REGIONE LIGURIA

PIANO DI TUTELA DELL'AMBIENTE MARINO E COSTIERO

AMBITO COSTIERO 08

Unità fisiografiche del Centa, Centa Sud e Maremola

ART. 41 LEGGE REGIONALE N° 20/2006

Relazione sulla modellazione di propagazione del moto ondoso da largo verso costa (RM)

REGIONE LIGURIA

Indice

1. Premessa 3

2. Il modello matematico MIKE21 4

2.1. Cos'è il modello 4

2.2. Cosa fa il modello 4

2.3. Dati di input del modello 5

3. Applicazione del modello all'Ambito Costiero 08 unità fisiografiche: Centa Sud, Centa e Maremola 8

3.1. Analisi dei dati batimetrici a disposizione 10

3.2. Valori caratteristici delle onde nei pressi delle stazioni di calcolo 10

3.3. Analisi dei risultati 23

3.4. Frangimento delle onde 25

4. Conclusioni della modellazione a larga scala 26

1. Premessa

La presente relazione tematica, propedeutica alla redazione del Piano di Tutela dell'ambiente marino e costiero, si pone lo scopo di individuare, mediante un modello matematico, l'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva all'interno dell'Ambito di studio, comprendente le unità fisiografiche Centa Sud, Centa e Maremola.
Lo studio è stato effettuato utilizzando il pacchetto modellistico MIKE 21 Spectral Waves (SW) di DHI (Danish Hydraulic Institute). Il modello numerico è in grado di simulare l'effetto delle mareggiate di riferimento, determinate dall'analisi del clima ondoso al largo, sul litorale dell'Ambito Costiero 08, in termini di distribuzione dei campi di altezza d'onda, andamento delle correnti litoranee, individuazione dell'area dei frangenti.
L'input al modello è rappresentato dall'onda al largo, come descritto nella relazione tematica "Relazione sul clima ondoso al largo". Sono state analizzate le onde caratteristiche per i periodi di ritorno pari a 1 anno e 50 anni e le loro propagazioni da largo verso riva. Per i vari periodi di ritorno, il modello numerico fornisce in output i dati caratteristici del moto ondoso in tutti i punti del dominio simulato (altezza, periodo e direzione dell'onda, e altre grandezze energetiche associate al moto ondoso).
Questa impostazione metodologica, e la relativa simulazione del modulo MIKE21 SW, è stata eseguita dapprima a larga scala e successivamente riscalata alla risoluzione di dettaglio per ogni singolo paraggio. Per riuscire a simulare le dinamiche costiere nei paraggi occorre un'alta risoluzione della maglia (mesh) di calcolo, si è resa pertanto necessaria la divisione dell'Ambito Costiero 08 in modelli di dettaglio opportuni.
Con riferimento alle batimetrie introdotte nel modello, si è proceduto ad un'operazione di unione dei rilievi disponibili per le aree modellate: in particolare, per la zona più sotto costa è stato utilizzato il rilievo di dettaglio MultiBeam effettuato nel 2012, mentre per le zone più esterne del dominio di calcolo si è fatto riferimento alle isobate dell'Istituto Idrografico della Marina.
Il modello "esteso", è stato implementato su un dominio di calcolo sufficientemente ampio da comprendere tutta la zona di interesse per l'Ambito Costiero 08, da Punta di Caprazoppa al porto turistico di Alassio e si estende fino ad una profondità di -100 m circa. Tale modello esteso è stato utilizzato esclusivamente per simulare i processi di trasformazione del moto ondoso (modulo MIKE21 SW). La risoluzione del modello, intesa come dimensione media dei triangoli della mesh, varia dai 500 m al largo ai 30 m sotto costa.
Per il modello "di dettaglio", implementato su un'area molto più ridotta, è stata utilizzata una dimensione minima della maglia di calcolo molto più fine (fino a 5m), che consente di risolvere al meglio i processi di trasformazione del moto ondoso fino ad apprezzare il fenomeno di frangimento (MIKE21-SW) e parallelamente, effettuare una modellazione idrodinamica delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso (MIKE 21 HD).
La scelta della risoluzione della *mesh* di calcolo ha potuto usufruire del grande vantaggio tipico dei modelli a maglia flessibile, ovvero quello di poter variare significativamente le dimensioni degli elementi di calcolo (triangoli) in funzione della zona di interesse e dei fenomeni che si intendono modellare. Si è potuto pertanto limitare il numero degli elementi riducendo la risoluzione dei triangoli laddove la profondità dell'acqua garantiva l'assenza di significativi processi di trasformazione dell'onda e idrodinamici.

2. Il modello matematico MIKE21

2.1. Cos'è il modello

L'analisi dell'evoluzione del moto ondoso e delle trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione verso costa è stata condotta mediante un modello numerico bidimensionale: il modulo Spectral Waves (SW) del codice di calcolo MIKE 21 di DHI (Danish Hydraulic Institute). Il pacchetto MIKE 21 dispone di diverse versioni che si differenziano in base alle schematizzazioni geometriche, la licenza utilizzata è quella di cui si è dotata ARPAL, con la versione ai volumi finiti e maglia flessibile (Flexible Mesh) che offre la possibilità di condurre simulazioni integrate tra diversi moduli, simulando quindi la mutua influenza delle diverse fenomenologie considerate quali onde, correnti, trasporto solido.
La propagazione del moto ondoso viene modellata con algoritmi di calcolo che simulano le trasformazioni delle grandezze spettrali del moto ondoso (principalmente, gli effetti dissipativi dovuti ai frangimenti, all'attrito con il fondo, agli effetti di rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni batimetriche.
MIKE 21 SW include due differenti formulazioni: "Directional decoupled parametric" e "Fully spectral". La prima delle due formulazioni è basata su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'energia del moto ondoso. La parametrizzazione è effettuata nel dominio della frequenza mediante l'introduzione come variabili dipendenti del momento di ordine zero e del momento di primo ordine dello spettro (Holthuijsen, 1989). La seconda formulazione è basata sulla conservazione dell'energia del moto ondoso come descritta da Komen (1994) e Young (1999). I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- Generazione dell'onda ad opera del vento;
- Interazione non lineare tra le onde;
- Dissipazione dovuta al cosiddetto "white capping"
- Dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- Dissipazione dovuta al frangimento;
- Rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni del fondale;
- Interazione onde-correnti;
- Diffrazione;
- Riflessione semplice;
- Frangimento.

I passi di un'indagine tipo consistono in:
- acquisizione ed importazione dei dati (ondametrici, batimetrici e immagini georiferite);
- analisi del clima ondoso al largo;
- individuazione delle classi (Hs, Tp, MWD);
- costruzione della mesh di calcolo;
- setup del modello SW;
- analisi e visualizzazione dei risultati.

2.2. Cosa fa il modello

MIKE 21 SW è un modello spettrale per vento ed onde di nuova generazione, basato su una griglia non strutturata. Il modello simula la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.
Il processo di propagazione dell'onda si risolve considerando l'equazione di bilancio dell'energia associata al moto ondoso che tiene in conto i diversi contributi: la variazione nel tempo, la propagazione nello spazio, la variazione nella direzione, la variazione nel dominio delle frequenze e i termini sorgente. I termini sorgente sono fenomeni fisici che contribuiscono alla variazione dell'energia del moto ondoso sia in senso negativo sia in senso positivo. I termini sorgente negativi sono i fenomeni che hanno una funzione dissipativa, come quelli sopra elencati, i termini positivi sono invece quelli che svolgono una funzione di accrescimento, come la generazione del moto ondoso per effetto del vento.

