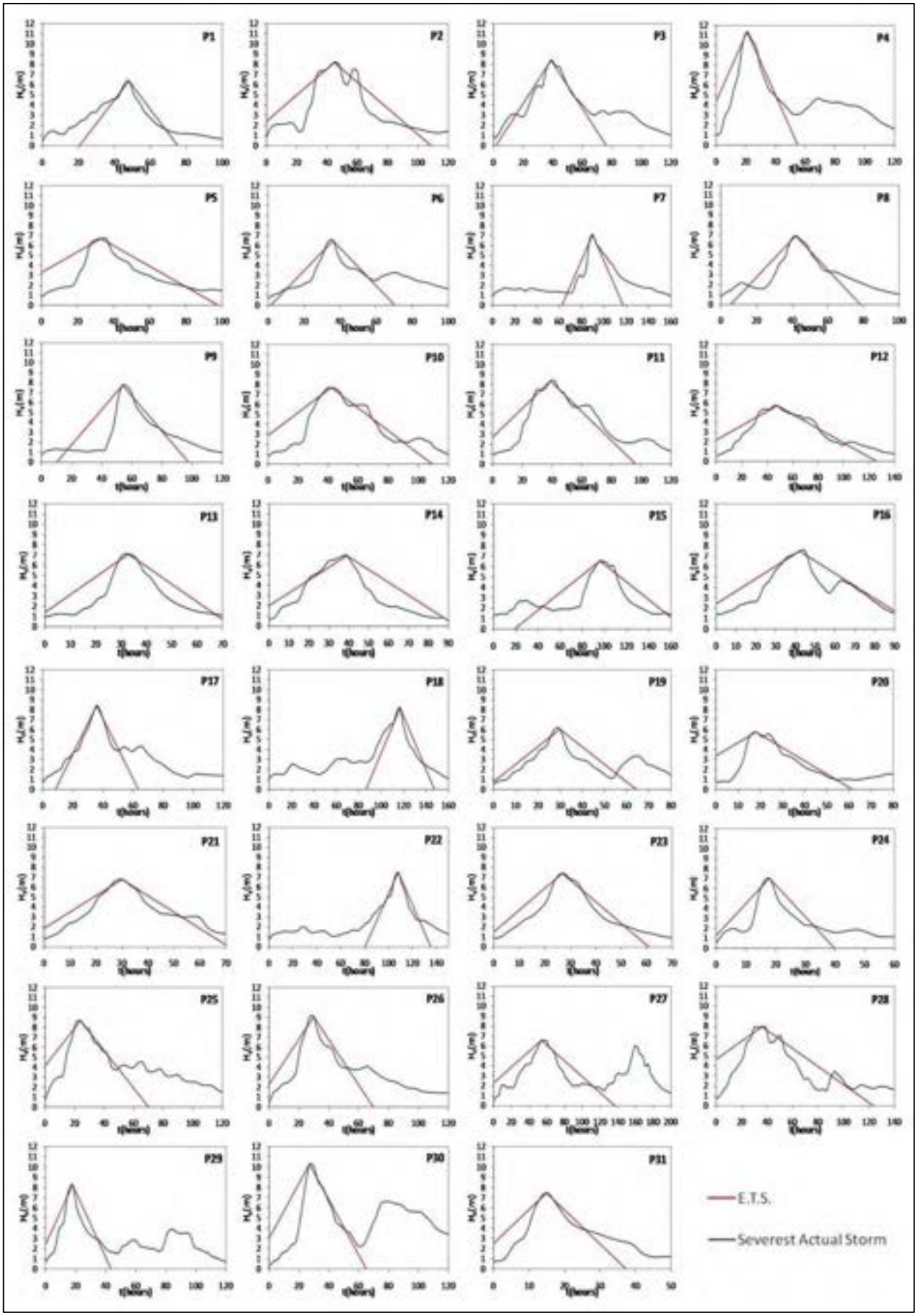

Figura 8. Mareggiata più intensa e mareggiata triangolare equivalente associata per ogni punto analizzato .

$$N = 10 n_{anni}.$$

Definiamo a_{10} e b_{10} rispettivamente l'altezza media e la base media delle *N* mareggiate triangolari equivalenti di questo insieme.
La Tabella 1 riporta i parametri a_{10} e b_{10} per i 31 punti in esame.
Considerando i parametri *a* e *b* dell'intero insieme di mareggiate individuate nella località in esame, normalizzati rispetto a a_{10} e b_{10}, è possibile determinare la regressione basi-altezze $\bar{b}(a)$ in una forma adimensionale (per dettagli v. Boccotti, 2000; Arena e Barbaro, 1999; Arena, 2004; Arena e Pavone 2006, 2009). La regressione lega il valor medio della base *b* all'altezza *a* e si ottiene rappresentando b/b_{10} rispetto a a/a_{10} in un diagramma cartesiano e interpolando i dati con una legge esponenziale di parametri K_1 e K_2:

$$\frac{\bar{b}(a)}{b_{10}} = K_1 \exp\left(K_2 \frac{a}{a_{10}} \right)$$

dove K_1 e K_2 sono parametri caratteristici adimensionali della località in esame.
La regressione basi altezze per i 31 punti in esame, ricavata dall'elaborazione delle intere serie temporali, è riportata nelle Figure 9 e 10. I parametri K_1 e K_2 sono riportati nella Tabella 1.

I.5 Periodo di ritorno $R(H_s>h)$

$R(H_s>h)$ rappresenta il periodo di ritorno di una mareggiata in cui l'altezza significativa massima supera la soglia *h*. L'espressione analitica di $R(H_s>h)$ è stata ricavata da Boccotti (2000) per il mare equivalente, che si ottiene sostituendo ad ogni mareggiata vera la mareggiata triangolare equivalente associata. La sua espressione è la seguente :

$$R(H_s > h) = \frac{b_{10} K_1 \exp\left(K_2 \dfrac{h}{a_{10}} \right)}{1 + u \left(\dfrac{h}{w} \right)^u} \exp\left(\frac{h}{w} \right)^u .$$

Le Figure 11 e 12 riportano i periodi di ritorno $R(H_s>h)$ nei 31 punti in esame. I valori delle altezze significative, per assegnati valori del tempo di ritorno, sono infine riportati nella Tabelle 2 e 3.

I.6 Persistenza media $D_m(h)$

La persistenza media $D_m(h)$ al di sopra della soglia *h* rappresenta l'intervallo di tempo medio in cui l'altezza significativa si mantiene al di sopra della soglia *h*, nelle mareggiate in cui tale soglia viene superata. Essa viene definite come il rapporto tra l'intervallo temporale in cui $H_s>h$ in un lungo intervallo di tempo τ ed il numero di mareggiate in cui $H_s > h$, durante τ. La persistenza è definita dalla seguente espressione:

$$D_m(h) = \frac{b_{10} K_1 \exp\left(K_2 \dfrac{h}{a_{10}} \right)}{1 + u \left(\dfrac{h}{w} \right)^u} .$$

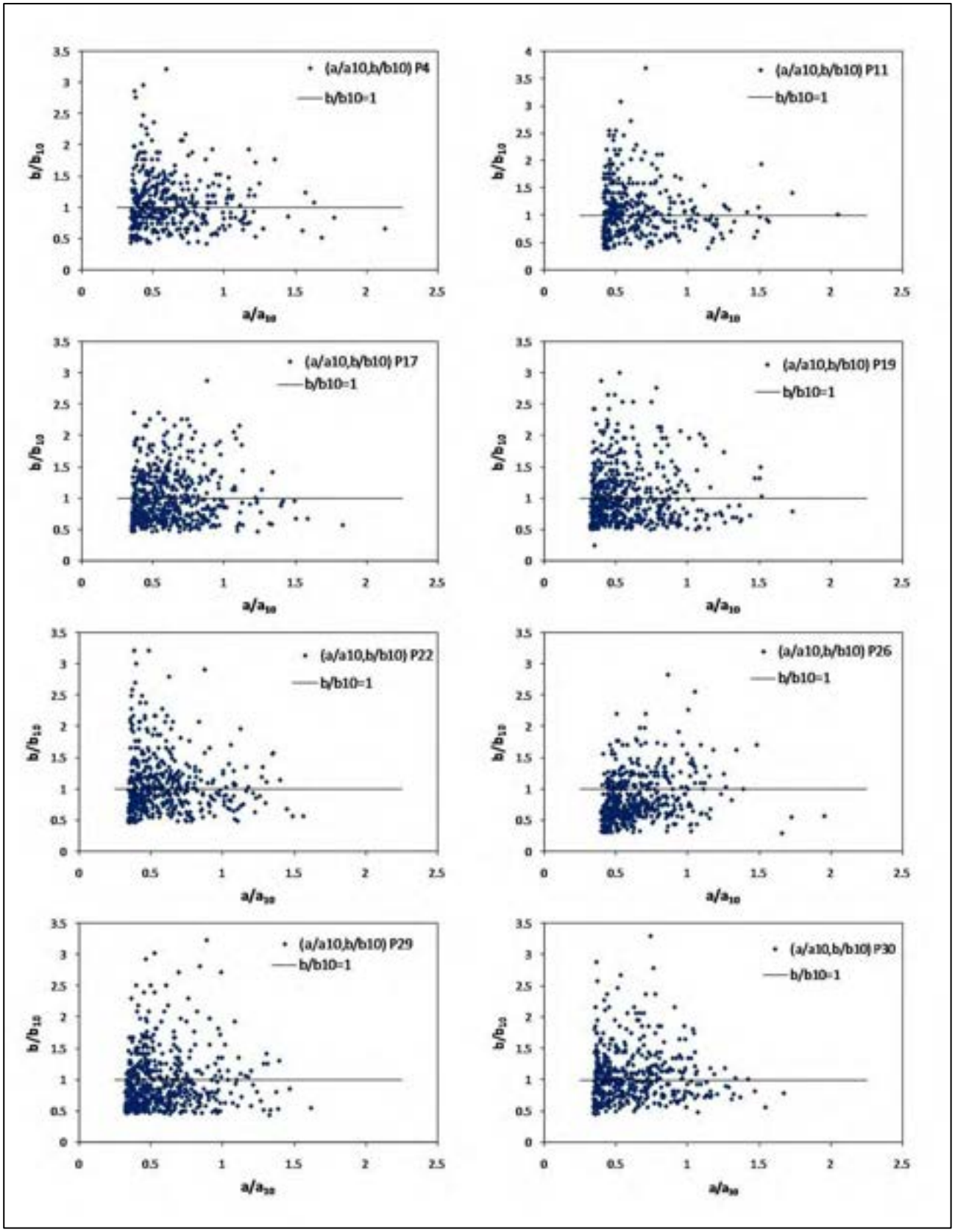

Figura 9. Regressione basi-altezze per le mareggiate triangolari equivalenti in forma adimensionale per alcuni dei punti analizzati .

