

Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili
Domanda di Autorizzazione Unica ex art. 12 D.lgs. 387/2003

Ministero della Transizione Ecologica
Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale ex D.lgs.152/2006

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN
PARCO EOLICO OFFSHORE DI TIPO FLOATING
NEL CANALE DI SICILIA**

PROGETTO DEFINITIVO
Allegato allo Studio di Impatto Ambientale



Relazione meteomarina

ORDINE DEGLI INGEGNERI
della Provincia di TARANTO
Progetto
Dott. Ing. Luigi Severini
SEVERINI Luigi
Elaborazioni **N. 776**

iLStudio.
Engineering & Consulting **Studio**

Concept & Innovations:
NiceTechnology®

UR06
C0420.UR06.RELMET.00.a



00	30/11/2021	Procedura di VIA		L.Severini
REV	DATA	DESCRIZIONE	DESIGNER	PLANNER

Codice:

C	0	4	2	0	U	R	0	0	6	R	E	L	M	E	T	0	0	a
NUM.COMM.	ANNO	CODSET	NUM.ELAB.	DESCRIZIONE ELABORATO												REV.	R.I.	

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)



Project manager	Andrea Pedroncini
Authors	Brunella Guida
Quality supervisor	Henrik Kofoed-Hansen
Approver	Andrea Crosta

Project number	22803240
Approval date	2021-10-12
Revision	Draft Final 1.0
Classification	Confidential

INDICE

Nomenclatura	ix
Sintesi del lavoro.....	1
1 Introduzione.....	4
1.1 Scopi e obiettivi	4
1.2 Organizzazione del report.....	4
2 Dati meteomarini di base	6
2.1 <i>Mediterranean Wind and Wave Database (MWM)</i>	6
2.1.1 Validazione dei dati del vento	8
2.1.2 I dati di periodo medio del vento	9
2.1.3 Validazione dei dati d'onda	10
2.1.4 I dati di periodo medio dell'onda	12
2.2 I dati del <i>Copernicus Marine Environment Monitoring Service</i>	12
2.3 I dati meteomarini forniti per il parco eolico	13
3 Climatologia generale	15
3.1 Caratteristiche del vento su mesoscala	15
3.2 Circolazione generale	18
3.2.1 Circolazione superficiale	19
3.2.2 Circolazione intermedia	21
3.2.3 Circolazione profonda	22
3.3 Il clima ondosso nel Mar Mediterraneo.....	23
4 Condizioni meteomarine tipiche	25
4.1 Vento.....	25
4.1.1 Serie temporali e statistiche annuali	25
4.1.2 Rose dei venti e tabelle di frequenza della velocità e direzione del vento	27
4.2 Livello del mare	29
4.2.1 Serie temporali e statistiche annuali	29
4.2.2 Livelli di marea	30
4.3 Correnti	30
4.3.1 Serie temporali e statistiche annuali	31
4.3.2 Rose e Tabella di frequenza (%) di occorrenza della velocità-direzione della corrente.....	33
4.3.3 Profilo verticale della velocità della corrente.....	38
4.4 Onde	41
4.4.1 Serie temporali e statistiche annuali	41
4.4.2 Rose d'onda	43
4.4.3 <i>Scatter plot</i> degli avvenimenti congiunti	43
5 Condizioni meteomarine estreme	48
5.1 Velocità del vento.....	48
5.1.1 Conversione tra scale temporali	60
5.2 Livello del mare	60
5.3 Correnti	63
5.4 Onde	69
5.4.1 Periodi d'onda associati	74
5.4.2 Altezze d'onda massima	78
5.4.3 Elevazione della cresta d'onda	83

6	Temperatura e salinità dell'acqua di mare	84
6.1	Temperatura dell'acqua di mare	84
6.2	Salinità dell'acqua di mare	87
7	Medicanes	91
7.1	Panoramica generale dei <i>Medicanes</i>	91
7.2	Caratteristiche statistiche	92
7.3	I <i>medicanes</i> nel clima futuro	93
7.4	Modellazione dei <i>medicanes</i>	95
7.4.1	Metodologia	95
7.4.2	<i>Medicane</i> Qendresa (5-11 novembre 2014)	96
7.4.3	Ianos (16-22 settembre 2020)	102
8	Potenziale impatto ambientale delle infrastrutture del Parco Eolico	107
8.1	Impronta del parco eolico	107
8.2	Impatto sul vento	108
8.3	Impatto sulle condizioni d'onda	110
8.4	Impatto sulle condizioni idrodinamiche	112
9	Marine Growth	114
9.1	Panoramica generale	114
9.2	Standard di riferimento	115
9.3	Il marine growth nelle acque italiane	115
9.4	Discussione	119
10	Conclusioni e suggerimenti	121
10.1	Conclusioni	121
10.2	Suggerimenti	121
11	Riferimenti	123
A	Model Quality Indices	1

FIGURES

Figura 0.1: Rose annuali di velocità del vento a 10 m slm (in alto a sinistra) e a 80 m slm (in alto a destra), rosa delle onde (total sea, in basso a sinistra) e rosa delle correnti superficiali (in basso a destra) per un punto all'interno del sito.F	2
Figura 2.1: Posizione del sito del progetto e del <i>Punto P1</i>	6
Figura 2.2: MWM – Dominio del modello, batimetria e <i>mesh</i> di calcolo	7
Figura 2.3: Copertura dei dati dell'altimetro utilizzati per la convalida dei dati del vento nel presente studio.....	8
Figura 2.4: Validazione dei valori della velocità del vento (10 m) sui dati dell'altimetro per tutti i valori (a sinistra) e per $WS > 2.5$ m/s. Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità	8
Figura 2.5: Validazione delle velocità del vento (10 m) attraverso i dati dell'altimetro per settori direzionali e $WS > 2.5$ m/s. Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità	9
Figura 2.6: Posizione della boa di Mazara del Vallo (Rete Ondametrica Nazionale) usata per la validazione dei dati d'onda nel presente studio	10
Figura 2.7: Validazione per tutti i valori di altezza d'onda significativa con quelli della boa di Mazara del Vallo (RON) (a sinistra) e per $H_s > 0.5$ m (a destra). Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità.....	10
Figura 2.8: Validazione delle altezze d'onda significativa rispetto ai dati misurati dalla boa di Mazara del Vallo (RON) per settori direzionali e $H_s > 0.5$ m	11
Figura 2.9: Spettri di Potenza in frequenza di MWM (Mike21 SW) modellati H_{m0} confrontati con quelli osservati alla boa di Mazara del Vallo	12
Figura 3.1: Batimetria del mar Mediterraneo centrale (a sinistra). Le isolinee indicano i livelli 200 m e i 2000 m di profondità. a), b) e c) indicano le sezioni verticali lungo la longitudine 9 E, in corrispondenza del Canale di Sicilia e lungo la longitudine 13 E ([19]). Mappa (a destra) da https://en.wikipedia.org/wiki/Strait_of_Sicily#/media/File:Strait_of_Sicily_map.png - Norman Einstein - CC BY-SA 3.0	15
Figura 3.2: Campi annuali (2000–04): probabilità di occorrenza di venti $U > 10$ m s ⁻¹ con le direzioni medie del vento sovrapposte (da [4])	16
Figura 3.3: Campi annuali (2000–04): stabilità del vento S (in basso) e variabilità relativa della velocità del vento G (in alto) (da [4])	17
Figura 3.4: Variabilità stagionale relativa della velocità del vento G (a sinistra) e stabilità S (a destra) (da [4])	18
Figura 3.5: Circolazione generale del Canale di Sicilia: (A) correnti dello strato superiore; (B) correnti dello strato inferiore. Le aree grigie evidenziano zone con profondità minore di 200 m. Da [11].	19
Figura 3.6: Campo di velocità totale <i>hindcast</i> mediata su 10 giorni a 5 m di profondità a febbraio (a sinistra) e ad Agosto (a destra) (from [19])	20
Figura 3.7: Circolazione del MAW in superficie (da [7])	21
Figura 3.8: Circolazione del LIW a 500 m di profondità (da [7])	22
Figura 3.9: Circolazione in acque profonde. AeDW, AdDW, TDW e WMDW indicano rispettivamente le acque profonde dell'Egeo, dell'Adriatico, del Tirreno e del Mediterraneo occidentale (da [7])	23
Figura 3.10: Altezze massime d'onda significativa (in alto) e corrispondente periodo medio dell'onda (in basso) nel Mar Mediterraneo. Da [14].	24
Figura 4.1 Serie temporali e statistiche della velocità del vento $WS_{10,2hr}$ e $WS_{80,2hr}$ [m/s] nel <i>Punto P1</i>	25
Figura 4.2 Statistiche mensili delle velocità del vento $WS_{10,2hr}$ (in alto) e $WS_{80,2hr}$ (in basso) nel <i>Punto P1</i>	26
Figura 4.3 Rose dei venti annuali medi $WS_{10,2hr}$ velocità del vento nel <i>Punto P1</i>	27
Figura 4.4 Rose dei venti annuali medi $WS_{80,2hr}$ velocità del vento nel <i>Punto P1</i>	27
Figura 4.5 Serie temporali dei livelli d'acqua (totale, mareale e residua) nel <i>Punto P1</i> del sito dell'HFOWF.....	29
Figura 4.6 Serie temporali e statistiche annuali delle correnti superficiali (totali, di marea e residue)	31
Figura 4.7 Statistiche mensili delle velocità della corrente superficiale nel <i>Point 1</i> . Dall'alto verso il basso: correnti totali, mareali e residue	33
Figura 4.8 Rose della corrente superficiale (direzione di propagazione) nel sito – in alto: totale, in basso a sinistra: mareale, in basso a destra: residue.....	34

Figura 4.9	Confronto dei profili verticali delle correnti <i>hindcast</i> (CMEMS) con il 75° (a sinistra), 90° (al centro) e 99° (a destra) percentile e il profilo teorico della legge di potenza con $n=7$	40
Figura 4.10:	Rose della corrente in superficie (in alto), a metà Colonna (in basso a sinistra) e sul fondale (in basso a destra) nel <i>Punto P1</i> , secondo i dati medi giornalieri CMEMS descritti nel Capitolo 2	41
Figura 4.11	Grafico delle serie temporali e statistiche annuali per H_{m0} , T_p , T_{02} e T_{01}	42
Figura 4.12	Rosa d'onda nel <i>Punto P1</i> per il periodo 1979-2020	43
Figura 4.13:	<i>Scatter plot</i> omnidirezionale di H_{m0} e T_p nel <i>Punto P1</i>	44
Figura 4.14:	<i>Scatter plot</i> di H_{m0} vs. $WS_{10,2hr}$ nel <i>Punto P1</i> per lo stato totale del mare	46
Figura 5.1	Stime omnidirezionali della velocità del vento ($WS_{10,2h}$) per un periodo di ritorno (TR) di 100 anni nel sito del progetto valutate usando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è stata valutata usando i metodi dei minimi quadrati (LS) e della massima verosimiglianza (ML)	49
Figura 5.2:	Distribuzione omnidirezionale estrema di $WS_{10,2hr}$ secondo una distribuzione di Gumbel adattata con l' <i>annual maxima</i> (AMP) e il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con una linea blu tratteggiata	49
Figura 5.3:	Distribuzione omnidirezionale estrema di $WS_{80,2hr}$ secondo una distribuzione di Gumbel adattata agli <i>annual maxima</i> (AMP) e il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con una linea blu tratteggiata	50
Figura 5.4:	Distribuzioni direzionali marginali estreme di $WS_{10,2hr}$ secondo una distribuzione di Gumbel adattata agli <i>annual maxima</i> (AMP) e con il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con una linea blu tratteggiata	51
Figura 5.5:	Distribuzioni estreme annuali ottenute per i livelli d'acqua HWL totale e residuo (in alto a sinistra e in alto a destra, rispettivamente) e per quelli LWL totale e residuo (in basso a sinistra e in basso a destra, rispettivamente)	61
Figura 5.6:	serie temporali del livello dell'acqua residuo, velocità del vento e direzione del vento (a 10 m slm) in occasione del valore minimo del livello dell'acqua residuo verificatosi a luglio 2018	61
Figura 5.7	Stime omnidirezionali di CS_{total} (a sinistra) e CS_{resid} (a destra) per un periodo di ritorno (TR) di 100 anni nel sito del progetto valutate usando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è valutata usando un metodo dei minimi quadrati (LS) e un metodo di massima verosimiglianza (ML)	64
Figura 5.8	CS_{total} (in alto) e CS_{resid} (in basso) omnidirezionali estreme secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai massimi annuali (AMP) e a un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono riportati con una linea blu tratteggiata	65
Figura 5.9	CS_{Total} omnidirezionale estrema secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai massimi annuali (AMP) e un metodo di adattamento dei minimi quadrati	66
Figura 5.10	CS_{Resid} omnidirezionale estrema secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai massimi annuali (AMP) e un metodo di adattamento dei minimi quadrati	67
Figura 5.11	Stime di $H_{m0,3h}$ omnidirezionale per un periodo di ritorno (TR) di 100 anni presso il sito valutate utilizzando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è stimata utilizzando il metodo dei minimi quadrati (LS) e il metodo della massima verosimiglianza (ML)	70
Figura 5.12	$H_{m0,3h}$ estrema omnidirezionale secondo una distribuzione Weibull a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e con un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono riportati con una linea blu tratteggiata	70
Figura 5.13	$H_{m0,3h}$ estrema omnidirezionale e direzionale marginale secondo una distribuzione di Weibull a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annuali (AAP) e con un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con una linea blu tratteggiata	71
Figura 5.14:	Valori <i>hindcast</i> dell'altezza d'onda significativa (H_{m0}), direzione media dell'onda (MWD), velocità del vento (WS_{10}) e direzione del vento (WD_{10}) durante la tempesta dell'11 gennaio 1987 nel <i>Punto P1</i>	73
Figura 5.15	<i>Scatter plot</i> di H_{m0} vs. T_p (sopra) e H_{m0} vs. T_{02} (sotto), e curve di correlazione utilizzate per condizioni omnidirezionali	77

Figura 5.16	Hmax estrema omnidirezionale secondo una distribuzione di Weibull a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e un metodo di adattamento dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e del 97.5% sono mostrati con una linea tratteggiata	79
Figura 5.17	Distribuzioni estreme direzionali marginali di Hmax secondo una distribuzione di Weibull a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e con un metodo di adattamento dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e del 97.5% sono mostrati con una linea tratteggiata	80
Figura 5.18:	Elevazioni delle creste d'onda omnidirezionali estreme nel <i>Punto P1</i>	83
Figura 6.1	Statistiche annuali e mensili della temperature giornaliera dell'acqua di mare (1993-2018) alla superficie (in alto), a metà colonna (al centro) e sul fondale (in basso).	85
Figura 6.2	Temperatura media mensile dell'acqua di mare (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da gennaio a giugno)	86
Figura 6.3	Temperatura media mensile dell'acqua di mare (dati CMEMS 1987-2019, da luglio a dicembre).	86
Figura 6.4	Statistiche annuali e mensili della salinità giornaliera (1993-2018) in superficie (in alto), a metà colonna (al centro) e sul fondale marino (in basso).	88
Figura 6.5	Salinità media mensile (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da gennaio a giugno)	89
Figura 6.6	Salinità media mensile (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da luglio a dicembre).	89
Figura 6.7:	Diagramma T-S nel <i>Punto P1</i> all'interno dell'area di Progetto, per tutti i dati (in alto), per i dati medi mensili da gennaio a giugno (in basso a sinistra) e da luglio a dicembre (in basso a destra).	90
Figura 7.1:	Densità di genesi (a sinistra) e densità di passaggio (a destra) da [41]	93
Figura 7.2:	Numero di eventi al mese (a sinistra) e per stagione (a destra) (da [41])	93
Figura 7.3:	(a) Variazioni nella frequenza media annual dei <i>medicanes</i> (MED) e dei cicloni non-tropicali (EXT). La barra superiore e quella inferiore indicano rispettivamente il 75° e il 25° percentile. (b) Numero relativo (numero di <i>medicanes</i> con durate divise per il numero totale dei <i>medicanes</i> nel periodo) dei <i>medicanes</i> in base alla loro durata in ore. Viene inoltre raffigurata (linee orizzontali) la somma del numero di <i>medicanes</i> di durata maggiore di 24 ore.	95
Figura 7.4:	Dominio del modello, griglia e batimetria utilizzati per la modellazione del <i>medicane</i> . La posizione del <i>Punto P1</i> è evidenziata.	96
Figura 7.5:	Immagine satellitare di Qendresa nella sua intensità di picco il 7 novembre, quando si avvicina a Malta	97
Figura 7.6:	Il tracciato "migliore" di TLC14 (linea rossa; posizioni ogni 3 ore), il suo punto d'origine e la depressione dopo aver perso le sue caratteristiche tropicali (linee nere; posizioni ogni 6 ore). Sono indicate anche gli orari (UTC) e le date delle posizioni di TLC14 ogni 3 ore. Le stazioni meteorologiche disponibili e i loro identificativi internazionali ICAO (<i>International Civil Aviation Organization</i>) sono riportati nel pannello. La scala di colori mostra l'altitudine della topografia (m).	98
Figura 7.7:	Serie temporali <i>hindcast</i> del mslp minimo (hPa) del ciclone nelle analisi ECMWF e in tutti gli esperimenti WRF – ARW. I tre pallini neri indicano le misurazioni mslp LMMML alle 16:34 UTC del 7/11/2014, LICO alle 21:00 UTC del 7/11/2014 e LICC alle 04:50 UTC del 8/11/2014. Da [47].	99
Figura 7.8:	Serie temporali della pressione media al livello del mare osservata (MSLP [hPa]), della velocità del vento sostenuta (WS10m [m/s]) e delle raffiche di vento (Gust10m [m/s]) a Luqa, Malta il 7 November 2014. Da [47]	99
Figura 7.9:	<i>Medicane</i> Qendresa: risultati della modellazione delle onde. Posizione dell'occhio del <i>medicane</i> (a), campo d'onda al picco della tempesta (b) e serie temporali dell'altezza d'onda significativa nel <i>Punto P1</i> del Parco Eolico (punto magenta in b))	100
Figura 7.10:	<i>Medicane</i> Qendresa: risultati della modellazione idrodinamica. Posizione dell'occhio del <i>medicane</i> (a), campo di velocità della corrente al picco della tempesta (b) e serie temporali della velocità della corrente mediata sulla profondità nel <i>Punto P1</i> del Parco Eolico (punto magenta in b))	101
Figura 7.11:	Un'immagine spettacolare di Ianos dal satellite EU/Copernicus Sentinel-3 vicino alla costa sud-occidentale della Grecia venerdì 18 settembre 2020.	102

Figura 7.12: Osservazioni satellitari ASCAT Metop di venti: a) Metop-A il 15 Settembre, 19:25 UTC, b) Metop-C il 16 Settembre, 08:13 UTC, c) Metop-B il 16 Settembre, 20:19 UTC, d) Metop-C il 17 Settembre, 19:11 UTC. Fonte: NESDIS	103
Figura 7.13: Un tentativo di percorso migliore per il <i>medicane</i> Ianos (da [48])	104
Figura 7.14: <i>Medicane</i> Ianos: risultati della modellazione delle onde. Posizione dell'occhio del <i>medicane</i> (a), campo d'onda al picco della tempesta (b) e serie temporale dell'altezza d'onda significativa nel <i>Punto P1</i> del Parco Eolico (punto magenta (b)).....	105
Figura 7.15: <i>Medicane</i> Ianos: risultati della modellazione idrodinamica. Posizione dell'occhio del <i>medicane</i> (a), campo di velocità della corrente al picco della tempesta (b) e serie temporali della velocità della corrente mediata sulla profondità nel <i>Punto P1</i> del Parco Eolico (punto magenta in (b))	106
Figura 8.1: Layout previsto del Parco Eolico . Fonte: 7 Seas Med e Google Earth©.....	107
Figura 8.2: Galleggiante preso in considerazione per i WTG nel Parco Eolico . Dimensioni in mm. Fonte: 7 Seas Med.....	108
Figura 8.3: Principali schemi di fondazioni eoliche offshore galleggianti. Fonte: ICF (2020) white paper [46].....	108
Figura 8.4: Tipologia e entità dei potenziali effetti ambientali degli impianti di energia eolica offshore galleggianti. Le variazioni attese valutati secondo le dinamiche atmosferiche e marine sono evidenziati dal riquadro in rosso. Fonte e illustrazione: Farr et al (2021, [49])	109
Figura 8.5: Ubicazione dell'OWF da 200 MW Vesterhav North e Vesterhav South OWF. Fonte: Vedere link a piè di pagina	111
Figura 8.6: Elenco dei potenziali effetti delle piattaforme eoliche offshore sull'idrodinamica. Fonte: van Berkel et al (2020, [54]).....	113
Figura 9.1: Sulla sinistra, immagini che mostrano la crescita delle incrostazioni " <i>hard</i> " e " <i>soft</i> ". Sulla destra, progressione e dimensione delle incrostazioni, da [59].....	115
Figura 9.2: Pannello di sinistra: la boa ODAS Italia 1 e la sua posizione, a 43°48.90' N, 009°06.80' E, a 37 nm da Genova, su acque con 1270 m di profondità. Pannello di destra: caratterizzazione del <i>macrofouling</i> in funzione della profondità, da [60]. Parte in alto della figura: rappresentazione schematica dei componenti principali presenti nei campioni raccolti ad alcune profondità lungo il corpo verticale della boa. Parte in basso: pesi umido, secco, ash del <i>macrofouling</i> depositato in ciascuna zona del corpo della boa e del disco stabilizzatore	117
Figura 9.3: Modello di densità del <i>biofouling</i> da [62].....	119

TABLES

Tabella 0.1: Riepilogo dei valori estremi annuali e omnidirezionali presso il sito (punto P1).....	3
Tabella 0.2: Riepilogo del potenziale impatto dell'HFOWF sui parametri fisici ambientali	3
Tabella 2.1 Nome, posizione e profondità dell'acqua nel punto di estrazione dei dati per l'analisi del vento e delle onde.....	6
Tabella 2.2 Riepilogo della configurazione principale del modello <i>Med Sea Reanalysis</i> (CMEMS).....	13
Tabella 2.3: Elenco dei contenuti del pacchetto dei dati meteorologici <i>hindcast</i> per il sito	14
Tabella 4.1: Nomi, localizzazioni, e informazioni sulla profondità dell'acqua per i punti di analisi, insieme ai dettagli sulla base dei dati	25
Tabella 4.2 Statistiche annuali e mensili delle velocità del vento $WS_{10,2hr}$ e $WS_{80,2hr}$ [m/s] nel <i>Punto P1</i>	26
Tabella 4.3 Tabella di frequenza (%) di occorrenza della velocità del vento $WS_{10,2hr}$ e della sua direzione nel punto P1	28
Tabella 4.4 Tabella di frequenza (%) di occorrenza della velocità del vento $WS_{80,2hr}$ e della sua direzione nel <i>Punto P1</i>	28
Tabella 4.5 Statistiche annuali dei livelli d'acqua (totale, mareale e residua) nel <i>Punto P1</i>	30
Tabella 4.6 Livelli di marea astronomica nel sito dell'HFOWF (<i>Point 1</i>) basato sui dati modellati con il DTU nel periodo di tempo dal 01-01-1987 al 31-12-2019. I valori sono forniti in metri relativi al livello del mare (m slm) and alla marea astronomica più bassa in conformità con la differenza slm-LAT estratta dai dati	30
Tabella 4.7 Statistiche mensili della velocità della corrente (totale, di marea e residua) in superficie.....	32

Tabella 4.8	Tabella di frequenza (%) di occorrenza congiunta della velocità della corrente totale superficiale e della sua direzione	35
Tabella 4.9	Tabella di frequenza (%) di occorrenza congiunte della velocità della corrente di marea superficiale e della sua direzione	36
Tabella 4.10	Tabella di frequenza (%) di occorrenza congiunte della velocità della corrente residua superficiale e della sua direzione	37
Tabella 4.11	Coefficienti per il calcolo della velocità della corrente a una determinata profondità a partire dalla corrente di superficie nel sito dell'HFOWF, ottenuti rispettivamente dai dati del CMEMS (90° percentile), e dal profilo teorico della legge di potenza. Si suggerisce di fare riferimento al profilo teorico della legge di potenza.	40
Tabella 4.12	Statistiche annuali e mensili di H_{m0} , T_p , T_{01} e T_{02}	42
Tabella 4.13	Tabella di frequenza di occorrenza [%] annuale di H_{m0} rispetto alla direzione media dell'onda nel <i>Punto P1</i> per il periodo 1979 - 2020	45
Tabella 4.14:	Tabella di frequenza di occorrenza [%] annuale di H_{m0} rispetto alla periodo di picco dell'onda T_p nel <i>Punto P1</i>	45
Tabella 4.15:	Tabella di frequenza di occorrenza [%] annuale omnidirezionale di H_{m0} rispetto alla velocità del vento $WS_{10,2hr}$ nel <i>Punto P1</i>	47
Tabella 5.1:	Velocità del vento estrema WS_{10} omnidirezionale e direzionale marginale nel <i>Punto P1</i> per le finestre medie di 1 ora e 10 minuti	52
Tabella 5.2:	Velocità del vento estrema WS_{10} omnidirezionale e direzionale marginale nel <i>Punto P1</i> per le finestre medie di 1 minuto e 3 secondi	53
Tabella 5.3:	Velocità del vento estrema WS_{10} omnidirezionale e direzionale scalata nel <i>Punto P1</i> per le finestre medie di 1 ora e 10 minuti: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1].....	54
Tabella 5.4:	Velocità del vento estrema WS_{10} omnidirezionale e direzionale scalata nel <i>Punto P1</i> per le finestre medie di 1 minuto e 3 secondi: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1].....	55
Tabella 5.5:	Velocità del vento estrema WS_{80} omnidirezionale e direzionale marginale nel <i>Punto P1</i> per le finestre medie di 1 ora e 10 minuti	56
Tabella 5.6:	Velocità del vento estrema WS_{80} omnidirezionale e direzionale marginale nel <i>Punto P1</i> per le finestre medie di 1 minuto e 3 secondi	57
Tabella 5.7:	Velocità del vento estrema WS_{80} omnidirezionale e direzionale scalata nel <i>Punto P1</i> per le finestre medie di 1 ora e 10 minuti: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1].....	58
Tabella 5.8:	Velocità del vento estrema WS_{80} omnidirezionale e direzionale scalata nel <i>Punto P1</i> per le finestre medie di 1 minuto e 3 secondi: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1].....	59
Tabella 5.9	Livelli totali di acqua alta annuali e mensili estremi (HWL_{total})	62
Tabella 5.10	Livelli residui di acqua alta annuali e mensili estremi (HWL_{resid}).....	62
Tabella 5.11	Livelli totali di acqua bassa annuali e mensili estremi (LWL_{total})	63
Tabella 5.12	Livelli residui di acqua bassa annuali e mensili estremi (LWL_{resid})	63
Tabella 5.13:	Corrente totale (CS_{Total}) e corrente residua (CS_{Resid}) estreme omnidirezionali e direzionali marginali alla superficie	68
Tabella 5.14:	Corrente totale (CS_{Total}) e corrente residua (CS_{Resid}) estreme omnidirezionali e direzionali scalate alla superficie. L'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 of [1]	68
Tabella 5.15	Altezze d'onda significativa estreme annuali $H_{m0,3hr}$ omnidirezionali e direzionali marginali.....	72
Tabella 5.16	Altezze d'onda significativa estreme annuali $H_{m0,3hr}$ omnidirezionali e direzionali scalate: lo scalaggio è effettuato secondo la Sezione 3.6.5.6 of [1]	72
Tabella 5.17	Intervallo dei periodi di picco (T_p) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (da Tabella 5.13)	75
Tabella 5.18	Intervallo dei periodi di zero-crossing (T_{02}) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (da Tabella 5.13)	75
Tabella 5.19	Intervallo dei periodi di picco (T_p) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (da Tabella 5.14)	76
Tabella 5.20	Intervallo dei periodi of zero-crossing (T_{02}) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (da Tabella 5.14)	76

Tabella 5.21 Altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali ($H_{\max,3h}$)	81
Tabella 5.22 Altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate ($H_{\max,3h}$): l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato secondo la Sezione 3.6.5.6 del [1]	81
Tabella 5.23 Periodo d'onda ($T_{H_{\max}}$) associato ai valori delle altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (H_{\max} dalla Tabella 5.21)	82
Tabella 5.24 Periodo d'onda ($T_{H_{\max}}$) associato ai valori delle altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (H_{\max} dalla Tabella 5.22)	82
Tabella 5.25: Elevazioni delle creste d'onda omnidirezionali estreme nel <i>Punto P1</i> relative al SWL	83
Tabella 6.1 Statistiche annuali e mensili delle temperature dell'acqua marina giornaliera estratte in superficie, a metà Colonna d'acqua e a livello del fondale marino nei periodi 1987-2019 nel <i>Punto P1</i>	84
Tabella 6.2 Statistiche annuali e mensili della salinità giornaliera estratta in superficie, a metà colonna e sul fondo nel periodo 1987-2019 nel <i>Punto P1</i>	87
Tabella 7.1: Principali differenze tra medicane e tempeste tropicali (da [34] [38])	92
Tabella 8.1: Fenomeni più importanti per il cambiamento delle condizioni d'onda all'interno di un OWF.....	110
Tabella 9.1: Sintesi dei dati di <i>fouling</i> su strutture offshore fisse nei mari italiani. Da [61].	118
Tabella 9.2: Riepilogo della crescita della biomassa in kg/m^2 misurata su corpi galleggianti [60] e su strutture offshore fisse [61]. La tabella include anche i tassi di crescita stimati dello spessore in mm/anno ricavati assumendo i valori di densità del <i>fouling</i> come suggerito dalle linee guida standard [1] (1325 kg/m^3).	119
Tabella 9.3: Riepilogo della crescita della biomassa in kg/m^2 misurata su corpi galleggianti [60] e su strutture offshore fisse [61]. La tabella include anche i tassi di crescita stimati dello spessore in mm/anno derivati dall'assunzione di avere valori di densità sovrastimati del 42%, come suggerito da [63], corrispondenti a 768 kg/m^3	120

APPENDICI

APPENDIX A – Model Quality Indices

APPENDIX B – Extreme Value Analysis

Nomenclatura

Abbreviations	
CD	Chart datum
HAT	Highest Astronomical Tide
HRL	Highest Residual Level
HSWL	Highest Still Water Level
ISO	International Organization for Standardisation
LAT	Lowest Astronomical Tide
LSWL	Lowest Still Water Level
LRL	Lowest Residual Level
LRMTS	Low Resolution Monthly Time Series
MHWS	Mean High Water Spring
MHWN	Mean High Water Neap
MLWN	Mean Low Water Neap
MLWS	Mean Low Water Spring
MSL	Mean Sea Level
MWD	Mean Wave Direction
PWD	Peak Wave Direction
POT	Peak-Over-Threshold
Tr	Return Period
SWL	Still Water Level
aMSL	Above Mean Sea Level
mMSL	Meters above Mean Sea Level
WTG	Wind Turbine Generator - aerogeneratore
RCP	Representative Concentration Pathway
ACC	Anthropogenic Climate Change
MSLP	Mean Sea Level Pressure

Subscripts	
Tide	Tide partition of the surface elevation
Residual	Surge partition of the surface elevation

Definitions	
Time	Times are relative to UTC
Level	Levels are relative to local LAT (if not specified otherwise), however graphs are relative to MSL
Coordinate system	UTM-WGS84 Zone-38 North or Long/Lat (if not specified otherwise)
Direction	Directions are 30-degree bins relative to true North, i.e., 12 bins covering: 30 deg: 0° = -15° -15°, 30° = 15°- 45°, etc. Wind: °N coming from Current: °N going to Waves: °N coming from

Symbols	
Latin characters	
CD	Current direction
CS	Current speed
C_{max}	Maximum wave crest level
WD	Water depth
H_{m0} , H_s	Significant wave height (spectrum based)
H_{max}	Maximum wave height
N	Number (of discrete values, number of waves, etc.)
T_{02} , T_{m02}	Zero-crossing wave period (spectral based)
T_p	Peak wave period
T_z	Zero-up crossing wave period (time domain based)
U_c	Current speed (m/s)
$U_{c, avg}$	Depth-integrated current speed (m/s)
WS	Wind speed
Z_0	Mean sea level
WD	Wind direction
U_{10}	Wind speed at 10 meters above MSL
D_{10}	Wind direction at 10 meters above MSL
Greek characters	
η	Surface elevation
Θ	Direction ($^{\circ}$ N)

Sintesi del lavoro

Questo report fornisce informazioni dettagliate sulle condizioni meteomarine tipiche (di esercizio) ed estreme per il parco eolico situato approssimativamente a 35 km dalle coste della Sicilia, in Italia, nella parte più a Nord del Canale di Sicilia, in acque con profondità di 150-300 m. Le condizioni meteomarine si sono basate sul database del modello *hindcast* di DHI, che comprende un periodo di 42 anni (1979-2020, compresi) di dati di vento e di onda, e sul database idrodinamico pubblicamente disponibile attraverso il servizio CMEMS. L'analisi delle condizioni meteomarine è stata eseguita in corrispondenza di una (1) posizione all'interno dell'area di sviluppo dell'HFOWF e include l'analisi di dati di vento, livello superficiale, corrente e onda.

Condizioni tipiche

La Figura 0.1 mostra le rose dei venti annuali a quota 10 e a 80 m slm, delle onde (total sea) e correnti superficiali per la posizione all'interno del sito del progetto

- La distribuzione dei venti mostra una predominanza dei venti provenienti da ovest e nord-ovest (settori direzionali centrati in 270°N e 315°N, rispettivamente). I venti provenienti da queste direzioni pesano più del 55% sul totale. Anche i venti da sud-est sono abbastanza frequenti, con un contributo di circa il 21%. I venti più forti arrivano da nord-ovest (315°N).
- La distribuzione delle onde mostra che circa il 48% di esse proviene da W-NW (270-330°N) e circa il 30% da SE (120-180°N). Gli eventi d'onda provenienti dal settore nord-est pesano per circa il 15% sul clima ondoso medio marino. Le altezze d'onda sono minori di 3.0 m per circa il 95% del tempo. Per il 20% del tempo si ha $H_{m0} < 0.5m$.
- La corrente totale in superficie scorre prevalentemente verso i settori meridionali per tutto l'anno, confermando che la dinamica è largamente connessa alla circolazione su larga scala tra la parte occidentale e quella orientale del bacino del Mar Mediterraneo. La velocità della corrente totale è minore di 0.35 m/s per circa il 93% del tempo. La velocità della corrente totale residua è minore di 0.35 m/s per il 95% dell'anno e ha valori massimi fino a 0.50 m/s nel periodo analizzato, associati a correnti dirette verso SSE. La velocità di corrente di marea è minore di 0.15 m/s per l'80% del tempo e scorre prevalentemente verso sud. Nei dati CMEMS sono state rilevate correnti di marea inaspettatamente elevate (fino a 0.35 m/s), probabilmente correlate all'assimilazione dei dati (*Sea Level Anomaly*) inclusa nel set di dati di rianalisi CMEMS. Questi valori necessitano di verifiche accurate una volta che saranno resi disponibili misure correntometriche al sito.

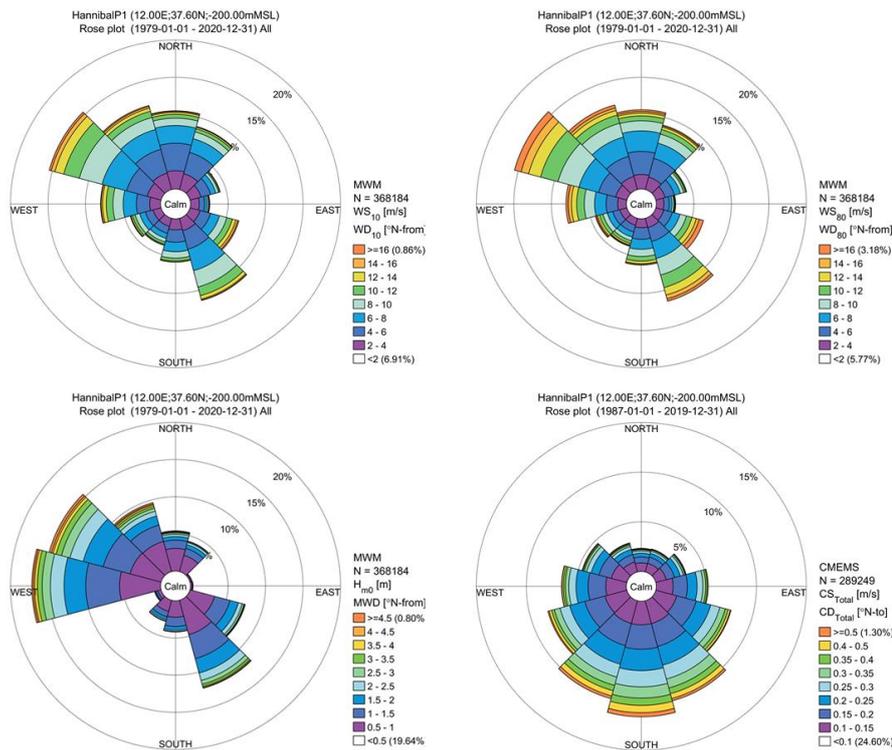


Figura 0.1: Rose annuali di velocità del vento a 10 m slm (in alto a sinistra) e a 80 m slm (in alto a destra), rosa delle onde (total sea, in basso a sinistra) e rosa delle correnti superficiali (in basso a destra) per un punto all'interno del sito.F

Condizioni estreme

Sono state stabilite condizioni estreme per i venti (a quota 10 m slm e 80 m slm), le onde (altezza d'onda significative, altezza d'onda massima), le correnti e i livelli del mare per periodi di ritorno fino a 500 anni, usando metodi statistici avanzati. La Tabella 0.1 fornisce un riepilogo dei valori estremi omnidirezionali e annuali per tutti i parametri analizzati.

Le onde estreme sono state stimate mediante il best-fitting di una popolazione di eventi di picco, che include una tempesta molto intensa avvenuta nel gennaio del 1987. Il periodo di ritorno stimato associato a questo evento è vicino a 150 anni. L'influenza dei *Medicanes* sull'analisi dei valori estremi d'onda è stata valutata come trascurabile, dato che gli eventi di picco che influenzano le distribuzioni estreme nel punto di estrazione considerato non sono correlati al passaggio dei *medicanes*.

Tabella 0.1: Riepilogo dei valori estremi annuali e omnidirezionali presso il sito (punto P1)

	TR [years]				
	1	10	50	100	500
WS _{10,1hr} [m/s]	21.1	24.6	27.0	28.1	30.6
WS _{80,1hr} [m/s]	25.5	30.0	33.1	34.5	37.6
H _{m0,3h} [m]	6.1	7.5	8.5	8.9	9.9
T _p [s]	11.1	12.0	12.6	12.8	13.3
T ₀₂ [s]	8.0	8.7	9.2	9.4	9.8
H _{max} [m]	11.2	14.0	15.6	16.6	18.4
T _{Hmax} [s]	10.2	11.1	11.8	12.0	12.5
HWL _{Total} [mMSL]	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
LWL _{Total} [mMSL]	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	-0.7
CS _{Total} [m/s] - surface	0.8	1.0	1.2	1.3	1.5
CS _{Resid} [m/s] - surface	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4

L'impatto ambientale del parco eolico

Una valutazione qualitativa del potenziale impatto ambientale atteso del parco eolico sui campi di vento, onda e corrente mostra che l'effetto complessivo è probabile che sia da lieve a moderato, come si può vedere in Tabella 0.2. La valutazione è stata basata sulla letteratura recente e sulle relazioni di Valutazione di Impatto Ambientale di vari progetti di parchi eolici *offshore*.

Tabella 0.2: Riepilogo del potenziale impatto dell'HFOWF sui parametri fisici ambientali

Parametro fisico ambientale	Impatto	Commenti
Vento (Velocità del vento)	Minor to moderate	La velocità del vento potrebbe ridursi fino al 10% all'interno del campo FOWF
Onda (Altezza d'onda)	Minor to moderate	L'altezza d'onda potrebbe ridursi fino al 5% nell'area di sottoflutto delle fondazioni. La variazione sarebbe di difficile misurazione in prossimità della costa.
Condizioni idrodinamiche (Velocità della corrente)	Minor	La velocità delle correnti potrebbe ridursi lievemente nell'area antistante la piattaforma galleggiante (< 3%)

1 Introduzione

Questo report è stato realizzato per **7 Seas Med S.r.l. (7 Seas Med)** da DHI Srl a socio unico (DHI) a contiene dati e analisi meteomarine destinati alla progettazione FEED del **Parco eolico offshore nel Canale di Sicilia**.

Questo documento include valutazioni sulle condizioni meteomarine tipiche ed estreme, nonché una valutazione qualitativa del potenziale impatto ambientale del parco eolico. Lo studio adempie allo scopo del lavoro definito nella proposta di DHI del 29 giugno 2021 come concordato nel *Consultancy Contract* della stessa data e nel *Data License Agreement* del 28 giugno 2021.

Il parco eolico si trova a circa 35 km dalla Sicilia, in Italia, nella parte più a nord del Canale di Sicilia (si veda illustrazione di copertina) in acque con profondità nel range 150-300 m. La capacità prevista del parco eolico è, secondo 7 Seas Med, 250 MW forniti da 21 WTG e una sottostazione galleggiante. Ogni WTG ha una potenza nominale di circa 12 MW.

Il Progetto è sviluppato da 7 Seas Med.

1.1 Scopi e obiettivi

Lo scopo di questo studio è definire le condizioni meteomarine per il parco eolico di input per la progettazione FEED delle turbine eoliche, le loro fondazioni e i sistemi di ormeggio e ancoraggio. Inoltre, lo studio è finalizzato a supportare il processo di autorizzazione di VIA (i.e., Valutazione di Impatto Ambientale).

Lo studio meteomarino si pone dunque l'obiettivo di descrivere la metodologia e i risultati di un'analisi di condizioni meteomarine di normale esercizio ed estreme. Questo include una descrizione delle condizioni del vento, dei livelli d'acqua, delle correnti e delle onde di superficie lungo il sito dF.

1.2 Organizzazione del report

Questo report è organizzato come segue:

- Capitolo 2: presenta la descrizione e validazione dei database utilizzati per l'analisi meteomarina
- Capitolo 3: fornisce una descrizione della climatologia generale dell'area
- Capitolo 4: comprende le analisi delle condizioni tipiche di vento, onde, corrente e livello del mare
- Capitolo 5: comprende l'analisi delle condizioni meteomarine estreme e una stima dei parametri di progetto
- Capitolo 6: mostra i principali dati statistici su temperatura e salinità dell'acqua del mare
- Capitolo 7: si occupa di condizioni meteomarine atipiche come i *Medicane* e fornisce una panoramica delle loro caratteristiche statistiche e una valutazione quantitativa delle caratteristiche d'onda e di corrente associate
- Capitolo 8: tratta il potenziale impatto ambientale delle infrastrutture dell'HFOWF
- Capitolo 9: fornisce informazioni sul "Marine Growth" estratte da pubblicazioni scientifiche specialistiche

- Capitolo 10: presenta conclusioni e raccomandazioni
- Capitolo 11: lista dei riferimenti bibliografici complessivamente utilizzati nel rapporto tecnico.

2 Dati meteomarini di base

Lo studio si basa su due diversi set di dati: uno per i venti e le onde e uno per i dati idrodinamici.

I dati relativi al vento e alle onde sono stati estratti dal *Mediterranean Wind Wave Model (MWM)*, sviluppato e mantenuto da DHI. MWM è un set di dati di modellazione validato e affidabile di 42 anni che copre l'intero Mar Mediterraneo nel periodo 1979-2020. Il database include dati orari di vento e onde ad alta risoluzione spaziale di circa 10 km al largo con un incremento fino a 3 km vicino a costa, ed è riconosciuto come il migliore set di dati del Mar Mediterraneo.

I dati idrodinamici, che includono livello del mare, correnti, temperatura e salinità, sono stati estratti dal catalogo *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)*.

Tutti i dati sono stati estratti in un punto della griglia a circa 3.3 km a ovest del sit. La Tabella 2.1 fornisce il nome e la posizione del punto selezionato, illustrato in Figura 2.1.

Nelle sezioni seguenti viene fornita una breve descrizione dell'origine dei dati e della loro validazione.

Tabella 2.1 Nome, posizione e profondità dell'acqua nel punto di estrazione dei dati per l'analisi del vento e delle onde

	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Water Depth (m)
Punto P1	12.00	37.60	200

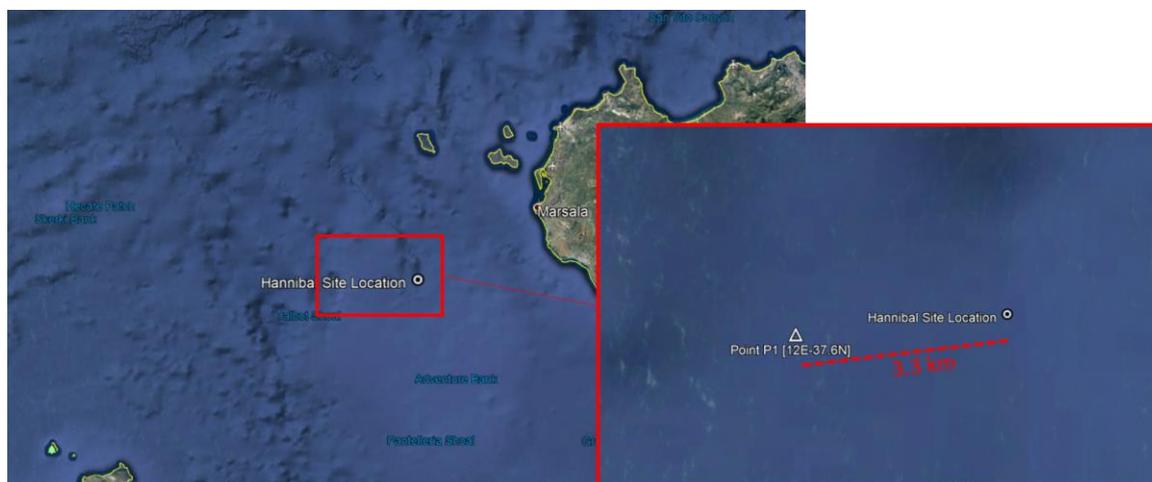


Figura 2.1: Posizione del sito del progetto e del *Punto P1*

2.1 *Mediterranean Wind and Wave Database (MWM)*

DHI ha definito un set di dati di modellazione validato e affidabile di 42 anni che copre l'intero Mar Mediterraneo per il periodo 1979-2020, il *Mediterranean Wind Wave Model (MWM)*.

Il modello meteorologico utilizzato da MWM è il modello WRF-ARW, uno dei modelli meteorologici non-idrostatici più largamente riconosciuti e all'avanguardia. Il *dataset* globale GFS, prodotto e pubblicato da NCEP (*National Centers for Environmental Predictions*) fornisce le condizioni al contorno e iniziali. (dati orari con una risoluzione spaziale di 0.5°).

Il modello spettrale delle onde e del vento di terza generazione MIKE 21 SW¹ sviluppato, mantenuto e supportato da DHI viene utilizzato come modello di simulazione delle onde con una risoluzione che va da 0.1° a 0.03° attraverso il Mar Mediterraneo. Le prestazioni del modello atmosferico e delle onde sono state validate sulla base di diversi dataset satellitari; Envisat, ERS-2, Geosat FO, Jason-1, Jason-2, Topex-Poseidon and CryoSat, mediante una procedura basata sulla tecnica della finestra mobile.

Sfruttando l'impostazione del modello realizzata per analisi di tipo *hindcast* e verificata attraverso dati misurati, è stato anche sviluppato un servizio di previsione (*forecast*) delle onde e del vento, operative 24 ore su 24, 7 giorni su 7, ad oggi utilizzato da numerose aziende e organizzazioni nel Mar Mediterraneo. Il servizio di previsione utilizza il set di dati GFS per fornire le condizioni al contorno e iniziali.

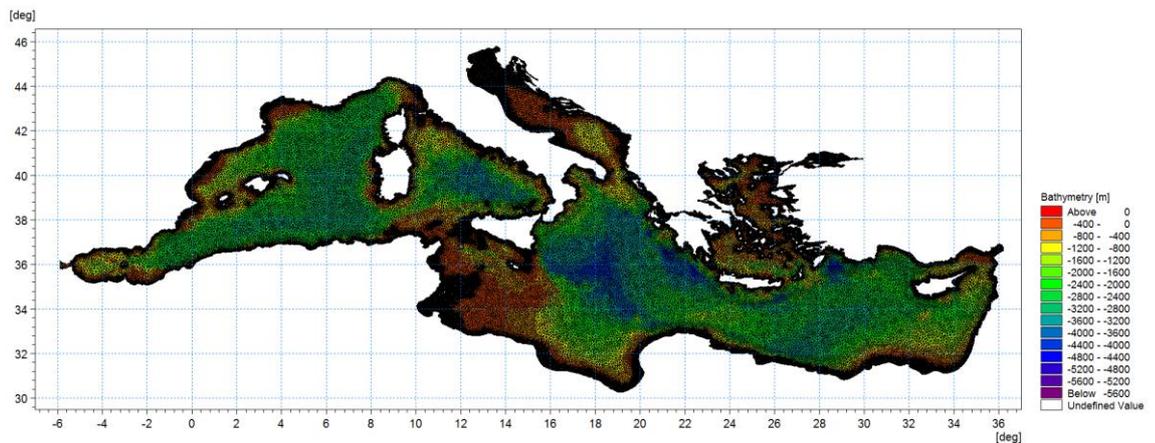


Figura 2.2: MWM – Dominio del modello, batimetria e *mesh* di calcolo

I risultati dei modelli del vento e delle onde sono memorizzati, ogni ora in tutto il dominio, in termini di parametri del vento e di parametri dell'onda mediati sul periodo d'onda ("*phase averaged results*" o risultati parametrici). Inoltre, gli spettri 2D, a cadenza oraria (in termini di energia d'onda associata a classi di frequenza e direzione) vengono salvati su una griglia regolare con una risoluzione spaziale costante di 0.1°.

I dati parametrici del vento MWM (orari) contengono:

- Velocità del vento @10m slm – WS (m/s), altre quote disponibili come quella a 80 m richiesta in questo studio
- Direzione del vento – WD (deg. N).

I dati parametrici standard dell'onda MWM (orari, totali) contengono:

- Altezza d'onda significativa spettrale– H_{m0} (m)
- Periodo di picco dell'onda – T_p (s)
- Periodo medio dell'onda – T_{01} (s)
- Periodo di zero-crossing – T_{02} (s)
- Direzione media dell'onda – MWD (deg. N)
- Direzione di picco dell'onda – PWD (deg. N)
- Deviazione standard della direzione – DSD (deg.)

¹ <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves>

2.1.1 Validazione dei dati del vento

Il set di dati MWM è stato ampiamente validato e utilizzato in molti studi scientifici e applicazioni e progetti commerciali. Per il parco eolico i dati del vento sono stati validati attraverso dati altimetrici a 10 m sul livello del mare, estratti per l'area evidenziata in rosso in Figura 2.3

La Figura 2.4 mostra lo scatter plot di tutte le velocità del vento modellate e dell'altimetro (a sinistra) e per le velocità del vento maggiori di 2.5 m/s (a destra), mentre la Figura 2.5 mostra lo stesso confronto per 8 settori direzionali. Il periodo di validazione copre gli anni dal 1992 al 2016 (inclusi).

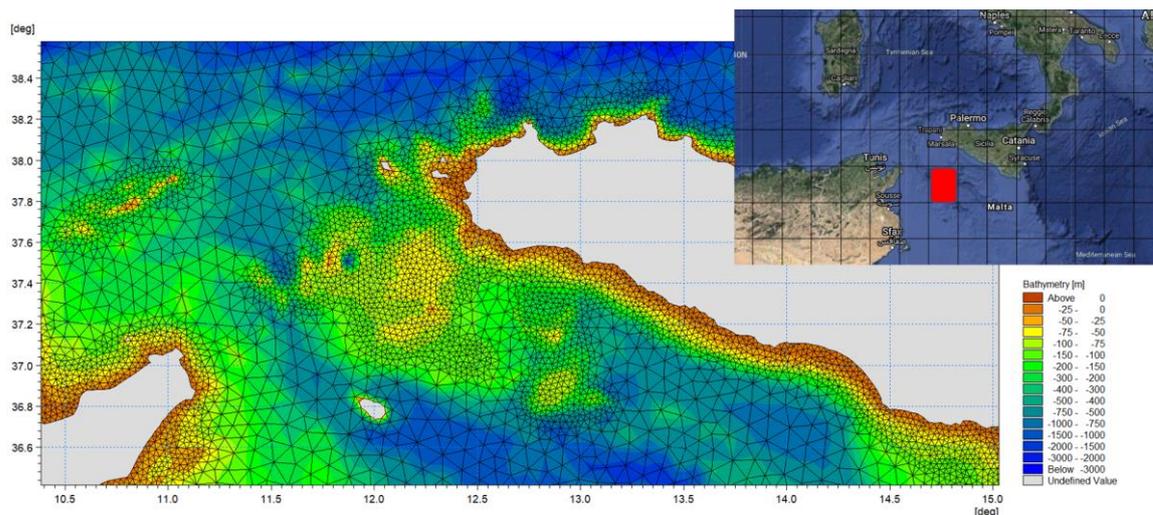


Figura 2.3: Copertura dei dati dell'altimetro utilizzati per la convalida dei dati del vento nel presente studio

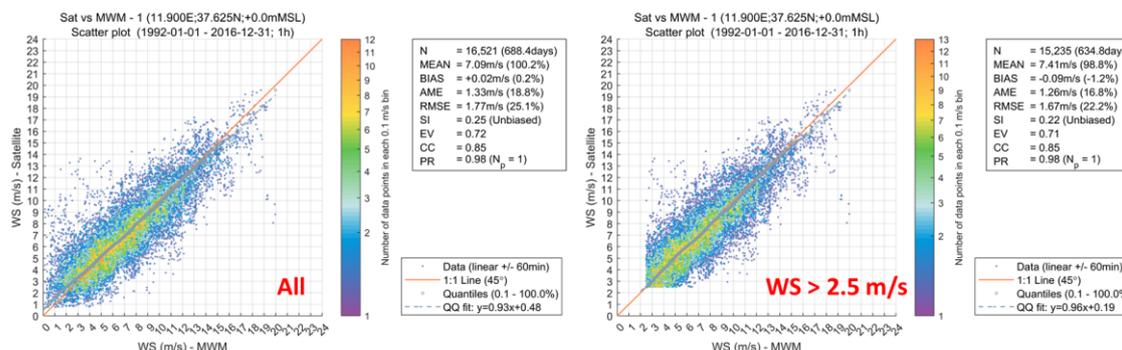


Figura 2.4: Validazione dei valori della velocità del vento (10 m) sui dati dell'altimetro per tutti i valori (a sinistra) e per WS > 2.5 m/s. Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità

In generale, i dati WRF sono in buon accordo con i dati altimetrici nel Canale di Sicilia. Tuttavia, si consiglia di effettuare un confronto tra i dati del modello del vento WRF e le misurazioni effettuate da strumentazione lidar galleggiante attualmente in corso (iniziate nell'Agosto 2021). Questo richiederà di effettuare una nuova simulazione del modello WRF.