Il modello descrive l'evoluzione delle caratteristiche delle onde (altezza, periodo, direzione e forma spettrale) nella propagazione dal largo verso riva in seguito ai fenomeni di rifrazione e shoaling indotti dalla profondità e dalle correnti, di frangimento, di diffrazione, di interazione tra le onde e di whitecapping.
Le simulazioni effettuate con MIKE 21 SW permettono di ottenere una dettagliata rappresentazione della distribuzione dell'altezza d'onda significativa in tutto il dominio di calcolo, con particolare attenzione alla zona più prossima alla spiaggia, laddove la risoluzione spaziale della mesh di calcolo è pari a circa 5m (lunghezza media dei lati dei triangoli che compongono la mesh).
L'osservazione dei risultati del modello risulta di interesse nella valutazione dei processi di propagazione del moto ondoso dovuti alle variazioni batimetriche. In particolare si può affermare che, data l'elevata profondità del fondale, non si avverte una concreta riduzione dell'altezza d'onda per effetto della rifrazione. In tutte le condizioni le onde dissipano buona parte dell'energia per effetto del frangimento determinando di conseguenza valori di altezza d'onda significativa abbastanza elevati in prossimità della spiaggia.
Durante la propagazione verso la costa l'onda subisce diverse trasformazioni; una delle trasformazioni più rilevanti nello studio delle dinamiche costiere è il processo di *rifrazione:* la rotazione del fronte d'onda che tende a disporsi parallelo alle isobate ed alla linea di costa è in grado di determinare l'insorgenza di sforzi di taglio al fondo (*radiation stress*). I gradienti dei *radiation stress,* massimi in corrispondenza del frangimento, sono i responsabili della generazione delle correnti litoranee. A parità di direzione di incidenza dell'onda, i gradienti di *radiation stress,* e quindi le correnti litoranee*,* sono tanto più elevati quanto maggiore è l'altezza d'onda al frangimento. A parità di altezza d'onda al frangimento, i gradienti di *radiation stress,* e quindi le correnti litoranee*,* sono tanto più elevati quanto maggiore è l'angolo di incidenza tra il fronte d'onda e le isobate.
Per studiare in dettaglio la generazione della corrente litoranea indotta dal moto ondoso, le mareggiate di riferimento sono state simulate utilizzando un modello numerico bidimensionale, il modulo HD (Hydrodynamics) del codice di calcolo MIKE 21 di DHI. Il modello è stato forzato dai campi di *radiation stress* ottenuti attraverso l'applicazione del modello d'onda MIKE 21 SW precedentemente illustrato.
Il software MIKE può inoltre eseguire direttamente il calcolo del frangimento solo ad elevate risoluzioni avendo a disposizione un rilievo di dettaglio del fondale in esame, sfruttando la grandezza statistica "Breaking Index".
Nell'analisi di dettaglio vengono quindi fornite le altezze d'onda in punti specifici individuati sotto costa e le profondità al frangimento.
Per una completa descrizione delle equazioni numeriche utilizzate dal modello durante l'elaborazione si rimanda al manuale del software scaricabile al link:
http://www.mikebydhi.com/~/media/Microsite_MIKEbyDHI/Publications/PDF/Short%20descriptions/MIKE21_SW_FM_Short_Description.ashx

2.3. Dati di input del modello

I primi passi da affrontare nell'ambito della modellazione sono la costruzione della griglia di calcolo a partire dai dati batimetrici/topografici dell'area oggetto di studio e la definizione dello spettro bidimensionale.
I principali passi che compongono la messa a punto del modello sono i seguenti.

- Individuazione spaziale dei punti rappresentativi dei parametri d'onda al largo su profondità di circa 100 metri, da fornire come input ai modelli sul contorno di largo del modello (offshore boundary conditions);
- definizione della linea di costa con punti equidistanti: particolare attenzione deve essere posta in corrispondenza delle strutture di protezione del litorale in modo da riprodurre una linea di costa quanto più coerente alla realtà;
- georeferenziazione immagini da sovrapporre alla linea di costa per verificare la conformità della costa e del boundary offshore;
- definizione delle condizioni al contorno: le boundary offshore e laterali devono essere inserite in modo coerente all'esposizione del paraggio in esame e al numero di elementi supportabili dal modello;

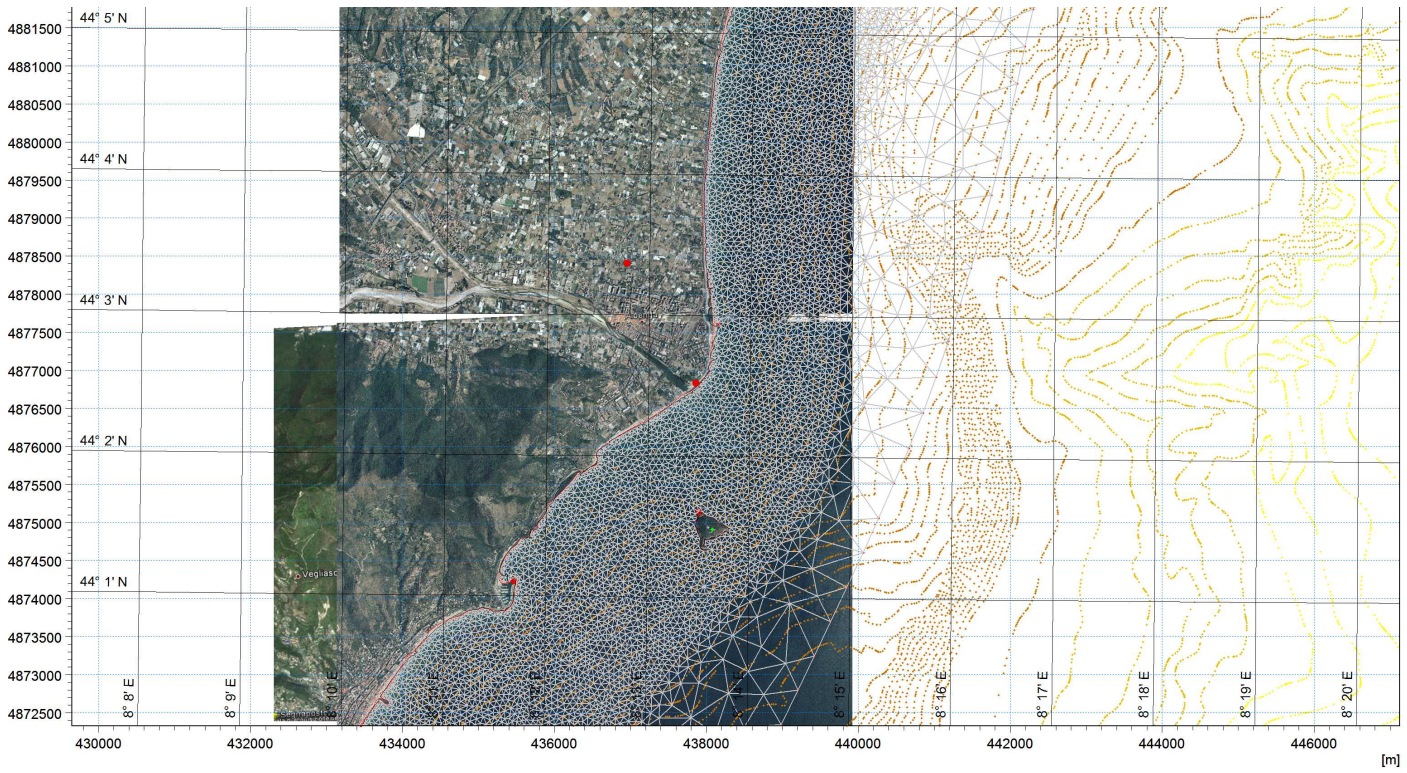


Figura 1 Mesh di calcolo (Centa)