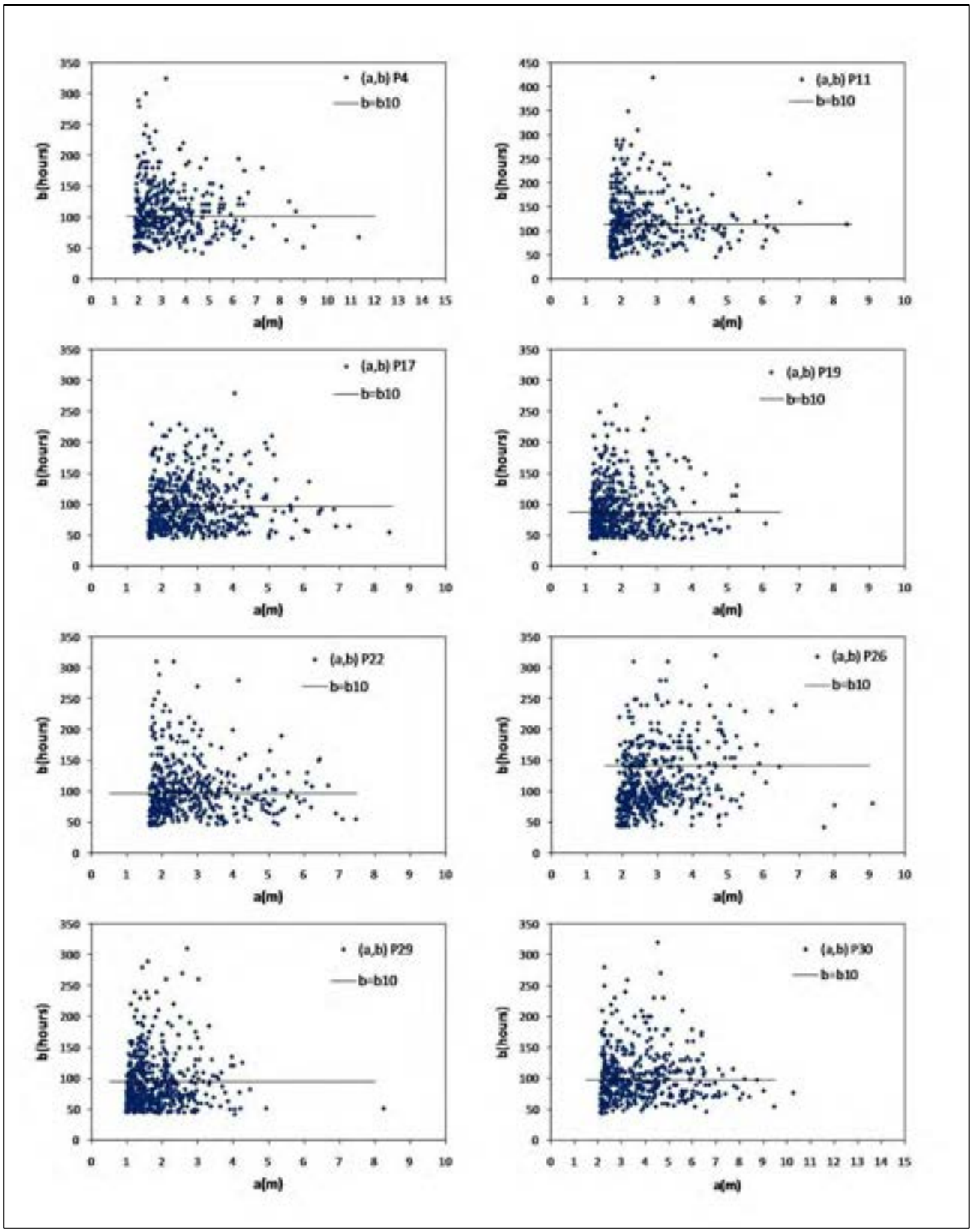

Figura 10. Regressione basi-altezze per le mareggiate triangolari equivalenti in forma dimensionale per alcuni dei punti analizzati .

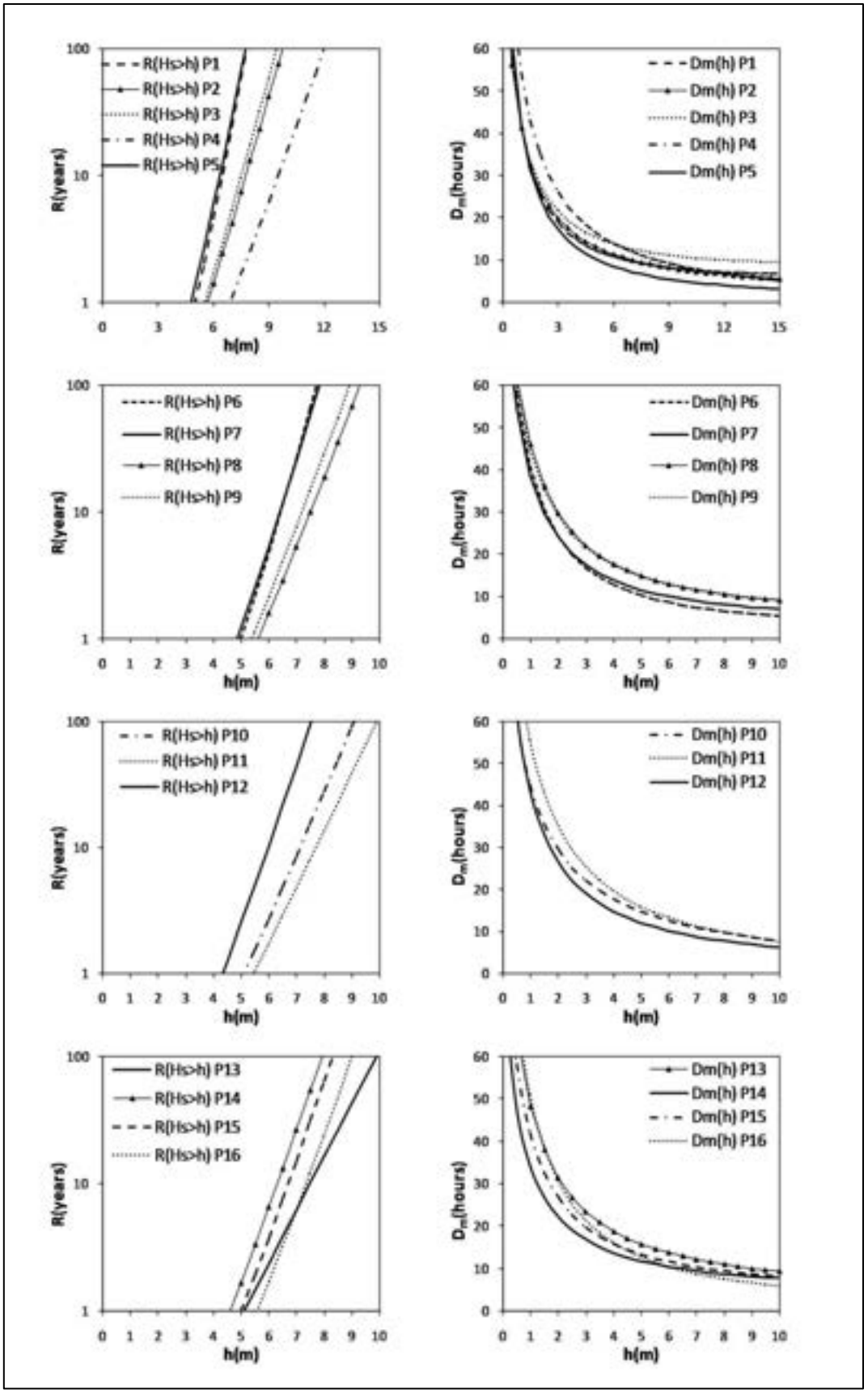

Figura 11. Periodo di ritorno $R(H_s>h)$ e persistenza media al di sopra della soglia $D_m(h)$ per ogni punto analizzato .

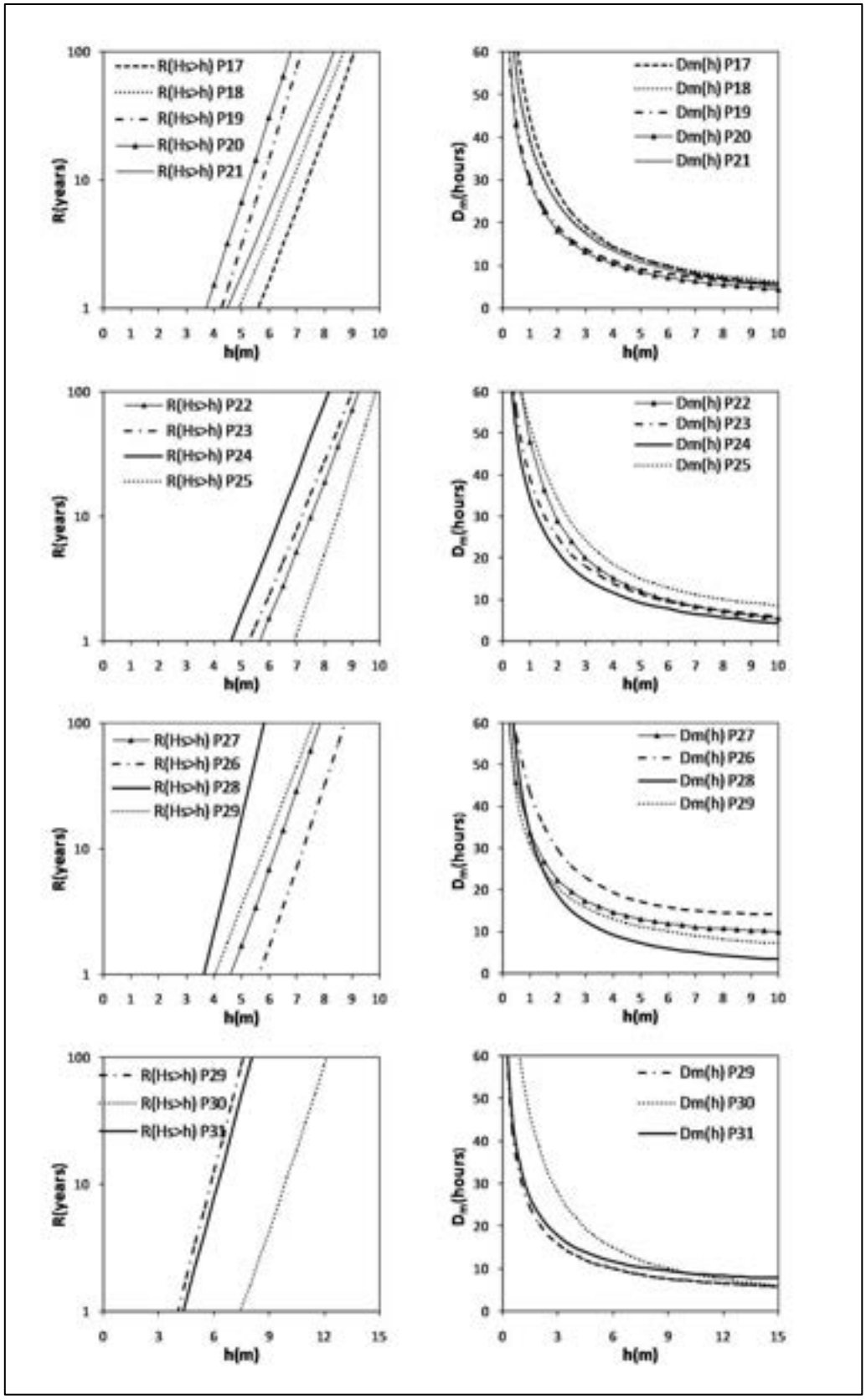

Figura 12. Periodo di ritorno $R(H_s>h)$ e persistenza media al di sopra della soglia $D_m(h)$ per ogni punto analizzato .