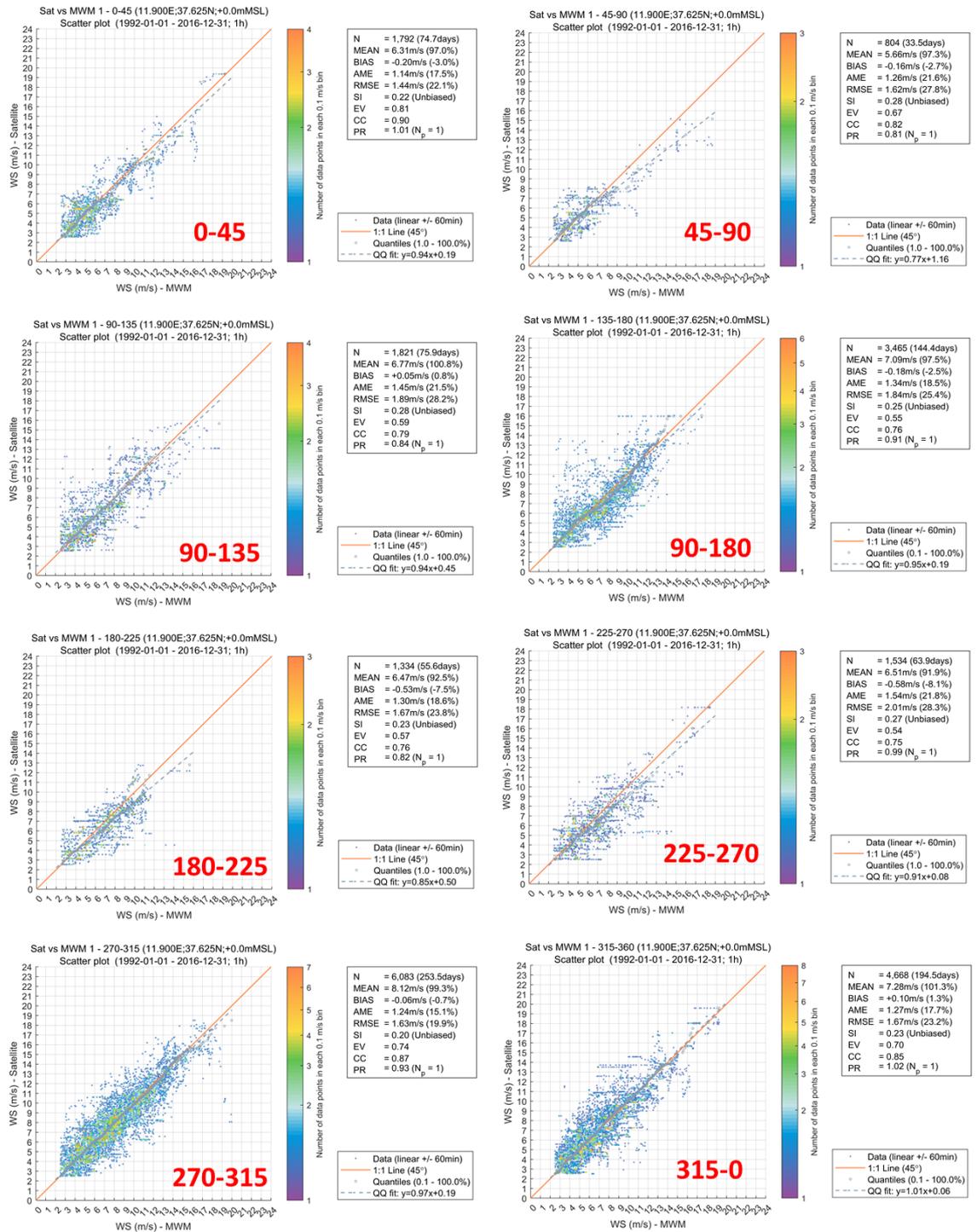


Figura 2.5: Validazione delle velocità del vento (10 m) attraverso i dati dell'altimetro per settori direzionali e WS > 2.5 m/s. Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità

2.1.2 I dati di periodo medio del vento

Le osservazioni del vento medio rappresentano di solito medie di 10 minuti in un singolo punto, mentre i dati del vento del modello atmosferico sono rappresentativi di un'area e una durata determinate da una combinazione delle forzanti applicate alla griglia del modello. Pertanto, i dati del modello possono essere in qualche modo considerati "smoothed" (nello spazio e nel tempo) rispetto alle rilevazioni. L'effetto di "smoothing" è generalmente stimato valutando un periodo

medio rappresentativo delle osservazioni per riflettere più accuratamente la minore variabilità del modello WRF.

Data la mancanza di dati sinottici nell'area del parco eolico, in questa fase non è possibile effettuare tale analisi. Sulla base di applicazioni simili nel Mar Mediterraneo, i dati del vento del MWM saranno assunti rappresentativi per un periodo medio di 2 ore. Un'adeguata verifica è rinviata a una fase successiva del progetto, quando saranno disponibili i dati di rilievo della strumentazione lidar galleggiante.

2.1.3 Validazione dei dati d'onda

Data la mancanza di misurazioni delle onde nell'area del progetto del parco eolico, i dati delle onde del MWM vicino alla costa sono stati validati con quelli provenienti da più di 20 boe, tra cui la più vicina di Mazara del Vallo (parte del RON locale), che è vicina al sito in progetto, come mostrato in Figura 2.6.

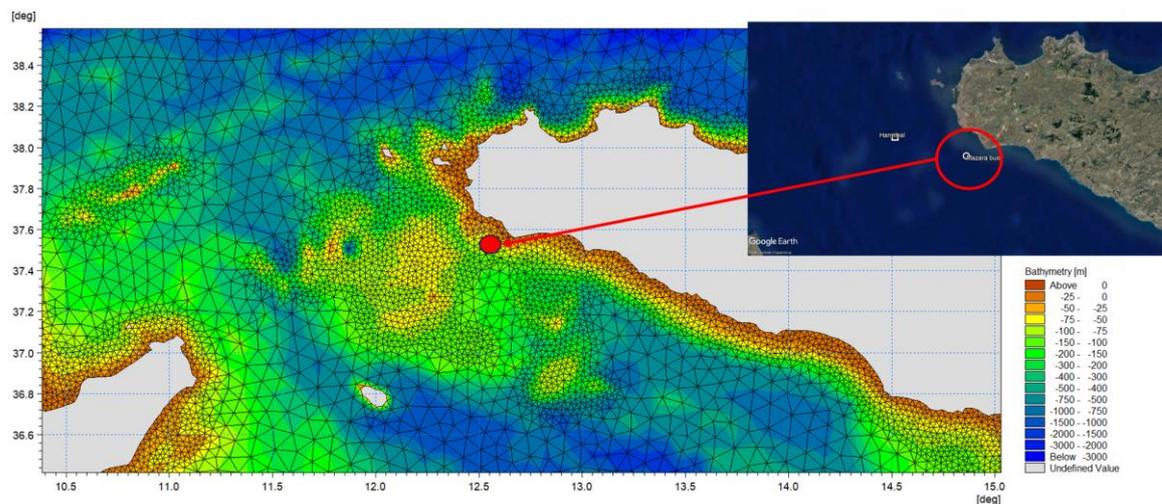


Figura 2.6: Posizione della boa di Mazara del Vallo (Rete Ondametrica Nazionale) usata per la validazione dei dati d'onda nel presente studio

La Figura 2.7 mostra lo *scatter plot* dell'altezza d'onda significativa modellata rispetto all'altimetro per tutti i dati (a sinistra) e per l'altezza d'onda significativa maggiore di 0.5 m (a destra), mentre la Figura 2.8 mostra lo stesso confronto per 8 settori direzionali. Il periodo di validazione copre gli anni che vanno da luglio 1989 a ottobre 2014. I grafici mostrano un ottimo confronto tra le altezze d'onda modellate e quelle misurate a Mazara.

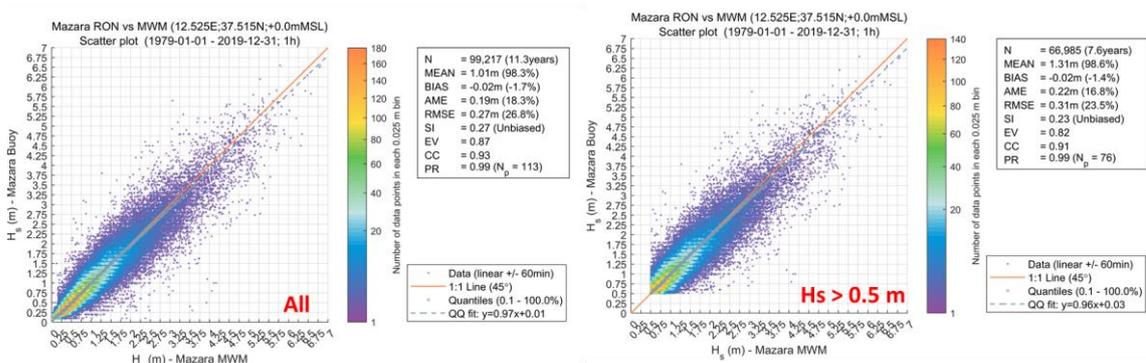


Figura 2.7: Validazione per tutti i valori di altezza d'onda significativa con quelli della boa di Mazara del Vallo (RON) (a sinistra) e per Hs>0.5 m (a destra). Vedere Appendice A per la definizione degli indici di qualità

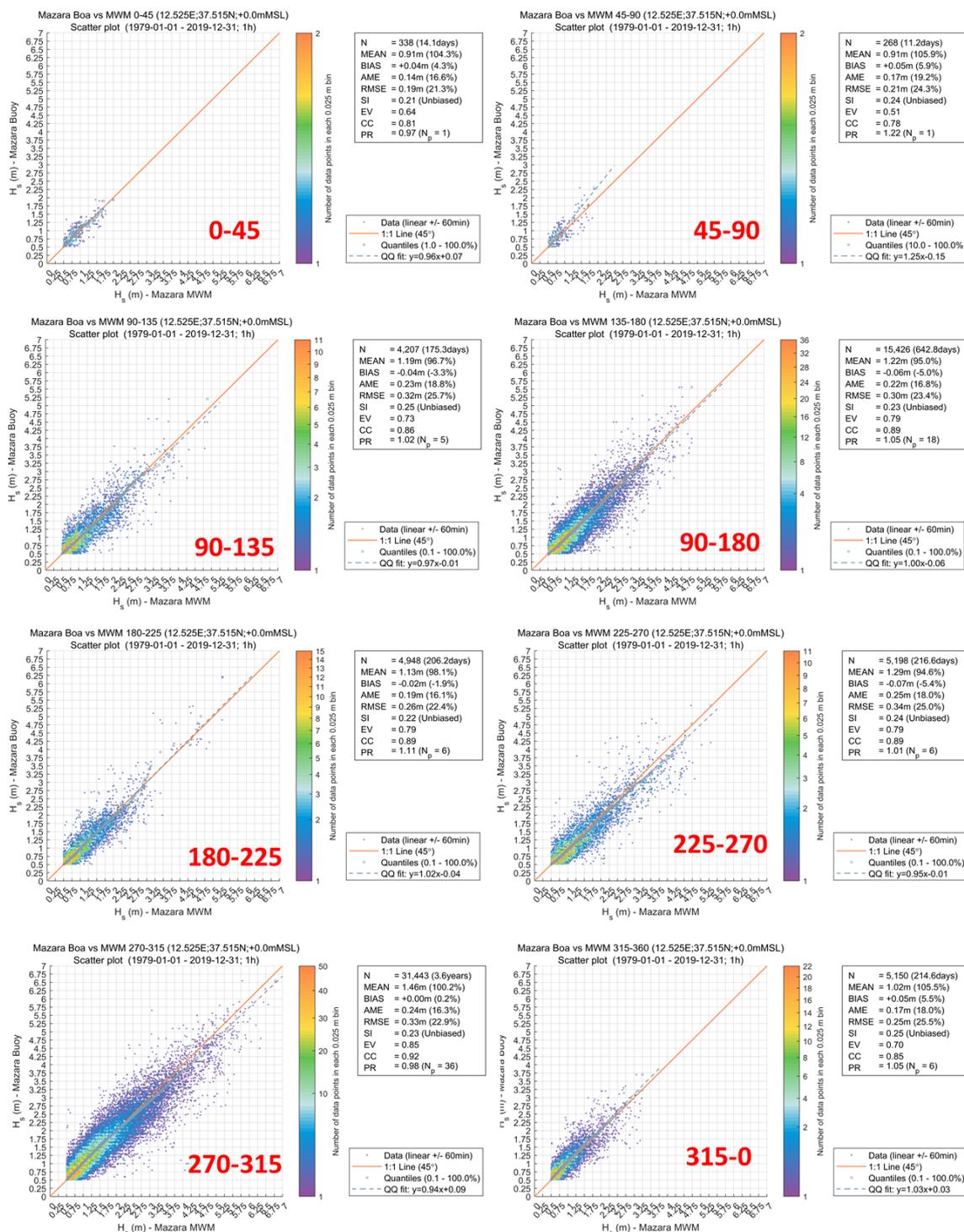


Figura 2.8: Validazione delle altezze d'onda significativa rispetto ai dati misurati dalla boa di Mazara del Vallo (RON) per settori direzionali e H_s>0.5 m

2.1.4 I dati di periodo medio dell'onda

I dati del modello d'onda rappresentano i valori istantanei di una cella di griglia e, considerando che la forzante del vento ha intervalli di un'ora (con una cella più grande di quella del modello d'onda), si prevede che i risultati del modello d'onda non rappresentino le fluttuazioni ad alta frequenza comuni nelle osservazioni registrate. Pertanto, i dati del modello possono essere considerati come uno stato del mare "smoothed" (nello spazio e nel tempo). Questa scala temporale dovrebbe essere presa in considerazione quando si applicano i dati del modello per scopi come la progettazione strutturale.

Un approccio piuttosto semplice per valutare tale scala temporale (o *smoothing*) del modello consiste nel confrontare gli spettri di potenza dell'altezza d'onda significativa osservata e modellata e fare la media, su diverse finestre temporali, dei dati osservati. La Figura 2.9 presenta un tale approccio a Mazara del Vallo, dove si può vedere che una finestra temporale di media di 3 ore si adatta meglio alla parte alta della frequenza dello spettro. Questo significa che, per un giusto confronto, le misure devono essere mediate sulle 3 ore.

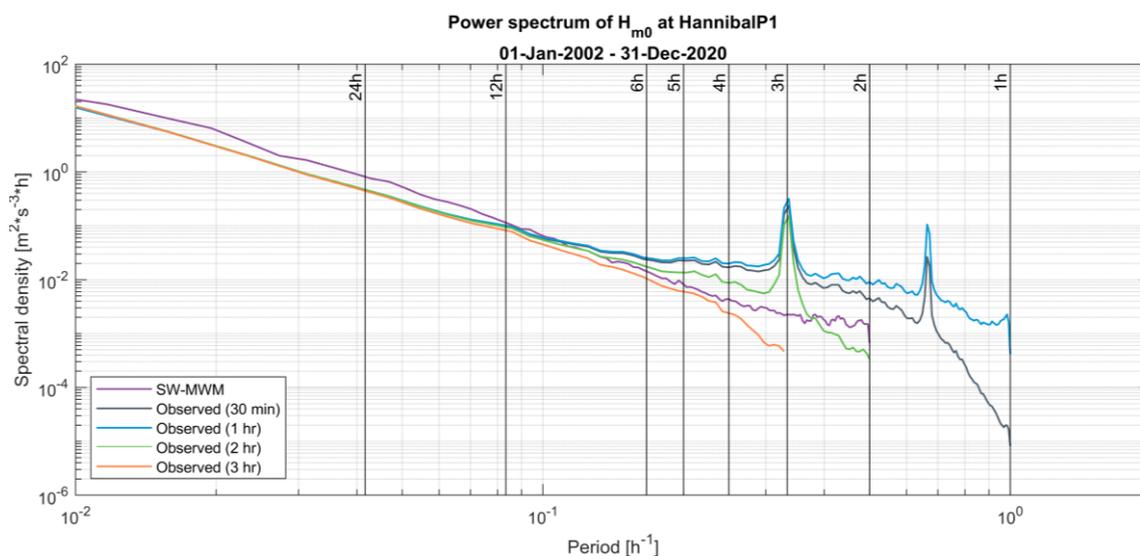


Figura 2.9: Spettri di Potenza in frequenza di MWM (Mike21 SW) modellati H_{m0} confrontati con quelli osservati alla boa di Mazara del Vallo

2.2 I dati del Copernicus Marine Environment Monitoring Service

Il *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) fornisce regolari e sistematiche informazioni sullo stato fisico, la variabilità e la dinamica degli ecosistemi oceanici e marini a scala globale (oceanica) o regionale (mari europei).

Il prodotto di rianalisi fisica MED (d'ora in poi MEDREA24) è generato da un sistema numerico composto da un modello idrodinamico, fornito dal *Nucleos of European Modelling of the Ocean* (NEMO) e da uno schema di assimilazione dei dati variabili (OceanVAR) per i profili verticali di temperatura e salinità e per i *Sea Level Anomaly* satellitari lungo le tracce dei dati. Il sistema di rianalisi è forzato dai campi atmosferici ERA5 dell'ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e assimila le osservazioni rielaborate. La risoluzione della griglia orizzontale del modello è $1/24^\circ$ (4-5 km) e i livelli verticali non uniformemente spazati sono 141. Il modello è disponibile con frequenza giornaliera attraverso le medie giornaliere dei campi di temperatura, salinità, altezza della superficie del mare e correnti. I dati orari sono disponibili solo per le correnti di superficie e i livelli d'acqua.

La Tabella 2.2 mostra la configurazione del modello *Copernicus Med Sea* i cui dati sono stati utilizzati nel presente studio meteomarinario e consegnati al 7 Seas Med. Visto che i dati del CMEMS

non includono le forzanti delle maree, esse sono state aggiunte sulla base delle costituenti delle maree del *Global Tide Model* di DHI.

Un'ampia validazione di MEDREA24 è fornita attraverso il CMEMS, valutato nel periodo 1987-2019, secondo i parametri di temperatura, salinità, altezza della superficie del mare, corrente, profondità degli strati misti ed energia cinetica turbolenta e comparandoli con le osservazioni di satelliti quasi-indipendenti o in sito e con set di dati climatologici. Fare riferimento a [3] per ulteriori dettagli.

Tabella 2.2 Riepilogo della configurazione principale del modello *Med Sea Reanalysis* (CMEMS)

Main configuration of the nesting model (Med Sea Reanalyses)	
MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004	
Numerical model	NEMO v3.6
Horizontal resolution	1/24° (approx. 4km)
Vertical resolution	141 unevenly spaced z levels
Temporal resolution	daily-mean, monthly-mean, hourly-mean
Availability	01.01.1987 - 31.12.2019
Tides	N/A
Atmospheric Forcing	1-h, 0.25° horizontal-resolution ERA5 reanalysis fields from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
Assimilation scheme	OceanVar (3DVAR)
Assimilated observations	In situ vertical profiles of Temperature and Salinity from CTDs, XBTs, MBTs, bottles, ARGO floats; Sea Level Anomaly (SLA) from available satellites. Objective Analyses-Sea Surface Temperature (SST) fields are used to correct surface heat fluxes
Initial conditions	Temperature and salinity monthly climatology (named SDN_V2aa) produced within the framework of SeaDataNet FP6 Project
Bathymetry	GEBCO 30sec interpolated on the model grid

2.3 I dati meteomarini forniti per il parco eolico

I dati meteomarini estratti dalle fonti di dati descritte nelle sezioni precedenti sono stati consegnati a 7 Seas Med in quanto facenti parte dell'obiettivo di lavoro concordato nel *Consultancy Contract* e nel *Licence Agreement* del 28 giugno 2021. La posizione del punto di estrazione è raffigurata in Figura 2.1 e in Tabella 2.1.

I dati di vento e onda sono stati forniti dal database meteomarino del Mediterraneo di DHI (MWM), che ricopre un periodo di 42 anni (1979-2020, compresi). I dati idrodinamici sono stati estratti dal *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) nella finestra di 34 anni (1987-2019, compresi). Visto che i dati CMEMS non includono le maree, questi sono stati inclusi sulla base delle costituenti delle maree del *Global Tide Model* di DHI.

I dati d'onda includevano spettri d'onda 2D. I dati sono stati forniti in quattro file MATLAB, come descritto nella tabella seguente.

Tabella 2.3: Elenco dei contenuti del pacchetto dei dati meteomarini *hindcast* per il sito

ID	Long. [E]	Lat. [N]	D (m)	Parameter	Time coverage	Model Database
Point P1	12	37.6	200	WIND	1979/01/01 - 2020/12/31	MWM (WRF)
				WAVE	1979/01/01 - 2020/12/31	MWM (MIKE 21 SW)
POINT 1	12	37.6	200	CURRENT	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS + DTU
				WATER LEVEL	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS + DTU
				TEMPERATURE	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS
				SALINITY	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS

3 Climatologia generale

Lo stretto di Sicilia (o Canale di Sicilia) si trova nell'area del Mediterraneo centrale tra Sicilia e Tunisia (Figura 3.1), un'area larga e dinamicamente attiva che connette i sottobacini orientale e occidentale del Mediterraneo, attraverso le acque poco profonde dello Stretto di Sicilia. Il canale di Sicilia divide il Mediterraneo occidentale dal Mediterraneo orientale; è caratterizzato da una batimetria complessa, con ampie piattaforme continentali, canale profondi e poco profondi nonché pianura abissali.

Il clima della zona è tipicamente caratterizzato da inverni temperati e estati calde e secche. Nel Mediterraneo centrale, il maestrale, freddo e secco, soffia in direzione nord-nordovest nel Golfo del Leone, occasionalmente fino alle coste africane. Quando entra nel Mar Tirreno, il *mistral* prende il nome di Maestrale, assumendo una direzione più marcata verso sud. Sul Mediterraneo centrale, specialmente in inverno, soffia Libeccio, in direzione ovest-sudovest e lo Scirocco, umido e caldo, che, in particolare in autunno, soffia da sud a est.

The climate of the area is typically characterized by temperate winters and dry and hot summers. In the central Mediterranean, the north-northwest cold and dry mistral blows in the Gulf of Lion, occasionally up to the African coasts. When it enters the Tyrrhenian Sea, the Mistral winds takes the name of maestrale, assuming a more marked southward direction. The central Mediterranean is swept, especially in winter, by the westerly-southwesterly Libeccio and by the wet and warm Sirocco, which in particular in autumn blow from south to east.

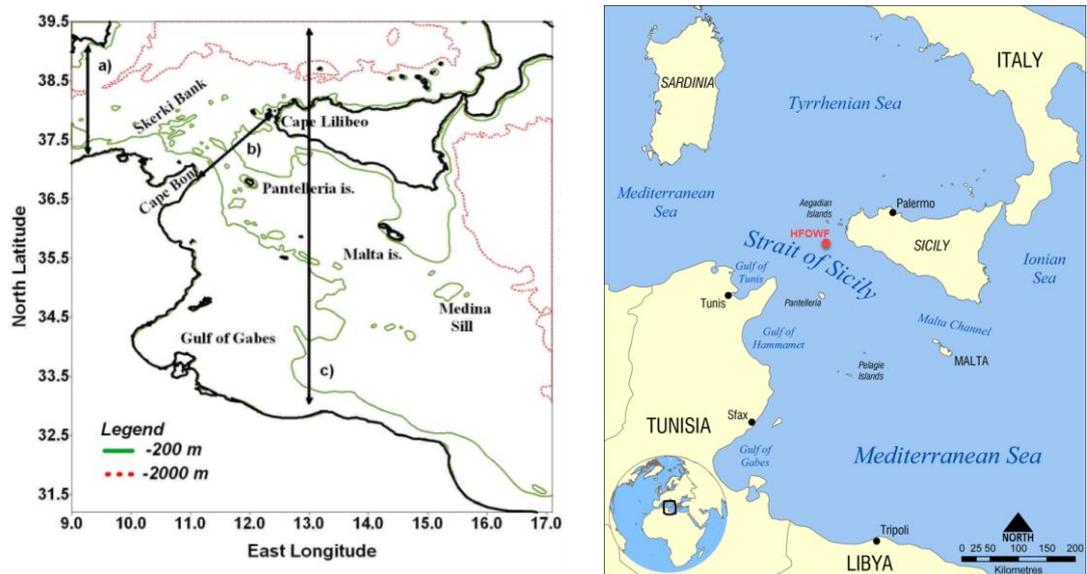


Figura 3.1: Batimetria del mar Mediterraneo centrale (a sinistra). Le isolinee indicano i livelli 200 m e i 2000 m di profondità. a), b) e c) indicano le sezioni verticali lungo la longitudine 9 E, in corrispondenza del Canale di Sicilia e lungo la longitudine 13 E ([19]). Mappa (a destra) da https://en.wikipedia.org/wiki/Strait_of_Sicily#/media/File:Strait_of_Sicily_map.png - Norman Einstein - CC BY-SA 3.0

3.1 Caratteristiche del vento su mesoscala

Una panoramica dei principali sistemi eolici e della loro variabilità spaziale nel bacino del Mediterraneo è ben rappresentata da (Zecchetto et al., 2007 [4]), che offre un'analisi climatologica

sul bacino per il periodo 2000-04, grazie al satellite *Quick Scatterometer* (QuickSCAT), fornito dalla *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

La Figura 3.2 riporta il campo di probabilità che la velocità del vento $U > 10$ m/s, con le direzioni medie del vento sovrapposte, calcolate su una griglia regolare $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, ma tracciate su una griglia $1^\circ \times 1^\circ$ per questioni di leggibilità. Mostra il flusso del vento verso sud-est nel Mediterraneo e la circolazione da nord nel Mar Nero. Il Canale di Sicilia è principalmente interessato dai venti di ponente e di nord-ovest: la struttura a scala regionale dei venti è comprovata dalla probabilità di velocità del vento, che raggiunge i suoi valori massimi ($P > 0.3$) nel Golfo del Leone e nel Canale di Sicilia (Maestrale), nel bacino levantino (Etesini), nell'Egeo settentrionale (vento simile alla Bora) e in poche piccole aree del Tirreno, Ionio e Adriatico.

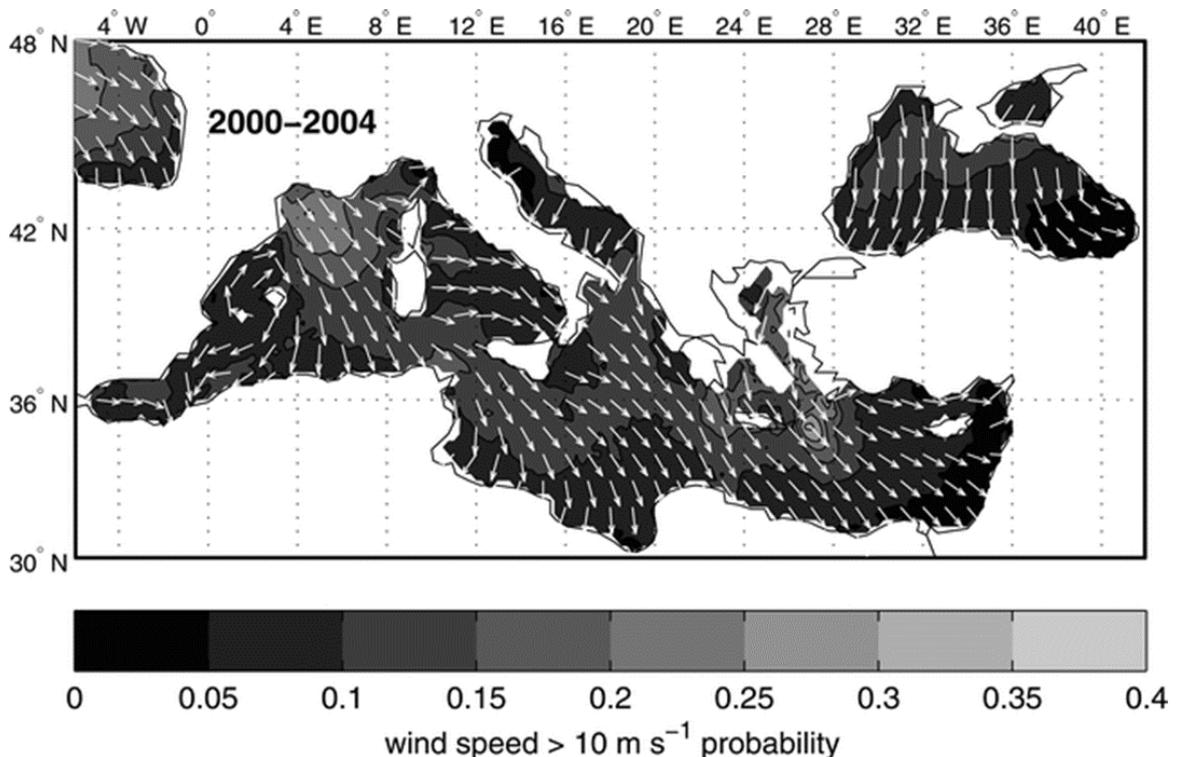


Figura 3.2: Campi annuali (2000–04): probabilità di occorrenza di venti $U > 10$ m s⁻¹ con le direzioni medie del vento sovrapposte (da [4])

La Figura 3.3 (parte alta) mostra la distribuzione spaziale della variabilità relativa annuale della velocità del vento G . In figura si può vedere che i valori più alti ($G > 0.40$) si verificano nelle aree spazzate dai venti da terra, provando forti interazioni tra il flusso d'aria e l'orografia. La parte bassa della Figura 3.3 presenta il campo di stabilità del vento S , mostrando che le direzioni del vento più variabili ($S < 40$) si trovano nei mari di Alboran, Baleari, Adriatico, Tirreno e Nero e nel Canale di Sicilia.

I campi di variabilità relativa della velocità dei venti stagionali, riportati sulla sinistra della Figura 3.4, mostrano che l'inverno e la primavera sono le stagioni più variabili. I campi di stabilità del vento sono riportati nei pannelli di destra della Figura 3.4. L'inverno è l'unica stagione di costanza per lo più uniforme e bassa su tutto il bacino ($30 < S < 50$), che deriva dal frequente passaggio dei fronti in questa stagione, mentre l'estate è la stagione con la più alta stabilità.

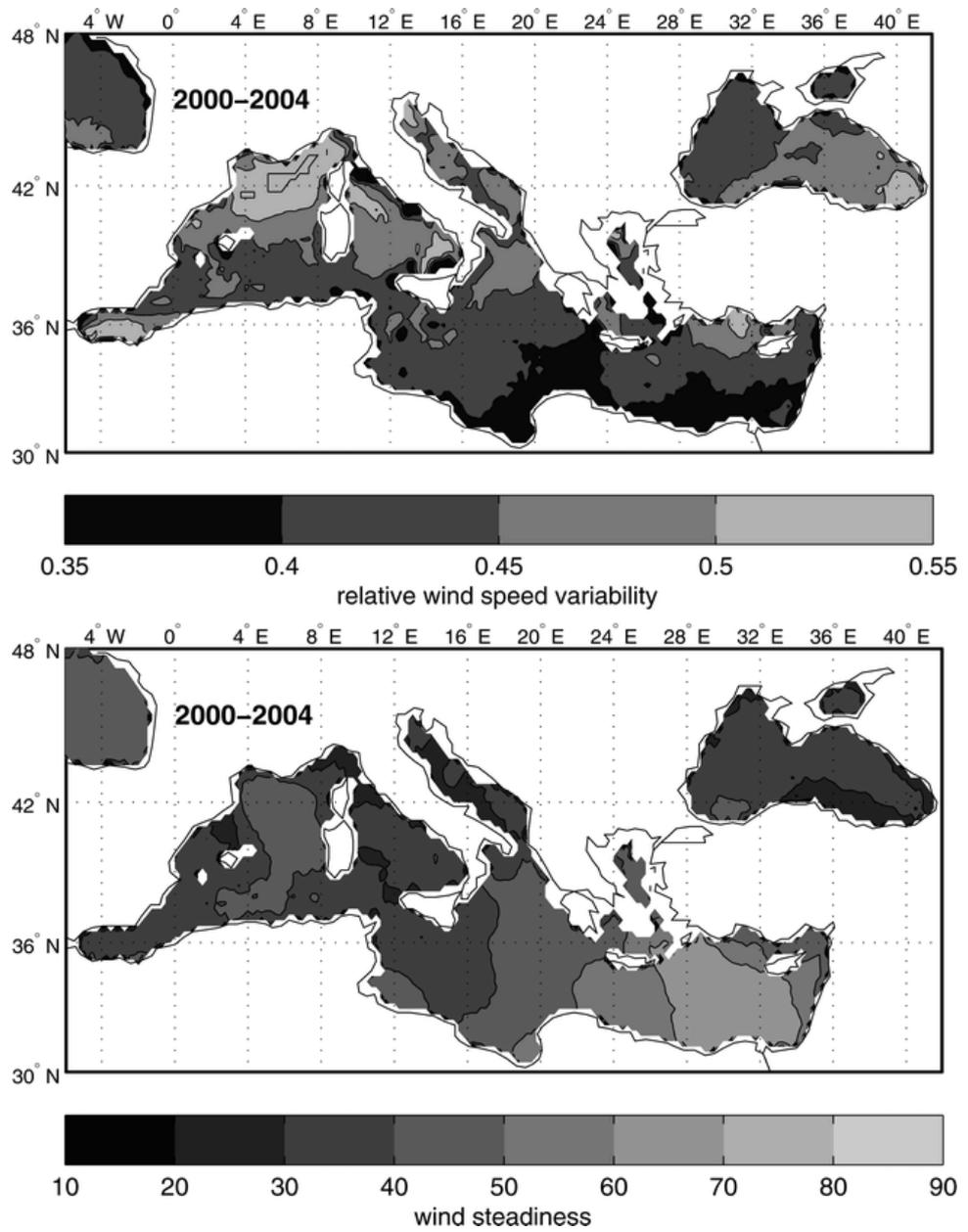


Figura 3.3: Campi annuali (2000–04): stabilità del vento S (in basso) e variabilità relativa della velocità del vento G (in alto) (da [4])

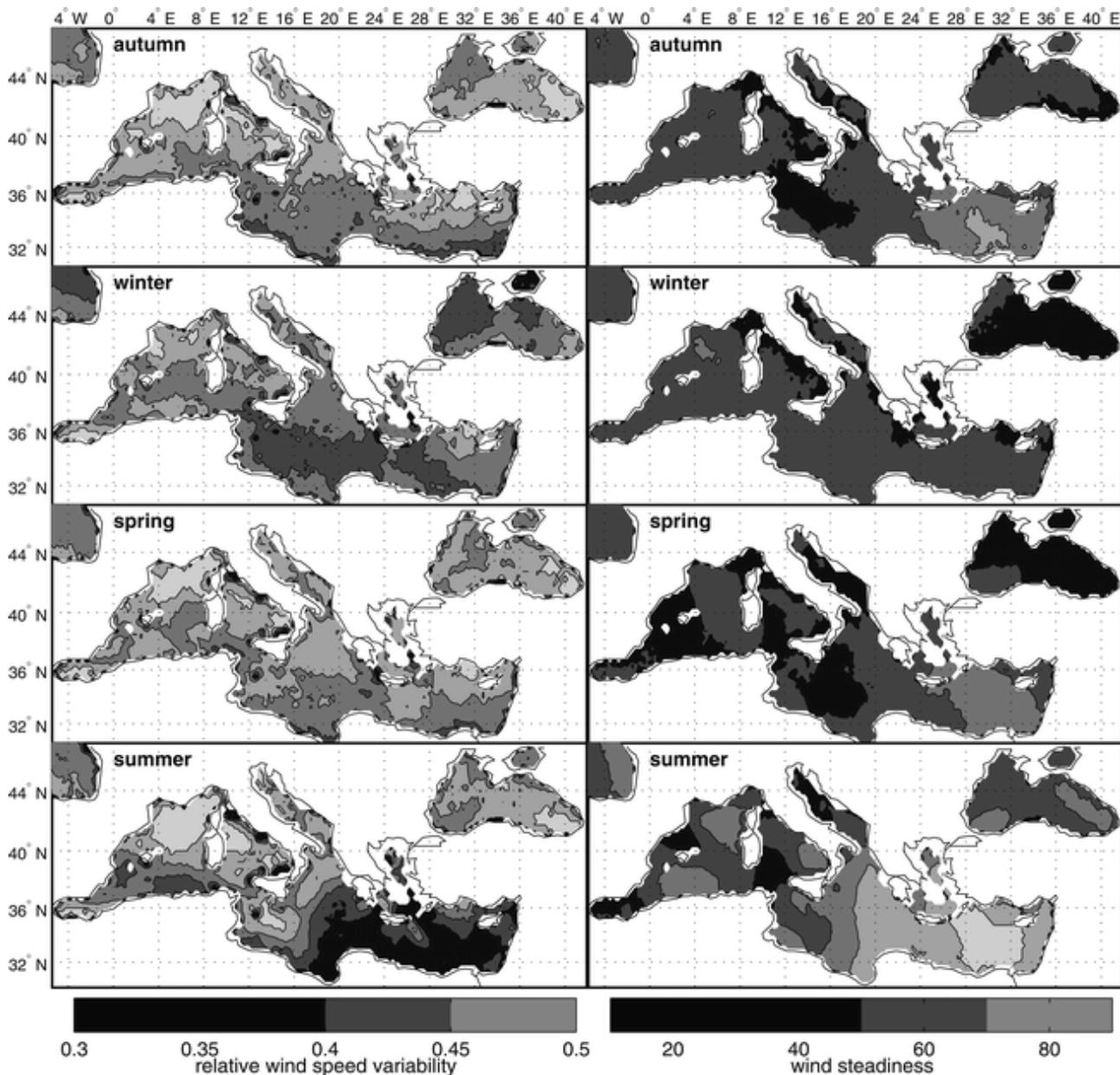


Figura 3.4: Variabilità stagionale relativa della velocità del vento G (a sinistra) e stabilità S (a destra) (da [4])

3.2 Circolazione generale

La circolazione generale su larga scala nel Mar Mediterraneo è in parte controllata dal gradiente di densità e dal dislivello tra l'Oceano Atlantico e il Mar Mediterraneo e dalla trasformazione delle masse d'acqua che induce una componente termoalina attiva nella circolazione (Saliot, 2007 [4]). Il flusso generale delle masse d'acqua nel Mediterraneo è determinato principalmente dallo scambio di calore e sale/dalla circolazione termoalina (Hopkins, 1978 [6]) e dall'effetto della rotazione terrestre (forza di Coriolis). Di conseguenza, la circolazione scorre approssimativamente in senso antiorario lungo i versanti continentali, ma l'attività dinamica alla mesoscala si impone quasi ovunque nel Mediterraneo, modificando questo percorso medio. I fenomeni di mesoscala sono tipicamente di risalita, fronti, meandri e vortici. Localmente ed episodicamente (fino a diversi mesi) possono perturbare fortemente la circolazione generale (Millot and Taupier-Letage, 2005 [7]).

Questo si traduce in un flusso a due strati attraverso lo Stretto di Sicilia con un flusso superficiale di *Modified Atlantic Water* (MAW) poco salina verso est e un deflusso, più in profondità e più salato, di *Levantine Intermediate Water* (LIW), come raffigurato in Figura 3.5. entrambi i flussi sono caratterizzati da una significativa variabilità stagionale e interannuale. Le indagini passate si sono basate principalmente su misurazioni idrografiche (Manzella, 1994 [8]; Grancini and Michelato, 1987 [9]; Poulain, 1998 [10]), che hanno fornito preziosi contributi per stabilire una stima della variabilità stagionale/interannuale attesa nello Stretto. Tuttavia, per rilevare fenomeni di mesoscala innescati da dinamiche intrinseche, sono necessarie misurazioni con elevata copertura, sia spaziale sia temporale.

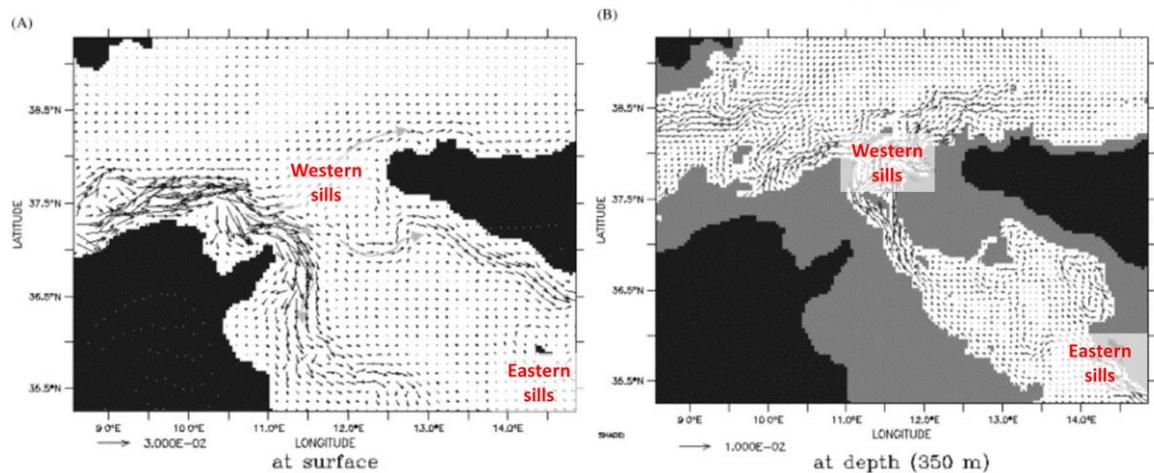


Figura 3.5: Circolazione generale del Canale di Sicilia: (A) correnti dello strato superiore; (B) correnti dello strato inferiore. Le aree grigie evidenziano zone con profondità minore di 200 m. Da [11].

Le maree mediterranee sono generalmente molto deboli, come dimostrato da modelli e osservazioni. Secondo (Sparnocchia et al., 2004 [12]), le maree di entità Maggiore sono nello Stretto di Gibilterra, forzate dalla marea atlantica, e sulle ampie piattaforme del Canale di Sicilia. Le maree dominanti sono quelle semidiurne M2 e S2, ma anche le componenti diurne K1 e O1 possono essere significative, anche se le loro ampiezze sono generalmente inferiori. Nel Canale di Sicilia la marea M2 è amplificata sulla piattaforma tunisina, ma presenta un anfidromo vicino all'isola di Pantelleria con la fase che ruota in senso antiorario intorno ad esso (Mosetti, 1987 [13]). La componente S2 ha un andamento simile, ma l'anfidromo è leggermente più a nord. D'altro lato, le componenti diurne sono deboli e le ampiezze maggiori (ad esempio circa 3 cm per K1) si trovano all'estremità occidentale dello Stretto. Grancini and Michelato (1987, [9]) hanno studiato le maree e le oscillazioni inerziali nei dati dei misuratori di corrente lungo il Canale di Sicilia: sono state osservate, lungo tutta la piattaforma occidentale, grandi correnti diurne e semidiurne (circa 20 cm/s), che rappresentano una frazione importante dell'energia cinetica turbolenta (vedi Figura 3.6). La più alta densità di energia associata alle maree è stata trovata sulla piattaforma siciliana, dove rappresenta il 70% dell'energia cinetica turbolenta. Lungo la piattaforma orientale sono state osservate maree diurne di circa 10 cm/s sul *Plateau* di Malta. Si è visto che l'ampiezza diminuisce spostandosi verso la costa della Sicilia e verso la regione centrale più profonda. Sulla piattaforma libica le correnti di marea sono risultate trascurabili.

3.2.1 Circolazione superficiale

La circolazione superficiale è dovuta alla *Atlantic Water* (AW), che entra nel Mar Mediterraneo attraverso lo Stretto di Gibilterra e scorre in superficie verso est; quest'acqua viene continuamente trasformata mescolandosi con quella presente nel Mediterraneo lungo tutto il suo percorso, diventando più calda e salata lungo la costa africana e costituendo l'origine della *Modified Atlantic Water* (MAW) (Warn-Varnas et al., 1999 [18]).

Scorre inizialmente attraverso il mare di Alboran, raggiungendo la costa algerina a 0°E circa. Forzato dalla forza di Coriolis, in corrispondenza del Canale di Sicilia, il flusso si dirama, con una parte che va a NE verso il Mar Tirreno e l'altra che scorre verso i bacini Ionio e Levantino attraverso il Canale di Sicilia. Il MAW scorre verso est lungo i versanti algerino e tunisino, mantenendo la costa sulla sua destra ed entra nel Mediterraneo orientale attraverso il Canale di Sicilia. Il MAW si trova anche in tutto il Mediterraneo nord-occidentale, formando la corrente permanente nord-mediterranea lungo le coste italiane, francesi e spagnole. Avvicinandosi al Canale di Sardegna, un ramo scorre verso nord nel Mediterraneo nord-occidentale. Nella Figura 3.6 è mostrato il modello di circolazione media vicino all'area di studio (cerchio rosso) a febbraio e agosto (da [19]), mentre la Figura 3.7 mostra lo schema di circolazione del MAW come definito da (Salot, 2005 [4]).

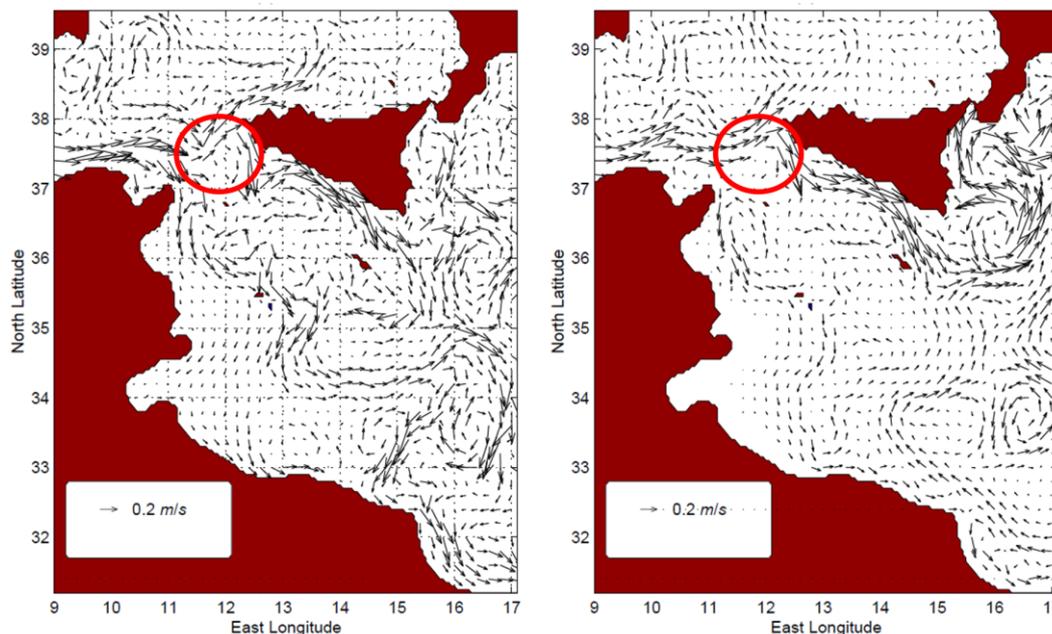


Figura 3.6: Campo di velocità totale *hindcast* mediata su 10 giorni a 5 m di profondità a febbraio (a sinistra) e ad Agosto (a destra) (from [19])

Nel canale di Sardegna il MAW è parzialmente deviato verso nord dal poco profondo Banco Skerki tunisino (Manzella, 1990 [20]) e poi si divide in tre rami principali per effetto della batimetria. Un ramo entra nel Mar Tirreno, scorrendo lungo la costa settentrionale siciliana; gli altri due flussi del MAW confluiscono nel bacino del Mediterraneo orientale attraversando il Canale di Sicilia (Astraldi et al., 1999 [21]). Il flusso principale nello Stretto è lungo la costa tunisina, mentre il flusso minore, sulla piattaforma meridionale siciliana, dà origine al meandro settentrionale AIS (*Atlantic Ionian Stream*) (Robinson et al., 1999 [24]).

Circa due terzi delle acque superficiali dell'Oceano Atlantico entrano nel bacino del Mediterraneo orientale attraverso il Canale di Sicilia. Lungo lo Stretto, la circolazione è complessa a causa della topografia caratterizzata da numerose isole e alla ampia larghezza dello Stretto. All'uscita del Canale di Sicilia, si verificano tre processi, così che il vortice orientale, al suo inizio, inizia a dividersi in più componenti: uno è un ramo che si estende a nord-est; il secondo è la generazione di vortici mesoscala che tendono a spostarsi nella parte centrale del Mar Ionio e, la terza, il flusso regolare lungo la costa tunisina che scorre verso est. Una circolazione generale di tipo ciclonico è stata proposta nel Mar Levantino e nel Mar Ionio.

La circolazione geostrofica delle acque del Mediterraneo centrale e orientale è notevolmente stabile in inverno e autunno ed è caratterizzata da un vasto vortice ciclonico nel Mar Levantino da un vortice anticiclonico vicino alla costa egiziana. Questi due flussi hanno una variabilità stagionale significativamente diversa. Mentre il flusso meridionale lungo la costa africana raggiunge il suo massimo nel tardo autunno (Astraldi et al., 1996 [22]). La componente del MAW

a ridosso della costa siciliana meridionale è più cospicua durante l'estate e l'autunno e durante l'inverno riempie l'intera estensione dello Stretto. A partire dalla primavera, questa componente del MAW inizia gradualmente a distaccarsi dalla superficie, diventando in autunno un flusso sotterraneo a una profondità di circa 60 m.

Gli schemi di circolazione superficiale sono mostrati in Figura 3.7.

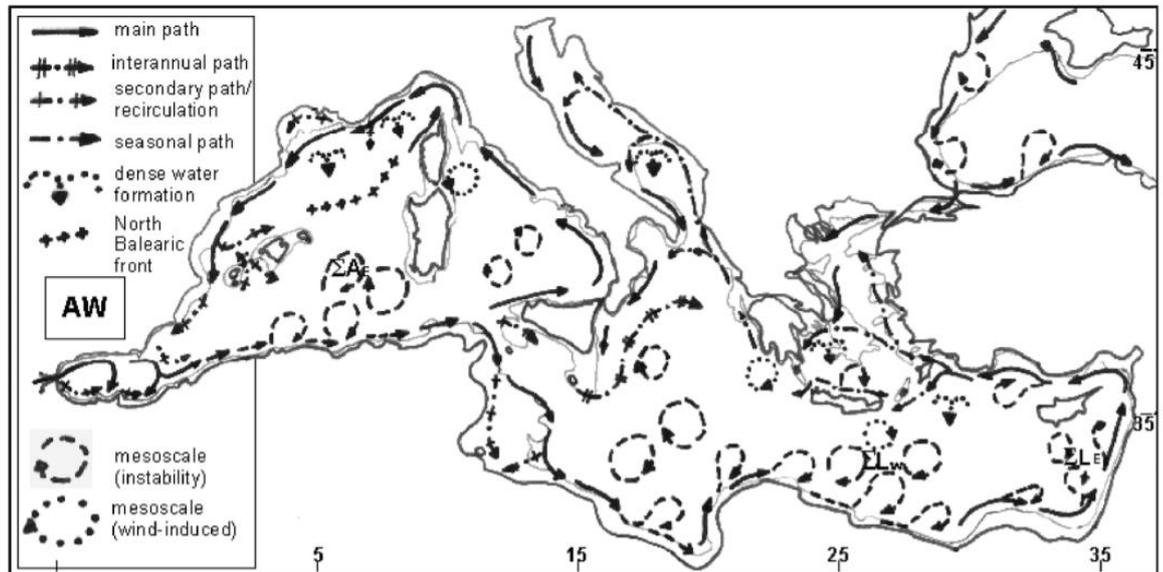


Figura 3.7: Circolazione del MAW in superficie (da [7])

3.2.2 Circolazione intermedia

Il LIW si forma principalmente nel bacino levantino nord-orientale durante l'inverno, a seguito di processi di raffreddamento ed evaporazione. Dopo la formazione, il LIW si dirige verso ovest lungo le coste di Creta e Rodi – principalmente per la forza di Coriolis – a una profondità intermedia, penetrando la dorsale del Mediterraneo centrale ed entrando infine nel bacino occidentale, dopo aver attraversato lo Stretto di Sicilia. Il LIW entra nel Canale di Sicilia attraverso la piattaforma di Medina con una salinità di circa 38.74-38.75 psu e una temperatura di circa 14.0-14.1°C in autunno-inverno (Warn-Varnas et al., 1999 [18]). Quando il LIW lascia il Canale di Sicilia, si dirige verso destra lungo le coste siciliane e scorre, in senso antiorario, verso lo Stretto di Gibilterra, mescolandosi con le acque superiori e inferiori, aumentando la sua salinità. Quindi, l'intero LIW si sposta nel Mar Tirreno, vincolato dalle caratteristiche topografiche e dall'effetto di Coriolis, e si mescola parzialmente con le acque superiori e inferiori, diventando più salato (Sparnocchia et al., 1999 [23]).

Il flusso di LIW non è costante ma soggetto a variabilità stagionale e calcolato essere 2-3 volte superiore in inverno rispetto all'estate (Manzella et al., 1988 [8]; Astraldi et al., 1996 [22]). La profondità del nucleo del flusso è più bassa in inverno, sotto i 200 m, e più vicino alla superficie in estate e autunno. Nel Mar Mediterraneo, il LIW scorre lungo la costa italiana, in parte uscendo dal Canale di Corsica verso nord, soprattutto durante l'inverno, e in parte a sud-ovest lungo la costa orientale sarda a una profondità compresa tra 700 m e 1000 m, sovrapponendosi poi alla WMDW (*Western Mediterranean Deep Water*) nel Canale di Sardegna (Hopkins, 1978 [6]).

Gli schemi di circolazione del LIW sono mostrati in Figura 3.8.

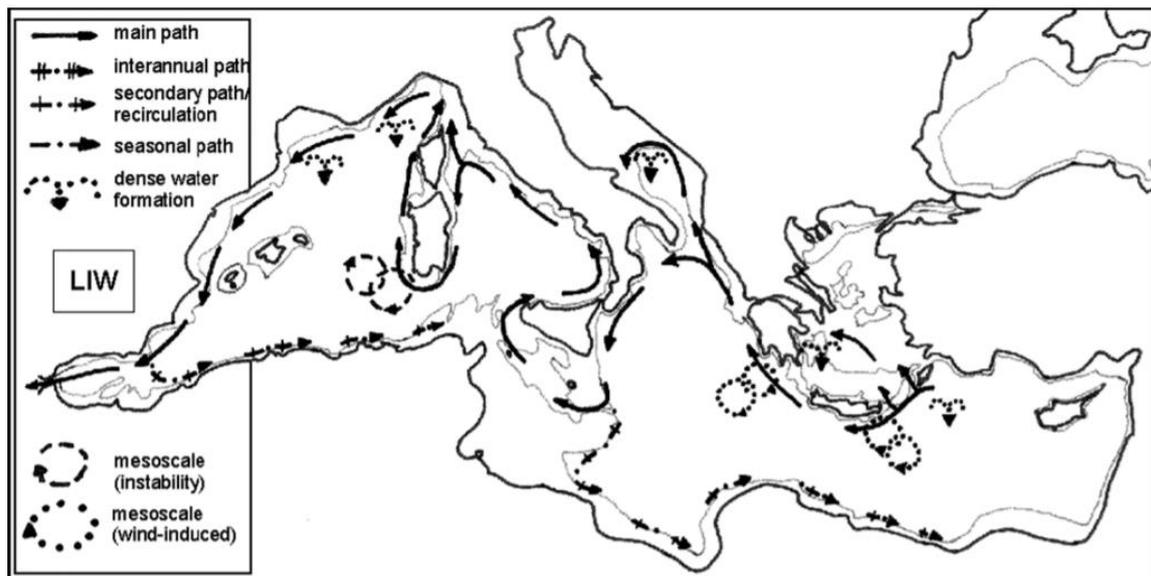


Figura 3.8: Circolazione del LIW a 500 m di profondità (da [7])

3.2.3 Circolazione profonda

Le acque profonde all'interno del bacino del Mediterraneo possono essere classificate come: acque profonde dell'Egeo e acque profonde dell'Adriatico, che formano le acque profonde del Mediterraneo orientale (EMDW) e acque profonde del Tirreno e acque profonde del Golfo del Leone, che formano le acque profonde del Mediterraneo occidentale (WMDW). Esperimenti sul campo condotti a partire dai primi anni '80 nell'ambito del programma di ricerca cooperativa internazionale POEM (*Physical Oceanography of the Eastern Mediterranean*) hanno dimostrato che un unico corpo idrico omogeneo riempiva l'intero Mediterraneo orientale al di sotto di una profondità di circa 1200 m. Hanno sostenuto che la colonna d'acqua negli strati profondi è caratterizzata da una temperatura potenziale e da una salinità che decrescono lentamente con la profondità, il che implica una stabilità statica molto bassa. Il periodo di ricambio delle acque profonde è stato stimato a circa 126 anni. Sotto l'influenza della forza di Coriolis, le acque profonde dell'Egeo e dell'Adriatico scorrono nel punto più profondo del Canale di Sicilia, principalmente nel lato tunisino, verso il bacino del Mediterraneo occidentale. Queste acque sono più dense di quelle tirreniche profonde presenti, quindi scorrono al di sotto e si mescolano con queste acque per formare l'acqua profonda tirrenica che si trova a 2000-3500 m.