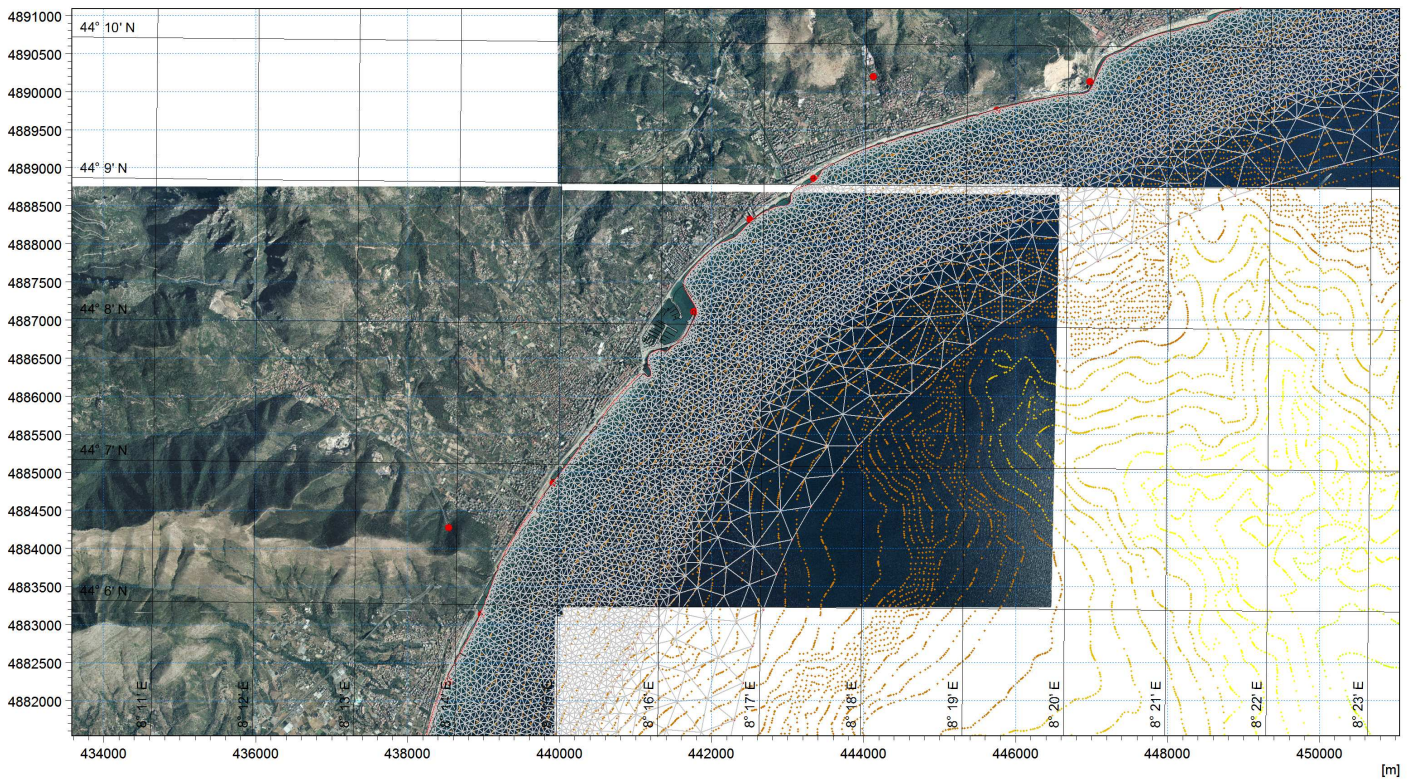


Figura 2 Mesh di calcolo (Maremola)

- costruzione della mesh di calcolo e interpolazione sulle batimetriche: il risultato costituisce l'input batimetrico rappresentativo dello specchio di interesse. La costruzione della mesh di calcolo consente di realizzare una griglia di calcolo variabile, distinguendo da un dominio più ampio al largo e più dettagliato sotto costa, in corrispondenza dei rilievi batimetrici di dettaglio. La griglia variabile consente di affinare le zone a risoluzione diversa distinte in base all'influenza della geometria dei fondali e dell'orografia costiera sulle variabili della propagazione del moto ondoso. Un esempio schematico di griglia è rappresentato nelle Figure 1 e 2.
- Set-up del modello: all'interno del file di simulazione si inseriscono tutte le impostazioni relative alle diverse componenti da considerare. Per tutte le simulazioni eseguite è stato utilizzato l'algoritmo di calcolo in modalità disaccoppiata in cui lo spettro è discretizzato nelle direzioni e parametrizzato nelle frequenze, formulazione sufficiente per i modelli alla scala considerata e per le applicazioni in cui domina il mare completamente sviluppato senza considerare ulteriori forzanti meteorologiche.