Point	*h(R=1 year)[m]*	*D_m(h)*	*h(R=5 years)[m]*	*D_m(h)*	*h(R=10 years)[m]*	*D_m(h)*
1	5.0	12.3	6.1	10.6	6.5	10.1
2	5.7	11.8	7.2	9.8	7.8	9.2
3	5.5	14.5	6.9	12.7	7.5	12.1
4	6.9	12.0	8.8	9.4	9.5	8.6
5	4.8	10.6	5.9	8.5	6.3	7.9
6	5.0	10.2	6.0	8.5	6.4	8.0
7	4.9	11.7	6.0	10.0	6.4	9.4
8	5.6	13.6	6.9	11.5	7.5	10.9
9	5.4	13.9	6.7	11.9	7.2	11.3
10	5.1	15.5	6.5	12.8	7.1	11.9
11	5.5	14.6	7.0	11.2	7.7	10.1
12	4.3	13.7	5.5	11.0	6.0	10.2
13	5.1	14.4	6.8	11.2	7.5	10.2
14	4.6	12.4	5.8	10.6	6.3	10.1
15	5.0	13.2	6.2	11.3	6.7	10.7
16	5.6	11.3	6.8	9.0	7.4	8.3
17	5.6	10.3	6.9	8.3	7.4	7.7
18	4.9	11.8	6.3	9.5	6.8	8.8
19	4.3	10.5	5.3	8.9	5.8	8.3
20	3.7	11.0	4.8	8.8	5.3	8.1
21	4.5	12.0	5.9	9.2	6.4	8.3
22	5.7	10.5	7.0	8.3	7.5	7.6
23	5.3	10.8	6.6	8.7	7.2	8.1
24	4.6	10.0	5.9	7.8	6.4	7.2
25	6.9	11.3	8.0	10.0	8.5	9.6
26	5.6	16.2	6.8	15.1	7.2	14.8
27	4.6	13.5	5.8	12.1	6.3	11.6
28	3.6	10.2	4.4	8.2	4.8	7.6
29	4.0	12.9	5.3	10.8	5.8	10.1
30	7.5	12.0	9.2	9.8	9.9	9.1
31	4.4	14.1	5.7	12.0	6.2	11.4

Tabella 2. Valori dell'altezza significativa *h(R)* per fissati valori del periodo di ritorno *R*(1, 5, 10 anni) e relativa persistenza media al di sopra della soglia $D_m(h)$.

Point	*h(R=20 years)[m]*	*D_m(h)*	*h(R=50 years)[m]*	*D_m(h)*	*h(R=100 years)[m]*	*D_m(h)*
1	6.9	9.7	7.4	9.2	7.8	8.9
2	8.4	8.7	9.2	8.0	7.7	7.7
3	8.1	11.7	8.9	11.2	9.4	10.9
4	10.3	7.9	11.3	7.1	12.0	6.6
5	6.8	7.3	7.3	6.7	7.8	6.3
6	6.8	7.6	7.4	7.0	7.7	6.7
7	6.9	9.0	7.4	8.5	7.8	8.1
8	8.1	10.4	8.8	9.8	9.3	9.4
9	7.7	10.8	8.4	10.2	8.9	9.8
10	7.7	11.2	8.5	10.4	9.1	9.9
11	8.4	9.2	9.2	8.3	9.9	7.6
12	6.5	9.5	7.1	8.6	7.5	8.1
13	8.2	9.4	9.2	8.5	9.9	7.9
14	6.8	9.6	7.5	9.1	7.9	8.8
15	7.2	10.1	7.8	9.5	8.3	9.2
16	7.9	7.7	8.5	7.0	9.0	6.6
17	7.9	7.2	8.6	6.6	9.1	6.2
18	7.4	8.2	8.1	7.5	8.7	7.1
19	6.2	7.9	6.8	7.4	7.2	7.1
20	5.7	7.5	6.3	6.8	6.8	6.4
21	7.0	7.6	7.8	6.8	8.3	6.2
22	8.1	7.0	8.7	6.4	9.3	6.0
23	7.8	7.5	8.5	6.9	9.0	6.5
24	7.0	6.5	7.6	5.9	8.2	5.5
25	8.9	9.2	9.5	8.8	9.9	8.6
26	7.7	14.6	8.3	14.4	8.7	14.3
27	6.8	11.3	7.4	10.9	7.9	10.6
28	5.1	7.1	5.5	6.5	5.8	6.1
29	6.4	9.5	7.1	8.9	7.6	8.5
30	10.6	8.5	11.5	7.8	12.1	7.3
31	6.8	10.8	7.5	12.2	8.1	9.9

Tabella 3. Valori dell'altezza significativa *h(R)* per fissati valori del periodo di ritorno *R*(20, 50, 100 anni) e relativa persistenza media al di sopra della soglia $D_m(h)$.

I.7 Flusso di energia ondosa nei punti in esame

L'esame del flusso di energia ondosa nei punti in esame ha consentito di determinare il potenziale energetico lungo le coste del Mare Mediterraneo. I risultati sono riportati nella Tabella 4 e nella Figura 13. Nei paragrafi seguenti si procede all'analisi direzionale dei dati di moto ondoso nei 3 punti più significativi dal punto di vista energetico: il punto 30, il punto 25 ed il punto 28.

Il primo punto, il 30, è posizionato a NordOvest della Sardegna. Esso rappresenta la migliore localizzazione, in aree costiere, per la produzione di energia da moto ondoso. Nella parte II del rapporto di procederà a dimensionare un REWEC3 in quest'area, al fine di determinare la produzione annua di energia elettrica ottenibile, mediamente, in un anno, con una diga di 1Km di lunghezza.

Il flusso di energia per unità di larghezza per uno stato di mare è definito come

$$\Phi = \rho g \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} c_g(\omega) S(\omega,\theta) \mathrm{d}\theta \, \mathrm{d}\omega$$

in cui ρ è la densità dell'acqua, g l'accelerazione di gravità, $S(\omega,\theta)$ lo spettro direzionale delle onde incidenti e c_g la celerità di gruppo. A partire da tale relazione è possibile ricavare la seguente espressione semplificata funzione dell'altezza significativa H_s e del periodo medio T_m di uno stato di mare

$$\Phi = \frac{\rho g^2}{64\pi} \gamma_f H_s^2 T_m,$$

in cui γ_f è un parametro adimensionale che dipende dallo spettro di frequenza e vale $\gamma_f = 1.12$ nel caso di spettro JONSWAP medio e $\gamma_f = 1.15$ per lo spettro Pierson-Moskowitz (PM). Si osservi, infine, che il periodo T_m è legato al periodo di picco dello spettro T_p dalla relazione: $T_m = \alpha_{f_1} T_p$, in cui il parametro α_{f_1} è pari a 0.81 per lo spettro JONSWAP medio e 0.75 per il PM.
Il flusso medio di energia disponibile per unità di larghezza in un'assegnata località è pari a

$$\overline{\Phi} = \int_0^{\infty} \Phi(h) \left| \frac{\mathrm{d}P(H_s > h)}{\mathrm{d}h} \right| \mathrm{d}h$$

in cui $P(H_s > h)$ è la probabilità di superamento dell'altezza significativa.

I.8 Distribuzione direzionale dell'altezza significativa $P(H_s>h;\ \theta_1<\theta<\theta_2)$

Per la previsione dei valori estremi dell'altezza significativa, tenendo in considerazione la direzione di propagazione delle onde, occorre stimare la probabilità di superamento direzionale dell'altezza significativa $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$. Per la stima della $P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2)$, Boccotti ha proposto di utilizzare una differenza tra due distribuzioni Weibull a due parametri, del tipo:

$$P(H_s > h; \theta_1 < \theta < \theta_2) = \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\alpha} \right)^u \right] - \exp\left[-\left(\frac{h}{w_\beta} \right)^u \right]$$

P	Φ_{tot}(W/m)	$\Phi_{medio\ annuo}$(W/m)	P(KW/m)
1	1.52E+08	1.52E+07	5.2
2	1.52E+08	1.52E+07	8.1
3	1.52E+08	1.52E+07	5.2
4	2.37E+08	2.37E+07	5.2
5	1.2E+08	1.2E+07	4.1
6	1.5E+08	1.5E+07	5.0
7	1.3E+08	1.3E+07	4.3
8	1.3E+08	1.3E+07	4.3
9	1.6E+08	1.6E+07	5.4
10	1.3E+08	1.3E+07	4.4
11	1.4E+08	1.4E+07	4.8
12	8.1E+07	8.1E+06	2.8
13	9.2E+07	9.2E+06	3.2
14	9.6E+07	9.6E+06	3.3
15	1.3E+08	1.3E+07	4.3
16	1.7E+08	1.7E+07	5.9
17	1.6E+08	1.6E+07	5.5
18	9.2E+07	9.2E+06	3.1
19	7.0E+07	7.0E+06	2.4
20	3.9E+07	3.9E+06	1.3
21	6.5E+07	6.5E+06	2.2
22	1.9E+08	1.9E+07	6.4
23	1.1E+08	1.1E+07	3.94
24	7.6E+07	7.6E+06	2.59
25	3.0E+08	3.0E+07	10.34
26	2.2E+08	2.2E+07	7.48
27	8.9E+07	8.9E+06	3.06
28	2.6E+08	2.6E+07	8.9
29	5.1E+07	5.1E+06	1.8
30	3.4E+08	3.4E+07	11.7
31	3.8E+07	3.8E+06	1.3

Tabella 4. Valori indicativi del flusso di energia totale, del flusso di energia medio annuo e della potenza per ciascuno dei punti analizzati.

