



COMUNE DI CASTIGLIONE DELLA PESCAIA



MARINA DI PUNTA ALA S.P.A.
 LOCALITA' IL PORTO SNC
 PUNTA ALA - CASTIGLIONE DELLA PESCAIA (GR)
 42°48',48 N - 10°44',22 E

AMPLIAMENTO DEL PORTO TURISTICO DI PUNTA ALA STRALCIO FUNZIONALE OPERE CIVILI MARITTIME

B.05

PROGETTO DEFINITIVO

RILIEVI, INDAGINI E STUDI SPECIALISTICI

STUDI METEOMARINI

20 012 DR B 005 0

Committente

Marina di Punta Ala S.p.a.
 sede legale:
 Castiglione della Pescaia (GR)
 Loc. Il Porto - Punta Ala

Progettazione opere marittime:


 MODIMAR s.r.l. Via Monte Zebio 40 - 00195 ROMA
 06.3269461 - www.modimar.it


 Modimar Project S.r.l.
 Via Asmara 72 - 00199 Roma

Progettazione:

Ing. Marco TARTAGLINI
 Ing. Marco DEL BIANCO
 Ing. Andrea SANZONE

ELABORATO REDATTO DA:
A-MARE

Gruppo di lavoro:

Ing. Alessio CAMUSI
 Ing. Valerio TRULLI
 Dott.ssa Sara SCRIMIERI

 **AM3 SPIN-OFF**
 ADVANCED MODELS AND METHODS
 IN MARITIME ENGINEERING



UNIVERSITÀ
 DEGLI STUDI
 FIRENZE
DICEA
 DIPARTIMENTO
 DI INGEGNERIA CIVILE
 E AMBIENTALE

A-MARE
 ACQUE MARE AMBIENTE ENERGIA
 Laboratorio Congiunto

Consulenza geotecnica:

AGiS Ingegneria s.r.l.
 Ing. Giuseppe IORIO

05.04.2024	0	EMISSIONE	A-MARE		M.T.
Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Verificato:	Approvato:



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

A-MARE

ACQUE MARE AMBIENTE ENERGIA
Laboratorio Congiunto



AGGIORNAMENTO DELLO STUDIO METEOMARINO DEL PARAGGIO DI MARINA DI PUNTA ALA

INDICE

Presentazione di A-MARE	9
Premessa	9
1. Studio Meteomarino.....	10
1.1. SETTORI DI TRAVERSIA PER IL PARAGGIO IN ESAME	10
1.2. FETCH EFFICACI	11
1.3. LIVELLI DEL MARE.....	13
1.3.1. <i>Livello idrometrico totale - Dati annuali ERA5</i>	15
1.3.1.1. <i>Livello idrometrico totale - Dati Apr.-Set. ERA5</i>	20
1.3.2. <i>Marea astronomica</i>	21
1.3.3. <i>Livelli e Pressione – Stazione mareografica di marina di Campo</i>	24
1.3.3.1. <i>Livello idrometrico</i>	25
1.3.3.2. <i>Pressione atmosferica</i>	26
1.3.4. <i>Sea Level Rise</i>	28
1.4. VENTI.....	32
1.4.1. <i>Venti – Stazione anemometrica di Follonica</i>	34
1.5. MOTI ONDOSI.....	35
1.5.1. <i>Moti ondosi per il periodo Aprile-Settembre</i>	38
2. Analisi delle onde estreme	41
2.1. ANALISI DELLE ONDE ESTREME PER IL PERIODO APR.-SET.	48
3. Verifica delle onde estreme generabili all’interno dell’area del golfo di Follonica	51
3.1. VENTI ESTREMI PER IL SETTORE 300-360°N	53
3.2. VENTI ESTREMI PER IL SETTORE GRECALE (22.5-67.5°N).....	53
3.3. CALCOLO DELLE ONDE ESTREME CON IL METODO JONSWAP.....	54
3.3.1. <i>Settore 300-330°N</i>	54
3.3.2. <i>Settore 330-360°N</i>	55
3.3.3. <i>Settore di Grecale</i>	56
4. Analisi congiunta livelli del mare e altezze d’onda	57
4.1. ANALISI CONGIUNTA LIVELLI DEL MARE E ALTEZZE D’ONDA PER IL PERIODO APRILE-SETTEMBRE	58
5. Propagazione a costa	60
5.1. CARATTERIZZAZIONE DEI MOTI ONDOSI PROPAGATI A COSTA.....	60
5.2. SIMULAZIONI NUMERICHE	62
5.2.1. <i>Impostazione del modello</i>	63
5.2.2. <i>Risultati</i>	65
Conclusioni.....	75

Riferimenti bibliografici	76
Allegato A – Massimi annuali.....	78
Allegato B – Massimi Aprile-Settembre	80
Allegato C – Massimi Analisi POT settore 280-300°N	82
Allegato D – Massimi Analisi POT settore 300-360°N.....	84
Allegato E – Massimi Analisi POT settore 170-240°N	86

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1- Area di studio ed esposizione del paraggio (sinistra) e fetch dell'area di studio (destra). Fonte: Google Earth.....	10
Figura 3 – Localizzazione dei 4 punti griglia utilizzati.	16
Figura 4 – Massimi annuali per i 4 punti griglia analizzati.	16
Figura 5 – Distribuzione statistica dei massimi annuali nei 4 punti griglia analizzati.	17
Figura 6 - Dati orari del livello totale del mare - periodo 1979-2018 - Punta Ala...	18
Figura 7 - A sinistra retta di regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel; a destra previsione dei valori estremi del livello totale del mare – dati annuali.	19
Figura 8 - A sinistra retta di regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel; a destra previsione dei valori estremi del livello totale del mare – dati Aprile-Settembre.	21
Figura 9 – Individuazione delle frequenze di marea astronomica.....	22
Figura 10 - Componenti di marea astronomica.	23
Figura 11 - Livello totale del mare, componenti di marea astronomica e sovrizzo di tempesta.	23
Figura 12 - Stazione mareografica di Marina di Campo (isola d'Elba) – Fonte: www.mareografico.it	25
Figura 13 – Livello idrometrico - periodo 2011-2023 – stazione di Marina di Campo.	25
Figura 14 – Pressione atmosferica - periodo 2011-2023 – stazione di Marina di Campo. In rosso il valore medio del periodo analizzato.	27
Figura 15 – Esempio di utilizzo del <i>Sea Level Projection Tool</i> - Tasso totale di crescita del livello del mare previsto per il 2050 secondo lo scenario SSP1-1.9 nell'area di interesse. Fonte: Sea Level Projection Tool - https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool	30
Figura 16 – Innalzamento del livello del mare previsto per i differenti scenari SSP. Gli intervalli ombreggiati mostrano gli intervalli del 17° e 83° percentile. Le proiezioni si riferiscono al periodo di riferimento 1995-2014 – Lat: 42°, Lon: 10°. Fonte: Sea Level Projection Tool - https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool	31
Figura 17 – Tempi previsti per l’innalzamento del livello del mare di 0.5m rispetto al periodo di riferimento 1995-2014. Le barre spesse mostrano gli intervalli dal 17° all’83° percentile, i cerchi neri mostrano il valore mediano – Lat: 42°, Lon: 10°. Fonte: Sea Level Projection Tool - https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool	31
Figura 18 – Localizzazione punti di estrazione dati di vento, onde e livelli idrometrici.....	32

Figura 19 – Rosa dei venti al largo del Marina di Punta Ala. Settori angolari di apertura paria a 20°.....	33
Figura 20 – Rosa dei venti per la stazione anemometrica di Follonica. Settori angolari di apertura pari a 20°.....	34
Figura 21 – Rosa delle onde al largo del Marina di Punta Ala. Settori angolari di apertura paria a 20°.....	36
Figura 22 – Rosa delle onde al largo del Marina di Punta Ala. Settori angolari di apertura paria a 20° - Periodo Aprile-Settembre.....	38
Figura 23 – Esempio di individuazione dei picchi di altezza d’onda oltre la soglia di 2.5 m.....	41
Figura 24 - Regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel a destra; previsione dei valori estremi di altezza d’onda di Gumbel a sinistra – settore 170-240°N.....	43
Figura 25 - Regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel a destra; previsione dei valori estremi di altezza d’onda di Gumbel a sinistra – settore 280-300°N.....	43
Figura 26 - Regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel a destra; previsione dei valori estremi di altezza d’onda di Gumbel a sinistra – settore 300-360°N.....	44
Figura 27 - Altezze d’onda significative al largo del Marina di Punta Ala in funzione dell’orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel settore 170-240°N; forma grafica a sinistra, forma tabellare a destra.....	45
Figura 28 - Altezze d’onda significative al largo del Marina di Punta Ala in funzione dell’orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel settore 280-300°N; forma grafica a sinistra, forma tabellare a destra.....	46
Figura 29 - Altezze d’onda significative al largo del Marina di Punta Ala in funzione dell’orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel settore 280-300°N; forma grafica a sinistra, forma tabellare a destra.....	46
Figura 30 – Correlazione altezze d’onda H_{m0} e periodo di picco T_p settore 170-240°N.....	47
Figura 31 – Correlazione altezze d’onda H_{m0} e periodo di picco T_p settore 280-300°N.....	47
Figura 32 – Correlazione altezze d’onda H_{m0} e periodo di picco T_p settore 300-360°N.....	48
Figura 33 – A sinistra regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel; a destra previsione dei valori estremi di altezza d’onda di Gumbel – periodo Aprile-Settembre.....	49
Figura 34 – Altezze d’onda significative al largo del Marina di Punta Ala in funzione dell’orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel. Settore 280-300°N – periodo Aprile-Settembre.....	49

Figura 35 – Correlazione altezze d’onda H_{m0} e periodo di picco T_p Settore 280-300°N – periodo Aprile-Settembre	50
Figura 36 - Previsione dei valori estremi di velocità del vento di Gumbel. Settore 300-360°N.	53
Figura 37 – A sinistra previsione dei valori estremi di velocità del vento di Gumbel per il dataset ERA5; a destra previsione dei valori estremi di velocità del vento di Gumbel per il dataset stazione anemometrica SIR-Follonica.....	54
Figura 38 - Contour plot delle percentuali di accadimento delle combinazioni di altezze d'onda e livelli del mare	58
Figura 39 - Contour plot delle percentuali di accadimento delle combinazioni di altezze d'onda e livelli del mare – Periodo Aprile-Settembre	59
Figura 40 – Griglie del dominio di calcolo.....	63
Figura 41 - Localizzazione dei punti di estrazione dati del modello di propagazione a costa.....	64
Figura 42 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=50$ anni - dir 290°N.	67
Figura 43 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=50$ anni + SLR - dir 290°N.	67
Figura 44 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=100$ anni - dir 290°N.....	68
Figura 45 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=100$ anni + SLR - dir 290°N.	68
Figura 46 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=50$ anni - dir 330°N.	70
Figura 47 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=50$ anni + SLR - dir 330°N.	70
Figura 48 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=100$ anni - dir 330°N.....	71
Figura 49 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=100$ anni + SLR - dir 330°N.	71
Figura 50 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=50$ anni - dir 360°N.	73
Figura 51 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=50$ anni + SLR - dir 360°N.	73
Figura 52 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=100$ anni - dir 360°N.....	74
Figura 53 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d’onda. $Tr=100$ anni + SLR - dir 360°N.	74

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Fetch geografici relativi al paraggio in esame.	11
Figura 2- Fetch efficaci dell'area di studio (rielaborazione di una immagine da fonte Google Earth).	12
Tabella 2 - Fetch efficaci per il paraggio in esame.	13
Tabella 3 – MASSIMI ANNUALI per i punti griglia utilizzati – misure in [m].	17
Tabella 4 - Massimi e minimi annuali - periodo 1979-2018 – Punta Ala.	18
Tabella 5 – Valori estremi di Gumbel del livello totale del mare – dati annuali.	19
Tabella 6 - Massimi e minimi Apr.-Set. - periodo 1979-2018 – Punta Ala.	20
Tabella 7 – Valori estremi di Gumbel del livello totale del mare – dati Aprile-Settembre.	21
Tabella 8 - Componenti di marea astronomica.	21
Tabella 9 – Massimi e minimi della marea astronomica per il periodo 1979-2018.	24
Tabella 10 – Massimi e minimi annuali – Idrometro di Marina di Campo	26
Tabella 11 - Confronto massimi e minimi annuali livello idrometrico tra il punto di estrazione dati ERA5 e l'idrometro della stazione mareografica di Marina di Campo.	26
Tabella 12 - Minimo e massimo barico annuale - Stazione di Marina di Campo - periodo 2011-2023.	27
Tabella 13 – Livello del mare e tasso di crescita al 2050 rispetto al periodo di riferimento 1995-2014 per l'area Lat 42° Lon 10°.	32
Tabella 14 - Distribuzione direzionale annuale dei venti al largo del Marina di Punta Ala per il periodo 1979-2023.	33
Tabella 15 - Distribuzione direzionale annuale dei venti per la stazione anemometrica di Follonica per il periodo 2015-2023.	35
Tabella 16 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} -Dir. Frequenze in percentuale, relative a classi di direzione e altezze d'onda	36
Tabella 17 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} - T_p . Frequenze in percentuale relative a classi di periodo e altezza d'onda	37
Tabella 18 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: T_p -Dir. Frequenze in percentuale relative a classi di direzione e periodo d'onda	37
Tabella 19 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} -Dir. Frequenze in percentuale, relative a classi di direzione e altezze d'onda – Periodo Aprile-Settembre	38
Tabella 20 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} - T_p . Frequenze in percentuale relative a classi di periodo e altezza d'onda – Periodo Aprile-Settembre	39
Tabella 21 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: T_p -Dir. Frequenze in percentuale relative a classi di direzione e periodo d'onda – Periodo Aprile-Settembre	39

Tabella 22 – Coefficienti della funzione di Gumbel per i 3 settori analizzati.	44
Tabella 23 - Altezza d’onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100anni) al largo del Marina di Punta Ala per i settori 1470-240°N, 280-300°N e 300-360°N. Distribuzione di Gumbel.....	45
Tabella 24 - Coefficienti della funzione di Gumbel - settore 280-300°N – periodo Aprile-Settembre.	49
Tabella 25 - Altezza d’onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) al largo del Marina di Punta Ala per i settori 280-300°N e 300-360°N. Distribuzione di Gumbel Periodo Aprile-Settembre	49
Tabella 26 – Valori di velocità del vento associata a diversi tempi di ritorno (1-100anni) per il settore 300-360°N. Distribuzione di Gumbel.	53
Tabella 27 – Velocità del vento associata a diversi tempi di ritorno (1-100anni) per il settore di Grecale per i dataset ERA5 e SIR-Follonica. Distribuzione di Gumbel..	54
Tabella 28 - Altezza d'onda significativa H_{m0} e periodo di picco T_p associati a differenti periodi di ritorno (1-100 anni) per il settore 300-330°N. Elaborazioni metodo Jonswap.	55
Tabella 29 - Altezza d'onda significativa H_{m0} e periodo di picco T_p associati a differenti periodi di ritorno (1-100 anni) per il settore 330-360°N. Elaborazioni metodo Jonswap.	55
Tabella 30 - Altezza d'onda significativa H_{m0} e periodo di picco T_p associati a differenti periodi di ritorno (1-100 anni) per il settore di Grecale. Elaborazioni metodo Jonswap.	56
Tabella 31 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} -T _{wl} . Frequenze in percentuale relative a classi di altezze d’onda significative e livelli totali del mare	57
Tabella 32 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} -T _{wl} . Frequenze in percentuale relative a classi di altezze d’onda significative e livelli totali del mare Periodo Aprile-Settembre	59
Tabella 33 – Parametri caratteristici delle onde propagate a costa	61
Tabella 34 - Altezza d’onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) al largo del Marina di Punta Ala per il settore 170-240°N. Distribuzione di Gumbel. - Studio Gennaio 2015.	62
Tabella 35 - Altezza d’onda significativa e direzione a largo e propagate a costa su fondali di -20m per il settore 170-240°N. - Studio Gennaio 2015.....	62
Tabella 36 – Coordinate UTM32-ED50 dei punti di estrazione dati a costa	64
Tabella 37 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 290°N – Tr 2, 10 e 20 anni....	66
Tabella 38 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 290°N – Tr 50 e 100 anni.....	66
Tabella 39 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 330°N – Tr 2, 10 e 20 anni....	69
Tabella 40 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 330°N – Tr 50 e 100 anni.....	69

Tabella 41 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 360°N – Tr 2, 10 e 20 anni. .. 72

Tabella 42 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 360°N – Tr 50 e 100 anni. 72

PRESENTAZIONE DI A-MARE

Fondato nel 2018, il laboratorio congiunto A-MARE porta avanti attività di ricerca inerenti alle tecnologie innovative a supporto della *Blue Growth*, nei campi specifici della dinamica, protezione e gestione dei litorali, dei dispositivi marittimi per il monitoraggio e lo sfruttamento delle energie rinnovabili dal mare, delle opere marittime innovative per la portualità e delle infrastrutture marittime.

Le attività di ricerca del Laboratorio A-MARE sono basate sia su modellistica sperimentale, svolta nei canali marittimi per onde e correnti del LABIMA (DICEA) dell'Università di Firenze, sia su modellistica numerica del moto ondoso e della sua interazione con strutture e dispositivi marittimi.

PREMESSA

Il laboratorio congiunto A-MARE tra l'Università Degli Studi di Firenze e la società AM3 Spin-off s.r.l. (di seguito *A-MARE*) è stato incaricato dal Marina di Punta Ala Spa (di seguito *Committente*) con mail del 29/06/2023 di eseguire un aggiornamento dello studio meteomarinario e di propagazione dei moti ondosi da largo a costa effettuato nel 2019-2020.

In particolare, è stato richiesto di aggiornare:

- analisi del moto ondoso (frequenza di accadimento, correlazione altezza-periodo) basata sui dati in ricostruzione ERA5 relativi al periodo 1979-2022 per un punto prossimo al sito in esame;
- analisi statistica delle onde estreme: i) definizione delle onde di progetto con tempo di ritorno 2, 10, 20, 50 e 100 anni, ii) analisi degli estremi ristretta al periodo aprile-settembre;
- analisi dei livelli del mare registrati dal mareografo di Marina di Campo: i) livelli di marea astronomica (livelli massimi, minimi, maree sizigiali etc...) ii) analisi del residuo, iii) analisi statistica dei valori estremi del livello totale per tempi di ritorno 2, 10, 20, 50 e 100 anni;
- analisi congiunta dei valori estremi di altezza d'onda e livello (anche ristretta al periodo aprile-settembre);
- propagazione sottocosta con modello numerico degli stati di mare di progetto per la valutazione delle condizioni di moto ondoso al piede delle opere foranee.

1. STUDIO METEOMARINO

1.1. SETTORI DI TRAVERSA PER IL PARAGGIO IN ESAME

Il Marina di Punta Ala è situato nell'estremo sud del Golfo di Follonica, nel comune di Castiglione della Pescaia ed è esposto al settore di traversia principale compreso fra le direzioni di 170°N e 240°N, al settore di traversia secondario compreso fra i 280°N e 300°N, e un terzo settore compreso fra i 240°N e i 280°N (Figura 1).

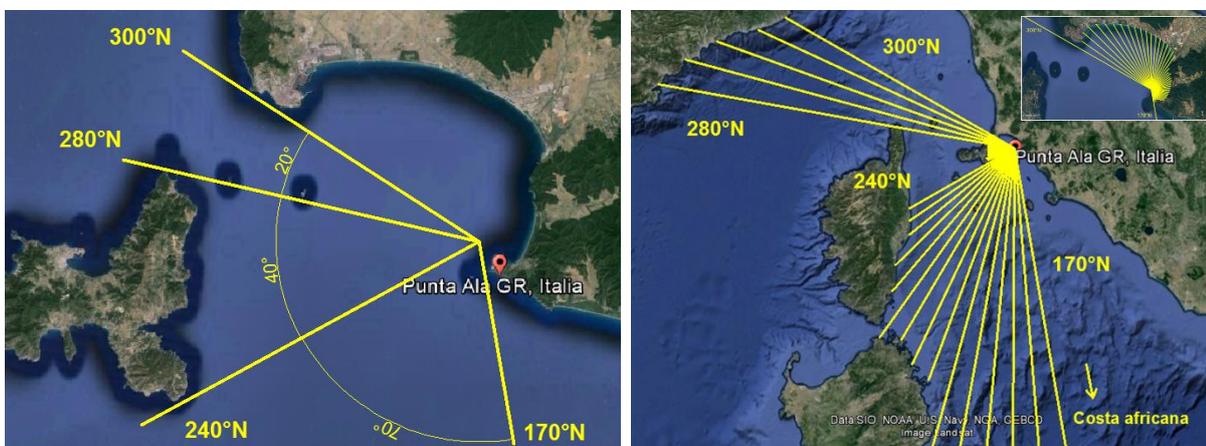


Figura 1- Area di studio ed esposizione del paraggio (sinistra) e fetch dell'area di studio (destra).
 Fonte: Google Earth.

Il settore di traversia principale è compreso fra Punta Hidalgo (170°N) e il promontorio sud-est dell'Isola l'Elba (240°N), con i fetch maggiori che raggiungono le coste di Corsica, Sardegna, Libia e Tunisia con lunghezze comprese fra i 120 km e 1120 km (Tabella 1). I fetch geografici sono stati limitati a 600 km, limite superiore delle perturbazioni atmosferiche responsabili del processo di generazione del moto ondoso che si è soliti considerare per il Mediterraneo. Il settore di traversia secondario è compreso fra il promontorio nord-est dell'Isola d'Elba (280°N) e il promontorio di Piombino (300°N), con fetch che raggiungono la costa francese e ligure con lunghezze superiori ai 250 km (Figura 1). Il terzo settore di traversia è compreso fra il promontorio sud-est dell'Isola d'Elba (240°N) e il promontorio nord-est dell'Isola d'Elba (280°N), caratterizzato da fetch limitati di lunghezza massima pari a 30 km.

Tabella 1 - Fetch geografici relativi al paraggio in esame.

FETCH GEOGRAFICI					
Direzione [°N]	Lunghezza [km]	Lunghezza limitata [km]	Direzione [°N]	Lunghezza [km]	Lunghezza limitata [km]
0	12	12	180	635	600
5	11	11	185	620	600
10	11	11	190	625	600
15	11	11	195	330	330
20	10	10	200	250	250
25	10	10	205	240	240
30	9	9	210	225	225
35	9	9	215	235	235
40	6	6	220	190	190
45	5	5	225	165	165
50	5	5	230	135	135
55	5	5	235	130	130
60	5	5	240	120	120
65	5	5	245	30	30
70	5	5	250	30	30
75	4	4	255	25	25
80	4	4	260	25	25
85	4	4	265	25	25
90	4	4	270	25	25
95	4	4	275	25	25
100	4	4	280	360	360
105	4	4	285	340	340
110	4	4	290	315	315
115	4	4	295	280	280
120	4	4	300	260	260
125	4	4	305	18	18
130	3	3	310	19	19
135	3	3	315	19	19
140	3	3	320	18	18
145	3	3	325	17	17
150	2	2	330	16	16
155	2	2	335	15	15
160	2	2	340	15	15
165	3	3	345	14	14
170	1120	600	350	13	13
175	1085	600	355	13	13

1.2. FETCH EFFICACI

Il fetch efficace rende conto delle variazioni dei fetch geografici in direzioni adiacenti, nonché della variabilità nella direzione del vento, al fine di fornire una migliore rappresentazione dell'area complessiva di generazione delle onde. Per la determinazione dei fetch efficaci è stata utilizzata la procedura proposta da Saville (*Shore Protection Manual*, 1984). Il metodo di Saville si basa sulle seguenti ipotesi:

(i) il vento trasferisce energia alla superficie del mare nella propria direzione di provenienza e in tutte quelle appartenenti ad un settore con ampiezza di circa $\pm 45^\circ$ rispetto a tale direzione di provenienza;

(ii) l'energia trasmessa dal vento lungo le varie direzioni è proporzionale al coseno dell'angolo formato da ogni direzione rispetto a quella di provenienza del vento, elevato ad una data potenza n ;

(iii) le onde sono completamente assorbite nell'impatto con le linee di costa.

Il fetch efficace per un'assegnata direzione i , $F_{eff,i}$, è dato da una media pesata dei fetch geografici (equidistanziati di 5° in un intorno di 45° a destra ed a sinistra della direzione in esame) ai quali si attribuisce un peso pari al $\cos^n(\Theta)$ (Eq. 1).

$$F_{eff,i} = \frac{\sum F_\Theta \cdot \cos^n(\Theta)}{\sum \cos^{n-1}(\Theta)} \quad (1)$$

dove F_Θ è la lunghezza del fetch geografico corrispondente alla direzione Θ per la quale si calcola il fetch efficace. Nel calcolo dei fetch efficaci, qualora i fetch geografici siano maggiori di 600 km, questi sono stati limitati a tale valore massimo, inteso come il limite superiore della dimensione delle perturbazioni atmosferiche responsabili del processo di generazione del moto ondoso nel Mediterraneo.

I fetch efficaci così calcolati sono riportati in Figura 2 e Tabella 2.

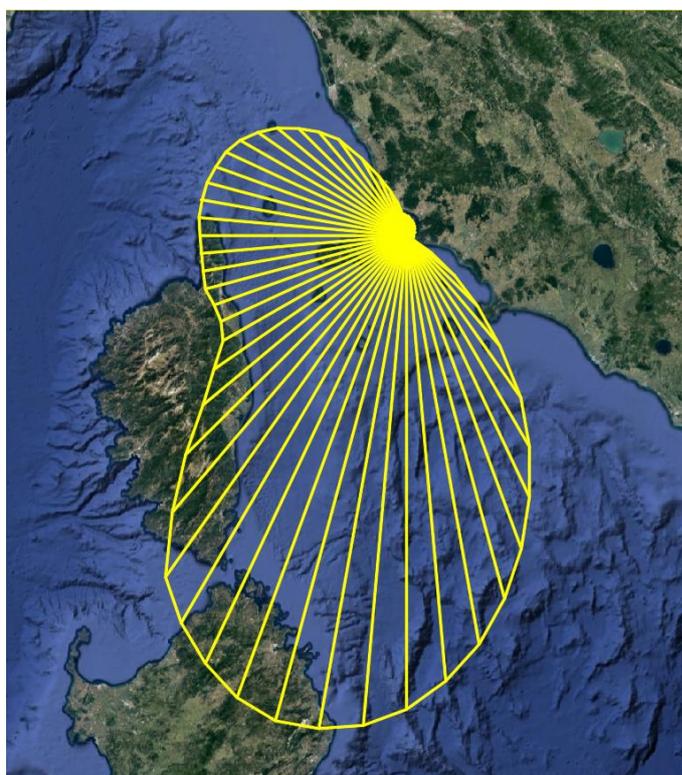


Figura 2- Fetch efficaci dell'area di studio (rielaborazione di una immagine da fonte Google Earth).

Tabella 2 - Fetch efficaci per il paraggio in esame.

FETCH EFFICACI			
<i>Direzione</i> [°N]	<i>Lunghezza</i> [km]	<i>Direzione</i> [°N]	<i>Lunghezza</i> [km]
0	11	180	266
5	11	185	276
10	10	190	281
15	9	195	282
20	9	200	276
25	8	205	265
30	8	210	251
35	7	215	234
40	7	220	203
45	6	225	174
50	6	230	148
55	5	235	131
60	5	240	118
65	5	245	114
70	5	250	114
75	4	255	116
80	4	260	115
85	4	265	115
90	4	270	115
95	4	275	116
100	4	280	116
105	4	285	115
110	3	290	113
115	3	295	111
120	3	300	107
125	17	305	101
130	35	310	94
135	56	315	85
140	81	320	76
145	111	325	66
150	137	330	50
155	162	335	37
160	187	340	27
165	211	345	19
170	233	350	12
175	251	355	12

1.3. LIVELLI DEL MARE

Parametri di importanza primaria per la caratterizzazione del clima meteomarinario relativo ad un determinato paraggio, in quanto fondamentali nella determinazione dell'effettiva azione sollecitante indotta dal moto ondoso sulle strutture a costa, sono i moti ondosi e il livello del mare in prossimità del paraggio in esame. Ai fini del presente studio, le principali cause di variazione del livello del mare possono essere ricondotte alle seguenti: variazioni della pressione

atmosferica, effetto dei venti foranei, sopralzo dovuto a moti ondosi frangenti (il cosiddetto "set-up") ed escursioni mareali.

Per il presente studio è stato utilizzato il database di COPERNICUS denominato ERA5. ERA5 è un modello di rianalisi dei dati climatici degli ultimi 8 decenni di quinta generazione sviluppato da ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). I dati sono disponibili dal 1940 in poi.

La rianalisi combina i dati del modello con le osservazioni provenienti da tutto il mondo in un set di dati completo e coerente a livello globale utilizzando le leggi della fisica. Questo principio, chiamato *data assimilation*, si basa sul metodo di analisi utilizzato dai centri di previsione meteorologica numerica, dove ogni x ore (12 ore all'ECMWF) una previsione precedente viene combinata con nuove osservazioni disponibili per produrre una nuova migliore.

ERA5 fornisce stime orarie per un gran numero di grandezze atmosferiche, delle onde oceaniche e della superficie terrestre. Il database ERA5 viene aggiornato quotidianamente con una latenza di circa 5 giorni. I dati sono disponibili su una griglia lat-lon regolare di 0,25 gradi.

È stato utilizzato un sottomodello specifico di ERA5 chiamato *Global sea level change time series from 1950 to 2050 derived from reanalysis and high resolution CMIP6 climate projections*.

Questo database fornisce serie temporali di variabili relative al livello globale del mare, tra cui maree, mareggiate e innalzamento del livello del mare dal 1950 al 2050 sulla base di modelli idrodinamici.