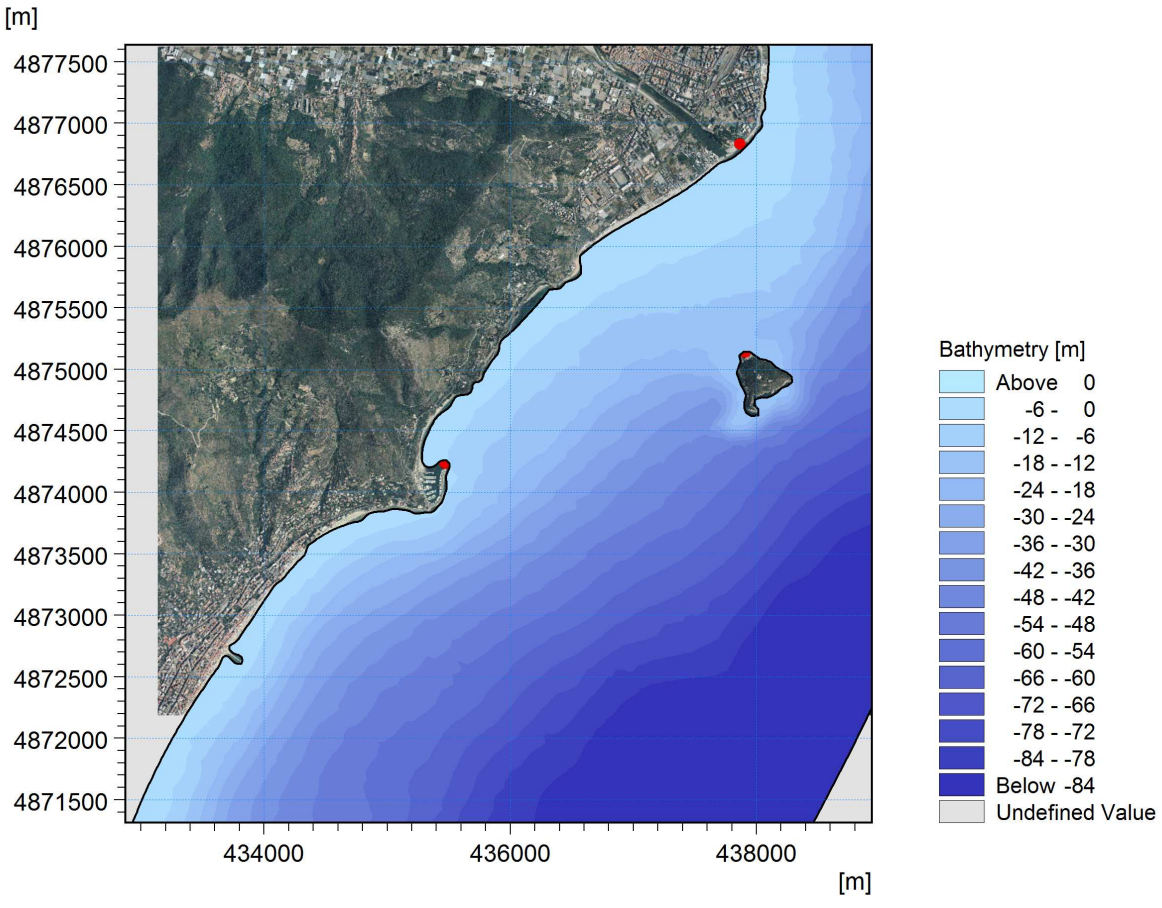


Figura 3 Interpolazione batimetriche (Centa)

Per la modellazione della propagazione del moto ondoso è stato utilizzato come input un’onda stazionaria con i parametri di altezza, direzione e periodo caratteristici del moto ondoso incidente al periodo di ritorno in esame.

3. Applicazione del modello all'Ambito Costiero 08 unità fisiografiche: Centa Sud, Centa e Maremola

Il modello sopra descritto è stato applicato all'Ambito Costiero 08 al fine di definire l'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva.
La griglia di input per la modellazione al largo è stata costruita sulla base delle isobate derivate dal modello dei fondali del Mare Mediterraneo prodotto dall'Istituto Idrografico della Marina.
Si sono forniti come input ai modelli le onde stazionarie corrispondenti a prefissati periodi di ritorno definite da altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione di provenienza.
Al fine di validare i dati di input al modello, è stata simulata l'azione del vento sull'intero Mar Ligure, in particolare tale simulazione ha permesso di associare il periodo di ritorno e di altezza d'onda ad un valore di velocità del vento di input. I risultati di questa analisi hanno inoltre permesso di capire il comportamento locale rispetto al fetch, le conseguenti considerazioni hanno contribuito ad ottimizzare gli input per l'analisi di moto ondoso. È infatti emersa la necessità di simulare un input variabile dal settore di 60°, il grecale, per tenere in conto la variabilità locale dell'altezza d'onda dovuta al fetch ridotto nella zona in esame. Il fetch rappresenta la superficie su cui spira il vento e sulla quale avviene la generazione del moto ondoso, il settore di traversia 60° nella zona di Albenga ha un fetch di circa 60 km.
Tuttavia i valori che si ottengono in uscita dalla modellazione, per la direzione di propagazione al largo pari a 60°N, sembrano essere sovrastimati proprio a causa dell'effetto di generazione delle onde che non corrisponde a quella di input al largo, dove il fetch preso in considerazione è sicuramente superiore.
Nel corso del lavoro è emersa la possibilità di utilizzare le mappature della Posidonia, in modo da utilizzare un ulteriore input di attrito al fondo, realistico per le zone di interesse.

Le celle della griglia sono state impostate nella mesh di calcolo definendo la linea di largo alla profondità di 100 m in modo tale che i triangoli della mesh più grossolana abbiano una lunghezza media di 500 metri, tale risoluzione è stata poi variata in prossimità del fondale alla profondità di 70 metri con una lunghezza media dei triangoli che varia da 70 metri a 30 metri sotto costa.
Nelle precedenti figure1 e 2 sono riportate le griglie di calcolo utilizzate per la propagazione del moto ondoso dal largo verso riva rispettivamente nelle unità fisiografiche Centa Sud, Centa e Maremola.

Definita la griglia sono stati generati, per tutti i periodi di ritorno considerati, gli spettri bidimensionali da utilizzare come input al modello; questi sono rappresentativi della distribuzione dell'energia del moto ondoso incidente, funzione della frequenza e della direzione media di propagazione del moto ondoso d'assieme.
In Tabella 3.1 sono riportati i valori caratteristici delle onde al largo per le tre direzioni predominanti (vedi relazione tematica "Relazione sul clima ondoso al largo"), per i vari periodi di ritorno.

Dir °N	Periodo di ritorno = 1 anno		Periodo di ritorno = 50 anni		Periodo di ritorno = 100 anni	
	H_o[m]	T_p [s]	H_o[m]	T_p [s]	H_o[m]	T_p [s]
60	2.9	7.7	6.2	11.3	6.8	11.7
90	2	6.4	4.6	9.7	5	10.1
120	1.7	5.9	4	9	4.4	9.4
150	2.5	7.1	5.4	10.5	5.8	10.9
180	3.1	7.9	6	11	6.5	11.5
210	3.4	8.3	7.8	12.6	8.5	13.2

Tabella 3.1 Valori di altezza d'onda, periodo e direzione delle onde al largo dell'Ambito Costiero 08 (UF: Centa Sud, Centa, Maremola).

Determinati i dati di input è stata analizzata l'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva mediante il modello MIKE 21. Il modello è stato fatto girare in modalità stazionaria.
A titolo di esempio, in figura 4 è rappresentata la distribuzione delle altezze d'onda, con indicazione dei vettori di direzione di propagazione del moto ondoso incidente, relativa all'evento ondoso con periodo di ritorno pari a 50 anni (direzione al largo 180°).