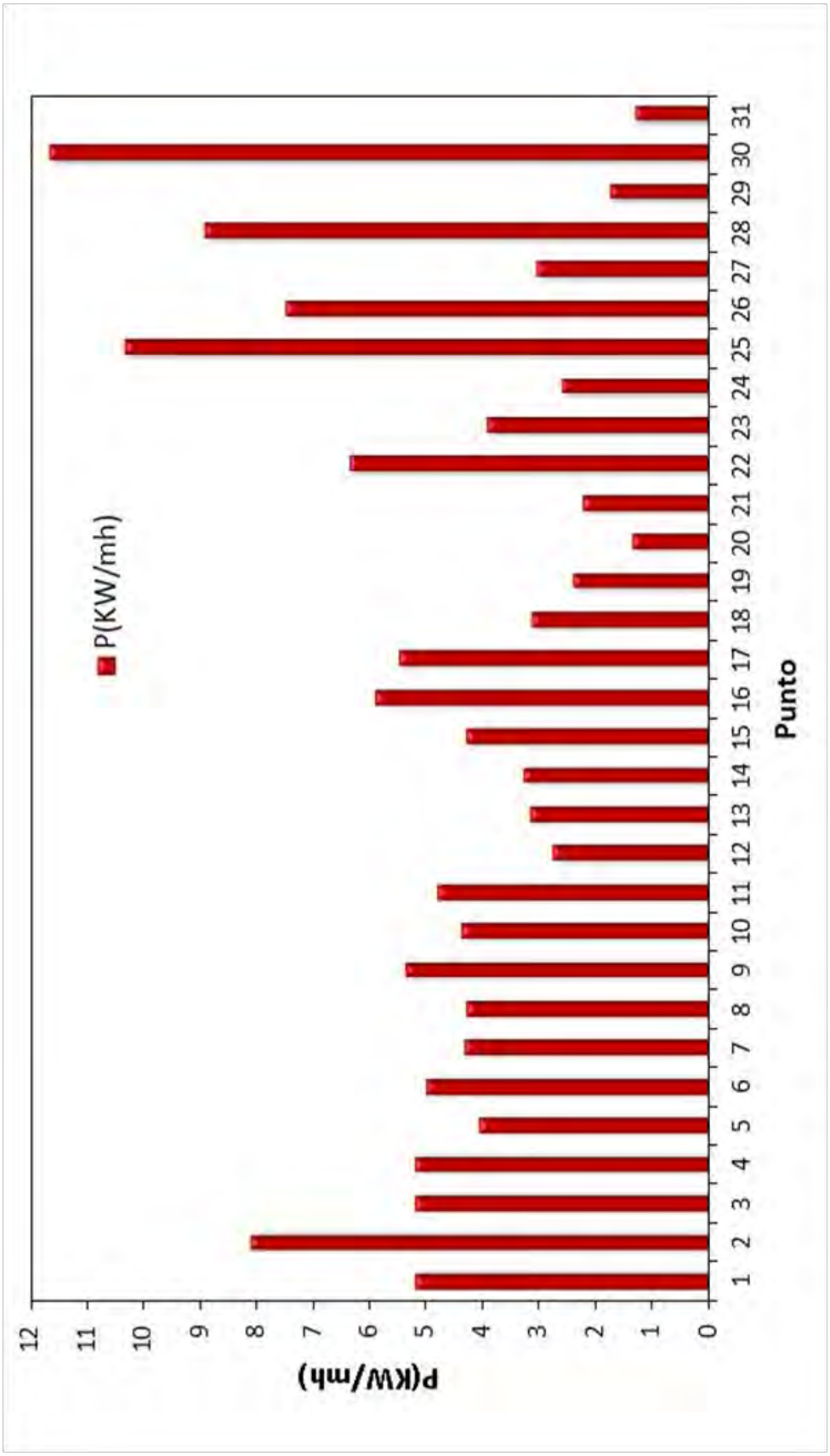

Figura 13. Valori indicativi della potenza *P(KW/m)* energetico per ciascuno dei punti analizzati.

dove i parametri w_α e w_β [m] dipendono dal settore considerato (θ_1,θ_2), mentre u è lo stesso della distribuzione omnidirezionale $P(H_s>h)$. I parametri w_α e w_β devono essere entrambi positivi, con $w_\beta < w_\alpha \le w$ in maniera tale da soddisfare sempre la condizione:

$$P(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)\le P(H_s>h) \qquad \forall h$$

Le probabilità direzionali dei livelli di altezza significativa, nei tre punti in esame (25, 28 e 30) sono state determinate. In dettaglio:

i. per il punto 25, la Figura 14 riporta un istogramma con i parametri w_α e w_β (i valori numerici sono riportati nella Tabella 5); le Figure 15 e 16 riportano le probabilità direzionali di altezza significativa, $P(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)$, per diversi settori direzionali;

ii. per il punto 28, la Figura 19 riporta un istogramma con i parametri w_α e w_β (i valori numerici sono riportati nella Tabella 6); le Figure 20 e 21 riportano le probabilità direzionali di altezza significativa, $P(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)$, per diversi settori direzionali;

iii. per il punto 30, la Figura 24 riporta un istogramma con i parametri w_α e w_β (i valori numerici sono riportati nella Tabella 7); le Figure 25 e 26 riportano le probabilità direzionali di altezza significativa, $P(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)$, per diversi settori direzionali.

I.9 Periodo di ritorno direzionale $R(H_s>h;\ \theta_1<\theta<\theta_2)$

$R(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)$ rappresenta il periodo di ritorno di una mareggiata in cui l'altezza significativa massima eccede la soglia h, con direzione delle onde compresa in un prefissato settore (θ_1,θ_2) (Arena, 2004):

$$R(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)=$$
$$=\frac{K_1 b_{10}\exp\left(K_2\dfrac{h}{a_{10}}\right)}{\left[1+u\left(\dfrac{h}{w_\alpha}\right)^u\right]\exp\left[-\left(\dfrac{h}{w_\alpha}\right)^u\right]-\left[1+u\left(\dfrac{h}{w_\alpha}\right)^u\right]\exp\left[-\left(\dfrac{h_l}{w_\beta}\right)^u\right]}.$$

I periodi di ritorno, per assegnati settori direzionali, vengono elaborati nei tre punti in esame (25, 28 e 30). In dettaglio:

i. per il punto 25, il periodo di ritorno $R(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)$ è riportato nelle Figure 17 e 18;

ii. per il punto 28, il periodo di ritorno $R(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)$ è riportato nelle Figure 22 e 23;

iii. per il punto 30, il periodo di ritorno $R(H_s>h;\theta_1<\theta<\theta_2)$ è riportato nelle Figure 27 e 28.

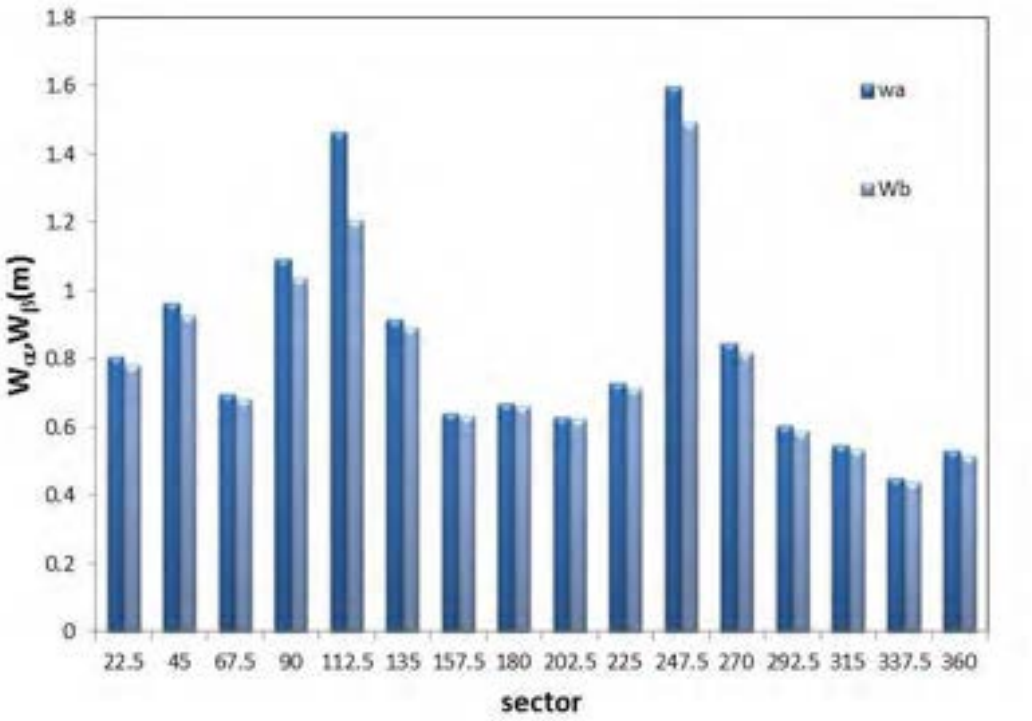

Figura 14. Parametri w_α e w_β della distribuzione direzionale dell'altezza significativa per fissati settori di ampiezza pari a 22,5°: identificazione del settore di traversia principale(punto 25).

Analisi direzionale per i punti col massimo potenziale energetico(25,28,30)

Settore centrato su	θ_{min}	θ_{max}	w_a(m)	w_b(m)
22.5°	11°	33°	0.806	0.784
45°	33°	56°	0.964	0.93
67.5°	56°	78°	0.697	0.681
90°	78°	101°	1.094	1.039
112.5°	101°	123°	1.466	1.209
135°	123°	146°	0.917	0.894
157.5°	146°	168°	0.64	0.634
180°	168°	191°	0.668	0.663
202.5°	191°	213°	0.631	0.625
225°	213°	236°	0.729	0.713
247.5°	236°	258°	1.599	1.494
270°	258°	281°	0.848	0.821
292.5°	281°	303°	0.604	0.589
315°	303°	326°	0.548	0.535
337.5°	326°	348°	0.451	0.438
360°	348°	371°	0.531	0.517

Tabella5. Parametri w_α e w_β della distribuzione direzionale dell'altezza significativa per fissati settori di ampiezza pari a 22,5° per il punto 25 .