Le serie temporali sono calcolate utilizzando il *Deltares Global Tide and Surge Model (GTSM)* versione 3.0, un modello idrodinamico che simula dinamicamente i livelli dell'acqua a intervalli di 10 minuti e in grado di utilizzare la forzatura di input dalla rianalisi e dai modelli climatici.

Le simulazioni per il periodo storico possono essere selezionate dalla rianalisi ERA5 o dalle simulazioni storiche dei GCM (*Global Climate Models*). Le simulazioni del periodo futuro provengono dai GCM e si basano su proiezioni climatiche globali utilizzando lo scenario ad alte emissioni SSP5-8.5 (*Shared Socioeconomic Pathways*). Un'eccezione a questo è la variabile di elevazione della marea che non si basa su scenari climatici futuri, poiché le forze generatrici di marea considerate in GTSM non sono correlate ad alcuna condizione climatologica o meteorologica.

I dati sono grigliati con passo della griglia variabile; nello specifico, la risoluzione orizzontale dei punti griglia varia come segue:

- 0.1° per i punti della griglia costiera;
- 0.25°, 0.5° e 1° per i punti della griglia oceanica rispettivamente entro 100km dalla costa, entro 550km dalla costa e oltre 500km dalla costa.

La copertura temporale va dal 1979 al 2018 per la rianalisi di ERA5 (dataset utilizzato), dal 1950 al 2014 per le proiezioni climatiche storiche e dal 2015 al 2050 per le proiezioni climatiche future.

Le variabili presenti in questo database sono:

- Mean sea level [m] - Il livello medio annuo del mare relativo al periodo di riferimento 1986-2005. I contributi all'innalzamento del livello del mare includono l'espansione termica dell'oceano, i cambiamenti nella circolazione oceanica, i contributi della calotta glaciale e l'aggiustamento glacio-isostatico (ma non la subsidenza o la tettonica).
- Storm surge residual [m] - Il residuo di tempesta è calcolato come la differenza tra il livello totale dell'acqua e le simulazioni di elevazione della marea. L'effetto delle variazioni del livello medio annuo del mare è incluso nella simulazione sia nel periodo storico che in quello futuro.
- Tidal elevation [m] - L'elevazione della marea è derivata dalla simulazione GTSM forzata con la sola marea celeste che genera forze e nessuna forzatura meteorologica (cioè, vento e pressione al livello medio del mare). Ciò si traduce nella marea pura senza effetti di tempesta. L'effetto delle variazioni del livello medio annuo del mare è incluso nella simulazione sia nel periodo storico che in quello futuro. Il livello di riferimento verticale è il livello medio del mare (MSL) nel periodo di riferimento 1986-2005.
- Total water level [m] - Il livello totale dell'acqua è costituito dalla marea pura, dalle mareggiate e dai cambiamenti del livello medio annuo del mare. Il livello di riferimento verticale è il livello medio del mare (MSL) nel periodo di riferimento 1986-2005.

1.3.1. Livello idrometrico totale - Dati annuali ERA5

In fase preliminare sono stati analizzate le serie temporali del parametro *Total water level* in 4 punti griglia dell'area di studio. Le serie temporali orarie non differiscono molto tra loro se non per un lag temporale dovuto alla diversa posizione spaziale. L'analisi dei massimi annuali per i diversi punti griglia mostra differenze massime pari a 4cm (differenza tra il valore massimo ed il valore minimo dei massimi registrati nei 4 punti griglia).

In Figura 3 si riporta la localizzazione dei 4 punti griglia utilizzati in fase preliminare, mentre in Figura 4 e Tabella 3 si riportano i massimi annuali relativi ad ogni punto griglia. In Figura 5 è riportata la distribuzione statistica dei massimi annuali nei diversi punti griglia.

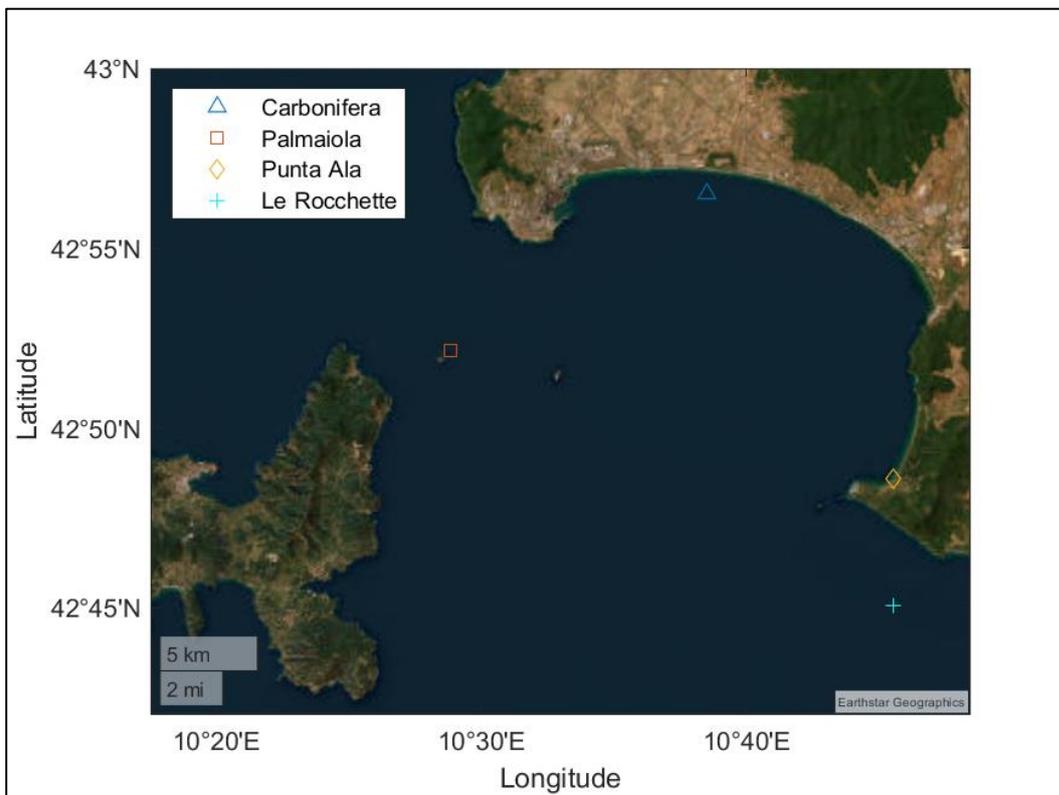


Figura 3 – Localizzazione dei 4 punti griglia utilizzati.

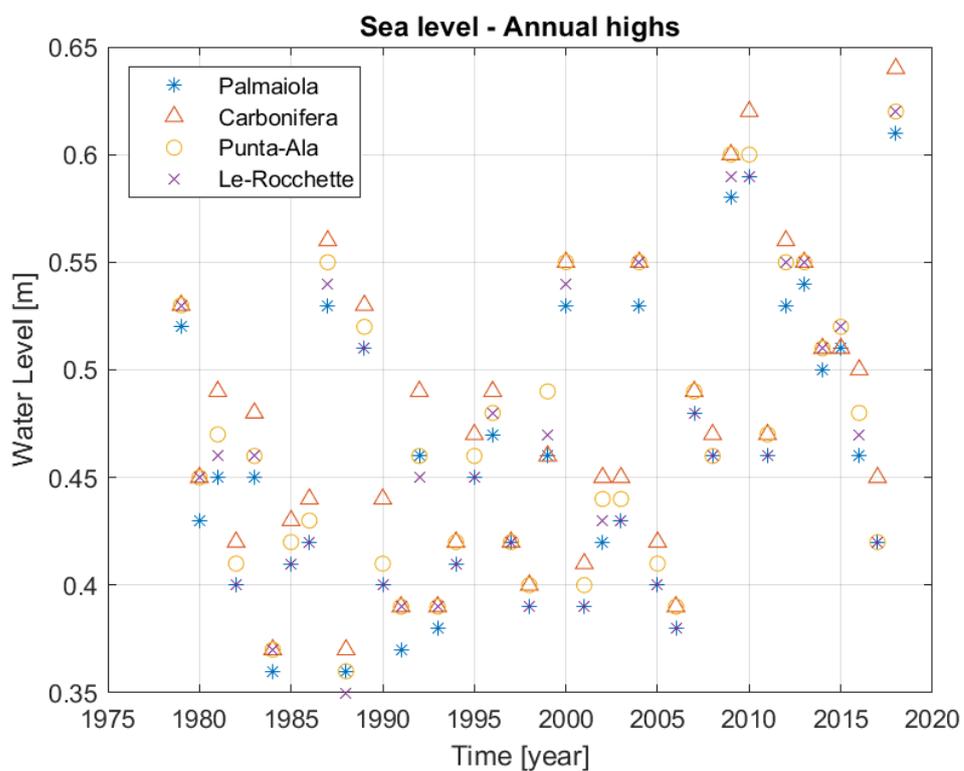


Figura 4 – Massimi annuali per i 4 punti griglia analizzati.

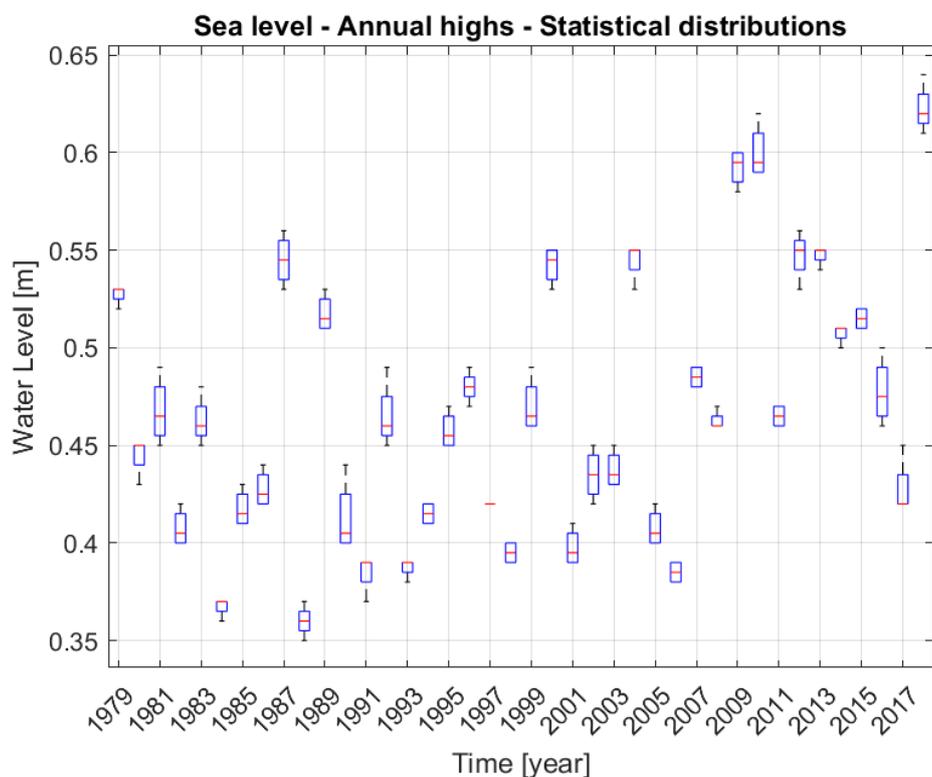


Figura 5 – Distribuzione statistica dei massimi annuali nei 4 punti griglia analizzati.

Tabella 3 – MASSIMI ANNUALI per i punti griglia utilizzati – misure in [m].

ANNO	<i>Carbonifera</i>	<i>Palmioli</i>	<i>Punta Ala</i>	<i>Le Rocchette</i>
1979	0.53	0.52	0.53	0.53
1980	0.45	0.43	0.45	0.45
1981	0.49	0.45	0.47	0.46
1982	0.42	0.40	0.41	0.40
1983	0.48	0.45	0.46	0.46
1984	0.37	0.36	0.37	0.37
1985	0.43	0.41	0.42	0.41
1986	0.44	0.42	0.43	0.42
1987	0.56	0.53	0.55	0.54
1988	0.37	0.36	0.36	0.35
1989	0.53	0.51	0.52	0.51
1990	0.44	0.40	0.41	0.40
1991	0.39	0.37	0.39	0.39
1992	0.49	0.46	0.46	0.45
1993	0.39	0.38	0.39	0.39
1994	0.42	0.41	0.42	0.41
1995	0.47	0.45	0.46	0.45
1996	0.49	0.47	0.48	0.48
1997	0.42	0.42	0.42	0.42
1998	0.40	0.39	0.40	0.39
1999	0.46	0.46	0.49	0.47
2000	0.55	0.53	0.55	0.54
2001	0.41	0.39	0.40	0.39
2002	0.45	0.42	0.44	0.43
2003	0.45	0.43	0.44	0.43

2004	0.55	0.53	0.55	0.55
2005	0.42	0.40	0.41	0.40
2006	0.39	0.38	0.39	0.38
2007	0.49	0.48	0.49	0.48
2008	0.47	0.46	0.46	0.46
2009	0.60	0.58	0.60	0.59
2010	0.62	0.59	0.60	0.59
2011	0.47	0.46	0.47	0.46
2012	0.56	0.53	0.55	0.55
2013	0.55	0.54	0.55	0.55
2014	0.51	0.50	0.51	0.51
2015	0.51	0.51	0.52	0.52
2016	0.50	0.46	0.48	0.47
2017	0.45	0.42	0.42	0.42
2018	0.64	0.61	0.62	0.62

Valutata l'invarianza dei livelli totali del mare nell'area di studio per le successive elaborazioni si è fatto riferimento al punto griglia a costa più vicino alla Marina di Punta Ala, di coordinate 42.81°N e 10.759°E.

In Figura 6 si riporta la serie temporale oraria di 350'640 dati del livello totale del mare acquisita e in Tabella 4 si riportano i valori annuali massimi e minimi. Il livello del mare massimo è stato pari a +0.62m nel 2018, mentre il livello del mare minimo è risultato pari a -0.55m nel 1980.

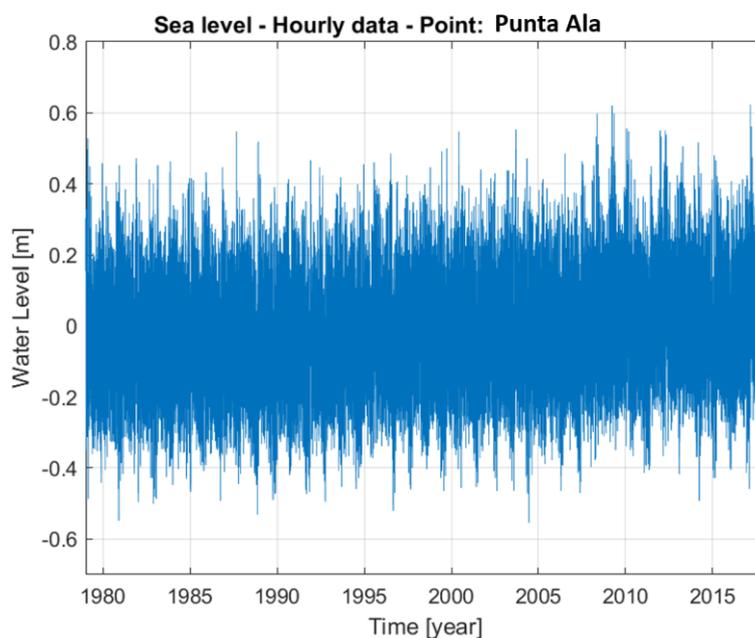


Figura 6 - Dati orari del livello totale del mare - periodo 1979-2018 - Punta Ala.

Tabella 4 - Massimi e minimi annuali - periodo 1979-2018 - Punta Ala.

ANNO	Max [m]	Min [m]	ANNO	Max [m]	Min [m]
1979	0.53	-0.49	1999	0.49	-0.43
1980	0.45	-0.55	2000	0.55	-0.46
1981	0.47	-0.44	2001	0.40	-0.46
1982	0.41	-0.49	2002	0.44	-0.45
1983	0.46	-0.48	2003	0.44	-0.46

1984	0.37	-0.45	2004	0.55	-0.47
1985	0.42	-0.47	2005	0.41	-0.55
1986	0.43	-0.49	2006	0.39	-0.42
1987	0.55	-0.44	2007	0.49	-0.47
1988	0.36	-0.42	2008	0.46	-0.47
1989	0.52	-0.53	2009	0.60	-0.37
1990	0.41	-0.49	2010	0.60	-0.35
1991	0.39	-0.46	2011	0.47	-0.41
1992	0.46	-0.47	2012	0.55	-0.41
1993	0.39	-0.49	2013	0.55	-0.42
1994	0.42	-0.46	2014	0.51	-0.37
1995	0.46	-0.43	2015	0.52	-0.49
1996	0.48	-0.34	2016	0.48	-0.43
1997	0.42	-0.52	2017	0.42	-0.41
1998	0.40	-0.46	2018	0.62	-0.46

Sulla base dei dati orari del periodo 1979-2018 è stata effettuata un'analisi dei valori estremi del livello totale del mare per diversi tempi di ritorno. Come funzione interpolante degli eventi estremi è stata utilizzata la distribuzione di Gumbel (Eq. 2).

$$P = \exp \left[-\exp \left(-\frac{H-\gamma}{\beta} \right) \right] \quad (2)$$

dove i coefficienti β e γ sono i parametri di scala e di posizione della funzione di Gumbel.

I coefficienti β e γ sono stati determinati mediante regressione lineare (Figura 7 a sinistra) in scala logaritmica sulle coppie di livello totale del mare e probabilità stimate, (P^* , T_wl). Nota la distribuzione di Gumbel, sono stati calcolati i livelli del mare per fissati tempi di ritorno come riportato in Figura 7 a destra e Tabella 5.

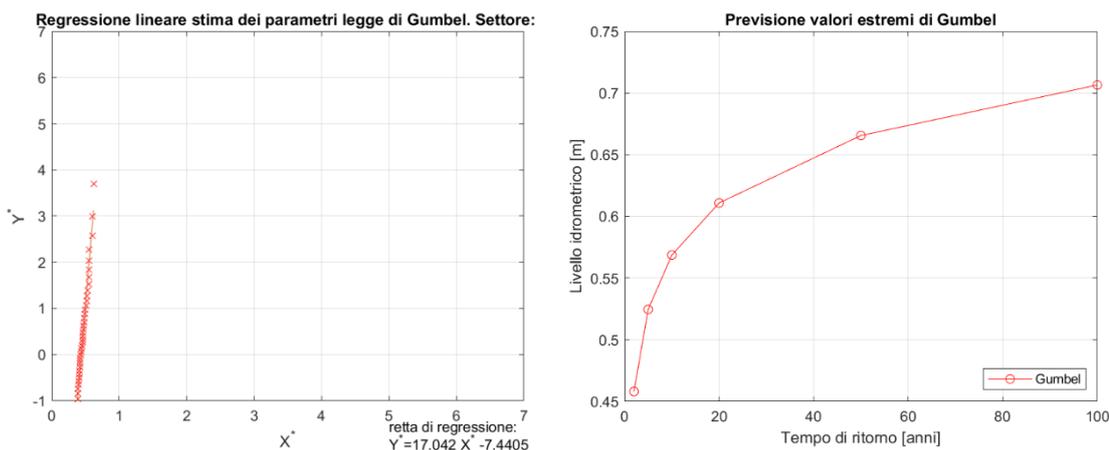


Figura 7 - A sinistra retta di regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel; a destra previsione dei valori estremi del livello totale del mare – dati annuali.

Tabella 5 – Valori estremi di Gumbel del livello totale del mare – dati annuali.

Tr [anni]	2	5	10	20	50	100
Total water level [m]	0.46	0.52	0.57	0.61	0.67	0.71

I valori di previsione estrema determinati evidenziano livelli totale del mare superiori a 50cm già con tempo di ritorno pari a 5 anni e supera i 70cm per la previsione a 100 anni.

1.3.1.1. Livello idrometrico totale - Dati Apr.-Set. ERA5

La serie di dati oraria è stata utilizzata per medesime elaborazioni anche sul solo periodo dal 1° Marzo al 30 Settembre.

In Tabella 6 vengono riportati i valori massimi e minimi del livello totale del mare per il periodo di riferimento.

Tabella 6 - Massimi e minimi Apr.-Set. - periodo 1979-2018 – Punta Ala.

ANNO	Max [m]	Min [m]	ANNO	Max [m]	Min [m]
1979	0.37	-0.36	1999	0.45	-0.32
1980	0.35	-0.37	2000	0.50	-0.34
1981	0.39	-0.36	2001	0.39	-0.34
1982	0.30	-0.35	2002	0.44	-0.35
1983	0.45	-0.35	2003	0.34	-0.32
1984	0.38	-0.40	2004	0.56	-0.32
1985	0.41	-0.35	2005	0.39	-0.42
1986	0.34	-0.36	2006	0.36	-0.37
1987	0.33	-0.36	2007	0.38	-0.35
1988	0.33	-0.39	2008	0.46	-0.32
1989	0.43	-0.34	2009	0.35	-0.31
1990	0.35	-0.38	2010	0.39	-0.29
1991	0.39	-0.37	2011	0.42	-0.32
1992	0.42	-0.36	2012	0.45	-0.28
1993	0.33	-0.35	2013	0.45	-0.32
1994	0.35	-0.37	2014	0.39	-0.26
1995	0.46	-0.36	2015	0.33	-0.31
1996	0.39	-0.33	2016	0.41	-0.31
1997	0.41	-0.36	2017	0.42	-0.28
1998	0.38	-0.32	2018	0.60	-0.38

L'analisi dei valori estremi del livello totale del mare ristretta al periodo Aprile-Settembre è riportata in Figura 8 e in Tabella 7.

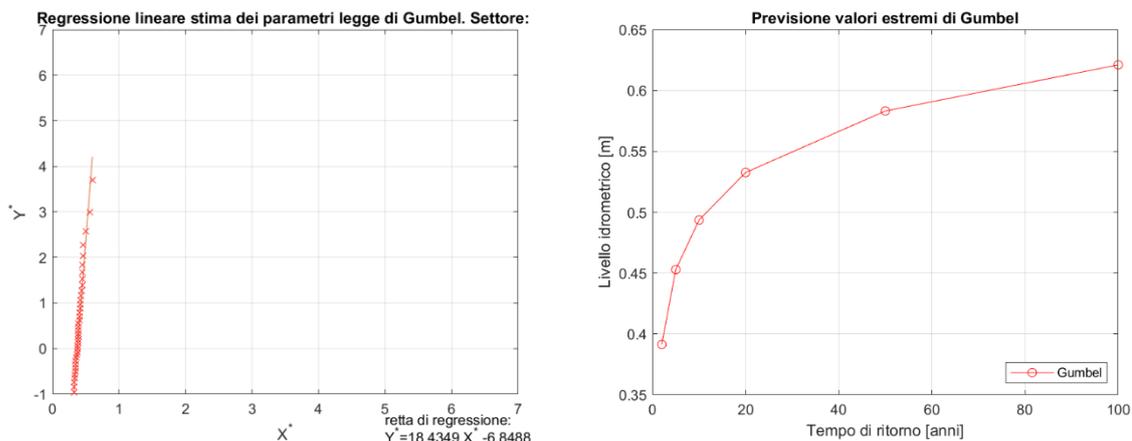


Figura 8 - A sinistra retta di regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel; a destra previsione dei valori estremi del livello totale del mare – dati Aprile-Settembre.

Tabella 7 – Valori estremi di Gumbel del livello totale del mare – dati Aprile-Settembre.

Tr [anni]	2	5	10	20	50	100
Total water level [m]	0.39	0.45	0.49	0.53	0.58	0.62

I valori estremi determinati per il periodo ristretto Aprile-Settembre risultano inferiori ma con differenze limitate che non raggiungono i 10cm.

1.3.2. Marea astronomica

La marea astronomica è causata dall'azione gravitazionale della Luna e del Sole sulla massa d'acqua, e dipende dalla posizione della Terra rispetto ai due astri. Poiché il moto relativo di questi corpi celesti è conosciuto con grande precisione, anche l'evoluzione della marea dovuta a tale interazione è deterministicamente prevedibile e può essere espressa da una serie di periodi costanti e definiti.

Il numero di questi periodi è teoricamente infinito, tuttavia le componenti più significative sono sette e vengono descritte in Tabella 8. La sigla identificativa delle maree contiene una numerazione corrispondente alla tipologia della marea; 1 se la componente ha un ciclo diurno, 2 se la componente ha un ciclo semidiurno.

Tabella 8 - Componenti di marea astronomica.

SIGLA	Componente	Periodo [ore]
M2	Lunare semidiurna principale	12.4206
S2	Solare semidiurna principale	12
N2	Lunare semidiurna ellittica maggiore	12.6583
K2	Lunisolare declinazione semidiurna	11.9672
K1	Lunisolare declinazione diurna	23.9345
O1	Lunare diurna principale	25.8193
P1	Solare diurna principale	24.0659

L'analisi delle componenti di marea astronomica è stata effettuata a partire dalla serie temporale 1979-2018 (350'640 dati) del livello totale del medio mare reperiti dal database di ERA5 *Global sea level change time series from 1950 to 2050 derived from reanalysis and high resolution CMIP6 climate projections*.

È stata effettuata un'analisi nel dominio della frequenza sulla serie temporale di dati per la verifica delle componenti di marea presenti, come riportata in Figura 9.

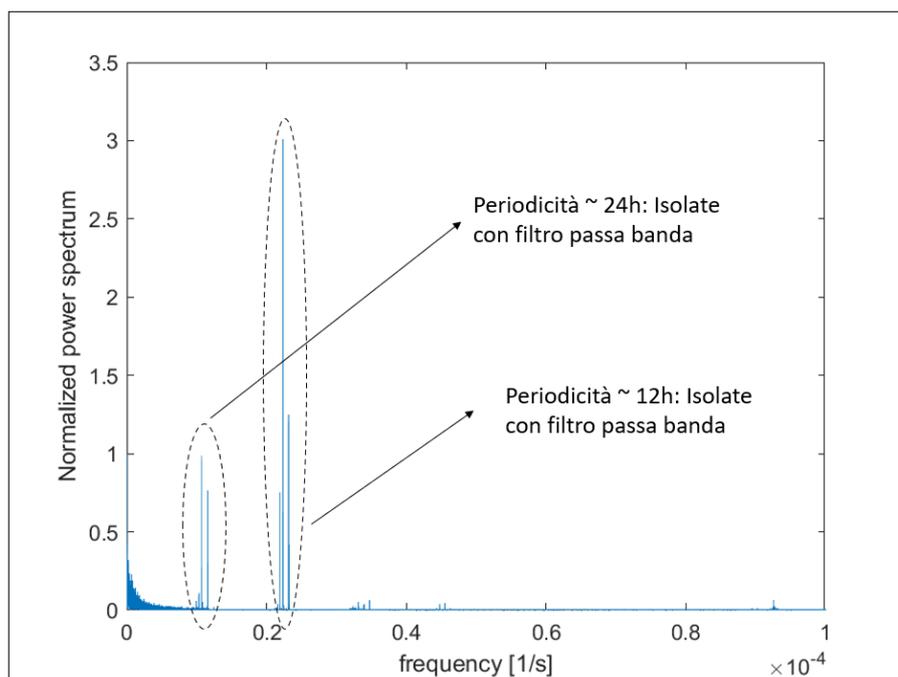


Figura 9 – Individuazione delle frequenze di marea astronomica.

Sul segnale del livello totale del mare sono stati dunque applicati due filtri passabanda per isolare le componenti di marea astronomica. Successivamente, queste sono state sommate per ottenere la serie temporale delle maree astronomiche, di cui si riporta una ristretta finestra temporale in Figura 10. In Figura 11 vengono riportate, per la stessa finestra temporale (mareggiata fine ottobre 2018), il livello totale del mare, la marea astronomica ed il sovrizzo di tempesta.

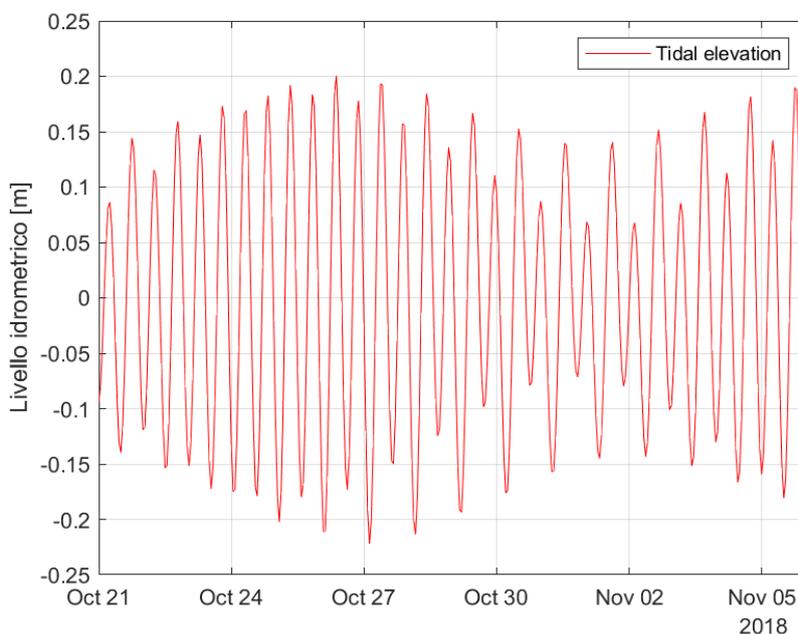


Figura 10 - Componenti di marea astronomica.