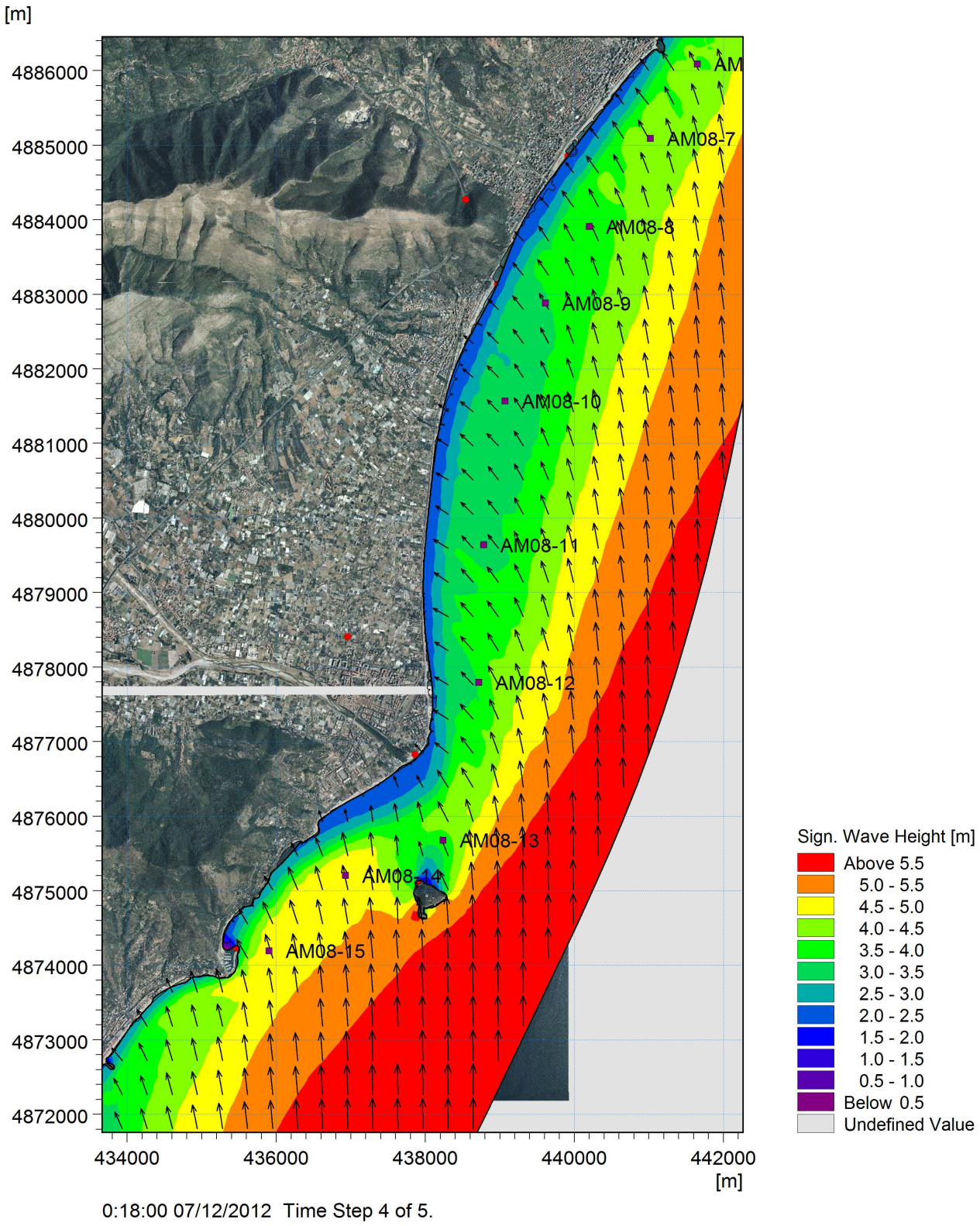


Figura 4 Distribuzione delle altezze d'onda e dei vettori di direzione di propagazione del moto ondoso dal largo verso riva relativa all'evento ondoso con periodo di ritorno pari a 50 anni - Albenga(direzione al largo 180°)

La rappresentazione dei vettori di direzione delle onde fornisce una schematizzazione globale delle ortogonali d'onda (o raggi d'onda), che evidenziano la rotazione dei fronti d'onda al variare delle profondità. Tali vettori, che in acque profonde sono equidistanti e paralleli tra loro, procedendo verso le acque basse variano la loro distanza e diventano convergenti o divergenti in funzione delle caratteristiche batimetriche e della morfologia costiera, evidenziando (dal punto di vista grafico) le aree a maggiore e minore concentrazione di energia ondosa.
Una volta a disposizione i risultati della modellazione matematica sono stati individuati i valori dell'altezza d'onda spettrale, il periodo e la direzione dell'onda nei pressi di 15 stazioni di calcolo, individuate in punti rappresentativi, utili per le successive elaborazioni all'interno dei paraggi.
Le caratteristiche delle onde sono state individuate rispettivamente ad una profondità (-15 m) tale che non si fosse ancora verificato il fenomeno del frangimento, nella propagazione dal largo verso riva. Le stazioni sono state individuate in punti significativi, almeno una all'interno di ogni paraggio, in modo tale da ricoprire omogeneamente l'intero tratto analizzato;

In Figura 5 sono riportate le stazioni individuate nell'ambito.