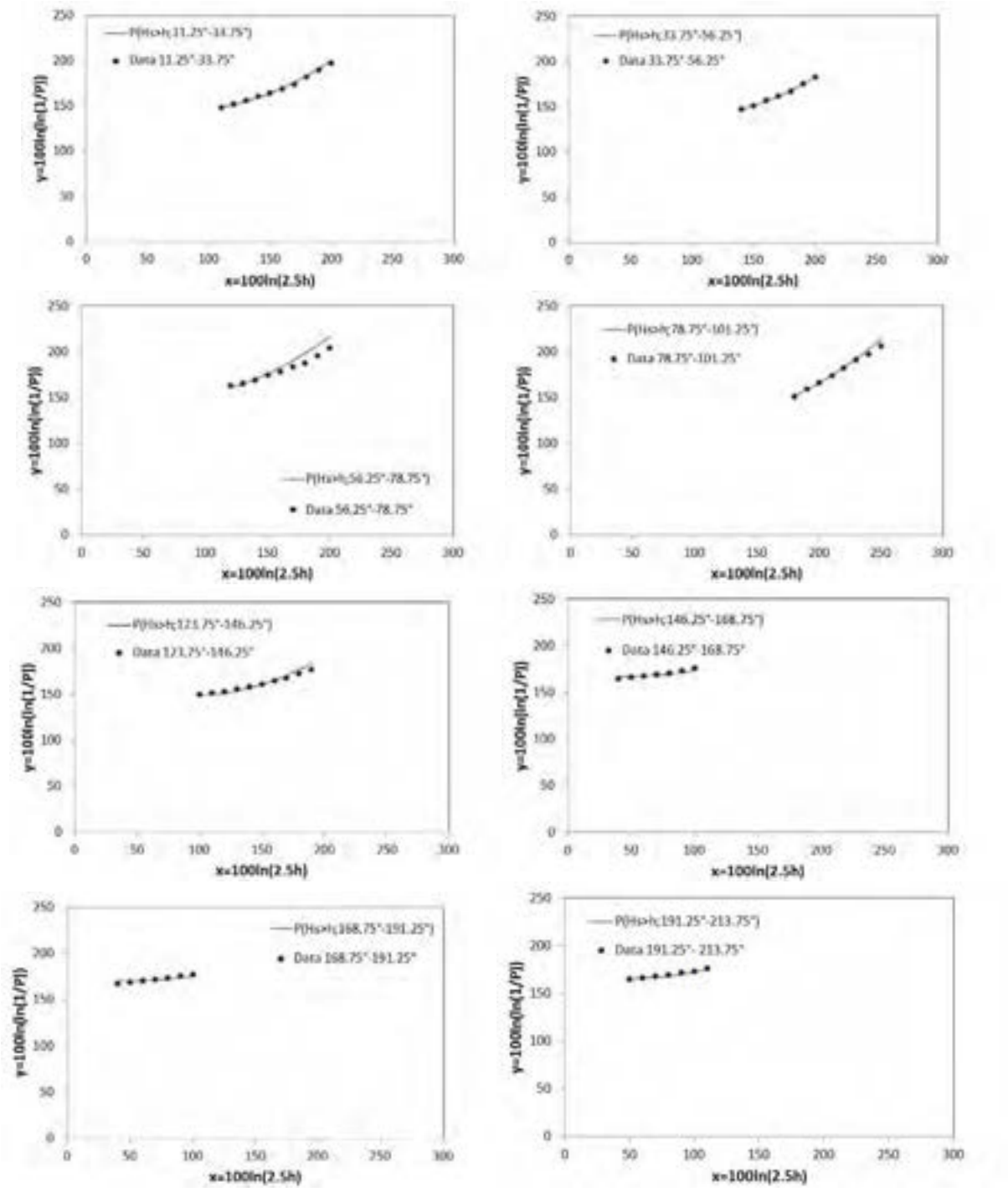

Figura 15. Distribuzione direzionale dell'altezza significativa per direzioni all'interno di fissati settori . Punto 25.

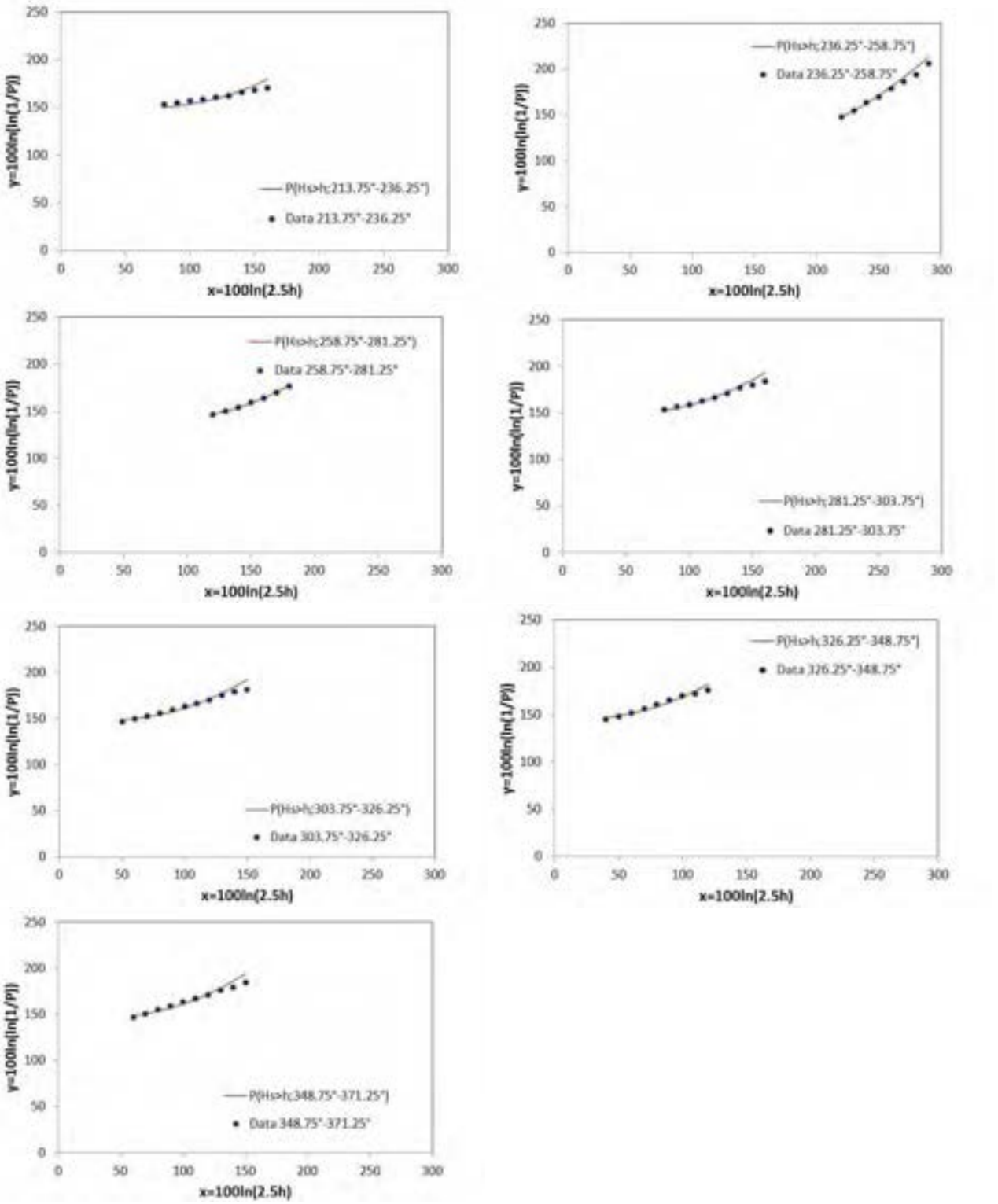

Figura 16. Distribuzione direzionale dell'altezza significativa per direzioni all'interno di fissati settori . Punto 25.

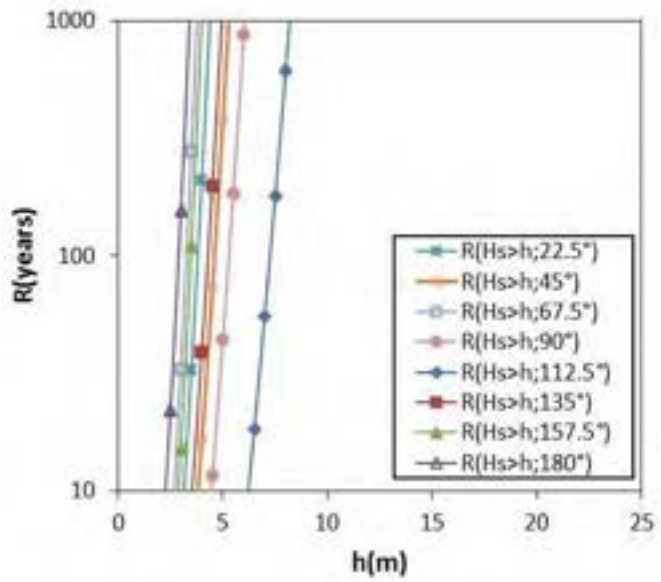

Figura 17. Periodo di ritorno direzionale $R(H_s>h;\Delta\theta)$ per fissati settori di ampiezza pari a 22.5 ° per il punto 25.

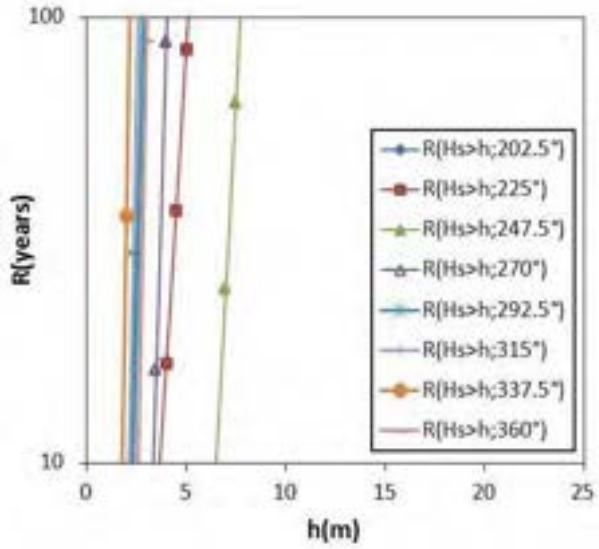

Figura 18. Periodo di ritorno direzionale $R(H_s>h;\Delta\theta)$ per fissati settori di ampiezza pari a 22.5 ° per il punto 25.