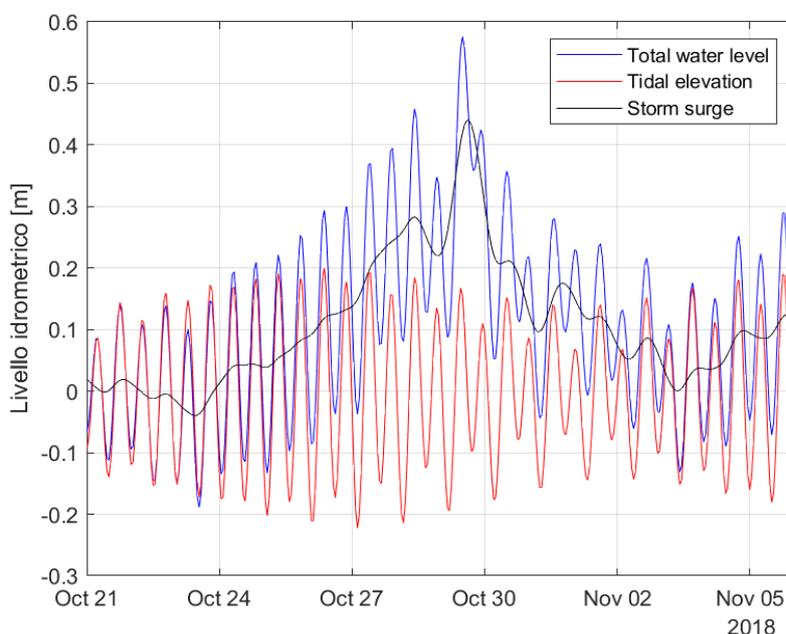


Figura 11 - Livello totale del mare, componenti di marea astronomica e sovralzo di tempesta.

Sulla serie temporale della marea astronomica così determinata dal 1979 al 2018 sono stati calcolati i minimi ed i massimi annuali, riportati in Tabella 9.

Tabella 9 – Massimi e minimi della marea astronomica per il periodo 1979-2018.

ANNO	Max [m]	Min [m]	ANNO	Max [m]	Min [m]
1979	0.23	-0.26	1999	0.22	-0.24
1980	0.23	-0.25	2000	0.23	-0.25
1981	0.22	-0.25	2001	0.23	-0.26
1982	0.23	-0.25	2002	0.23	-0.26
1983	<u>0.24</u>	-0.26	2003	0.22	-0.26
1984	0.23	-0.26	2004	0.23	-0.26
1985	0.23	-0.26	2005	<u>0.24</u>	<u>-0.27</u>
1986	0.23	-0.26	2006	<u>0.24</u>	<u>-0.27</u>
1987	0.23	-0.26	2007	0.23	-0.26
1988	<u>0.24</u>	-0.26	2008	0.22	-0.26
1989	0.23	-0.26	2009	<u>0.24</u>	-0.26
1990	0.23	-0.25	2010	0.23	-0.26
1991	0.22	-0.26	2011	0.22	-0.26
1992	0.23	-0.26	2012	0.22	-0.25
1993	0.23	-0.25	2013	0.22	-0.25
1994	0.22	-0.24	2014	0.23	-0.25
1995	0.22	-0.25	2015	0.23	-0.25
1996	0.22	-0.25	2016	0.22	-0.25
1997	0.23	-0.25	2017	0.22	-0.24
1998	0.23	-0.25	2018	<u>0.24</u>	-0.26

1.3.3. Livelli e Pressione – Stazione mareografica di marina di Campo

Oltre ai dati reperiti tramite i database ERA5 di COPERNICUS, sono stati analizzati anche i dati di livello idrometrico e pressione atmosferica registrati presso l'idrometro di Marina di Campo (Isola d'Elba), stazione della rete mareografica nazionale più vicina all'area di interesse e gestita da ISPRA.

La stazione è ubicata nella zona del porto di Marina di Campo, alla radice del molo denominato *Molo Nuovo*, nel punto di coordinate Lat 42° 44' 33.48"N e Lon 10° 14' 18.00"E come riportato in Figura 12.



Figura 12 - Stazione mareografica di Marina di Campo (isola d'Elba) – Fonte: www.mareografico.it.

1.3.3.1. Livello idrometrico

La misura del livello idrometrico con cadenza pari a 10 minuti è disponibile dal 21/07/2011 ad oggi, per un totale di 598681 dati. La serie temporale è riportata in Figura 13.

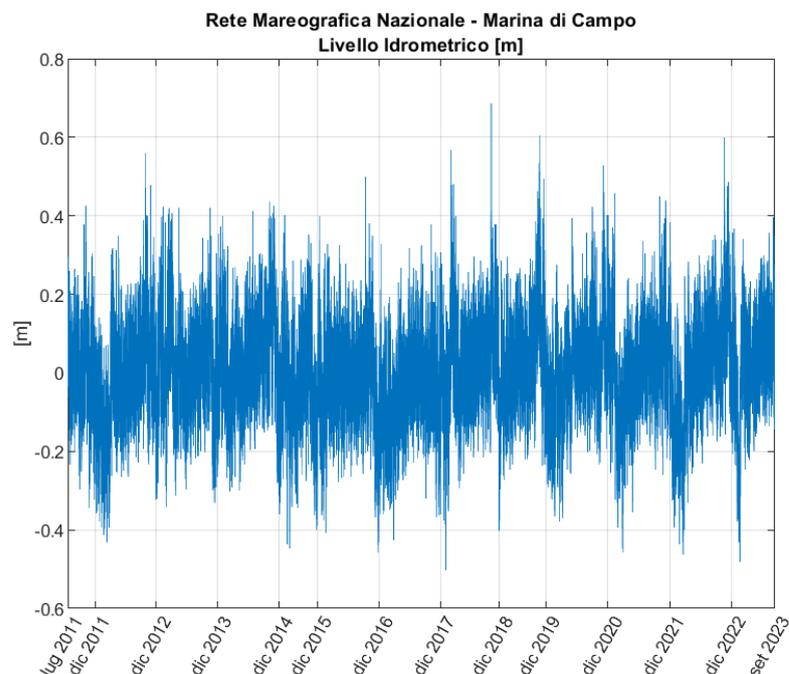


Figura 13 – Livello idrometrico - periodo 2011-2023 – stazione di Marina di Campo.

In Tabella 10 si riportano i valori massimi e minimi annuali registrati. Nella Tabella 11 invece, vengono riportati i valori massimi e minimi sia per il punto di

estrazione dati ERA5 che per la stazione di Marina di Campo per il solo periodo comune di dati disponibili (2011-2018).

Tabella 10 – Massimi e minimi annuali – Idrometro di Marina di Campo

ANNO	Dati	Max [m]	Min [m]
2011	23189	0.45	-0.32
2012	51687	0.58	-0.41
2013	51773	0.45	-0.32
2014	52003	0.46	-0.29
2015	32777	0.43	-0.42
2016	51828	0.52	-0.43
2017	52366	0.40	-0.40
2018	49244	0.71	-0.48
2019	39888	0.63	-0.38
2020	52392	0.55	-0.35
2021	52378	0.48	-0.43
2022	52226	0.62	-0.44
2023	36930	0.42	-0.45

Tabella 11 - Confronto massimi e minimi annuali livello idrometrico tra il punto di estrazione dati ERA5 e l'idrometro della stazione mareografica di Marina di Campo.

Punto ERA5			Marina di Campo		
ANNO	Max [m]	Min [m]	ANNO	Max [m]	Min [m]
2011	0.47	-0.41	2011	0.45	-0.32
2012	0.55	-0.41	2012	0.58	-0.41
2013	0.55	-0.42	2013	0.45	-0.32
2014	0.51	-0.37	2014	0.46	-0.29
2015	0.52	-0.49	2015	0.43	-0.42
2016	0.48	-0.43	2016	0.52	-0.43
2017	0.42	-0.41	2017	0.40	-0.40
2018	0.62	-0.46	2018	0.71	-0.48

1.3.3.2. Pressione atmosferica

I dati di pressione atmosferica sono restituiti tramite misurazioni orarie. Il periodo disponibile è lo stesso del livello idrometrico, dal 21/07/2011 ad oggi, per un totale di 100804 dati.

In Figura 14 viene riportata la serie temporale delle pressioni registrate; il valore medio durante tutto il periodo in esame è pari a 1015 mbar.

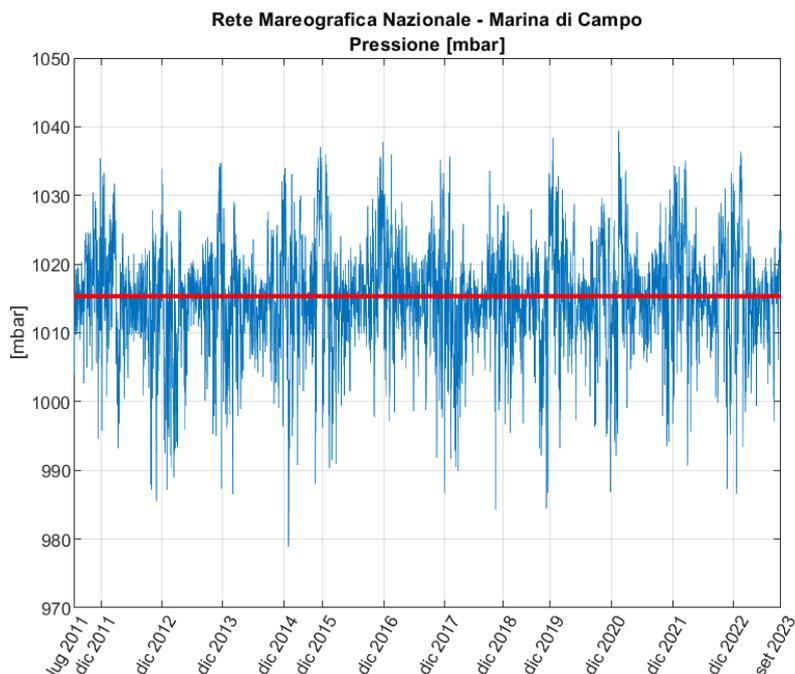


Figura 14 – Pressione atmosferica - periodo 2011-2023 – stazione di Marina di Campo. In rosso il valore medio del periodo analizzato.

In Tabella 12, si riportano i valori minimi e massimi annuali. Il minimo valore barico nel paraggio in esame è pari a circa 979mbar, risultando così inferiore di 36mbar rispetto al valore medio del periodo. Poiché, in prima approssimazione, è possibile assumere un sopralzo del mare pari a 1cm per ogni mbar di bassa pressione, è possibile affermare che il contributo delle basse pressioni all’innalzamento del mare nel paraggio in esame possa arrivare a 36cm.

Tabella 12 - Minimo e massimo barico annuale - Stazione di Marina di Campo - periodo 2011-2023.

ANNO	Dati	Massimo [mbar]	Minimo [mbar]
2011	3895	1035	995
2012	8655	1033	986
2013	8668	1035	987
2014	8691	1032	987
2015	5484	1037	<u>979</u>
2016	8766	1038	990
2017	8757	1036	987
2018	8237	1036	984
2019	6668	1033	987
2020	8762	1038	987
2021	8760	<u>1039</u>	992
2022	8732	1035	987
2023	6729	1036	987

1.3.4. Sea Level Rise

Per la valutazione dell'incremento del livello del medio mare (*sea level rise*) dell'area di studio è possibile fare riferimento agli studi condotti dall'IPPC (*Gruppo Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici*), ossia l'organismo delle Nazioni Unite preposto alla valutazione della scienza relativa ai cambiamenti climatici.

Secondo l'ultimo report rilasciato dall'IPCC (Marzo 2023), le attività umane, principalmente attraverso le emissioni di gas serra, hanno inequivocabilmente contribuito al riscaldamento globale. Nel periodo 2011-2020 la temperatura superficiale globale è stata di circa 1.1°C al di sopra della media del periodo 1850-1900, con aumenti maggiori sulla terraferma (1.59°C [1.34÷1.83 °C]) che sull'oceano (0.88°C [0.68÷1.01 °C]). Le emissioni globali di gas serra hanno continuato ad aumentare nel periodo 2010-2019 e sono attribuibili all'uso non sostenibile dell'energia, dall'uso del territorio e dai cambiamenti nell'uso del territorio, dagli stili di vita e dai modelli di consumo e produzione. Il riscaldamento dovuto ai gas serra (GHG) è dominato dalle emissioni di CO₂ e metano (CH₄) ed è parzialmente mascherato dal raffreddamento tramite aerosol. La temperatura superficiale globale è aumentata più velocemente dal 1970 che in qualsiasi altro periodo di 50 anni almeno negli ultimi 2000 anni.

È praticamente certo che la parte superiore dell'oceano globale (0-700 m) si sia riscaldata a partire dagli anni '70 ed è estremamente probabile che l'influenza umana sia stato il principale fattore. Il riscaldamento degli oceani ha rappresentato il 91% del riscaldamento del sistema climatico, mentre il riscaldamento del territorio, la perdita di ghiaccio e il riscaldamento atmosferico rappresentano rispettivamente circa il 5%, 3% e 1%. Il livello medio globale del mare è aumentato di 0.20m [0.15÷0.25 m] tra il 1901 e il 2018. Il tasso medio di aumento del livello del mare è stato di 1.3mm/yr [0.6÷2.1 mm/yr] tra il 1901 e il 1971, aumentando a 1.9mm/yr [0.8÷2.9 mm/yr] tra il 1971 e il 2006, e in ulteriore aumento fino a 3.7mm/yr [3.2÷4.2 mm/yr] tra il 2006 e il 2018.

Il report dell'IPCC fornisce proiezioni del livello del mare che considerano solo i processi per i quali è possibile effettuare proiezioni con un livello di confidenza almeno medio, relativamente al periodo 1995-2014, per cinque scenari di percorso socioeconomico condiviso (SSP) e cinque diverse temperature superficiali medie globali future (dal 2080 al 2100). Nelle proiezioni del livello del mare, gli intervalli probabili vengono valutati in base alla combinazione di incertezza nel cambiamento di temperatura associato a scenari di emissioni e incertezza nelle relazioni tra temperatura e fattori che determinano il cambiamento del livello del mare previsto, come espansione termica, dinamica oceanica e perdita di massa dei ghiacciai e delle calotte glaciali.

- SSP1-1.9 mantiene il riscaldamento a circa 1.5°C sopra il 1850-1900 nel 2100 dopo un leggero superamento (mediana) e implica emissioni nette di CO₂ pari a zero intorno alla metà del secolo.
- SSP1-2.6 rimane al di sotto dei 2.0°C di riscaldamento rispetto al periodo 1850-1900 (mediana) con zero emissioni nette implicite nella seconda metà del secolo.
- SSP2-4.5 è approssimativamente in linea con il limite superiore dei livelli di emissione aggregate del *Nationally Determined Contribution* entro il 2030. I nuovi o aggiornati NDC del 2020 non hanno modificato in modo significativo le proiezioni delle emissioni fino al 2030, sebbene più paesi abbiano adottato obiettivi di zero emissioni nette per il 2050 in linea con SSP1-1.9 o SSP1-2.6. Lo scenario SSP2-4.5 si discosta leggermente da uno scenario di riferimento *senza politiche climatiche aggiuntive*, risultando in un riscaldamento migliore stimato intorno a 2.7°C entro la fine del 21° secolo rispetto al periodo 1850-1900.
- SSP3-7.0 è uno scenario di riferimento medio-alto derivante dall'assenza di una politica climatica aggiuntiva nell'ambito della narrazione dello sviluppo socioeconomico dell'SSP3. SSP3-7.0 presenta emissioni di non-CO₂ particolarmente elevate, comprese elevate emissioni di aerosol.
- SSP5-8.5 è uno scenario di riferimento elevato senza alcuna politica climatica aggiuntiva. Livelli di emissione pari a SSP5-8.5 non sono ottenuti mediante modelli di valutazione integrata (IAM) nell'ambito di nessuno degli SSP diversi dal percorso di sviluppo socioeconomico SSP5 alimentato da combustibili fossili.

Tramite l'utilizzo del *Sea Level Projection Tool* (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>) è possibile conoscere le previsioni sito specifiche dei livelli del mare e del tasso di crescita secondo i diversi scenari SSP per determinati intervalli temporali riferiti al periodo di riferimento 1995-2014 (Figura 15). La discretizzazione delle diverse aree avviene con una risoluzione di 1° sia per la latitudine che per la longitudine; inoltre, sono riportati valori puntuali in corrispondenza di alcune stazioni idrometriche costiere. Per la costa italiana sono presenti 9 valori puntuali in corrispondenza di Genova, Civitavecchia, Cagliari, Palermo, Napoli Arsenale, Napoli Mandracchio, Venezia Arsenale, Venezia S. Stefano e Venezia Punta della Salute.

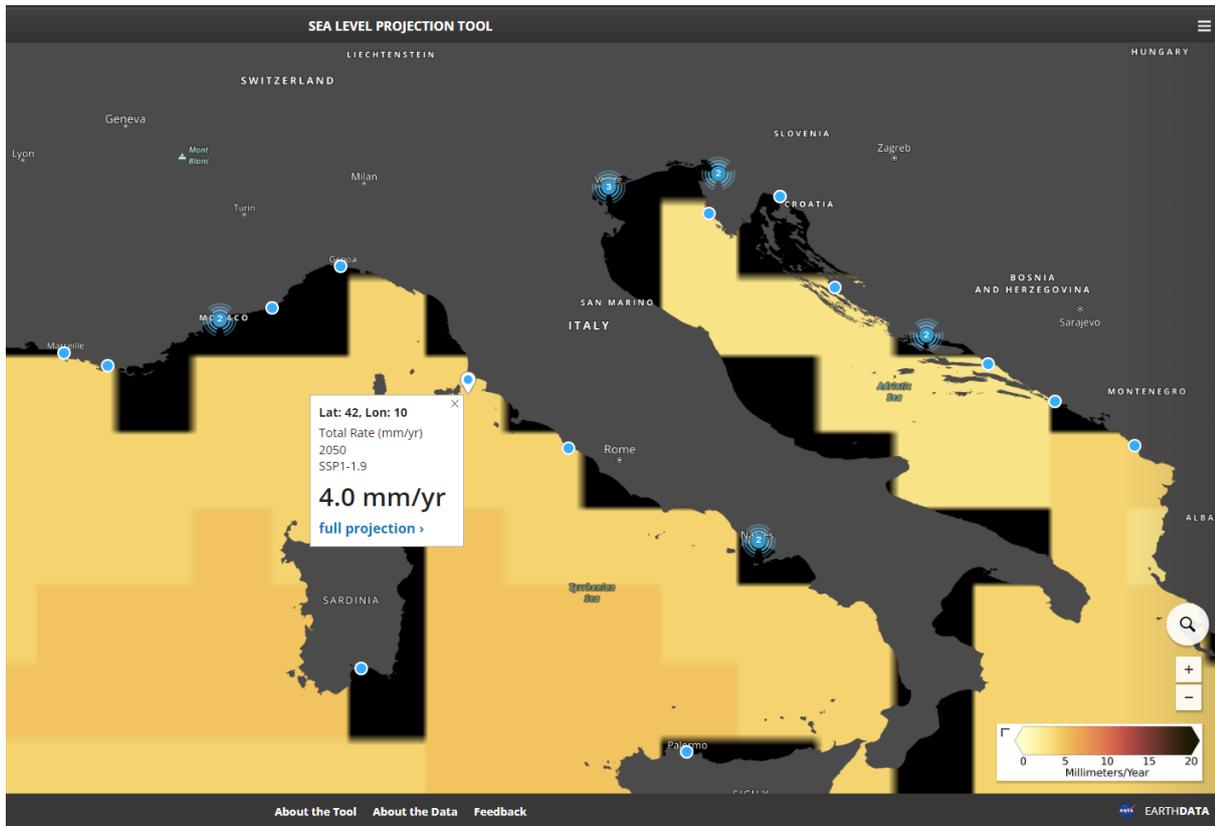


Figura 15 – Esempio di utilizzo del *Sea Level Projection Tool* - Tasso totale di crescita del livello del mare previsto per il 2050 secondo lo scenario SSP1-1.9 nell'area di interesse.

Fonte: Sea Level Projection Tool - <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

Sono stati valutati i dati relativi all'area di interesse individuata dalle coordinate Latitudine 42° e Longitudine 10°. In Figura 16 vengono riportate le previsioni di innalzamento del livello del medio mare per i diversi scenari SSP dal 2020 al 2150. In Figura 17 vengono invece riportati i tempi previsti per il raggiungimento di un innalzamento del livello del medio mare pari a 0.5m.

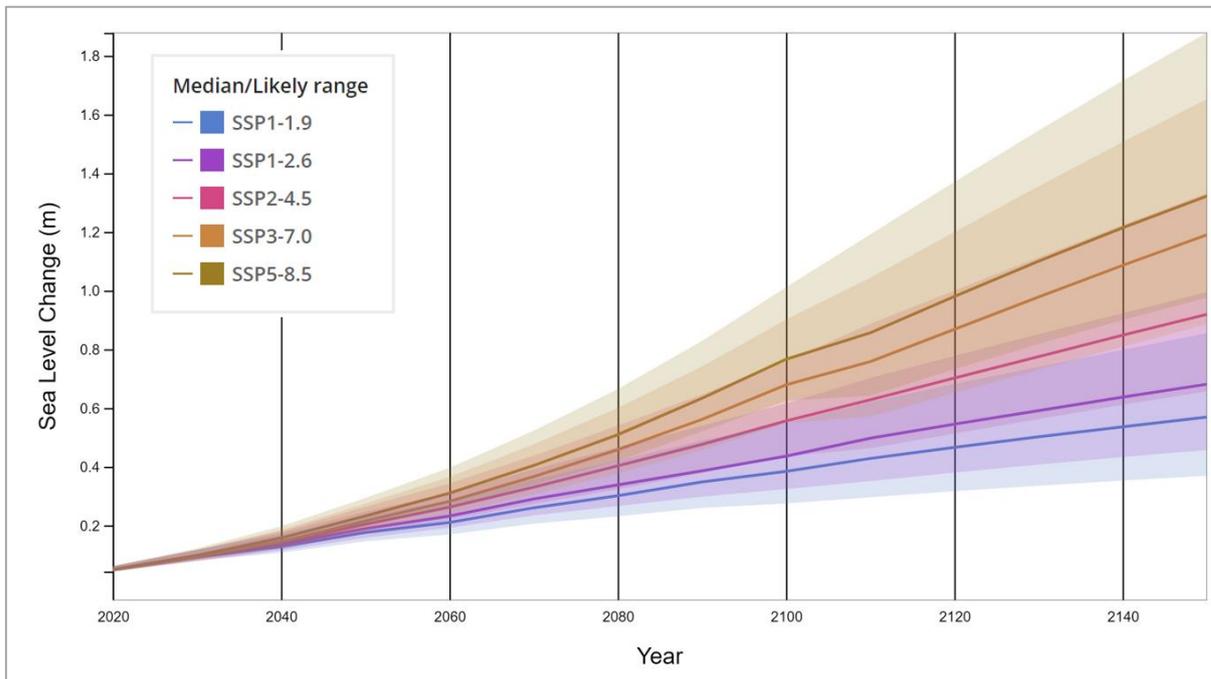


Figura 16 – Innalzamento del livello del mare previsto per i differenti scenari SSP. Gli intervalli ombreggiati mostrano gli intervalli del 17° e 83° percentile. Le proiezioni si riferiscono al periodo di riferimento 1995-2014 – Lat: 42°, Lon: 10°.

Fonte: Sea Level Projection Tool - <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

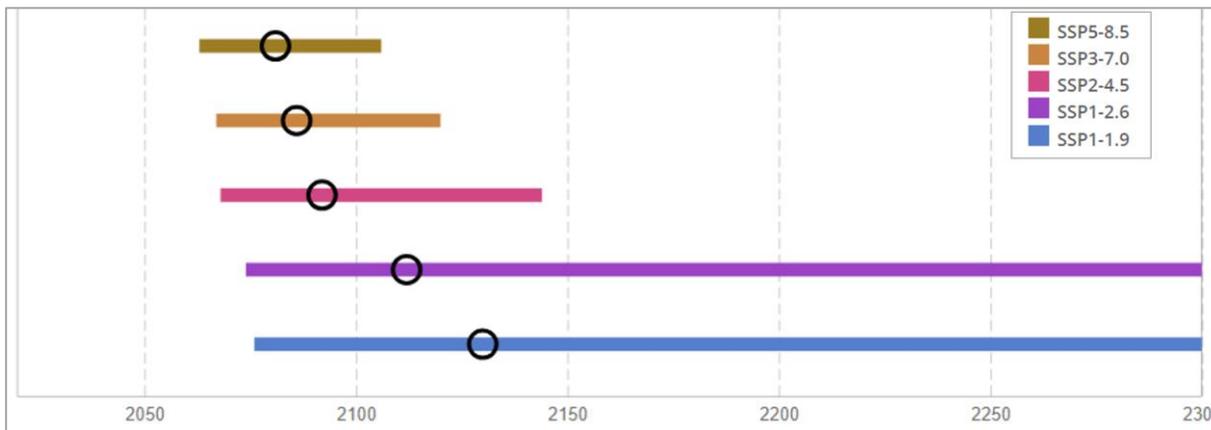


Figura 17 – Tempi previsti per l’innalzamento del livello del mare di 0.5m rispetto al periodo di riferimento 1995-2014. Le barre spesse mostrano gli intervalli dal 17° all’83° percentile, i cerchi neri mostrano il valore mediano – Lat: 42°, Lon: 10°.

Fonte: Sea Level Projection Tool - <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

Il livello di innalzamento del medio mare al 2020 rispetto al periodo di riferimento 1995-2014 per l’area di interesse è pari a +0.06m. In Tabella 13 si riportano per i differenti scenari i valori del livello del mare ed il relativo tasso di crescita dell’area di interesse al 2050.

Tabella 13 – Livello del mare e tasso di crescita al 2050 rispetto al periodo di riferimento 1995-2014 per l’area Lat 42° Lon 10°.

SCENARIO	ANNO	L.m.m. [m]	Rateo [mm/yr]
SSP1-1.9	2050	+0.18	4
SSP1-2.6	2050	+0.21	5
SSP2-4.5	2050	+0.22	6
SSP3-7.0	2050	+0.23	6
SSP5-8.5	2050	+0.25	7

1.4. VENTI

L’analisi dei venti entro l’area di generazione del moto ondoso relativa al paraggio in esame è stata basata sui dati di vento forniti dal database Copernicus, in particolare dal sottomodulo specifico ERA5 *Hourly data on single levels from 1940 to present*. ERA5 fornisce stime orarie per un gran numero di grandezze atmosferiche, delle onde oceaniche e della superficie terrestre. ERA5 viene aggiornato quotidianamente con una latenza di circa 5 giorni.

I dati sono disponibile su una griglia lat-lon regolare di 0,25 gradi per la rianalisi e 0,5 gradi per la stima dell'incertezza. Esistono quattro sottoinsiemi principali: prodotti orari e mensili, sia su livelli di pressione (campi aerei superiori) che su singoli livelli (quantità atmosferiche, di onde oceaniche e di superficie terrestre).

Le componenti di velocità del vento *u* e *v* (*zonale* e *meridionale*) sono state ottenute con frequenza oraria relativamente al periodo 1979-2023, per un totale di 391.774 coppie di dati. I dati sono stati estratti nel punto di coordinate geografiche 42°84’N (Lat.), 10°64’E (Long.) , indicato in Figura 18.

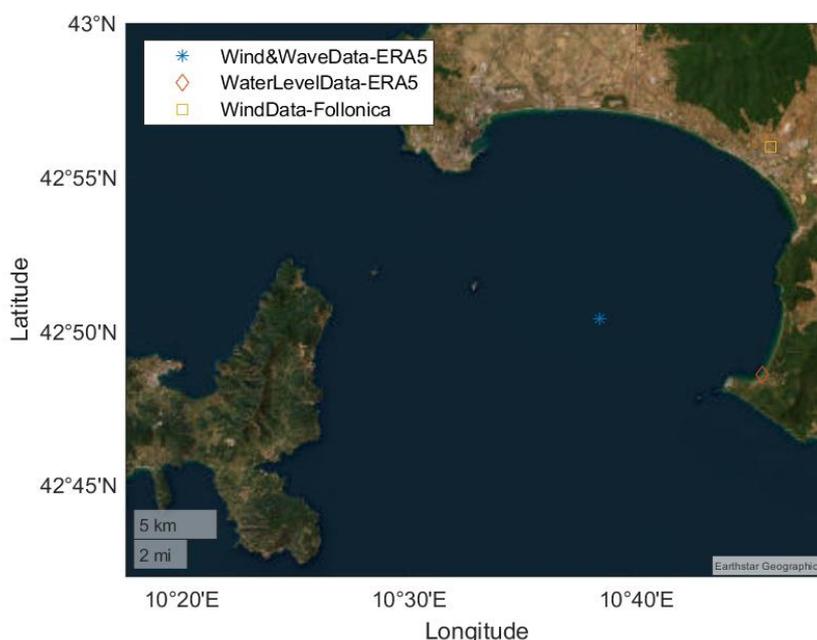


Figura 18 – Localizzazione punti di estrazione dati di vento, onde e livelli idrometrici.

Dalle coppie di componenti di velocità u e v è stato possibile definire modulo e direzione di provenienza dei venti. In Figura 19 e in Tabella 14 si riportano rispettivamente la rosa dei venti e la tabella bivariata intensità del vento e direzione (V-Dir).

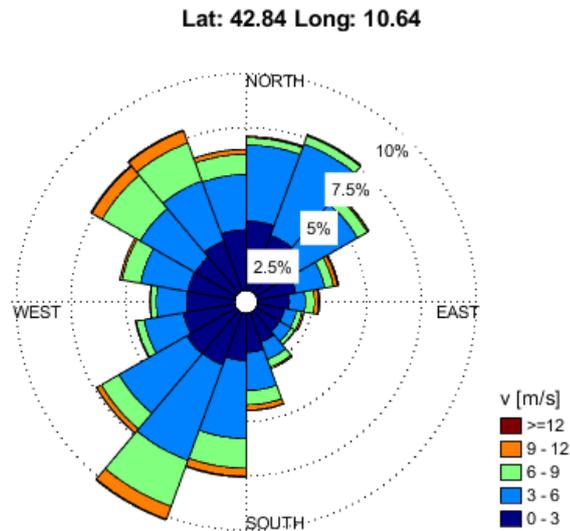


Figura 19 – Rosa dei venti al largo del Marina di Punta Ala. Settori angolari di apertura paria a 20°.