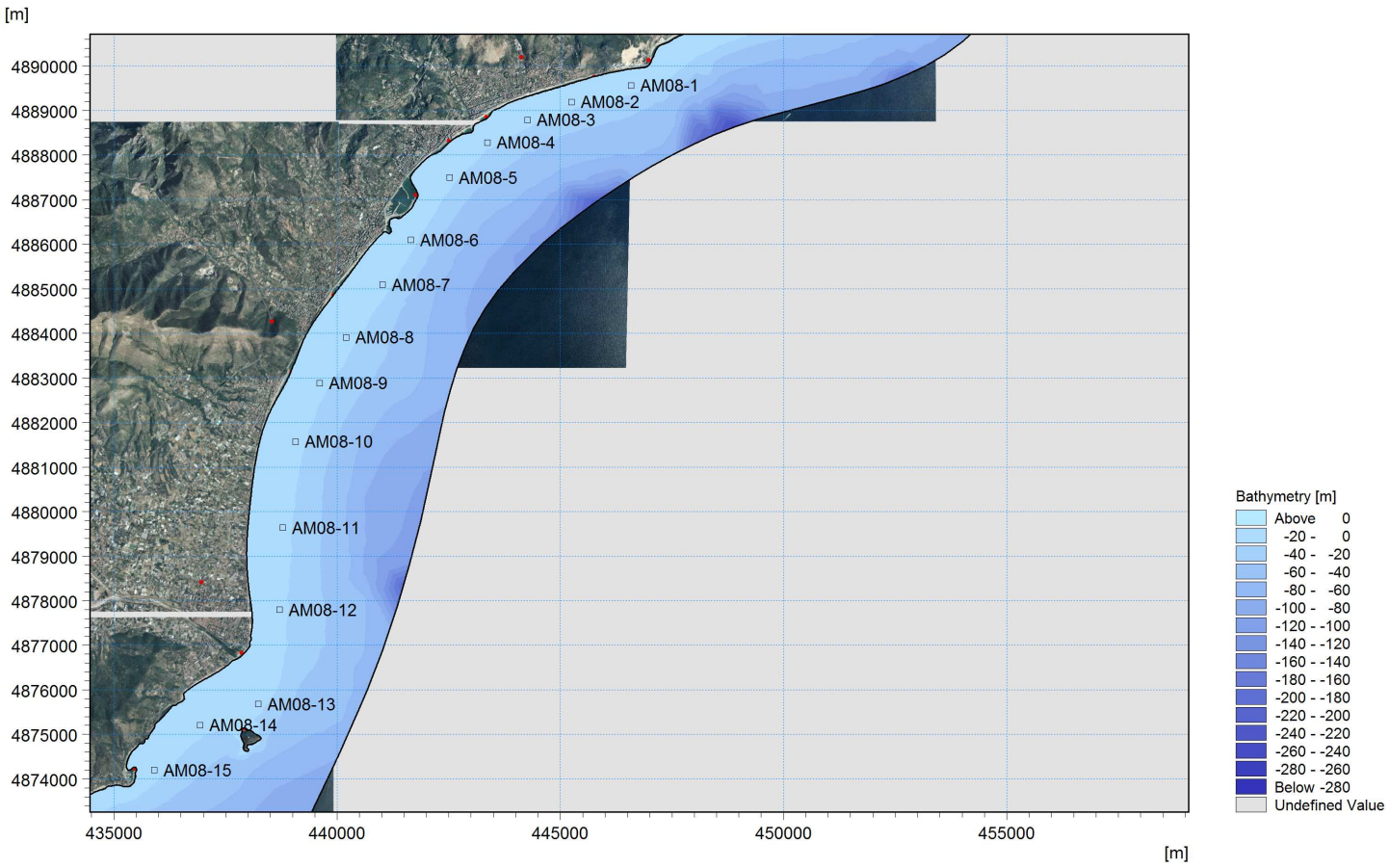


Figura 5 Batimetrie e stazioni di calcolo all'interno dell'Ambito 08.

3.1. Analisi dei dati batimetrici a disposizione

Le 15 stazioni di calcolo sono state definite al fine di determinare i valori caratteristici delle onde (altezza, periodo e direzione) in punti sotto costa e in corrispondenza di ogni paraggio; ad ogni stazione è stato associato un nome di riconoscimento in relazione alla posizione geografica scelta.
La modellazione a larga scala è stata impostata su una griglia a risoluzione grossolana, derivata dal modello dei fondali del Mare Mediterraneo prodotto dall'Istituto Idrografico della Marina, mentre quella di dettaglio su una griglia più fitta, costruita sulla base delle isobate derivate dal rilievo multibeam a risoluzione 1m x 1m commissionato ed effettuato nel 2012.

3.2. Valori caratteristici delle onde nei pressi delle stazioni di calcolo

L'evoluzione del moto ondoso dal largo verso riva all'interno delle tre unità fisiografiche è stata analizzata per i periodi di ritorno pari a 1 e 50; nelle Tabelle 3.3 e 3.4 sono riportati i valori caratteristici delle onde nelle 15 stazioni, per i diversi periodi di ritorno.

Nome Stazione	N° Stazione	Coordinate Stazione		
		x	y	Z [m]
Caprazoppa	AM08-1	1446587.29	4889561.44	-15
Borgio	AM08-2	1445253.6	4889192.11	-15
Pietra_Est	AM08-3	1444264.21	4888790.27	-15
Pietra_Centro	AM08-4	1443369.42	4888280.9	-15
Pietra_Ovest	AM08-5	1442520.00	4887493.25	-15
Loano_Nimbalto	AM08-6	1441649.94	4886092.81	-15
Loano_Spiagge	AM08-7	1441016.97	4885091.38	-15
Borghetto	AM08-8	1440195.66	4883910.21	-15
Ceriale_Capo	AM08-9	1439608.77	4882883.17	-15
Ceriale	AM08-10	1439068.24	4881570.42	-15
Albenga	AM08-11	1438782.52	4879639.91	-15
Albenga_darsena	AM08-12	1438713.02	4877794.34	-15
Albenga_vadino	AM08-13	1438234.25	4875678.48	-15
Punta_cippo	AM08-14	1436925.37	4875207.44	-15
Alassio_S.Anna	AM08-15	1435902.19	4874195.85	-15

Tabella 3.2 Indicazione delle coordinate geografiche e profondità delle 15 stazioni di calcolo.

Nome Stazione	Direz. largo 60°			Direz. largo 90°			Direz. largo 120°			Direz. largo 150°			Direz. largo 180°			Direz. largo 210°		
	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ
Caprazoppa	1.23	7.61	101.75	1.55	6.36	104.74	1.55	5.88	123.76	2.27	7.06	151.64	2.72	7.85	175.34	2.28	8.24	189.88
Borgio	0.90	7.63	106.89	1.39	6.37	108.16	1.53	5.89	124.49	2.24	7.07	151.44	2.60	7.86	172.89	1.89	8.25	184.44
Pietra_Est	0.99	7.65	100.53	1.49	6.38	104.08	1.57	5.89	122.43	2.29	7.08	149.91	2.60	7.86	171.20	1.78	8.25	181.76
Pietra_Centro	1.14	7.65	96.80	1.58	6.38	101.48	1.59	5.89	121.71	2.28	7.08	149.11	2.47	7.86	169.33	1.59	8.25	179.38
Pietra_Ovest	1.45	7.66	89.00	1.71	6.39	97.23	1.61	5.89	120.52	2.26	7.08	147.54	2.36	7.85	165.51	1.43	8.24	174.20
Loano_Nimbalto	1.63	7.67	84.51	1.76	6.39	95.49	1.62	5.89	119.95	2.24	7.08	145.97	2.24	7.85	162.24	1.28	8.24	169.92
Loano_Spiagge	1.80	7.66	81.79	1.79	6.39	94.33	1.61	5.89	119.97	2.22	7.07	145.86	2.17	7.85	161.31	1.16	8.23	168.29
Borghetto	1.89	7.64	80.60	1.79	6.38	93.91	1.61	5.89	120.07	2.23	7.06	145.39	2.13	7.83	159.79	1.04	8.22	165.84
Ceriale_Capo	1.98	7.64	79.39	1.82	6.38	93.28	1.61	5.89	119.93	2.19	7.07	144.87	1.97	7.84	158.16	0.91	8.22	164.25
Ceriale	2.07	7.65	75.77	1.84	6.38	91.92	1.61	5.89	119.26	2.09	7.06	141.01	1.69	7.82	151.37	0.75	8.19	155.89
Albenga	2.38	7.66	68.65	1.88	6.39	90.30	1.62	5.89	118.86	2.05	7.06	139.69	1.69	7.80	149.87	0.83	8.14	154.19
Albenga_darsena	2.48	7.66	67.05	1.89	6.39	90.14	1.62	5.89	118.92	2.07	7.06	140.30	1.75	7.81	151.96	0.90	8.15	158.09
Albenga_vadino	2.26	7.64	74.94	1.83	6.38	93.00	1.61	5.89	120.06	2.13	7.08	143.65	1.88	7.86	158.81	1.04	8.23	171.74
Punta_cippo	1.46	7.43	85.26	1.23	6.32	94.58	1.26	5.89	129.00	2.17	7.07	152.60	2.49	7.84	171.05	1.66	8.23	181.14
Alassio_S.Anna	1.31	7.60	87.78	1.60	6.38	99.48	1.60	5.89	121.13	2.27	7.07	147.74	2.42	7.85	166.76	1.54	8.23	176.84

Tabella 3.3 Periodo di ritorno 1 anno - valori di altezza, periodo e direzione dell'onda nei pressi delle 15 stazioni di calcolo