Gli schemi di circolazione di queste masse di acqua profonda sono mostrate in Figura 3.9.

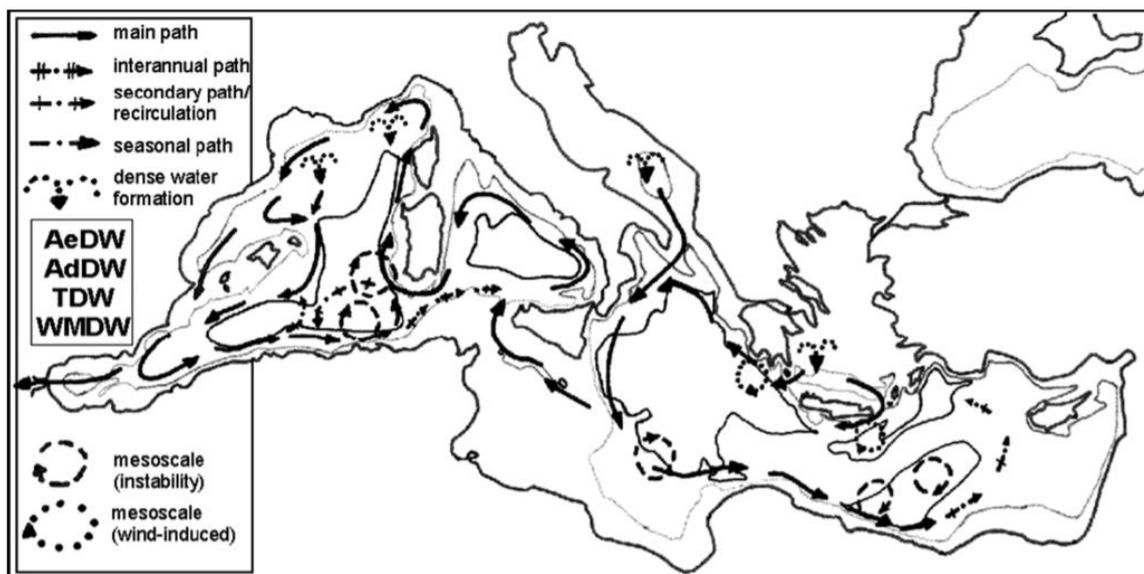


Figura 3.9: Circolazione in acque profonde. AeDW, AdDW, TDW e WMDW indicano rispettivamente le acque profonde dell’Egeo, dell’Adriatico, del Tirreno e del Mediterraneo occidentale (da [7])

3.3 Il clima ondoso nel Mar Mediterraneo

Il Mar Mediterraneo presenta una grande varietà di caratteristiche del clima ondoso e la sua variabilità è principalmente governata dalle caratteristiche meteorologiche altamente diversificate attive su scala sinottica e mesoscala (Sartini L. et al., 2017 [14]).

La distribuzione dei valori massimi assoluti di altezza d’onda significativa ricostruite da modello sull’intero bacino mostra che gli stati del mare di maggiore entità si verificano nell’intero bacino occidentale e sono parzialmente associati a forti perturbazioni meteorologiche provenienti dall’Oceano Atlantico, come si può vedere in Figura 3.10.

Queste condizioni ondose molto intense sono particolarmente marcate vicino al Golfo del Leone e al Mare delle Baleari e vicino al bacino algerino. Anche nel Tirreno settentrionale si sviluppano questi stati di mare rilevanti, per la combinazione dei venti di Maestrone da nord-ovest e di Libeccio da sud-ovest: qui le onde lunghe (swell) sono frequenti. Gli eventi provenienti da nord-ovest, incanalati dalle Bocche di Bonifacio, sono responsabili anche della situazione nel clima ondoso del bacino tirrenico orientale. Anche nel bacino ionico meridionale e nell’area centrale del bacino levantino sono presenti elevate altezze d’onda significativa associate a sistemi ciclogenetici.

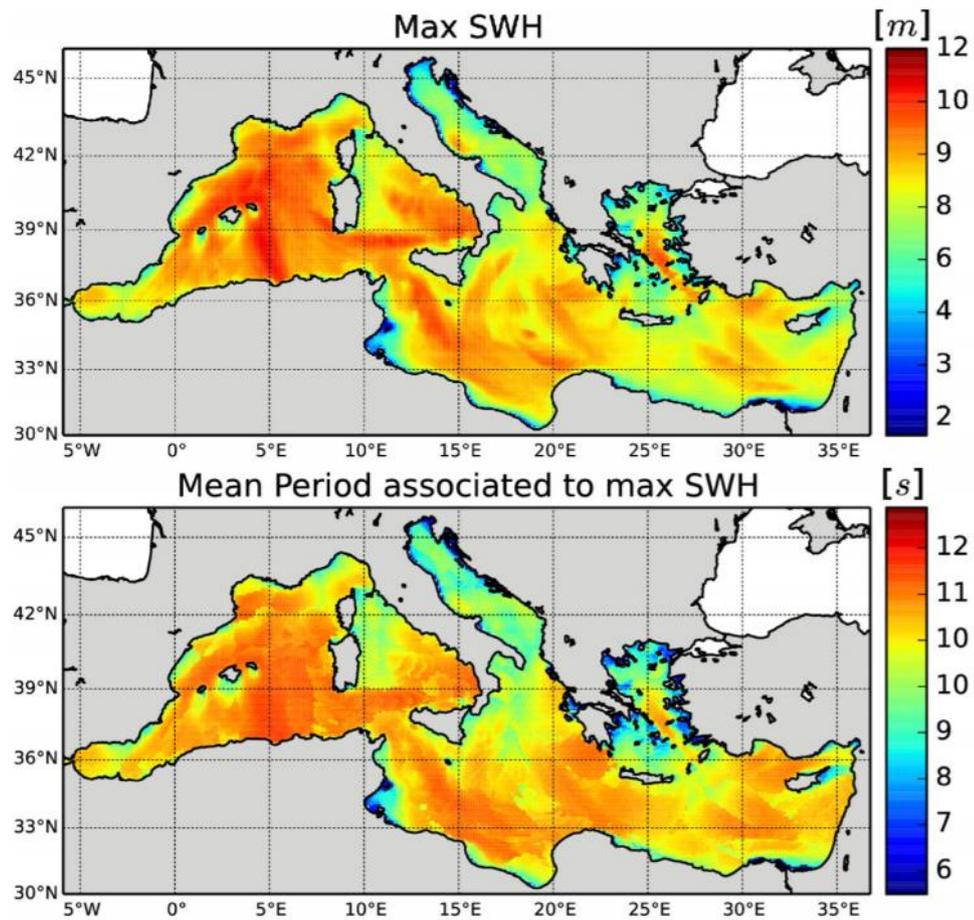


Figura 3.10: Altezze massime d'onda significativa (in alto) e corrispondente periodo medio dell'onda (in basso) nel Mar Mediterraneo. Da [14].

4 Condizioni meteomarine tipiche

Sono state condotte una serie di analisi meteomarine per descrivere le condizioni operative (normali) nel sito in progetto. Le analisi sono state condotte nei seguenti luoghi, ritenuti rappresentativi delle condizioni del sito del progetto e sono elencate nella seguente Tabella 4.1.

Tabella 4.1: Nomi, localizzazioni, e informazioni sulla profondità dell'acqua per i punti di analisi, insieme ai dettagli sulla base dei dati

ID	Long. [E]	Lat. [N]	D (m)	Parameter	Time coverage	Model Database
Point P1	12	37.6	200	WIND	1979/01/01 - 2020/12/31	MWM (WRF)
				WAVE	1979/01/01 - 2020/12/31	MWM (MIKE 21 SW)
POINT 1	12	37.6	200	CURRENT	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS + DTU
				WATER LEVEL	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS + DTU
				TEMPERATURE	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS
				SALINITY	1987/01/21 - 2019/12/31	CMEMS

4.1 Vento

L'analisi delle condizioni del vento operative si è basata sui dati del modello atmosferico WRF descritti nel Capitolo 2. La risoluzione temporale dei dati del WRF è di 1 ora e la velocità e la direzione del vento modellate sono considerate rappresentative di una finestra media di 2 ore. L'analisi del vento è stata eseguita a quota 10 m slm e 80 m slm.

4.1.1 Serie temporali e statistiche annuali

La serie temporale, lunga 42 anni, della velocità del vento nel punto P1 è riportata in Figura 4.1. La statistica annuale e quelle mensili, riportate in Tabella 4.2, mostrano che la velocità media mensile del vento è omogeneamente alta per la maggior parte dell'anno, con i valori massimi che si verificano tipicamente a gennaio.

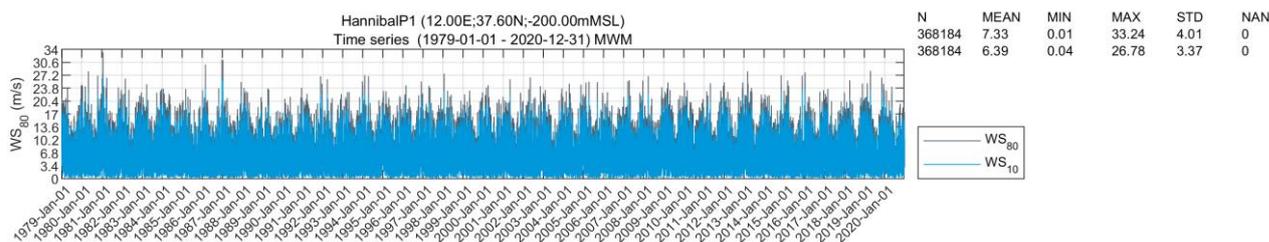


Figura 4.1 Serie temporali e statistiche della velocità del vento WS_{10,2hr} e WS_{80,2hr} [m/s] nel Punto P1

Tabella 4.2 Statistiche annuali e mensili delle velocità del vento $WS_{10,2hr}$ e $WS_{80,2hr}$ [m/s] nel *Punto P1*

	$WS_{10,2hr}$ [m/s]				$WS_{80,2hr}$ [m/s]		
	MEAN	MAX	STD		MEAN	MAX	STD
All	6.4	26.8	3.4	All	7.3	33.2	4.0
Jan	7.6	26.8	3.8	Jan	8.6	33.2	4.5
Feb	7.5	22.7	3.6	Feb	8.5	27.2	4.3
Mar	7.3	23.8	3.6	Mar	8.4	30.1	4.3
Apr	6.8	23.0	3.4	Apr	7.9	28.3	4.2
May	5.9	22.0	3.1	May	7.1	26.6	3.8
Jun	5.1	17.1	2.6	Jun	6.1	21.2	3.1
Jul	5.0	18.0	2.4	Jul	5.8	21.0	2.8
Aug	4.9	17.6	2.4	Aug	5.5	21.3	2.8
Sep	5.6	20.4	2.9	Sep	6.2	25.4	3.4
Oct	6.2	22.1	3.2	Oct	7.0	27.1	3.8
Nov	7.2	22.9	3.6	Nov	8.2	27.2	4.2
Dec	7.7	25.8	3.6	Dec	8.8	31.3	4.4

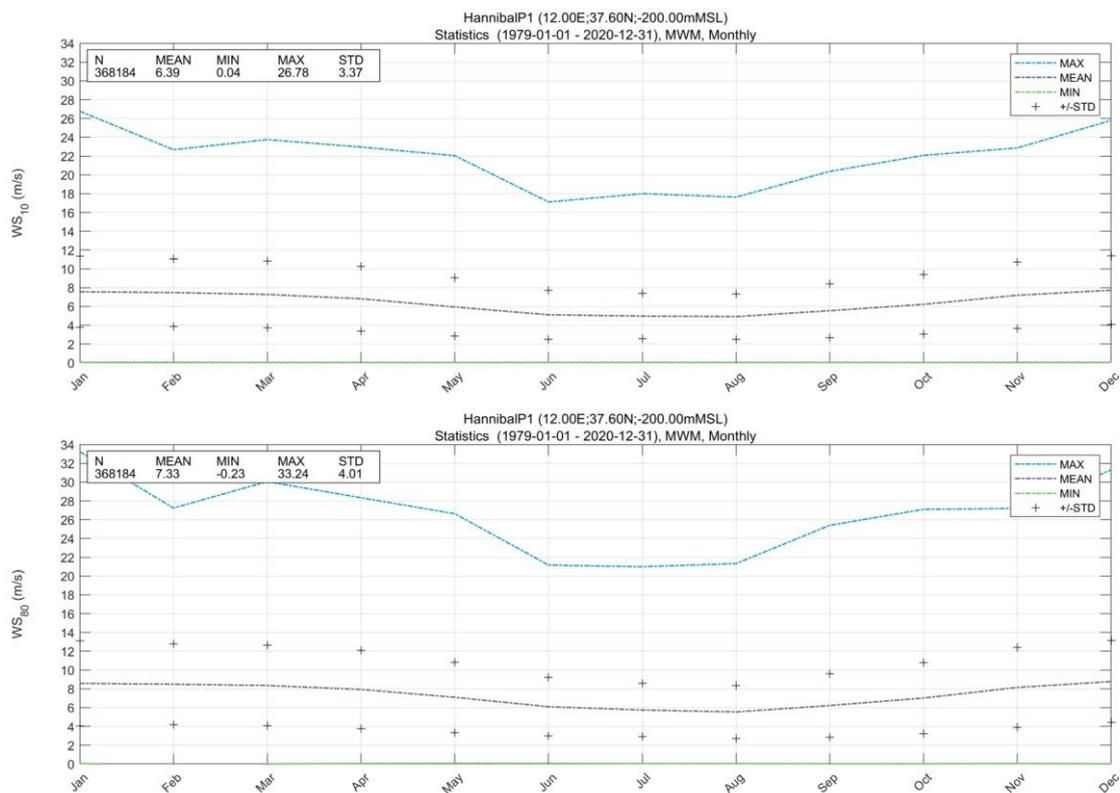


Figura 4.2 Statistiche mensili delle velocità del vento $WS_{10,2hr}$ (in alto) e $WS_{80,2hr}$ (in basso) nel *Punto P1*

4.1.2 Rose dei venti e tabelle di frequenza della velocità e direzione del vento

Vengono riportate, in Figura 4.3 e Figura 4.4, la rosa dei venti medi annuali nel punto P1, rispettivamente a 10 m e 80 m di altitudine. Le corrispondenti tabelle di frequenza di accadimento sono mostrate in Tabella 4.3 e in Tabella 4.4.

La distribuzione dei venti mostra una dominanza dei venti occidentali e nord-occidentali (settori direzionali centrati rispettivamente in 270°N e 315°N). I venti da queste direzioni rappresentano oltre il 55% del totale. Abbastanza frequenti sono anche i venti da sud-est, che rappresentano circa il 21% delle direzioni del vento. I venti più intensi provengono da nord-ovest (315°N).

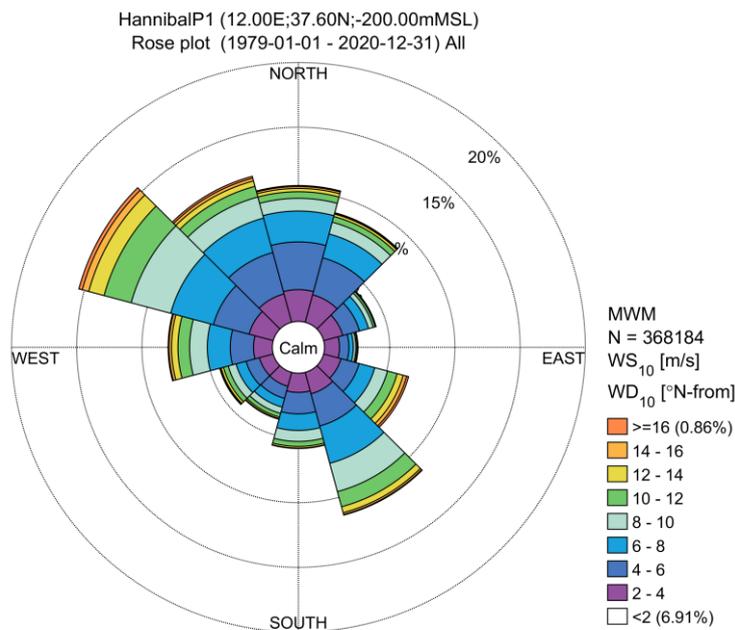


Figura 4.3 Rose dei venti annuali medi WS_{10,2hr} velocità del vento nel *Punto P1*

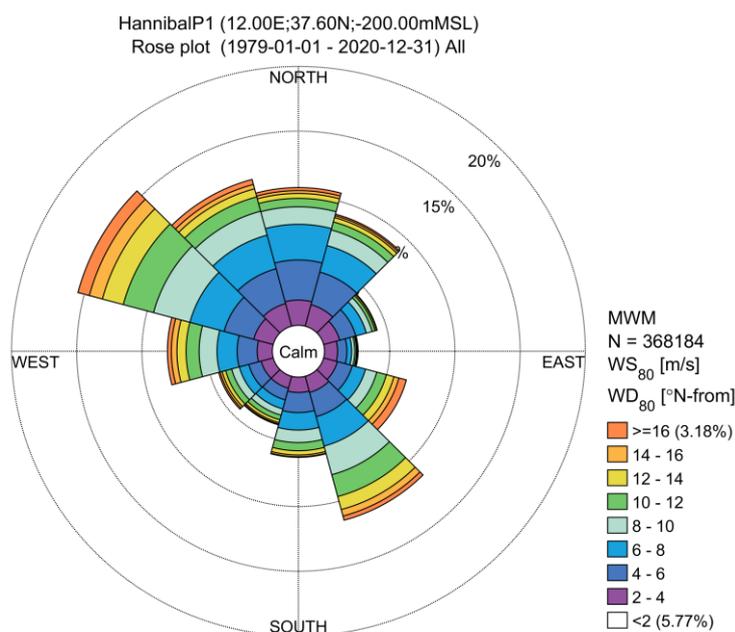


Figura 4.4 Rose dei venti annuali medi WS_{80,2hr} velocità del vento nel *Punto P1*

Tabella 4.3 Tabella di frequenza (%) di occorrenza della velocità del vento $WS_{10,2hr}$ e della sua direzione nel punto P1

DIR [°N]	Wind Speed (m/s) $WS_{10,2h}$																Tot.	
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32		32-34
0	0.658	2.454	3.687	2.387	0.983	0.508	0.259	0.144	0.059	0.013	0.001	0.001	0.001	-	-	-	-	11.16
30	0.652	2.199	2.959	1.910	0.940	0.454	0.199	0.072	0.025	0.009	0.001	-	-	-	-	-	-	9.42
60	0.616	1.518	1.328	0.719	0.364	0.164	0.053	0.016	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	4.78
90	0.574	1.149	0.720	0.339	0.186	0.100	0.043	0.023	0.004	0.001	-	-	-	-	-	-	-	3.14
120	0.543	1.374	1.451	1.236	1.011	0.767	0.477	0.273	0.107	0.036	0.009	0.002	-	-	-	-	-	7.29
150	0.524	1.715	2.576	2.986	2.263	1.213	0.476	0.142	0.032	0.015	0.002	0.001	-	-	-	-	-	11.95
180	0.533	1.483	1.660	1.281	0.847	0.388	0.131	0.023	0.004	0.001	-	0.001	-	-	-	-	-	6.35
210	0.528	1.115	0.973	0.699	0.492	0.305	0.119	0.035	0.011	0.004	0.001	-	-	-	-	-	-	4.28
240	0.510	1.096	1.055	0.796	0.623	0.379	0.192	0.077	0.023	0.003	0.001	-	-	-	-	-	-	4.76
270	0.523	1.444	1.783	1.761	1.357	0.895	0.492	0.192	0.055	0.012	0.002	0.001	-	-	-	-	-	8.52
300	0.621	1.916	2.833	3.393	3.134	2.154	1.221	0.512	0.191	0.061	0.014	0.003	-	-	-	-	-	16.05
330	0.633	2.272	3.309	2.756	1.682	0.856	0.431	0.225	0.102	0.038	0.006	0.001	-	-	-	-	-	12.31
Tot	6.92	19.74	24.33	20.26	13.88	8.18	4.09	1.73	0.62	0.19	0.04	0.01	0.00	-	-	-	-	100.00

Tabella 4.4 Tabella di frequenza (%) di occorrenza della velocità del vento $WS_{80,2hr}$ e della sua direzione nel Punto P1

DIR [°N]	Wind Speed (m/s) $WS_{80,2h}$																Tot.	
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32		32-34
0	0.547	1.951	3.098	2.755	1.351	0.653	0.379	0.218	0.127	0.070	0.027	0.008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	11.19
30	0.537	1.720	2.604	2.125	1.250	0.639	0.344	0.153	0.076	0.027	0.013	0.006	0.001	-	-	-	-	9.50
60	0.512	1.276	1.277	0.836	0.455	0.232	0.115	0.038	0.016	0.005	0.001	-	-	-	-	-	-	4.76
90	0.480	0.999	0.718	0.369	0.229	0.122	0.073	0.037	0.019	0.007	0.002	-	-	-	-	-	-	3.06
120	0.444	1.091	1.183	1.054	0.891	0.766	0.596	0.397	0.306	0.156	0.079	0.030	0.013	0.005	0.002	-	-	7.01
150	0.430	1.296	1.938	2.354	2.287	1.747	1.041	0.522	0.218	0.071	0.024	0.014	0.003	0.001	0.001	-	-	11.95
180	0.460	1.189	1.552	1.350	0.967	0.630	0.329	0.135	0.034	0.010	0.002	0.001	-	0.001	-	-	-	6.66
210	0.436	0.956	0.935	0.726	0.495	0.375	0.229	0.105	0.045	0.013	0.007	0.002	0.001	-	-	-	-	4.33
240	0.429	0.957	0.986	0.750	0.609	0.474	0.277	0.161	0.074	0.033	0.008	0.002	0.001	-	-	-	-	4.76
270	0.451	1.166	1.535	1.544	1.368	1.005	0.698	0.427	0.188	0.080	0.025	0.008	0.002	0.001	-	-	-	8.50
300	0.519	1.550	2.353	2.713	2.888	2.403	1.657	1.038	0.520	0.234	0.097	0.040	0.012	0.004	-	-	-	16.03
330	0.523	1.808	2.788	2.688	1.913	1.146	0.643	0.351	0.210	0.106	0.062	0.019	0.006	0.001	-	-	-	12.26
Tot	5.77	15.96	20.97	19.26	14.70	10.19	6.38	3.58	1.83	0.81	0.35	0.13	0.04	-	-	-	-	100.00

4.2 Livello del mare

Le normali condizioni del livello della superficie libera nel sito del progetto sono descritte nel seguito. Le analisi si basano sui dati *hindcast* CMEMS per il periodo 1987-2019, come descritto nel Capitolo 2, con una risoluzione temporale di 1 ora. Poiché i dati CMEMS non includono le maree, queste sono state aggiunte in base ai dati di marea del *Global Tide Model* di DHI.

I livelli d'acqua sono stati sottoposti ad analisi armonica per separare il segnale in componenti di marea e non di marea (residui). Questo *de-tiding* è stato condotto usando il metodo *U-tide* come descritto in [25], che si basa sul metodo di analisi delle maree *IOS U-tide* [26] definito dall'*Institute of Oceanographic Sciences* [27] e integrando gli approcci di Foreman [28].

I valori assoluti sono riportati relativi al livello medio del mare (slm). I livelli equivalenti relativi alla marea astronomica più bassa (LAT) possono essere ottenuti sommando la differenza slm-LAT estratta attraverso l'analisi armonica dei livelli d'acqua modellati, descritti nella Sezione 4.2.2.

I pedici "*tide*" e "*resid.*" rappresentano, rispettivamente, la componente di marea e residua del livello totale dell'acqua.

4.2.1 Serie temporali e statistiche annuali

Le serie temporali dei livelli d'acqua nel P1 sono mostrate in Figura 4.5. Le statistiche annuali e mensili dei livelli d'acqua sono presentate in Tabella 4.5. I valori mensili massimi totali e residui mostrano una variazione stagionale relativamente debole.

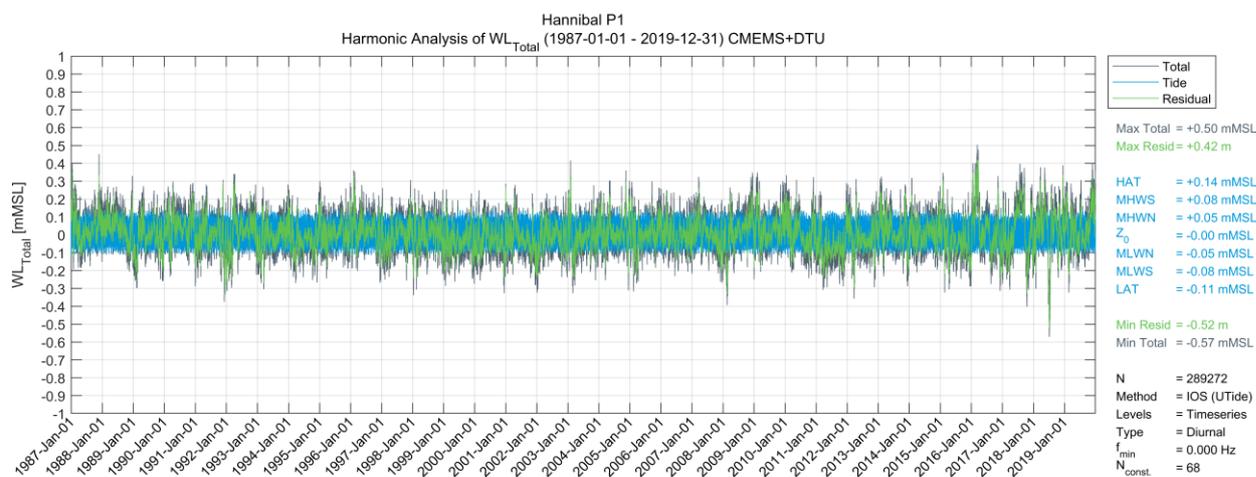


Figura 4.5 Serie temporali dei livelli d'acqua (totale, mareale e residua) nel *Punto P1* del sito dell'HFOWF

Tabella 4.5 Statistiche annuali dei livelli d'acqua (totale, mareale e residua) nel *Punto P1*

Parameter	WL _{total} [mMSL]			WL _{tide} [m]			WL _{resid} [m]		
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
All	0.00	-0.57	0.50	0.00	-0.11	0.14	0.00	-0.52	0.42
Jan	0.01	-0.34	0.40	0.00	-0.11	0.14	0.01	-0.25	0.35
Feb	0.00	-0.39	0.42	0.00	-0.11	0.14	0.00	-0.33	0.36
Mar	-0.01	-0.36	0.50	0.00	-0.11	0.13	-0.01	-0.29	0.42
Apr	0.01	-0.31	0.34	0.00	-0.10	0.13	0.01	-0.25	0.30
May	0.01	-0.29	0.38	0.00	-0.11	0.14	0.01	-0.24	0.31
Jun	0.00	-0.39	0.30	0.00	-0.11	0.14	0.00	-0.33	0.23
Jul	-0.01	-0.57	0.40	0.00	-0.11	0.14	-0.01	-0.52	0.28
Aug	0.00	-0.28	0.35	0.00	-0.11	0.14	0.00	-0.18	0.26
Sep	0.01	-0.24	0.37	0.00	-0.11	0.13	0.01	-0.17	0.27
Oct	-0.02	-0.40	0.27	0.00	-0.10	0.12	-0.02	-0.33	0.24
Nov	0.01	-0.31	0.45	0.00	-0.11	0.13	0.01	-0.22	0.33
Dec	-0.01	-0.37	0.39	0.00	-0.11	0.14	-0.01	-0.33	0.33

4.2.2 Livelli di marea

I valori di marea astronomica del WL presentati in Tabella 4.6 sono stati ricavati dalle serie temporali, lunghe 34 anni, dei livelli d'acqua di marea modellate del DTU nel *Punto P1* (vedi Tabella 4.1) come segue:

- HAT: WL massimo previsto
- MHWS: media dei due massimi consecutivi nelle 24 ore quando l'escursione di marea è al suo massimo (*spring tide*)
- MHNW: media dei due massimi consecutivi nelle 24 ore quando l'escursione di marea è al suo minimo (*neap tide*)
- MSL: WL medio previsto
- MLWN: media dei due minimi consecutivi nelle 24 ore quando l'escursione di marea è al suo minimo (*neap tide*)
- MLWS: media dei due minimi consecutive nelle 24 ore quando l'escursione di marea è al suo massimo (*spring tide*)
- LAT: WL minimo previsto

Tabella 4.6 Livelli di marea astronomica nel sito dell'HFOWF (*Point 1*) basato sui dati modellati con il DTU nel periodo di tempo dal 01-01-1987 al 31-12-2019. I valori sono forniti in metri relativi al livello del mare (m slm) and alla marea astronomica più bassa in conformità con la differenza slm-LAT estratta dai dati

WL (m)	HAT	MHWS	MHWN	Z ₀	MLWN	MLWS	LAT
mMSL	0.14	0.08	0.05	0.00	-0.05	-0.08	-0.11
mLAT	0.25	0.19	0.16	0.11	0.06	0.03	0.00

4.3 Correnti

Le normali condizioni della corrente sono state stabilite sulla base dei dati *hindcast* CMEMS per il periodo 1987-2019 come descritto nel Capitolo 2, con una risoluzione temporale di 1 ora. Poiché i dati CMEMS non includono le maree, le maree sono state aggiunte sulla base delle costituenti delle maree del *Global Tide Model* di DHI.

I dati sulla velocità della corrente sono stati analizzati per i componenti totali, di marea e residui. La separazione dei componenti mareali e residui è stata eseguita utilizzando il metodo descritto

in [19]. I pedici “*tide*” e “*resid.*” Rappresentano, rispettivamente, le componenti di marea e residue della velocità e della direzione della corrente. Le correnti modellate rappresentano i valori di superficie. L’analisi del profilo verticale della velocità della corrente è presentata nella Sezione 4.3.3. Da questa analisi sono state stabilite le relazioni tra la corrente superficiale e la velocità della corrente vicino al fondale.

4.3.1 Serie temporali e statistiche annuali

Le statistiche annuali della velocità della corrente superficiale (totale, di marea, residua) sono mostrate in Figura 4.6. le statistiche mensili per le velocità della corrente superficiale media e massima sono riassunte nella Tabella 4.7 e in Figura 4.7 per la velocità della corrente superficiale.

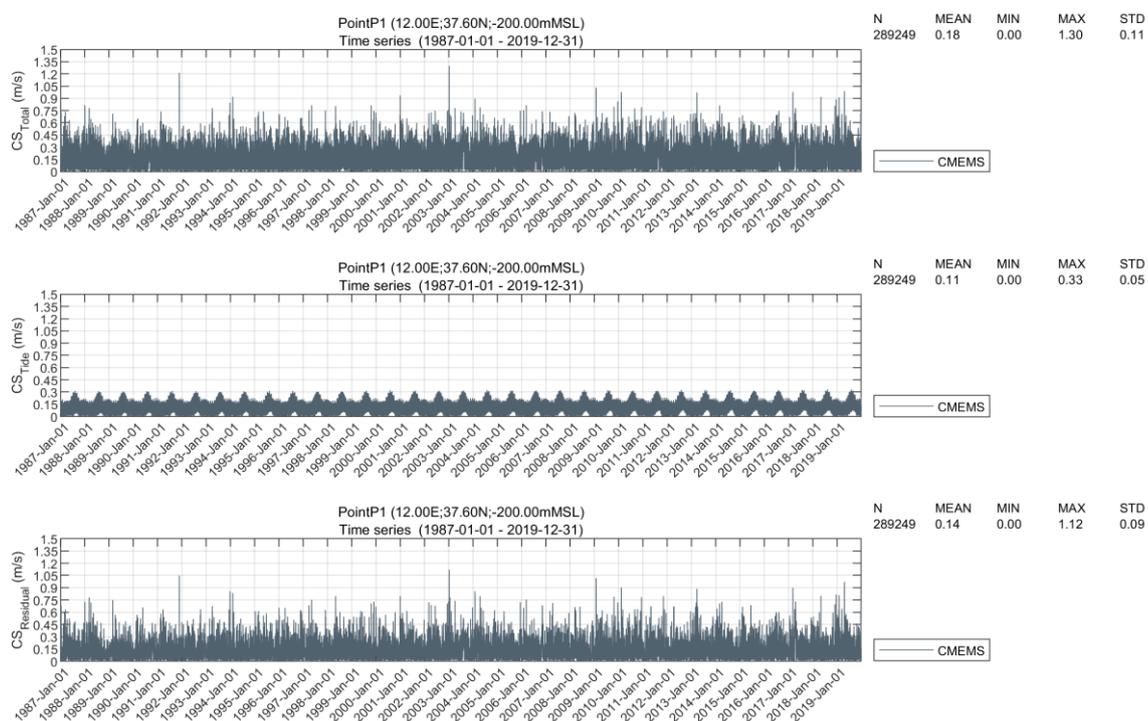


Figura 4.6 Serie temporali e statistiche annuali delle correnti superficiali (totali, di marea e residue)

Tabella 4.7 Statistiche mensili della velocità della corrente (totale, di marea e residua) in superficie

Parameter	CS _{total} [m/s]		CS _{tide} [m/s]		CS _{resid} [m/s]	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
All	0.18	1.30	0.11	0.33	0.14	1.12
Jan	0.17	1.30	0.11	0.23	0.14	1.12
Feb	0.17	0.98	0.11	0.22	0.13	0.90
Mar	0.17	0.98	0.10	0.20	0.14	0.90
Apr	0.18	0.99	0.09	0.20	0.16	0.97
May	0.18	0.92	0.10	0.24	0.15	0.80
Jun	0.19	0.75	0.12	0.29	0.15	0.69
Jul	0.20	0.74	0.14	0.33	0.15	0.60
Aug	0.21	0.78	0.15	0.33	0.14	0.64
Sep	0.19	0.64	0.13	0.30	0.14	0.57
Oct	0.16	0.81	0.10	0.24	0.13	0.79
Nov	0.17	1.21	0.09	0.23	0.14	1.05
Dec	0.18	0.94	0.10	0.23	0.14	0.86

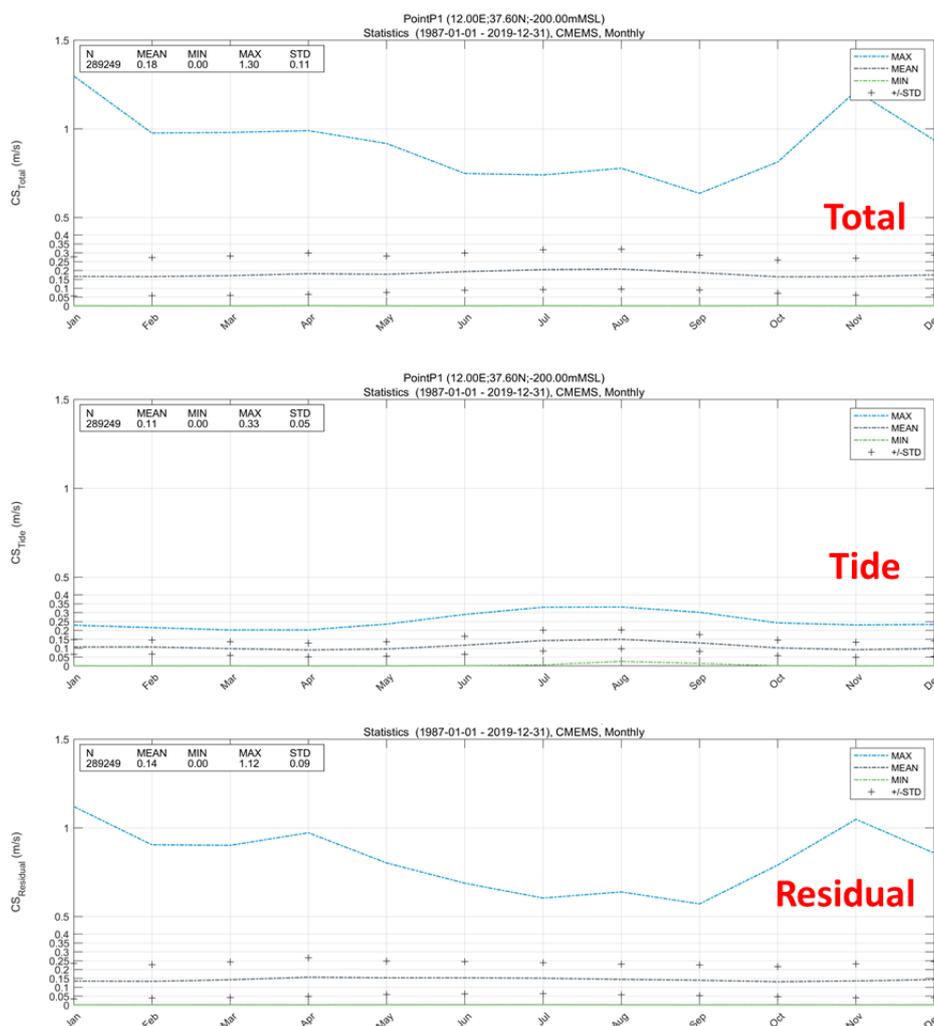


Figura 4.7 Statistiche mensili delle velocità della corrente superficiale nel *Point 1*. Dall'alto verso il basso: correnti totali, mareali e residue

4.3.2 Rose e Tabella di frequenza (%) di occorrenza della velocità-direzione della corrente

Le rose della corrente superficiale media (totale, di marea e residua) sono presentate in Figura 4.8, mentre le corrispondenti frequenze di accadimento sono riportate nella Tabella 4.8. La Figura 4.8 mostra le rose mensili per, rispettivamente, le correnti totali, di marea e residue.

Le correnti superficiali totali fluiscono prevalentemente verso i settori meridionali durante tutto l'anno, a conferma che la dinamica è in gran parte determinata dai fenomeni di mesoscala descritti nella Sezione 3.2, legati alla circolazione su larga scala tra i bacini occidentale e orientale del Mar Mediterraneo. La velocità della corrente totale è < 0.35 m/s per circa il 93% del tempo. La velocità della corrente residua è inferiore a 0.35 m/s per il 95% dell'anno ma ha valori massimi fino a 0.50 m/s nel periodo analizzato, associati ai flussi SSE. La velocità della corrente di marea è inferiore a 0.15 m/s per l'80% del tempo e scorre principalmente verso sud. Tuttavia, nei dati CEMES si trovano correnti di marea inaspettatamente elevate (fino a 0.35 m/s), probabilmente correlate all'assimilazione dei dati inclusi nel *dataset* di rianalisi. Questi valori necessitano di verifiche accurate, una volta che le misurazioni sulla corrente, specifiche del sito, saranno disponibili, durante le fasi future del progetto.

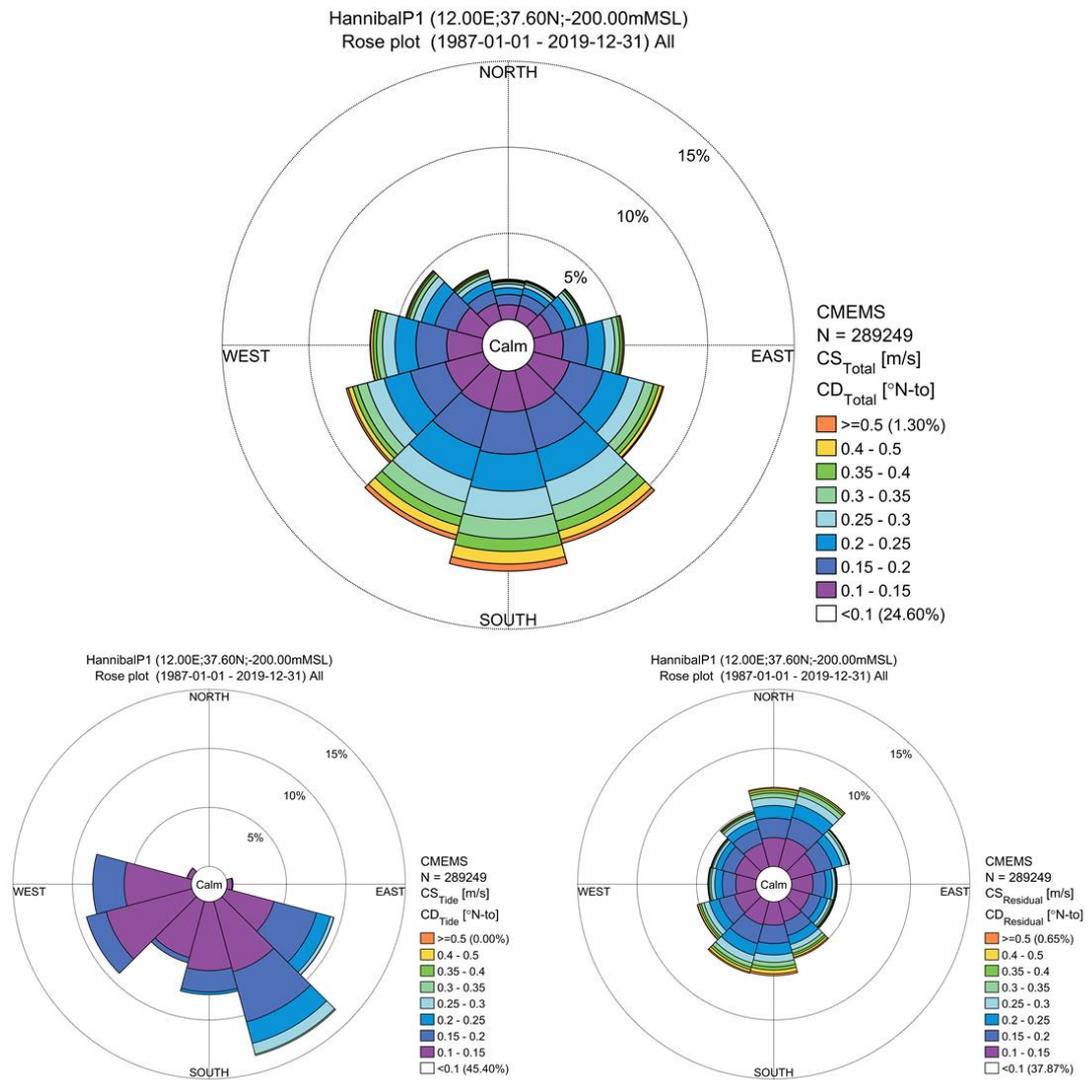


Figura 4.8 Rose della corrente superficiale (direzione di propagazione) nel sito – in alto: totale, in basso a sinistra: mareale, in basso a destra: residue

Tabella 4.8 Tabella di frequenza (%) di occorrenza congiunta della velocità della corrente totale superficiale e della sua direzione

CS_{Total} [m/s]		0-0.05	0.05-0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	0.2-0.25	0.25-0.30	0.3-0.35	0.35-0.4	0.4-0.45	0.45-0.5	0.5-1	Total
Direction from [°N]	0	0.503	0.987	0.853	0.596	0.382	0.227	0.124	0.065	0.047	0.040	-	3.824
	30	0.507	0.987	0.903	0.649	0.393	0.223	0.120	0.058	0.041	0.010	-	3.890
	60	0.532	1.099	1.080	0.850	0.593	0.316	0.156	0.087	0.044	0.006	-	4.763
	90	0.569	1.399	1.674	1.421	0.978	0.574	0.289	0.146	0.086	0.017	-	7.154
	120	0.595	1.652	2.163	2.014	1.505	0.948	0.561	0.303	0.218	0.071	0.002	10.032
	150	0.672	1.832	2.377	2.381	1.953	1.442	0.935	0.594	0.508	0.236	0.002	12.932
	180	0.680	1.849	2.370	2.458	2.156	1.626	1.138	0.731	0.735	0.412	-	14.156
	210	0.646	1.826	2.361	2.310	1.937	1.341	0.874	0.552	0.545	0.278	-	12.671
	240	0.648	1.835	2.261	2.085	1.574	1.003	0.586	0.285	0.261	0.119	-	10.658
	270	0.612	1.655	2.055	1.768	1.209	0.721	0.352	0.190	0.146	0.034	-	8.743
	300	0.553	1.391	1.606	1.287	0.804	0.467	0.244	0.114	0.081	0.027	-	6.575
	330	0.506	1.066	1.035	0.781	0.529	0.307	0.174	0.088	0.076	0.040	-	4.602
TOT.	7.02	17.58	20.74	18.60	14.01	9.20	5.55	3.21	2.79	1.29	*	100.00	

Tabella 4.9 Tabella di frequenza (%) di occorrenza congiunte della velocità della corrente di marea superficiale e della sua direzione

CS_{Tide} [m/s]		0-0.05	0.05-0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	0.2-0.25	0.25-0.30	0.3-0.35	0.35-0.4	0.4-0.45	0.45-0.5	0.5-1	Total
Direction from [°N]	0	0.193	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.194
	30	0.178	0.003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.180
	60	0.301	0.054	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.355
	90	0.536	0.918	0.436	0.063	0.001	-	-	-	-	-	-	1.952
	120	0.721	3.051	4.143	3.705	1.204	0.299	0.024	-	-	-	-	13.147
	150	1.016	5.235	6.171	4.404	1.900	0.937	0.117	-	-	-	-	19.781
	180	1.455	7.924	5.821	1.812	0.226	0.000	-	-	-	-	-	17.238
	210	1.673	7.729	4.945	0.450	-	-	-	-	-	-	-	14.797
	240	1.259	6.502	7.472	1.721	-	-	-	-	-	-	-	16.954
	270	0.829	3.875	5.663	2.630	0.003	-	-	-	-	-	-	13.000
	300	0.579	1.013	0.421	0.029	-	-	-	-	-	-	-	2.042
	330	0.306	0.053	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.360
TOT.	9.05	36.36	35.07	14.81	3.33	1.24	0.14	-	-	-	-	100.00	

Tabella 4.10 Tabella di frequenza (%) di occorrenza congiunte della velocità della corrente residua superficiale e della sua direzione

CS_{Resid} [m/s]		0-0.05	0.05-0.1	0.1-0.15	0.15-0.2	0.2-0.25	0.25-0.30	0.3-0.35	0.35-0.4	0.4-0.45	0.45-0.5	0.5-1	Total
Direction from [°N]	0	1.146	2.667	2.445	1.654	1.068	0.663	0.387	0.219	0.166	0.091	-	10.507
	30	1.150	2.718	2.534	1.831	1.176	0.705	0.416	0.183	0.120	0.024	-	10.856
	60	1.027	2.361	2.166	1.460	0.810	0.385	0.183	0.066	0.034	0.006	-	8.496
	90	0.997	2.074	1.808	1.070	0.557	0.232	0.092	0.035	0.032	0.011	-	6.909
	120	0.961	1.946	1.618	0.998	0.584	0.282	0.144	0.077	0.071	0.039	0.001	6.723
	150	0.924	1.923	1.778	1.226	0.797	0.468	0.285	0.173	0.177	0.108	0.001	7.859
	180	0.930	1.934	1.973	1.560	0.968	0.621	0.381	0.278	0.303	0.168	-	9.116
	210	0.941	1.975	2.056	1.655	1.045	0.666	0.358	0.220	0.208	0.112	-	9.236
	240	0.954	1.913	1.917	1.356	0.850	0.452	0.253	0.158	0.145	0.042	-	8.041
	270	0.933	1.898	1.695	1.146	0.627	0.306	0.138	0.086	0.047	0.004	-	6.882
	300	1.017	2.033	1.873	1.142	0.551	0.237	0.097	0.049	0.045	0.005	-	7.050
	330	1.057	2.396	2.075	1.286	0.732	0.385	0.190	0.087	0.085	0.031	-	8.325
TOT.	12.04	25.84	23.94	16.38	9.77	5.40	2.92	1.63	1.43	0.64	*	100.00	

4.3.3 Profilo verticale della velocità della corrente

Allo scopo di indicare una relazione adeguata a determinare le caratteristiche della corrente a diverse profondità (per esempio vicino alla superficie e vicino al fondo), è stato studiato il profilo verticale della velocità della corrente nel sito del progetto.

I profili caratteristici di velocità della corrente sono stati stabiliti sulla base dei dati CMEMS disponibili, descritti nel Capitolo 2. Più precisamente, è stato utilizzato il set di dati della media giornaliera ricavando valori su 41 livelli lungo la colonna d'acqua.

Ai fini della progettazione un profilo di potenza generale può essere considerato adeguato alle acque costiere e ben rappresentativo delle condizioni più energetiche, compresi i valori estremi:

$$\frac{V_{z1}}{V_{z2}} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{1/n} \quad \text{and} \quad V_{z1} = V_m \frac{n+1}{n} \left(\frac{z_1}{d} \right)^{1/n} \quad (4.1)$$

dove V_{z1} è la velocità della corrente al livello z_1 , V_{z2} è la velocità della corrente al livello z_2 , n è un coefficiente derivato dai dati sperimentali e d è la profondità dell'acqua. Questo coefficiente, per acque basse o intermedie (cioè < 100-200 m) assume in generale valori compresi tra 4 e 7.

Una verifica dell'idoneità del profilo di potenza della corrente, basato sui dati CMEMS, è mostrata in Figura 4.9. Tutti i profili ricostruiti da modello (linee grigie) sono mostrati insieme ai percentili di ordine 75, 90 e 99 (linea tratteggiata blu rispettivamente nei pannelli sinistro, centrale e destro), ovvero la velocità della corrente che supera i valori di soglia del 75%, 90% e 99%. Il profilo di potenza con $n=7$ approssima in maniera soddisfacente il profilo della velocità della corrente osservato lungo l'intera colonna d'acqua in tutti i casi, con una leggera sottostima della velocità della corrente in prossimità del fondo.

Tabella 4.11 fornisce i parametri di adattamento, a diverse profondità lungo tutta la colonna d'acqua, ottenuti dai dati (prima colonna) e dai profili della legge di potenza teorica (seconda colonna). Si suggerisce di fare riferimento al profilo della legge di potenza, data l'incertezza relativa all'utilizzo di dati medi giornalieri per scopi di progettazione.

Il comportamento della velocità e della direzione della corrente lungo il profilo verticale nel *Punto P1* dell'HFOWF è riportato nella Figura 4.10, che riporta la rosa della corrente a tre diversi livelli della colonna d'acqua (superficie, metà colonna, fondo), secondo i dati medi giornalieri di CMEMS. La velocità della corrente è significativamente ridotta a metà del profilo verticale, dove fluisce prevalentemente verso ovest, e diventa prevalentemente orientata verso nord-ovest spostandosi verso il fondo del mare.

Tabella 4.11 Coefficienti per il calcolo della velocità della corrente a una determinata profondità a partire dalla corrente di superficie nel sito dell'HFOWF, ottenuti rispettivamente dai dati del CMEMS (90° percentile), e dal profilo teorico della legge di potenza. Si suggerisce di fare riferimento al profilo teorico della legge di potenza.

Depth	Fit parameter at HFOWF point P1	
	CMEMS 90 th perc.	Power Law
Surface	1.0	1.0
95%	0.9	1.0
90%	0.8	0.9
85%	0.7	0.9
80%	0.7	0.9
75%	0.6	0.9
70%	0.6	0.9
65%	0.6	0.8
60%	0.6	0.8
55%	0.5	0.8
50%	0.5	0.8
45%	0.5	0.8
40%	0.5	0.7
30%	0.5	0.7
20%	0.5	0.7
10%	0.5	0.6
5%	0.6	0.6
0%	0.5	0.5

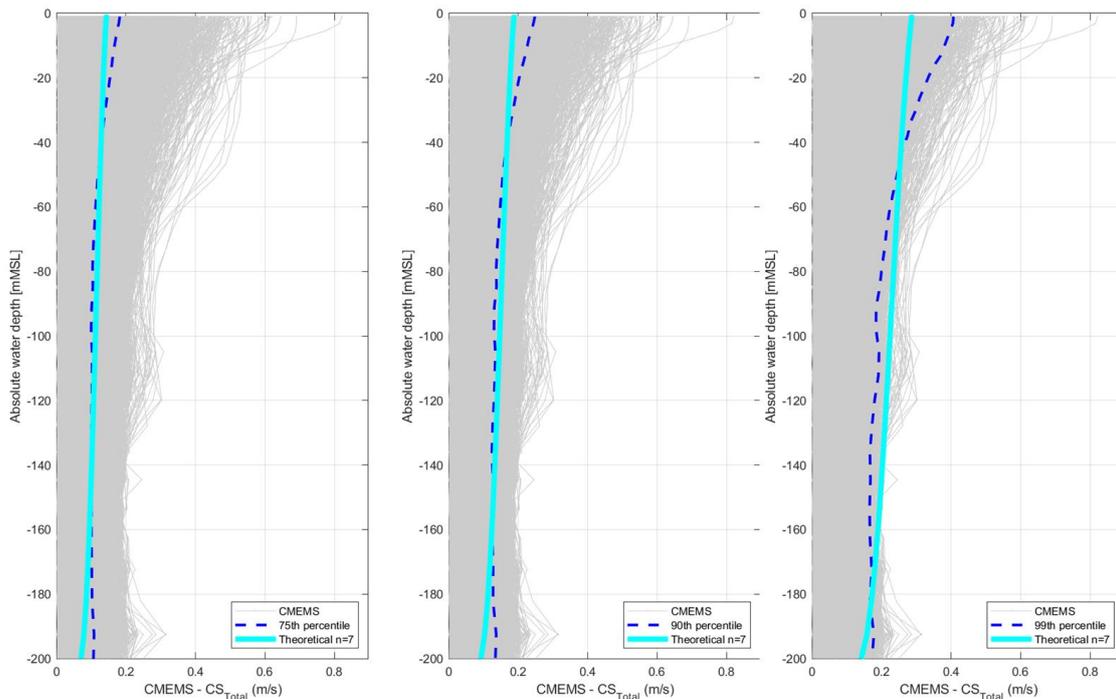


Figura 4.9 Confronto dei profili verticali delle correnti *hindcast* (CMEMS) con il 75° (a sinistra), 90° (al centro) e 99° (a destra) percentile e il profilo teorico della legge di potenza con n=7

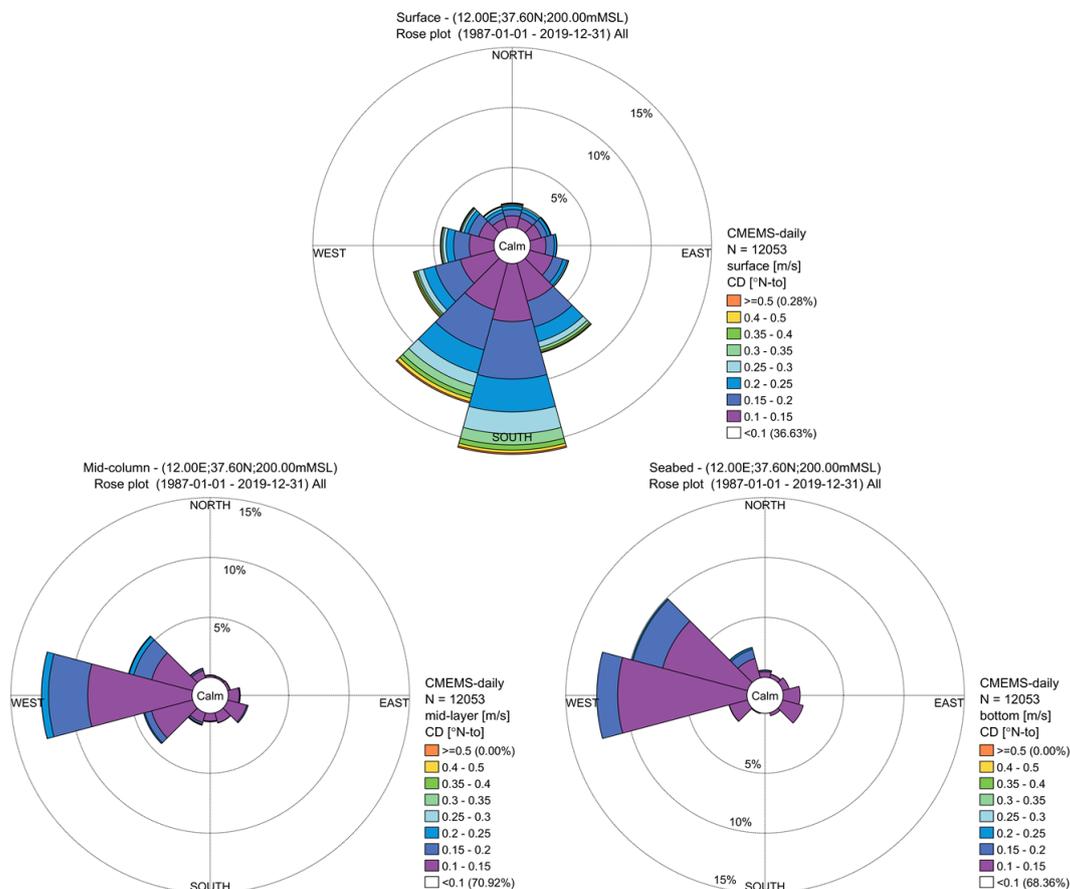


Figura 4.10: Rose della corrente in superficie (in alto), a metà Colonna (in basso a sinistra) e sul fondale (in basso a destra) nel *Punto P1*, secondo i dati medi giornalieri CMEMS descritti nel Capitolo 2

4.4 Onde

Le normali condizioni d'onda sono state fissate sulla base dei dati descritti nel Capitolo 2. La risoluzione temporale dei dati del MWM è di 1 ora e le altezze d'onda modellate sono considerate rappresentative di una finestra media di stati del mare di 3 ore (vedere Capitolo 0).