Tabella 14 - Distribuzione direzionale annuale dei venti al largo del Marina di Punta Ala per il periodo 1979-2023.

DIR [°N]	VENTO [m/s]										
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	TOT.
10	1.3	3.9	1.5	0.3	0.1	*	*	*	*		7.1
30	1.1	3.6	2.4	0.4	0.1	*	*				7.7
50	1.0	2.5	1.9	0.4	0.1	*	*	*			6.0
70	0.9	1.6	0.6	0.3	0.2	0.1	*	*	*		3.8
90	0.8	1.0	0.3	0.3	0.2	0.1	*	*	*	*	2.9
110	0.8	0.7	0.3	0.2	0.1	*	*	*	*		2.2
130	0.8	0.8	0.3	0.2	*	*	*				2.1
150	0.8	1.1	0.4	0.3	0.1	*	*	*			2.8
170	0.9	1.8	0.9	0.5	0.3	0.1	*	*	*	*	4.5
190	1.0	2.5	2.2	1.1	0.5	0.2	*	*	*		7.6
210	1.1	3.2	3.0	1.7	0.9	0.3	*	*			10.2
230	1.2	3.0	2.0	0.8	0.3	0.1	*	*			7.4
250	1.2	2.1	0.9	0.3	0.1	*	*	*			4.6
270	1.2	1.7	0.7	0.2	0.1	*	*				3.9
290	1.2	1.8	1.3	0.7	0.2	*	*				5.3
310	1.2	2.1	1.9	1.5	0.8	0.3	*	*			7.7
330	1.3	2.3	1.9	1.4	0.8	0.3	*	*			7.9
350	1.4	2.7	1.3	0.7	0.3	0.1	*		*		6.5
TOT.	19.1	38.5	23.8	11.1	5.2	1.8	0.4	0.1	0.0	0.0	100.0

* Percentuale < 0.1

I risultati mostrano che i venti foranei locali più frequenti e più intensi provengono principalmente dal settore 200-220°N centrato sui 210°N (10.2% del tempo) e dai settori adiacenti 180-200°N centrato sui 190°N (7.6% del tempo) e 220°-240° centrato sui 230°N (7.4% del tempo). I venti provengono secondariamente dai settore 300-320°N centrato sui 310°N e 320°-340°N centrato sui 330°N (rispettivamente 7.7% e 7.90% dl tempo). Infine, venti meno intensi ma abbastanza frequenti provengono dal settore 20°-40°N centrato sui 30°N (7.7% del tempo).

1.4.1. Venti – Stazione anemometrica di Follonica

Oltre ai dati reperiti tramite i database ERA5 di COPERNICUS, sono stati analizzati anche i dati di direzione e velocità del vento registrati presso l’anemometro di Follonica, stazione della rete del Servizio Idrologico della Regione Toscana (Figura 18).

La stazione TOS03002459 è ubicata nell’area del CNR-IBE Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la BioEconomia, nel punto di coordinate Lat 42°55’59.2"N e Lon 10°45’55.4"E a quota pari a 15 m slm.

I dati della direzione in gradi N e della velocità del vento in m/s sono disponibili per il periodo 2015-2023 con frequenza pari a 15 minuti, per un totale di 289140 coppie di valori.

Dall’analisi dei dati disponibili sono state elaborate la rosa dei venti e la tabella bivariata intensità del vento e direzione riportate in Figura 20 e Tabella 15.

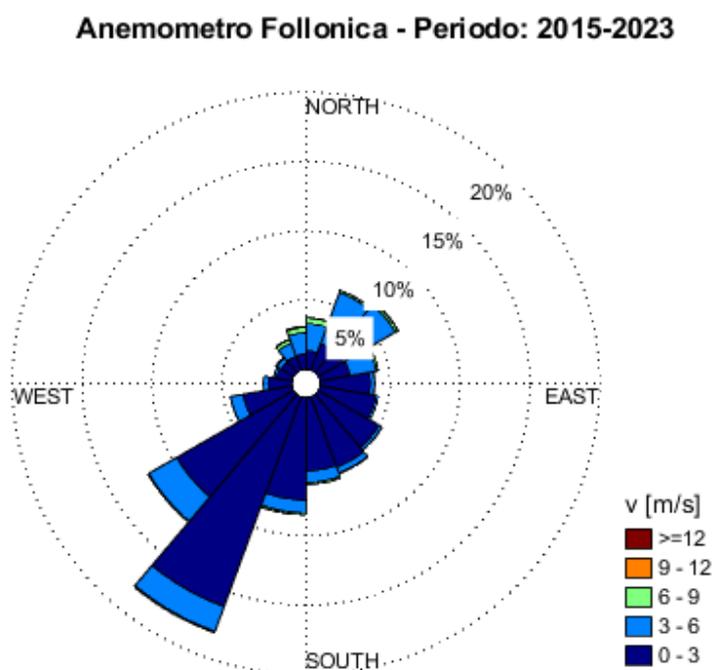


Figura 20 – Rosa dei venti per la stazione anemometrica di Follonica. Settori angolari di apertura pari a 20°.

Tabella 15 - Distribuzione direzionale annuale dei venti per la stazione anemometrica di Follonica per il periodo 2015-2023.

DIR [°N]	VENTO [m/s]								TOT.
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	
10	0.7	1.3	1.2	0.3	0.1	*			3.62
30	0.8	2.8	2.2	0.2	*				6.03
50	0.8	3.6	2.1	0.2	*	*	*		6.72
70	1.3	1.8	1.1	0.1	*	*			4.34
90	2.9	0.9	0.1	*	*				3.91
110	3.6	0.5	*	*					4.18
130	4.6	0.5	0.1	*					5.25
150	5.1	0.6	0.2	*	*				5.93
170	4.8	0.9	0.4	0.1	*				6.23
190	6.1	1.5	0.5	0.1	*				8.24
210	9.9	7.2	0.5	0.1					17.74
230	6.1	5.5	0.9	0.1					12.65
250	2.5	1.9	0.3	*					4.75
270	1.3	0.8	0.1	*					2.12
290	0.9	0.4	0.1	*					1.36
310	0.7	0.5	0.1	*	*				1.46
330	0.7	0.8	0.5	0.2	0.1	*			2.36
350	0.6	1.0	1.0	0.3	0.1	*	*		3.12
TOT.	53.39	32.52	11.59	1.93	0.42	0.12	0.02	0.01	100

* Percentuale < 0.1

I risultati mostrano che i venti foranei locali più frequenti e più intensi provengono principalmente dal terzo quadrante dalla direzione di Libeccio, dai settori centrati su 190°N, 210°N e 230°N con rispettivamente l'8.24%, il 17.74% e il 12.65% del tempo.

Secondariamente venti moderatamente intensi e frequenti provengono dal primo quadrante dalla direzione di Grecale, dai settori centrati su 30°N e 50°N con rispettivamente il 6.03% ed il 6.72% del tempo.

1.5. MOTI ONDOSI

Per i dati relativi ai moti ondosi a largo del paraggio di studio è stato utilizzato lo stesso database utilizzato per i dati di vento, il sotto-modello specifico ERA5 *Hourly data on single levels from 1940 to present*.

I parametri caratteristici del moto ondoso (altezza significativa, H_{m0} ; direzione di provenienza delle onde, Dir; periodo medio, $T_{m-1,0}$ e periodo di picco T_p) sono stati ottenuti con frequenza oraria relativamente al periodo 1979-2023, per un totale di 389.537 dati d'onda. I dati sono stati estratti nello stesso punto utilizzato

per l'estrazione delle componenti di velocità del vento, di coordinate geografiche 42°84'N (Lat.), 10°64'E (Long.), indicato in Figura 18.

L'analisi dei dati, in forma di rosa delle onde, è riportata in Figura 21 e nelle tabelle bi-variate H_{m0} -Dir, H_{m0} - T_p e T_p -Dir (Tabella 16, Tabella 17 e Tabella 18).

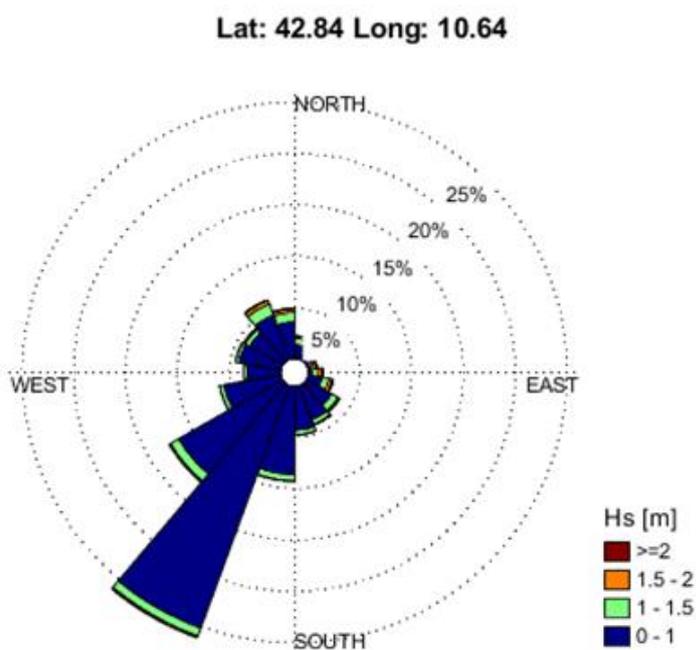


Figura 21 – Rosa delle onde al largo del Marina di Punta Ala. Settori angolari di apertura paria a 20°

Tabella 16 - Clima ondoso meteomarinò al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} -Dir. Frequenze in percentuale, relative a classi di direzione e altezze d'onda

Dir [°N]	Altezza significativa H_{m0} [m]						TOTALE
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	
10	1.40	0.80	0.08	0.01	*		2.29
30	0.50	0.58	0.09	*			1.17
50	0.29	0.48	0.12	*			0.89
70	0.25	0.54	0.19	0.02	*		0.99
90	0.43	0.79	0.20	0.04	0.01	*	1.47
110	1.40	0.96	0.15	0.02	*		2.54
130	2.83	0.86	0.05	*			3.74
150	3.56	0.55	0.04	*			4.15
170	4.31	0.47	0.01				4.79
190	8.62	0.67	*				9.30
210	25.16	0.99	0.02				26.17
230	11.60	1.05	0.04				12.69
250	5.62	0.45	0.01				6.07
270	3.32	0.28	0.01				3.60
290	4.16	0.35	0.02	*			4.52
310	3.77	0.57	0.04	*			4.39

330	4.63	1.50	0.13	*			6.25
350	3.60	1.22	0.14	0.01	*		4.97
TOTALE	85.47	13.10	1.31	0.12	0.01	0.00	100.00

* Percentuale < 0.01

Tabella 17 - Clima ondoso meteomarinario al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} - T_p . Frequenze in percentuale relative a classi di periodo e altezza d'onda

T_p [s]	Altezza significativa H_{m0} [m]						TOTALE
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	
0 - 2	0.35						0.35
2 - 4	40.35	0.02					40.37
4 - 6	30.53	6.60	0.05				37.17
6 - 8	11.86	5.50	1.06	0.03			18.45
8 - 10	2.28	0.96	0.20	0.08	0.01	*	3.52
10 - 12	0.10	0.02	0.01	*	*	*	0.14
TOTALE	85.47	13.10	1.31	0.12	0.01	0.00	100.00

* Percentuale < 0.01

Tabella 18 - Clima ondoso meteomarinario al largo del Marina di Punta Ala: T_p -Dir. Frequenze in percentuale relative a classi di direzione e periodo d'onda

Dir [°N]	Periodo di picco T_p [s]						TOTALE
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	
10		0.67	0.94	0.58	0.10	*	2.29
30	*	0.20	0.45	0.41	0.10	*	1.17
50	*	0.11	0.31	0.35	0.11	*	0.89
70	*	0.09	0.36	0.44	0.10	*	0.99
90	*	0.18	0.54	0.62	0.13	*	1.47
110	0.01	0.72	0.93	0.75	0.13	*	2.54
130	*	1.65	1.28	0.71	0.10	*	3.74
150	0.01	1.99	1.32	0.73	0.10	*	4.15
170	0.01	2.41	1.45	0.80	0.12	0.01	4.79
190	0.04	4.50	3.08	1.37	0.29	0.02	9.30
210	0.26	11.43	9.38	4.16	0.90	0.05	26.17
230	0.02	4.94	5.32	1.96	0.44	0.01	12.69
250	*	2.35	2.36	1.11	0.24	0.01	6.07
270	*	1.44	1.29	0.75	0.12	*	3.60
290		2.16	1.43	0.79	0.14	0.01	4.52
310		1.80	1.60	0.82	0.15	0.01	4.39
330		1.97	2.95	1.20	0.13	*	6.25
350		1.75	2.18	0.91	0.13	*	4.97
TOTALE	0.35	40.37	37.17	18.45	3.52	0.14	100.00

* Percentuale < 0.01

Il moto ondoso più intenso e più frequente proviene principalmente dal settore 200-220°N centrato sui 210°N (26% del tempo). I moti ondosi più intensi relativi al periodo analizzato raggiungono altezze significative di 5.4m (ciò implica, in

acque profonde, la presenza di singole onde con altezze fino a 11m), con periodi di picco fino a 12s.

In Allegato A si riportano i massimi annuali caratterizzati per il periodo 1979-2023.

1.5.1. Moti ondosi per il periodo Aprile-Settembre

Le analisi condotte sui dati orari di moto ondoso nel punto offshore di coordinate sono state condotte con la stessa metodologia descritta nel paragrafo precedente anche su una serie di dati ristretta al periodo Aprile-Settembre.

Di seguito si riportano la rosa delle onde (Figura 22) e le tabelle bi-variate H_{m0} -Dir, H_{m0} - T_p e T_p -Dir (Tabella 19, Tabella 20 e Tabella 21).

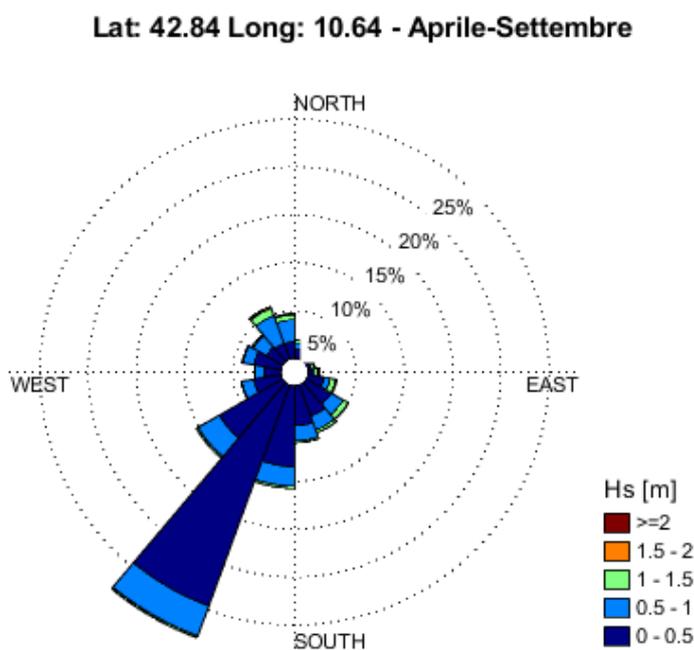


Figura 22 – Rosa delle onde al largo del Marina di Punta Ala. Settori angolari di apertura paria a 20° - Periodo Aprile-Settembre

Tabella 19 - Clima ondoso meteomarinico al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} -Dir. Frequenze in percentuale, relative a classi di direzione e altezze d’onda – Periodo Aprile-Settembre

Dir [°N]	Altezza significativa H_{m0} [m]				TOTALE
	0-1	1-2	2-3	3-4	
10	1.66	0.30	*		1.96
30	0.71	0.26	0.01		0.98
50	0.41	0.32	0.02		0.76
70	0.36	0.39	0.05		0.80
90	0.67	0.55	0.06	0.01	1.29
110	2.34	0.72	0.02		3.08
130	4.42	0.64	*		5.06

150	5.01	0.34	*		5.34
170	5.77	0.22			6.00
190	10.51	0.24			10.75
210	27.90	0.21	*		28.12
230	10.14	0.22	*		10.36
250	4.13	0.11			4.25
270	2.70	0.09			2.79
290	4.02	0.11	*		4.13
310	3.56	0.17	0.01		3.74
330	4.85	1.01	0.03		5.89
350	4.05	0.64	0.02		4.72
TOTALE	93.20	6.56	0.23	0.01	100.00

* Percentuale < 0.01

Tabella 20 - Clima ondoso meteomarinò al largo del Marina di Punta Ala: $H_{m0}-T_p$. Frequenze in percentuale relative a classi di periodo e altezza d'onda - Periodo Aprile-Settembre

T_p [s]	Altezza significativa H_{m0} [m]				TOTALE
	0-1	1-2	2-3	3-4	
0 - 2	0.44				0.44
2 - 4	50.16	0.01			50.16
4 - 6	29.69	3.53	0.02		33.24
6 - 8	11.21	2.57	0.20	*	13.98
8 - 10	1.67	0.44	0.02	*	2.13
10 - 12	0.03	0.01			0.04
TOTALE	93.20	6.56	0.23	0.01	100.00

* Percentuale < 0.01

Tabella 21 - Clima ondoso meteomarinò al largo del Marina di Punta Ala: T_p -Dir. Frequenze in percentuale relative a classi di direzione e periodo d'onda - Periodo Aprile-Settembre

Dir [°N]	Periodo di picco T_p [s]						TOTALE
	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	
10		0.94	0.61	0.38	0.04	*	1.96
30	*	0.33	0.34	0.26	0.05	*	0.98
50	*	0.18	0.31	0.22	0.05		0.76
70	*	0.16	0.35	0.23	0.06		0.80
90	0.01	0.31	0.51	0.37	0.08		1.29
110	0.01	1.34	1.06	0.59	0.08	*	3.08
130	*	2.82	1.47	0.67	0.09	*	5.06
150	0.02	3.02	1.48	0.73	0.09	*	5.34
170	0.01	3.54	1.56	0.78	0.11	*	6.00
190	0.07	6.35	2.84	1.27	0.23	*	10.75
210	0.29	14.85	8.70	3.63	0.64	0.01	28.12
230	0.02	5.09	3.68	1.32	0.24	*	10.36
250	*	1.93	1.55	0.65	0.11	*	4.25
270	*	1.21	1.07	0.45	0.05	*	2.79
290		2.23	1.36	0.47	0.06	*	4.13

310		1.68	1.49	0.51	0.05	*	3.74
330		2.07	2.94	0.83	0.05	*	5.89
350		2.12	1.93	0.61	0.05	*	4.72
TOTALE	0.44	50.16	33.24	13.98	2.13	0.04	100.00

* Percentuale < 0.01

Il moto ondoso più frequente proviene principalmente dal settore 200-220°N centrato sui 210°N (28% del tempo).

In Allegato B si riportano i massimi annuali ristretti al periodo Aprile-Settembre caratterizzati per il periodo 1979-2023.

2. ANALISI DELLE ONDE ESTREME

L'analisi statistica delle onde estreme è stata effettuata con il metodo detto POT (*Peak Over Threshold*). Con questo metodo, gli eventi estremi utilizzati nell'analisi vengono individuati come picchi al di sopra di un valore soglia (un esempio in Figura 23).

Nelle analisi documentate nel presente rapporto tecnico, il valore della soglia è stato adottato in seguito ad una preliminare analisi di sensitività che ha mostrato la sostanziale ininfluenza, sui risultati finali, della scelta della soglia nell'intorno del valore scelto. Per ciascuno dei picchi così ottenuti è calcolata la probabilità campionaria (P^*) che la relativa altezza d'onda (H) non venga superata.

Come funzione interpolante degli eventi estremi è stata utilizzata la distribuzione di Gumbel (Eq. 3).

$$P = \exp \left[-\exp \left(-\frac{H-\gamma}{\beta} \right) \right] \quad (3)$$

dove i coefficienti β e γ sono i parametri di scala e di posizione della funzione di Gumbel.

Individuazione dei primi 20 picchi di H_s oltre la soglia di 2.5 m Settore: 280-30C

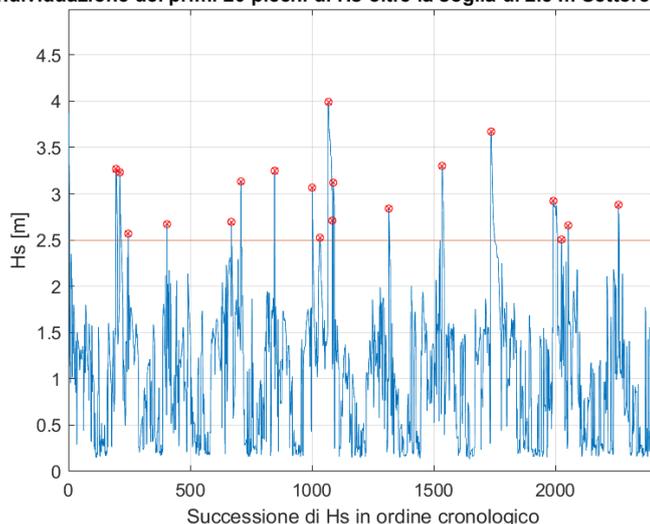


Figura 23 – Esempio di individuazione dei picchi di altezza d'onda oltre la soglia di 2.5 m.

I coefficienti β e γ sono stati determinati mediante regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P^* , H). Nota la distribuzione di Gumbel, sono state calcolate le altezze d'onda per fissati tempi di ritorno nonché per fissati livelli di rischio e orizzonti temporali del progetto.

Il tempo di ritorno T_R è il valor medio dell'intervallo di tempo che intercorre fra due superamenti successivi di un valore di altezza d'onda fissato ed è legato alla probabilità P dalla relazione:

$$P = 1 - \frac{1}{\lambda T_R} \quad (4)$$

dove il coefficiente λ è il numero medio di eventi estremi in un anno (i.e. il numero di mareggiate, con altezza maggiore del valore soglia, che mediamente si sono presentate in un anno) su cui si basa l'analisi statistica.

Dato i legami fra P e H forniti dalla distribuzione di Gumbel, vengono determinate le relazioni che forniscono il valore di altezza d'onda associato ad un assegnato tempo di ritorno T_R :

$$H_{T_R} = \gamma - \beta \ln\left(\ln\frac{1}{P}\right) = \gamma - \beta \ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{\lambda T_R}\right)\right) \quad (5)$$

Nel progetto di un'opera, l'altezza d'onda di progetto viene comunemente scelta sulla base di un tempo di ritorno ritenuto accettabile. È tuttavia è necessario fornire anche una misura del rischio che negli anni a seguire il valore dell'altezza d'onda di progetto possa essere superato, con conseguenti danneggiamenti dell'opera. È quindi possibile dare una quantificazione statistica del rischio, inteso come probabilità che una certa altezza d'onda venga superata entro un prefissato orizzonte temporale n , esprimendo il legame fra la probabilità (P) ed il rischio (R) come:

$$R = 1 - P^{\lambda \cdot n} \quad (6)$$

Dalla definizione della probabilità secondo la distribuzione adottata si ottiene l'altezza d'onda in funzione dell'orizzonte di progetto e del rischio di superamento come descritto in Eq. 6

$$H_R = \gamma - \beta \ln(-\ln P) = \gamma - \beta \ln\left(-\ln\left(\lambda n \sqrt{1-R}\right)\right) \quad (7)$$

L'analisi statistica delle onde estreme è stata applicata alla serie storica di dati orari e caratterizzanti il punto al largo del Marina di Punta Ala (coordinate 42°84'N, 10°64, indicato in Figura 18. L'analisi relativa al periodo 1979 - 2023 è stata eseguita per:

- (i) Settore di traversia, di apertura 70°, compreso fra 170-240°N;
 - (ii) Settore di traversia, di apertura 20°, compreso fra 280-300°N;
 - (iii) Settore di traversia, di apertura 60°, compreso fra 300-360°N.
- L'analisi su questo ultimo settore è stata effettuata al fine di fornire una caratterizzazione specifica dei moti ondosi provenienti da Nord, con area di generazione principale all'interno del Golfo di Follonica e di conseguenza fetch ed altezze limitati.

Per il settore 170-240°N, l'analisi degli eventi estremi è stata condotta individuando, quali estremi, i picchi di altezza d'onda significativa superiori alla soglia $H_{threshold}$ assunta pari a 2.0m. La regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P^* , H), è riportata in Figura 24 (a

sinistra). Le altezze d'onda significative in acque alte relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con la distribuzione di Gumbel sono riportate in Figura 24 (a destra) e in Tabella 23. Nel settore considerato l'altezza d'onda significativa determinata con la funzione di Gumbel con tempo di ritorno 50 anni è pari a $H_{m0}=4.0\text{m}$, quella con tempo di ritorno pari a 100 anni è pari a $H_{m0}=4.2\text{m}$.

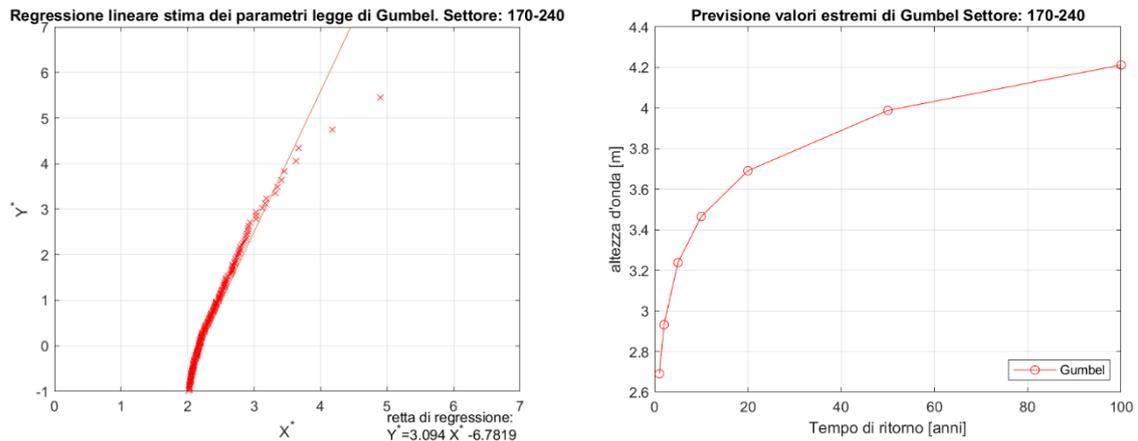


Figura 24 - Regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel a destra; previsione dei valori estremi di altezza d'onda di Gumbel a sinistra – settore 170-240°N.

Per il settore 280-300°N, l'analisi degli eventi estremi è stata condotta individuando, quali estremi, i picchi di altezza d'onda significativa superiori alla soglia $H_{threshold}$ assunta pari a 2.5m. La regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P^*, H) , è riportata in Figura 25 (a sinistra). Le altezze d'onda significative in acque alte relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con la distribuzione di Gumbel sono riportate in Figura 25 (a destra) e in Tabella 23. Considerando il settore 280-300°N, l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni è pari a $H_{m0}=4.4\text{m}$; l'altezza d'onda con tempo di ritorno pari a 100 anni ha $H_{m0}=4.7\text{m}$.

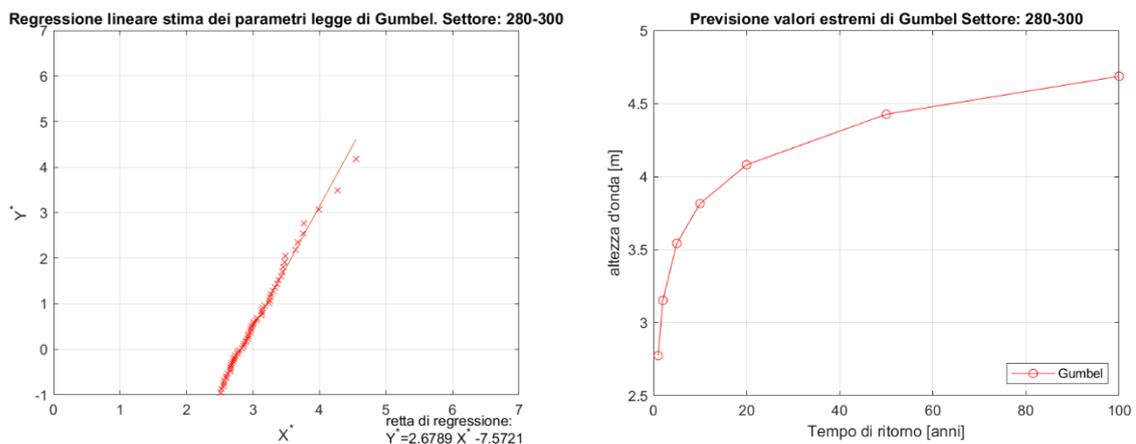


Figura 25 - Regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel a destra; previsione dei valori estremi di altezza d'onda di Gumbel a sinistra – settore 280-300°N.

Per il settore 300-360°N, l'analisi degli eventi estremi è stata condotta individuando, quali estremi, i picchi di altezza d'onda significativa superiori alla soglia $H_{threshold}$ assunta pari a 1.2m. La regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d'onda e probabilità stimate, (P^*, H) , è riportata in Figura 26 (a sinistra). Le altezze d'onda significative in acque alte relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con la distribuzione di Gumbel sono riportate in Figura 26 (a destra) e in Tabella 23. Per il settore 300-360°N, l'altezza d'onda significativa con tempo di ritorno 50 anni è pari a $H_{m0}=3.4\text{m}$ mentre quella relativa al tempo di ritorno pari a 100 anni ha $H_{m0}=3.6\text{m}$.