Nome Stazione	Direz. largo 60°			Direz. largo 90°			Direz. largo 120°			Direz. largo 150°			Direz. largo 180°			Direz. largo 210°		
	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ	H [m]	T [s]	Dir ℵ
Caprazoppa	2.44	11.10	117.12	3.26	9.55	119.31	3.48	8.90	132.05	5.05	10.35	153.49	5.46	10.83	172.52	5.55	12.36	182.99
Borgio	1.99	11.13	122.15	2.86	9.58	122.91	3.29	8.92	133.17	4.84	10.38	153.33	5.07	10.86	170.24	4.45	12.41	178.24
Pietra_Est	2.24	11.14	114.60	3.04	9.59	116.05	3.41	8.93	128.67	4.91	10.38	150.15	4.98	10.86	166.74	4.01	12.41	172.99
Pietra_Centro	2.36	11.14	110.61	3.21	9.60	113.47	3.53	8.93	127.29	4.93	10.38	148.25	4.61	10.86	163.39	3.29	12.42	168.48
Pietra_Ovest	2.71	11.15	101.34	3.52	9.60	105.86	3.54	8.93	122.65	4.72	10.38	143.43	4.22	10.86	156.53	2.78	12.41	159.63
Loano_Nimbalto	3.33	11.19	93.11	3.88	9.62	100.38	3.62	8.94	119.59	4.65	10.39	139.59	4.00	10.86	151.83	2.61	12.40	153.90
Loano_Spiagge	3.62	11.16	91.54	3.91	9.61	99.93	3.58	8.93	119.87	4.64	10.37	139.53	4.01	10.83	151.53	2.64	12.38	153.50
Borghetto	3.80	11.09	89.25	3.87	9.57	99.27	3.62	8.91	119.85	4.75	10.32	138.43	3.87	10.79	150.32	2.40	12.32	153.02
Ceriale_Capo	4.34	11.08	88.62	4.01	9.57	98.71	3.59	8.91	119.92	4.49	10.34	138.24	3.47	10.81	148.49	2.22	12.33	150.27
Ceriale	4.39	11.11	82.74	4.01	9.59	94.79	3.54	8.92	116.09	4.11	10.34	131.06	3.11	10.78	139.77	2.26	12.29	139.47
Albenga	4.95	11.12	74.03	4.15	9.60	90.79	3.52	8.91	113.54	4.11	10.31	128.28	3.30	10.73	137.52	2.49	12.22	137.84
Albenga_darsena	5.24	11.12	71.58	4.20	9.60	90.54	3.58	8.92	114.60	4.40	10.32	130.91	3.52	10.77	141.30	2.60	12.28	143.46
Albenga_vadino	4.75	11.10	86.84	4.03	9.60	99.82	3.62	8.94	120.78	4.59	10.38	139.98	3.83	10.86	153.52	2.98	12.39	159.89
Punta_cippo	2.93	10.79	101.41	2.54	9.43	109.35	2.70	8.88	132.65	4.46	10.34	152.27	4.71	10.81	166.23	3.81	12.35	171.92
Alassio_S.Anna	2.81	11.11	101.67	3.40	9.59	107.63	3.56	8.92	123.40	4.91	10.36	145.45	4.70	10.83	161.11	3.59	12.38	166.59

Tabella 3.4 Periodo di ritorno 50 anni - valori di altezza, periodo e direzione dell'onda nei pressi delle 15 stazioni di calcolo

In rosso è indicata, per ogni periodo di ritorno, l'altezza d'onda più alta tra quelle ottenute con le tre modellazioni esaminate.

3.3. Analisi dei risultati

Da una prima analisi dei valori ottenuti, risulta evidente come i mari provenienti da scirocco siano i più significativi per le unità fisiografiche del Centa e del Maremola a causa dell'orientamento della costa. Le zone di levante dell'unità fisiografica del Maremola, in corrispondenza di Pietra Ligure, sono quelle in cui si ha la minor riduzione dei valori di altezza d'onda passando dal largo a riva.
Nelle tabelle 3.5 e 3.6 è indicato come si modifica l'altezza d'onda, in termini di decremento percentuale, nel passaggio dal largo alla profondità delle stazioni di calcolo (-15 metri).

Nome Stazione	N° Stazione	Direzione al largo 60°			Direzione al largo 90°			Direzione al largo 120°			Direzione al largo 150°			Direzione al largo 180°			Direzione al largo 210°		
		H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %
Caprazoppa	AM08-1	2.9	1.23	58%	2	1.55	23%	1.7	1.55	9%	2.5	2.27	9%	3.1	2.72	12%	3.4	2.28	33%
Borgio	AM08-2	2.9	0.90	69%	2	1.39	31%	1.7	1.53	10%	2.5	2.24	10%	3.1	2.60	16%	3.4	1.89	44%
Pietra_Est	AM08-3	2.9	0.99	66%	2	1.49	26%	1.7	1.57	7%	2.5	2.29	9%	3.1	2.60	16%	3.4	1.78	48%
Pietra_Centro	AM08-4	2.9	1.14	61%	2	1.58	21%	1.7	1.59	6%	2.5	2.28	9%	3.1	2.47	20%	3.4	1.59	53%
Pietra_Ovest	AM08-5	2.9	1.45	51%	2	1.71	14%	1.7	1.61	5%	2.5	2.26	10%	3.1	2.36	24%	3.4	1.43	58%
Loano_Nimbalto	AM08-6	2.9	1.63	44%	2	1.76	12%	1.7	1.62	5%	2.5	2.24	11%	3.1	2.24	28%	3.4	1.28	62%
Loano_Spiagge	AM08-7	2.9	1.80	38%	2	1.79	10%	1.7	1.61	5%	2.5	2.22	11%	3.1	2.17	30%	3.4	1.16	66%
Borghetto	AM08-8	2.9	1.89	35%	2	1.79	10%	1.7	1.61	5%	2.5	2.23	11%	3.1	2.13	31%	3.4	1.04	69%
Ceriale_Capo	AM08-9	2.9	1.98	32%	2	1.82	9%	1.7	1.61	5%	2.5	2.19	12%	3.1	1.97	37%	3.4	0.91	73%
Ceriale	AM08-10	2.9	2.07	29%	2	1.84	8%	1.7	1.61	5%	2.5	2.09	16%	3.1	1.69	46%	3.4	0.75	78%
Albenga	AM08-11	2.9	2.38	19%	2	1.88	6%	1.7	1.62	5%	2.5	2.05	18%	3.1	1.69	46%	3.4	0.83	76%
Albenga_darsena	AM08-12	2.9	2.48	15%	2	1.89	6%	1.7	1.62	5%	2.5	2.07	17%	3.1	1.75	44%	3.4	0.90	74%
Albenga_vadino	AM08-13	2.9	2.26	23%	2	1.83	9%	1.7	1.61	5%	2.5	2.13	15%	3.1	1.88	39%	3.4	1.04	69%
Punta_cippo	AM08-14	2.9	1.46	50%	2	1.23	38%	1.7	1.26	26%	2.5	2.17	13%	3.1	2.49	20%	3.4	1.66	51%
Alassio_S.Anna	AM08-15	2.9	1.31	55%	2	1.60	20%	1.7	1.60	6%	2.5	2.27	9%	3.1	2.42	22%	3.4	1.54	55%

Tabella 3.5 Periodo di ritorno 1 anno – altezze d'onda al largo, nelle stazioni e decremento percentuale nel passaggio dal largo alla profondità dei 15 metri, per le tre direzioni analizzate