4.4.1 Serie temporali e statistiche annuali

I grafici delle serie temporali di H_{m0} , T_p , T_{01} e T_{02} sono mostrate in Figura 4.11, mentre la Tabella 4.12 riassume le statistiche annuali per H_{m0} , T_p , T_{01} e T_{02} . Le statistiche mostrano che c'è una variabilità stagionale nelle statistiche d'onda, con le altezze d'onda significative più alte che si verificano nei mesi invernali (dicembre-febbraio). L'angolo di diffusione della direzione dell'onda mostra un valore medio di circa 30° , con deviazione standard di circa 7° , corrispondente all'indice di diffusione nel range 2-4 circa.

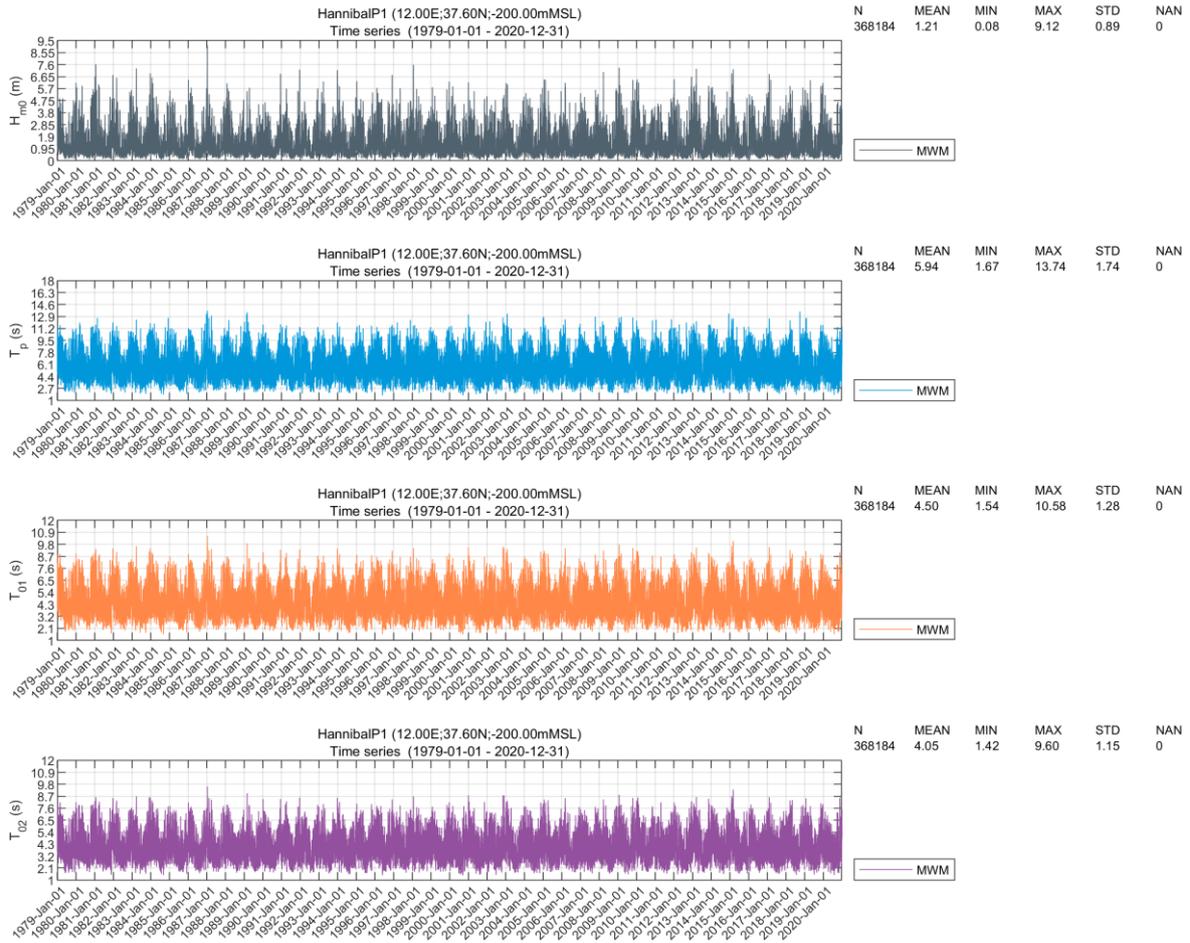


Figura 4.11 Grafico delle serie temporali e statistiche annuali per H_{m0} , T_p , T_{02} e T_{01}

Tabella 4.12 Statistiche annuali e mensili di H_{m0} , T_p , T_{01} e T_{02}

Parameter	H_{m0} [m]		T_p [s]		T_{01} [s]		T_{02} [s]	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
All	1.2	9.1	5.9	13.7	4.5	10.6	4.1	9.6
Jan	1.6	9.1	6.7	13.7	5.0	10.6	4.5	9.6
Feb	1.6	6.9	6.6	13.5	5.0	9.9	4.5	9.0
Mar	1.5	7.3	6.5	13.0	4.9	10.1	4.4	9.3
Apr	1.4	6.4	6.4	11.8	4.9	9.0	4.4	8.3
May	1.1	5.7	5.8	11.4	4.4	8.9	3.9	8.4
Jun	0.8	4.8	5.2	11.2	3.9	7.9	3.5	7.2
Jul	0.7	4.0	4.8	10.3	3.7	7.2	3.3	6.6
Aug	0.7	3.8	4.8	10.1	3.6	7.5	3.3	6.8
Sep	0.9	4.8	5.4	13.6	4.1	8.3	3.7	7.8
Oct	1.1	6.4	5.9	12.9	4.5	9.5	4.0	8.5
Nov	1.5	5.9	6.5	12.8	4.9	9.6	4.5	8.8
Dec	1.6	7.2	6.7	13.3	5.1	9.5	4.6	8.8

4.4.2 Rose d'onda

La rosa d'onda (la distribuzione dell'altezza d'onda significativa H_{m0} e la direzione media dell'onda MWD) è riportata in Figura 4.12 e nella Tabella 4.13 per lo stato totale del mare nel *Punto P1*.

La distribuzione mostra che circa il 48% delle onde provengono da W-NW (270-330°N) e circa il 30% da SE (120-180°N). Gli eventi d'onda provenienti dal settore nord-orientale rappresentano circa il 15% del clima ondoso medio annuo. Le altezze d'onda sono inferiori a 3.0 m per circa il 95% del tempo e le condizioni di calma (qui rappresentate come $H_{m0} < 0.5$ m) rappresentano il 19.6% del tempo. I valori massimi di H_{m0} sono associati ai settori W-NW: l'altezza massima dell'onda nel periodo è 9.12 m, relativa a una forte tempesta avvenuta nel gennaio del 1987.

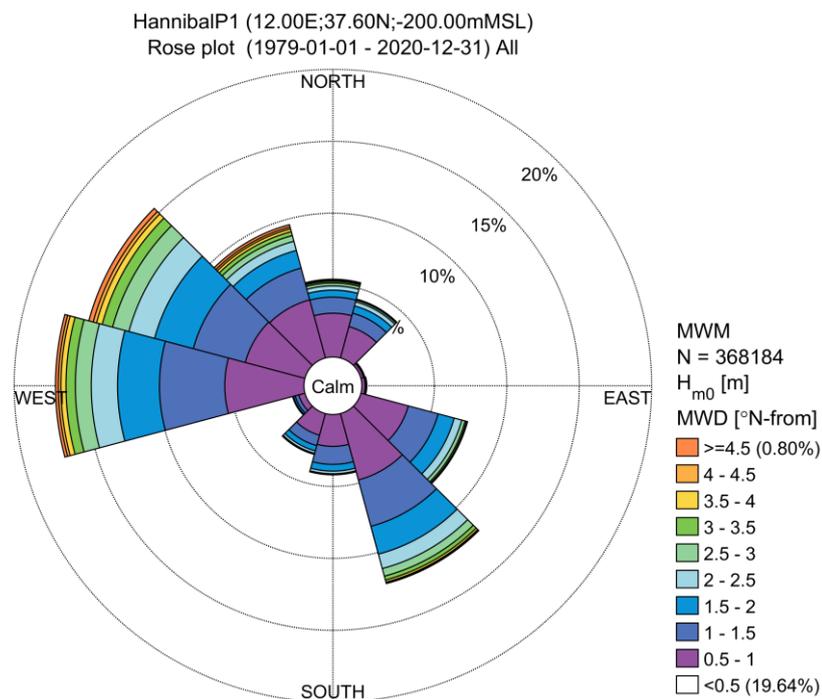


Figura 4.12 Rosa d'onda nel *Punto P1* per il periodo 1979-2020

4.4.3 Scatter plot degli avvenimenti congiunti

Sono stati prodotti i diagrammi scatter (scatter plot) che descrivono la relazione tra i diversi parametri meteomarinari. Questi includono:

- Altezza d'onda significativa e periodo di picco dell'onda (H_{m0} vs. T_p);
- Altezza d'onda significativa e velocità del vento (H_{m0} vs. WS)

Gli scatter plot annuali/omnidirezionali per lo stato totale del mare sono riassunti nel seguito.

4.4.3.1 H_{m0} e T_p

Lo scatter plot omnidirezionale H_{m0} - T_p è mostrato in Figura 4.13. le tabelle che danno la frequenza di occorrenza [%] delle combinazioni di H_{m0} , T_p , e MWD sono riportate in un file digitale (Microsoft Excel, formato .xlsx) insieme a questo report, per i seguenti intervalli:

- Intervalli H_{m0} di 0.5 m (per esempio, $0 \text{ m} \leq H_{m0} < 0.5 \text{ m}$)
- Intervalli T_p di 1 secondo (per esempio, $0 \text{ s} \leq T_p < 1.0 \text{ s}$)
- Per onde omnidirezionali, e per onde condizionate sulla direzione media dell'onda, MWD (settori direzionali $12 \times 30^\circ$, centrati su 0°N , 30°N , 60°N , etc.).

Le tabelle omnidirezionali di H_{m0} vs. T_p sono riportate nella Tabella 4.14.

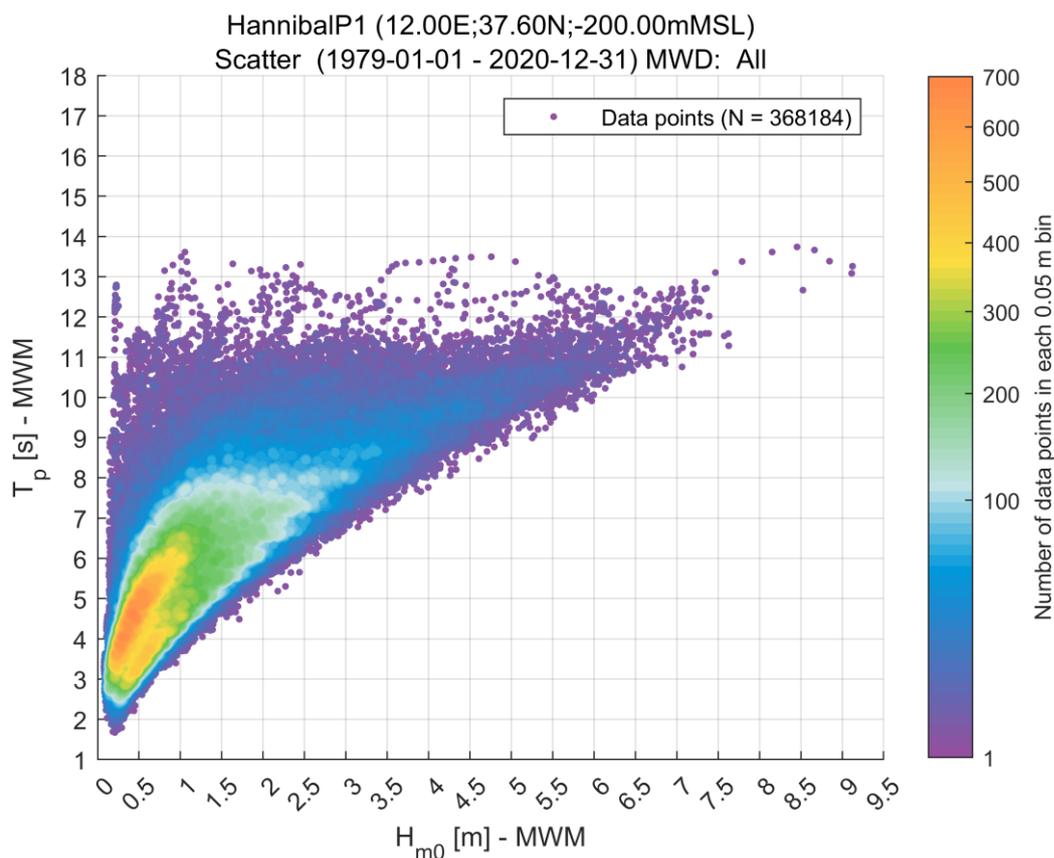


Figura 4.13: Scatter plot omnidirezionale di H_{m0} e T_p nel Punto P1

Tabella 4.13 Tabella di frequenza di occorrenza [%] annuale di H_{m0} rispetto alla direzione media dell'onda nel *Punto P1* per il periodo 1979 - 2020

H_{m0} [m]	<0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	5.0 - 5.5	5.5 - 6.0	6.0 - 6.5	6.5 - 7.0	7.0 - 7.5	7.5 - 8.0	8.0 - 8.5	8.5 - 9.0	9.0 - 9.5	Total	
Direction from [°N]	0	3.323	3.045	1.119	0.485	0.298	0.191	0.114	0.073	0.046	0.026	0.008	0.005	0.001	0.001						8.74
	30	2.080	2.260	0.969	0.521	0.296	0.117	0.048	0.025	0.007	0.002	0.001									6.33
	60	0.297	0.183	0.058	0.029	0.006	0.002	0.002	0.002		0.001										0.58
	90	0.374	0.224	0.074	0.025	0.008	0.004	0.004	0.001	0.001											0.72
	120	2.427	3.386	2.132	1.148	0.538	0.243	0.099	0.046	0.017	0.009	0.004									10.05
	150	1.965	4.780	3.339	2.004	1.036	0.548	0.281	0.146	0.056	0.029	0.011	0.011	0.002							14.21
	180	1.325	2.214	1.250	0.469	0.184	0.048	0.016	0.007	0.004	0.001										5.52
	210	1.293	1.555	0.749	0.382	0.177	0.054	0.015	0.006	0.003	0.001										4.24
	240	0.341	0.438	0.254	0.124	0.043	0.013	0.006		0.002	0.001										1.22
	270	1.970	5.466	4.506	2.892	1.817	1.096	0.647	0.352	0.178	0.103	0.057	0.022	0.011	0.003	0.002					19.12
	300	1.757	4.265	3.714	2.768	1.835	1.167	0.741	0.408	0.235	0.125	0.089	0.058	0.021	0.013	0.007	0.001	0.001	0.001	0.001	17.21
	330	2.485	4.188	2.285	1.275	0.655	0.410	0.285	0.196	0.134	0.085	0.037	0.025	0.017	0.006	0.003	0.001				12.09
TOT.	19.64	32.00	20.45	12.12	6.89	3.89	2.26	1.26	0.68	0.38	0.21	0.12	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	100	

Tabella 4.14: Tabella di frequenza di occorrenza [%] annuale di H_{m0} rispetto alla periodo di picco dell'onda T_p nel *Punto P1*

T_p [s]	H_{m0} [m]																		Total	
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	7-7.5	7.5-8	8-8.5	8.5-9		9-9.5
14-15																				
13-14		0.001	0.001	0.001	0.001			0.001	0.002	0.001	0.001						0.001	0.001	0.001	0.011
12-13	0.004	0.005	0.004	0.005	0.008	0.004	0.006	0.001	0.004	0.002	0.003	0.008	0.006	0.007	0.007					0.073
11-12	0.007	0.022	0.023	0.015	0.023	0.027	0.025	0.023	0.015	0.02	0.028	0.032	0.027	0.013	0.004	0.001				0.304
10-11	0.018	0.044	0.061	0.083	0.15	0.153	0.115	0.127	0.155	0.179	0.145	0.076	0.019	0.004						1.329
9-10	0.02	0.076	0.228	0.433	0.477	0.487	0.53	0.581	0.429	0.175	0.031	0.006								3.473
8-9	0.042	0.265	1.026	1.491	1.439	1.476	1.248	0.509	0.08	0.007										7.582
7-8	0.127	1.465	3.692	3.567	2.964	1.575	0.331	0.02												13.74
6-7	0.457	5.322	6.725	4.668	1.78	0.169	0.003													19.124
5-6	2.131	11.041	6.47	1.844	0.049															21.534
4-5	7.014	9.853	2.207	0.014																19.088
3-4	7.908	3.881	0.012																	11.801
2-3	1.9	0.031																		1.931
1-2	0.009																			0.009
Total	19.636	32.006	20.449	12.121	6.892	3.892	2.257	1.262	0.684	0.382	0.208	0.121	0.052	0.023	0.012	0.001	0.001	0.001	0.001	100

4.4.3.2 H_{m0} e WS

Lo *scatter plot* e la tabella di frequenza di occorrenza (%) di H_{m0} vs. WS nel *Punto P1* dell'HFOWF per le condizioni dello stato totale del mare sono mostrate in Figura 4.14 e nella Tabella 4.15, rispettivamente.

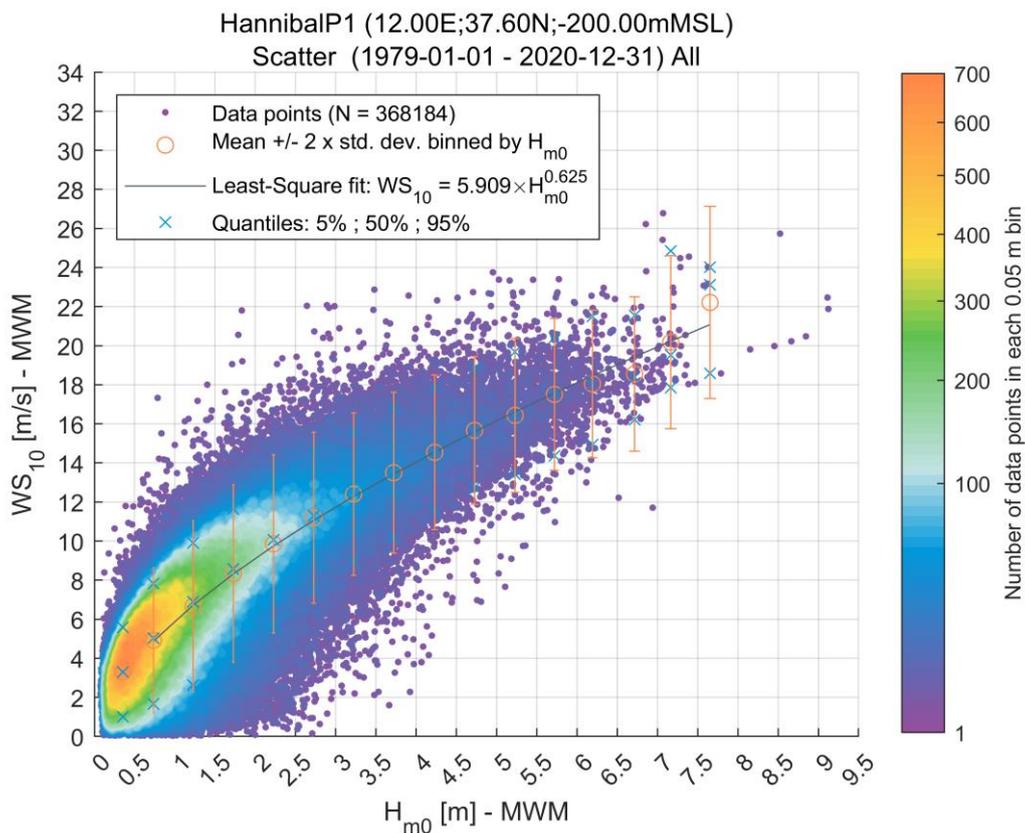


Figura 4.14: *Scatter plot* di H_{m0} vs. $WS_{10,2hr}$ nel *Punto P1* per lo stato totale del mare

Tabella 4.15: Tabella di frequenza di occorrenza [%] annuale omnidirezionale di H_{m0} rispetto alla velocità del vento $WS_{10,2hr}$ nel *Punto P1*

WS_{10} [m/s]	H_{m0} [m]																			
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	3.5-4	4-4.5	4.5-5	5-5.5	5.5-6	6-6.5	6.5-7	7-7.5	7.5-8	8-8.5	8.5-9	9-9.5	Total
32-34																				
30-32																				
28-30																				
26-28																				0.001
24-26															0.001					0.002
22-24						0.001				0.002	0.002	0.002	0.001		0.001	0.001				0.01
20-22				0.001		0.001	0.001	0.002	0.002	0.005	0.006	0.008	0.005	0.004	0.003			0.001		0.039
18-20				0.001	0.001	0.006	0.007	0.016	0.026	0.032	0.032	0.037	0.02	0.011	0.006		0.001			0.194
16-18			0.002	0.005	0.015	0.029	0.073	0.104	0.11	0.116	0.084	0.051	0.018	0.008	0.001					0.615
14-16		0.001	0.005	0.034	0.123	0.269	0.378	0.376	0.288	0.168	0.068	0.019	0.007							1.735
12-14		0.007	0.056	0.352	0.912	1.066	0.918	0.517	0.199	0.049	0.013	0.003	0.001							4.094
10-12	0.002	0.056	0.83	2.35	2.492	1.561	0.64	0.193	0.048	0.009	0.002	0.001								8.184
8-10	0.015	1.224	4.946	4.646	2.131	0.694	0.177	0.039	0.007	0.001	0.001									13.881
6-8	0.435	8.343	7.509	2.936	0.802	0.178	0.046	0.01	0.002	0.001										20.262
4-6	5.827	12.42	4.499	1.221	0.291	0.057	0.014	0.003	0.001											24.332
2-4	9.485	7.643	2.016	0.464	0.097	0.024	0.004	0.002												19.736
0-2	3.872	2.311	0.586	0.111	0.029	0.006														6.915
Total	19.636	32.006	20.449	12.121	6.892	3.892	2.257	1.262	0.684	0.382	0.208	0.121	0.052	0.023	0.012	0.001	0.001	0.001	0.001	100

5 Condizioni meteomarine estreme

Sono state condotte una serie di analisi per valutare le condizioni meteomarine estreme nel *Punto P1* all'interno del sito del progetto. Le condizioni estreme sono state basate sui dati presentati nel Capitolo 2. Le condizioni d'onda estreme sono state eseguite solamente per lo stato totale del mare.

Tutti i valori estremi sono forniti per i periodi di ritorno (T_R) di 1, 10, 50, 100 e 500 anni. Gli estremi dei sottoinsiemi direzionali si basano su settori direzionali $12 \times 30^\circ$ (centrati in $0^\circ N$, $30^\circ N$, $60^\circ N$, etc.). Gli estremi dei sottoinsiemi direzionali sono presentati, in questo documento, in due modi differenti (come concordato con 7 Seas):

1. Come valori estremi direzionali marginali: individuando le distribuzioni teoriche che meglio si adattano ai campioni di dati che soddisfano il requisito specifico (cioè, per ogni intervallo direzionale di 30°). A partire dalle serie temporali disponibili, vengono estratti gli eventi più significativi per ciascuna direzione, e si individua la distribuzione estrema teorica che meglio si adatta al campione di eventi estratti per ciascuna direzione separatamente. Infine, i valori estremi vengono derivati dalle distribuzioni per ciascun periodo di ritorno selezionato.
2. Come valori direzionali scalati: per i requisiti di progettazione, è stato determinato un insieme caratteristico di valori direzionali con probabilità annua di superamento p_0 , secondo le raccomandazioni presenti nella Sezione 3.6.5.6 di [1]. Questo comporta il calcolo del valore del periodo di ritorno per ciascun sottoinsieme direzionale corrispondente a una probabilità di superamento di $p_0/(0.5N_{DS})$, dove N_{DS} è il numero dei settori direzionali.

Ad esempio, con 12 settori direzionali e una probabilità annua di superamento di 10^{-2} (ovvero $T_R = 100$ anni), i valori estremi per ciascun settore direzionale corrispondono a un periodo di ritorno di 600 anni. Allo stesso modo, i valori estremi, per ogni settore, di 1, 10, 50 e 500 anni corrispondono a valori del periodo di ritorno, rispettivamente, di 6, 60, 300 e 3000 anni. Infine, il valore del periodo di ritorno caratteristico per ciascuna direzione viene selezionato come il valore minimo tra l'estremo direzionale così calcolato e il valore omnidirezionale corrispondente.

5.1 Velocità del vento

Le velocità del vento estreme nel sito del progetto sono state stabilite sulla base dei dati del modello WRF a 10 m slm e 80 m slm descritti nel Capitolo 2. Si è ipotizzato che la risoluzione temporale del vento modellato rappresenti il vento medio su una durata di 2 ore.

La distribuzione applicata per stimare le velocità del vento estreme è stata scelta sulla base di un'analisi di sensibilità che confronta le stime omnidirezionali estreme, associate a un periodo di ritorno di 100 anni, della velocità del vento a 10 m slm (WS_{10}). Ciò ha comportato il confronto tra i valori stimati e il corrispondente adattamento ai dati ottenuti per varie distribuzioni, numero di eventi e metodi di adattamento. I risultati di questo test di sensibilità sono presentati in termini di valori associati a un periodo di ritorno di 100 anni in Figura 5.1.

Questa figura mostra che la distribuzione di Gumbel con adattamento ai minimi quadrati (LS alla velocità del vento al quadrato) fornisce una stima centrale delle velocità del vento estreme, per un periodo di ritorno di 100 anni, nel *Punto P1*, rispetto ad altre distribuzioni e metodi di adattamento. La Figura 5.1 mostra che la distribuzione estrema nel *Punto P1*, basata su Gumbel, valori di picco annuali *LS fit and squared*, fornisce un buon adattamento ai dati; quindi, si consiglia di applicare questo metodo per derivare le velocità del vento estreme (a tutte le altezze) nel sito del progetto. La Figura 5.2 e la Figura 5.3 mostrano le distribuzioni omnidirezionali ottenute rispettivamente per le velocità del vento a 10 m slm e 80 m slm.

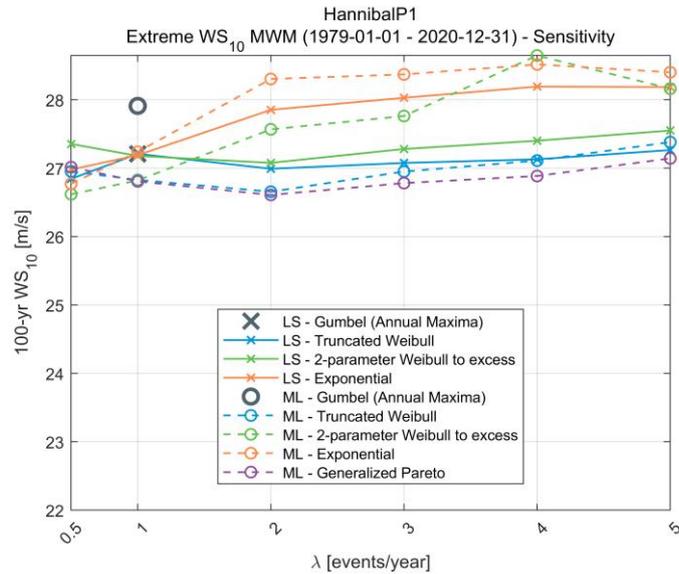


Figura 5.1 Stime omnidirezionali della velocità del vento ($WS_{10,2h}$) per un periodo di ritorno (T_R) di 100 anni nel sito del progetto valutate usando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è stata valutata usando i metodi dei minimi quadrati (LS) e della massima verosimiglianza (ML)

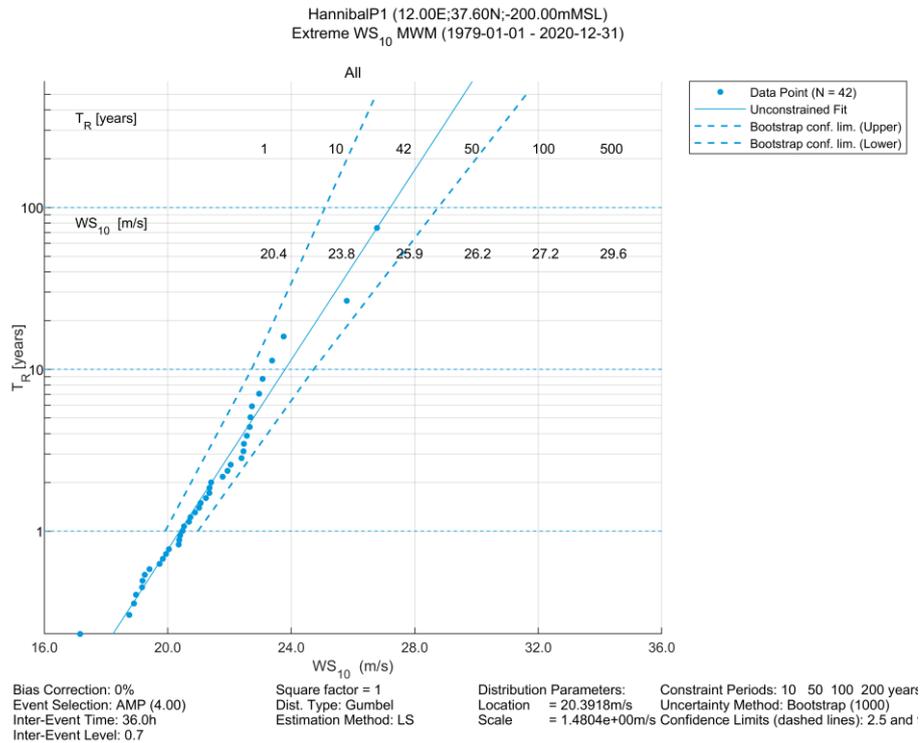


Figura 5.2: Distribuzione omnidirezionale estrema di $WS_{10,2hr}$ secondo una distribuzione di Gumbel adattata con l'annual maxima (AMP) e il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con una linea blu tratteggiata

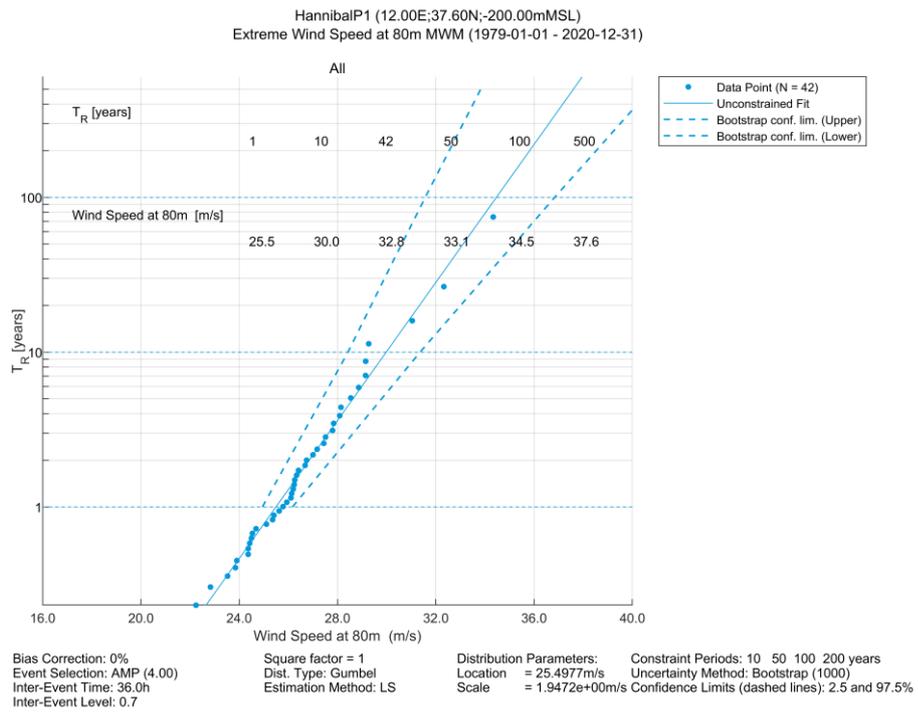


Figura 5.3: Distribuzione omnidirezionale estrema di $WS_{80,2hr}$ secondo una distribuzione di Gumbel adattata agli *l'annual maxima* (AMP) e il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con una linea blu tratteggiata

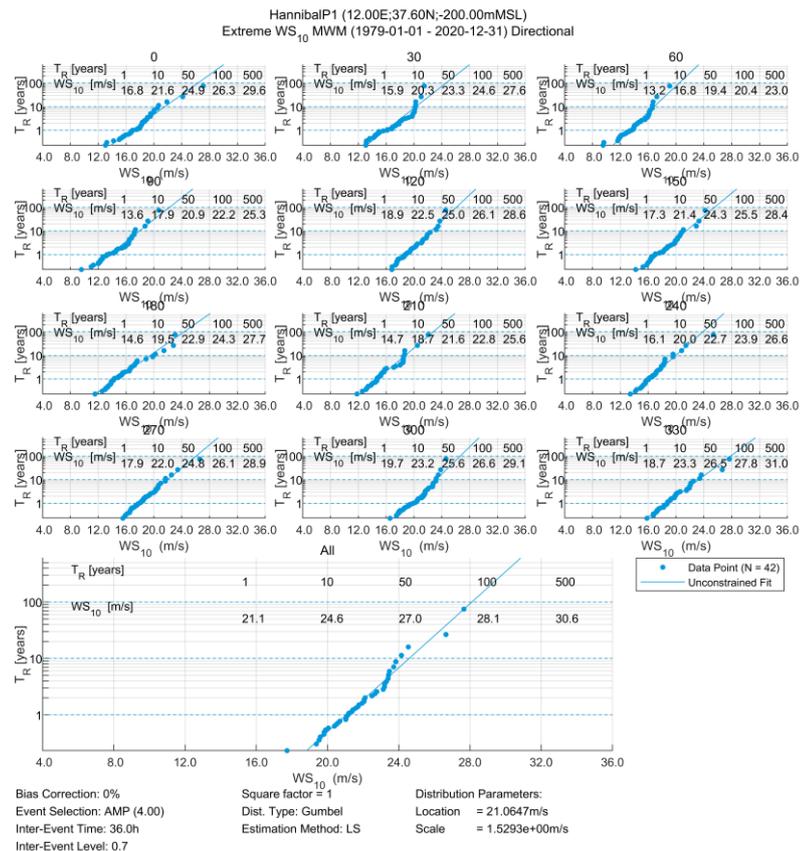


Figura 5.4: Distribuzioni direzionali marginali estreme di WS₁₀,2hr secondo una distribuzione di Gumbel adattata agli *annual maxima* (AMP) e con il metodo dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con una linea blu tratteggiata

Come menzionato nella Sezione 3.3, le velocità del vento a 10 m di altitudine modellate sono considerate rappresentative di una finestra media di 2 ore. Per questo studio, è stato necessario valutare le velocità del vento estreme in finestre temporali medie più piccole di 1 ore, 10 minuti, 1 minuto e 3 secondi, per tutte le altitudini, applicando i profili suggeriti in (European standard, 2005 [30]). I fattori di conversione sono indicati nella successiva Section 5.1.1. Le velocità del vento estreme risultanti nel *Punto P1* sono riportate nella seguente serie di tabelle:

- La Tabella 5.1 e la Tabella 5.2 riassumono le velocità del vento estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali per WS₁₀ e per le durate di 1 ora, 10 minuti, 1 minuto e 3 secondi, rispettivamente.
- Dalla Tabella 5.3 alla Tabella 5.4 vengono riassunte le velocità del vento estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate per WS₁₀. L'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1].
- La Tabella 5.5 e la Tabella 5.6 riassumono le velocità del vento estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali per WS₈₀ e per le durate di 1 ora, 10 minuti, 1 minuto e 3 secondi, rispettivamente.
- La Tabella 5.7 e la Tabella 5.8 riassumono le velocità del vento estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate per WS₈₀. L'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1].

Tabella 5.1: Velocità del vento estrema WS_{10} omnidirezionale e direzionale marginale nel *Punto P1* per le finestre medie di 1 ora e 10 minuti

		$WS_{10,1hr}$ [m/s]					$WS_{10,10min}$ [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		21.1	24.6	27.1	28.1	30.6	25.4	30.1	33.4	34.8	38.1
Wind Incoming Direction [°N coming from]	0	16.8	21.6	24.9	26.3	29.6	20.0	26.1	30.5	32.4	36.9
	30	15.9	20.3	23.3	24.6	27.6	18.9	24.4	28.4	30.1	34.1
	60	13.2	16.8	19.4	20.5	23.0	15.5	20.0	23.2	24.6	27.9
	90	13.6	17.9	20.9	22.2	25.3	16.0	21.4	25.3	27.0	31.0
	120	18.9	22.5	25.0	26.1	28.6	22.6	27.3	30.6	32.1	35.5
	150	17.3	21.4	24.3	25.5	28.4	20.7	25.9	29.7	31.3	35.2
	180	14.6	19.5	22.9	24.3	27.7	17.2	23.4	27.8	29.7	34.3
	210	14.7	18.8	21.6	22.8	25.6	17.4	22.5	26.1	27.7	31.4
	240	16.1	20.0	22.7	23.9	26.6	19.1	24.0	27.6	29.1	32.7
	270	17.9	22.0	24.8	26.1	28.9	21.3	26.6	30.4	32.0	35.9
	300	19.7	23.2	25.6	26.6	29.1	23.7	28.2	31.4	32.8	36.1
330	18.7	23.3	26.5	27.8	31.1	22.3	28.3	32.6	34.4	38.8	

Tabella 5.2: Velocità del vento estrema WS_{10} omnidirezionale e direzionale marginale nel *Punto P1* per le finestre medie di 1 minuto e 3 secondi

		$WS_{10,1min}$ [m/s]					$WS_{10,3sec}$ [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		27.9	33.2	37.0	38.7	42.6	31.1	37.3	41.7	43.7	48.4
Wind Incoming Direction [°N coming from]	0	21.8	28.7	33.7	35.9	41.1	24.1	32.0	37.8	40.4	46.6
	30	20.5	26.8	31.3	33.2	37.9	22.7	29.8	35.0	37.3	42.8
	60	16.8	21.8	25.4	27.0	30.8	18.4	24.1	28.3	30.1	34.4
	90	17.3	23.3	27.7	29.7	34.2	19.0	25.9	30.9	33.2	38.5
	120	24.7	30.0	33.8	35.5	39.4	27.4	33.6	38.0	40.0	44.6
	150	22.5	28.5	32.8	34.7	39.1	24.9	31.8	36.8	39.0	44.3
	180	18.7	25.6	30.6	32.8	38.1	20.6	28.4	34.3	36.8	43.0
	210	18.8	24.5	28.6	30.5	34.7	20.8	27.2	32.0	34.1	39.1
	240	20.7	26.3	30.3	32.1	36.3	22.9	29.3	34.0	36.0	40.9
	270	23.3	29.2	33.6	35.5	39.9	25.8	32.7	37.7	39.9	45.2
	300	25.9	31.0	34.7	36.4	40.2	28.8	34.8	39.1	41.0	45.5
330	24.4	31.2	36.1	38.2	43.4	27.1	34.9	40.7	43.2	49.3	

Tabella 5.3: Velocità del vento estrema WS_{10} omnidirezionale e direzionale scalata nel *Punto P1* per le finestre medie di 1 ora e 10 minuti: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1]

		Scaled directional extremes					Scaled directional extremes				
		$WS_{10,1hr}$ [m/s]					$WS_{10,10min}$ [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		21.1	24.6	27.1	28.1	30.6	25.4	30.1	33.4	34.8	38.1
Wind Incoming Direction [°N coming from]	0	20.5	24.6	27.1	28.1	30.6	24.7	30.1	33.4	34.8	38.1
	30	19.3	23.6	26.7	28.0	30.6	23.2	28.8	32.8	34.6	38.1
	60	16.0	19.7	22.2	23.3	25.8	19.0	23.6	26.9	28.3	31.7
	90	17.0	21.3	24.3	25.6	28.6	20.2	25.7	29.7	31.4	35.5
	120	21.1	24.6	27.1	28.1	30.6	25.4	30.1	33.4	34.8	38.1
	150	20.5	24.6	27.1	28.1	30.6	24.7	30.1	33.4	34.8	38.1
	180	18.4	23.3	26.6	28.1	30.6	22.0	28.3	32.8	34.8	38.1
	210	17.9	21.9	24.7	25.9	28.7	21.3	26.5	30.2	31.8	35.6
	240	19.1	23.0	25.7	26.9	29.6	22.9	28.0	31.6	33.2	36.9
	270	21.1	24.6	27.1	28.1	30.6	25.4	30.1	33.4	34.8	38.1
	300	21.1	24.6	27.1	28.1	30.6	25.4	30.1	33.4	34.8	38.1
330	21.1	24.6	27.1	28.1	30.6	25.4	30.1	33.4	34.8	38.1	

Tabella 5.4: Velocità del vento estrema WS_{10} omnidirezionale e direzionale scalata nel *Punto P1* per le finestre medie di 1 minuto e 3 secondi: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1]

		Scaled directional extremes					Scaled directional extremes				
		$WS_{10,1min}[m/s]$					$WS_{10,3sec}[m/s]$				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		27.9	33.2	37.0	38.7	42.6	31.1	37.3	41.7	43.7	48.4
Directional Sector [°N coming from] - All	0	27.1	33.2	37.0	38.7	42.6	30.2	37.3	41.7	43.7	48.4
	30	25.4	31.8	36.4	38.4	42.6	28.2	35.6	41.0	43.4	48.4
	60	20.7	25.8	29.6	31.2	35.1	22.8	28.7	33.1	34.9	39.5
	90	22.0	28.2	32.8	34.8	39.5	24.3	31.5	36.8	39.1	44.7
	120	27.9	33.2	37.0	38.7	42.6	31.1	37.3	41.7	43.7	48.4
	150	27.1	33.2	37.0	38.7	42.6	30.2	37.3	41.7	43.7	48.4
	180	24.0	31.2	36.4	38.7	42.6	26.7	34.9	41.0	43.7	48.4
	210	23.3	29.1	33.3	35.2	39.6	25.8	32.5	37.5	39.6	44.8
	240	25.1	30.8	35.0	36.8	41.1	27.8	34.5	39.3	41.5	46.6
	270	27.9	33.2	37.0	38.7	42.6	31.1	37.3	41.7	43.7	48.4
	300	27.9	33.2	37.0	38.7	42.6	31.1	37.3	41.7	43.7	48.4
330	27.9	33.2	37.0	38.7	42.6	31.1	37.3	41.7	43.7	48.4	

Tabella 5.5: Velocità del vento estrema WS_{80} omnidirezionale e direzionale marginale nel *Punto P1* per le finestre medie di 1 ora e 10 minuti

		$WS_{80,1hr}$ [m/s]					$WS_{80,10min}$ [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		25.5	30.0	33.1	34.5	37.6	31.3	37.3	41.7	43.5	48.0
Wind Incoming Direction [°N coming from]	0	19.7	25.9	30.2	32.1	36.4	23.6	31.8	37.6	40.2	46.2
	30	18.7	24.1	27.8	29.4	33.2	22.4	29.4	34.4	36.6	41.7
	60	15.3	19.8	22.9	24.2	27.3	18.1	23.7	27.8	29.6	33.8
	90	15.8	21.2	25.0	26.6	30.4	18.7	25.6	30.6	32.7	37.8
	120	23.3	27.9	31.2	32.6	35.8	28.3	34.5	39.0	40.9	45.5
	150	21.3	26.2	29.7	31.2	34.7	25.7	32.3	37.0	39.0	43.8
	180	17.3	23.2	27.4	29.2	33.4	20.6	28.3	33.8	36.3	42.0
	210	17.4	22.4	25.8	27.3	30.7	20.8	27.1	31.7	33.6	38.3
	240	18.9	23.7	27.1	28.6	32.0	22.6	28.9	33.4	35.4	40.0
	270	21.0	26.3	30.0	31.6	35.2	25.4	32.3	37.3	39.5	44.6
	300	23.5	27.8	30.8	32.1	35.1	28.6	34.3	38.4	40.2	44.4
330	22.0	27.4	31.1	32.8	36.5	26.7	33.8	38.9	41.2	46.4	

Tabella 5.6: Velocità del vento estrema WS_{80} omnidirezionale e direzionale marginale nel *Punto P1* per le finestre medie di 1 minuto e 3 secondi

		$WS_{80,1min}$ [m/s]					$WS_{80,3sec}$ [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		34.6	41.6	46.7	48.9	54.2	38.9	47.2	53.3	56.0	62.3
Wind Incoming Direction [°N coming from]	0	25.9	35.2	42.0	45.0	52.1	28.8	39.6	47.6	51.2	59.8
	30	24.5	32.4	38.2	40.7	46.8	27.2	36.4	43.1	46.2	53.4
	60	19.6	26.0	30.6	32.6	37.5	21.6	28.9	34.3	36.6	42.3
	90	20.4	28.1	33.8	36.3	42.2	22.5	31.4	38.0	40.9	47.9
	120	31.2	38.4	43.6	45.8	51.2	35.0	43.4	49.5	52.2	58.7
	150	28.2	35.7	41.2	43.6	49.3	31.5	40.3	46.7	49.6	56.4
	180	22.4	31.2	37.6	40.4	47.2	24.8	34.9	42.4	45.8	53.8
	210	22.7	29.8	35.0	37.3	42.8	25.1	33.4	39.4	42.1	48.6
	240	24.7	31.9	37.1	39.4	44.8	27.4	35.7	41.8	44.6	51.0
	270	27.9	35.8	41.6	44.2	50.2	31.1	40.4	47.2	50.2	57.5
	300	31.5	38.1	42.9	45.0	50.0	35.3	43.1	48.8	51.3	57.2
330	29.3	37.5	43.5	46.1	52.4	32.8	42.4	49.4	52.6	60.1	

Tabella 5.7: Velocità del vento estrema WS_{80} omnidirezionale e direzionale scalata nel *Punto P1* per le finestre medie di 1 ora e 10 minuti: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1]

		Scaled directional extremes					Scaled directional extremes				
		$WS_{80,1hr}$ [m/s]					$WS_{80,10min}$ [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		25.5	30.0	33.1	34.5	37.6	31.3	37.3	41.7	43.5	48.0
Wind Incoming Direction [°N coming from]	0	24.5	30.0	33.1	34.5	37.6	29.9	37.3	41.7	43.5	48.0
	30	22.9	28.2	32.0	33.6	37.3	27.8	35.0	40.1	42.3	47.6
	60	18.8	23.2	26.4	27.7	30.8	22.5	28.3	32.4	34.2	38.5
	90	20.0	25.4	29.2	30.8	34.6	24.1	31.1	36.2	38.4	43.7
	120	25.5	30.0	33.1	34.5	37.6	31.3	37.3	41.7	43.5	48.0
	150	25.1	30.0	33.1	34.5	37.6	30.8	37.3	41.7	43.5	48.0
	180	21.9	27.9	32.1	33.9	37.6	26.5	34.5	40.2	42.7	48.0
	210	21.3	26.2	29.6	31.1	34.5	25.7	32.2	36.8	38.8	43.6
	240	22.6	27.5	30.9	32.3	35.7	27.5	33.9	38.6	40.6	45.3
	270	25.1	30.0	33.1	34.5	37.6	30.8	37.3	41.7	43.5	48.0
	300	25.5	30.0	33.1	34.5	37.6	31.3	37.3	41.7	43.5	48.0
330	25.5	30.0	33.1	34.5	37.6	31.3	37.3	41.7	43.5	48.0	

Tabella 5.8: Velocità del vento estrema WS_{80} omnidirezionale e direzionale scalata nel *Punto P1* per le finestre medie di 1 minuto e 3 secondi: l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 di [1]

		Scaled directional extremes					Scaled directional extremes				
		$WS_{80,1min}$ [m/s]					$WS_{80,3sec}$ [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		34.6	41.6	46.7	48.9	54.2	38.9	47.2	53.3	56.0	62.3
Directional Sector [°N coming from] - All	0	33.1	41.6	46.7	48.9	54.2	37.1	47.2	53.3	56.0	62.3
	30	30.6	38.9	44.8	47.5	53.7	34.3	43.9	51.0	54.2	61.8
	60	24.6	31.2	35.9	38.0	43.0	27.3	34.9	40.5	42.9	48.8
	90	26.4	34.4	40.3	42.9	49.1	29.3	38.7	45.7	48.8	56.1
	120	34.6	41.6	46.7	48.9	54.2	38.9	47.2	53.3	56.0	62.3
	150	34.0	41.6	46.7	48.9	54.2	38.3	47.2	53.3	56.0	62.3
	180	29.2	38.3	45.0	47.9	54.2	32.6	43.3	51.2	54.8	62.3
	210	28.2	35.6	41.0	43.4	49.0	31.5	40.1	46.5	49.3	56.0
	240	30.3	37.7	43.1	45.4	51.0	33.8	42.6	48.9	51.8	58.5
	270	34.0	41.6	46.7	48.9	54.2	38.3	47.2	53.3	56.0	62.3
	300	34.6	41.6	46.7	48.9	54.2	38.9	47.2	53.3	56.0	62.3
330	34.6	41.6	46.7	48.9	54.2	38.9	47.2	53.3	56.0	62.3	

5.1.1 Conversione tra scale temporali

Le informazioni fornite in questa sezione descrivono in dettaglio i fattori di correzione della velocità del vento di tempesta che possono essere applicati alle velocità del vento modellate per rappresentare i vari intervalli di tempo. Queste correzioni sono state determinate seguendo le istruzioni specificate dalle principali linee guida della progettazione *offshore* [30].

Per finestre di media temporale minori di 1 ora, la velocità media del vento in condizioni di tempesta può essere espressa come:

$$U_{w,T}(z) = U_{w,1h}(z) \cdot \left[1 - 0.41 \cdot I_u \cdot \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] \quad (5.1)$$

con:

$U_{w,T}(z)$ è la velocità del vento sostenuta (m/s) a un'altitudine di z m slm, mediate su un intervallo di tempo T

$U_{w,1h}(z)$ è la velocità del vento sostenuta in 1 ora a un'altitudine di z m slm

T_0 è l'intervallo di riferimento di media temporale di 3600 s

I_u è un valore dimensionalmente dipendente per l'intensità turbolenta della velocità del vento, dato da: $I_u = 0.06 \cdot (1 + 0.043 \cdot U_{w0}) \cdot \left(\frac{z}{z_r} \right)^{-0.22}$

Poiché le velocità del vento modellate rappresentano una velocità del vento sostenuta di 2 ore, (?definire?) un mezzo per determinare la velocità del vento sostenuta di 1 ora (U_{w0}) è un passo necessario per implementare le correzioni di cui sopra. I valori di U_{w0} sono stati approssimati tramite una soluzione iterativa delle equazioni di media temporale descritte sopra, impostando T a 7200 m e l'elevazione z a 10 m, che ha portato a definire un fattore di correzione del 3.3% da 2 h a 1 h.

5.2 Livello del mare

Il modello statistico EVA di DHI (vedi Appendice B) è stato impostato per i livelli d'acqua. I livelli estremi di acqua alta e bassa sono stimati indipendentemente per il livello totale dell'acqua (di marea e residuo) e solo residuo. Le altezze della superficie libera mostrano variazioni stagionali e la stagione viene quindi utilizzata come co-variabile.

Le distribuzioni estreme sono mostrate in Figura 5.5. La Tabella 5.9 e la Tabella 5.10 mostrano, rispettivamente, i livelli mensili estremi totali e residui dell'acqua alta. I valori estremi mensili dell'acqua bassa sono riportati nella Tabella 5.11 e nella Tabella 5.12 per i livelli dell'acqua totale e residua, rispettivamente. I livelli dell'acqua sono riportati rispetto al livello medio del mare (m slm). La tabella evidenzia che la distribuzione estrema annuale è guidata dal valore più basso verificatosi nel luglio 2018, ovvero un livello residuo fino a -0.52 m. tale valore è legato all'evoluzione di un sistema ad alta pressione persistente sul bacino: la Figura 5.6 mostra la serie temporale del livello residuo dell'acqua e le contemporanee velocità e direzione del vento (a 10 m slm), come estratte nel *Punto P1* nell'area de parco eolico.