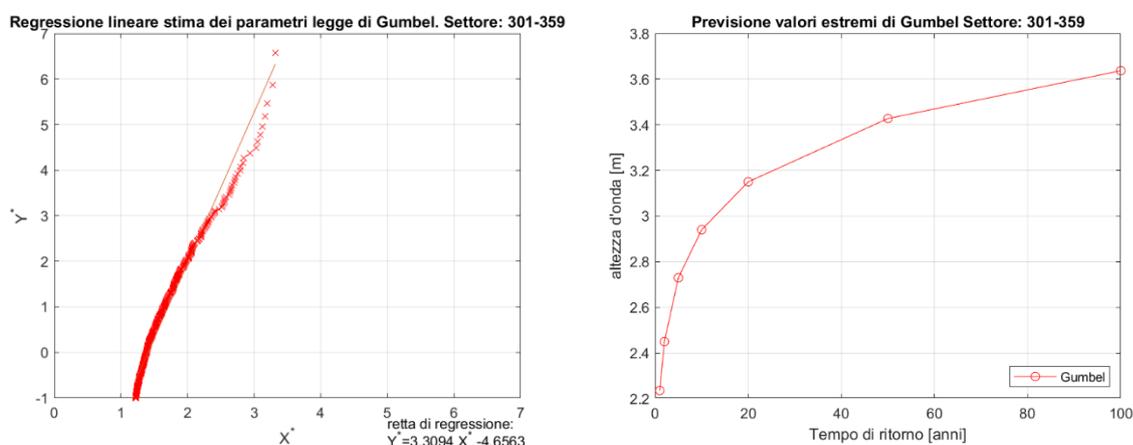


Figura 26 - Regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel a destra; previsione dei valori estremi di altezza d'onda di Gumbel a sinistra – settore 300-360°N.

In Tabella 22 vengono riportati i coefficienti β , γ e λ della funzione di Gumbel per i tre settori analizzati. Per i massimi sopra soglia individuati ed utilizzati per l'analisi degli eventi estremi si rimanda agli ALLEGATI C, D e E. In Tabella 23 sono riassunti i valori di altezza d'onda significativa associata a diversi tempi di ritorno per i tre settori analizzati.

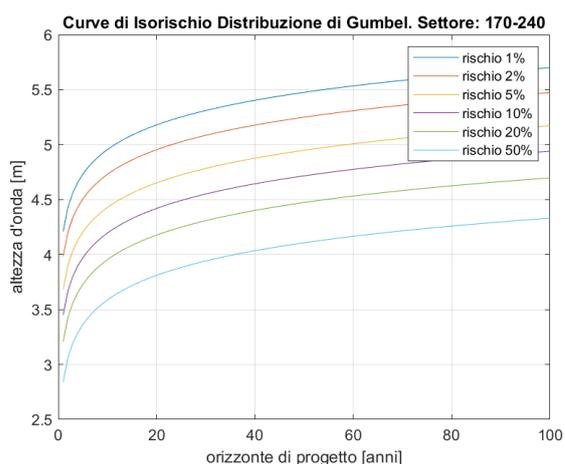
Tabella 22 – Coefficienti della funzione di Gumbel per i 3 settori analizzati.

SETTORE	SOGLIA [m]	β	γ	λ
170°-240°N	2.0	0.3232	2.1919	5.1948
280°-300°N	2.5	0.3733	2.8266	1.4617
300°-360°N	1.2	0.3022	1.4070	16.0341

Tabella 23 - Altezza d'onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100anni) al largo del Marina di Punta Ala per i settori 1470-240°N, 280-300°N e 300-360°N. Distribuzione di Gumbel.

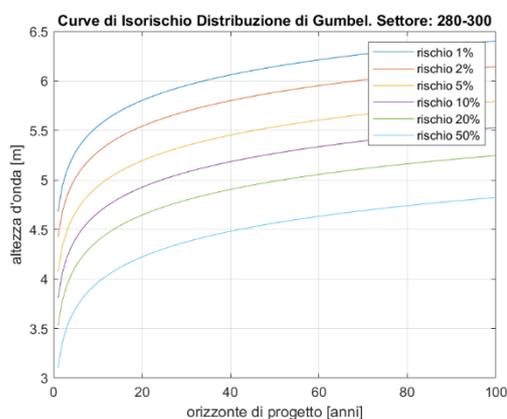
	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
Settore 170-240°N H_{m0} [m]	2.7	2.9	3.2	3.5	3.7	4.0	4.2
Settore 280-300°N H_{m0} [m]	2.8	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7
Settore 300-360°N H_{m0} [m]	2.2	2.5	2.7	2.9	3.2	3.4	3.6

Inoltre, sono state determinate le curve di isorischio riportate da Figura 27 a Figura 29 rispettivamente per i settori 170-240°N, 280-300°N e 300-360°N.



Rischio [%]	Orizzonte di progetto [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
1	4.2	4.4	4.7	5.0	5.2	5.5	5.7
2	4.0	4.2	4.5	4.7	5.0	5.2	5.5
5	3.7	3.9	4.2	4.4	4.7	4.9	5.2
10	3.5	3.7	4.0	4.2	4.4	4.7	4.9
20	3.2	3.4	3.7	4.0	4.2	4.5	4.7
50	2.8	3.1	3.4	3.6	3.8	4.1	4.3

Figura 27 - Altezze d'onda significative al largo del Marina di Punta Ala in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel settore 170-240°N; forma grafica a sinistra, forma tabellare a destra.



Rischio [%]	Orizzonte di progetto [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
1	4.7	4.9	5.3	5.5	5.8	6.1	6.4
2	4.4	4.7	5.0	5.3	5.5	5.9	6.1
5	4.1	4.3	4.7	4.9	5.2	5.5	5.8
10	3.8	4.1	4.4	4.7	4.9	5.3	5.5
20	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	5.0	5.2
50	3.1	3.4	3.7	4.0	4.2	4.6	4.8

Figura 28 - Altezze d'onda significative al largo del Marina di Punta Ala in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel settore 280-300°N; forma grafica a sinistra, forma tabellare a destra.

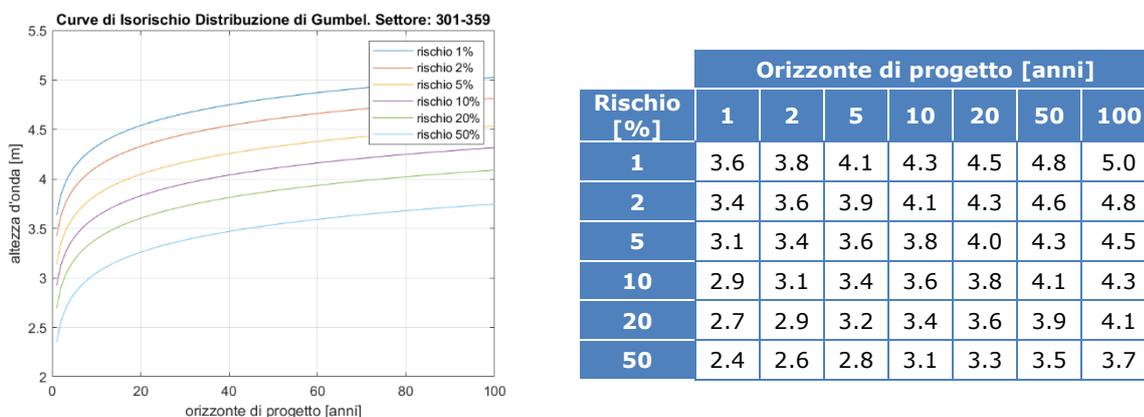


Figura 29 - Altezze d'onda significative al largo del Marina di Punta Ala in funzione dell'orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel settore 280-300°N; forma grafica a sinistra, forma tabellare a destra.

Infine, è stata inoltre determinata la legge di correlazione tra altezza significativa H_{m0} e periodo di picco T_p per i 3 settori analizzati come mostrato da Figura 30 a Figura 32 e nelle Equ. 8, 9 e 10 rispettivamente per i settori 170-240°N, 280-300°N e 300-360°N.

$$T_p = 5.083 \cdot H_{m0}^{0.412} \quad (8)$$

$$T_p = 5.298 \cdot H_{m0}^{0.400} \quad (9)$$

$$T_p = 5.620 \cdot H_{m0}^{0.328} \quad (10)$$

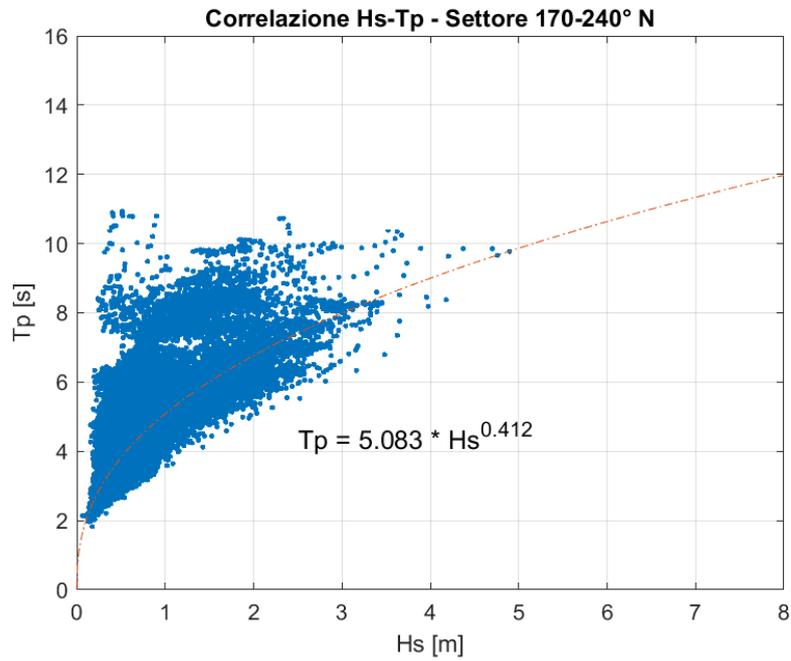


Figura 30 – Correlazione altezze d’onda H_{m0} e periodo di picco T_p settore 170-240°N.

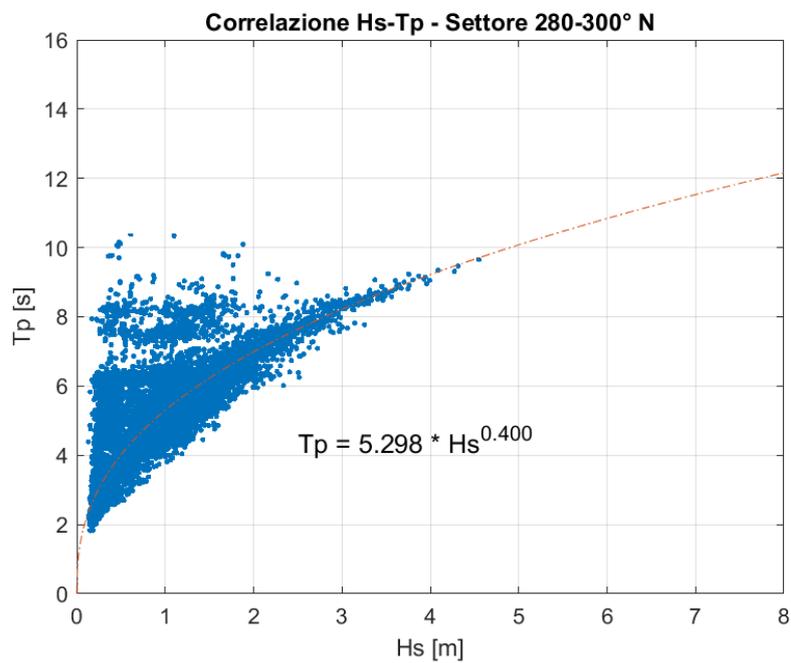


Figura 31 – Correlazione altezze d’onda H_{m0} e periodo di picco T_p settore 280-300°N.

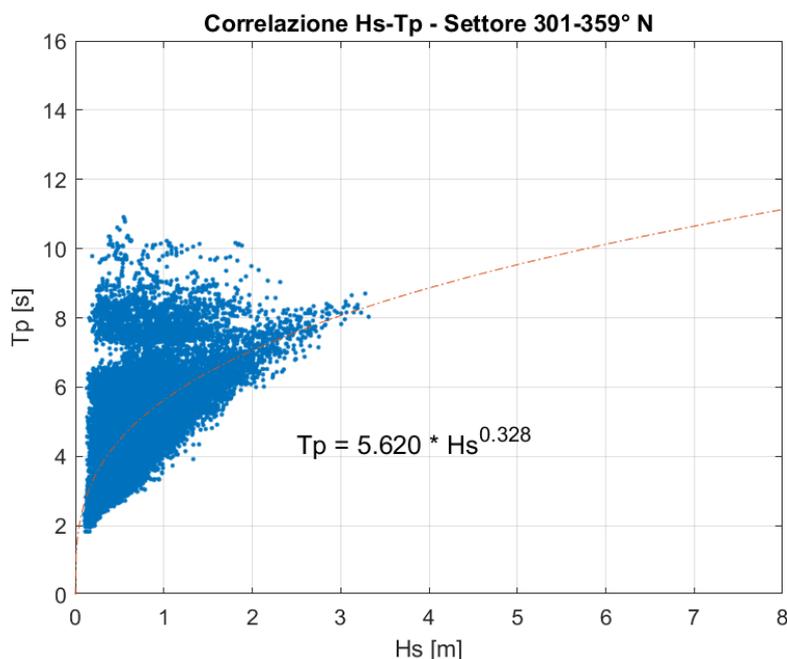


Figura 32 – Correlazione altezze d’onda H_{m0} e periodo di picco T_p settore 300-360°N.

2.1. ANALISI DELLE ONDE ESTREME PER IL PERIODO APR.-SET.

Per il punto $P_{offshore}$ (coordinate 42°84’N, 10°64’E, Figura 18), in aggiunta all’analisi degli estremi annuali, è stata condotta un’analisi degli eventi estremi limitata al solo periodo aprile-settembre. L’analisi statistica delle onde estreme per il periodo aprile-settembre è stata condotta con le stesse modalità descritte al paragrafo precedente, relativamente al settore di traversia di apertura 20°, compreso fra 280-300°N.

Gli estremi sono stati individuati quali picchi di altezza d’onda significativa superiori alla soglia $H_{threshold}$ assunta pari a 0.9m. La regressione lineare in scala logaritmica sulle coppie di altezze d’onda e probabilità stimate, (P^*, H) , è riportata in Figura 33 (sinistra) e i coefficienti stimati in Tabella 24. Le altezze d’onda significative in acque alte relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con la distribuzione di Gumbel sono riportate in Figura 33 (a destra) e in

Tabella 25. Considerando il settore 280-300°N, l’altezza d’onda significativa con tempo di ritorno 50 anni è pari a $H_{m0}=2.8m$ con la distribuzione di Gumbel. L’onda con tempo di ritorno pari a 100 anni ha $H_{m0}=3.0m$. Le curve di isorischio sono riportate in Figura 34.

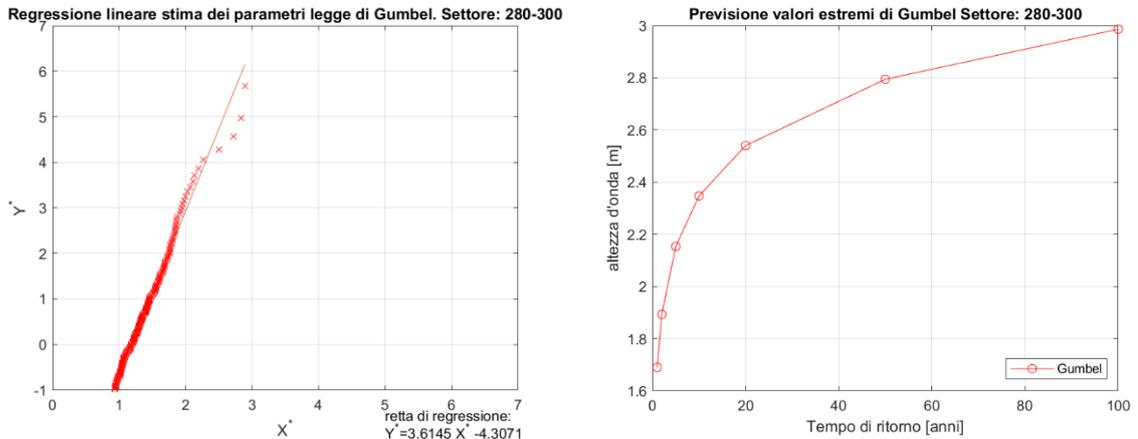


Figura 33 – A sinistra regressione lineare per la stima dei parametri di Gumbel; a destra previsione dei valori estremi di altezza d’onda di Gumbel – periodo Aprile-Settembre

Tabella 24 - Coefficienti della funzione di Gumbel - settore 280-300°N – periodo Aprile-Settembre.

SETTORE	SOGLIA [m]	β	γ	λ
280°-300°N	0.9	0.2767	1.1916	6.5682

Tabella 25 - Altezza d’onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) al largo del Marina di Punta Ala per i settori 280-300°N e 300-360°N. Distribuzione di Gumbel
 Periodo Aprile-Settembre

	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
Settore 280-300°N H _{m0} [m]	1.7	1.9	2.2	2.3	2.5	2.8	3.0

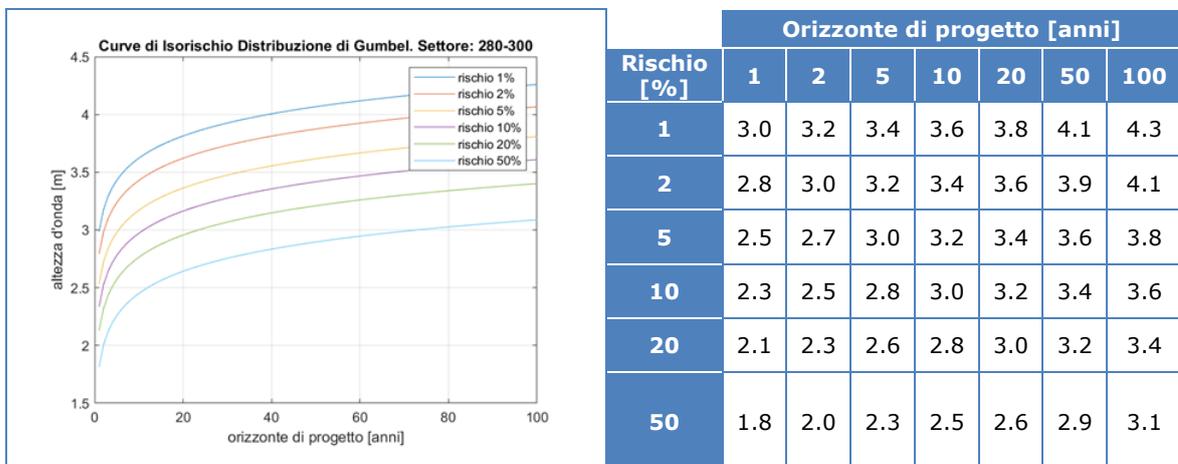


Figura 34 – Altezze d’onda significative al largo del Marina di Punta Ala in funzione dell’orizzonte temporale e del livello di rischio di superamento ottenute con le distribuzioni di Gumbel.
 Settore 280-300°N – periodo Aprile-Settembre.

Analogamente ai dati annuali è stata determinata la legge di correlazione tra altezza significativa H_{m0} e periodo di picco T_p per il settore analizzato riportate in Figura 35 e Equ. 11.

$$T_p = 5.527 \cdot H_{m0}^{0.272} \quad (11)$$

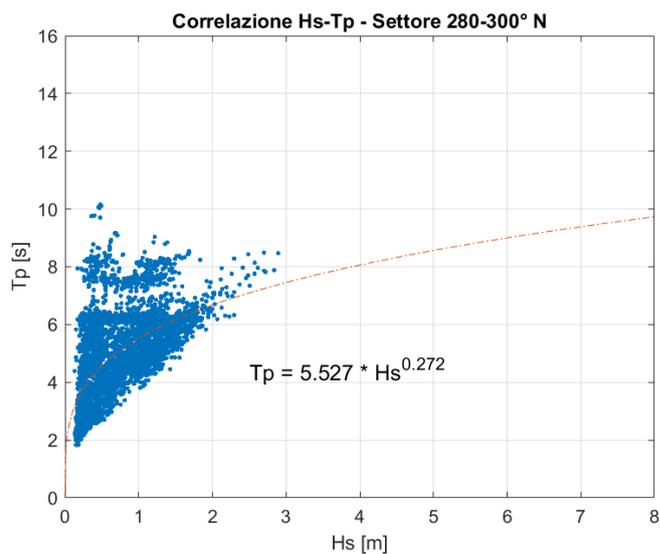


Figura 35 – Correlazione altezze d’onda H_{m0} e periodo di picco T_p
 Settore 280-300°N – periodo Aprile-Settembre

3. VERIFICA DELLE ONDE ESTREME GENERABILI ALL'INTERNO DELL'AREA DEL GOLFO DI FOLLONICA

Come descritto precedentemente, il dataset ERA5 *Hourly data on single levels from 1940 to present* utilizzato per i dati d'onda restituisce i dati su una griglia lat-lon regolare di 0,25 gradi; ciò vuol dire che l'intero Golfo di Follonica è rappresentato dai dati restituiti da un solo punto. Inoltre, è nota la difficoltà e l'incertezza di tali modelli di ricostruzione e rianalisi dei dati d'onda nei punti più prossimi alla costa per le onde generate su aree limitate spazialmente e con direzioni di provenienza da terra.

Alla luce di tali osservazioni e dall'analisi preliminare dei fetch, si è ritenuto opportuno verificare con altra metodologia le altezze d'onda degli eventi estremi per i settori di generazione ricadenti all'interno dell'area del Golfo di Follonica.

A partire dai dati di vento disponibili, è stata effettuata un'analisi dei venti estremi, con la stessa modalità POT (*Peak Over Threshold*) utilizzata precedentemente per i dati di onde al fine di definire le intensità del vento associate a determinati orizzonti temporali o tempi di ritorno. Successivamente, a partire dai valori di intensità del vento così determinati, sono state definite le altezze d'onda significative ed i periodi di picco utilizzando il metodo parametrico di previsione delle onde *Jonswap* (Hasselmann et al., 1973).

Il metodo JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) è una tecnica comunemente utilizzata per la definizione dei parametri caratteristici delle onde (altezza significativa H_{m0} e periodo di picco T_p) utilizzando i dati di vento.

Sono definiti una serie di parametri adimensionali come segue:

$$F^* = \frac{g \cdot F}{U^2} \quad (12)$$

$$H_{m0}^* = \frac{g \cdot H_{m0}}{U^2} \quad (13)$$

$$T_p^* = \frac{g \cdot T_p}{U} \quad (14)$$

$$t^* = \frac{g \cdot t}{U} \quad (15)$$

, dove:

- F = lunghezza del fetch in [m];
- U = velocità del vento ad un'altezza di 10m slm in [m/s];
- H_{m0} = altezza d'onda significativa in [m];
- T_p = periodo di picco in [s];
- t = durata della tempesta in [h].

Inoltre, sono fornite relazioni tra questi parametri adimensionali come riportato nelle equazioni di seguito:

$$H_{m0}^* = 0.0016 \cdot (F^*)^{1/2} \quad (16)$$

$$T_p^* = 0.286 \cdot (F^*)^{1/3} \quad (17)$$

$$t^* = 68.8 \cdot (F^*)^{2/3} \quad (18)$$

Sostituendo queste equazioni per ottenere le equazioni per l'altezza significativa delle onde e il periodo di picco, otteniamo le formule seguenti:

$$H_{m0} = \frac{0.0016 \cdot U \cdot F^{1/2}}{g^{1/2}} \quad (19)$$

$$T_p = \frac{0.286 \cdot U^{1/3} \cdot F^{1/2}}{g^{1/2}} \quad (20)$$

Nella condizione *fetch limited*, le equazioni Eq. 19 e Eq. 20 possono essere utilizzate con la velocità del vento misurata e la lunghezza del fetch. Nel caso invece di *duration limited*, viene calcolata una lunghezza efficace del fetch. La lunghezza del fetch viene sostituita con la lunghezza efficace del fetch nelle Eq. 19 e 20. Per calcolare la lunghezza efficace del fetch, F^* nella Eq. 18 viene sostituito con F_{eff}^* . Se $F^* < F_{eff}^*$, allora la tempesta è limitata dalla distanza percorsa (*fetch limited*). In caso contrario, è limitata dalla durata (*duration limited*).

Le condizioni di mare completamente sviluppato sono determinate con i valori dei parametri adimensionali indicati nelle formule seguenti.

$$H_{m0}^* = 0.243; T_p^* = 8.13; t^* = 71500. \quad (21)$$

Per il verificarsi della condizione *Fully developed sea* è sufficiente che uno di questi valori adimensionali sia maggiore dei valori indicati in Eq. 21.

Infine, un'ulteriore verifica viene effettuata sulla profondità dei fondali nell'area di generazione tramite le equazioni seguenti (*Young e Verhagen, 1996*).

$$H_{m0}^* = 0.24 \cdot \left\{ \tanh[0.49 \cdot (d^*)^{0.75}] \cdot \tanh \left[\frac{0.0031 \cdot (F^*)^{0.57}}{\tanh[0.49 \cdot (d^*)^{0.75}]} \right] \right\}^{0.87} \quad (22)$$

$$T_p^* = 7.54 \cdot \left\{ \tanh[0.33 \cdot (d^*)] \cdot \tanh \left[\frac{0.00052 \cdot (F^*)^{0.73}}{\tanh[0.33 \cdot (d^*)]} \right] \right\}^{0.37} \quad (23)$$

, dove F^* , H_{m0}^* e T_p^* sono definiti come in Eq. 12, Eq. 13 e Eq. 14 e d^* è definito come:

$$d^* = \frac{g \cdot d}{U^2} \quad (24)$$

, dove d è la profondità dei fondali in [m].

In particolare, questa metodologia è stata utilizzata per la verifica delle condizioni d'onda provenienti dal settore 300-360°N e per determinare quelle provenienti dal settore di Grecale.

3.1. VENTI ESTREMI PER IL SETTORE 300-360°N

L'analisi dei venti estremi è stata condotta sul dataset di dati *Hourly data on single levels from 1940 to present* individuando, quali estremi, i picchi di velocità del vento superiori alla soglia $V_{threshold}$ assunta pari a 2.0m/s. Le intensità del vento relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con la distribuzione di Gumbel sono riportate in Figura 37 a destra per il dataset ERA5 e a sinistra per il dataset di Follonica e in Tabella 27.

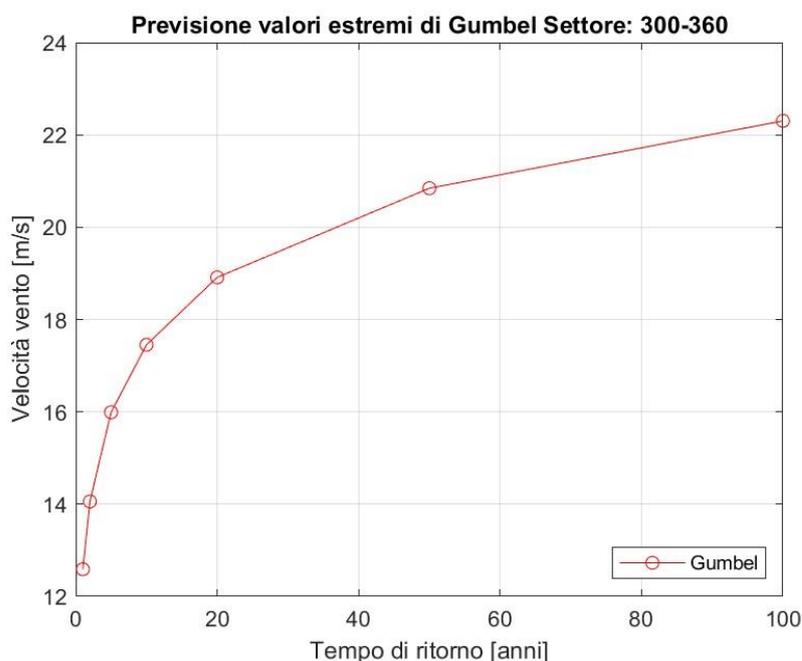


Figura 36 - Previsione dei valori estremi di velocità del vento di Gumbel. Settore 300-360°N.

Tabella 26 – Valori di velocità del vento associata a diversi tempi di ritorno (1-100anni) per il settore 300-360°N. Distribuzione di Gumbel.

	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
Settore 300-360°N V [m/s]	12.6	14.1	16.0	17.5	18.9	20.8	22.3

3.2. VENTI ESTREMI PER IL SETTORE GRECALE (22.5-67.5°N)

L'analisi dei venti estremi è stata condotta sui due dataset di dati di vento, quello ERA5 di Copernicus e quello relativo alla stazione anemometrica SIR-Follonica individuando, quali estremi, i picchi di velocità del vento superiori alla

soglia $V_{threshold}$ assunta pari a 2.0m/s. Le intensità del vento relative a tempi di ritorno pari a 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 anni, ottenute con la distribuzione di Gumbel sono riportate in Figura 37 a destra per il dataset ERA5 e a sinistra per il dataset di Follonica e in Tabella 27.