Nome Stazione	N° Stazione	Direzione al largo 60°			Direzione al largo 90°			Direzione al largo 120°			Direzione al largo 150°			Direzione al largo 180°			Direzione al largo 210°		
		H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %	H_{largo}	$H_{stazione}$	decremento %
Caprazoppa	AM08-1	6.2	2.44	61%	4.6	3.26	29%	4.0	3.48	13%	5.4	5.05	6%	6.0	5.46	9%	7.8	5.55	29%
Borgio	AM08-2	6.2	1.99	68%	4.6	2.86	38%	4.0	3.29	18%	5.4	4.84	10%	6.0	5.07	15%	7.8	4.45	43%
Pietra_Est	AM08-3	6.2	2.24	64%	4.6	3.04	34%	4.0	3.41	15%	5.4	4.91	9%	6.0	4.98	17%	7.8	4.01	49%
Pietra_Centro	AM08-4	6.2	2.36	62%	4.6	3.21	30%	4.0	3.53	12%	5.4	4.93	8%	6.0	4.61	23%	7.8	3.29	58%
Pietra_Ovest	AM08-5	6.2	2.71	56%	4.6	3.52	23%	4.0	3.54	11%	5.4	4.72	12%	6.0	4.22	29%	7.8	2.78	64%
Loano_Nimbalto	AM08-6	6.2	3.33	47%	4.6	3.88	15%	4.0	3.62	9%	5.4	4.65	13%	6.0	4.00	33%	7.8	2.61	66%
Loano_Spiagge	AM08-7	6.2	3.62	42%	4.6	3.91	15%	4.0	3.58	10%	5.4	4.64	14%	6.0	4.01	33%	7.8	2.64	66%
Borghetto	AM08-8	6.2	3.80	39%	4.6	3.87	15%	4.0	3.62	9%	5.4	4.75	12%	6.0	3.87	35%	7.8	2.40	69%
Ceriale_Capo	AM08-9	6.2	4.34	30%	4.6	4.01	13%	4.0	3.59	10%	5.4	4.49	16%	6.0	3.47	42%	7.8	2.22	71%
Ceriale	AM08-10	6.2	4.39	29%	4.6	4.01	12%	4.0	3.54	11%	5.4	4.11	23%	6.0	3.11	48%	7.8	2.26	71%
Albenga	AM08-11	6.2	4.95	20%	4.6	4.15	9%	4.0	3.52	12%	5.4	4.11	23%	6.0	3.30	45%	7.8	2.49	68%
Albenga_darsena	AM08-12	6.2	5.24	16%	4.6	4.20	8%	4.0	3.58	10%	5.4	4.40	18%	6.0	3.52	41%	7.8	2.60	67%
Albenga_vadino	AM08-13	6.2	4.75	24%	4.6	4.03	12%	4.0	3.62	9%	5.4	4.59	15%	6.0	3.83	36%	7.8	2.98	62%
Punta_cippo	AM08-14	6.2	2.93	53%	4.6	2.54	45%	4.0	2.70	32%	5.4	4.46	17%	6.0	4.71	21%	7.8	3.81	51%
Alassio_S.Anna	AM08-15	6.2	2.81	55%	4.6	3.40	26%	4.0	3.56	11%	5.4	4.91	9%	6.0	4.70	21%	7.8	3.59	54%

Tabella 3.6 Periodo di ritorno 50 anni – altezze d'onda al largo, nelle stazioni e decremento percentuale nel passaggio dal largo alla profondità dei 15 metri, per le tre direzioni analizzate

I risultati della modellazione matematica hanno evidenziato che nella propagazione del moto ondoso dal largo verso riva le onde subiscono una trasformazione dovuta all'effetto del fondo; i fronti d'onda subiscono una rotazione a causa della diminuzione della velocità delle onde con la profondità e l'altezza d'onda subisce una diminuzione legata alla dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase e velocità di gruppo. Il moto ondoso, a causa dell'orientazione della costa, subisce modesti effetti rifrattivi per le mareggiate provenienti da Scirocco e si presenta con altezze d'onda notevoli. Differente è il comportamento che si manifesta in corrispondenza di mareggiate provenienti da Libeccio, come si evince dalle tabelle del paragrafo 3.3, per tale direzione infatti l'effetto dell'orientamento delle batimetriche e della costa sono responsabili di un maggiore effetto di rifrazione che porta a un decremento di oltre il 70% per diverse zone.
Il decremento percentuale minore, per tutte le direzioni di propagazione considerate, si ha in corrispondenza del paraggio di Pietra Ligure dove le condizioni del moto ondoso, comprese le direzioni di propagazione hanno subito limitatamente gli effetti di rifrazione, diffrazione e shoaling.
I risultati ottenuti hanno permesso di evidenziare come i mari provenienti da Scirocco siano i più significativi per i paraggi posti a ponente dell'Ambito del Centa, mentre quelli da Mezzogiorno lo siano per quelli dell'Unità Fisiografica del Maremola; si nota inoltre come i risultati della stazione di Albenga Vadino siano influenzati dall'isola Gallinara, che infatti, riesce a "schermare" dalle mareggiate di Libeccio e di Mezzogiorno la zona fociva del Fiume Centa.

È possibile quindi considerare queste stazioni come partenza per la propagazione del moto ondoso sotto costa, all'interno dei singoli paraggi.

3.4. Frangimento delle onde

Il modello matematico utilizzato ha permesso di individuare le zone di frangimento delle onde nella propagazione dal largo verso riva. Per ogni periodo di ritorno è stato analizzato il comportamento delle onde in termini di frangimento, per le direzioni dominanti.
Il modello di calcolo, applica il criterio di frangimento di Battjes e Janssen (1978) che prevede che il frangimento dell'onda si manifesta quando viene raggiunta un'altezza d'onda limite. I trasferimenti di energia non lineari alle alte frequenze che avvengono durante il frangimento non sono rappresentate nel modello.
L'individuazione della zona dei frangenti (surf zone) ha permesso di fare alcune considerazioni preliminari sulla movimentazione dei sedimenti all'interno delle unità fisiografiche considerate ed è stata propedeutica per gli studi successivi effettuati a scala di paraggio nelle singole relazioni di Paraggio, a cui si rimanda per la modellazione matematica della propagazione del moto ondoso e per la definizione della zona dei frangenti.

4. Conclusioni della modellazione a larga scala

I risultati della modellazione matematica hanno evidenziato che nella propagazione del moto ondoso dal largo verso riva le onde subiscono una trasformazione dovuta all'effetto del fondo; i fronti d'onda subiscono una rotazione a causa della diminuzione della velocità delle onde con la profondità e l'altezza d'onda subisce una diminuzione legata alla dispersione dell'energia per effetto delle differenze tra velocità di fase e velocità di gruppo.
Il moto ondoso, a causa dell'orientazione della costa, subisce modesti effetti rifrattivi e si presenta con altezze d'onda notevoli; alla profondità di circa 15 metri l'onda non ha ancora subito il fenomeno del frangimento e presenta ancora altezze d'onda molto prossime a quelle al largo (fondali di circa 100 metri). Si rimanda pertanto alle relazioni di paraggio per quanto riguarda la propagazione ondosa e la disposizione delle ortogonali d'onda sotto costa, derivati dal modello di dettaglio, all'interno dei singoli paraggi dell'Ambito.

Riferimenti

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