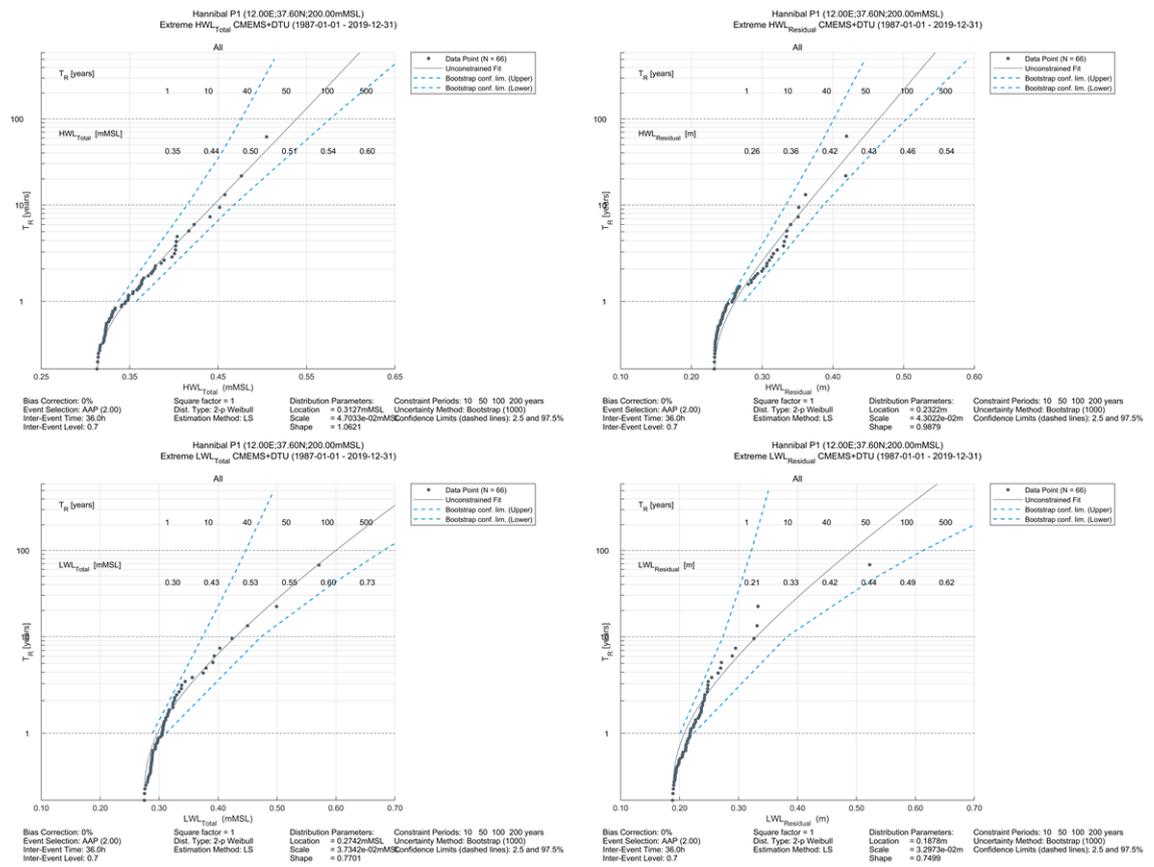


Figura 5.5: Distribuzioni estreme annuali ottenute per i livelli d'acqua HWL totale e residuo (in alto a sinistra e in alto a destra, rispettivamente) e per quelli LWL totale e residuo (in basso a sinistra e in basso a destra, rispettivamente)

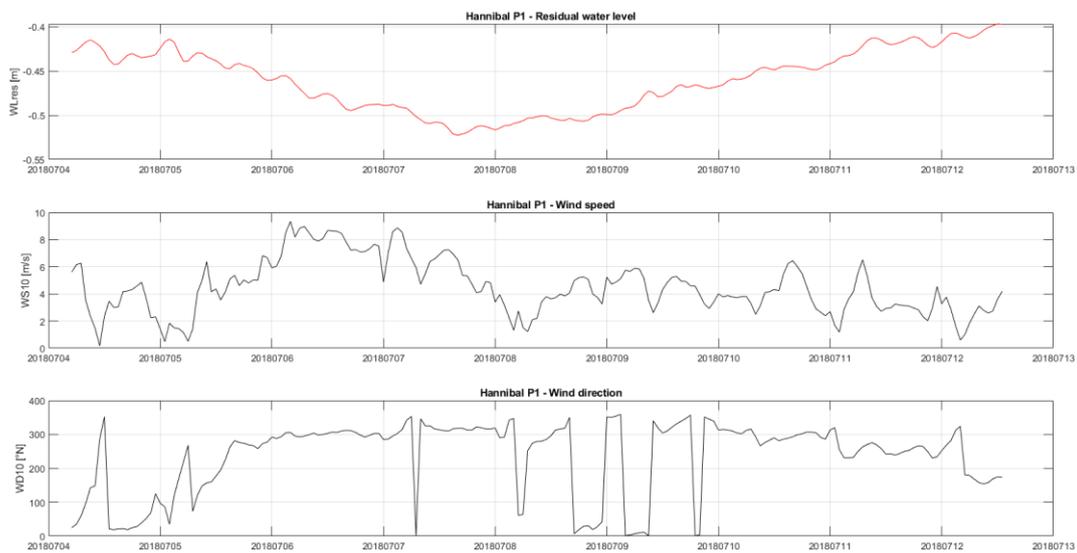


Figura 5.6: serie temporali del livello dell'acqua residuo, velocità del vento e direzione del vento (a 10 m slm) in occasione del valore minimo del livello dell'acqua residuo verificatosi a luglio 2018

Tabella 5.9 Livelli totali di acqua alta annuali e mensili estremi (HWL_{total})

Annual and Monthly Extreme Total High Water Level [mMSL]						
Months		T _R [years]				
		1	10	50	100	500
Monthly	Annual	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
	Jan	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
	Feb	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
	Mar	0.2	0.4	0.5	0.5	0.6
	Apr	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
	May	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Jun	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4
	Jul	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Aug	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Sep	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Oct	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
	Nov	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
	Dec	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5

Tabella 5.10 Livelli residui di acqua alta annuali e mensili estremi (HWL_{resid})

Annual and Monthly Extreme Residual High Water Level [m]						
Months		T _R [years]				
		1	10	50	100	500
Monthly	Annual	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5
	Jan	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4
	Feb	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Mar	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5
	Apr	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4
	May	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4
	Jun	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
	Jul	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4
	Aug	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4
	Sep	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3
	Oct	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
	Nov	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
	Dec	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4

Tabella 5.11 Livelli totali di acqua bassa annuali e mensili estremi (LWL_{total})

Annual and Monthly Extreme Total Low Water Level [mMSL]						
Months		T _R [years]				
		1	10	50	100	500
Monthly	Annual	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	-0.7
	Jan	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4
	Feb	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
	Mar	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4
	Apr	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4
	May	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	Jun	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
	Jul	-0.2	-0.4	-0.5	-0.6	-0.9
	Aug	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	Sep	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	Oct	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5
	Nov	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
	Dec	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4

Tabella 5.12 Livelli residui di acqua bassa annuali e mensili estremi (LWL_{resid})

Annual and Monthly Extreme Residual Low Water Level [m]						
Months		T _R [years]				
		1	10	50	100	500
Monthly	Annual	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6
	Jan	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	Feb	-0.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4
	Mar	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
	Apr	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
	May	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
	Jun	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
	Jul	-0.1	-0.2	-0.4	-0.5	-0.9
	Aug	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2
	Sep	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2
	Oct	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
	Nov	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
	Dec	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4

5.3 Correnti

In questa sezione sono presentate le condizioni di corrente superficiale estreme. L'analisi ai valori estremi è stata eseguita per le velocità di corrente superficiale totale (CS_{Total}) e residua (CS_{Resid}). Il *de-tiding* è stato condotto utilizzando il metodo *U-tide* come descritto in [18]. I pedici "*tide*" e "*resid.*" rappresentano, rispettivamente, la componente di marea e residua della velocità della corrente e della sua direzione.

La distribuzione applicata per stimare la velocità delle corrente estrema è stata scelta sulla base di un'analisi di sensibilità che confronta le stime estreme omnidirezionali estreme, associate a un periodo di ritorno di 100 anni, di CS_{Total} e CS_{Resid} (e il corrispondente adattamento dei dati) ottenute da varie distribuzioni, numero di eventi e metodi di adattamento. I risultati di questo test di sensibilità sono presentati in termini di valori associati a un periodo di ritorno di 100 anni in Figura 5.15.

I risultati mostrano che le stime della corrente estrema delle diverse distribuzioni rimangono pressoché stabili aumentando i criteri di soglia (numero di eventi per anno) e il tipo di distribuzione. È stato riscontrato che la distribuzione di Gumbel adattata ai picchi massimi annuali fornisce una stima centrale del CS_{Total} e del CS_{Resid} associati a un periodo di ritorno di 100 anni, pertanto si consiglia di applicare questo metodo per derivare le correnti superficiali estreme in corrispondenza dell'HFOWF.

Le distribuzioni dei valori estremi per le condizioni di corrente superficiale omnidirezionale sono mostrate nella Figura 5.8 per la corrente totale (in alto) e per quella residua (in basso).

I valori estremi omnidirezionali e direzionali marginali della velocità della corrente superficiale CS_{Total} e CS_{Resid} sono riassunte nella Tabella 5.13, mentre la Tabella 5.14 mostra l'insieme dei valori direzionali scalati (scalati secondo la Sezione 3.6.5.6 of [1]).

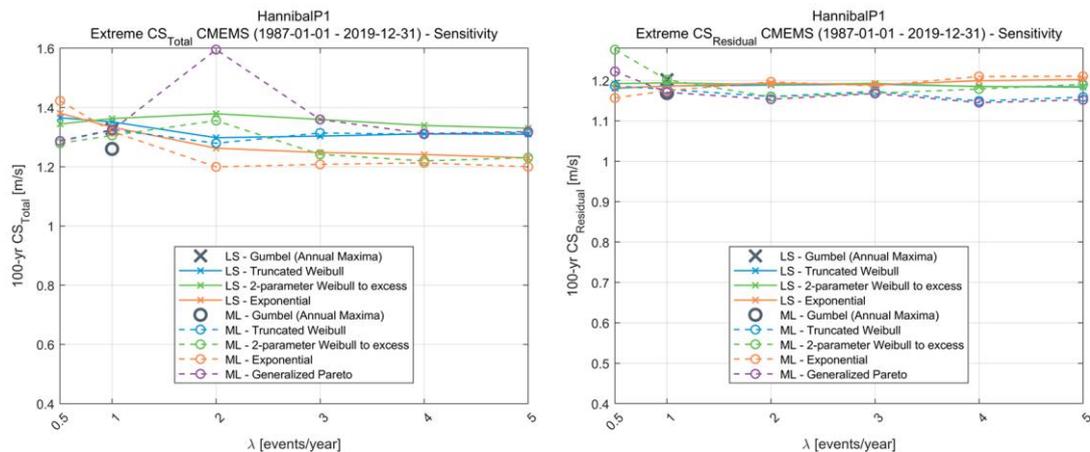


Figura 5.7 Stime omnidirezionali di CS_{total} (a sinistra) e CS_{resid} (a destra) per un periodo di ritorno (T_R) di 100 anni nel sito del progetto valutate usando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è valutata usando un metodo dei minimi quadrati (LS) e un metodo di massima verosimiglianza(ML)

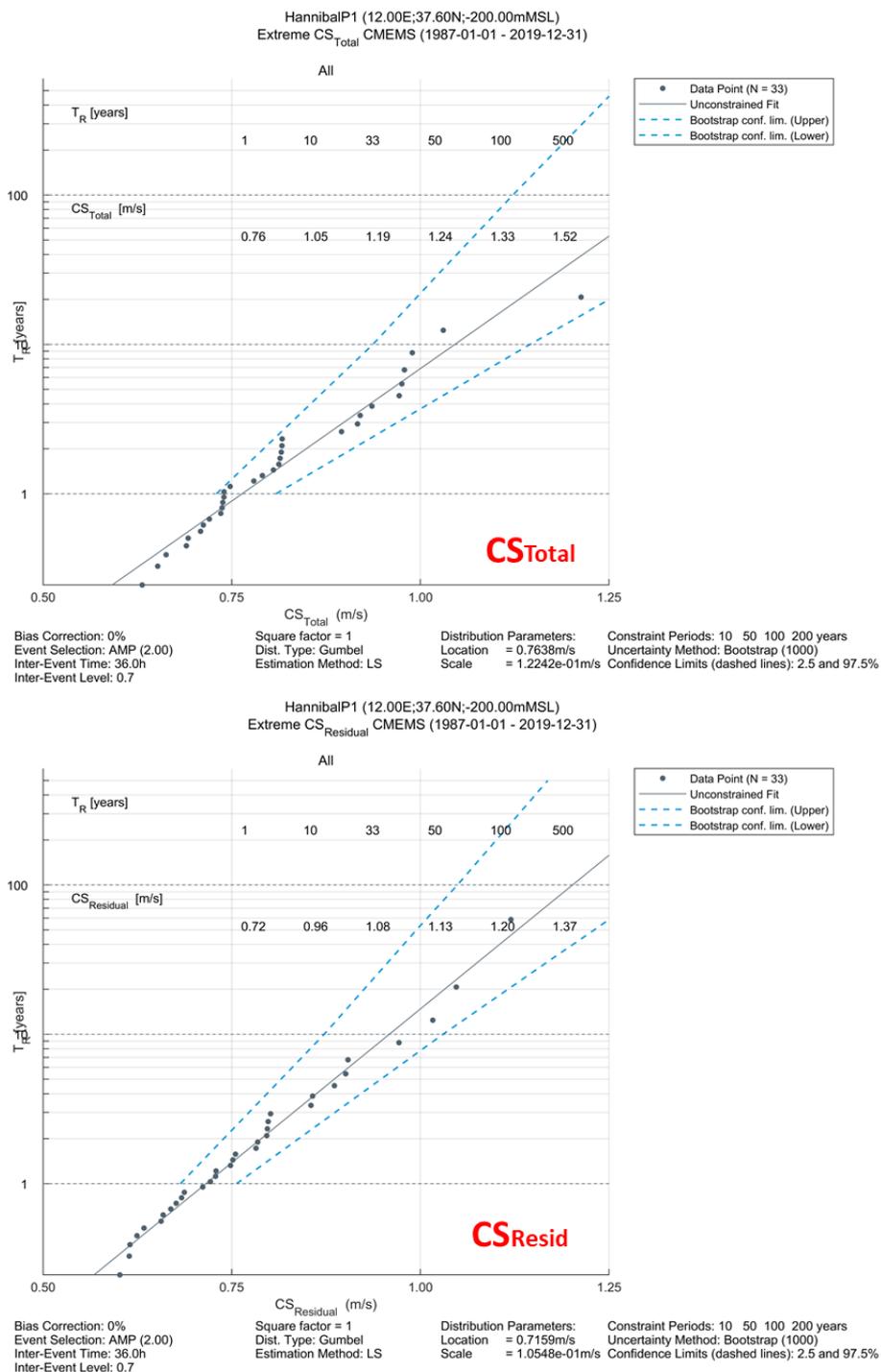


Figura 5.8 CS_{total} (in alto) e CS_{resid} (in basso) omnidirezionali estreme secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai massimi annuali (AMP) e a un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono riportati con una linea blu tratteggiata

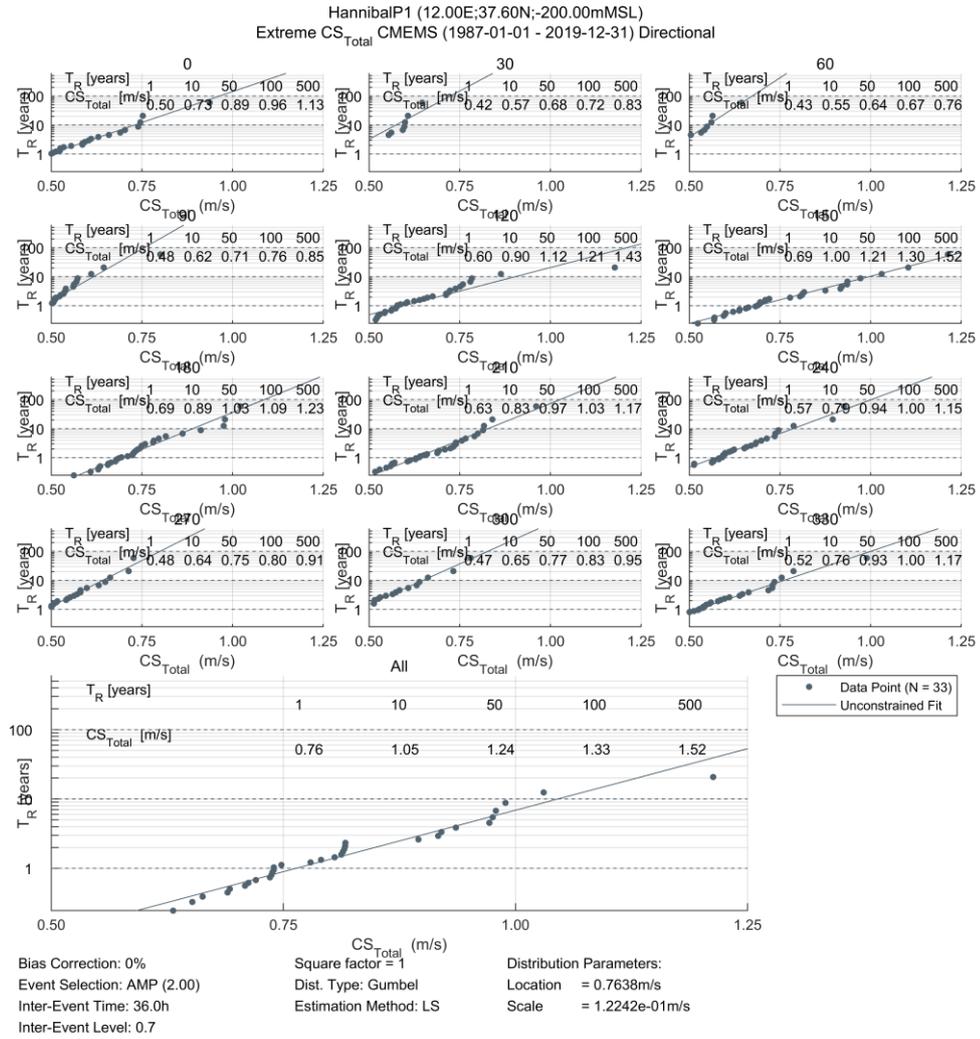


Figura 5.9 CS_{Total} omnidirezionale estrema secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai massimi annuali (AMP) e un metodo di adattamento dei minimi quadrati

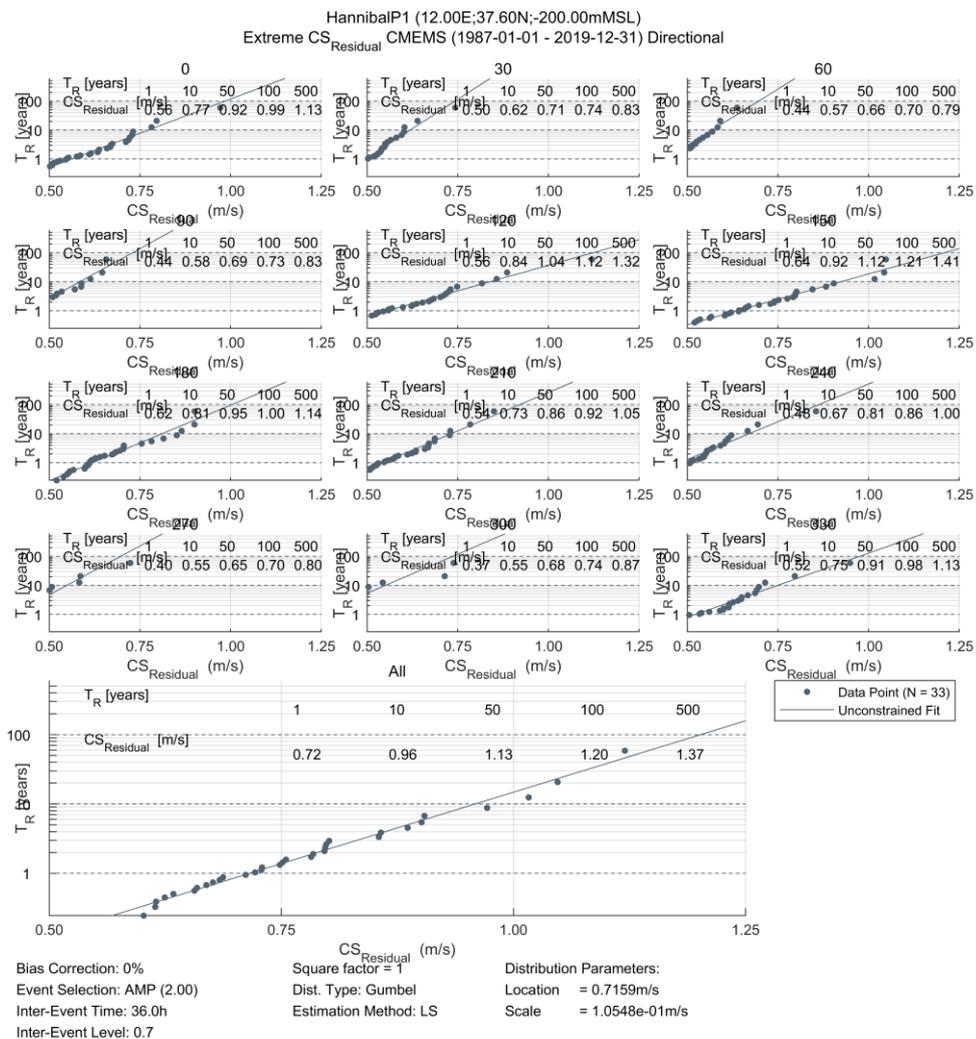


Figura 5.10 CS_{Resid} omnidirezionale estrema secondo una distribuzione di Gumbel adattata ai massimi annuali (AMP) e un metodo di adattamento dei minimi quadrati

Tabella 5.13: Corrente totale (CS_{Total}) e corrente residua (CS_{Resid}) estreme omnidirezionali e direzionali marginali alla superficie

		CS_{Total} [m/s]					CS_{Resid} [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		0.8	1.1	1.2	1.3	1.5	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4
Surface current Direction [°N going towards]	0	0.5	0.7	0.9	1.0	1.1	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1
	30	0.4	0.6	0.7	0.7	0.8	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8
	60	0.4	0.6	0.6	0.7	0.8	0.4	0.6	0.7	0.7	0.8
	90	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.4	0.6	0.7	0.7	0.8
	120	0.6	0.9	1.1	1.2	1.4	0.6	0.8	1.0	1.1	1.3
	150	0.7	1.0	1.2	1.3	1.5	0.6	0.9	1.1	1.2	1.4
	180	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	0.6	0.8	1.0	1.0	1.1
	210	0.6	0.8	1.0	1.0	1.2	0.5	0.7	0.9	0.9	1.1
	240	0.6	0.8	0.9	1.0	1.2	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0
	270	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9	0.4	0.6	0.7	0.7	0.8
300	0.5	0.7	0.8	0.8	1.0	0.4	0.6	0.7	0.7	0.9	
330	0.5	0.8	0.9	1.0	1.2	0.5	0.8	0.9	1.0	1.1	

Tabella 5.14: Corrente totale (CS_{Total}) e corrente residua (CS_{Resid}) estreme omnidirezionali e direzionali scalate alla superficie. L'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato in accordo con la Sezione 3.6.5.6 of [1]

		Scaled directional extremes									
		CS_{Total} [m/s]					CS_{Resid} [m/s]				
T_R [years]		1	10	50	100	500	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		0.8	1.1	1.2	1.3	1.5	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4
Surface current Direction [°N going towards]	0	0.7	0.9	1.1	1.2	1.3	0.7	0.9	1.1	1.2	1.3
	30	0.5	0.7	0.8	0.8	1.0	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9
	60	0.5	0.7	0.7	0.8	0.9	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9
	90	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9
	120	0.8	1.1	1.2	1.3	1.5	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4
	150	0.8	1.1	1.2	1.3	1.5	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4
	180	0.8	1.0	1.2	1.2	1.4	0.7	1.0	1.1	1.2	1.3
	210	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2
	240	0.7	1.0	1.1	1.2	1.3	0.6	0.8	1.0	1.0	1.2
	270	0.6	0.8	0.9	0.9	1.0	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9
300	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	
330	0.7	1.0	1.1	1.2	1.4	0.7	0.9	1.1	1.2	1.3	

5.4 Onde

Le altezze d'onda significative estreme sono state definite sulla base dei dati estratti dal database *hindcast* del MWM descritto nel Capitolo 2. Il calcolo delle onde estreme è stato basato sullo stato totale del mare (condizioni combinate di *swell* e *wind sea*) per un periodo di 42 anni (1979-2020, compresi).

La risoluzione temporale dei parametri dell'onda modellata è 1 ora e gli eventi del periodo di ritorno sono considerati rappresentativi di uno stato di mare di 3 ore ($H_{m0,3h}$). Le condizioni d'onda estreme sono state determinate per periodi di ritorno di 1, 10, 50, 100 e 500 anni.

La distribuzione applicata per stimare l' $H_{m0,3h}$ estrema è stata scelta sulla base di un test di sensibilità che confronta la stima omnidirezionale estrema, associata a un periodo di ritorno di 100 anni, e il corrispondente adattamento ai dati, ottenuti da varie distribuzioni PDF, numero di eventi e metodi di adattamento. I risultati di questo test di sensibilità sono presentati in Figura 5.11. Alcuni metodi fornivano adattamenti più instabili ed erano più sensibili al *threshold* fissato (λ eventi all'anno). La distribuzione di Weibull a 2 parametri, associata al metodo di stima della massima verosimiglianza (ML), ha mostrato una leggera diminuzione delle stime dei valori estremi per una soglia $\lambda > 2$ eventi all'anno. La stessa distribuzione è stata applicata per valutare le altezze massime d'onda (H_{max}).

Sulla base di ciò, si raccomanda di derivare le stime delle onde estreme nel sito dell'HFOWF utilizzando una distribuzione di Weibull a 2 parametri con un metodo di stima dei minimi quadrati (LS), utilizzando una soglia corrispondente alla media di due picchi annuali ($\lambda = 2$).

La distribuzione risultante per le altezze d'onda significativa totali omnidirezionali è mostrata in Figura 5.12 e riassume l'altezza d'onda significativa estrema omnidirezionale. La Figura 5.13 mostra le distribuzioni estreme direzionali marginali adattate agli eventi di picco per ciascun settore direzionale, e i valori estremi risultanti sono riassunti nella Tabella 5.13. L'insieme dei valori direzionali scalati (scalati secondo la Sezione 3.6.5.6 of [1]) è riportato nella Tabella 5.14.

Si prega di notare che l'altezza d'onda più alta del campione di dati su cui è stata utilizzata la distribuzione di Weibull è di 9.12 m e corrisponde a una tempesta molto forte avvenuta l'11 gennaio 1987, a causa di un sistema di pressione molto bassa. La Figura 5.14 mostra i valori *hindcast* di altezza d'onda significativa (H_{m0}), direzione media dell'onda (MWD), velocità del vento (WS_{10}) e direzione del vento (WS_{10}) durante l'evento estremo nel *Punto P1*. Il periodo di ritorno stimato di quella tempesta è vicino a 150 anni.

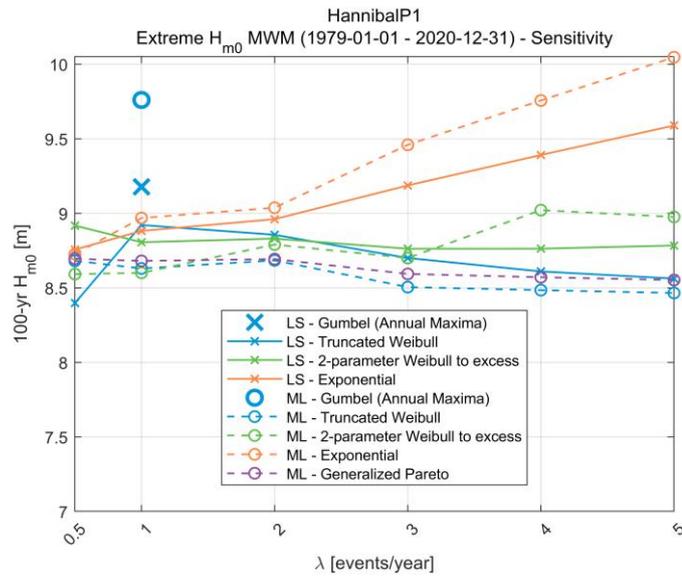


Figura 5.11 Stime di $H_{m0,3h}$ omnidirezionale per un periodo di ritorno (T_R) di 100 anni presso il sito valutato utilizzando diverse distribuzioni e numero di eventi di picco. Ogni distribuzione è stimata utilizzando il metodo dei minimi quadrati (LS) e il metodo della massima verosimiglianza (ML)

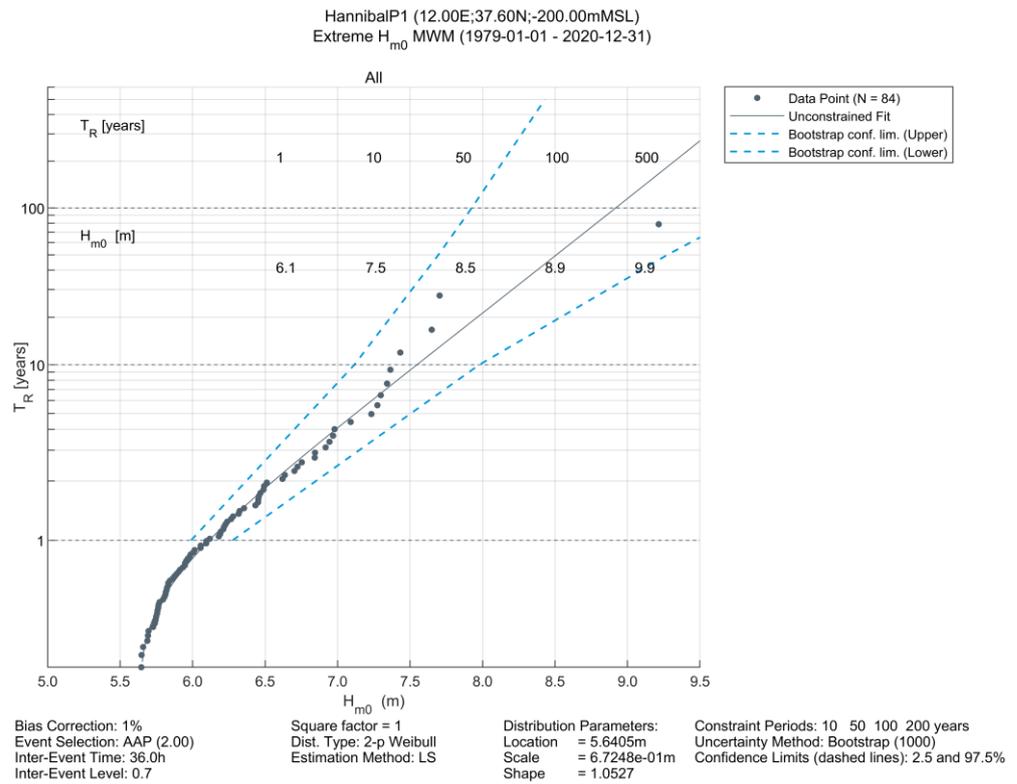


Figura 5.12 $H_{m0,3h}$ estrema omnidirezionale secondo una distribuzione Weibull a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e con un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono riportati con una linea blu tratteggiata

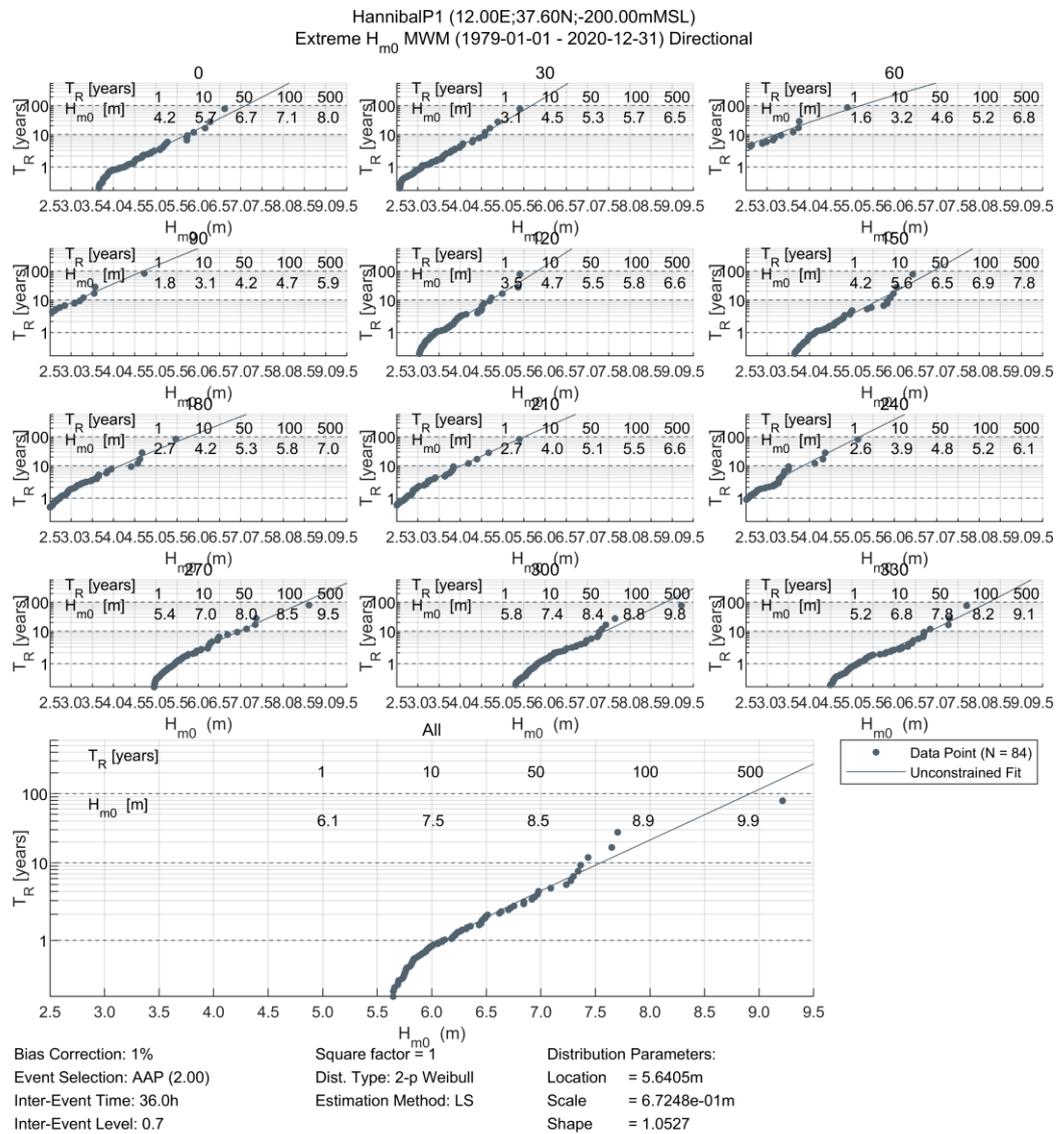


Figura 5.13 $H_{m0,3h}$ estrema omnidirezionale e direzionale marginale secondo una distribuzione di Weibull a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annuali (AAP) e con un metodo di adattamento ai minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e 97.5% sono mostrati con una linea blu tratteggiata

Tabella 5.15 Altezze d'onda significativa estreme annuali $H_{m0,3hr}$ omnidirezionali e direzionali marginali

		$H_{m0,3h}$ [m]				
T_R [years]		1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		6.1	7.5	8.5	8.9	9.9
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	4.2	5.7	6.7	7.1	8.0
	30	3.1	4.5	5.3	5.7	6.5
	60	1.6	3.2	4.6	5.2	6.8
	90	1.8	3.1	4.2	4.7	5.8
	120	3.5	4.7	5.5	5.8	6.6
	150	4.2	5.6	6.5	6.9	7.8
	180	2.7	4.2	5.3	5.8	7.0
	210	2.7	4.0	5.1	5.5	6.6
	240	2.6	3.9	4.8	5.2	6.1
	270	5.4	7.0	8.0	8.5	9.6
	300	5.8	7.4	8.4	8.8	9.8
	330	5.2	6.8	7.8	8.2	9.1

Tabella 5.16 Altezze d'onda significativa estreme annuali $H_{m0,3hr}$ omnidirezionali e direzionali scalate: lo scalaggio è effettuato secondo la Sezione 3.6.5.6 of [1]

		Scaled directional extremes				
		$H_{m0,3h}$ [m]				
T_R [years]		1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		6.1	7.5	8.5	8.9	9.9
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	5.4	6.8	7.7	8.1	9.0
	30	4.2	5.4	6.2	6.5	7.3
	60	2.8	4.7	6.3	7.0	8.7
	90	2.8	4.3	5.5	6.0	7.1
	120	4.5	5.6	6.3	6.6	7.3
	150	5.3	6.6	7.5	7.9	8.7
	180	3.8	5.4	6.6	7.1	8.4
	210	3.7	5.2	6.2	6.7	7.8
	240	3.6	4.9	5.8	6.2	7.2
	270	6.1	7.5	8.5	8.9	9.9
	300	6.1	7.5	8.5	8.9	9.9
	330	6.1	7.5	8.5	8.9	9.9

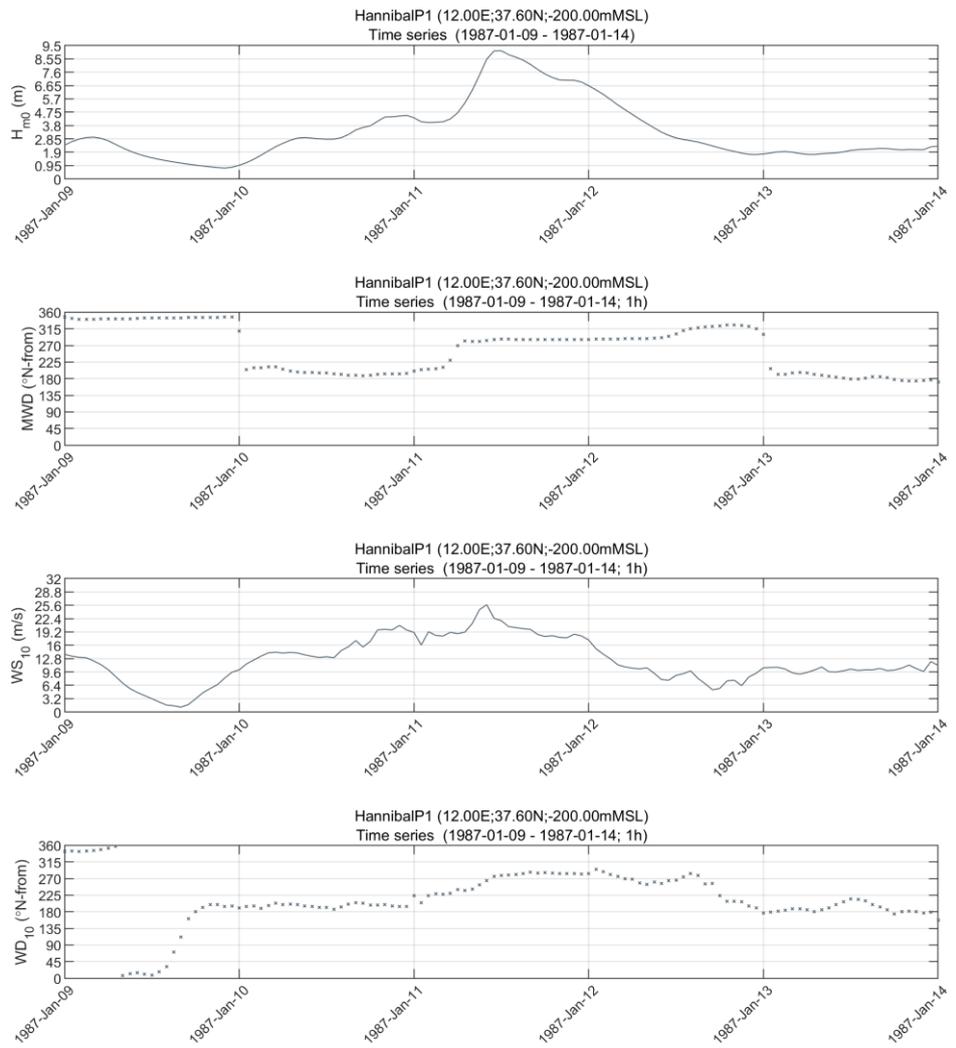


Figura 5.14: Valori *hindcast* dell'altezza d'onda significativa (H_{m0}), direzione media dell'onda (MWD), velocità del vento (WS_{10}) e direzione del vento (WD_{10}) durante la tempesta dell'11 gennaio 1987 nel Punto P1.

5.4.1 Periodi d'onda associati

Gli intervalli del periodo d'onda associati all'altezza d'onda significativa estrema sono stati determinati per il periodo di picco dell'onda (T_p), periodo d'onda spettrale equivalente of mean zero-crossing (T_{02}) e sono riportate nella Tabella 5.17.

La Figura 5.15 mostra lo *scatter plot* di H_{m0} vs. T_p e H_{m0} vs. T_{02} per le condizioni dello stato del mare omnidirezionali totali nel punto della griglia del modello analizzato. Esiste una relazione molto chiara tra l'altezza d'onda significative e il periodo d'onda, che suggerisce una dominanza delle onde generate dal vento per le condizioni estreme. Una funzione di potenza ai minimi quadrati è stata adattata ai quantili del 5, 50 e 95% per le onde più grandi. Gli adattamenti risultanti sono stati utilizzati per stimare l'intervallo di valori di T_p e T_{02} associati alle altezze d'onda significativa estreme omnidirezionali.

Lo stesso approccio è stato adottato per determinare i periodi d'onda associati alle altezze d'onda significativa estreme direzionali. L'analisi di regressione si è basata su quattro set direzionali (basati sulla MWD):

- Settore 1: settori direzionali centrati da 30°N a 90°N
- Settore 2: settori direzionali centrati da 120°N a 180°N
- Settore 3: settori direzionali centrati da 210°N a 270°N
- Settore 4: settori direzionali centrati da 300°N a 0°N

La Tabella 5.17 e la Tabella 5.18 riassumono l'intervallo del periodo d'onda (T_p e T_{02}) associato alle altezze d'onda significativa estreme omnidirezionali e direzionali marginali (cioè le altezze d'onda dalla Tabella 5.13).

Tabella 5.19 e la Tabella 5.20 riassumono l'intervallo del periodo d'onda (T_p e T_{02}) associato alle altezze d'onda significativa estreme omnidirezionali e i valori direzionali caratteristici (cioè le altezze d'onda scalate secondo la Sezione 3.6.5.6 di [23] dalla Tabella 5.14).

Tabella 5.17 Intervallo dei periodi di picco (T_p) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (da Tabella 5.13)

T_p [s]		T_R [years]														
T_R [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
OMNIDIRECTIONAL		10.4	11.1	12.2	11.4	12.0	13.0	12.1	12.6	13.4	12.3	12.8	13.6	12.9	13.3	14.0
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	8.8	9.6	10.6	10.1	10.8	11.8	10.8	11.5	12.4	11.1	11.7	12.7	11.7	12.3	13.2
	30	7.6	8.6	9.6	9.1	10.0	10.5	9.9	10.7	11.0	10.2	11.0	11.2	10.9	11.6	11.6
	60	5.5	6.6	8.1	7.7	8.7	9.6	9.2	10.1	10.6	9.8	10.6	10.9	11.2	11.9	11.7
	90	5.7	6.8	8.2	7.7	8.6	9.6	8.8	9.7	10.3	9.3	10.2	10.6	10.4	11.1	11.3
	120	7.7	8.5	10.2	8.9	9.7	10.9	9.6	10.3	11.3	9.9	10.6	11.4	10.5	11.1	11.7
	150	8.4	9.2	10.7	9.7	10.4	11.4	10.5	11.1	11.7	10.8	11.4	11.9	11.4	11.9	12.2
	180	6.9	7.7	9.7	8.4	9.2	10.6	9.4	10.1	11.2	9.9	10.5	11.4	10.8	11.4	11.9
	210	7.1	8.2	10.2	8.7	9.7	11.3	9.7	10.6	11.9	10.2	11.0	12.2	11.1	11.8	12.7
	240	6.9	8.1	10.1	8.5	9.5	11.2	9.5	10.4	11.8	9.9	10.7	12.0	10.7	11.4	12.5
	270	10.1	10.9	12.1	11.5	12.0	12.9	12.3	12.7	13.3	12.7	13.0	13.5	13.4	13.6	13.9
300	10.2	10.9	11.9	11.3	11.9	12.9	11.9	12.5	13.5	12.2	12.8	13.7	12.7	13.3	14.2	
330	9.7	10.4	11.4	10.9	11.6	12.5	11.5	12.2	13.1	11.8	12.4	13.3	12.3	12.9	13.8	

Tabella 5.18 Intervallo dei periodi di zero-crossing (T_{02}) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (da Tabella 5.13)

T_{02} [s]		T_R [years]														
T_R [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
OMNIDIRECTIONAL		7.7	8.0	8.4	8.5	8.7	9.0	9.0	9.2	9.3	9.2	9.4	9.5	9.6	9.8	9.8
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	6.5	6.8	7.3	7.5	7.8	8.2	8.0	8.3	8.7	8.2	8.5	8.9	8.7	9.0	9.2
	30	5.5	5.8	6.2	6.6	6.9	7.1	7.1	7.4	7.6	7.3	7.6	7.8	7.8	8.1	8.2
	60	4.0	4.3	4.8	5.6	5.9	6.2	6.6	6.9	7.2	7.0	7.3	7.6	8.0	8.3	8.4
	90	4.2	4.5	4.9	5.5	5.8	6.2	6.3	6.7	6.9	6.7	7.0	7.2	7.4	7.7	7.9
	120	5.7	6.1	7.1	6.6	7.0	7.5	7.0	7.5	7.7	7.2	7.7	7.8	7.6	8.1	8.0
	150	6.2	6.6	7.3	7.1	7.6	7.8	7.6	8.1	8.0	7.8	8.3	8.1	8.2	8.7	8.3
	180	5.1	5.5	6.7	6.2	6.6	7.3	6.9	7.3	7.7	7.2	7.7	7.8	7.9	8.3	8.1
	210	5.2	5.6	6.5	6.3	6.7	7.4	7.1	7.4	8.0	7.4	7.7	8.2	8.1	8.4	8.7
	240	5.1	5.5	6.4	6.2	6.6	7.3	6.9	7.3	7.8	7.2	7.5	8.1	7.8	8.1	8.5
	270	7.3	7.7	8.2	8.3	8.6	8.8	8.9	9.1	9.3	9.2	9.3	9.4	9.7	9.8	9.8
300	7.5	7.8	8.2	8.4	8.7	9.0	8.9	9.1	9.4	9.1	9.3	9.6	9.5	9.7	9.9	
330	7.1	7.5	7.9	8.1	8.4	8.7	8.6	8.9	9.2	8.8	9.0	9.3	9.2	9.4	9.7	

Tabella 5.19 Intervallo dei periodi di picco (T_p) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (da Tabella 5.14)

T_p [s]		T_R [years]														
T_R [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
OMNIDIRECTIONAL		10.4	11.1	12.2	11.4	12.0	13.0	12.1	12.6	13.4	12.3	12.8	13.6	12.9	13.3	14.0
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	9.8	10.6	11.6	10.9	11.5	12.5	11.5	12.1	13.1	11.7	12.4	13.3	12.3	12.9	13.8
	30	8.8	9.7	10.3	10.0	10.8	11.0	10.7	11.4	11.4	11.0	11.7	11.6	11.6	12.2	11.9
	60	7.2	8.2	9.3	9.4	10.2	10.7	10.7	11.5	11.5	11.3	12.0	11.8	12.6	13.1	12.5
	90	7.2	8.2	9.3	9.0	9.8	10.4	10.0	10.8	11.1	10.5	11.2	11.3	11.4	12.1	11.9
	120	8.7	9.4	10.8	9.7	10.4	11.3	10.3	10.9	11.7	10.5	11.2	11.8	11.1	11.7	12.0
	150	9.5	10.2	11.2	10.5	11.2	11.8	11.2	11.8	12.1	11.4	12.0	12.2	12.0	12.5	12.5
	180	8.1	8.8	10.4	9.5	10.2	11.3	10.5	11.2	11.8	10.9	11.5	12.0	11.8	12.3	12.4
	210	8.3	9.4	11.1	9.9	10.7	12.0	10.8	11.5	12.6	11.3	11.9	12.8	12.2	12.6	13.3
	240	8.2	9.2	10.9	9.6	10.5	11.8	10.5	11.2	12.3	10.8	11.5	12.6	11.7	12.2	13.0
	270	10.7	11.4	12.5	11.9	12.4	13.1	12.7	13.0	13.5	13.0	13.3	13.7	13.7	13.8	14.0
	300	10.4	11.1	12.1	11.4	12.0	13.0	12.0	12.6	13.5	12.2	12.8	13.7	12.8	13.3	14.2
330	10.4	11.1	12.1	11.4	12.0	13.0	12.0	12.6	13.5	12.2	12.8	13.7	12.8	13.3	14.2	

Tabella 5.20 Intervallo dei periodi of zero-crossing (T_{02}) associati alle altezze d'onda significativa estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (da Tabella 5.14)

T_{02} [s]		T_R [years]														
T_R [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
OMNIDIRECTIONAL		7.7	8.0	8.4	8.5	8.7	9.0	9.0	9.2	9.3	9.2	9.4	9.5	9.6	9.8	9.8
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	7.3	7.6	8.0	8.1	8.4	8.7	8.6	8.8	9.1	8.7	9.0	9.3	9.2	9.4	9.6
	30	6.3	6.7	6.9	7.2	7.5	7.7	7.7	8.0	8.1	7.9	8.1	8.3	8.3	8.6	8.6
	60	5.2	5.5	5.9	6.7	7.0	7.3	7.7	8.0	8.1	8.1	8.4	8.5	9.0	9.3	9.2
	90	5.2	5.6	5.9	6.4	6.8	7.0	7.2	7.5	7.7	7.5	7.8	8.0	8.2	8.5	8.5
	120	6.4	6.8	7.4	7.1	7.5	7.7	7.5	8.0	7.9	7.7	8.1	8.0	8.0	8.5	8.2
	150	6.9	7.4	7.7	7.7	8.1	8.0	8.1	8.6	8.2	8.3	8.8	8.3	8.7	9.2	8.4
	180	5.9	6.3	7.2	7.0	7.4	7.7	7.7	8.1	8.0	7.9	8.4	8.1	8.6	9.1	8.4
	210	6.1	6.5	7.2	7.2	7.5	8.0	7.9	8.2	8.5	8.2	8.4	8.8	8.8	9.0	9.2
	240	6.0	6.4	7.1	7.0	7.3	7.9	7.6	7.9	8.4	7.9	8.2	8.5	8.4	8.7	8.9
	270	7.8	8.1	8.5	8.6	8.9	9.1	9.2	9.4	9.4	9.4	9.6	9.6	9.9	10.0	9.9
	300	7.7	8.0	8.4	8.5	8.7	9.0	8.9	9.2	9.4	9.1	9.4	9.6	9.6	9.8	10.0
330	7.7	8.0	8.4	8.5	8.7	9.0	8.9	9.2	9.4	9.1	9.4	9.6	9.6	9.8	10.0	

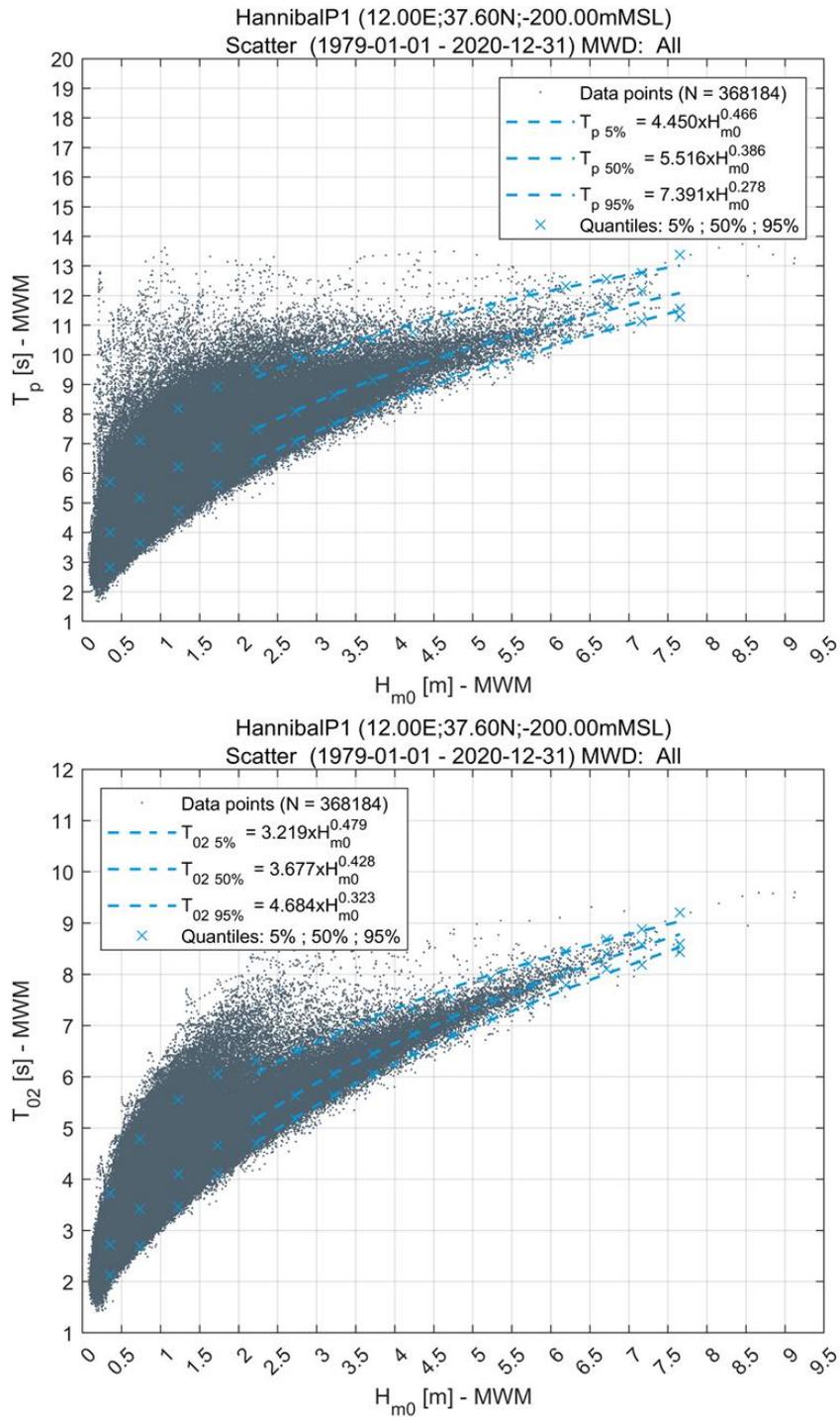


Figura 5.15 Scatter plot di H_{m0} vs. T_p (sopra) e H_{m0} vs. T_{02} (sotto), e curve di correlazione utilizzate per condizioni omnidirezionali

5.4.2 Altezze d'onda massima

L'altezza massima dell'onda individuale $H_{max,3h}$ è stata stimata utilizzando il metodo della convoluzione di Tromans and Vanderschuren [15] e basato sulla distribuzione dell'altezza delle onde a breve termine di Forristall [16]. Maggiori dettagli sulla metodologia sono riportati nell'Appendice B.

I valori estremi sono stati stimati utilizzando lo stesso metodo applicato per derivare i valori estremi di $H_{m0,3h}$ (distribuzione di Weibull a 2 parametri adattata a due eventi annuali e con best-fitting ai minimi quadrati). La Figura 5.16 mostra la distribuzione omnidirezionale, mentre le distribuzioni direzionali marginali sono riportate in Figura 5.17 che riassume l'altezza d'onda individuale annuale/omnidirezionale e direzionale marginale ottenuta e rappresentativa per il sito. Confrontando i risultati dell'altezza d'onda significativa estrema riportate nel paragrafo precedente, i rapporti tra i valori omnidirezionali estremi $H_{max,}/H_{m0}$ sono compresi tra 1.7-1.9, con un valore medio di ~1.85 considerando tutti i periodi di ritorno.

I periodi d'onda associati alle altezze massime d'onda sono derivati applicando la seguente relazione ottenuta in occasione di progetti passati e solitamente adottata nell'area del Canale di Sicilia e sono riportati in Tabella 5.23 e Tabella 5.24.

$$T_{Hmax} = 1.28 * T_{m02}$$

Solo per il caso omnidirezionale e per gli estremi marginali, la tabella seguente fornisce le stime superiori e inferiori, come raccomandato da DNV (vedere Sezione 3.7.4 di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), che afferma che il periodo d'onda T_{Hmax} da utilizzare in combinazione con l'altezza d'onda individuale estrema a lungo termine H_{max} , per un periodo di ritorno di 100 anni, dovrebbe essere variato nel range:

$$2.55\sqrt{H_{max,100}} < T_{Hmax,100} < 3.32\sqrt{H_{max,100}}$$

Questi sono dati come limiti inferiori e superiori DNV in tabella. I valori di stima centrale previsti per T_{Hmax} risultano essere all'interno del range raccomandato da DNV, è questo è verificato per ciascuno dei 12 settori direzionali considerati.