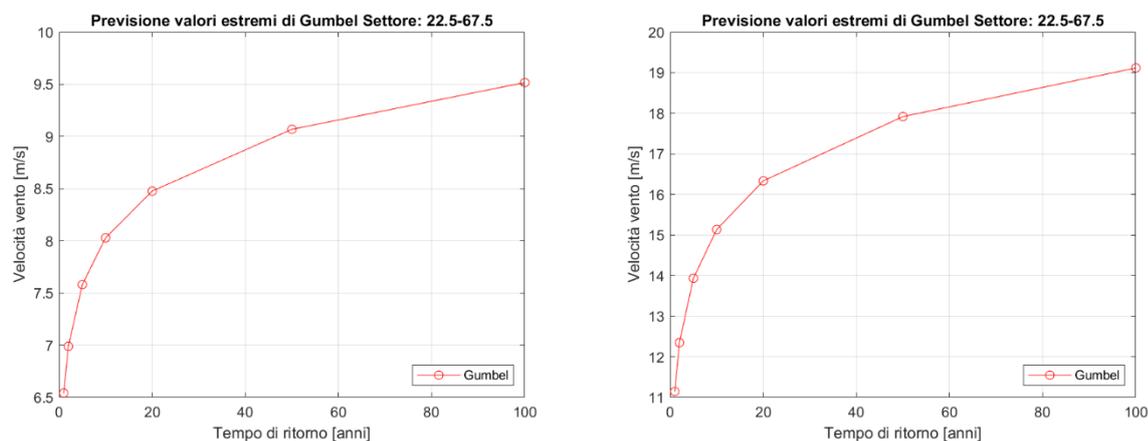


Figura 37 – A sinistra previsione dei valori estremi di velocità del vento di Gumbel per il dataset ERA5; a destra previsione dei valori estremi di velocità del vento di Gumbel per il dataset stazione anemometrica SIR-Follonica.

Tabella 27 – Velocità del vento associata a diversi tempi di ritorno (1-100anni) per il settore di Grecale per i dataset ERA5 e SIR-Follonica. Distribuzione di Gumbel.

	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
Dataset ERA5 V [m/s]	11.1	12.3	13.9	15.1	16.3	17.9	19.1
Dataset SIR-Follonica V [m/s]	6.5	7.0	7.6	8.0	8.5	9.1	9.5

3.3. CALCOLO DELLE ONDE ESTREME CON IL METODO JONSWAP

Al fine di una migliore rappresentazione delle reali condizioni d'onda da utilizzare successivamente per la propagazione delle stesse sottocosta, si è deciso di suddividere in due sottosettori il settore 300-360°N, precisamente in 300-330°N e 330-360°N.

3.3.1. Settore 300-330°N

Per la definizione dei parametri caratteristici di altezza d'onda significativa e periodo di picco degli eventi estremi provenienti dal settore 300-330°N sono stati utilizzati i seguenti dati di input:

- valori di intensità del vento con differenti periodi di ritorno come definiti precedentemente e riportati in Tabella 26;
- lunghezza del fetch geografico maggiore tra i fetch determinati nel settore, e pari a 20km;
- durata della tempesta tale da permettere la condizione *fetch limited*, cautelativa rispetto alla condizione *duration limited* e pari a 12h;
- profondità media dei fondali lungo il fetch considerato e pari a 40m.

In Tabella 28 si riportano i risultati delle elaborazioni effettuate.

Tabella 28 - Altezza d'onda significativa H_{m0} e periodo di picco T_p associati a differenti periodi di ritorno (1-100 anni) per il settore 300-330°N. Elaborazioni metodo Jonswap.

	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
H_{m0} [m]	0.9	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
T_p [s]	3.9	4.1	4.3	4.4	4.5	4.7	4.8

3.3.2. Settore 330-360°N

Per la definizione dei parametri caratteristici di altezza d'onda significativa e periodo di picco degli eventi estremi provenienti dal settore 330-360°N sono stati utilizzati gli stessi dati di input utilizzati per il settore 300-330°N ad eccezione di quelli riportati di seguito:

- lunghezza del fetch geografico maggiore tra i fetch determinati nel settore, e pari a 16km;
- profondità media dei fondali lungo il fetch considerato e pari a 30m.

In Tabella 29 si riportano i risultati delle elaborazioni effettuate.

Tabella 29 - Altezza d'onda significativa H_{m0} e periodo di picco T_p associati a differenti periodi di ritorno (1-100 anni) per il settore 330-360°N. Elaborazioni metodo Jonswap.

	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
H_{m0} [m]	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
T_p [s]	3.7	3.8	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4

3.3.3. Settore di Grecale

Per la definizione dei parametri caratteristici di altezza d'onda significativa e periodo di picco degli eventi estremi provenienti dal settore di Grecale (22.5-67.56°N) sono stati utilizzati i seguenti dati di input:

- valori di intensità del vento con differenti periodi di ritorno come definiti precedentemente e riportati in Tabella 27. A favore di sicurezza sono state considerate le velocità del vento definite sulla base del dataset ERA5;
- lunghezza del fetch geografico maggiore tra i fetch determinati nel settore, e pari a 10km;
- durata della tempesta tale da permettere la condizione *fetch limited*, cautelativa rispetto alla condizione *duration limited* e pari a 12h;
- profondità media dei fondali lungo il fetch considerato e pari a 15m.

In Tabella 30 si riportano i risultati delle elaborazioni effettuate.

Tabella 30 - Altezza d'onda significativa H_{m0} e periodo di picco T_p associati a differenti periodi di ritorno (1-100 anni) per il settore di Grecale. Elaborazioni metodo Jonswap.

	Tempo di ritorno TR [anni]						
	1	2	5	10	20	50	100
H_{m0} [m]	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0
T_p [s]	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6

4. ANALISI CONGIUNTA LIVELLI DEL MARE E ALTEZZE D'ONDA

Le serie di dati orarie dei livelli totali del mare e delle altezze d'onda significative a largo del paraggio di studio sono state analizzate anche congiuntamente per fornire una panoramica sulle combinazioni verificatesi negli ultimi 40 anni.

L'analisi è restituita in forma di tabella bi-variata delle classi di altezza d'onda significativa e livelli totali del mare come riportato in Tabella 31.

Tabella 31 - Clima ondoso meteomarinario al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} - Twl . Frequenze in percentuale relative a classi di altezze d'onda significative e livelli totali del mare

Twl [m]	Altezza significativa H_{m0} [m]						TOTALE
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	
-0.7 - -0.6							0.00
-0.6 - -0.5	*						0.00
-0.5 - -0.4	0.15	0.01					0.16
-0.4 - -0.3	1.38	0.07	*				1.45
-0.3 - -0.2	6.77	0.35	0.01	*	*		7.13
-0.2 - -0.1	15.84	1.22	0.06	*	*		17.13
-0.1 - 0	21.75	2.53	0.17	0.01	*		24.47
0 - 0.1	21.56	3.26	0.28	0.02	*		25.13
0.1 - 0.2	13.60	3.03	0.33	0.03	*		16.99
0.2 - 0.3	3.75	1.93	0.27	0.03	*	*	5.97
0.3 - 0.4	0.50	0.67	0.13	0.02	*	*	1.32
0.4 - 0.5	0.05	0.12	0.04	0.01	*	*	0.23
0.5 - 0.6	*	0.02	*	*			0.03
0.6 - 0.7	*	*					0.00
TOTALE	85.37	13.20	1.31	0.12	0.01	0.00	100.00

I risultati sono stati elaborati anche in forma grafica tramite funzioni *contour plot* per una più semplice interpretazione dei risultati.

Le contour line identificano al loro interno le aree in cui si possono verificare determinate combinazioni di altezze d'onda e livelli del mare con una certa frequenza di accadimento. A titolo di esempio la contour line di Figura 38 con valore nominale pari a 1 definisce un'area in cui la massima altezza d'onda che può presentarsi è di poco superiore a 2m in combinazione con livelli del mare compresi tra 0 e +0.2m di sovrizzo. Questa combinazione ha una frequenza di accadimento pari al 1% su un totale di 389'537 onde analizzate.

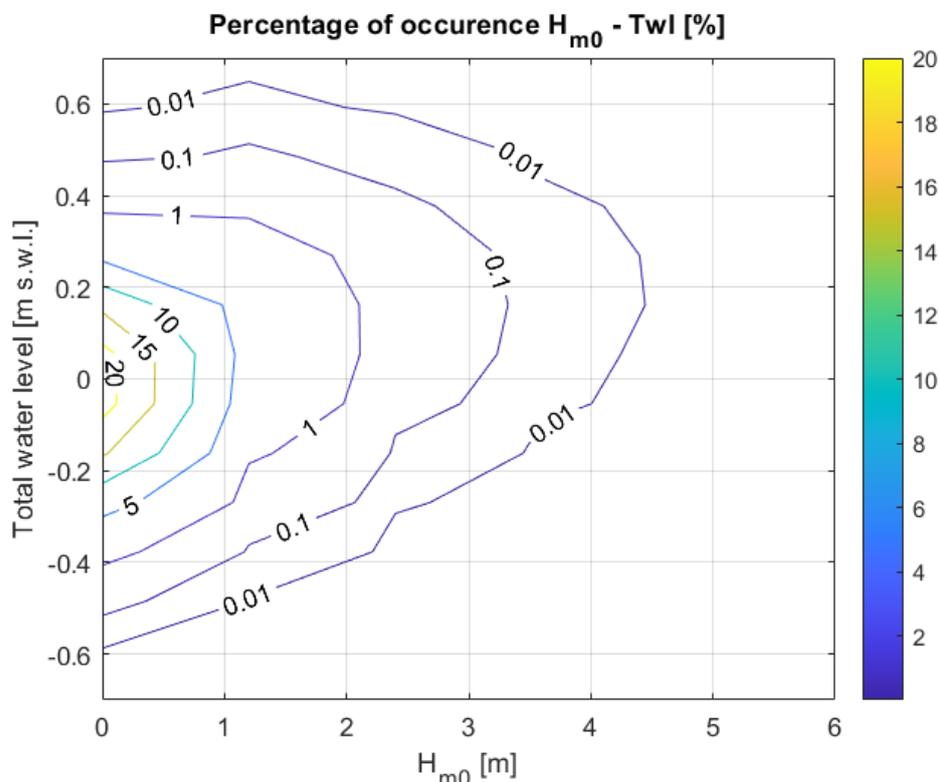


Figura 38 - Contour plot delle percentuali di accadimento delle combinazioni di altezze d'onda e livelli del mare

4.1. ANALISI CONGIUNTA LIVELLI DEL MARE E ALTEZZE D'ONDA PER IL PERIODO APRILE-SETTEMBRE

Analogamente alle elaborazioni condotte sulla serie completa di dati orari a disposizione, sono state determinate la tabella bi-variata (Tabella 32) e i contour plot (Figura 39) relativi alle classi di altezze d'onda e livelli del mare.

Tabella 32 - Clima ondoso meteomarinario al largo del Marina di Punta Ala: H_{m0} -Twl. Frequenze in percentuale relative a classi di altezze d'onda significative e livelli totali del mare
 Periodo Aprile-Settembre

Twl [m]	Altezza significativa H_{m0} [m]				TOTALE
	0-1	1-2	2-3	3-4	
-0.7 - -0.6					0.00
-0.6 - -0.5					0.00
-0.5 - -0.4	*				0.00
-0.4 - -0.3	0.38	*			0.38
-0.3 - -0.2	4.82	0.07			4.89
-0.2 - -0.1	15.69	0.51	0.01		16.21
-0.1 - 0	24.34	1.27	0.04		25.65
0 - 0.1	25.57	1.74	0.05	*	27.36
0.1 - 0.2	17.54	1.68	0.06	*	19.29
0.2 - 0.3	4.40	1.02	0.05	*	5.47
0.3 - 0.4	0.39	0.26	0.02		0.67
0.4 - 0.5	0.03	0.03	*		0.07
0.5 - 0.6	*	*			0.01
0.6 - 0.7					0.00
TOTALE	93.16	6.60	0.23	0.00	100.00

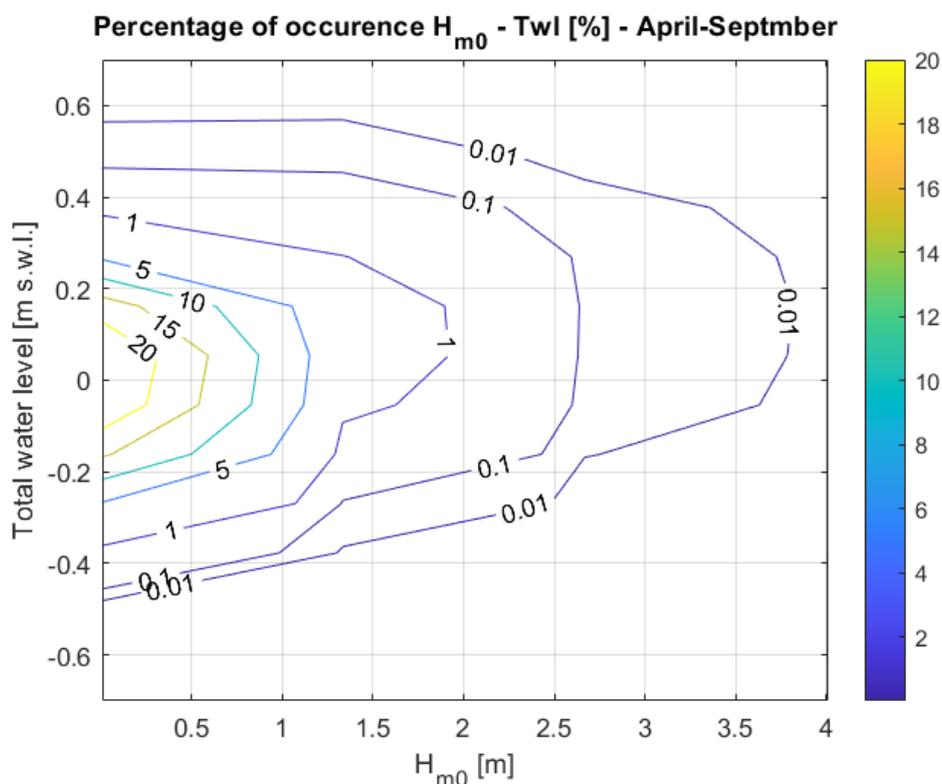


Figura 39 - Contour plot delle percentuali di accadimento delle combinazioni di altezze d'onda e livelli del mare - Periodo Aprile-Settembre

5. PROPAGAZIONE A COSTA

Durante il fenomeno di propagazione da acque alte a costa i parametri che contraddistinguono l'onda subiscono delle variazioni, principalmente a seguito di fenomeni rifrattivi e diffrattivi, nonché dei fenomeni dissipativi dovuti all'attrito al fondo che possono verificarsi al decrescere della profondità del fondale. Il frangimento è un ulteriore fenomeno determinato per la modifica delle caratteristiche del moto ondoso nel suo avvicinamento a costa. La presente sezione mostra le caratteristiche dei moti ondosi una volta propagati fino ai fondali antistanti la diga foranea del Marina di Punta Ala.

5.1. CARATTERIZZAZIONE DEI MOTI ONDOSI PROPAGATI A COSTA

I moti ondosi risultanti dall'analisi statistica al largo sono stati propagati fino ai fondali antistanti le opere previste per l'ampliamento della diga del Marina di Punta Ala, ad una distanza di 20m dal piede delle opere, con riferimento alle seguenti casistiche:

- (i) Moti ondosi provenienti, al largo, dal settore di traversia 280-300°N e aventi tempi di ritorno pari a 2, 10, 20, 50 e 100 anni;
- (ii) Moti ondosi provenienti, al largo, dal settore di traversia 300-330°N e aventi tempi di ritorno pari a 2, 10, 20, 50 e 100 anni;
- (iii) Moti ondosi provenienti, al largo, dal settore di traversia 330-360°N e aventi tempi di ritorno pari a 2, 10, 20, 50 e 100 anni.

Non esistono relazioni universalmente valide per la definizione di un periodo (sia esso medio o di picco) da associare alle onde significative estreme, in quanto la relazione altezza-periodo è influenzata da fattori locali quali la morfologia e l'orografia dell'area in esame. Per la scelta del periodo da associare a ciascun moto ondoso da propagare a costa, è stata quindi considerata la relazione fra altezze significative e periodi specifica per il punto al largo $P_{offshore}$ di Figura 18.

Per il moto ondoso proveniente dai settori 280-300°N lo scatter plot di altezze e periodi al largo (Figura 31) mostrano come sia possibile individuare una relazione che meglio si adatti ai dati di moto ondoso per il sito in esame avente la seguente espressione:

$$T_p = 5.298 \cdot H_{m0}^{0.400} \quad (9)$$

Per i moti ondosi provenienti dai settori 300-330°N e 330-360°N sono stati utilizzati i valori di altezza significativa e periodo di picco definiti con la procedura descritta nel capitolo 3 (*Verifica delle onde estreme generabili all'interno dell'area del golfo di Follonica*).

In sintesi, per la propagazione a costa, i moti ondosi estremi al largo sono stati associati ai relativi periodi e direzioni come di seguito:

- (i) Per il settore di traversia 280-300°N, ai moti ondosi con tempo di ritorno 2, 10, 20, 50 e 100 anni è stato associato il periodo T_p risultante dall'applicazione della relazione in Eq. (9). A ciascuna onda estrema è stata associata la direzione di propagazione 290°N (i.e. la bisettrice del settore considerato).
- (ii) Per il settore di traversia 300-330°N, sono stati utilizzati i valori di altezza significativa e periodo di picco con tempo di ritorno 2, 10, 20, 50 e 100 anni riportati in Tabella 28. A ciascuna onda è state associate la direzioni di propagazione 330°N.
- (iii) Per il settore di traversia 330-360°N, sono stati utilizzati i valori di altezza significativa e periodo di picco con tempo di ritorno 2, 10, 20, 50 e 100 anni riportati in Tabella 29. A ciascuna onda è state associate la direzioni di propagazione 360°N.

Alle diverse condizioni di moto ondoso sono stati associati livelli di sovrалzo del medio mare differenti. Indefinitiva, le caratteristiche riassuntive dei moti ondosi definiti per la propagazione a costa, concordati con il Committente ed il Progettista sono riportate in Tabella 33.

Tabella 33 – Parametri caratteristici delle onde propagate a costa

T_r [anni]	H_s [m]	T_p [s]	Dir [°N]	SWL [m MSL]	note livello
2	3.2	8.4	290	0.30	High Tide +~ 10 cm sovrалzo
10	3.8	9.0		0.50	Tr 5 anni
20	4.1	9.3		0.50	Tr 5 anni
50	4.4	9.6		0.60	Tr 10 anni
50+SLR	4.4	9.6		1.10	Tr 10 anni+SLR
100	4.7	9.8		0.60	Tr 10 anni
100+SLR	4.7	9.8		1.10	Tr 10 anni+SLR
2	1.0	4.1	330	0.30	High Tide +~ 10 cm sovrалzo
10	1.3	4.4		0.50	Tr 5 anni
20	1.4	4.5		0.55	Tr 5 anni
50	1.5	4.7		0.60	Tr 10 anni
50+SLR	1.5	4.7		1.10	Tr 10 anni+SLR
100	1.6	4.8		0.65	Tr 10 anni
100+SLR	1.6	4.8		1.10	Tr 10 anni+SLR
2	0.9	3.8	360	0.30	High Tide +~ 10 cm sovrалzo
10	1.1	4.1		0.50	Tr 5 anni
20	1.2	4.2		0.55	Tr 5 anni
50	1.3	4.3		0.60	Tr 10 anni
50+SLR	1.3	4.3		1.10	Tr 10 anni+SLR
100	1.4	4.4		0.65	Tr 10 anni
100+SLR	1.4	4.4		1.10	Tr 10 anni+SLR

Per quanto riguarda il settore 170-240°N, di concerto con il Committente non sono state effettuate nuove simulazioni di propagazione da largo verso costa. Per questo settore l'aggiornamento degli eventi estremi ha restituito valori più bassi di quelli definiti nei precedenti studi su dataset di dati più ristretti.

Dunque, per la valutazione dei risultati di propagazione a costa si rimanda al report dello *Studio meteomarinò e studio numerico dell'interazione tra le nuove opere previste per l'ampliamento del Marina di Punta Ala e le dinamiche marine* del Gennaio 2015.

Per comodità di lettura si riportano di seguito i valori di altezze d'onda degli eventi estremi associati a differenti periodi di ritorno (Tabella 34) e i risultati delle simulazioni delle onde propagate a costa (Tabella 35) per il settore 170-240°N.

Tabella 34 - Altezza d'onda significativa associata a diversi tempi di ritorno (1-100 anni) al largo del Marina di Punta Ala per il settore 170-240°N. Distribuzione di Gumbel. - Studio Gennaio 2015.

	Tempo di ritorno TR [anni]					
	2	5	10	20	50	100
Settore 170-240°N H_{m0} [m]	3.7	4.2	4.5	4.9	5.3	5.7

Tabella 35 - Altezza d'onda significativa e direzione a largo e propagate a costa su fondali di -20m per il settore 170-240°N. - Studio Gennaio 2015.

Tr	A largo			A costa (fondali di 20m)		
	5 gg/anno	5 anni	50 anni	5 gg/anno	5 anni	50 anni
H_{m0} [m]	2.0	4.2	5.3	1.2	2.5	3.3
Dir [°N]	240	240	240	260	242	256

5.2. SIMULAZIONI NUMERICHE

Per le simulazioni numeriche è stato utilizzato il modello ONDA3.0 sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile Dell'Università di Firenze (Cappiotti, 2003). Noto il moto ondoso al largo (caratterizzato da altezza, direzione e periodo), il modello permette di ricostruire le altezze d'onda su un'assegnata batimetria, simulando i processi combinati di rifrazione-diffrazione, abbattimento dell'altezza d'onda per effetto del frangimento e dell'attrito al fondo.

Il modello si basa sull'integrazione numerica dell'equazione proposta da Kirby nel 1986, che deriva da un'approssimazione parabolica (Radder, 1979) dell'equazione ellittica detta Mild Slope Equation, ricavata da Berkhoff nel 1972.

Il frangimento viene valutato con il criterio di Battjes & Janssen, 1978, mentre l'attrito al fondo con la relazione di Putnam & Jonsson, 1949, in cui il coefficiente di attrito al fondo per il moto ondoso è calcolato con il modello di Swart, 1974. L'equazione viene risolta per via numerica con metodo alle differenze finite noto come Crank-Nicolson (Hirsch, 1991).

5.2.1. Impostazione del modello

Le dimensioni del dominio numerico sono pari a 9000m nella direzione di propagazione dell'onda al largo e 5000m in direzione ortogonale. La risoluzione spaziale del modello di simulazione numerica è pari a 5m. Al fine di migliorare la precisione numerica dei risultati, le griglie del dominio di calcolo sono state allineate secondo la direzione di propagazione dei moti ondosi al largo (Figura 40).

I dati batimetrici per la costruzione del modello digitale dei fondali utilizzati nel presente studio sono stati reperiti mediante digitalizzazione dalla carta nautica dell'I.I.M. "Dal Canale di Piombino al Promontorio Argentario e Scoglio Africa" uniti al rilievo dei fondali antistanti il Marina di Punta Ala eseguita dalla società GeoCoste nel 2019 ed integrati con il rilievo eseguito nel 2023 dalla società Oikos.

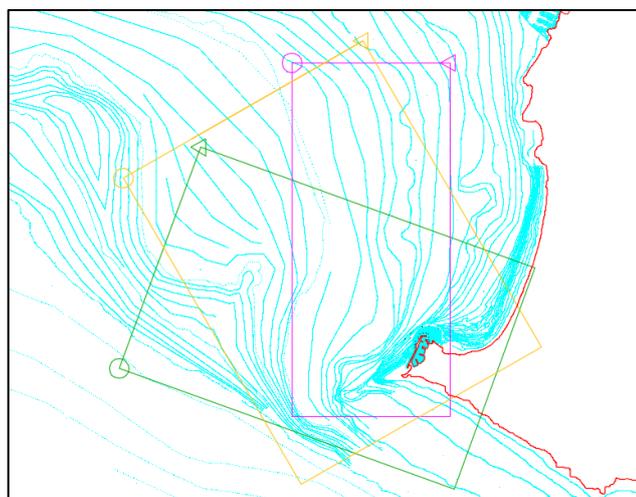


Figura 40 – Griglie del dominio di calcolo.

I moti ondosi caratteristici al largo sono stati propagati a costa e analizzati per la zona di interesse con riferimento ad una serie di 13 punti posizionati a 20m di distanza dal piede dell'opera in progetto e ulteriori 6 punti richiesti dal Committente e dal Progettista.

In Figura 41 è riportata la localizzazione dei punti di estrazione dati ed in Tabella 36 sono riportate le relative coordinate nel sistema di riferimento UTM32-ED50.

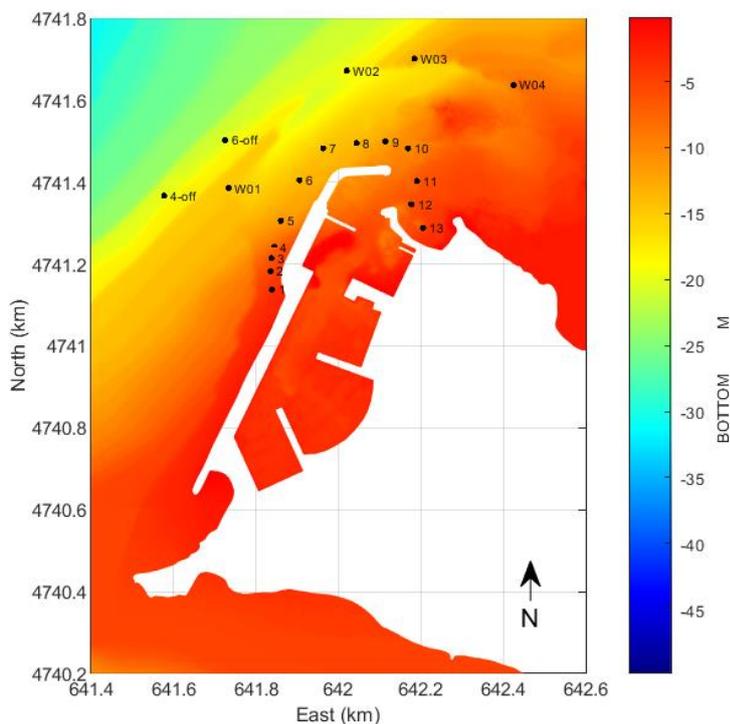


Figura 41 - Localizzazione dei punti di estrazione dati del modello di propagazione a costa

Tabella 36 – Coordinate UTM32-ED50 dei punti di estrazione dati a costa

Punto	East[m]	North[m]	Z [m MSL]
1	641839.293	4741137.887	-3.8
2	641834.857	4741182.568	-5.3
3	641837.476	4741214.284	-6.5
4	641844.114	4741241.528	-7.6
5	641860.382	4741305.632	-11.2
6	641905.539	4741404.771	-13.7
7	641962.742	4741482.938	-14.7
8	642044.190	4741495.837	-13.6
9	642113.786	4741498.982	-11.9
10	642168.886	4741482.555	-10.7
11	642190.226	4741402.976	-6.8
12	642176.626	4741345.928	-6.8
13	642205.033	4741287.948	-5.4
4-off	641577.067	4741367.077	-20.0
6-off	641725.381	4741502.603	-20.0
W01	641733.334	4741385.655	-15.0
W02	642020.219	4741672.540	-18.7
W03	642184.391	4741701.488	-13.1
W04	642424.393	4741637.180	-8.4

5.2.2. Risultati

I risultati delle simulazioni numeriche, per tutti i moti ondosi al largo indicati in Tabella 36 sono riportati nelle tabelle e figure di seguito; in particolare:

- In Tabella 37 e Tabella 38 sono riportati per i 19 punti di output i valori di altezza significativa [m] e direzione [°N] per le onde provenienti da largo con direzione 290°N, rispettivamente per le onde con tempo di ritorno pari a 2, 10 e 20 anni e 50 e 100 anni; da Figura 42 a Figura 45 vengono riportati i campi vettoriali delle altezze significative per le onde con tempo di ritorno 50 e 100 anni con e senza *see level rise*.
- Tabella 39 e Tabella 40 sono riportati per i 19 punti di output i valori di altezza significativa [m] e direzione [°N] per le onde provenienti da largo con direzione 330°N, rispettivamente per le onde con tempo di ritorno pari a 2, 10 e 20 anni e 50 e 100 anni; da Figura 46 a Figura 49 vengono riportati i campi vettoriali delle altezze significative per le onde con tempo di ritorno 50 e 100 anni con e senza *see level rise*.
- Tabella 41 e Tabella 42 sono riportati per i 19 punti di output i valori di altezza significativa [m] e direzione [°N] per le onde provenienti da largo con direzione 360°N, rispettivamente per le onde con tempo di ritorno pari a 2, 10 e 20 anni e 50 e 100 anni; da Figura 50 a Figura 53 vengono riportati i campi vettoriali delle altezze significative per le onde con tempo di ritorno 50 e 100 anni con e senza *see level rise*.

Le onde provenienti dal settore 280-300°N mostrano tutte un fenomeno di focalizzazione delle onde nell'area compresa tra i punti di estrazione 4 e 6, corrispondenti al tratto della Diga Foranea Maestrale del Marina di Punta Ala. Le altezze d'onda a circa 5km di distanza dall'opera sono per lo più invariate rispetto all'altezza d'onda a largo; nei successivi 3km di propagazione verso costa le altezze d'onda crescono fino a valori maggiori di 5m in corrispondenza dei punti di estrazione 4, 5 e 6 a 20m dalla diga foranea e 4-off e 6-off su fondali di 20m.

Inoltre, una singolarità si verifica in corrispondenza della nuova testata della diga foranea (punto di estrazione 10), dove per fenomeni di focalizzazione e frangimento si raggiungono i valori di altezza d'onda massimi.

Le onde propagate dalle direzioni 330°N e 360°N giungono a costa per lo più invariate e frangono sulla diga foranea del Marina di Punta Ala.

Tabella 37 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 290°N – Tr 2, 10 e 20 anni.