Settore centrato su	θ_{min}	θ_{max}	w_a(m)	w_b(m)
22.5°	11°	33°	0.729	0.706
45°	33°	56°	1.013	0.978
67.5°	56°	78°	0.779	0.744
90°	78°	101°	1.211	0.921
112.5°	101°	123°	1.37	1.226
135°	123°	146°	0.776	0.754
157.5°	146°	168°	0.719	0.7
180°	168°	191°	0.963	0.929
202.5°	191°	213°	1.163	1.085
225°	213°	236°	0.497	0.488
247.5°	236°	258°	0.452	0.449
270°	258°	281°	0.412	0.41
292.5°	281°	303°	0.307	0.306
315°	303°	326°	0.357	0.354
337.5°	326°	348°	0.484	0.474
360°	348°	371°	0.409	0.396

Tabella 6. Parametri w_α e w_β della distribuzione direzionale dell'altezza significativa per fissati settori di ampiezza pari a 22,5° per il punto 28 .

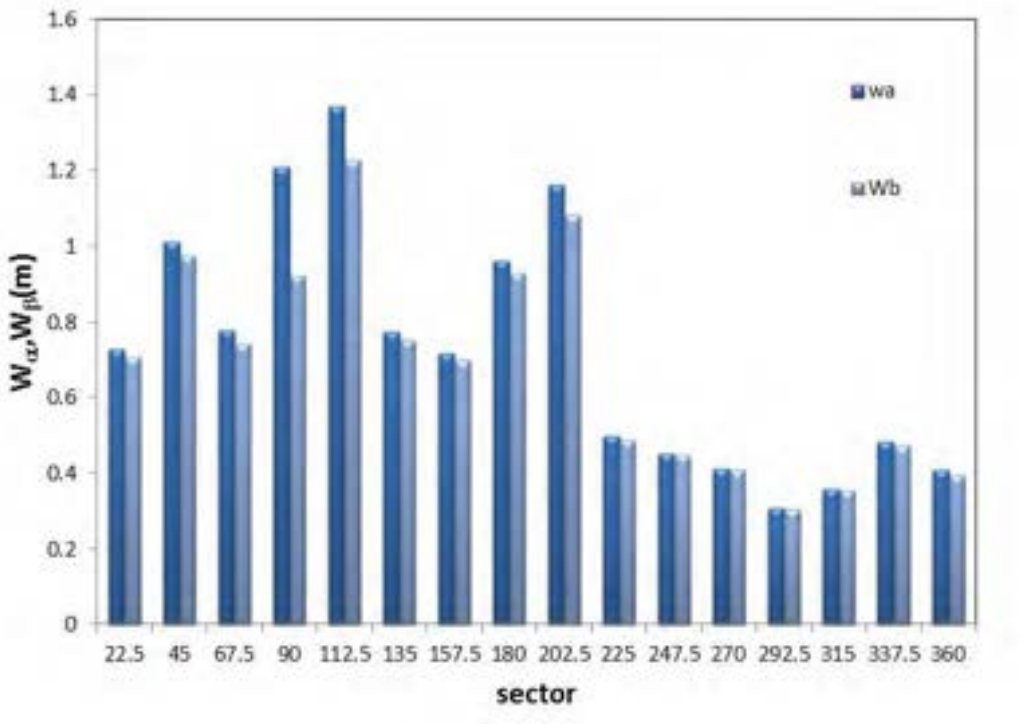

Figura 19. Parametri w_α e w_β della distribuzione direzionale dell'altezza significativa per fissati settori di ampiezza pari a 22,5°: identificazione del settore di traversia principale(punto 28).

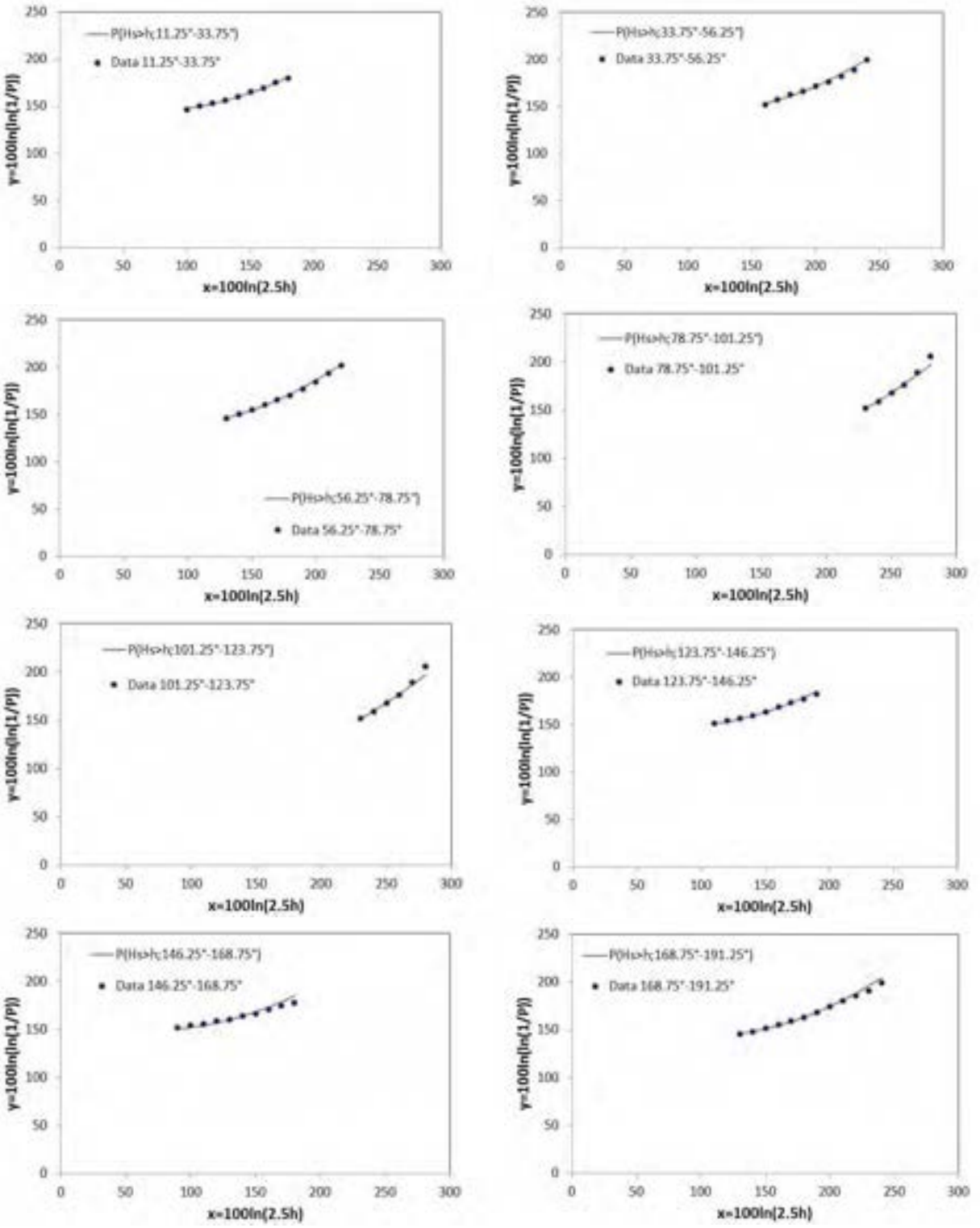

Figura 20. Distribuzione direzionale dell'altezza significativa per direzioni all'interno di fissati settori . Punto 28.

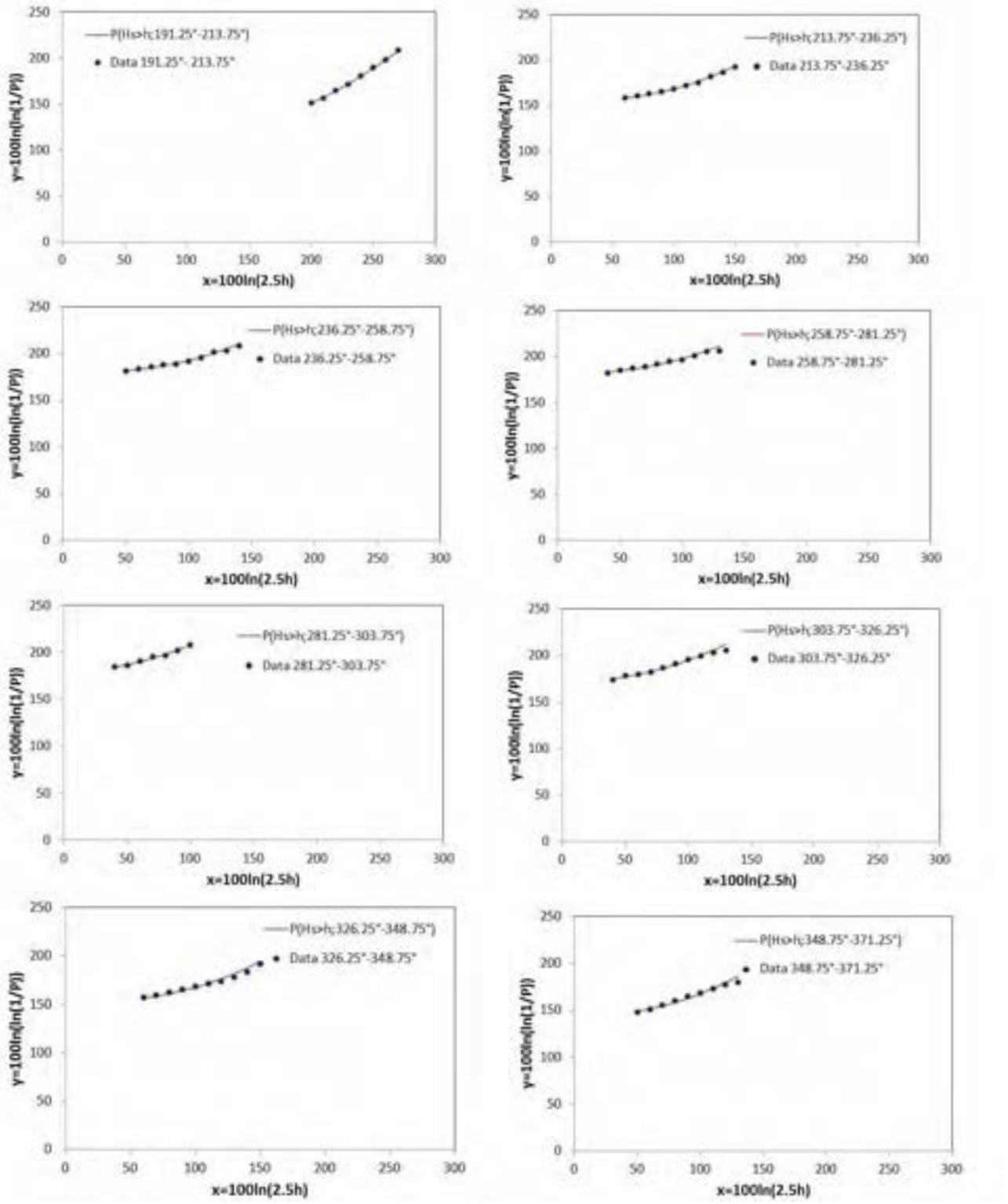

Figura 21. Distribuzione direzionale dell'altezza significativa per direzioni all'interno di fissati settori . Punto 28.