T_{Hmax} [s]	T_R [years]				
	1	10	50	100	500
Lower DNV	8.5	9.5	10.1	10.4	10.9
Lower (5%)	9.9	10.2	10.8	10.9	11.1
Cental (50%)	10.2	10.8	10.9	11.1	11.5
Upper (95%)	10.8	10.9	11.1	11.5	11.5
Upper DNV	11.1	12.4	13.2	13.5	14.2

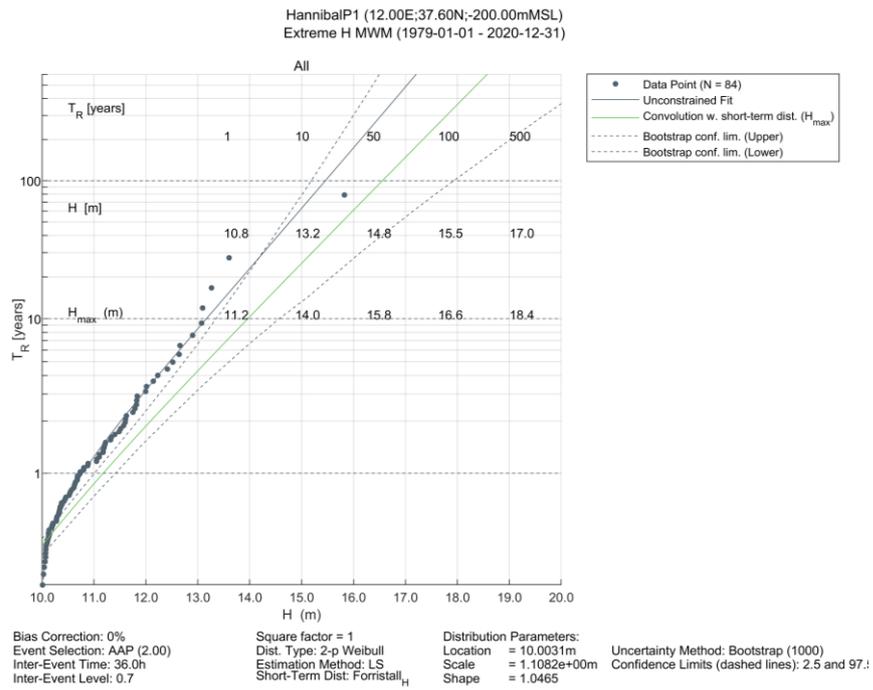


Figura 5.16 H_{max} estrema omnidirezionale secondo una distribuzione di Weibull a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e un metodo di adattamento dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e del 97.5% sono mostrati con una linea tratteggiata

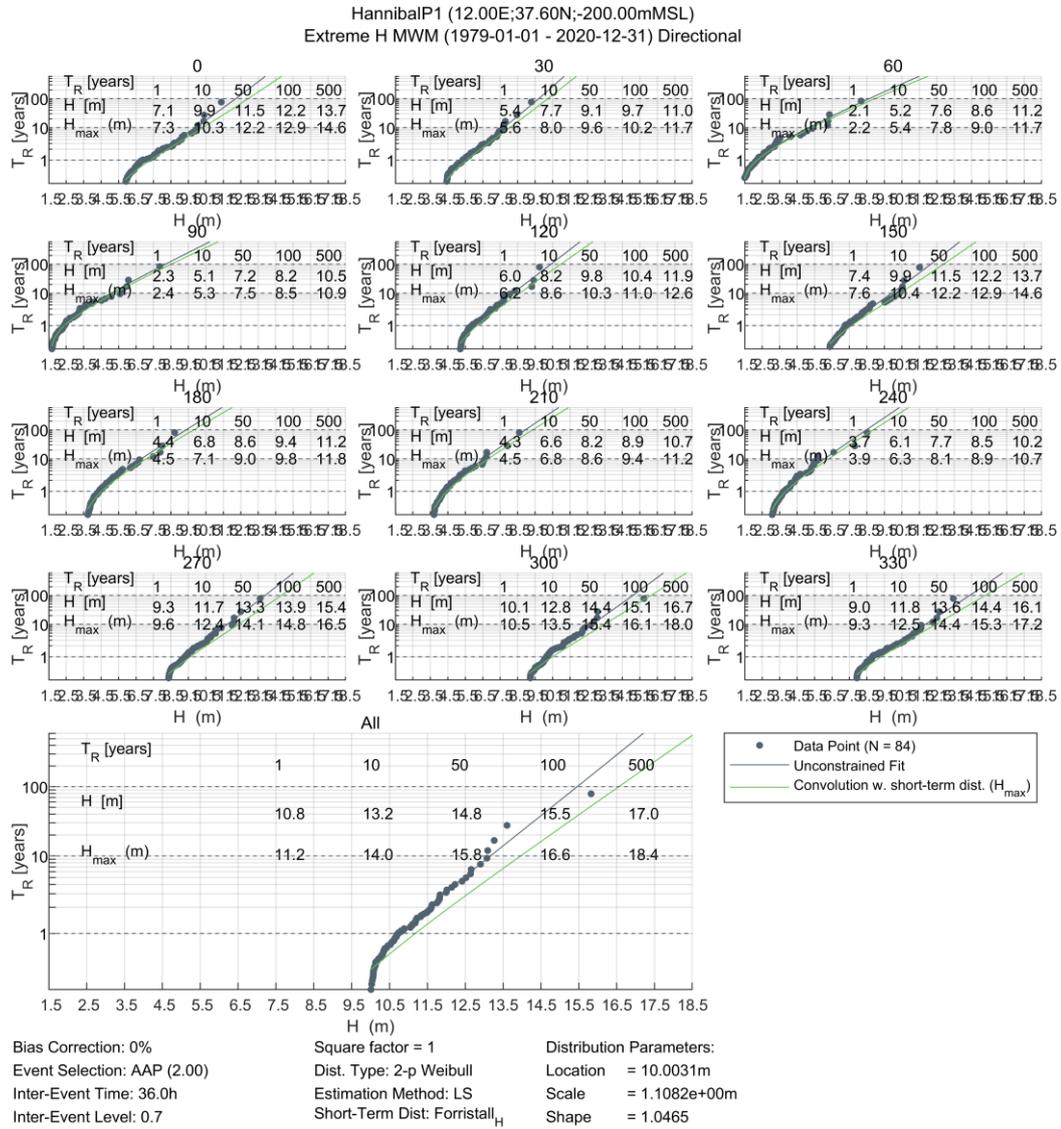


Figura 5.17 Distribuzioni estreme direzionali marginali di H_{max} secondo una distribuzione di Weibull a 2 parametri adattata a 2 picchi medi annui (AAP) e con un metodo di adattamento dei minimi quadrati. I limiti di confidenza del 2.5% e del 97.5% sono mostrati con una linea tratteggiata

Tabella 5.21 Altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali ($H_{max,3h}$)

		H_{max} [m]				
T_R [years]		1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		11.2	14.0	15.8	16.6	18.4
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	7.3	10.3	12.2	12.9	14.6
	30	5.6	8.0	9.6	10.2	11.7
	60	2.2	5.4	7.8	9.0	11.7
	90	2.4	5.3	7.5	8.5	10.9
	120	6.2	8.6	10.3	11.0	12.6
	150	7.6	10.4	12.2	12.9	14.6
	180	4.5	7.1	9.0	9.8	11.8
	210	4.5	6.8	8.6	9.4	11.2
	240	3.9	6.3	8.1	8.9	10.7
	270	9.6	12.4	14.1	14.8	16.5
	300	10.5	13.5	15.4	16.1	18.0
330	9.3	12.5	14.4	15.3	17.2	

Tabella 5.22 Altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate ($H_{max,3h}$): l'insieme dei valori direzionali scalati è stato calcolato secondo la Sezione 3.6.5.6 del [1]

		Scaled directional extremes				
		H_{max} [m]				
T_R [years]		1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL		11.2	14.0	15.8	16.6	18.4
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	9.7	12.4	14.1	14.8	16.5
	30	7.5	9.8	11.2	11.9	13.3
	60	4.6	8.1	10.8	12.0	14.9
	90	4.6	7.8	10.2	11.2	13.7
	120	8.1	10.5	12.1	12.8	14.5
	150	9.8	12.3	14.0	14.8	16.4
	180	6.5	9.2	11.2	12.0	14.0
	210	6.3	8.8	10.6	11.4	13.3
	240	5.8	8.3	10.1	10.9	12.8
	270	11.2	14.0	15.8	16.6	18.4
	300	11.2	14.0	15.8	16.6	18.4
330	11.2	14.0	15.8	16.6	18.4	

Tabella 5.23 Periodo d'onda (T_{Hmax}) associato ai valori delle altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali marginali (H_{max} dalla Tabella 5.21)

T_{Hmax} [s]		T_R [years]														
T_R [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
OMNIDIRECTIONAL		9.9	10.2	10.8	10.9	11.1	11.5	11.5	11.8	11.9	11.8	12.0	12.2	12.3	12.5	12.5
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	8.3	8.7	9.3	9.6	10.0	10.5	10.2	10.6	11.1	10.5	10.9	11.4	11.1	11.5	11.8
	30	7.0	7.4	7.9	8.4	8.8	9.1	9.1	9.5	9.7	9.3	9.7	10.0	10.0	10.4	10.5
	60	5.1	5.5	6.1	7.2	7.6	7.9	8.4	8.8	9.2	9.0	9.3	9.7	10.2	10.6	10.8
	90	5.4	5.8	6.3	7.0	7.4	7.9	8.1	8.6	8.8	8.6	9.0	9.2	9.5	9.9	10.1
	120	7.3	7.8	9.1	8.4	9.0	9.6	9.0	9.6	9.9	9.2	9.9	10.0	9.7	10.4	10.2
	150	7.9	8.4	9.3	9.1	9.7	10.0	9.7	10.4	10.2	10.0	10.6	10.4	10.5	11.1	10.6
	180	6.5	7.0	8.6	7.9	8.4	9.3	8.8	9.3	9.9	9.2	9.9	10.0	10.1	10.6	10.4
	210	6.7	7.2	8.3	8.1	8.6	9.5	9.1	9.5	10.2	9.5	9.9	10.5	10.4	10.8	11.1
	240	6.5	7.0	8.2	7.9	8.4	9.3	8.8	9.3	10.0	9.2	9.6	10.4	10.0	10.4	10.9
	270	9.3	9.9	10.5	10.6	11.0	11.3	11.4	11.6	11.9	11.8	11.9	12.0	12.4	12.5	12.5
300	9.6	10.0	10.5	10.8	11.1	11.5	11.4	11.6	12.0	11.6	11.9	12.3	12.2	12.4	12.7	
330	9.1	9.6	10.1	10.4	10.8	11.1	11.0	11.4	11.8	11.3	11.5	11.9	11.8	12.0	12.4	

Tabella 5.24 Periodo d'onda (T_{Hmax}) associato ai valori delle altezze d'onda massime estreme annuali omnidirezionali e direzionali scalate (H_{max} dalla Tabella 5.22)

T_{Hmax} [s]		T_R [years]														
T_R [years]		1			10			50			100			500		
Percentile [%]		5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95	5	50	95
OMNIDIRECTIONAL		9.9	10.2	10.8	10.9	11.1	11.5	11.5	11.8	11.9	11.8	12.0	12.2	12.3	12.5	12.5
Wave Incoming Direction [°N coming from]	0	9.3	9.7	10.2	10.4	10.8	11.1	11.0	11.3	11.6	11.1	11.5	11.9	11.8	12.0	12.3
	30	8.1	8.6	8.8	9.2	9.6	9.9	9.9	10.2	10.4	10.1	10.4	10.6	10.6	11.0	11.0
	60	6.7	7.0	7.6	8.6	9.0	9.3	9.9	10.2	10.4	10.4	10.8	10.9	11.5	11.9	11.8
	90	6.7	7.2	7.6	8.2	8.7	9.0	9.2	9.6	9.9	9.6	10.0	10.2	10.5	10.9	10.9
	120	8.2	8.7	9.5	9.1	9.6	9.9	9.6	10.2	10.1	9.9	10.4	10.2	10.2	10.9	10.5
	150	8.8	9.5	9.9	9.9	10.4	10.2	10.4	11.0	10.5	10.6	11.3	10.6	11.1	11.8	10.8
	180	7.6	8.1	9.2	9.0	9.5	9.9	9.9	10.4	10.2	10.1	10.8	10.4	11.0	11.6	10.8
	210	7.8	8.3	9.2	9.2	9.6	10.2	10.1	10.5	10.9	10.5	10.8	11.3	11.3	11.5	11.8
	240	7.7	8.2	9.1	9.0	9.3	10.1	9.7	10.1	10.8	10.1	10.5	10.9	10.8	11.1	11.4
	270	10.0	10.4	10.9	11.0	11.4	11.6	11.8	12.0	12.0	12.0	12.3	12.3	12.7	12.8	12.7
300	9.9	10.2	10.8	10.9	11.1	11.5	11.4	11.8	12.0	11.6	12.0	12.3	12.3	12.5	12.8	
330	9.9	10.2	10.8	10.9	11.1	11.5	11.4	11.8	12.0	11.6	12.0	12.3	12.3	12.5	12.8	

5.4.3 Elevazione della cresta d'onda

Per ogni stato del mare, l'elevazione massima della cresta dell'onda, C_{max} , è stata stimata usando il metodo di convoluzione di Tromans e Vanderschuren [15]. Si è ipotizzato che le elevazioni delle singole creste d'onda seguissero la distribuzione proposta da Forristall [17]. Ulteriori informazioni tecniche sono contenute nell'Appendice B. le elevazioni massime della cresta dell'onda sono state calcolate relative al livello del mare calmo, $C_{max,SWL}$.

La stessa distribuzione a lungo termine usata per valutare l'altezza d'onda significativa estrema è stata applicata per stimare le altezze d'onda individuali massime estreme omnidirezionali e direzionali, ovvero con una distribuzione di Weibull a 2 parametri adattata a una media di 2 picchi all'anno ($\lambda = 2$), con il metodo di adattamento LS.

Le distribuzioni risultanti per $C_{max,SWL}$ sono mostrate in Figura 5.18, e i valori estremi stimati per i periodi di ritorno richiesti sono riassunti in Tabella 5.25.

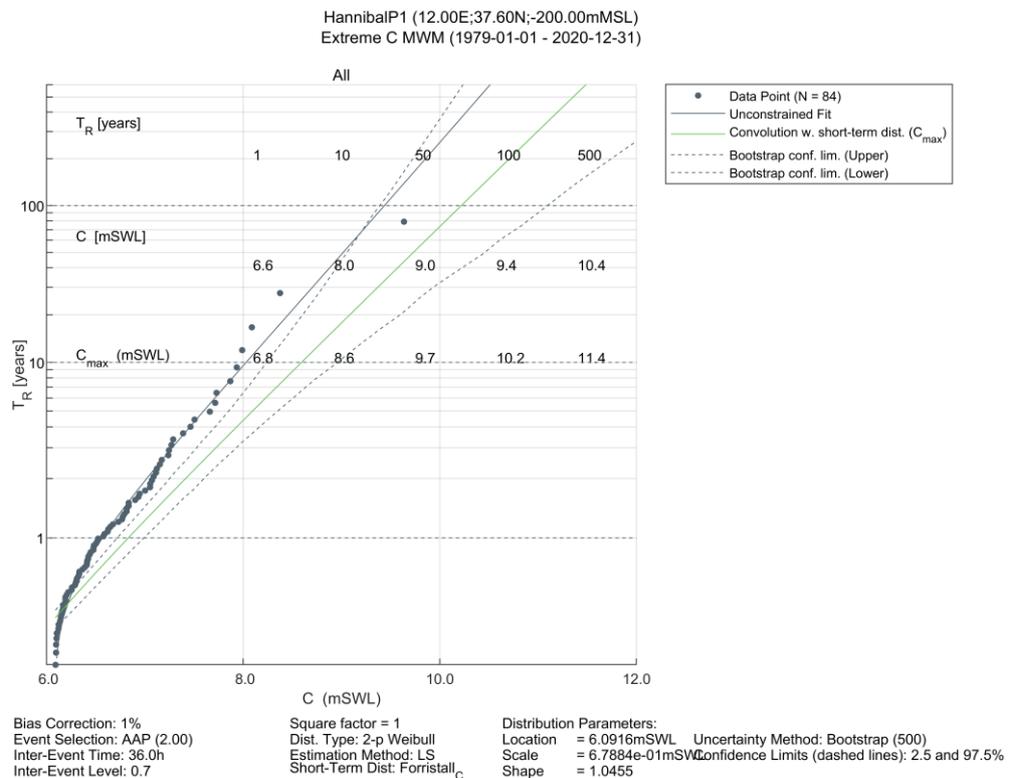


Figura 5.18: Elevazioni delle creste d'onda omnidirezionali estreme nel *Punto P1*

Tabella 5.25: Elevazioni delle creste d'onda omnidirezionali estreme nel *Punto P1* relative al SWL

T_R [years]	C_{max} [m]				
	1	10	50	100	500
OMNIDIRECTIONAL	6.8	8.6	9.7	10.2	11.4

6 Temperatura e salinità dell'acqua di mare

6.1 Temperatura dell'acqua di mare

I profili mensili della temperatura lungo la colonna d'acqua sono stati stimati dai dati *hindcast* del CMEMS per il periodo 1987-2019, come descritto nel Capitolo 2, con una risoluzione temporale di 24 ore. I profili medi giornalieri della temperatura e della salinità sono stati estratti, relativi al *Punto P1* (vedere Tabella 4.1).

Le statistiche annuali e mensili delle temperature giornaliere sono fornite in Tabella 6.1 e in Figura 6.1 per tre livelli della colonna d'acqua: in superficie, a metà colonna e sul fondo del mare. I dati mostrano che la colonna d'acqua è ben miscelata durante i mesi invernali, mentre, da maggio a novembre, si sviluppa una chiara stratificazione. Le temperature più elevate dell'acqua in superficie si registrano nel periodo luglio-agosto, mentre i valori da metà colonna al fondale marino rimangono pressoché stabili durante tutto l'anno.

Le suddette variazioni mensili sono chiaramente visibili nei profili medi mensili mostrati in Figura 6.2 e Figura 6.3. Da maggio a novembre la colonna d'acqua è caratterizzata da una stratificazione piuttosto forte, confermando la presenza dell'*Atlantic Water* (AW) e, per profondità maggiori di ~200 m, della *Levantine Intermediate Water* (LIW) caratterizzata da valori diversi e piuttosto stabili di temperatura e salinità.

Tabella 6.1 Statistiche annuali e mensili delle temperature dell'acqua marina giornaliere estratte in superficie, a metà Colonna d'acqua e a livello del fondale marino nel periodi 1987-2019 nel *Punto P1*

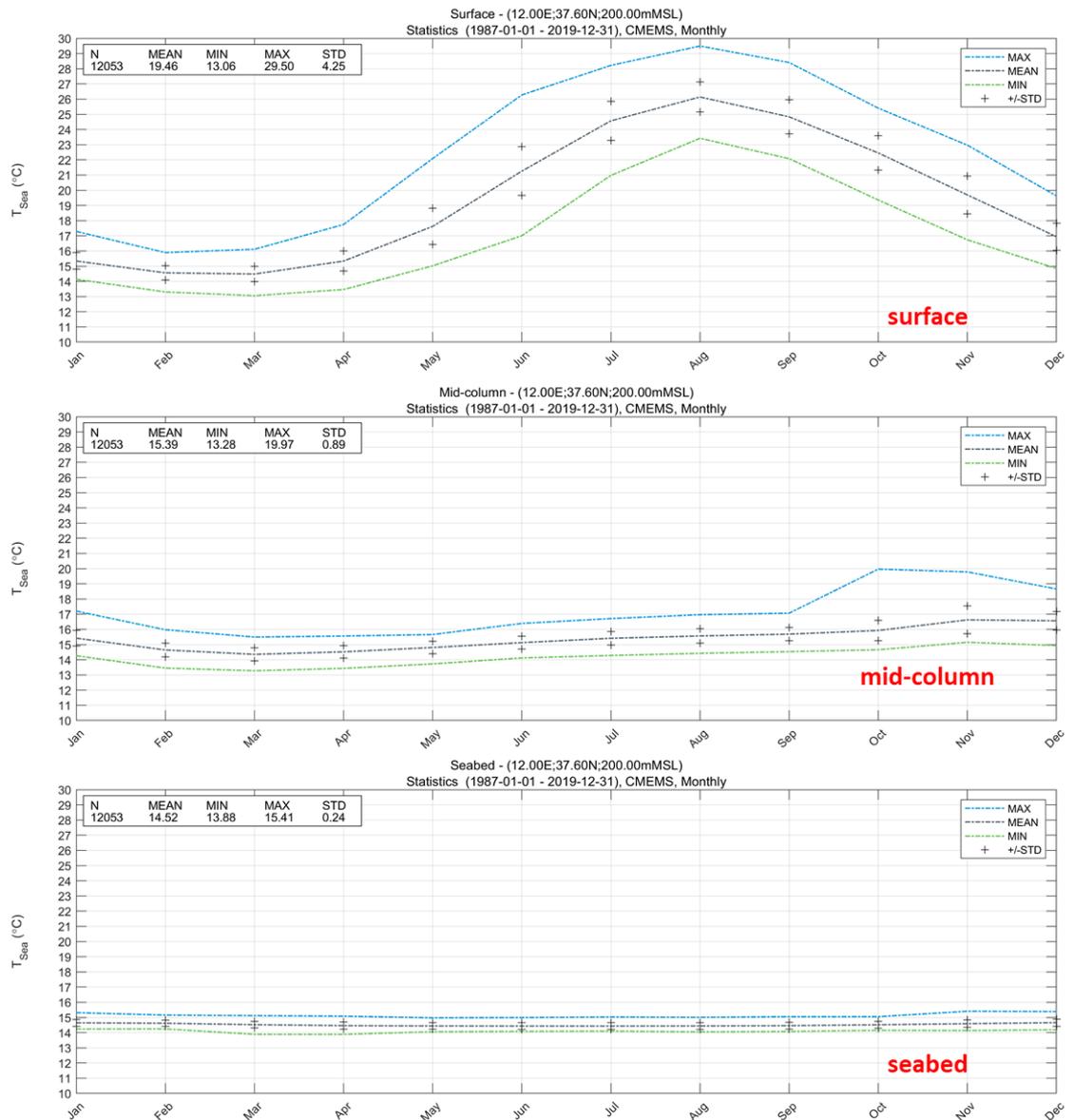


Figura 6.1 Statistiche annuali e mensili della temperature giornaliera dell'acqua di mare (1993-2018) alla superficie (in alto), a metà colonna (al centro) e sul fondale (in basso).

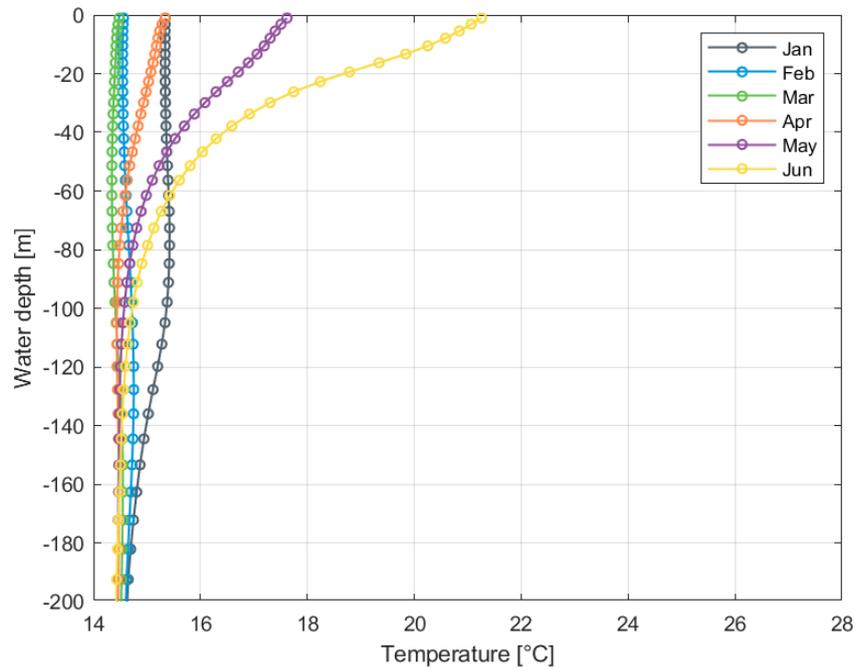


Figura 6.2 Temperatura media mensile dell'acqua di mare (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da gennaio a giugno)

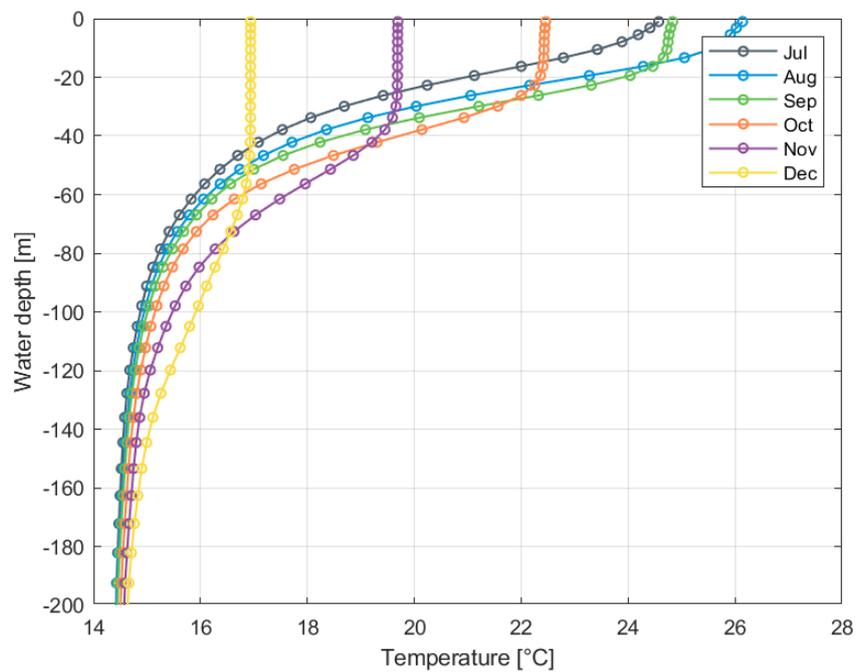


Figura 6.3 Temperatura media mensile dell'acqua di mare (dati CMEMS 1987-2019, da luglio a dicembre).

6.2 Salinit  dell'acqua di mare

I profili di salinit  mensili lungo la colonna d'acqua sono stati valutati dai dati *hindcast* CMEMS per il periodo 1987-2019, come descritto nel Capitolo 2, con una risoluzione temporale di 24 ore. I profili di salinit  giornalieri sono stati estratti per il *Punto P1* (vedere Tabella 4.1).

Le statistiche annuali e mensili della salinit  giornaliera sono fornite nella Tabella 6.2 e in Figura 6.4 a tre livelli della colonna d'acqua: in superficie, a met  colonna e al livello del fondale marino. I dati mostrano valori pi  alti e stabili negli strati pi  profondi, dovuti alla presenza della *Levantine Intermediate Water* (LIW). I profili medi mensili sono mostrati in Figura 6.5 e in Figura 6.6. I valori minimi di salinit  si verificano da maggio a settembre nell'intervallo 30-50 m sotto la superficie, mostrando una stratificazione piuttosto forte.

La presenza di determinate masse d'acqua sar  discussa in questo paragrafo analizzando i diagrammi T-S ottenuti dai profili CMEMS estratti nel *Punto P1*. La Figura 6.7 mostra, nella parte in alto, il diagramma T-S per tutti i dati, mentre la media mensile   riportata da gennaio a giugno (nella parte in basso a sinistra) e da luglio a dicembre (nella parte in basso a destra). Come previsto, i diagrammi evidenziano la presenza della massa d'acqua superficiale di origine atlantica (MAW) identificabile da salinit  minima e a un livello intermedio di origine levantina (LIW) evidenziata da un livello di salinit  massima assoluto.

Tabella 6.2 Statistiche annuali e mensili della salinit  giornaliera estratta in superficie, a met  colonna e sul fondo nel periodo 1987-2019 nel *Punto P1*

Parameter	Surface			Mid-column			Seabed		
	Mean Salinity [-]	Min Salinity [-]	Max Salinity [-]	Mean Salinity [-]	Min Salinity [-]	Max Salinity [-]	Mean Salinity [-]	Min Salinity [-]	Max Salinity [-]
All	37.4	36.7	38.4	37.5	36.9	38.3	38.6	37.9	38.9
Jan	37.4	36.8	37.9	37.5	37.0	37.9	38.6	38.2	38.8
Feb	37.4	36.8	37.8	37.5	36.9	37.9	38.6	37.9	38.8
Mar	37.4	36.9	37.7	37.5	37.1	38.0	38.6	38.2	38.8
Apr	37.3	36.8	37.7	37.5	37.0	38.3	38.6	38.2	38.8
May	37.3	36.8	37.9	37.5	37.0	38.1	38.6	38.3	38.8
Jun	37.3	36.8	37.9	37.4	37.0	37.9	38.6	38.4	38.8
Jul	37.4	36.8	38.4	37.4	37.1	37.9	38.7	38.5	38.8
Aug	37.5	37.0	38.1	37.5	37.2	38.0	38.7	38.5	38.8
Sep	37.6	37.0	38.2	37.5	37.2	38.3	38.7	38.4	38.8
Oct	37.6	37.0	38.1	37.6	37.1	38.1	38.7	38.5	38.8
Nov	37.5	36.9	38.0	37.6	37.1	38.0	38.6	38.4	38.9
Dec	37.4	36.7	38.0	37.6	37.0	38.0	38.6	38.4	38.8

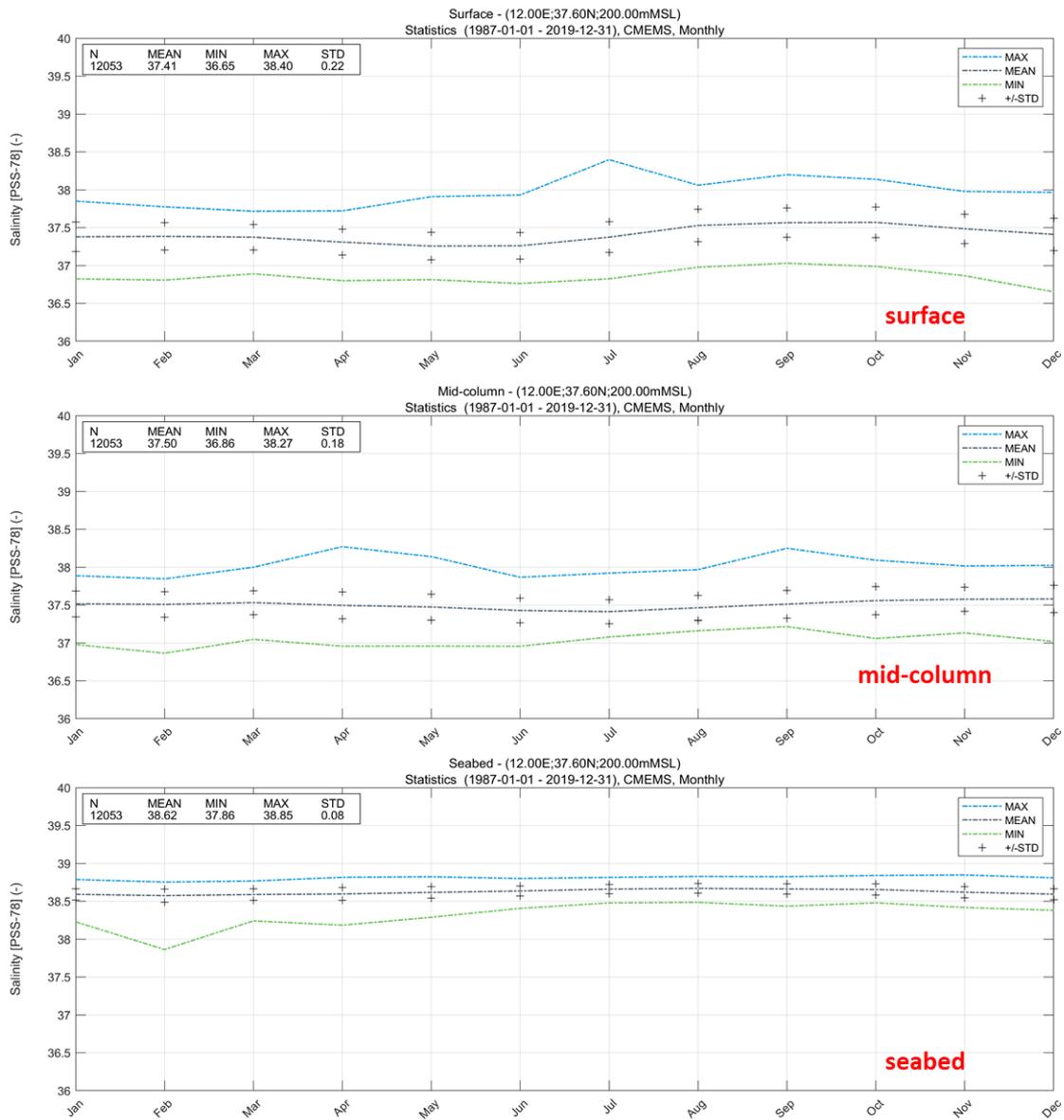


Figura 6.4 Statistiche annuali e mensili della salinità giornaliera (1993-2018) in superficie (in alto), a metà colonna (al centro) e sul fondale marino (in basso).

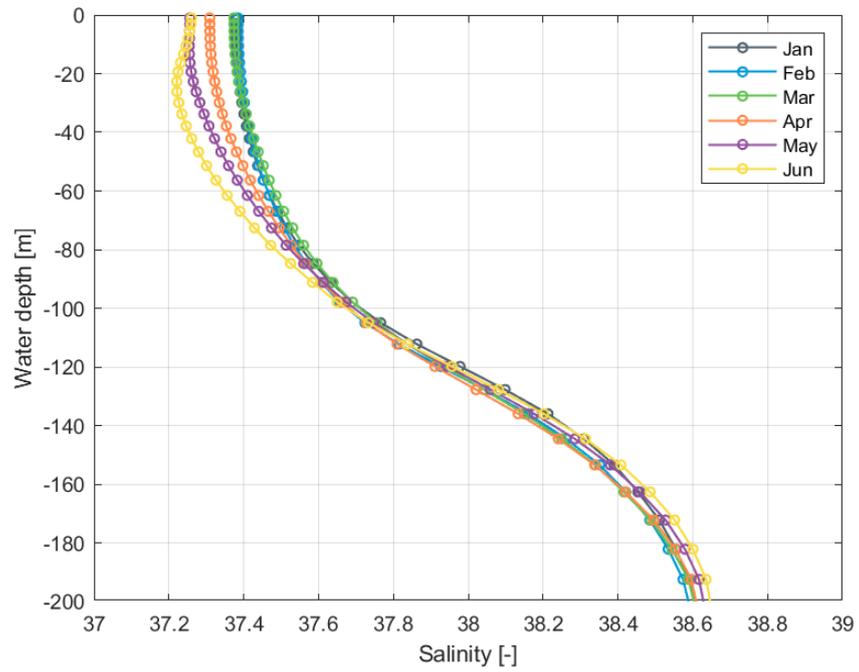


Figura 6.5 Salinità media mensile (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da gennaio a giugno)

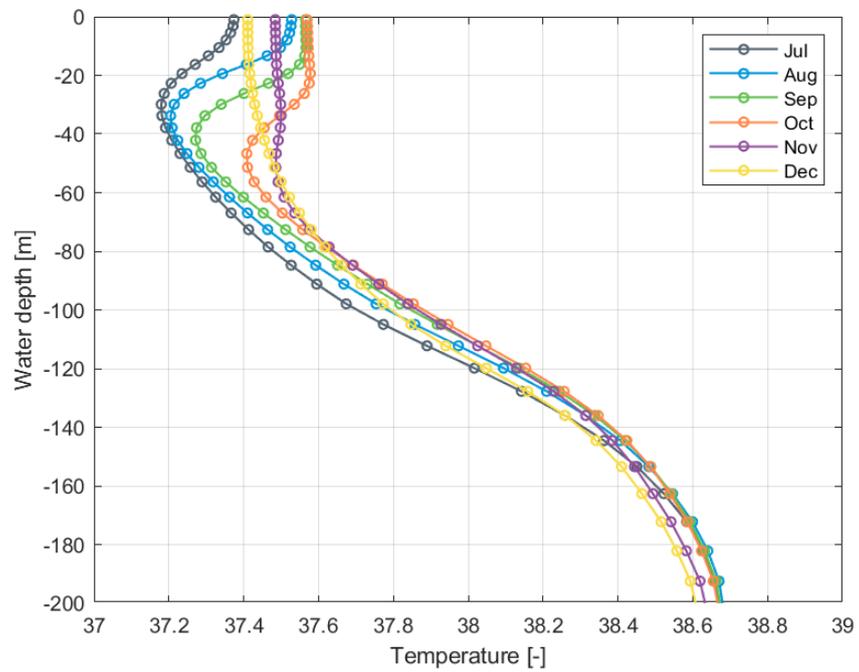


Figura 6.6 Salinità media mensile (dati giornalieri CMEMS 1987-2019, da luglio a dicembre).

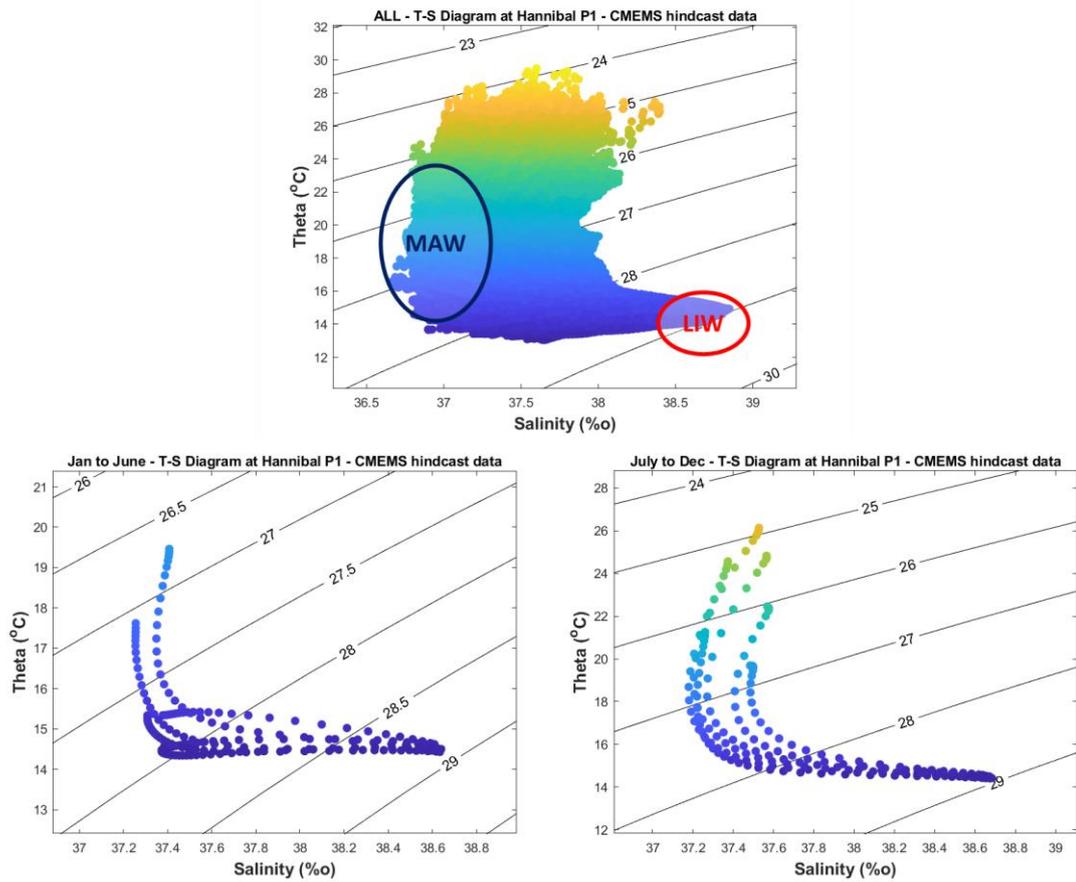


Figura 6.7: Diagramma T-S nel *Punto P1* all'interno dell'area di Progetto, per tutti i dati (in alto), per i dati medi mensili da gennaio a giugno (in basso a sinistra) e da luglio a dicembre (in basso a destra).

7 Medicanes

La regione mediterranea è una delle più attive regioni ciclogenetiche del mondo, con una media climatologica di qualche migliaio di cicloni all'anno. Tra la grande quantità di cicloni sviluppatasi nel bacino, si possono trovare nella storia antica una serie di tempeste di breve durata ma eccezionalmente violente. Solo negli ultimi secoli questi rari eventi sono stati paragonati agli uragani, a causa dei forti venti associati.

7.1 Panoramica generale dei *Medicanes*

I *Medicanes* (*MEDiterranean hurriCANES*) sono sistemi meteorologici su mesoscala che si formano nel bacino del Mediterraneo, dove la baroclinicità fornisce l'instabilità atmosferica necessaria per la formazione di cicloni. Con il progresso delle immagini satellitari, la particolarità di queste tempeste è stata messa in evidenza e, per l'effettiva somiglianza con gli uragani, le tempeste degli ultimi anni sono state chiamate *Medicanes*. Queste tempeste rappresentano un rischio significativo per le aree marine *offshore* e costiere poiché provocano ingenti danni dovuti a eventi estremi di venti, precipitazioni e inondazioni associati alle tempeste.

Dagli anni 80' a oggi sono stati studiate alcune di queste tempeste e le principali caratteristiche meteorologiche possono essere catalogate come un sistema a bassa pressione che, anche se spesso di natura baroclina, può entrare in una nuova fase di sviluppo, spinto dalla convezione e dall'interazione aria-mare piuttosto che dall'instabilità baroclina, assumendo caratteristiche simili a quelle dei vortici tropicali:

- una simmetria verticale quasi perfetta,
- una copertura nuvolosa a forma di spirale con un occhio nel mezzo, corrispondente a una colonna d'aria senza vento sopra il centro della tempesta,
- un nucleo caldo visibile nelle anomalie positive del campo di temperatura.

Il termine "simil-tropicale" è stato introdotto per il fatto che, sebbene condividano caratteristiche simili a quelle dei cicloni tropicali, si sviluppano oltre i tropici (Homar et al., 2003 [31]; Gaertner et al., 2018 [32]). I cicloni simil-tropicali di media latitudine e gli attuali cicloni tropicali mostrano caratteristiche simili ma leggermente differenti. Le maggiori differenze tra i *medicanes* e le tempeste tropicali riguardano l'intensità e la durata (vedere Tabella 7.1):

- La durata dei *medicanes* è ridotta a qualche giorno a causa dell'estensione limitata del Mar Mediterraneo, e raggiungono la loro forma "tropicale" solo per un breve periodo, mentre conservano le caratteristiche non-tropicali per il resto del tempo.
- L'estensione orizzontale è generalmente limitata a qualche centinaio di chilometri
- L'intensità raramente supera la Categoria 1 della scala Saffir-Simpson (Miglietta et al., 2011[33]; Miglietta and Rotunno, 2019 [34]).

Le loro principali somiglianze sono il loro aspetto nelle immagini satellitari e le loro caratteristiche dinamiche e termodinamiche: un nucleo caldo la cui anomalia decresce con l'altitudine, una debole variabilità verticale del vento, una forte rotazione intorno al punto minimo di pressione (alta vorticità di basso livello) e celle convettive organizzate in bande di pioggia che si estendono dal fronte dell'occhio (Pravia-Sarabia et al., 2020 [35]).

Tabella 7.1: Principali differenze tra medicane e tempeste tropicali (da [34] [38])

	Tropical Cyclone	Medicane
Radius [km]	Up to 1000	Up to 150
Min SLP [hPa]	910	980
Vmax [km/h]	295	180

Le caratteristiche principali dei *medicane* e i valori tipici dei loro parametri, derivati dai pochi eventi osservati, possono essere riassunti come segue:

- Un raggio compreso tra 70 e 200 km
- Una durata compresa tra 12 h e 5 giorni
- Una distanza percorsa compresa tra 700 and 3000 km
- Nella maggior parte dei casi si sviluppa un occhio chiaramente definito e visibile fino a 3 giorni. In alcuni casi, l'occhio non compare, mentre in altri si sviluppa due volte (scomparendo quando la tempesta attraverso zone di terra)
- Velocità del vento fino a circa 40 m/s
- Le regioni di genesi più frequenti sono le isole Baleari e il Mar Ionio
- La maggior parte dei *medicane* si verifica in autunno, ma alcuni sono stati rilevati anche in inverno e in primavera.

7.2 Caratteristiche statistiche

I *medicane* sono considerati fenomeni rari a causa del piccolo numero di osservazioni. Un elenco aggiornato di possibili *medicane* rilevati dalle immagini satellitari conta poche decine di eventi in un periodo di 25 anni (1982-2007). Con una frequenza media di uno o due eventi all'anno e data la mancanza di database sistematici e pluridecennali, una valutazione oggettiva dei rischi a lungo termine dei venti indotti dai *medicane* è impossibile con i metodi standard.

Una valutazione sistematica della frequenza e delle proprietà statistiche dei *medicane* è resa ancora più ardua dal fatto che non è semplice tracciare una linea netta di demarcazione tra i *medicane* e i cicloni mediterranei ordinari. Infatti, i *medicane* sono spesso disturbi baroclini nelle prime fasi della loro vita, che subiscono una transizione verso dinamiche di tipo tropicale ogni volta che si presentano diversi fattori ambientali favorevoli.

I metodi di rilevamento e tracciamento utilizzano in genere algoritmi applicati ai dati globali di rianalisi ricostruiti con modelli meteorologici a risoluzione spaziale crescente (*downscaling*). La prima sfida, anche per i più moderni prodotti di rianalisi, è che la risoluzione di *downscaling* deve essere abbastanza alta da comprendere la scala spaziale dei *medicane*, che può essere anche inferiore a cento chilometri (Cavicchia and von Storch, 2012 [40]). Inoltre, i principali algoritmi di rilevamento sono stati ideati per i cicloni tropicali e devono quindi essere adattati al caso dei *medicane*. La letteratura su questo argomento specifico è ampia e quale sia il metodo migliore da essere utilizzato per i *medicane* è ancora una questione aperta. Un metodo di tracciamento indipendente dal tempo sembra essere necessario per rilevare i *medicane* nella realtà e tale approccio consente anche di rilevare tempeste simultanee. Infatti, potrebbe verificarsi la reale coesistenza (nel tempo) di due *medicane* all'interno di un dominio, e la capacità di rilevarne più di uno alla volta potrebbe essere della massima importanza.

Una statistica sperimentale pluridecennale viene realizzata in (Cavicchia et al., 2014 [41]) applicando un algoritmo di rilevamento dei campi atmosferici ridotti ottenuti dalle rianalisi NCEP/NCAR per il periodo 1948-2011 che ha portato all'identificazione di 99 *medicane*. I *pattern* geografici delle genesi e delle traiettorie dei *medicane* rilevati sono mostrati in Figura 7.1. La maggior parte dei *medicane* identificati si forma in due aree specifiche del Mediterraneo:

- **Mediterraneo occidentale**, delimitato approssimativamente dalle isole Baleari e dalla costa spagnola a ovest, dalla Francia meridionale e nord e dalle coste occidentali della Corsica e della Sardegna a est,
- **Mar Ionio**, tra Sicilia e Grecia, che si estende a sud fino alla costa della Libia.

Alter due aree di formazione, caratterizzate da un minor numero di eventi, sono il Mar Egeo e il Mar Adriatico. Si rileva un'attività molto bassa nel bacino levantino nel Mediterraneo orientale.

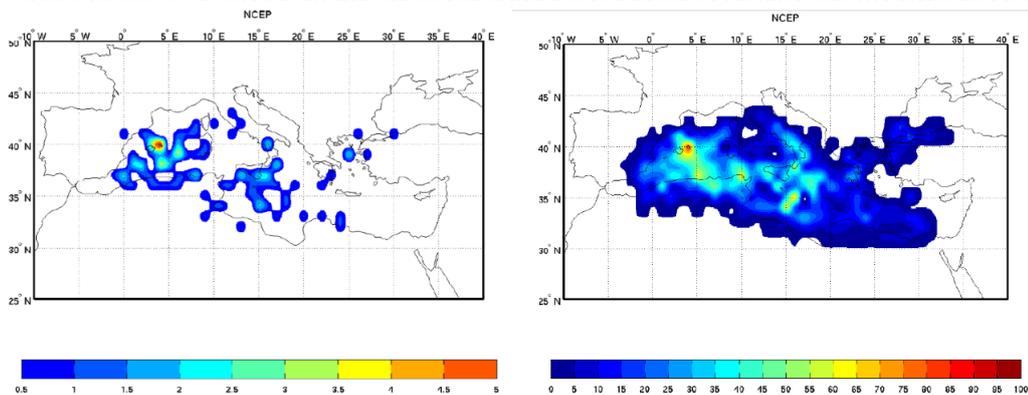


Figura 7.1: Densità di genesi (a sinistra) e densità di passaggio (a destra) da [41]

Il numero di *medicane* al mese (a sinistra) e per stagione (a destra) è riportato in Figura 7.2. La variabilità da un anno all'altro è forte. Il trend complessivo è trascurabile (+0.015 eventi/anno). La distribuzione stagionale dei *medicane* rilevati è caratterizzata da nessun evento in estate, un'elevata attività durante l'intero autunno, un picco a gennaio e una coda che si estende da febbraio fino a maggio. La frequenza di questi fenomeni è quindi estremamente bassa, 1.57 +/- 1.3 eventi a stagione (da agosto fino a luglio dell'anno successivo), coerentemente con l'assunzione empirica dei *medicane* come eventi rari.

C'è una marcata differenza tra le proprietà statistiche de *medicane* nelle due aree dove se ne forma il maggior numero: la frequenza di formazione dei *medicane* nel Mediterraneo occidentale aumenta costantemente durante l'autunno e inizia a decrescere a gennaio, con una lunga coda che si estende durante la primavera. Nell'altro caso, gli eventi nel Mar Ionio mostrano un netto picco a gennaio, con un'attività molto più bassa durante l'autunno e la primavera.

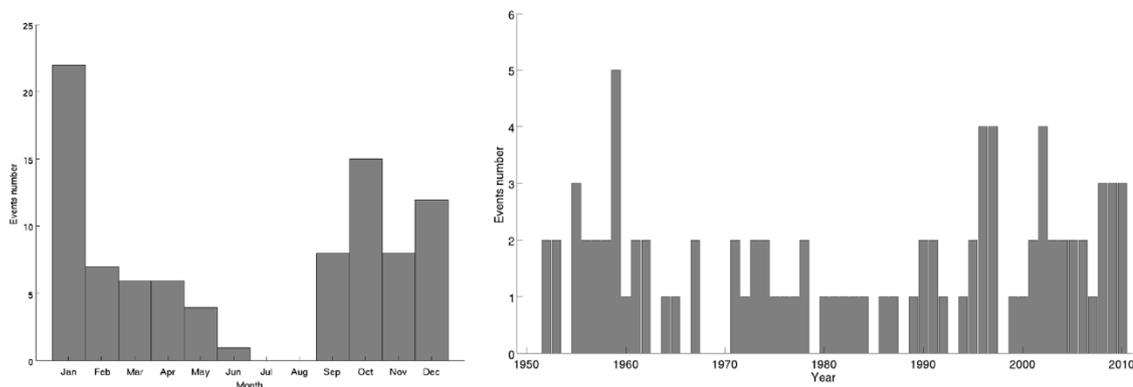


Figura 7.2: Numero di eventi al mese (a sinistra) e per stagione (a destra) (da [41])

7.3 I *medicane* nel clima futuro

L'impatto del cambiamento climatico antropogenico (ACC) sui *medicane* è comunemente investigato attraverso i modelli climatici regionali e le proiezioni risultanti mostrano una

diminuzione del numero di *medicane* nel 21° secolo, accompagnata da un aumento dell'intensità massima del vento (Cavicchia et al., 2014b [42]). Tuttavia, i risultati basati sui modelli climatici regionali sono affetti da importanti limitazioni che potrebbero portare a una rappresentazione non corretta delle caratteristiche dei *medicane* e a sovrastimare la loro intensità. Queste limitazioni sono legate alla mancanza di algoritmi di "coupling" atmosfera-oceano e alla mancanza di un legame interattivo a scale incrociate con quella dei modelli climatici globali.

Il recente lavoro di (González-Alemán et al., 2019 [43]) è il primo studio in cui un modello globale accoppiato a un'alta risoluzione atmosferica orizzontale viene usato per studiare gli effetti dell'ACC su molteplici caratteristiche dei *medicane*. Il modello adottato HiFLOR (*High – Resolution Forecast – Oriented Low Ocean Resolution*) si è dimostrato uno strumento utile nello studio della risposta dei cicloni tropicali all'ACC, in quanto ha una risoluzione orizzontale della griglia (~25 km) che permette di studiare la struttura dei *medicane*, tiene esplicitamente conto delle dinamiche non lineari associate ai sistemi non-tropicali (per esempio leggi di *cutoff* e rottura d'onda) ed è uno dei pochi modelli climatici globali in grado di catturare TC di categoria 4 e 5. Inoltre, essendo un modello accoppiato, include la miscelazione oceanica indotta dal vento e la rappresentazione dello strato misto oceanico.

I ricercatori studiano i rischi collegati ai *medicane* attraverso le seguenti tre simulazioni HiFLOR di 50 anni:

- Una climatologica (**CLIM**), rappresentativa dello stato climatico medio durante gli anni 1986–2005,
- Il futuro prossimo (**EARLY**) con il *Representative Concentration Pathway* (RCP4.5)
- Il futuro lontano (**LATE**) con l'RCP4.5.

È stata trovata una serie di cambiamenti rilevanti nei rischi legati ai *medicane* entro la fine del 21° secolo. Sebbene in numero inferiore, è probabile che i *medicane* diventino più intensi in autunno rispetto alla primavera e all'inverno e che sviluppino nuclei caldi più profondi di maggiore durata, il che significa una struttura tropicale più robusta e, di conseguenza, l'aumento della probabilità di raggiungere l'intensità degli uragani. Le simulazioni prevedono precipitazioni più intense, che sono anche motivo di preoccupazione dati i rischi di alluvione legati a queste tempeste. Inoltre, i *medicane* tendono a cambiare i loro punti preferiti di genesi e passaggio, diventando più comuni nel Mar Ionio e meno comuni nel Mar Mediterraneo occidentale.

Si trovano cambiamenti significative solo nel futuro lontano rispetto al futuro vicino, ciò significa che i *medicane* probabilmente non cambieranno sostanzialmente nei prossimi decenni ma risentiranno significativamente dell'ACC entro la fine del 21° secolo. L'assunzione presente più forte è nello scenario RCP4.5 adottato, che tiene conto degli sforzi considerevoli che dovrebbero essere messi in atto per ridurre le emissioni cumulative di gas serra.

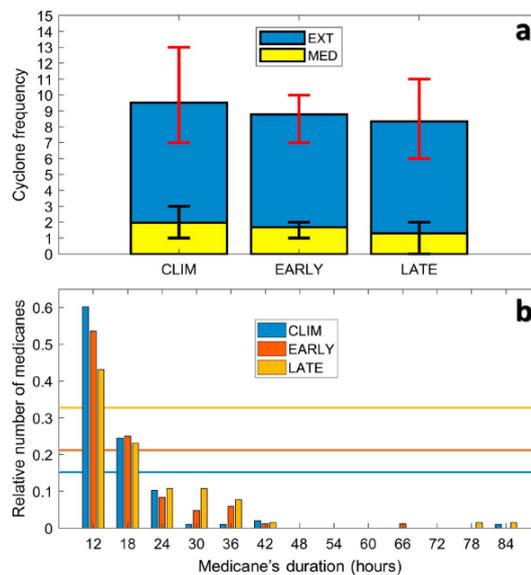


Figura 7.3: (a) Variazioni nella frequenza media annual dei *medicanes* (MED) e dei cicloni non-tropicali (EXT). La barra superiore e quella inferiore indicano rispettivamente il 75° e il 25° percentile. (b) Numero relativo (numero di *medicanes* con durate divise per il numero totale dei *medicanes* nel periodo) dei *medicanes* in base alla loro durata in ore. Viene inoltre raffigurata (linee orizzontali) la somma del numero di *medicanes* di durata maggiore di 24 ore.

7.4 Modellazione dei *medicanes*

In questa sezione si descrive la modellazione numerica eseguita per valutare i parametri meteomarinari indotti dal passaggio di un possibile *medicane* nel sito del parco eolico. Come discusso nelle sezioni precedenti, l'algoritmo per il rilevamento e il tracciamento dei *medicanes* è ancora una questione aperta, quindi manca un elenco ben definito di *medicanes* storici, così come un database delle traiettorie stimate (cosiddette "best-tracks"). Sulla base della lista delle migliori tracce disponibili, si è scelto di concentrare la modellazione ai seguenti due casi:

- *Medicane* Qendresa (5-11 novembre 2014), scelto perché uno dei più vicini al sito con caratteristiche simil-tropicali
- *Medicane* Ianos (16-22 settembre 2020), scelto perché uno dei più intensi degli ultimi anni.