PUNTO	Tr=2 anni		Tr=10 anni		Tr=20 anni	
	$H_s=3.2m - T_p=8.4s$ $s=+0.3m$		$H_s=3.8m - T_p=9.0s$ $s=0.5m$		$H_s=4.1m - T_p=9.3s$ $s=0.5m$	
	Hs [m]	Dir [°N]	Hs [m]	Dir [°N]	Hs [m]	Dir [°N]
1	2.3	296	2.5	296	2.5	296
2	3.1	297	3.2	297	3.3	297
3	3.5	297	3.9	298	4.0	298
4	3.5	299	4.4	299	4.6	301
5	3.1	299	3.9	299	4.3	299
6	3.0	295	3.7	296	4.1	296
7	2.8	295	3.5	296	3.8	296
8	2.7	296	3.3	297	3.6	296
9	2.1	317	2.5	311	2.9	307
10	3.5	284	4.5	280	5.0	281
11	1.4	311	1.8	312	1.9	312
12	0.4	351	0.6	5	0.7	9
13	0.3	338	0.4	351	0.5	359
4-off	3.3	291	4.0	291	4.4	291
6-off	3.0	292	3.7	291	4.1	291
W01	3.1	294	3.9	294	4.3	295
W02	2.8	291	3.2	292	3.5	292
W03	2.9	291	3.3	291	3.5	291
W04	2.8	286	3.3	287	3.5	288

Tabella 38 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 290°N – Tr 50 e 100 anni.

PUNTO	Tr=50 anni		Tr=50 anni + SLR		Tr=100 anni		Tr=100 anni + SLR	
	$H_s=4.4m - T_p=9.6s$ $s=0.6m$		$H_s=4.4m - T_p=9.6s$ $s=1.1m$		$H_s=4.7m - T_p=9.8s$ $s=0.6m$		$H_s=4.7m - T_p=9.8s$ $s=1.1m$	
	Hs [m]	Dir [°N]						
1	2.5	296	2.8	296	2.5	297	2.8	296
2	3.3	297	3.6	297	3.3	298	3.6	297
3	4.0	298	4.3	298	4.0	298	4.3	298
4	4.6	301	4.9	301	4.7	301	4.9	301
5	4.8	299	4.7	299	5.2	300	5.2	299
6	4.5	296	4.5	296	4.9	296	4.9	296
7	4.2	296	4.2	295	4.6	296	4.6	295
8	4.0	296	4.0	296	4.4	296	4.4	296
9	3.4	303	3.5	301	3.9	300	4.0	298
10	5.3	283	5.5	279	5.4	285	5.7	282
11	2.0	312	2.0	313	2.0	313	2.0	313
12	0.7	11	0.7	11	0.7	11	0.7	11
13	0.5	3	0.6	359	0.6	358	0.7	355
4-off	4.8	291	4.8	291	5.2	291	5.2	291
6-off	4.5	291	4.5	291	4.9	291	4.9	291
W01	4.7	295	4.7	295	5.1	295	5.1	295
W02	3.8	292	3.8	292	4.1	292	4.1	292
W03	3.8	291	3.8	291	4.1	292	4.1	292
W04	3.8	289	3.9	289	4.1	289	4.2	289

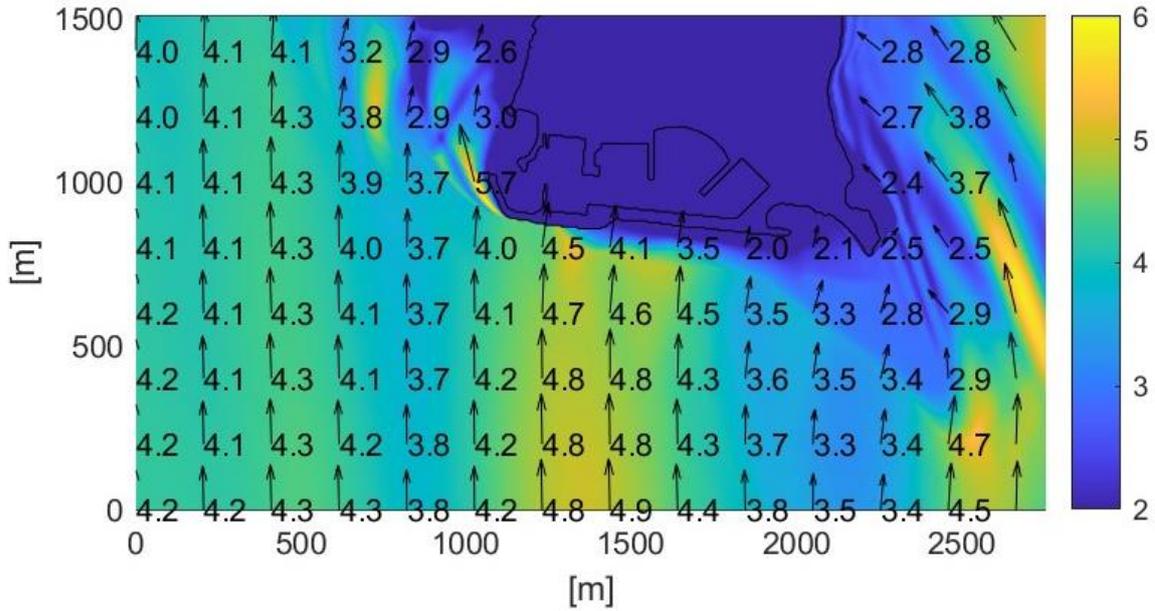


Figura 42 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=50 anni - dir 290°N.

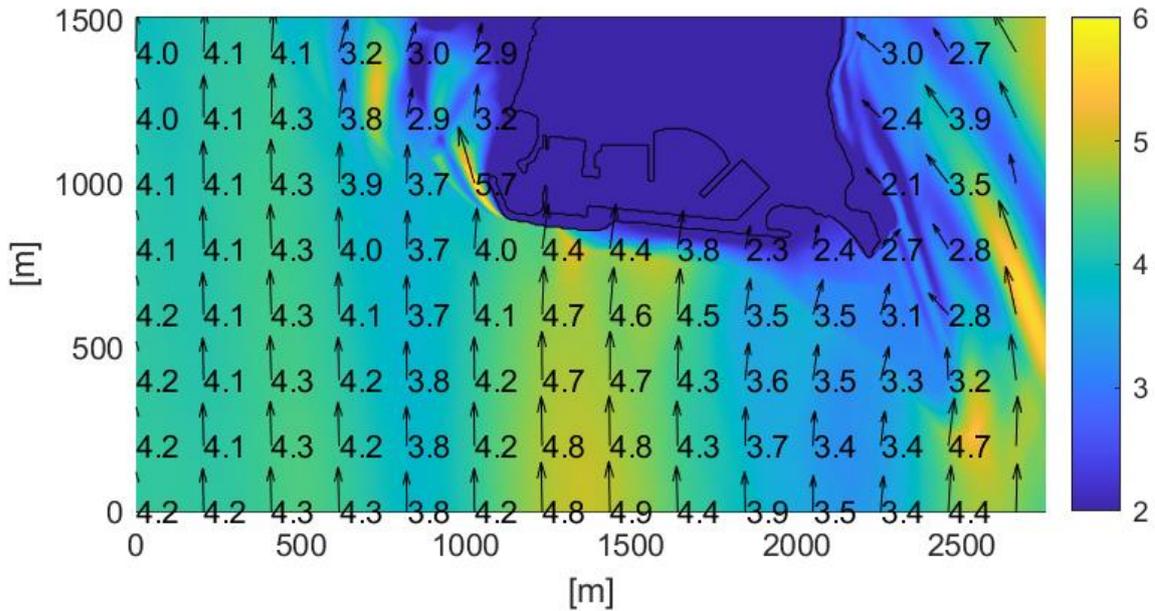


Figura 43 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=50 anni + SLR - dir 290°N.

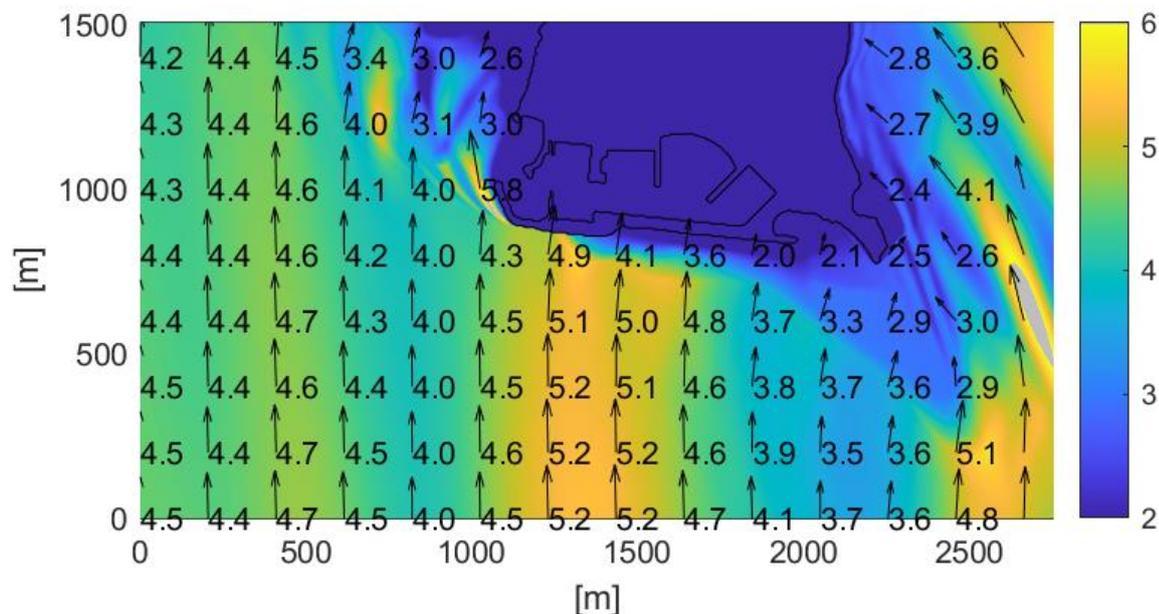


Figura 44 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=100 anni - dir 290°N.

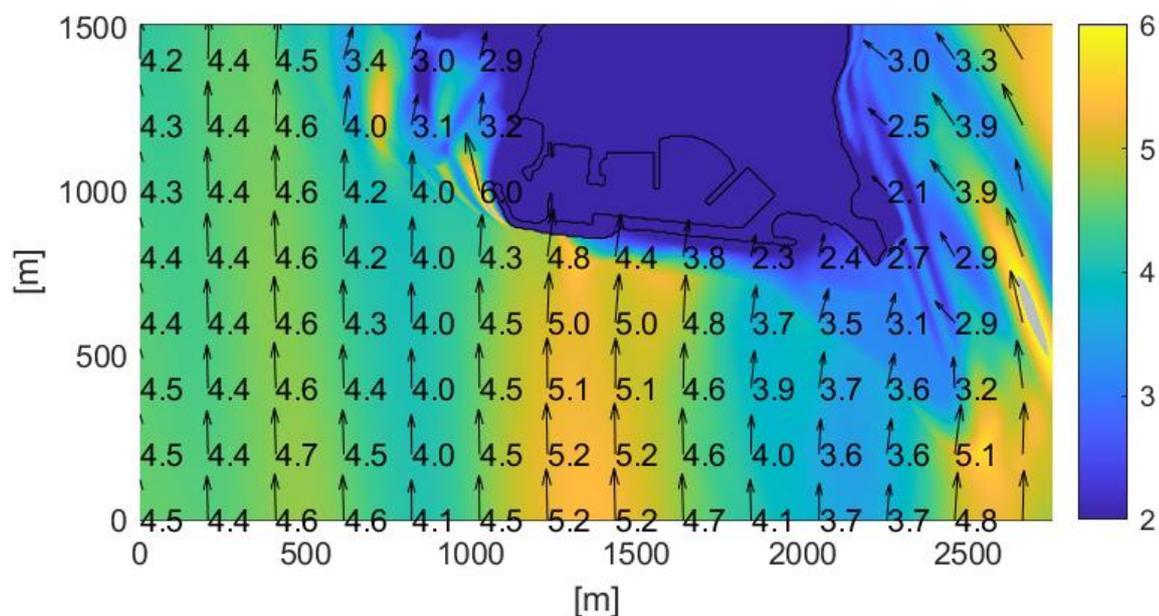


Figura 45 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=100 anni + SLR - dir 290°N.

Tabella 39 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 330°N – Tr 2, 10 e 20 anni.

PUNTO	Tr=2 anni		Tr=10 anni		Tr=20 anni	
	$H_s=1.0m - T_p=4.1s$ $s=+0.3m$		$H_s=1.3m - T_p=4.4s$ $s=0.5m$		$H_s=1.4m - T_p=4.5s$ $s=0.5m$	
	Hs [m]	Dir [°N]	Hs [m]	Dir [°N]	Hs [m]	Dir [°N]
1	0.9	325	1.2	324	1.3	324
2	0.9	328	1.2	328	1.3	328
3	0.9	330	1.2	330	1.3	330
4	1.0	330	1.2	330	1.3	330
5	1.0	330	1.3	330	1.4	330
6	1.0	330	1.3	330	1.4	330
7	1.0	330	1.3	330	1.4	330
8	1.0	330	1.3	330	1.4	330
9	1.0	330	1.3	330	1.4	330
10	1.0	330	1.3	330	1.3	330
11	0.9	331	1.2	331	1.3	331
12	0.5	330	0.6	331	0.6	332
13	0.5	325	0.6	325	0.6	325
4-off	1.0	330	1.3	330	1.4	330
6-off	1.0	330	1.3	330	1.4	330
W01	1.0	330	1.3	330	1.4	330
W02	1.0	330	1.3	330	1.4	330
W03	1.0	330	1.3	330	1.4	330
W04	1.0	330	1.3	330	1.4	330

Tabella 40 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 330°N – Tr 50 e 100 anni.

PUNTO	Tr=50 anni		Tr=50 anni + SLR		Tr=100 anni		Tr=100 anni + SLR	
	$H_s=1.5m - T_p=4.7s$ $s=0.6m$		$H_s=1.5m - T_p=4.7s$ $s=1.1m$		$H_s=1.6m - T_p=4.8s$ $s=0.6m$		$H_s=1.6m - T_p=4.8s$ $s=1.1m$	
	Hs [m]	Dir [°N]						
1	1.4	324	1.4	324	1.5	323	1.5	324
2	1.4	328	1.4	328	1.5	328	1.5	328
3	1.4	329	1.4	329	1.5	329	1.5	329
4	1.4	330	1.4	330	1.5	330	1.5	330
5	1.5	330	1.5	330	1.5	330	1.5	330
6	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
7	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
8	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
9	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
10	1.4	330	1.4	330	1.5	330	1.5	330
11	1.4	329	1.4	329	1.5	328	1.5	328
12	0.7	332	0.7	332	0.7	332	0.7	332
13	0.6	325	0.6	326	0.7	325	0.7	326
4-off	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
6-off	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
W01	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
W02	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
W03	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330
W04	1.5	330	1.5	330	1.6	330	1.6	330

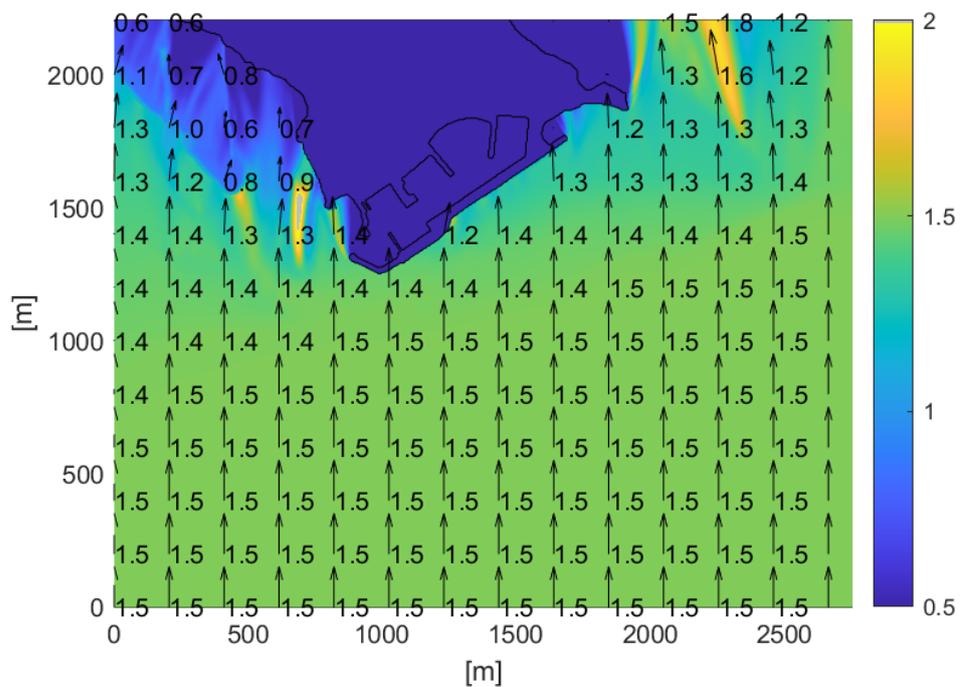


Figura 46 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=50 anni - dir 330°N.

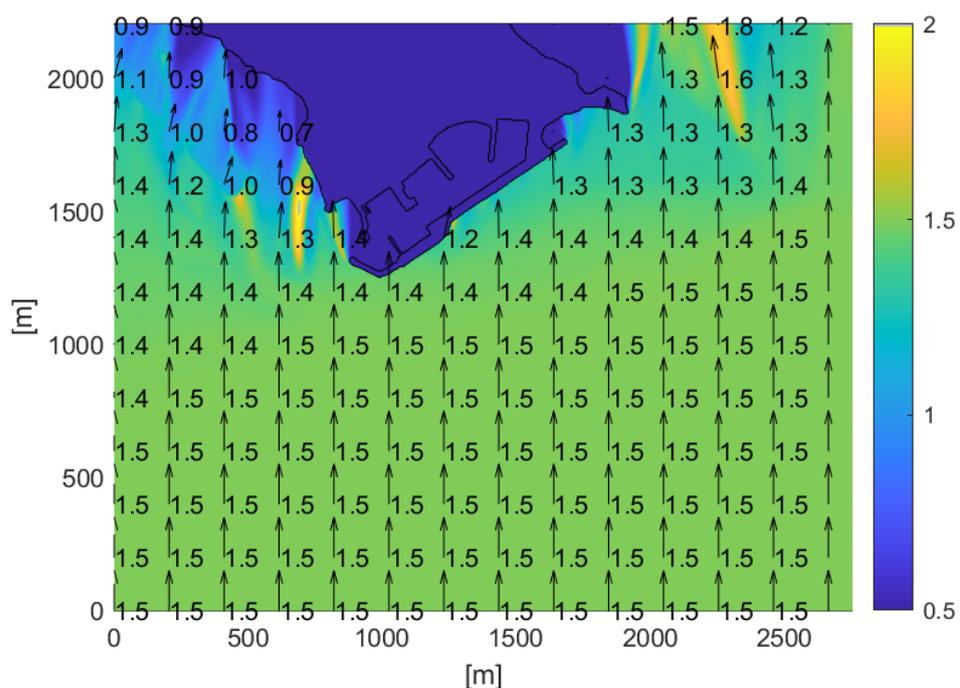


Figura 47 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=50 anni + SLR - dir 330°N.

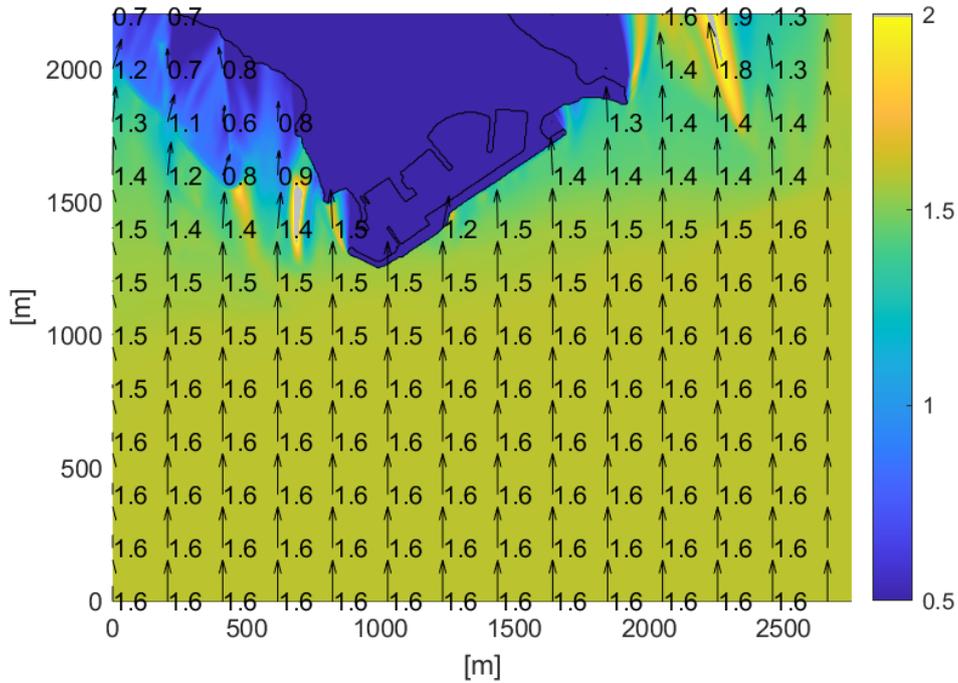


Figura 48 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=100 anni - dir 330°N.

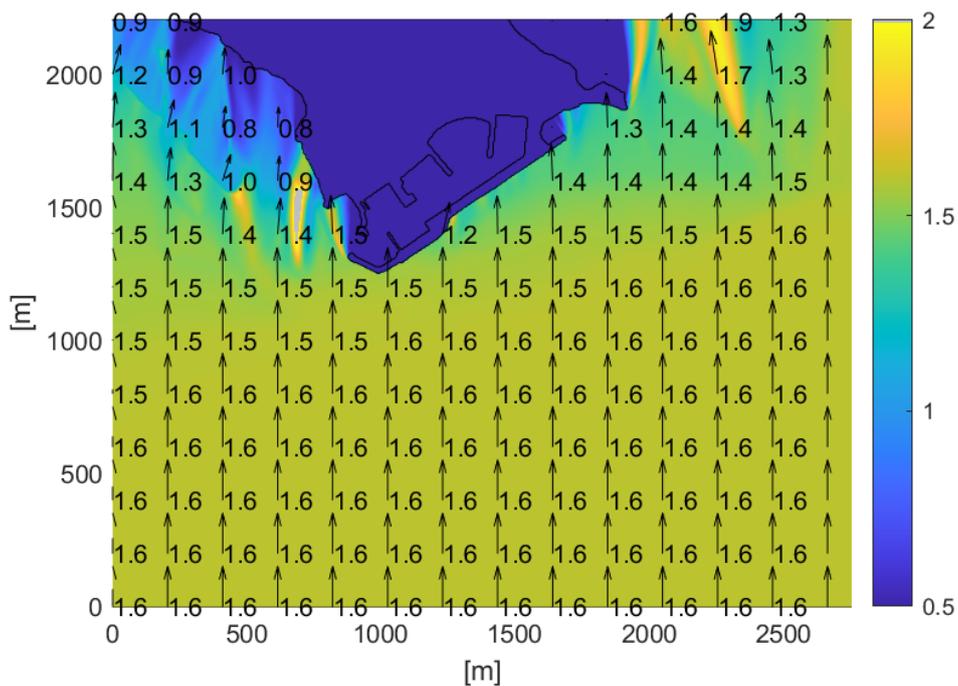


Figura 49 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=100 anni + SLR - dir 330°N.

Tabella 41 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 360°N – Tr 2, 10 e 20 anni.

PUNTO	Tr=2 anni		Tr=10 anni		Tr=20 anni	
	$H_s=0.9m - T_p=3.8s$ $s=+0.3m$		$H_s=1.1m - T_p=4.1s$ $s=0.5m$		$H_s=1.2m - T_p=4.2s$ $s=0.5m$	
	Hs [m]	Dir [°N]	Hs [m]	Dir [°N]	Hs [m]	Dir [°N]
1	0.9	356	1.1	356	1.2	356
2	0.8	356	1.0	355	1.0	354
3	0.9	359	1.0	358	1.1	358
4	0.9	360	1.1	359	1.1	359
5	0.9	360	1.1	360	1.2	360
6	0.9	360	1.1	360	1.2	360
7	0.9	360	1.1	360	1.2	360
8	0.9	360	1.1	360	1.2	360
9	0.9	360	1.1	360	1.2	360
10	0.9	360	1.1	360	1.2	360
11	0.8	358	1.0	357	1.0	357
12	0.8	359	1.0	357	1.1	356
13	0.7	352	0.9	351	0.9	350
4-off	0.9	360	1.1	360	1.2	360
6-off	0.9	360	1.1	360	1.2	360
W01	0.9	360	1.1	360	1.2	360
W02	0.9	360	1.1	360	1.2	360
W03	0.9	360	1.1	360	1.2	360
W04	0.9	360	1.1	360	1.2	360

Tabella 42 – Altezza significativa [m] e direzione [°N] a costa per le onde provenienti da largo con direzione di propagazione 360°N – Tr 50 e 100 anni.

PUNTO	Tr=50 anni		Tr=50 anni + SLR		Tr=100 anni		Tr=100 anni + SLR	
	$H_s=1.3m - T_p=4.3s$ $s=0.6m$		$H_s=1.3m - T_p=4.3s$ $s=1.1m$		$H_s=1.4m - T_p=4.4s$ $s=0.6m$		$H_s=1.4m - T_p=4.4s$ $s=1.1m$	
	Hs [m]	Dir [°N]						
1	1.3	356	1.4	359	1.5	357	1.5	359
2	1.1	353	1.1	353	1.2	352	1.2	352
3	1.2	358	1.2	359	1.3	358	1.3	358
4	1.2	359	1.2	359	1.3	359	1.3	359
5	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
6	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
7	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
8	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
9	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
10	1.3	360	1.3	360	1.3	360	1.4	360
11	1.1	357	1.1	357	1.2	356	1.2	357
12	1.2	355	1.2	356	1.3	354	1.3	355
13	1.0	350	1.0	351	1.1	349	1.1	350
4-off	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
6-off	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
W01	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
W02	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
W03	1.3	360	1.3	360	1.4	360	1.4	360
W04	1.3	360	1.3	360	1.3	360	1.3	360

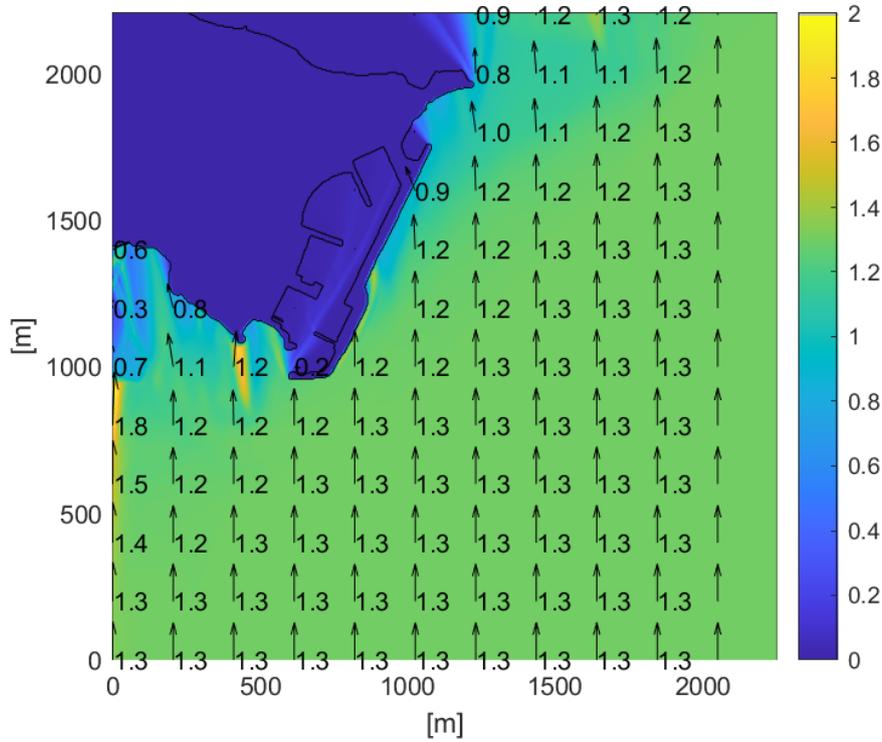


Figura 50 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=50 anni - dir 360°N.

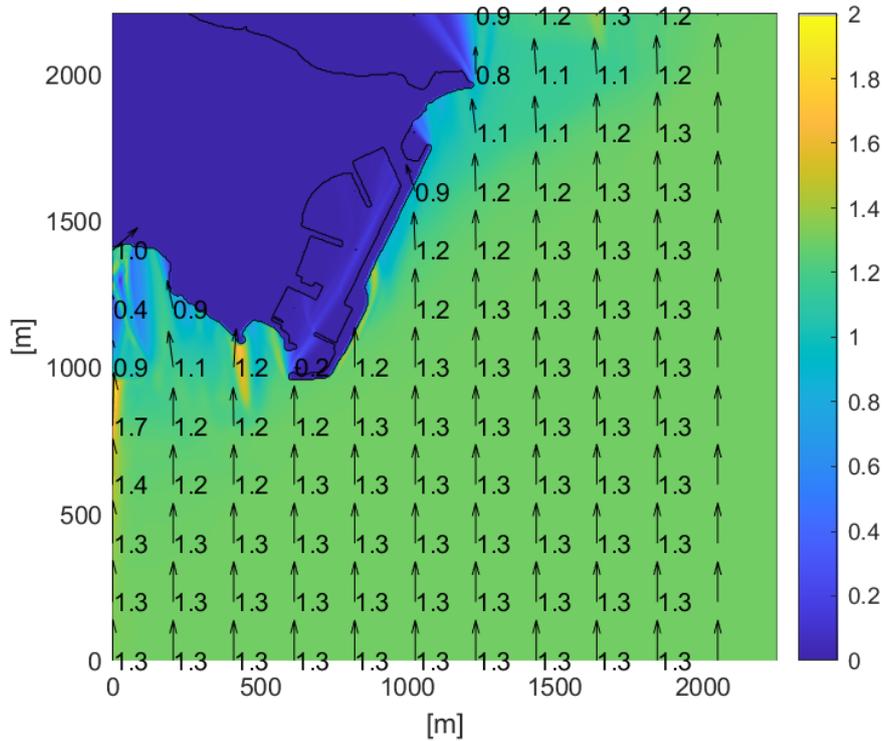


Figura 51 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=50 anni + SLR - dir 360°N.