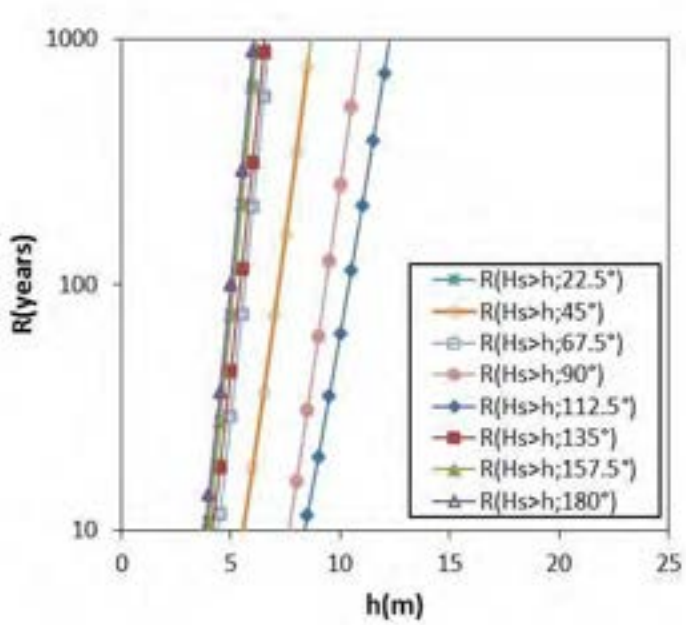

Figura 22. Periodo di ritorno direzionale $R(H_s>h;\Delta\theta)$ per fissati settori di ampiezza pari a 22.5 ° per il punto 28.

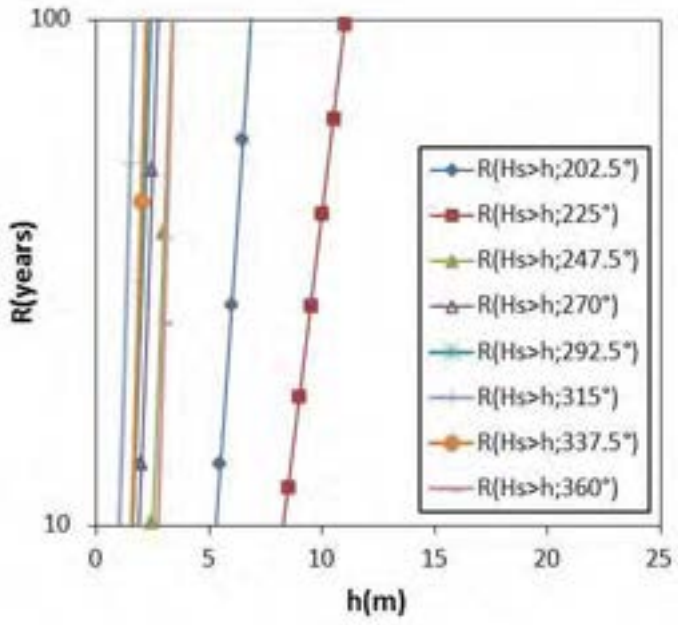

Figura 23. Periodo di ritorno direzionale $R(H_s>h;\Delta\theta)$ per fissati settori di ampiezza pari a 22.5 ° per il punto 28.

Settore centrato su	θ_{min}	θ_{max}	w_a(m)	w_b(m)
22.5°	11°	33°	0.512	0.497
45°	33°	56°	0.866	0.827
67.5°	56°	78°	1.042	0.988
90°	78°	101°	0.895	0.861
112.5°	101°	123°	1.18	1.111
135°	123°	146°	1.524	1.311
157.5°	146°	168°	1.01	0.973
180°	168°	191°	0.933	0.903
202.5°	191°	213°	0.699	0.678
225°	213°	236°	0.545	0.529
247.5°	236°	258°	0.517	0.513
270°	258°	281°	0.463	0.46
292.5°	281°	303°	0.515	0.512
315°	303°	326°	0.492	0.485
337.5°	326°	348°	0.632	0.603
360°	348°	371°	0.501	0.479

Tabella 7. Parametri w_α e w_β della distribuzione direzionale dell'altezza significativa per fissati settori di ampiezza pari a 22,5° per il punto 30 .

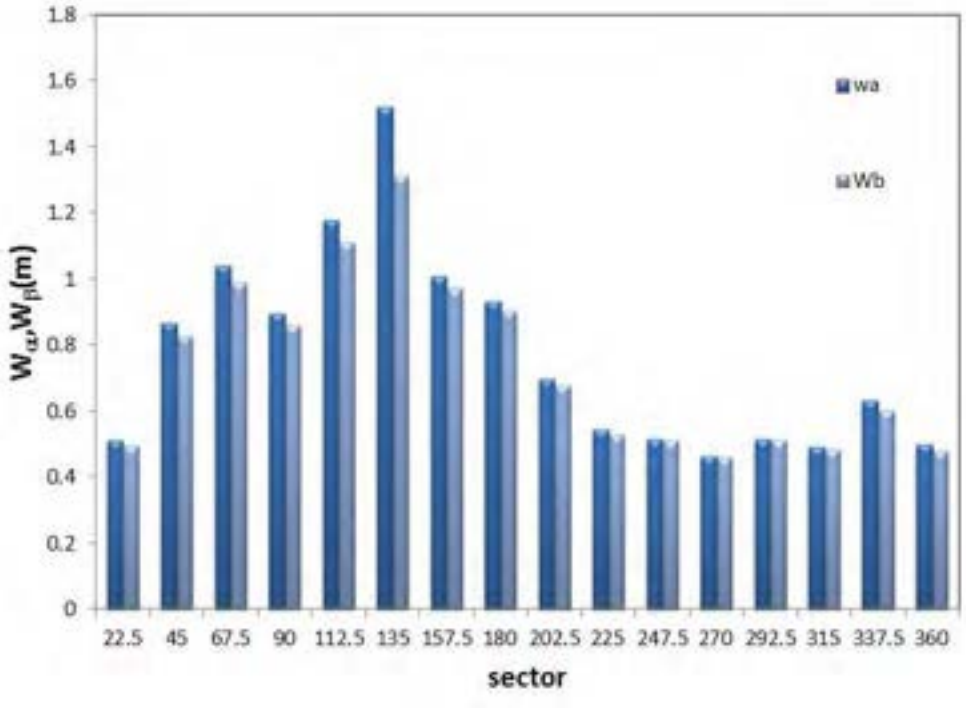

Figura 24. Parametri w_α e w_β della distribuzione direzionale dell'altezza significativa per fissati settori di ampiezza pari a 22,5°: identificazione del settore di traversia principale(punto 30).

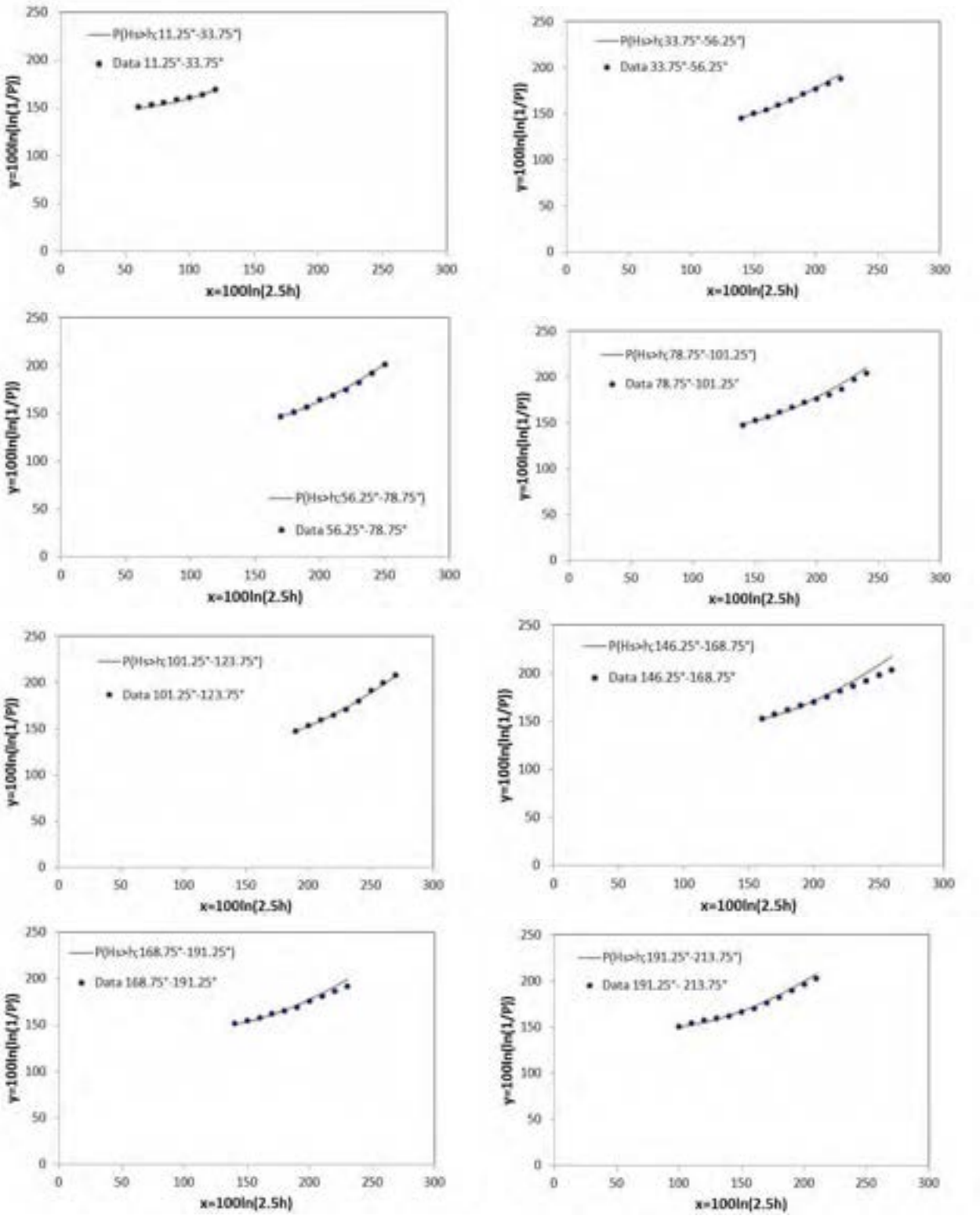

Figura 25. Distribuzione direzionale dell'altezza significativa per direzioni all'interno di fissati settori . Punto 30.