7.4.1 Metodologia

Un *hindcasting* affidabile delle condizioni meteomarine indotte da una tempesta tropicale richiede la messa a punto di una catena di modelli numerici accoppiati (meteorologico, di moto ondoso e idrodinamico) che richiederebbero inutilmente tempo e costi per gli obiettivi di questo studio, dato che il Canale di Sicilia non è un'area soggetta a cicloni tropicali. Tuttavia, è stata adottata una metodologia semplificata con l'obiettivo di stimare l'energia potenziale dell'onda indotta nel sito del progetto dal passaggio dei *medicanes* del passato. La metodologia è costituita dall'applicazione dei seguenti modelli numerici:

- MIKE 21 *Cyclone Wind Generation*
- MIKE 21 *Spectral Waves* (SW)
- MIKE 21 *Hydrodynamic* (HD)

Il campo del vento è stato definito applicando il modello parametrico di Holland (i.e., Holland, 1980 [46]) attraverso il modulo *Cyclone Wind Generation* di MIKE 21. Il vento e la pressione generate dal ciclone sono quindi descritti da un semplice modello parametrico basato su parametri come la posizione dell'occhio del ciclone, il raggio della velocità del vento massima, etc. La maggior

parte di questi parametri è generalmente disponibile da pubblicazioni meteorologiche o da banche dati. Bisogna evidenziare che la metodologia qui presentata non tiene in conto le condizioni meteomarine trovate dal *medicane* al momento del suo sviluppo, pertanto le onde e le correnti *hindcast* devono essere interpretate come potenziali contributi alle condizioni locali dovute al passaggio delle tempeste simulate.

Le simulazioni d'onda e di corrente sono state eseguite con i modelli applicati in modalità non-stazionaria a forzati dai campi di venti ricostruiti, ottenuti per ogni percorso ciclonico. I modelli sono stati applicati su un'ampia area (vedere Figura 7.4), per evitare effetti di confine nel sito *target*. Per ogni percorso ciclonico sono stati registrati il campo d'onda indotto sull'intero dominio e le serie temporali d'onda nei punti di interesse.

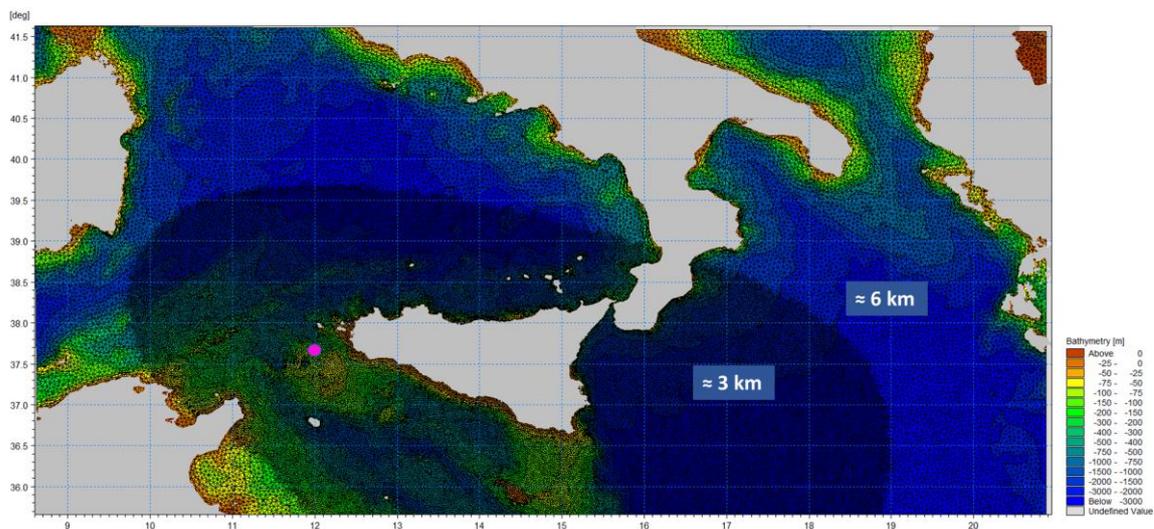


Figura 7.4: Dominio del modello, griglia e batimetria utilizzati per la modellazione del *medicane*. La posizione del *Punto P1* è evidenziata.

Sono stati modellati i due *medicanes* selezionati tra la documentazione storica e sono state stimate le condizioni d'onda e delle correnti nella zona del parco eolico. I risultati sono riassunti nelle sezioni seguenti, dopo una breve descrizione di ciascuna tempesta.

7.4.2 *Medicane* Qendresa (5-11 novembre 2014)

Un ciclone simil-tropicale (TLC) con un "occhio", convezione profonda lungo le pareti dell'occhio e venti forti ha colpito il Mar Mediterraneo centrale il 7-8 novembre 2014 (da ora in poi **TLC14**).

Le origini del *medicane* (TLC14) sono apparse nelle analisi della pressione minima media sul livello del mare (mslp), condotte sul Mar Mediterraneo centrale, appena a ovest della Tunisia, nella seconda metà del 6/11/2014: la sua formazione sembra essere associata a un sistema baroclinico.

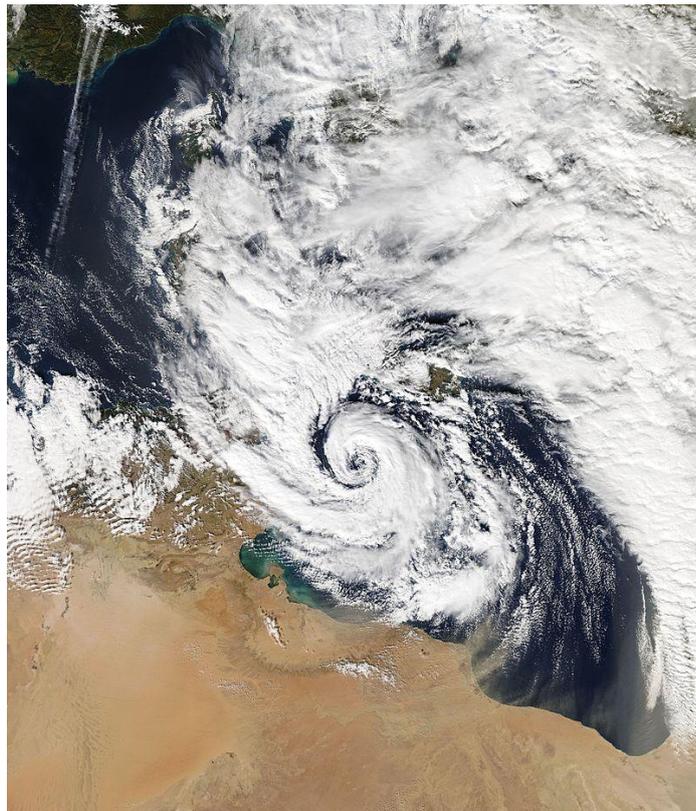


Figura 7.5: Immagine satellitare di Qendresa nella sua intensità di picco il 7 novembre, quando si avvicina a Malta

La depressione ha iniziato a mostrare le caratteristiche del ciclone tropicale nelle immagini satellitari, come un “occhio”, pareti dell’occhio e bande a spirale di nuvole profonde, intorno alle 11-12 UTC del 7/11 quando si trovava sul mare vicino all’isola di Lampedusa. La velocità del vento di superficie sostenuta di 10 minuti riportata in questa stazione ha raggiunto i 22 m/s (denominata forza della tempesta tropicale). Nelle ore successive, TLC14 si è spostato verso est e poi verso nord lungo la Sicilia meridionale e orientale, abbassandosi e mantenendo le sue caratteristiche da ciclone tropicale; la stazione di Malta ha riportato un mslp di 985 hPa (vedere Figura 7.8). All’inizio dell’8/11 TLC14 si è abbattuto sulla Sicilia orientale, causando danni significativi. Dalle 06 UTC dell’8/11, il Sistema di bassa pressione, senza più le caratteristiche di ciclone tropicale, si è spostato da est a sudest verso il Mar Ionio meridionale e si è indebolito.

La massima velocità del vento a 10 m registrata (in un raggio di 200 km intorno al minimo mslp del ciclone simulato) è stata pari a 36.5 m/s ed è stata prevista alle 10.00 UTC del 7/11 (Pytharoulis, 2017 [47]). Sebbene la velocità del vento sostenuta osservata a Lampedusa fosse molto più bassa (23.7 m/s) della velocità del vento del modello, bisogna tenere in considerazione che i venti sostenuti osservati sono mediati su un intervallo di 10 minuti mentre i valori simulati rappresentano la media dello step temporale del modello (45 secondi). Inoltre, va notato che le raffiche massime osservate hanno raggiunto i 37.6 m/s il 12.06 UTC all’isola di Lampedusa.

Il migliore percorso per TCL14 usato in questo studio deriva dal lavoro di (Pytharoulis, 2017 [47]), che ha combinato osservazioni di superficie, analisi di modelli a scala globale, immagini satellitari, dati sui fulmini e simulazioni di modelli principalmente regionali per registrare la tempesta. Il percorso migliore è riassunto in Figura 7.6.

I campi d’onda e di corrente modellati sono brevemente descritti in Figura 7.9 e in Figura 7.10, mostrando la posizione dell’occhio del *medicane* (a), il campo d’onda al picco della tempesta (b) e le serie temporali dell’altezza d’onda significativa e della velocità della corrente mediata sulla profondità nel *Punto P1* del Parco Eolico (punto magenta in (b)), rispettivamente. Il valore

massimo di H_{m0} non supera 3.0 m, e si verifica all'inizio della tempesta, quando l'occhio del ciclone in via di sviluppo è più vicino al sito, anche se, in quel momento, la tempesta non è al massimo della sua intensità. Le correnti indotte (mediate sulla profondità) nel sito sembrano essere minori di 0.2 m/s.

Secondo i risultati descritti sopra, i valori massimi di H_{m0} indotti dallo sviluppo di Qendresa sul bacino sono di circa 9 m e si verificano nella parte meridionale del Canale di Sicilia, mentre la tempesta si sta spostando verso il Mar Ionio. Questi valori sono ancora compatibili con gli eventi più significativi avvenuti in situ nel periodo *hindcast* di 42 anni analizzato nel presente report, confermando che il passaggio di tempeste simil-tropicali non è verosimilmente determinante per l'intensità dell'energia d'onda più alta nell'area del Parco Eolico .

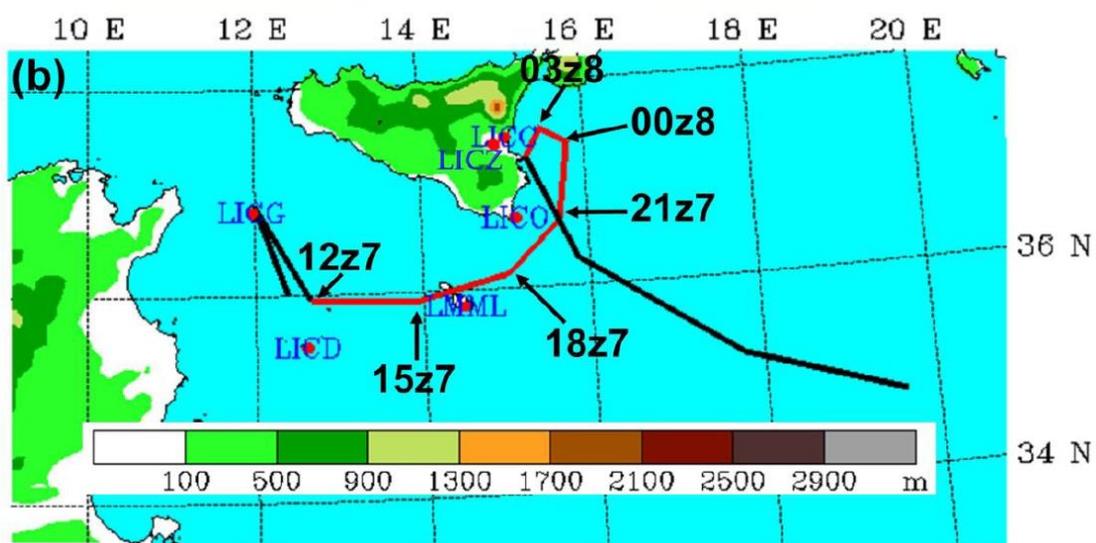


Figura 7.6: Il tracciato "migliore" di TLC14 (linea rossa; posizioni ogni 3 ore), il suo punto d'origine e la depressione dopo aver perso le sue caratteristiche tropicali (linee nere; posizioni ogni 6 ore). Sono indicate anche gli orari (UTC) e le date delle posizioni di TLC14 ogni 3 ore. Le stazioni meteorologiche disponibili e i loro identificativi internazionali ICAO (*International Civil Aviation Organization*) sono riportati nel pannello. La scala di colori mostra l'altitudine della topografia (m).

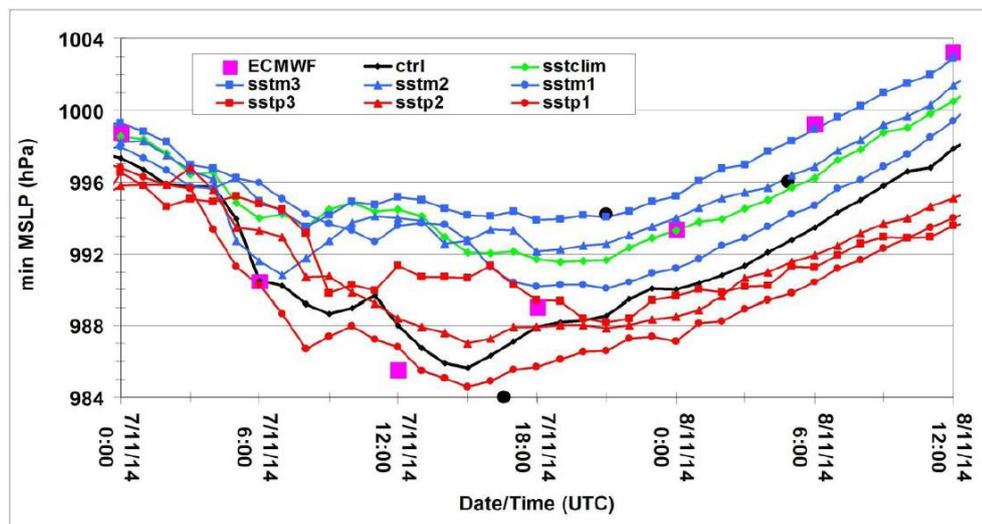


Figura 7.7: Serie temporali *hindcast* del mslp minimo (hPa) del ciclone nelle analisi ECMWF e in tutti gli esperimenti WRF – ARW. I tre pallini neri indicano le misurazioni mslp LMML alle 16:34 UTC del 7/11/2014, LICO alle 21:00 UTC del 7/11/2014 e LICC alle 04:50 UTC del 8/11/2014. Da [47].

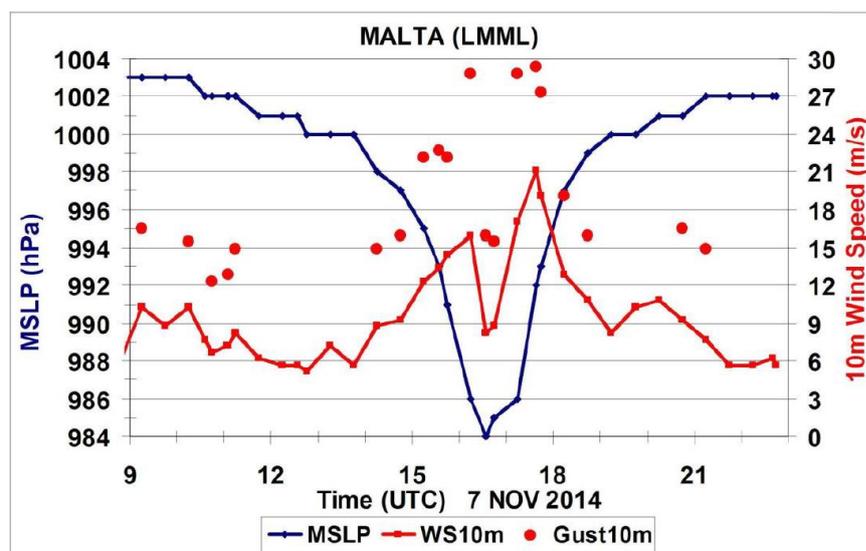


Figura 7.8: Serie temporali della pressione media al livello del mare osservata (MSLP [hPa]), della velocità del vento sostenuta (WS10m [m/s]) e delle raffiche di vento (Gust10m [m/s]) a Luqa, Malta il 7 November 2014. Da [47]

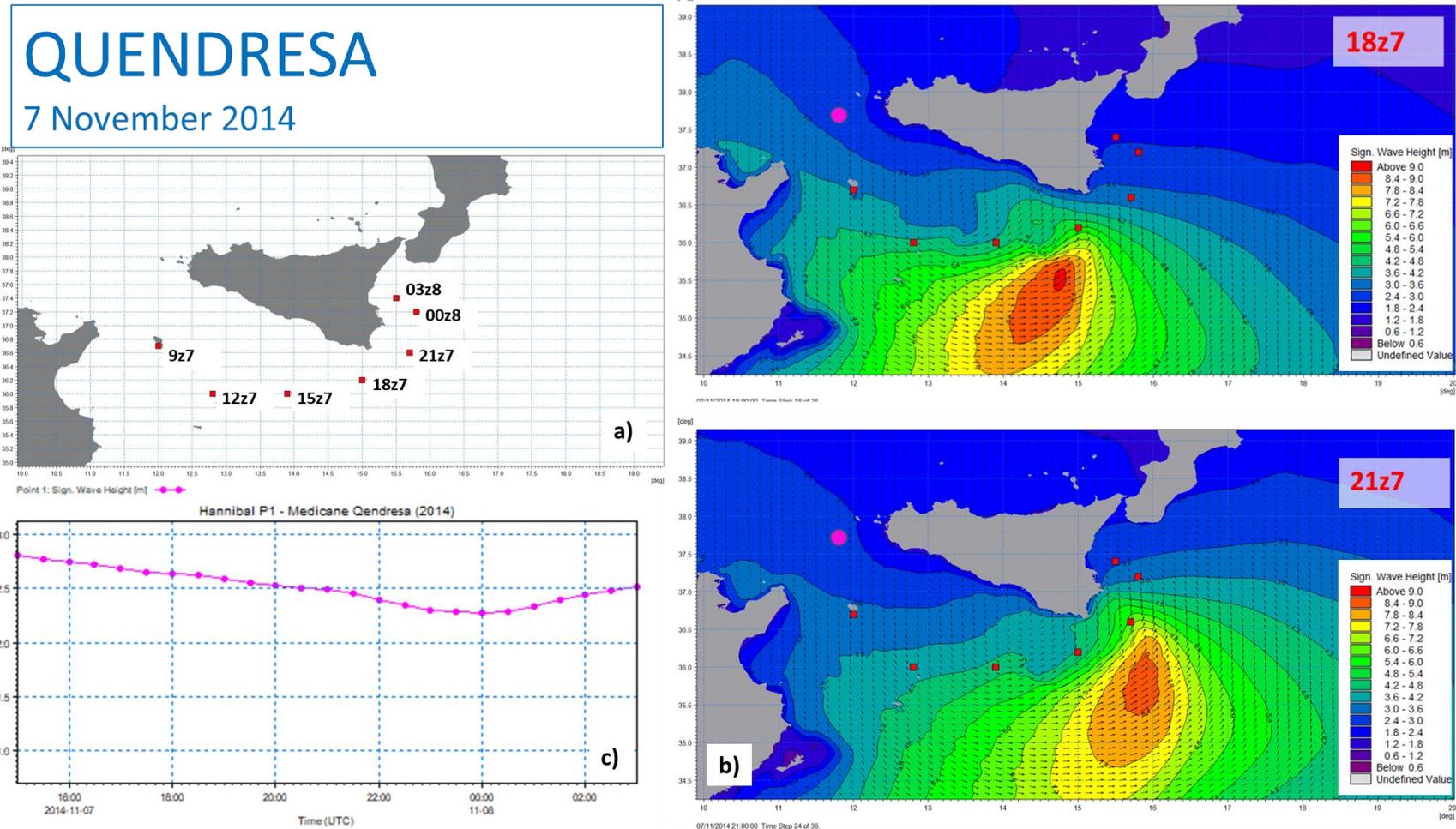


Figura 7.9: *Mediane Qendresa*: risultati della modellazione delle onde. Posizione dell'occhio del *mediane* (a), campo d'onda al picco della tempesta (b) e serie temporali dell'altezza d'onda significativa nel *Punto P1* del *Parco Eolico* (punto magenta in b))

QUENDRESA

7 November 2014

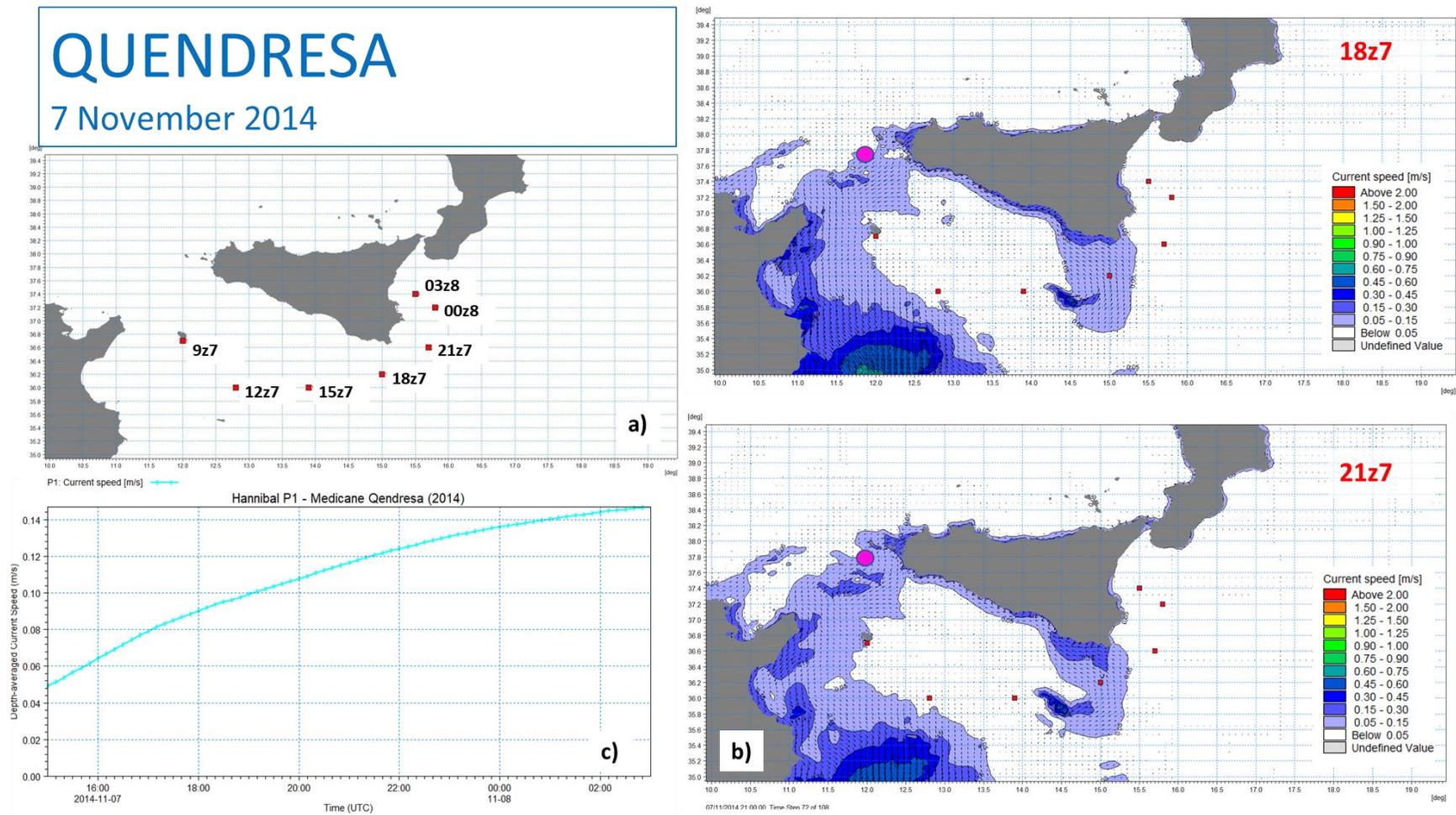


Figure 7.10: *Mediane* Qendresa: risultati della modellazione idrodinamica. Posizione dell'occhio del *mediane* (a), campo di velocità della corrente al picco della tempesta (b) e serie temporali della velocità della corrente mediata sulla profondità nel *Punto P1* del *Parco Eolico* (punto magenta in b))

7.4.3 Ianos (16-22 settembre 2020)

Ianos ha iniziato a svilupparsi sul Mar Mediterraneo il 14 settembre 2020, appena al largo delle coste nordafricane. Il 16 settembre il ciclone si è intensificato e si sono formati forti venti intorno al suo centro. La Figura 2 mostra i venti misurati dallo strumento ASCAT (scatterometro) sui satelliti Metop, indicando velocità del vento superiori a 90 km/h (25 m/s) intorno al ciclone.



Figura 7.11: Un'immagine spettacolare di Ianos dal satellite EU/Copernicus Sentinel-3 vicino alla costa sud-occidentale della Grecia venerdì 18 settembre 2020

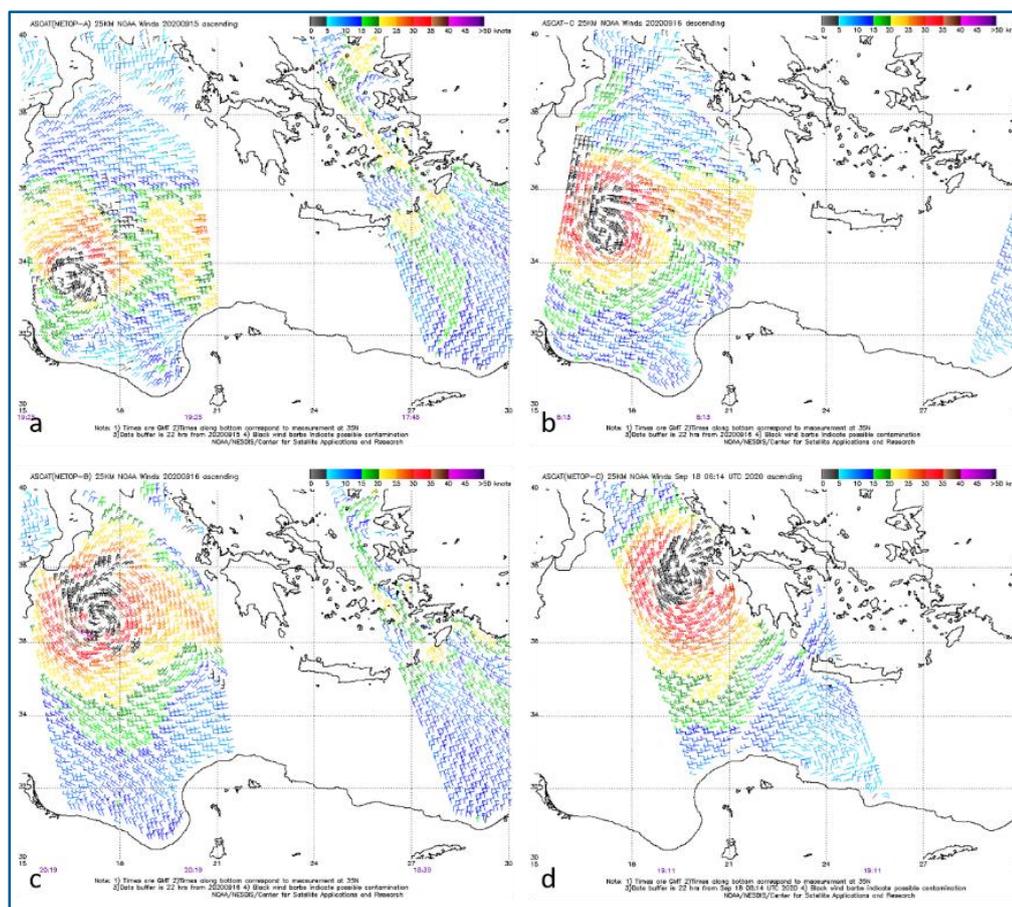


Figura 7.12: Osservazioni satellitari ASCAT Metop di venti: a) Metop-A il 15 Settembre, 19:25 UTC, b) Metop-C il 16 Settembre, 08:13 UTC, c) Metop-B il 16 Settembre, 20:19 UTC, d) Metop-C il 17 Settembre, 19:11 UTC. Fonte: NESDIS

All'inizio del 17 settembre il ciclone si era avvicinato alla costa italiana sul Mar Ionio, con una struttura ad occhio e l'avanzamento di forti bande di pioggia quasi-stazionarie, raggiungendo le coste meridionali della regione Calabria, con elevate quantità di precipitazioni locali. L'intero episodio durò dai cinque ai sei giorni. La sera del 17 settembre il *medicane* Ianos approdò sulle isole greche e sulle coste occidentali della Grecia. Le isole del mar Ionio di Zante, Cefalonia e Itaca furono tutte gravemente colpite. Sono state segnalate velocità del vento superiori a 100 km/h. il 18 settembre la tempesta ha attraversato la Grecia continentale. In molti luoghi si sono verificate forti precipitazioni e inondazioni improvvise, causate da tempeste convettive che si sono sviluppate all'interno del *medicane*.

Più tardi nel Corso della giornata, una tempesta convettiva si è inserita nella fascia nuvolosa del *medicane* causando forti precipitazioni persistenti sulle parti centrali e orientali della Grecia. Nelle città di Lamia e Karpenissi l'inondazione ha intrappolato le persone nelle loro case e veicoli e il collegamento ferroviario tra Atene e Salonicco è stato interrotto. Centinaia di persona hanno dovuto essere state tratte in salvo da edifici allagati e almeno tre persone sarebbero state uccise dalla tempesta.

La Figura 7.13 mostra il migliore percorso di Ianos utilizzato in questo studio, fatto dal meteorologo freelance del *Medicane Centre* [48] che segue i *medicanes* dal 2018.

I campi d'onda e idrodinamici modellati sono brevemente descritti nella Figura 7.14 e nella Figura 7.15, che mostrano la posizione dell'occhio del *medicane* (a), il campo d'onda al picco della tempesta (b), e le serie temporali dell'altezza d'onda significativa e della velocità della corrente mediata sulla profondità nel *Punto P1* del Parco Eolico (punto magenta in (b)), rispettivamente. Il valore massimo di H_{m0} è di circa 3.2 m, e si verifica nelle prime ore del 18 settembre, quando la

tempesta sta per approdare sulle coste greche. Le correnti indotte (mediate sulla profondità) sembrano essere inferiori a 0.1 m/s.

Secondo i risultati sopra descritti, i valori massimi di H_{m0} indotti dallo sviluppo di lanos sul bacino sono di circa 6.5 m e si verificano nel Mar Ionio. Tale valore è ancora inferiore delle tempeste più violente avvenute nell'area del Parco Eolico nel periodo *hindcast* di 42 anni analizzato nel presente report, confermando che il passaggio di tempeste simil-tropicali non è verosimilmente determinante per l'intensità della più alta energia d'onda nell'area.

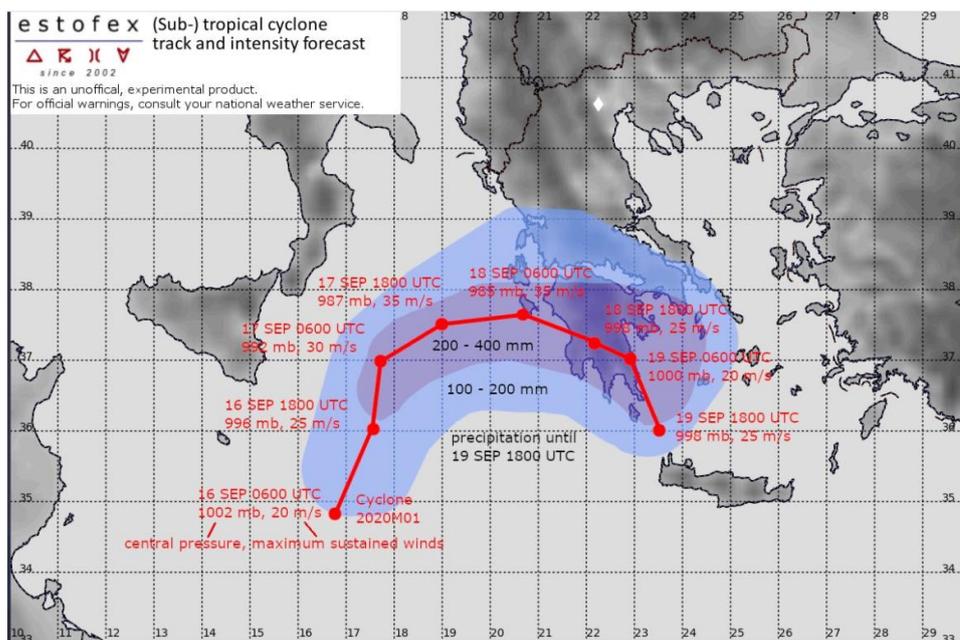


Figura 7.13: Un tentativo di percorso migliore per il *medicane* lanos (da [48])

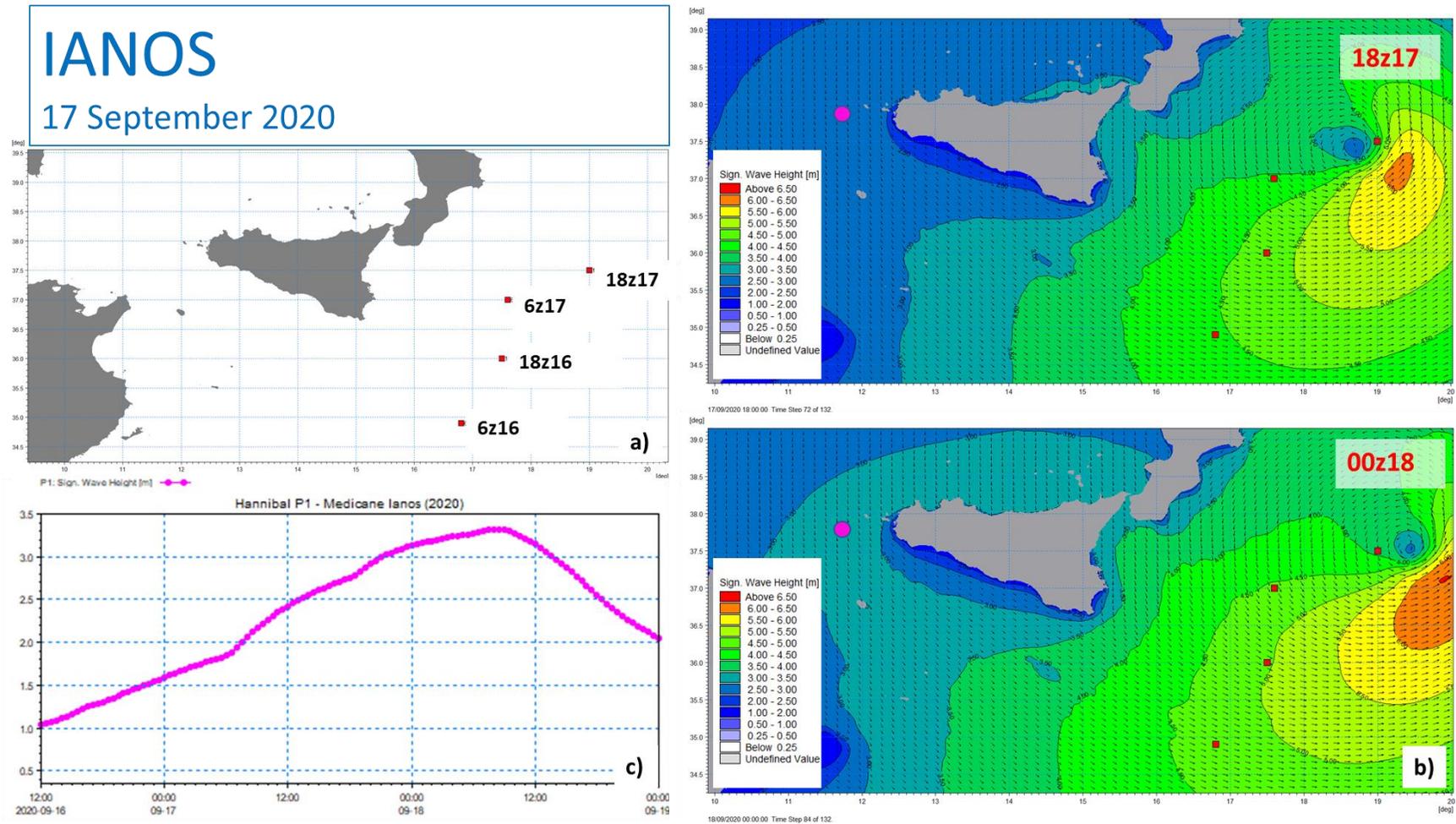


Figura 7.14: *Medicane Ianos*: risultati della modellazione delle onde. Posizione dell'occhio del *medicane* (a), campo d'onda al picco della tempesta (b) e serie temporale dell'altezza d'onda significativa nel *Punto P1* del *Parco Eolico* (punto magenta (b))

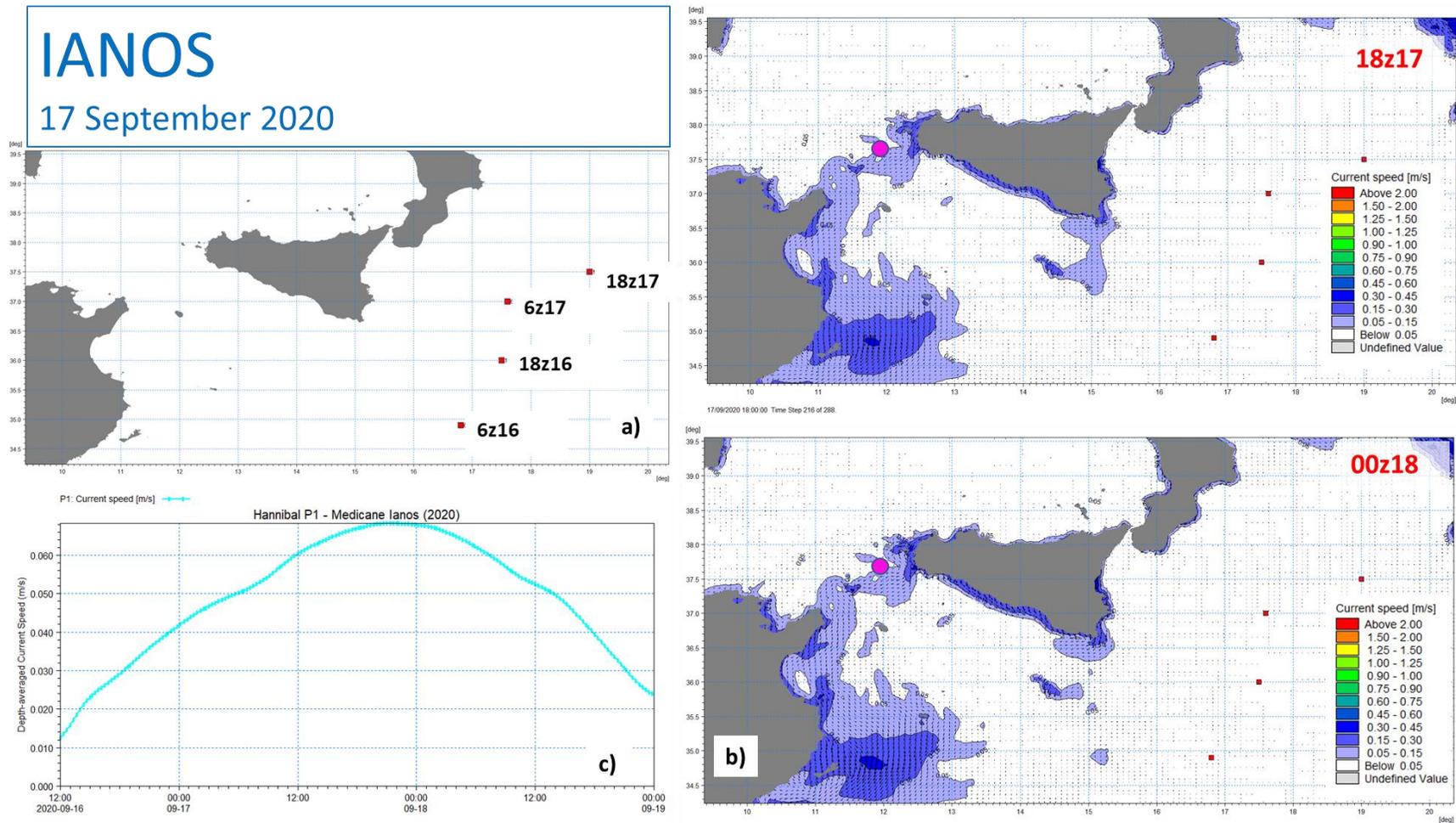


Figura 7.15: *Mediane Ianos*: risultati della modellazione idrodinamica. Posizione dell'occhio del *mediane* (a), campo di velocità della corrente al picco della tempesta (b) e serie temporali della velocità della corrente mediata sulla profondità nel *Punto P1* del *Parco Eolico* (punto magenta in (b))

8 Potenziale impatto ambientale delle infrastrutture del Parco Eolico

Questo capitolo presenta una valutazione qualitativa degli effetti del Parco Eolico in progetto sull'ambiente fisico, cioè i campi di vento, onda e corrente.

8.1 Impronta del parco eolico

La capacità pianificata del parco è, secondo 7 Seas Med, di 250 MW, forniti da 21 WTG disposte come illustrato in Figura 8.1 a profondità di 150-300 m (WD) e una sottostazione (FOSS). Ogni WTG ha una potenza nominale di circa 12 MW. La distanza tra le WTG sarà nell'intervallo di 1-2 km e copre un'are adiacente di circa 50 km².

In questa fase del progetto sono ancora in sviluppo il tipo di galleggiante e i sistemi di ormeggio e ancoraggio. Secondo 7 Seas Med è probabile che il galleggiante sarà di tipo semi-sommersibile, come presentato in Figura 8.2². Esempi dei principali schemi di fondazioni eoliche offshore galleggianti sono illustrati in Figura 8.3.

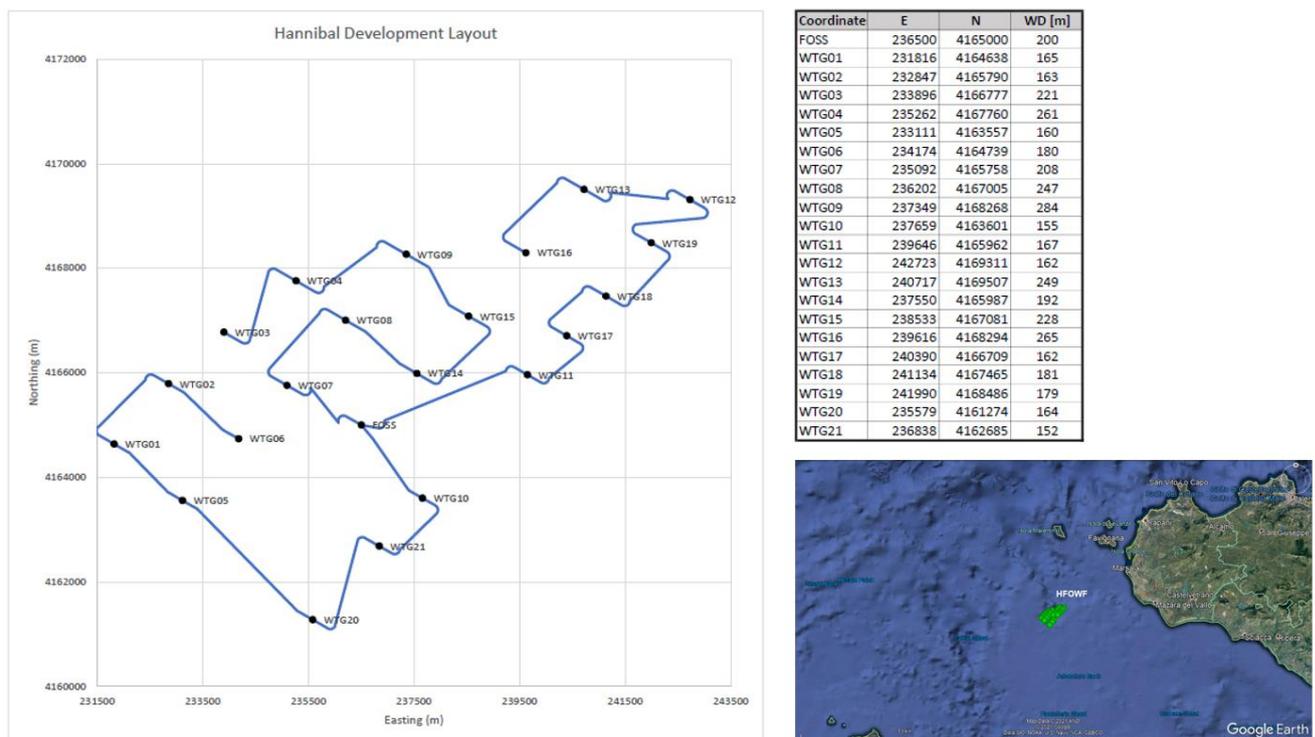


Figura 8.1: Layout previsto del Parco Eolico . Fonte: 7 Seas Med e Google Earth©

² See also visualisation here <https://www.stiesdal.com/offshore-technologies/tetra-offshore-foundations-for-any-water-depth/>

TetraSub – Dimensions



© Stiesdal Offshore Technologies A/S 2021, All Rights Reserved

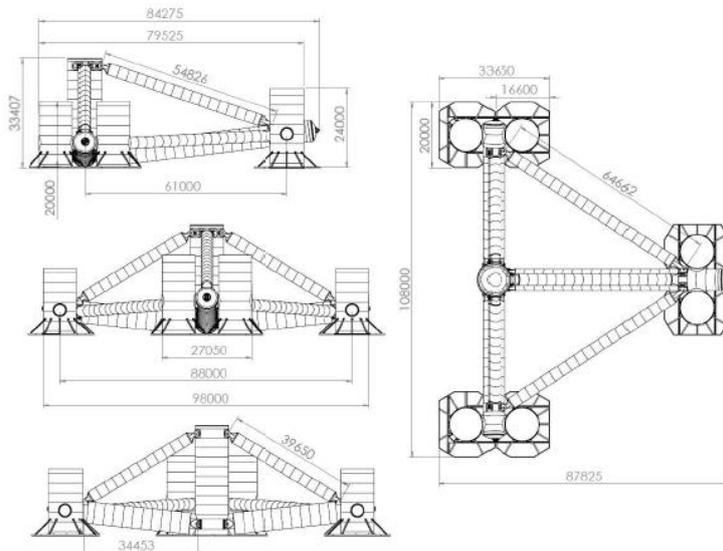


Figura 8.2: Galleggiante preso in considerazione per i WTG nel Parco Eolico . Dimensioni in mm. Fonte: 7 Seas Med

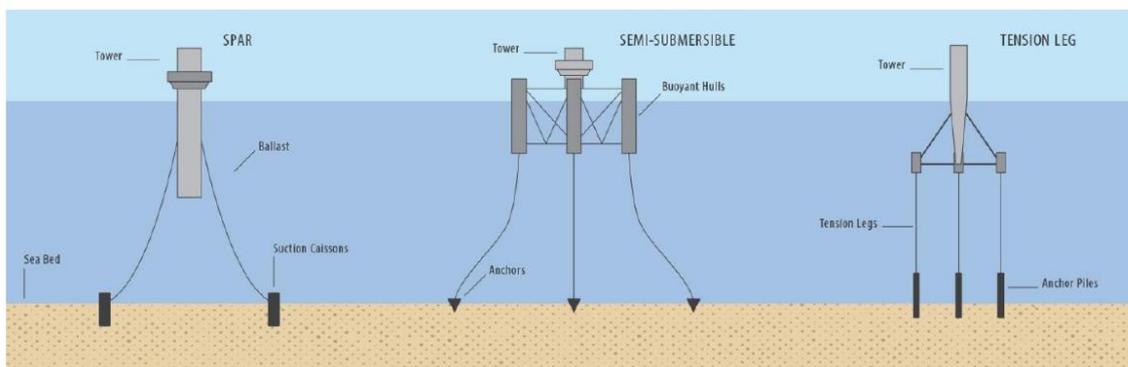


Figura 8.3: Principali schemi di fondazioni eoliche offshore galleggianti. Fonte: ICF (2020) white paper [46]

8.2 Impatto sul vento

La conseguenza probabilmente più ampiamente documentata sulle condizioni atmosferiche locali e regionali della raccolta dell'energia eolica è l'effetto scia. Le turbine eoliche estraggono energia cinetica dall'atmosfera e convertono parte di essa in energia elettrica. La restante parte dell'energia viene convertita in energia cinetica turbolenta che genera scie e deficit della velocità del vento di sottovento.

Per valutare l'impatto degli Horns Rev 1 OWF da 158 MW (WTG da 80x2 MW all'interno di una spaziatura 7D (diametro del rotore $D = 80$ m) che copre un'area di 20 km² in acque con profondità 6-14 m) sul clima ambientale del vento, Christiansen e Hasager (2005, [52]) hanno utilizzato immagini satellitari da radar ad apertura sintetica (SAR) per stimare il deficit di velocità del vento di sottovento.

Per l'intervallo di velocità del vento 8-9 m/s la velocità del vento alla quota media dell'altezza dell'hub si riduce mediamente dell'8-9% nell'area di sottovento del WTG rispetto al punto di riferimento sopravvento, vedere anche Christensen et al (2013, [50]). La velocità del vento recupera entro il 2% rispetto alla velocità del flusso libero su una distanza di 5-20 km a seconda della velocità del vento ambientale, alla stabilità atmosferica e al numero di turbine in funzione.

L'effetto scia a Horns Rev 1 OWF è ben visualizzato dalle famose fotografie aeree scattate il 12 febbraio 2008, si veda Hasager et al (2013, [53]).

Anche Akhtar et al (2021,[51]) hanno recentemente esaminato gli impatti dei parchi eolici sulle dinamiche atmosferiche locali e sui deficit spaziali-temporali dei pattern della velocità del vento per lo scenario del parco eolico prossimo futuro nel Mare del Nord usando un modello climatico ad alta risoluzione con la parametrizzazione delle turbine eoliche. I loro risultati mostrano che gruppi di grandi parchi eolici (> 500 MW) possono potenzialmente portare a riduzioni della velocità media del vento locale di 2-2.5 m/s (cioè del 20-25% ipotizzando una velocità media del vento di 10 m/s) e con un recupero della velocità sottovento a 40 km dal parco eolico.

Sebbene i risultati di cui sopra si riferiscano a parchi eolici con fondazioni a fondo fisso, è ragionevole supporre che gli effetti siano simili per quelli galleggianti. Quindi è probabile che la velocità media del vento verrà ridotta, all'interno del Parco Eolico da 250 MW, fino al 10% con distanze di recupero della velocità sottovento di 20-30 km.

Come affermato nella recente e completa revisione dei potenziali effetti ambientali degli impianti di energia eolica offshore galleggianti in acque profonde di Farr et al (2021, [49]), l'effetto complessivo dei FOWF sul clima regionale è probabilmente da lieve a moderato, come anche illustrato in Figura 8.4.

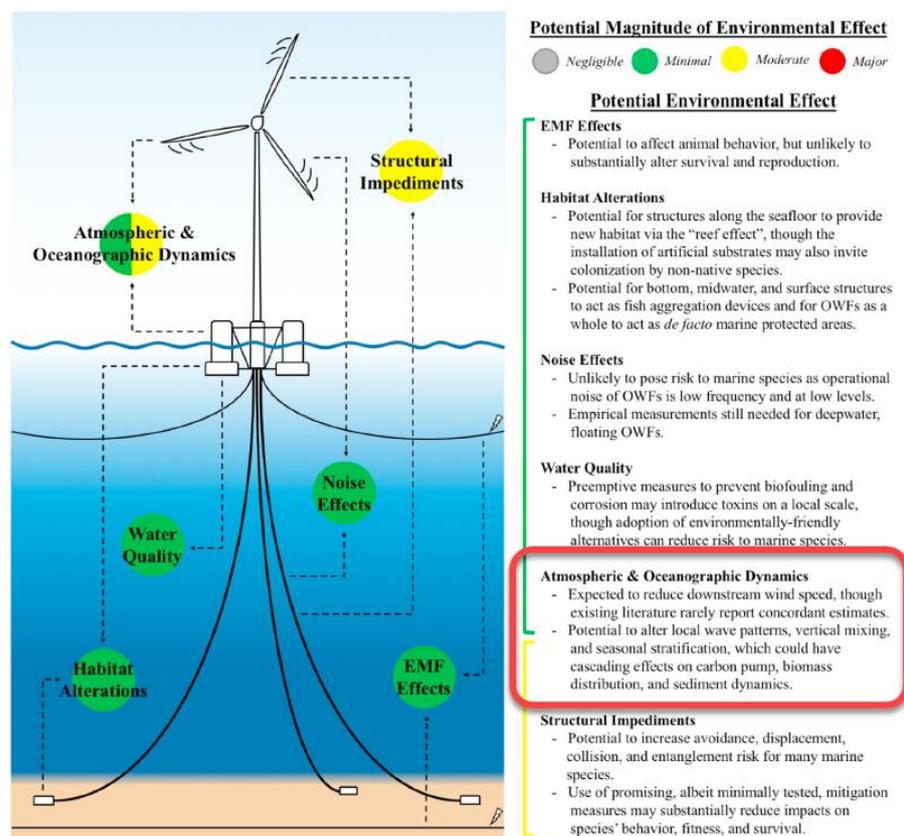


Figura 8.4: Tipologia e entità dei potenziali effetti ambientali degli impianti di energia eolica offshore galleggianti. Le variazioni attese valutate secondo le dinamiche atmosferiche e marine sono evidenziati dal riquadro in rosso. Fonte e illustrazione: Farr et al (2021, [49])

8.3 Impatto sulle condizioni d'onda

Il più grande impatto visivo di una turbina eolica galleggiante sulle onde di gravità superficiali è l'interazione tra le onde e il galleggiante, che si traduce in una variazione locale delle altezze d'onda.

Come affermato in Christensen et al (2013, [50]), ci sono fondamentalmente tre diversi processi responsabili delle modifiche ai campi d'onda che si propagano attraverso un parco eolico, come elencato nella Tabella 8.1. L'effetto risultante di tutti e tre i processi sarà maggiore per le onde con periodo breve (lunghezza d'onda simile alla grandezza caratteristica del galleggiante) e minore per le onde con periodo lungo (*swell*). L'effetto della dissipazione dell'energia d'onda dovuto all'attrito e alla separazione dei vortici attorno a una fondazione è ridotto rispetto agli altri due fenomeni.

Tabella 8.1: Fenomeni più importanti per il cambiamento delle condizioni d'onda all'interno di un OWF.

Wave Changing Processes			
	Dissipation of wave energy due to drag resistance	Reflection/diffraction of waves around the foundation structure	Effect of changed wind field inside and on lee site of the wind farm
Consequence	Due to the local interaction between the waves and foundation structure a part of the wave energy will be transformed into turbulent kinetic energy because of surface friction on the structure and flow separation on the lee site of the structure	A part of the wave energy will be reflected/diffracted around the foundation structure. This will change the wave conditions significantly, but only locally.	As the generation of wind waves is governed by the surface shear stress on the water surface due to wind, fetch, depth and wind duration, changed wind field means changed wave field. A reduced wind speed results in a reduced wave height (period).