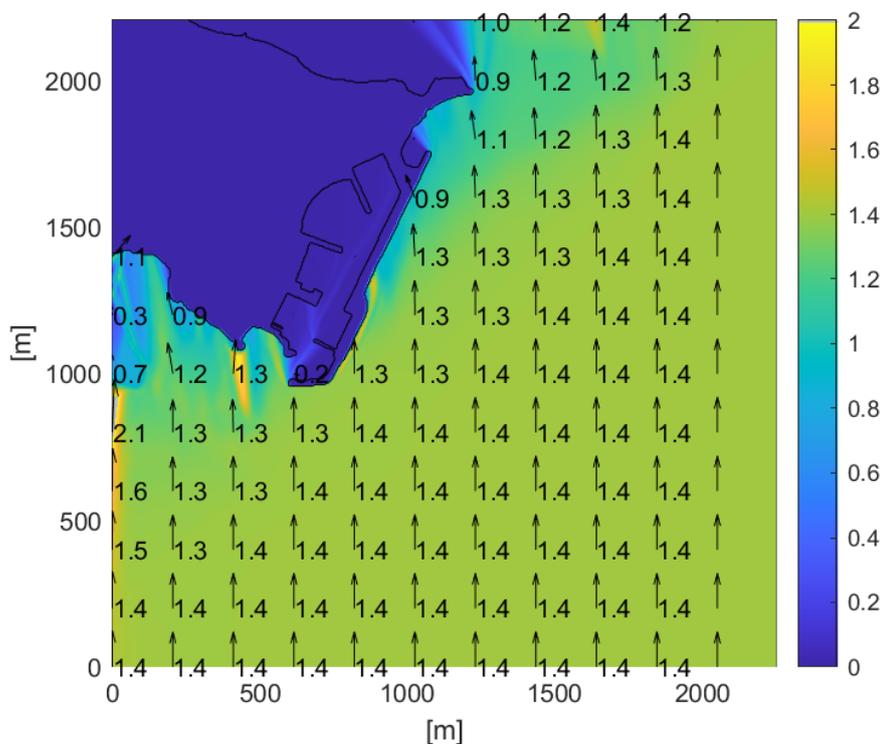


Figura 52 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=100 anni - dir 360°N.

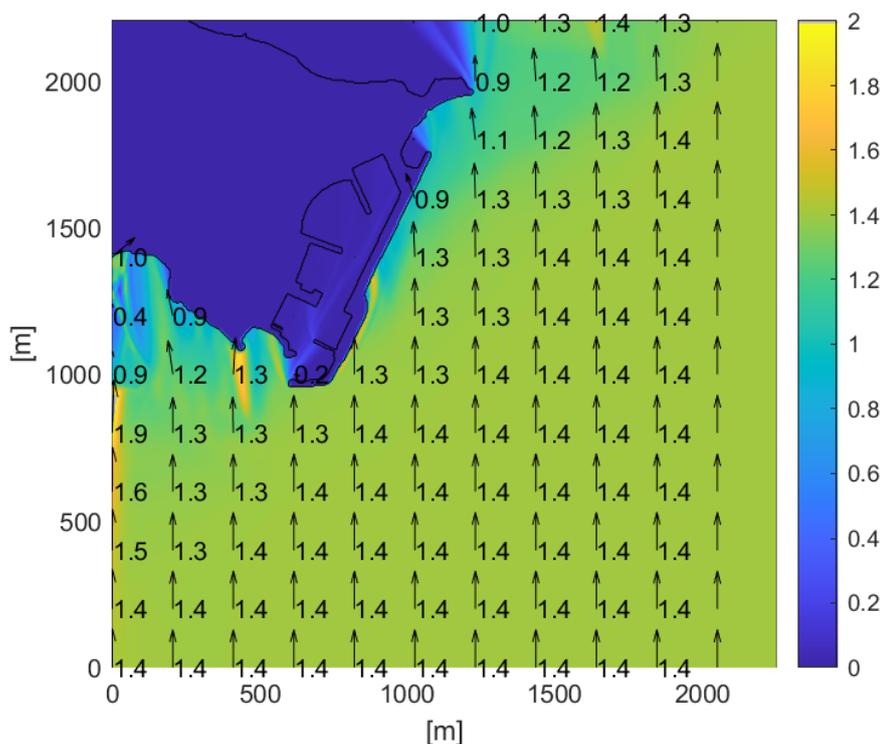


Figura 53 - Campo vettoriale delle altezze d'onda significative e contour map delle altezze d'onda.
 Tr=100 anni + SLR - dir 360°N.

CONCLUSIONI

Il presente studio è un aggiornamento del precedente realizzato nel 2019, a sua volta aggiornamento dello studio del 2015, e ha avuto lo scopo di stimare le caratteristiche delle onde da assumere per il progetto delle nuove opere portuali previste per l'ampliamento del Marina di Punta Ala.

In particolare, le stime del 2015 erano state eseguite sulla base dei dati WWA (World Wave Atlas) messi a disposizione dalla Regione Toscana, riferiti ad un punto esterno al golfo di Follonica, mentre il rapporto del 2019 è stato effettuato sulla base dei dati di vento forniti dal CFSR (Reanalysis Climate Forecast System) utilizzati come input per un modello spettrale di terza generazione (WAVEWATCH III) che ha permesso la ricostruzione di oltre 160 000 valori di moto ondoso in un periodo di 19 anni in un punto distante circa 8Km da porto di Punta Ala. Infine, il presente studio ha utilizzato i database ERA5 di Copernicus per i valori dei livelli del mare e per i parametri caratteristici delle onde ottenuti da modelli di rianalisi su intervalli temporali di circa 40 anni, per un totale di 389'537 dati orari. I valori dei livelli del mare sono riferiti ad un punto a costa a meno di 1km dal Marina, mentre i dati delle onde sono riferiti ad un punto distante circa 8km dal porto di Punta Ala e non distante dal punto offshore utilizzato nel 2019.

L'analisi statistica per la previsione dei valori estremi ha fornito le caratteristiche delle onde al largo associate a tempi di ritorno di 1, 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anni (Tabella 23). È stata eseguita anche una analisi statistica limitata al solo periodo primaverile-estivo (Aprile-Settembre) ed i risultati sono riportati in Tabella 25.

Questi ultimi valori sono stati trasferiti a costa con uno specifico codice di calcolo ed i valori di altezza e direzione sono stati estratti in corrispondenza di 19 punti.

I valori ottenuti, riportati da Tabella 37 a Tabella 42, rappresentano le più attendibili stime, allo stato attuale delle conoscenze, per le onde di progetto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

AM3 Spin-off, 2019, *Studio meteomarinario e studio numerico dell'interazione tra le nuove opere previste per l'ampliamento del Marina di Punta Ala e le dinamiche marine*.

IPCC, 2023, *Sections*. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N., 2023: *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.adbb2d47

Sanne Muis, Maialen Irazoqui Apecechea, José Antonio Álvarez, Martin Verlaan, Kun Yan, Job Dullaart, Jeroen Aerts, Trang Duong, Rosh Ranasinghe, Dewi le Bars, Rein Haarsma, Malcolm Roberts, 2022: *Global sea level change time series from 1950 to 2050 derived from reanalysis and high resolution CMIP6 climate projections*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.a6d42d60

ISPRA, 2023, <https://www.mareografico.it/it/stazioni.html>

Battjes J. A. e Janssen J.P.F.M., 1978, *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Eng., Hamburg, ASCE ed., 1, pp. 569-587.

Cappiotti, L., 2003, *Interazione onda-corrente*. PhD thesis. Università degli Studi di Firenze, pp. 140.

Goda, Y., 2000, *Random Seas and design of maritime structures*. World Scientific.

Hirsch C., 1991, *Numerical Computation of Internal and External Flows*. John Wiley and Sons, New York.

Kirby J.T., 1986, *Rational approximations in the parabolic equation method for water waves*. Coastal Eng., 10: 355-378.

Putnam J.A. e Johnson J.W., 1949, *The dissipation of wave energy by bottom friction*. Trans. Am. Geoph. Union, 30: 67-74.

Swart, D.H., 1974, *Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles*. Delft Hydraulic Laboratory, Publication 131.

Coastal Engineering Research Center, Mississippi, 1984, *Shore protection manual: Volume I and II, Hydraulic Engineering Reports*.

Kamphuis, J.W., 2000, *Introduction to coastal engineering and management*. Advanced Series on Ocean Engineering – Vol. 16, pp. 105-113.

ALLEGATO A – MASSIMI ANNUALI

DATA	H _{m0} [m]	T _{m10} [s]	T _p [s]	Dir [°N]	
01-Jan-1979	18:00:00	4.22	7.9	9.0	270
29-nov-1980	04:00:00	3.06	6.9	7.7	258
16-Dec-1981	16:00:00	3.56	7.4	8.5	275
11-Dec-1982	05:00:00	3.31	7.0	8.0	265
31-Jan-1983	05:00:00	3.25	7.0	8.4	296
24-Jan-1984	15:00:00	3.99	7.7	9.1	287
12-apr-1985	11:00:00	3.01	6.9	7.7	264
19-Dec-1986	17:00:00	3.67	7.4	8.8	288
15-Jan-1987	03:00:00	2.94	7.2	8.0	187
31-mar-1988	02:00:00	3.03	7.0	8.1	187
26-feb-1989	16:00:00	3.45	7.4	7.8	253
27-feb-1990	21:00:00	5.15	8.5	9.8	274
20-Dec-1991	17:00:00	3.32	7.0	8.0	306
05-Dec-1992	09:00:00	2.74	6.6	7.5	184
24-Dec-1993	18:00:00	3.14	7.0	7.1	258
2-apr-1994	09:00:00	3.18	7.0	8.3	275
27-Jan-1995	06:00:00	3.51	7.2	8.6	279
21-nov-1996	05:00:00	3.62	7.6	8.6	271
12-Oct-1997	17:00:00	3.55	7.3	8.6	275
13-Sep-1998	22:00:00	3.02	7.3	8.4	275
28-Dec-1999	12:00:00	5.40	8.7	9.8	271
6-nov-2000	15:00:00	3.46	7.1	8.3	177
11-nov-2001	14:00:00	2.61	7.2	7.0	76
16-nov-2002	09:00:00	3.27	7.3	8.6	159
08-Oct-2003	04:00:00	2.97	7.7	7.6	281
15-Jan-2004	07:00:00	3.49	7.3	8.6	284
03-Dec-2005	05:00:00	3.32	7.0	8.1	181
09-Dec-2006	03:00:00	2.66	6.4	7.5	189
02-Jan-2007	09:00:00	3.45	7.1	8.6	283
01-Dec-2008	02:00:00	3.42	7.1	8.3	185
22-Dec-2009	02:00:00	2.58	6.6	7.6	178
02-Jan-2010	16:00:00	3.01	6.9	7.6	279
17-Dec-2011	04:00:00	4.28	7.7	8.7	266
06-Jan-2012	09:00:00	2.72	6.4	7.6	331
26-Dec-2013	06:00:00	3.17	7.1	8.2	179
10-feb-2014	12:00:00	2.67	6.3	7.1	166
30-Jan-2015	12:00:00	3.04	7.0	7.8	271
10-feb-2016	09:00:00	4.12	7.5	8.7	270
11-Dec-2017	01:00:00	3.12	7.0	8.1	188
29-Oct-2018	19:00:00	4.90	8.3	9.8	183

22-Dec-2019	09:00:00	3.76	7.2	8.3	268
28-Dec-2020	10:00:00	4.18	7.4	8.4	197
22-Jan-2021	19:00:00	2.83	6.3	7.1	182
22-nov-2022	18:00:00	2.64	7.1	7.8	311
09-Jan-2023	18:00:00	2.99	6.8	7.8	277

ALLEGATO B – MASSIMI APRILE-SETTEMBRE

DATA	H _{m0} [m]	T _{m10} [s]	T _p [s]	Dir [°N]	
24-apr-1979	15:00:00	2.01	5.7	6.3	173
23-May-1980	08:00:00	1.62	5.5	6.3	97
04-May-1981	19:00:00	2.62	7.1	6.5	257
13-Jun-1982	21:00:00	1.97	5.7	6.2	267
24-May-1983	15:00:00	1.98	6.2	5.9	242
3-apr-1984	00:00:00	2.39	6.5	6.5	214
12-apr-1985	11:00:00	3.01	6.9	7.7	264
15-apr-1986	18:00:00	2.05	6.0	7.0	161
4-apr-1987	08:00:00	2.85	6.9	8.2	155
02-Sep-1988	22:00:00	2.23	6.5	6.9	276
3-apr-1989	19:00:00	2.62	6.3	7.6	160
08-Jun-1990	20:00:00	1.69	5.9	5.6	242
28-Sep-1991	00:00:00	1.84	6.2	5.8	262
04-Sep-1992	20:00:00	2.51	6.5	7.3	286
2-apr-1993	20:00:00	2.60	6.6	7.6	149
2-apr-1994	09:00:00	3.18	7.0	8.3	275
13-May-1995	20:00:00	2.68	7.5	7.5	263
08-Jul-1996	14:00:00	2.65	6.8	6.6	254
29-Aug-1997	06:00:00	2.47	6.8	7.4	268
13-Sep-1998	22:00:00	3.02	7.3	8.4	275
17-apr-1999	21:00:00	2.25	5.9	6.3	261
21-Sep-2000	07:00:00	2.45	6.7	6.8	254
20-Jul-2001	02:00:00	2.10	5.4	6.4	274
05-Jun-2002	12:00:00	1.67	5.2	6.1	158
29-Aug-2003	11:00:00	2.05	5.7	6.4	168
07-May-2004	09:00:00	1.84	6.1	5.9	234
10-apr-2005	20:00:00	2.14	5.1	6.9	37
14-Sep-2006	21:00:00	2.20	6.1	7.1	137
28-May-2007	20:00:00	2.61	6.9	7.1	250
15-Aug-2008	22:00:00	1.46	5.9	5.9	241
18-Jul-2009	07:00:00	2.32	6.2	7.1	272
5-apr-2010	05:00:00	1.71	5.4	6.2	291
20-Jul-2011	07:00:00	1.90	5.9	6.9	270
11-apr-2012	08:00:00	1.95	5.7	6.5	174
24-May-2013	08:00:00	2.30	6.4	6.5	251
08-Jul-2014	21:00:00	1.87	6.1	5.6	241
14-Sep-2015	01:00:00	1.79	5.4	6.3	154
23-May-2016	19:00:00	2.20	6.3	6.3	248
28-apr-2017	10:00:00	1.95	6.4	8.1	231
1-apr-2018	05:00:00	2.10	6.1	6.8	274

09-May-2019	02:00:00	2.11	5.7	6.8	161
25-Sep-2020	18:00:00	3.22	7.1	7.7	268
11-apr-2021	04:00:00	2.33	6.4	7.6	161
2-apr-2022	11:00:00	2.47	6.9	7.0	209
1-apr-2023	08:00:00	1.75	5.7	6.6	279

ALLEGATO C – MASSIMI ANALISI POT SETTORE 280-300°N

DATA	H _{m0} [m]	T _{m10} [s]	T _p [s]	Dir [°N]
12-Dec-1979 07:00:00	3.27	7.3	8.5	284
16-Dec-1979 08:00:00	3.23	7.2	8.4	282
31-Dec-1979 08:00:00	2.57	6.6	6.9	290
25-Oct-1980 15:00:00	2.67	6.7	7.3	282
17-Dec-1981 04:00:00	2.70	6.8	7.8	280
2-mar-1982 15:00:00	3.13	7.0	8.3	294
31-Jan-1983 05:00:00	3.25	7.0	8.4	296
28-nov-1983 05:00:00	3.07	7.1	8.3	280
16-Jan-1984 02:00:00	2.53	6.5	7.7	285
24-Jan-1984 15:00:00	3.99	7.7	9.1	287
8-feb-1984 18:00:00	2.71	6.5	7.8	289
3-mar-1984 09:00:00	3.12	6.9	8.2	284
12-apr-1985 13:00:00	2.84	7.1	7.9	280
24-Jan-1986 16:00:00	3.30	7.3	8.4	281
19-Dec-1986 17:00:00	3.67	7.4	8.8	288
30-Jan-1988 21:00:00	2.92	7.1	8.1	285
9-feb-1988 03:00:00	2.50	7.1	6.4	280
17-mar-1988 04:00:00	2.66	7.0	8.0	281
06-Dec-1988 09:00:00	2.88	7.1	8.3	280
12-feb-1990 14:00:00	2.66	6.3	7.3	284
12-feb-1990 22:00:00	2.79	6.9	7.7	287
28-feb-1990 01:00:00	4.55	8.5	9.7	280
1-mar-1990 20:00:00	2.61	7.0	7.8	281
20-Dec-1991 16:00:00	3.25	6.7	7.8	299
04-Sep-1992 20:00:00	2.51	6.5	7.3	286
11-Dec-1993 18:00:00	3.00	6.9	8.3	281
17-Dec-1993 03:00:00	2.76	7.1	7.7	280
05-Jun-1994 09:00:00	2.72	6.9	7.8	281
27-Jan-1995 07:00:00	3.47	7.3	8.7	283
28-mar-1995 03:00:00	2.66	7.2	7.8	298
18-nov-1995 07:00:00	3.44	7.3	8.6	282
13-feb-1997 23:00:00	3.05	7.4	8.7	284
27-feb-1997 07:00:00	2.68	6.6	7.7	300
12-Oct-1997 20:00:00	3.17	7.5	8.6	282
14-Sep-1998 00:00:00	2.89	7.3	8.5	286
22-feb-1999 17:00:00	3.76	7.6	8.9	286
19-nov-1999 09:00:00	3.01	7.3	7.7	292
13-Dec-1999 07:00:00	2.87	6.8	8.2	283

27-Dec-1999	13:00:00	2.92	7.3	8.3	284
28-Dec-1999	19:00:00	4.27	8.5	9.3	280
26-nov-2000	17:00:00	2.56	6.3	7.5	291
08-Oct-2003	04:00:00	2.97	7.7	7.6	281
15-Jan-2004	07:00:00	3.49	7.3	8.6	284
02-Jan-2007	09:00:00	3.45	7.1	8.6	283
13-feb-2007	05:00:00	2.96	6.9	8.0	281
22-nov-2008	01:00:00	2.59	7.2	7.8	287
02-Jan-2010	17:00:00	2.96	7.0	7.8	293
17-Dec-2011	07:00:00	3.75	7.8	8.8	289
1-nov-2012	04:00:00	2.52	6.9	6.2	295
30-Jan-2015	13:00:00	2.97	7.0	7.8	281
22-nov-2015	00:00:00	2.77	7.1	7.8	286
13-Jan-2016	07:00:00	2.73	6.9	8.0	280
10-feb-2016	15:00:00	3.36	7.5	8.7	280
3-mar-2016	04:00:00	2.56	6.7	7.7	280
13-Jan-2017	16:00:00	2.92	6.8	7.9	290
6-mar-2017	23:00:00	2.86	6.9	8.2	285
03-Jan-2018	20:00:00	3.14	7.0	8.2	283
17-Jan-2018	11:00:00	3.64	7.7	8.9	281
09-Dec-2018	18:00:00	3.38	7.4	8.7	283
11-feb-2019	08:00:00	2.51	6.3	7.6	285
13-Dec-2019	21:00:00	3.14	6.9	7.8	299
23-Dec-2019	02:00:00	3.33	7.5	8.5	285
4-feb-2020	14:00:00	2.52	6.4	7.6	286
26-feb-2020	17:00:00	3.42	7.3	8.6	290
22-nov-2022	15:00:00	2.60	6.8	7.6	299

ALLEGATO D – MASSIMI ANALISI POT SETTORE 300-360°N

DATA	H _{m0} [m]	T _{m10} [s]	T _p [s]	Dir [°N]	
09-Jan-1979	23:00:00	1.97	6.9	8.3	320
12-Jan-1979	01:00:00	1.83	6.4	7.4	301
31-Jan-1979	07:00:00	1.58	6.3	6.7	330
10-feb-1979	18:00:00	1.32	5.4	5.9	303
14-feb-1979	21:00:00	1.37	5.9	5.8	305
10-mar-1979	16:00:00	1.46	6.6	8.4	306
22-mar-1979	23:00:00	1.35	5.6	5.4	301
5-apr-1979	01:00:00	1.27	5.9	7.9	322
7-apr-1979	04:00:00	1.55	6.2	6.1	305
25-apr-1979	01:00:00	1.33	6.0	6.9	302
03-May-1979	15:00:00	1.53	5.7	5.3	303
16-Jun-1979	21:00:00	1.28	6.0	6.2	302
13-Oct-1979	04:00:00	1.39	6.2	7.6	324
14-nov-1979	15:00:00	1.37	6.2	7.1	337
12-Dec-1979	15:00:00	2.06	6.7	7.2	307
16-Dec-1979	22:00:00	1.61	6.2	7.0	311
29-Dec-1979	06:00:00	1.43	5.2	5.7	303
31-Dec-1979	13:00:00	3.19	7.0	8.4	331
02-Jan-1980	19:00:00	1.36	4.7	5.8	354
23-Jan-1980	19:00:00	1.35	5.9	6.2	315
1-feb-1980	21:00:00	1.51	6.5	6.6	319
06-feb-80	00:00:00	1.24	6.1	7.6	305
8-mar-1980	07:00:00	1.48	5.8	5.3	311
21-apr-1980	09:00:00	1.42	5.0	5.7	349
02-Jul-1980	15:00:00	1.21	5.8	6.6	303
21-Jul-1980	17:00:00	1.28	5.6	5.8	309
09-Oct-1980	20:00:00	1.66	6.4	8.3	313
11-Oct-1980	16:00:00	1.97	6.6	7.4	314
18-Oct-1980	20:00:00	1.21	5.6	6.0	329
25-Oct-1980	17:00:00	2.41	6.7	7.2	305
6-nov-1980	20:00:00	1.76	6.3	6.4	304
28-nov-1980	12:00:00	1.49	6.9	6.1	356
07-Dec-1980	14:00:00	1.71	6.3	7.3	314
21-Dec-1980	08:00:00	1.41	5.9	6.3	318
27-Dec-1980	05:00:00	1.52	5.4	5.7	339
04-Jan-1981	21:00:00	1.93	6.8	7.0	304
15-Jan-1981	19:00:00	2.08	6.9	6.4	316
18-Jan-1981	00:00:00	1.20	5.5	5.7	327

5-feb-1981	05:00:00	1.34	6.0	5.8	343
14-mar-1981	05:00:00	1.35	5.9	6.3	307
27-May-1981	14:00:00	1.31	6.5	7.7	317
04-Jul-1981	06:00:00	1.21	5.5	4.9	307
19-Jul-1981	17:00:00	1.62	5.9	5.9	302
29-Sep-1981	00:00:00	1.21	6.0	5.9	338
04-Oct-1981	04:00:00	1.25	5.3	5.8	349
11-Oct-1981	14:00:00	1.62	6.9	8.7	359
22-Oct-1981	23:00:00	1.69	6.5	8.4	302
27-Oct-1981	17:00:00	1.57	6.5	6.2	301
28-nov-1981	10:00:00	1.94	5.9	7.0	309
01-Dec-1981	14:00:00	1.75	6.9	9.8	304
07-Dec-1981	19:00:00	2.02	6.4	6.3	308
12-Dec-1981	18:00:00	2.11	6.9	7.2	322
15-Dec-1981	18:00:00	1.90	6.4	7.3	302
22-Dec-1981	09:00:00	1.32	6.3	7.1	326
25-Dec-1981	17:00:00	1.37	5.9	5.9	304
02-Jan-1982	06:00:00	2.02	6.4	7.1	304
07-Jan-1982	00:00:00	1.74	6.3	6.3	303
2-mar-1982	16:00:00	3.09	7.1	8.4	306
11-mar-1982	17:00:00	2.21	6.3	7.1	302
13-mar-1982	14:00:00	1.94	5.5	6.3	309
14-Jun-1982	00:00:00	1.75	5.9	6.6	311
08-Oct-1982	08:00:00	1.31	5.4	5.3	317
09-Oct-1982	16:00:00	1.37	5.8	6.1	302
12-Oct-1982	10:00:00	1.79	6.0	7.0	302
15-Oct-1982	21:00:00	1.57	6.0	6.4	301
...

ALLEGATO E – MASSIMI ANALISI POT SETTORE 170-240°N

DATA	H _{m0} [m]	T _{m10} [s]	T _p [s]	Dir [°N]
11-Jan-1979 07:00:00	2.39	7.3	8.5	284
30-Jan-1979 08:00:00	2.03	7.2	8.4	282
17-mar-1979 01:00:00	2.58	6.6	6.9	290
29-mar-1979 01:00:00	2.26	6.7	7.3	282
24-apr-1979 15:00:00	2.01	6.8	7.8	280
14-nov-1979 07:00:00	2.01	7.0	8.3	294
15-nov-1979 08:00:00	2.68	7.0	8.4	296
15-Dec-1979 19:00:00	2.02	7.1	8.3	280
22-Dec-1979 17:00:00	3.67	6.5	7.7	285
30-Dec-1979 13:00:00	2.72	7.7	9.1	287
31-Dec-1979 07:00:00	2.61	6.5	7.8	289
1-feb-1980 02:00:00	2.02	6.9	8.2	284
14-mar-1980 05:00:00	2.34	7.1	7.9	280
11-Oct-1980 11:00:00	2.5	7.3	8.4	281
18-Oct-1980 03:00:00	2.25	7.4	8.8	288
25-Oct-1980 10:00:00	2.35	7.1	8.1	285
29-nov-1980 10:00:00	2.23	7.1	6.4	280
06-Dec-1980 15:00:00	2.9	7.0	8.0	281
4-feb-1981 15:00:00	2.09	7.1	8.3	280
04-May-1981 16:00:00	2.47	6.3	7.3	284
26-Oct-1981 11:00:00	2.12	6.9	7.7	287
08-Dec-1981 06:00:00	2.07	8.5	9.7	280
09-Dec-1981 12:00:00	2.57	7.0	7.8	281
18-Dec-1981 14:00:00	2.16	6.7	7.8	299
29-Dec-1981 10:00:00	2.26	6.5	7.3	286
11-mar-1982 10:00:00	2.17	6.9	8.3	281
06-Oct-1982 19:00:00	2.43	7.1	7.7	280
9-nov-1982 09:00:00	2.52	6.9	7.8	281
13-nov-1982 22:00:00	2.24	7.3	8.7	283
10-Dec-1982 23:00:00	2.13	7.2	7.8	298
18-Dec-1982 03:00:00	2.18	7.3	8.6	282
6-feb-1983 08:00:00	2.78	7.4	8.7	284
29-mar-1983 12:00:00	2.06	6.6	7.7	300
27-nov-1983 18:00:00	2.23	7.5	8.6	282
17-Dec-1983 06:00:00	2.02	7.3	8.5	286
18-Dec-1983 12:00:00	2.2	7.6	8.9	286
19-Dec-1983 12:00:00	2.19	7.3	7.7	292
24-Jan-1984 02:00:00	2.14	6.8	8.2	283

7-feb-1984	17:00:00	2.05	7.3	8.3	284
03-apr-84	00:00:00	2.39	8.5	9.3	280
21-May-1984	08:00:00	2.27	6.3	7.5	291
24-Sep-1984	02:00:00	2.21	7.7	7.6	281
03-Oct-1984	13:00:00	2.33	7.3	8.6	284
16-nov-1984	19:00:00	2.13	7.1	8.6	283
2-mar-1985	18:00:00	2.33	6.9	8.0	281
12-apr-1985	06:00:00	2.17	7.2	7.8	287
13-nov-1985	22:00:00	2.34	7.0	7.8	293
06-Jan-1986	08:00:00	2.19	7.8	8.8	289
24-Jan-1986	10:00:00	3.18	6.9	6.2	295
31-Jan-1986	06:00:00	2.28	7.0	7.8	281
19-Dec-1986	10:00:00	2.81	7.1	7.8	286
10-Jan-1987	10:00:00	2.18	6.9	8.0	280
15-Jan-1987	03:00:00	2.94	7.5	8.7	280
19-feb-1987	08:00:00	2.09	6.7	7.7	280
4-apr-1987	17:00:00	2.01	6.8	7.9	290
16-Jun-1987	06:00:00	2.07	6.9	8.2	285
25-Aug-1987	01:00:00	2.17	7.0	8.2	283
24-nov-1987	08:00:00	2.8	7.7	8.9	281
25-nov-1987	08:00:00	2.05	7.4	8.7	283
8-feb-1988	23:00:00	2.51	6.3	7.6	285
12-feb-1988	08:00:00	2.19	6.9	7.8	299
31-mar-1988	02:00:00	3.03	7.5	8.5	285
21-nov-1988	10:00:00	2.32	6.4	7.6	286
06-Dec-1988	02:00:00	2.3	7.3	8.6	290
25-feb-1989	08:00:00	2.47	6.8	7.6	299
...