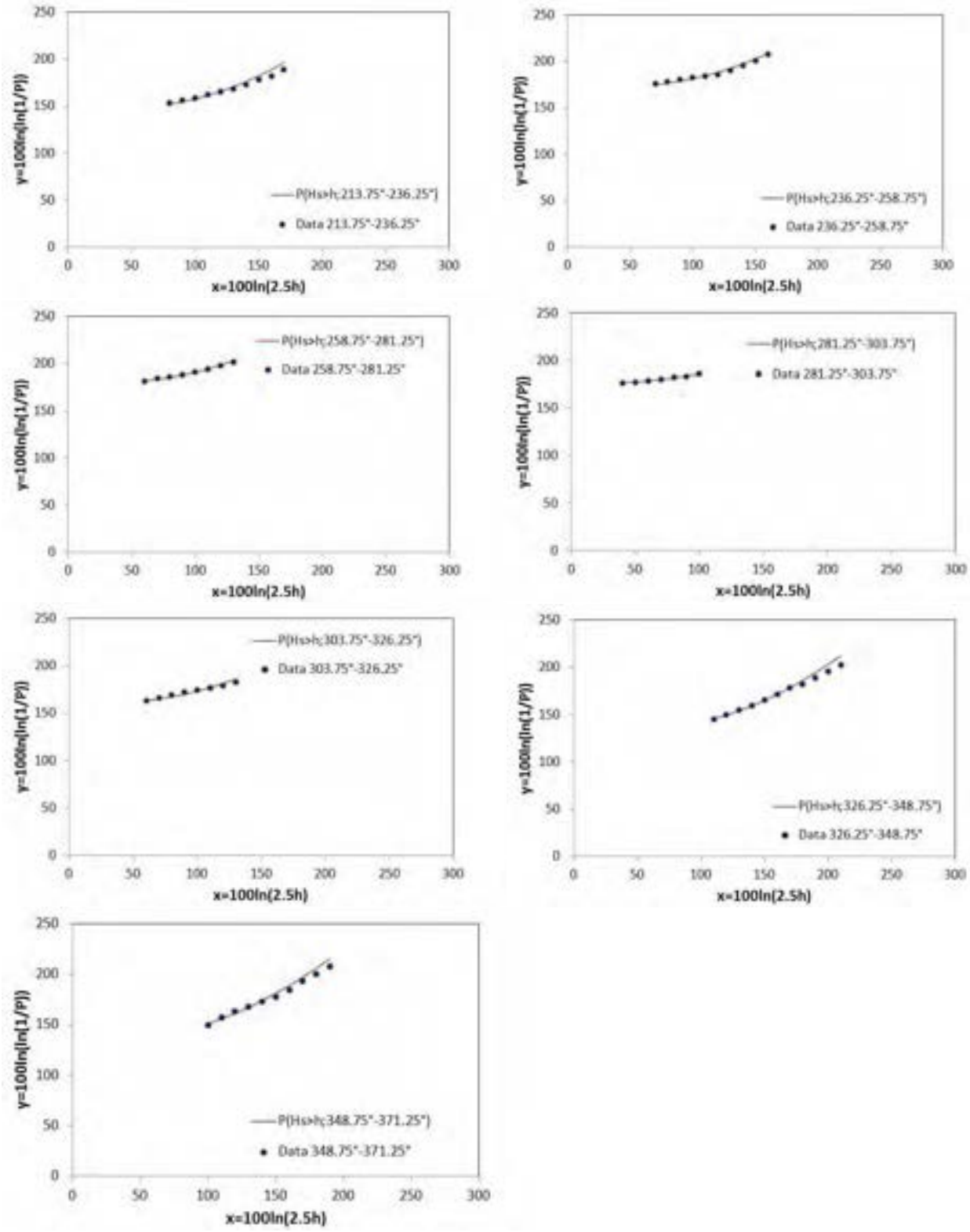

Figura 26. Distribuzione direzionale dell'altezza significativa per direzioni all'interno di fissati settori . Punto 30.

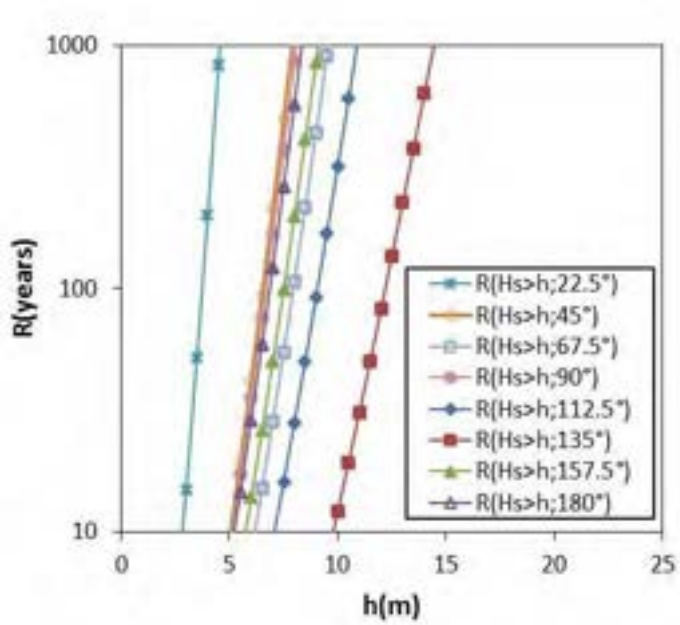

Figura 27. Periodo di ritorno direzionale $R(H_s>h;\Delta\theta)$ per fissati settori di ampiezza pari a 22.5 ° per il punto 30.

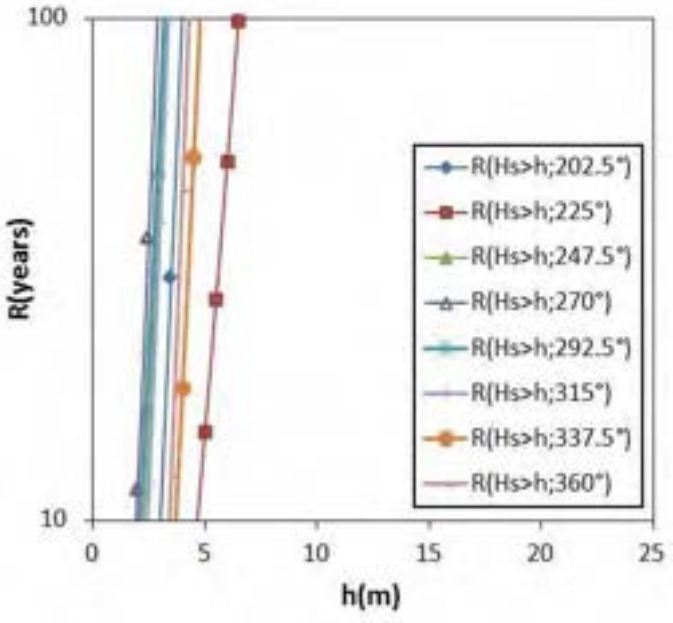

Figura 28. Periodo di ritorno direzionale $R(H_s>h;\Delta\theta)$ per fissati settori di ampiezza pari a 22.5 ° per il punto 30.

Riferimenti bibliografici

Arena, F. e Barbaro, G. (1999) Il rischio ondoso nei mari italiani, pubbl. CNR-GNDCI num. 1965, Editoriale BIOS, Cosenza, pp. 1-136

Arena F. (2004) On the prediction of extreme sea waves. Environmental Sciences and Environmental Computing, Vol. 2, P. Zanetti, Ed., EnviroComp Institute, pp. 1-50.

Arena F. and Pavone D. (2006) Return Period of nonlinear high wave crests. ***J. Geophys. Res.***, 111, C08004, doi:10.1029/2005JC003407.

Arena F. and Pavone D. (2009) A generalized approach for the long-term modelling of extreme sea waves. ***Ocean Modell.***, 26, pp. 217-225.

Arena, F., A. Carillo, V. Laface, G. Malara, A. Romolo, G. Sannino (2012). Extreme waves in the Central Mediterranean Sea for design of offshore wind farms and wave energy devices. *Proc. of the European Seminar OWEMES 2012,*Rome*,* 199-213.

Arena, F., Fiamma, V., Laface, V., Malara G., Romolo, A., Viviano, A., Sannino, G., Carillo, A. (2013) Installing U-OWC devices along Italian coasts, *Proc. of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (OMAE2013-10928), June, 9-14, Nantes, France

Arena F., Laface V., Malara G., Romolo A., Viviano A., Carillo A., Sannino G. (2013) Wave energy and extreme value analysis in coastal zone in the central Mediterranean sea, oriented to the design of energy harvesters, *Proc. of the European Wave and Tidal Energy Conference* EWTEC 2013, Aalborg, Denmark, 2-5 September

Arena F., Barbaro G. & Romolo A. (2013) Return period of a sea storm with at least two waves higher than a fixed threshold, ***Mathematical Problems in Engineering***, Vol. 2013, Article ID 416212, pp. 1-6, doi:10.1155/2013/416212

Arena F., Malara G., Romolo A. (2013) Long-term statistics of nonlinear wave crests via the equivalent power storm model, *Proc. of the 11th International Conference on Structural Safety & Reliability ICOSSAR 2013*, New York, USA, June 16-20.

Arena F., Laface V., Barbaro G., Romolo A. (2013) Effects of sampling between data of significant wave height for intensity and duration of severe sea storms, ***International Journal of Geosciences*****,** Vol. 4, Issue 1A, pp. 240-248 doi:10.4236/ijg.2013.41A021

Boccotti P. (2000) Wave Mechanics for Ocean Engineering. **Elsevier Science**, New York.

Borgman L.E. (1970) Maximum wave height probabilities for a random number of random intensity storms. Proceedings of the 12th Conference of Coastal Engineering, Washington, DC, ASCE, pp. 53-64.

Borgman L.E. (1973) Probabilities for highest wave in hurricane. ***J. Waterw., Harbors Coastal Eng. Div.***, Amer. Soc. Civ. Eng., 99, pp. 185-207.

Fedele F. and Arena F. (2010) Long-Term Statistics and Extreme Waves of Sea Storms. ***J. Phys. Oceanogr.***, 40, pp. 1106–1117.