Presso DHI Christensen et al (2013, [50]) hanno sviluppato un metodo ingegneristico per la valutazione delle variazioni delle condizioni d'onda utilizzando i modelli numerici allo stato dell'arte MIKE 21 SW³ e WAMIT™ (simile a quello utilizzato oggi in MIKE 21 MA⁴). Questa metodologia generale è stata utilizzata nell' Horns Rev 1 OWF sopra menzionato. Si è riscontrato che la riduzione massima dell'altezza d'onda significativa sottovento rispetto all'OWF era dell'ordine del 5%, e a 20 km di distanza la riduzione era di circa l'1%. Il periodo dell'onda è rimasto pressoché invariato. Si prega di notare che l'analisi è stata effettuata per stati di mare stazionari, che è un'approssimazione, probabilmente conservativa, per la valutazione dei cambiamenti climatici d'onda dovuti agli effetti dell'OWF.

I parchi eolici offshore Vesterhav Sud e Vesterhav Nord, leggermente più grandi, da 200 MW ciascuno, sono situati a nord di Horns Rev 1 lungo la costa ovest dello Jutland, si veda Figura 8.5. I parchi eolici si trovano in acque profonde 15-30 m, a circa 4 km dalla costa e coprono un'area di circa 44 km² ciascuno (simile al Parco Eolico in esame). Ciascun parco eolico sarà composto da 20-21 WTG da 8.4 MW. Sebbene la profondità dell'acqua e la distanza dalla costa siano diverse rispetto al Parco Eolico (150-300 m di profondità e 30-40 km dalla più vicina zona costiera), la capacità (MW), il numero di WTG, l'impronta e le condizioni ambientali (vento, onde e correnti) non sono significativamente differenti, sebbene le condizioni del Mare del Nord siano più severe rispetto a quelle dell'area in esame..

³ <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21/waves/spectral-waves>

⁴ <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-mooring-analysis>



Figura 8.5: Ubicazione dell'OWF da 200 MW Vesterhav North e Vesterhav South OWF. Fonte: Vedere link a piè di pagina

Dopo un'attenta valutazione lo Studio di Impatto Ambientale per ciascuno dei due siti ha concluso che l'impatto complessivo sulle condizioni d'onda è minore (riduzione dell'altezza d'onda media dell'1-3.5% e confinato nell'area del parco eolico)^{5,6}. La metodologia utilizzata era basata su Christensen et al (2013, [50]).

Per il progetto Hornsea Three, circa 10 volte più grande (2400 MW, 231 WTG), nel Regno Unito situato a più di 120 km dalla costa e che ricopre un'area di quasi 700 km², lo Studio di Impatto Ambientale ha concluso che la riduzione massima dell'altezza d'onda era del 15% e meno del 2.5% a circa 50 km sottovento rispetto all'OWF⁷. Questa valutazione si basava su analisi numeriche dettagliate. Il progetto è stato approvato nel dicembre del 2020.

Per il FOWF operative Hywind Scotland da 30 MW (5x6 MW WTG, 95-120 m di profondità d'acqua e 7 km² di estensione) l'impatto in termini di variazioni indotte sulle condizioni d'onda, di corrente, dei sedimenti e della morfologia è stato analizzato durante la fase esplorativa. Questo sembra anche essere il caso dell'Hywind Tampen (Norway) FOWF in progetto da 88 MW (11x8 MW WTG a 260-300 m di profondità, estensione sul fondale marino di 22.5 km² e a 140 km dalla costa)⁸.

Sebbene i risultati di cui sopra si riferiscano a una gamma di parchi eolici con fondazioni fisse sul fondo, è ragionevole prevedere che l'effetto di blocco sulle condizioni d'onda sottovento non sarà significativamente diverso per un parco eolico galleggiante. Quindi è probabile che l'altezza d'onda sarà ridotta meno del 5% sottovento rispetto al parco eolico in esame e il cambiamento sarà difficilmente misurabile nelle vicine zone costiere a 30-40 km di distanza.

L'effetto dei cavi di ormeggio sulle onde sarà trascurabile per la loro dimensione rispetto alla lunghezza d'onda. Solo localmente la piattaforma galleggiante (ad esempio semi-sommersa) darà maggiori effetti di protezione rispetto alle fondazioni monopalo o al jacket.

⁵ https://www2.mst.dk/Udgiv/web/ATR%2005_06_Vesterhav%20Syd_Sediment%20and%20Hydrographic%20R4.pdf

⁶ https://www2.mst.dk/Udgiv/web/ATR%2005_06_Vesterhav%20Nord_Sediment%20and%20Hydrographic%20R4.pdf

⁷ <https://hornseaproject3.co.uk/> Environmental Statement: Volume 5, Annex 1.1 – Marine Processes Technical Report, May 2018

⁸ <https://www.equinor.com/en/how-and-why/impact-assessments/hywind-tampen.html>

Pertanto, è probabile che l'effetto complessivo del Parco Eolico sulle condizioni d'onda sia da lieve a moderato.

8.4 Impatto sulle condizioni idrodinamiche

I due principali impatti derivano da 1) la modifica del campo del vento dovuta all'effetto diretto dell'estrazione della potenza dal vento e 2) dagli effetti di blocco della fondazione WTG sulle correnti marine e conseguentemente sulla turbolenza, sulla miscelazione e sulla stratificazione della colonna d'acqua; vedere ad esempio queste recente analisi completa fatta da van Berkel et al (2020, [54]) di DHI e la Figura 8.6. Come affermato sia in Farr et al (2021, [49]) sia in van Berkel et al (2020, [54]), l'attuale comprensione degli effetti dei FOWF sulle dinamiche marine è limitata e incerta.

La maggior parte degli studi di impatto ambientale per i progetti eolici offshore è basata su modellazioni del flusso idrodinamico per scenari di riferimento e di sviluppo progettuale al fine di quantificare il probabile impatto, dove la velocità è ridotta all'intero del parco eolico e il blocco del flusso dovuto alla fondazione è tenuto in conto da un processo di modellazione su sotto-griglie. Quest'ultimo mostra che l'effetto di blocco sul flusso è maggiore nelle immediate vicinanze della piattaforma di fondazione, ma si riduce rapidamente di entità a valle della struttura. In prossimità delle singole fondazioni, si ha spesso una piccola amplificazione locale della velocità della corrente (come avviene anche per onde di gravità superficiali).

Questo approccio è stato applicato anche per l'OWF Vesterhav Sud da 200 MW e l'OWF Vesterhav Nord discussi sopra, dove è stato utilizzato il modello MIKE 21/3⁹. I risultati mostrano che i cambiamenti delle correnti (e dei livelli d'acqua) previsti sono relativamente piccoli (velocità della corrente ridotta meno del 2%), e lo Studio di Impatto Ambientale conclude che l'impatto è trascurabile.

Per il 10 volte più grande OWF Hornsea Three (si veda sopra), i cambiamenti previsti nelle velocità della corrente di picco variano da +0.04 m/s a -0.1 m/s in prossimità dell'area dell'OWF. Questo cambiamento dovrebbe essere confrontato con le velocità della corrente generate dalle maree di 0.6 m/s (acqua alta) e di 1.0 m/s (acqua bassa) per le maree primaverili medie.

Si è inoltre concluso che, nonostante l'OWF Hornsea Three causi qualche redistribuzione della velocità della corrente, la variazione netta complessiva della portata a cui l'acqua passa attraverso l'OWF è minima e quindi i livelli del mare locali e regionali (di marea e non) non avrebbero dovuto essere interessati dall'OWF.

⁹ <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-21-3>

SUMMARY OF LOCAL AND REGIONAL HYDRODYNAMIC IMPACTS

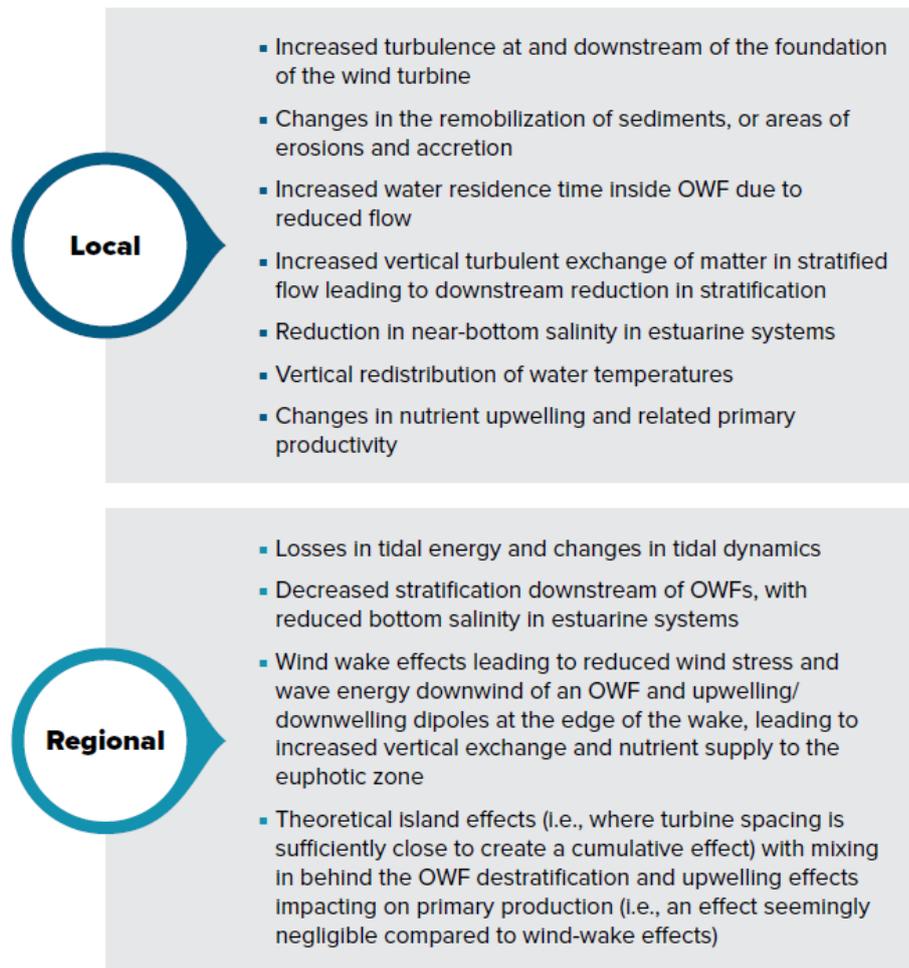


Figura 8.6: Elenco dei potenziali effetti delle piattaforme eoliche offshore sull'idrodinamica. Fonte: van Berkel et al (2020, [54])

Per il Parco Eolico in particolare, le correnti di superficie e della porzione superiore della colonna d'acqua (10-20 m) cambieranno nelle immediate vicinanze del galleggiante, ma dovrebbero rimanere confinate nell'ordine di centinaia di metri dalla piattaforma di fondazione. È probabile che il cambiamento di flusso, principalmente non mareale, ambientale e delle velocità relativamente meno intense della corrente (corrente superficiale < 0.15 m/s nel 50% del tempo) sia minimo (< 2-3%). Dato che i galleggianti occupano il 5-10% della colonna d'acqua superiore e che la dimensione dei cavi di ormeggio e dei sistemi di ancoraggio al fondo marino è ridotta, l'impatto previsto sulle correnti vicino al fondale dovrebbe essere minore, anche considerando l'entità delle velocità della corrente sul fondale descritta nella Sezione 4.3.3 (il 75% del tempo la velocità della corrente vicino al fondale marino è < 0.1 m/s).

Allo stesso modo, l'impatto sulle condizioni del livello del mare dovrebbe essere minimo.

9 Marine Growth

Questo capitolo presenta dati e raccomandazioni riguardanti la valutazione delle incrostazioni biologiche (*marine growth*) attese nel sito del progetto, che si basano su studi di letteratura e sulla conoscenza sviluppata nel corso di esperienze precedenti.

9.1 Panoramica generale

L'incrostazione biologica (o *marine growth*) consiste nell'insediamento e nella crescita di organismi marini, comprese alghe e animali, su superfici sommerse. Può avere un effetto negativo su strutture come quelle galleggianti modificando i processi di corrosione dei metalli, causando corrosioni locali, fino alla perforazione o aumentando il peso morto delle strutture, spostando il baricentro e aumentando notevolmente gli effetti del carico idrodinamico. Ad esempio, uno strato di incrostazione di 150 mm di spessore può causare un aumento solo del 0.15% del peso della struttura, ma può allo stesso tempo aumentare del 17.5% il carico idrodinamico, causando un aumento del 63.3% dei danni da fatica e un aumento del 38% della vita a fatica, si veda [56].

Altri termini per "marine growth" sono "incrostazione marina" oppure "bio-incrostazione". La composizione e l'estensione della crescita marina variano con la regione biogeografica con un incremento dalle alte alle basse latitudini. Numerosi fattori influenzano la quantità e il tipo di incrostazione marina, tra cui la salinità, la temperatura, la profondità, la velocità della corrente e l'esposizione alle onde, oltre a fattori biologici come la disponibilità di cibo, l'approvvigionamento larvale, la presenza di predatori e la biologia e fisiologia generali delle specie incrostanti.

Dalle vaste conoscenze acquisite nel corso degli anni di funzionamento e manutenzione delle piattaforme petrolifere/gasiere in tutto il mondo, è stato possibile definire modelli generali nel processo di colonizzazione di una nuova struttura da parte di organismi marini. In pochi giorni o settimane incominceranno a colonizzare il nuovo substrato duro (cemento o metallo) introdotto nell'ambiente. Tipicamente, si verifica una successione di composizioni di specie con l'aumentare dell'età del substrato. La successione è il risultato di organismi che competono per lo spazio, e una condizione quasi-stazionaria delle comunità incrostanti non si stabilirà in meno di 4-6 anni. Insieme alla successione, i singoli organismi si ingrandiscono, portando all'aumento dello spessore dell'incrostazione marina.

La tipica successione biotica inizia con un biofilm (cioè "*microfouling*"), costituito da batteri e diatomee, entro la prima settimana. Questi sono seguiti da una comunità di "*macrofouling*", composta da "*soft fouling*" e "*hard fouling*" (vedere Figura 9.1). Il *soft fouling* comprende alghe e invertebrate, come coralli molli, spugne, anemoni, tunicati e idroidi, mentre l'*hard fouling* comprende invertebrati come cirripedi, cozze e tubicoli (WHOI 1952, [57]).

Time	Organism	Illustration	Size (mm)
Minutes	Organic Film		
Hours	Bacterial Slimes		0.001 to 0.1
Days	Diatoms and Filamentous algae		0.01 to 1
Weeks	Barnacles, Bryozoans, Tubeworms, Macroalgae		1 to 30
Months	Mussels, Oysters, Sponges		30 to 50



Figura 9.1: Sulla sinistra, immagini che mostrano la crescita delle incrostazioni “hard” e “soft”. Sulla destra, progressione e dimensione delle incrostazioni, da [59]

9.2 Standard di riferimento

Ai fini della progettazione, l'incrostazione marina deve essere definita dal suo spessore, dalla sua scabrezza, dalla sua densità e dalla sua variazione con la profondità. Esistono numerosi standard di riferimento nell'ingegneria offshore per regolare il modo in cui la crescita marina viene contabilizzata nella progettazione ingegneristica e nella manutenzione strutturale in ambiente marino. I principali riferimenti sono gli standard DNV per la progettazione delle strutture delle turbine eoliche offshore, dei sistemi di ormeggio e le raccomandazioni pratiche sulle condizioni e i carichi ambientali. Ulteriori indicazioni possono essere ricavate anche da altri standard associati alle industrie offshore petrolifere e dei gas (*International Organization for Standardisation (ISO), British Standards Institute, etc.*).

Le linee guida tendono a riferirsi alla latitudine di installazione e spesso si basano solamente sui dati del Mare del Nord (NORSOK-N003, [58]), da utilizzare a meno che non siano disponibili dati più accurati e specifici del sito. Il valore suggerito per la densità della crescita marina è di 1325 kg/m³.

Alcune informazioni specifiche del sito sono riportate in ISO 19901-1 [29] ma riferite al Regno Unito, al largo della Norvegia, all'Africa occidentale, al Golfo Persico e alle acque degli Stati Uniti. Nella sezione successiva viene fornita una panoramica dei dati di crescita marina raccolti nelle acque italiane.

9.3 Il marine growth nelle acque italiane

La presente sezione fornisce una sintesi dei più ampi dati sulla crescita marina disponibili per strutture sia galleggianti sia fisse nei mari italiani. Le comunità di *fouling* nelle acque italiane sono le più conosciute nel Mar Mediterraneo. La maggior parte delle pubblicazioni relative al *fouling* nel Mar Mediterraneo sono legate a piattaforme fisse, generalmente situate all'interno della piattaforma costiera, ad esempio a meno di 200 m di profondità (Relini G, 1999a [60]). È probabile che l'incrostazione su boe e strutture galleggianti sia differente a causa della “natura galleggiante” del substrato che significa che la comunità è meno esposta al movimento mareale. Questo, tuttavia, è vero nelle aree con un'ampia escursione di marea. Nell'area di progetto l'escursione

di marea è piccola, per cui i tassi di accrescimento dell'incrostazione marina possono essere assunti pari a quelli relativi alle strutture fisse.

Marine growth su una struttura offshore galleggiante

Il lavoro di (Relini et al., 1999a [60]) mostra i risultati delle indagini (dal 1987) sui fenomeni di *fouling* e *macrofouling* sulla boa oceanografica ODAS Italia 1 (*Oceanographic Data Acquisition System*) ormeggiata a 37 miglia da Genova (Mar Mediterraneo NW). La boa, gestita dall'IAN-CNR (*Institute for Ship Automation of the Italian National Research Council*), è costituita da una struttura tubolare in acciaio (diametro 600 mm), lunga 52 m: 37 m sono sommersi e 15 m sono fuori dall'acqua. La boa è ancorata a un fondale profondo 1270 m, tramite un cavo di ormeggio elastico lungo 1900 m che permette alla boa di muoversi intorno al punto di ormeggio per circa mezzo miglio nautico. Non è stata applicata alcuna vernice antivegetativa. I risultati sono mostrati in Figura 9.2, in termini di peso umido della biomassa in funzione della profondità dell'acqua, e possono essere riassunti come segue:

- Dopo 52 mesi, la boa ODAS è stata trasferita su un molo di cantiere e il *fouling* depositato lungo tutta la lunghezza di 37 m della parte immersa della boa è stato campionato lungo l'intero corpo, dalla superficie fino a -34 m di profondità. I valori del peso umido della biomassa variavano senza alcun *trend* coerente con l'aumento della profondità. Il valore più alto (20.8 g/dm²) è stato registrato a -20 m, mentre sulla superficie orizzontale del disco stabilizzatore (posto a -37 m), il valore massimo raggiunto è stato di 42.4 g/dm².
- Le ricerche sul *macrofouling* sulla boa ODAS hanno riguardato un periodo più lungo, di 70 mesi. Le cozze e altri bivalvi erano i componenti principali della popolazione di *macrofouling*. Dopo 70 mesi, la biomassa di incrostazione ha raggiunto i 28.1 g/dm² a -12 m e i 47.4 g/dm² a -33 m, in termini di peso umido.

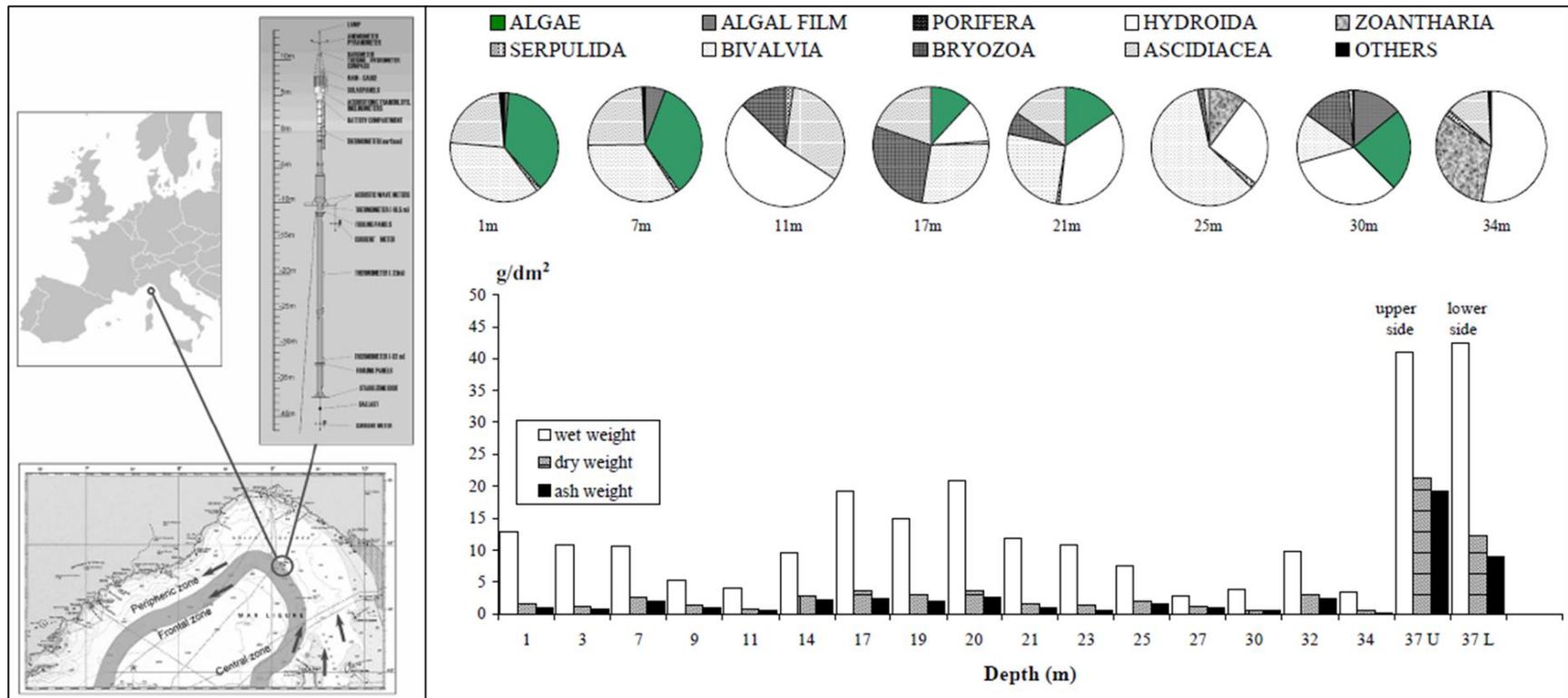


Figura 9.2: Pannello di sinistra: la boa ODAS Italia 1 e la sua posizione, a 43°48.90' N, 009°06.80' E, a 37 nm da Genova, su acque con 1270 m di profondità. Pannello di destra: caratterizzazione del *macrofouling* in funzione della profondità, da [60]. Parte in alto della figura: rappresentazione schematica dei componenti principali presenti nei campioni raccolti ad alcune profondità lungo il corpo verticale della boa. Parte in basso: pesi umido, secco, ash del *macrofouling* depositato in ciascuna zona del corpo della boa e del disco stabilizzatore

Marine growth su una struttura offshore fissa

Per i dati di crescita marina relative a strutture offshore fisse, si fa qui riferimento al lavoro di (Relini and Montanari, 1999b [61]). Questo lavoro include una sintesi esaustiva del *fouling* da parte delle specie mediterranee di mitili, preso atto che i mitili sono i principali *foulers* delle strutture offshore nei mari italiani. Il lavoro si basa su dati raccolti su piattaforme fisse situate nel Mar Adriatico (PCW-A e AGO-A), nel Mar Ionio (LUNA-A) e nel Mar Ligure (terminal petrolifero per super-petroliere, situato al largo del porto petrolifero di Genova-Multedo, di seguito GOLP).

I tassi di crescita della biomassa risultanti (in kg/m²) sono mostrati in Tabella 9.1. osservando la tabella si nota la grande differenza dell'accumulo di incrostazioni (principalmente mitili) tra l'Adriatico centrale e settentrionale, rispetto agli altri mari italiani. Tale grande differenza è dovuta alle diverse caratteristiche dell'acqua di mare, in particolare al contenuto di nutrienti. Gli autori hanno anche messo in evidenza che i valori di biomassa e i tassi di crescita registrati per i mitili nel Mar Adriatico sono i più alti mai riportati in letteratura.

Tabella 9.1: Sintesi dei dati di *fouling* su strutture offshore fisse nei mari italiani. Da [61].

Offshore Structure	PCW-A	AGO-A	LUNA-A	G.O.L.P.
Sea	Adriatic	Adriatic	Ionian	Thyrrhenian
Locality	Ravenna	Ravenna	Crotone	Genova
Distance from coast (km)	7	18	6	2.8
Depth bottom (m)	12	23	70	50
Level of sample	surface	surface	surface	surface
Substrate	panels	panels	panels	girders
Maximum age of mussels	12 months	12 months	12 months	12 months
No of mussels/12 dm ²	59,988	116,688	4,549	1,059
Maximum length (mm)	60	60	35	62
% of most common	94%	95.30%	78%	37.50%
Length class	(0-10 mm)	(0-10 mm)	(0-10 mm)	(20-30 mm)
Weight of mussels (g/12 dm ²)	10,391	11,600	654	3,129
Weight of mussels (kg/m ²)	86.6	96.6	5.4	26.1
Mussels as % of total fouling weight	95%	97%	80%	90%

I valori di crescita di biomassa in kg/m² potrebbero essere convertiti in tassi di crescita dello spessore (in mm/anno) se fossero disponibili misure di densità. Quando la densità del *biofouling* non è disponibile, si raccomanda di utilizzare lo standard di 1325 kg/m³, da **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Per una stima più precisa, la letteratura suggerisce di adottare questo valore (1325 kg/m³) per l'*hard fouling* e un valore più basso (1050 kg/m³) per il *soft fouling*.

Una sintesi dei dati di crescita della biomassa raccolti nei mari italiani estratti da [60][61] è riportata in Tabella 9.2, insieme a una stima dei tassi di crescita dello spessore derivati con un valore standard di densità di *biofouling* di 1325 kg/m³.

Tabella 9.2: Riepilogo della crescita della biomassa in kg/m² misurata su corpi galleggianti [60] e su strutture offshore fisse [61]. La tabella include anche i tassi di crescita stimati dello spessore in mm/anno ricavati assumendo i valori di densità del *fouling* come suggerito dalle linee guida standard [1] (1325 kg/m³).

		Reference	Bottom WD [m]	Ref. WD [m]	biomass growth rate [kg/m ² /year]	growth rate [mm/year] density = 1325 kg/m ³ ⁽³⁾
fouling and macrofouling on a floating body						
Ligurian Sea	ODAS	Relini et al. 1999a	1270	-11 to -20 ⁽¹⁾	2.08	1.6
				-37 ⁽¹⁾	4.24	3.2
				-12 ⁽²⁾	2.80	2.1
				-33 ⁽²⁾	4.74	3.6
mussels on fixed structures						
Ionian Sea	LUNA-A	Relini et al. 1999b	70	surf	5.4	4.1
Ligurian Sea	G.O.L.P.		50	-34	10.3	7.8
Adriatic Sea	PCW-A		12	surf	86.6	65.4
	AGO-A		23	surf	96.6	72.9
		⁽¹⁾ fouling; ⁽²⁾ macrofouling				
		⁽³⁾ according to [1]				

9.4 Discussione

Nella presente relazione è stato adottato il valore standard di densità del *biofouling*. Tuttavia, vale la pena notare che le indagini sul campo e la raccolta di dati potrebbero rivelare valori di densità molto diversi da quelli suggeriti dalle attuali linee guida standard di settore. Un esempio è il lavoro di (Coolen et al. 2019, [62]), nel quale gli autori hanno realizzato un modello di densità basato su osservazioni sul campo (21 campioni su 2 piattaforme offshore fisse situate nel Mare del Nord) sia di spessore (mm) sia di peso umido (kg/m²) del *biofouling*. Il modello di densità è stato creato come mostrato in Figura 9.3, prevedendo una densità generalizzata di 612 kg/m³, significativamente minore dal valore standard di 1325 kg/m³.

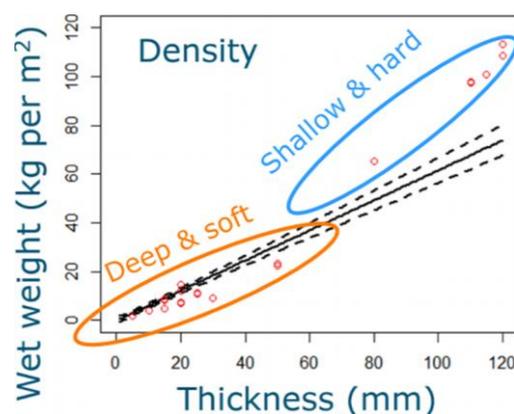


Figura 9.3: Modello di densità del *biofouling* da [62]

Dal punto di vista della progettazione ingegneristica, si stima che le linee guida standard portino generalmente a sovrastimare il peso del *biofouling* fino al 42%, secondo [63]. Assumendo questa sovrastima, i tassi di crescita dello spessore stimati della Tabella 9.2 aumentano, come riportato nella successiva Tabella 9.3.

Per la progettazione dell'HFOWF si suggerisce qui di fare riferimento agli spessori stimati riportati in Tabella 9.3, più precisamente al caso della boa ODAS, in quanto è il più simile al caso in esame, essendo un corpo galleggiante situato in acque profonde.

Vale la pena notare che i valori consigliati sono molto bassi rispetto a quelli suggeriti dalle regole standard (si veda [1]) per le aree del Mare del Nord. La comprensione del peso, del peso in acqua e della densità del *biofouling* associata alla sua massa è quindi evidenziata come informazione chiave, necessaria come supporto per il processo decisionale ingegneristico. Pertanto, sono fortemente consigliate indagini specifiche e raccolta di dati della crescita marina sul campo.

Tabella 9.3: Riepilogo della crescita della biomassa in kg/m² misurata su corpi galleggianti [60] e su strutture offshore fisse [61]. La tabella include anche i tassi di crescita stimati dello spessore in mm/anno derivati dall'assunzione di avere valori di densità sovrastimati del 42%, come suggerito da [63], corrispondenti a 768 kg/m³.

		Reference	Bottom WD [m]	Ref. WD [m]	biomass growth rate [kg/m ² /year]	growth rate [mm/year] density = 1325 kg/m ³ (3)	growth rate [mm/year] density = 768 kg/m ³ (4)
fouling and macrofouling on a floating body							
Ligurian Sea	ODAS	Relini et al. 1999a	1270	-11 to -20 ⁽¹⁾	2.08	1.6	2.7
				-37 ⁽¹⁾	4.24	3.2	5.5
				-12 ⁽²⁾	2.80	2.1	3.6
				-33 ⁽²⁾	4.74	3.6	6.2
mussels on fixed structures							
Ionian Sea	LUNA-A	Relini et al. 1999b	70	surf	5.4	4.1	7.0
Ligurian Sea	G.O.L.P.		50	-34	10.3	7.8	13.4
Adriatic Sea	PCW-A		12	surf	86.6	65.4	112.7
	AGO-A		23	surf	96.6	72.9	125.7
				⁽¹⁾ fouling; ⁽²⁾ macrofouling			
				⁽³⁾ according to [1]; ⁽⁴⁾ assuming 42% density overestimation according to [63]			

10 Conclusioni e suggerimenti

10.1 Conclusioni

Questo lavoro definisce le condizioni meteomarine e i parametri meteomarini di progetto valutati per il **Parco eolico offshore nel Canale di Sicilia**, situato al largo nel Canale di Sicilia, a circa 35 km a ovest dalla costa siciliana.

La base di dati per lo studio si è fondata sui dati meteomarini disponibili di 42 anni (1979-2020) per i venti e le onde, estratte dal database MWM di DHI. I dati hindcast idrodinamici per corrente 3D, livello del mare e temperatura/salinità sono estratti dai database CMEMS. Il confronto con i dati satellitari e le misurazioni disponibili hanno mostrato che tutti i modelli funzionano adeguatamente.

I dati di vento e onda sono stati analizzati in un punto (P1) situato a circa tre (3) km a ovest rispetto al sito del progetto, considerato rappresentativo delle condizioni del sito. Per quanto riguarda corrente e livello del mare, DHI ha combinato i dati CMEMS con quelli del modello *Global Tide* di DHI per tenere conto dell'influenza delle maree. I risultati delle analisi dei valori normali ed estremi sono considerati rappresentativi delle condizioni meteomarine del sito del progetto e applicabili per il FEED.

La regione del Mediterraneo è una delle regionali ciclogenetiche più attive del mondo. Questo studio fornisce una panoramica generale sui *medicanes*, comprese le loro caratteristiche statistiche, sulla base della letteratura disponibile, e fornisce anche una valutazione quantitativa delle potenziali altezze d'onda indotte nei pressi del sito di progetto da due medicane storiche di cui sono disponibili dei tentativi di "best-track". Si conclude che è improbabile che il passaggio di tempeste simil-tropicali sia determinante ai fini della stima delle onde estreme nell'area del Parco Eolico .

Questo report include anche una valutazione qualitativa del potenziale impatto previsto del Parco Eolico F sull'ambiente fisico, ivi incluso il campo del vento, il moto ondoso e le correnti, mostrando che l'effetto complessivo è probabilmente da lieve a moderato. La valutazione si è basata sulla letteratura recente e sui report degli Studi di Impatto Ambientale di vari progetti di parchi eolici offshore.

10.2 Suggerimenti

Validazione aggiuntiva e aggiornamento del report

È fortemente consigliato effettuare un confronto tra i dati del modello *hindcast* utilizzati in questo studio e della campagna lidar in corso (rilievi iniziati ad agosto 2021, che comprendono venti, onde e idrodinamica) per qualificare o aggiornare ulteriormente i parametri meteomarini di progettazione qui riportati. Questo richiederebbe (idealmente) di effettuare simulazioni aggiuntive con i modelli descritti, in modo da estendere i database sul periodo della campagna di misure. Si propone di riprendere questo argomento Q2 2022, al termine della stagione invernale.

Modellazione di *down-scaling*

In questo studio meteomarino sono stati utilizzati i migliori dati meteomarini disponibili a lungo termine provenienti da vari modelli regionali. Per migliorare ulteriormente la qualità dei dati e ridurre le incertezze ad essi associate, in particolare sui dati d'onda e di corrente nel sito di progetto , si suggerisce di implementare il *down-scaling* locale ad alta risoluzione delle condizioni al largo, da effettuarsi a seguito di un doveroso confronto tra i dati dei modelli regionali e quelli provenienti dalle misure lidar attualmente in corso.

Indagini sul marine growth

Nella presente relazione è stato adottato il valore standard della densità di *biofouling*. Tuttavia, vale la pena notare che le indagini e la raccolta di dati sul campo potrebbero rivelare valori reali di densità molto diversi da quelli suggeriti dalle attuali linee guida standard del settore. Dal punto di vista della progettazione ingegneristica, le linee guida standard portano generalmente a sovrastime del peso del *biofouling* del 42%. La comprensione del peso, del peso in acqua e della densità del *biofouling* associata alla sua massa è quindi evidenziata come informazione chiave, necessaria come supporto per il processo decisionale ingegneristico [63]. Pertanto, sono fortemente consigliate indagini specifiche e raccolta di dati per caratterizzare il marine growth sul campo.

11 Riferimenti

- [1] DNV-GL, “DNVGL-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads, 19th Edition, December 2020,” DNV-GL, 2020.
- [2] S. Saha, S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y. Hou, H. Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, M. Peña Mendez, H. van den Dool, Q. Zhang, W. Wang, M. Chen and E. Becker, “The NCEP Climate Forecast System Version 2,” *Journal of Climate*, vol. 27, pp. 2185-2208, 2014.
- [3] <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-004.pdf>
- [4] Zecchetto, S., & De Biasio, F. (2007). Sea Surface Winds over the Mediterranean Basin from Satellite Data (2000–04): Meso- and Local-Scale Features on Annual and Seasonal Time Scales, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(6), 814-827.
- [5] Alain Saliot Editor, 2007, “The Mediterranean Sea”, Springer
- [6] Hopkins, T. S.: Physical processes in the Mediterranean basins, University of South Carolina Press., 269–310, 1978.
- [7] Millot, C. and Taupier-Letage, I., 2005, “Circulation in the Mediterranean Sea”, *The Mediterranean Sea in Handbook of Environmental Chemistry*, Springer Berlin, ISBN: 978-3-540-25018-0, Vol. 5k: 29–66.
- [8] Manzella, G. M. R.: The seasonal variability of the water masses and transport through the Strait of Sicily, *Coastal and Estuarine Studies*, 46, 33–450, 1994
- [9] Grancini, G. F. and Michelato, A.: Current structure and variability in the Strait of Sicily and adjacent area, *Ann. Geophysicae*, 5B, 75–88, 1987
- [10] Poulain, P. M.: Lagrangian measurements of the surface circulation in the Adriatic and Ionian Seas between November 1994 and March 1997, *Rapp. Comm. Int. Mer Medit.*, 35, 190–191, 1998
- [11] K Béranger, L Mortier, G.-P Gasparini, L Gervasio, M Astraldi, M Crépon, The dynamics of the Sicily Strait: a comprehensive study from observations and models, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Volume 51, Issues 4–5, 2004, Pages 411-440, ISSN 0967-0645, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.08.004>.
- [12] Sparnocchia, S.; Vetrano, A.; Mazzola, S.. 2004 Tidal and subtidal currents in the Strait of Sicily. *Journal of Geophysical Research*, 109 (C2). C02011. <https://doi.org/10.1029/2003JC002011>
- [13] Mosetti, F. (1987), Distribuzione delle maree nei mari italiani, *Boll. Oceanol. Teor. Appl.*, 5, 65 – 71
- [14] L. Sartini, G. Besio, F. Cassola, Spatio-temporal modelling of extreme wave heights in the Mediterranean Sea, *Ocean Modelling*, Volume 117, 2017, Pages 52-69, ISSN 1463-5003, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.07.001>.
- [15] P. Tromans and V. L., “Response Based Design Conditions in the North Sea: Application of a New Method,” in *Offshore Technology Conference Texas, USA May 1995*, Texas, 1995.
- [16] G. Z. Forristall, “On the Statistical Distribution of Wave Heights in a Storm,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, no. C5, pp. 2353-2358, 1978.
- [17] G. Z. Forristall, “Wave Crest Distributions: Observations and Second-Order Theory,” *Journal of Geophysical Research*, vol. 30, no. 8, pp. 1931-1943, 2000.
- [18] Warn-Varnas, A., Sellschops, J., Haley, Jr., P. J., Leslie, W. G., and Lozano, C. J.: Strait of Sicily water masses, *Dyn. Atmosph. Oceans*, 29h, 437–469, 1999

- [19] Sorgente, R., Drago, A. F., and Ribotti, A.: Seasonal variability in the Central Mediterranean Sea circulation, *Ann. Geophys.*, 21, 299–322, <https://doi.org/10.5194/angeo-21-299-2003>, 2003
- [20] Manzella, G. M. R., Hopkins, T. S., Minnett, P. J., and Nacini, E. (1990), Atlantic water in the strait of Sicily, *J. Geophys. Res.*, 95(C2), 1569– 1575, doi:10.1029/JC095iC02p01569.
- [21] Astraldi, M., Balopoulos, S., Candela, J., Font, J., Gacic, M., Gasparini, G. P., Manca, B., and Theocharis, A.: The role of straits and channels in understanding the characteristics of Mediterranean circulation, *Progress in Oceanography*, 44, 65–108, 1999.
- [22] Astraldi, M., Gasparini, G. P., Sparnocchia, S., Moretti, M., and Sansone, E.: The characteristics of the water masses and the water transport in the Sicily Strait at long time scales the eastern and western Mediterranean through the Strait of Sicily, *Bulletin de l'Institut Oceanographique, Monaco, CIESM Science Series n 2*, 95–115, 1996.
- [23] Sparnocchia, S., Gasparini, G. P., Astraldi, A., Borghini, M., and Pistek, P.: Dynamics and mixing of the Eastern Mediterranean outflow in the Tyrrhenian Sea, *J. Marine Systems*, 20, 301–317, 1999.
- [24] Robinson, A. R., Sellschopp, J., Warn-Varnas, A., Anderson, L. A., and Lermusiaux, P. F. J.: The Atlantic Ionian Stream, *J. Marine Systems*, 20, 129–156, 1999.
- [25] D. L. Codiga, »Unified Tidal Analysis and Prediction Using the U-Tide Matlab Functions. Technical Report 2011-01, « Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp, 2011.
- [26] R. Pawlowicz, B. Beardsley og S. Lentz, »Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE, « *Computers & Geosciences* 28, pp. 929-937, 2002
- [27] K. E. Leffler og D. A. Jay, »Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L-1/L-2) solutions, « *Cont. Shelf Res.* 29, pp. 78-88. DOI: 10.1016/j.csr.2008.1004.1011, 2009
- [28] M. G. G. Foreman, J. Y. Cherniawsky og V. A. Ballantyne, »Versatile Harmonic Tidal Analysis: Improvements and Applications., « *J. Atmos. Oceanic Tech.* 26, pp. 806-817. DOI: 810.1175/2008JTECHO1615.1171, 2009
- [29] ISO 19901-1 Petroleum and Natural Gas Industries - Specific requirements for offshore structures - Part 1: Metocean design and operating considerations, 2015.
- [30] IEC, "International Standard, IEC 61400-3-1 ED1, IEC TC 88: Wind Energy Generation Systems, Part 3-1: Design requirements for offshore wind turbines, Edition 1.0 2019," 2019.
- [31] Homar, V., Romero, R., Stensrud, D. J., Ramis, C., and Alonso, S.: Numerical diagnosis of a small, quasi-tropical cyclone over the western Mediterranean: Dynamical vs. boundary factors, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129, 1469–1490, 2003
- [32] Gaertner, M. Á., González-Alemán, J. J., Romera, R., Domínguez, M., Gil, V., Sánchez, E., Gallardo, C., Miglietta, M. M., Walsh, K. J., Sein, D. V., Somot, S., Dell'Aquila, A., Teichmann, C., Ahrens, B., Buonomo, E., Colette, A., Bastin, S., van Meijgaard, E., and Nikulin, G.: Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean–atmosphere coupling and increased resolution, *Clim. Dynam.*, 51, 1041–1057, 2018
- [33] Miglietta, M. M., Moscatello, A., Conte, D., Mannarini, G., Lacorata, G., and Rotunno, R.: Numerical analysis of a Mediterranean “hurricane” over south-eastern Italy: Sensitivity experiments to sea surface temperature, *Atmos. Res.*, 101, 412–426, 2011.
- [34] Miglietta, M. M. and Rotunno, R.: Development mechanisms for Mediterranean tropical-like cyclones (medicanes), *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 145, 1444–1460, 2019
- [35] Pravia-Sarabia, E., Gómez-Navarro, J. J., Jiménez-Guerrero, P., and Montávez, J. P.: TITAM (v1.0): The Time-Independent Tracking Algorithm for Medicanes, *Geosci. Model Dev.*, 13, 6051–6075, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-6051-2020>, 2020.

- [36] Anthes, R. A., Corell, R. W., Holland, G., Hurrell, J. W., Mac-Cracken, M. C., and Trenberth, K. E.: Hurricanes and Global Warming—Potential Linkages and Consequences, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 87, 623–628, 2006.
- [37] Shen, B.-W., Atlas, R., Reale, O., Lin, S.-J., Chern, J.-D., Chang, J., Henze, C., and Li, J.-L.: Hurricane forecasts with a global mesoscale-resolving model: Preliminary results with Hurricane Katrina (2005), *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13813, <https://doi.org/10.1029/2006GL026143>, 2006.
- [38] Tous, M. and Romero, R.: Meteorological environments associated with medicane development, *Int. J. Climatol.*, 33, 1–14, <https://doi.org/10.1002/joc.3428>, 2013.
- [39] Nastos, P., Karavana-Papadimou, K., and Matzangouras, I.: Tropical-like cyclones in the Mediterranean: Impacts and composite daily means and anomalies of synoptic conditions, in: *Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology*, 3–5, 2015.
- [40] Cavicchia, L. and von Storch, H.: The simulation of medicanes in a high-resolution regional climate model, *Clim. Dynam.*, 39, 2273–2290, 2012.
- [41] Cavicchia, L., von Storch, H. & Gualdi, S. A long-term climatology of medicanes. *Clim Dyn* 43, 1183–1195 (2014).
- [42] Cavicchia, L., von Storch, H., & Gualdi, S. (2014). Mediterranean Tropical-Like Cyclones in Present and Future Climate, *Journal of Climate*, 27(19), 7493-7501.
- [43] González-Alemán, J. J., Pascale, S., Gutierrez-Fernandez, J., Murakami, H., Gaertner, M. A., & Vecchi, G. A. (2019). Potential increase in hazard from Mediterranean hurricane activity with global warming. *Geophysical Research Letters*, 46, 1754-1764.
- [44] Romero, R., and K. Emanuel (2013), Medicane risk in a changing climate, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 5992–6001, doi:10.1002/jgrd.50475.
- [45] Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J. et al. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* 109, 77 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- [46] Holland, G. J., 1980. An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes. *Monthly Weather Review*, Vol.108
- [47] I. Pytharoulis, Analysis of a Mediterranean tropical-like cyclone and its sensitivity to the sea surface Temperatures, *Atmospheric Research*, Volume 208, 2018, Pages 167-179, ISSN 0169-8095, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.08.009>.
- [48] Main Page, https://medicanecentre.org/wiki/index.php?title=Main_Page&oldid=2011 (last visited August 27, 2021).
- [49] Farr, H., Ruttenberg, B., Walter R.K., Wang, Y-H., White, C., 2021 Potential environmental effects of deepwater floating offshore wind energy facilities, *Ocean & Coastal Management*, 207, 16pp, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105611>
- [50] Christensen, E.D., Johnson, M., Sørensen, O.R., Hasager, C.B., Badger, M., Larsen, S.E., 2013. Transmission of wave energy through an offshore wind turbine farm. *Coast Eng.* 82, 25–46. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.004>
- [51] Akhtar, N., Geyer, B., Rockel, B. et al., 2021. Accelerating deployment of offshore wind energy alter wind climate and reduce future power generation potentials. *Sci Rep* 11, 11826. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91283-3>
- [52] Christiansen, M.B., Hasager, C.B., 2005. Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR. *Rem. Sens. Environ.* 98, 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.009>

- [53] Hasager, C. B., Rasmussen, L., Peña, A., Jensen, L. E., & Réthoré, P-E., 2013. Wind Farm Wake: The Horns Rev Photo Case. *Energies*, 6, 696-716. <https://doi.org/10.3390/en6020696>
- [54] van Berkel, J., Burchard, H., Christensen, A., Mortensen, L.O., Petersen, O.S., and Thomsen, F., 2020 The effects of offshore wind farms on hydrodynamics and implications for fishes. *Oceanography* 33(4):108–117, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.410>
- [55] ICF. 2020. Comparison of Environmental Effects from Different Offshore Wind Turbine Foundations. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Headquarters, Sterling, VA. OCS Study BOEM 2020-041. 42 pp. <https://www.boem.gov/sites/default/files/documents/environment/Wind-Turbine-Foundations-White%20Paper-Final-White-Paper.pdf>
- [56] N. J. Heaf, »The effect of marine growth on the performance of fixed offshore platforms in the North Sea,« Offshore Technology Conference, (1979, January)
- [57] Woods Hole Oceanographic Institution [WHOI]. 1952. Marine fouling and its prevention. Annapolis, MD: United States Naval Institute
- [58] NORSOK Standard – N003, Actions and action effects, 2012
- [59] Hunsucker J T, Quantification of frictional drag due to biofouling on in-service ships, Master of Science Ocean Engineering Florida Institute of Technology 2011
- [60] Relini G., Montanari M., Moschella P. and Siccardi A., Macrofouling of an Oceanographic Buoy in the Ligurian Sea (Western Mediterranean), 10th International Congress on Marine Corrosion and Fouling University of Melbourne, February 1999a
- [61] Relini G., Montanari M. Macrofouling Role of Mussels in Italian Seas: A Short Review. 10th International Congress on Marine Corrosion and Fouling University of Melbourne, February 1999b
- [62] Coolen J.W.P., Luís P. Almeida L.P., Olie R., Modelling marine growth biomass on North Sea offshore structures, Structures in the Marine Environment (SIME2019), May 2019
- [63] Miller, R.G. and Macleod, A. K. (2016). Marine Growth Mapping and Monitoring: Feasibility of Predictive Mapping of Marine Growth. A report by SAMS Research Services Ltd to the Offshore Renewable Energy Catapult. Glasgow, UK. 51 pp

APPENDICES

APPENDIX A – Model Quality Indices

A Model Quality Indices

To obtain an objective and quantitative measure of how well the model data compared to the observed data, a number of statistical parameters so-called quality indices (QI's) are calculated.

Prior to the comparisons, the model data are synchronised to the time stamps of the observations so that both time series had equal length and overlapping time stamps. For each valid observation, measured at time t , the corresponding model value is found using linear interpolation between the model time steps before and after t . Only observed values that had model values within \pm the representative sampling or averaging period of the observations are included (e.g., for 10-min observed wind speeds measured every 10 min compared to modelled values every hour, only the observed value every hour is included in the comparison).

The comparisons of the synchronised observed and modelled data are illustrated in (some of) the following figures:

- Time series plot including general statistics
- Scatter plot including quantiles, QQ-fit and QI's (dots coloured according to the density)
- Histogram of occurrence vs. magnitude or direction
- Histogram of bias vs. magnitude
- Histogram of bias vs. direction
- Dual rose plot (overlapping roses)
- Peak event plot including joint (coinciding) individual peaks

The quality indices are described below, and their definitions are listed in Table A1. Most of the quality indices are based on the entire data set, and hence the quality indices should be considered averaged measures and may not be representative of the accuracy during rare conditions.

The MEAN represents the mean of modelled data, while the bias is the mean difference between the modelled and observed data. AME is the mean of the absolute difference, and RMSE is the root mean square of the difference. The MEAN, BIAS, AME and RMSE are given as absolute values and relative to the average of the observed data in percent in the scatter plot.

The scatter index (SI) is a non-dimensional measure of the difference calculated as the unbiased root-mean-square difference relative to the mean absolute value of the observations. In open water, an SI below 0.2 is usually considered a small difference (excellent agreement) for significant wave heights. In confined areas or during calm conditions, where mean significant wave heights are generally lower, a slightly higher SI may be acceptable (the definition of SI implies that it is negatively biased (lower) for time series with high mean values compared to time series with lower mean values (and same scatter/spreading), although it is normalised).

EV is the explained variation and measures the proportion $[0 - 1]$ to which the model accounts for the variation (dispersion) of the observations.

The correlation coefficient (CC) is a non-dimensional measure reflecting the degree to which the variation of the first variable is reflected linearly in the variation of the second variable. A value close to 0 indicates very limited or no (linear) correlation between the two data sets, while a value close to 1 indicates a very high or perfect correlation. Typically, a CC above 0.9 is considered a high correlation (good agreement) for wave heights. It is noted that CC is 1 (or -1) for any two fully linearly correlated variables, even if they are not 1:1. However, the slope and intercept of the linear relation may be different from 1 and 0, respectively, despite CC of 1 (or -1).

The Q-Q line slope and intercept are found from a linear fit to the data quantiles in a least-square sense. The lower and uppermost quantiles are not included on the fit. A regression line slope different from 1 may indicate a trend in the difference.

The peak ratio (PR) is the average of the N_{peak} highest model values divided by the average of the N_{peak} highest observations. The peaks are found individually for each data set through the Peak-Over-Threshold (POT) method applying an average annual number of exceedances of 4 and an inter-event time of 36 hours. A general underestimation of the modelled peak events results in PR below 1, while an overestimation results in a PR above 1.

An example of a peak plot is shown in Figure A1. 'X' represents the observed peaks (x-axis), while 'Y' represents the modelled peaks (y-axis), both represented by circles ('o') in the plot. The joint (coinciding) peaks, defined as any X and Y peaks within ± 36 hours¹⁰ of each other (i.e., less than or equal to the number of individual peaks), are represented by crosses ('x'). Hence, the joint peaks ('x') overlap with the individual peaks ('o') only if they occur at the same time exactly. Otherwise, the joint peaks ('x') represent an additional point in the plot, which may be associated with the observed and modelled individual peaks ('o') by searching in the respective X and Y-axis directions, see example with red lines in Figure A1. It is seen that the 'X' peaks are often underneath the 1:1 line, while the 'Y' peaks are often above the 1:1 line.

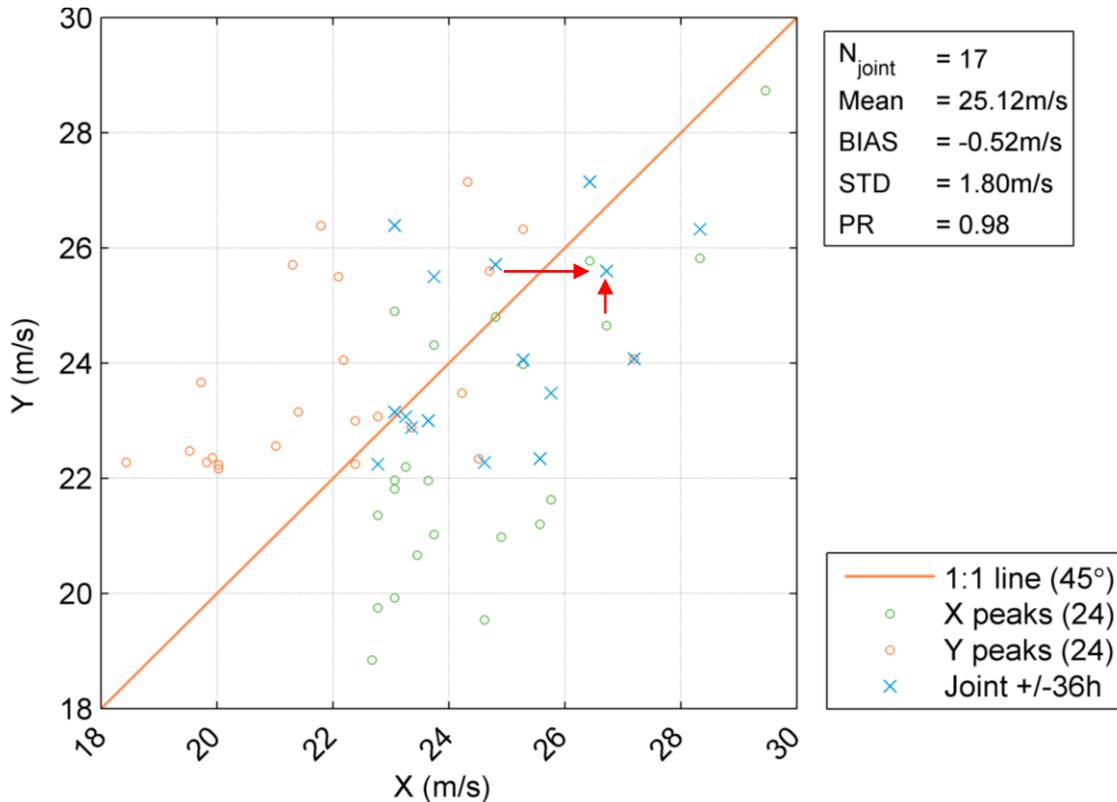


Figure A1 Example of peak event plot (wind speed)

¹⁰ 36 hours is chosen arbitrarily as representative of an average storm duration. Often the observed and modelled storm peaks are within 1-2 hours of each other.

Table A1 Definition of model quality indices (X = Observation, Y = Model)

Abbreviation	Description	Definition
N	Number of data (synchronised)	–
MEAN	Mean of Y data, Mean of X data	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \equiv \bar{Y}$, $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \equiv \bar{X}$
STD	Standard deviation of Y data Standard deviation of X data	$\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y - \bar{Y})^2}$, $\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X - \bar{X})^2}$
BIAS	Mean difference	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - X)_i = \bar{Y} - \bar{X}$
AME	Absolute mean difference	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - X)_i$
RMSE	Root mean square difference	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - X)_i^2}$
SI	Scatter index (unbiased)	$\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y - X - \text{BIAS})_i^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i }$
EV	Explained variance	$\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 - \sum_{i=1}^N [(X_i - \bar{X}) - (Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$
CC	Correlation coefficient	$\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$
QQ	Quantile-Quantile (line slope and intercept)	Linear least square fit to quantiles
PR	Peak ratio (of N_{peak} highest events)	$\text{PR} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{peak}}} Y_i}{\sum_{i=1}^{N_{\text{peak}}} X_i}$

APPENDIX B – Extreme Value Analysis

