

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA
PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO
NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE - BARIUM BAY
74 WTG – 1.110 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

Progettazione e SIA



Indagini ambientali e studi specialistici



Studio misure di mitigazione e compensazione



supervisione scientifica



SIA.ES.7 CLIMA METEOMARINO

ES.7.2 Oceanografia Fisica modellazione

REV.	DATA	DESCRIZIONE





DICAM

Dipartimento di ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali

ANALISI DI IMPATTO AMBIENTALE DI PARCHI EOLICI GALLEGGIANTI

MODELLAZIONE NUMERICA 2D E 3D

BARI



Bologna, 30 Luglio 2022

autori

Prof. Barbara Zanuttigh

Direttore

Prof. Stefano Gandolfi

RESPONSABILE SCIENTIFICO

Prof. Barbara Zanuttigh

www.dicam.unibo.it

30 Luglio 2022

ALMA MATER STUDIORUM • università di bologna

DICAM • DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE E DEI MATERIALI
AMMINISTRAZIONE • VIALE RISORGIMENTO, 2 - 40136 BOLOGNA - ITALIA - TEL. +39 051 2093237 - 2093502 - FAX +39 051 2093253
VIA TERRACINI, 28 - 40131 BOLOGNA - ITALIA - TEL. +39 051 2090312 - FAX +39 051 2090322
www.dicam.unibo.it - C.F. 80007010376 - P.IVA 01131710376



SOMMARIO

PREMESSA	5
1. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO	6
2. BATIMETRIA.....	7
2.1 FONTI DEI DATI BATIMETRICI	7
2.2 RICOSTRUZIONE DELLA BATIMETRIA	7
3. DATI CLIMATICI	9
3.1 FONTI DEI DATI	9
3.2 SCELTA DELL'ANNO TIPICO.....	9
4. MODELLAZIONE NUMERICA CON MIKE 3.....	18
4.1 IL MODELLO NUMERICO MIKE 3.....	18
4.2 COSTRUZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO ORIZZONTALE	18
4.3 COSTRUZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO VERTICALE	21
4.4 SETTAGGIO DEL MODELLO MIKE 3 HD	22
4.5 APPROCCIO A FINESTRE MOBILI	23
4.6 SETTAGGIO DEL MODELLO MIKE 3 MT.....	24
5. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE CON MIKE 3.....	26
5.1 CAMPO TRIDIMENSIONALE DELLE CORRENTI	26
5.2 CAMPO TRIDIMENSIONALE DI SALINITÀ E TEMPERATURA	31
5.3 MAPPE DELLE CONCENTRAZIONI DEL SEDIMENTO IN SOSPENSIONE	42
5.4 PROFILI DELLE CONCENTRAZIONI DEL SEDIMENTO IN SOSPENSIONE	46
5.5 SUPERAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI ACQUE LIMPIDE	49
5.6 CONCLUSIONI	54
6. CLIMA	55
6.1 FONTI DEI DATI CLIMATICI E RICOSTRUZIONE DEL CLIMA TIIPICO	55
6.2 RICOSTRUZIONE DEL CLIMA TIPICO	55
6.3 SCELTA DEGLI STATI ONDOSI DA MODELLARE	58
7. MODELLAZIONE NUMERICA CON MIKE 21 SW.....	58
7.1 IL MODELLO NUMERICO.....	58
7.2 DEFINIZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO	59
7.3 IL SETTAGGIO DEL MODELLO MIKE21 SW E LE CONFIGURAZIONI ESAMINATE	63
8. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE CON MIKE 21 SW.....	64
8.1 VARIAZIONE DEL CAMPO ONDOSO D'ONDA IN PROSSIMITÀ DEL PARCO EOLICO.....	64
8.2 MAPPE DELLE VARIAZIONI DELLE ALTEZZE D'ONDA NELL'AREA DI STUDIO	69
8.3 VARIAZIONE DELLE ALTEZZE E DIREZIONI D'ONDA AL LARGO	74
8.4 VARIAZIONE DELLE ALTEZZE E DIREZIONI D'ONDA SOTTO-COSTA.....	77
8.5 CONCLUSIONI	80

9. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SULL'IMPATTO AMBIENTALE DEL PARCO EOLICO BASATE SULLA MODELLAZIONE NUMERICA	81
9.1 EFFETTI DEL PARCO EOLICO SULLA TORBIDITA' DELL'ACQUA	81
9.2 EFFETTI DEL PARCO EOLICO SUL MOTO ONDOSI: USI DELLO SPAZIO MARINO AL LARGO E DINAMICA DEL LITORALE	82
10. BIBLIOGRAFIA	84
11. APPENDICE I.....	85
11.1 EVOLUZIONE DELLA DISPERSIONE DEI SEDIMENTI IN UNA FINESTRA MOBILE DI MODELLAZIONE CON MIKE 3 MT	85
12. APPENDICE II.....	112
12.1 MAPPA DELLE VARIAZIONI DELLE ALTEZZE D'ONDA PER CIASCUNO STATO ONDOSI.....	112
12.2 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA D'ONDA E DELLA DIREZIONE AL LARGO E SOTTOCOSTA.....	132

PREMESSA

La presente relazione analizza l'impatto ambientale del parco eolico galleggiante da realizzarsi al largo di Bari, considerando specificatamente tre diversi possibili impatti: gli impatti della dispersione del sedimento ed eventuale ri-sospensione legata allo scavo della trincea del cavidotto, gli impatti locali sul clima ondoso al largo nella zona di installazione del parco e sul clima sottocosta. Gli impatti sono analizzati mediante modellazione numerica con il software di calcolo Mike 21 sviluppato da DHI Water & Environment.

A partire da un breve inquadramento dell'area di studio, nei Capitoli 1 e 2, la relazione si compone di due parti. La prima (Capitoli 3-5) è dedicata alla modellazione dell'impatto dovuto allo scavo per il posizionamento del cavidotto, che richiede l'utilizzo del software 3D Mike 3, sviluppato da DHI, moduli idrodinamico HD e di trasporto per materiale coesivo MT. La seconda (Capitoli 6-8) è dedicata alla modellazione degli impatti sui processi ondosi, sia al largo sia sotto-costa, che sono studiati mediante il software 2D Mike 21, sviluppato ancora da DHI, modulo spettrale SW.

La prima parte descrive la metodologia ed i risultati della modellazione della circolazione globale e della dispersione dei sedimenti di scavo per un intero anno, rappresentativo di tutte le tipiche combinazioni di corrente, livello, temperatura e salinità nell'area di studio. Si compone dei capitoli 3, 4 e 5 che nello specifico contengono:

- i dati climatici, comprese le fonti e le elaborazioni compiute, per la messa a punto del modello di correnti, temperatura, salinità (Capitolo 3);
- la predisposizione del dominio di calcolo numerico ed il settaggio delle condizioni iniziali ed al contorno di MIKE 3 HD e MT, nonché la descrizione dell'approccio utilizzato per modellare la sospensione relativa allo scavo in tutte le possibili condizioni climatiche per trarne una sintesi statistica (Capitolo 4);
- la presentazione dei risultati e relative conclusioni (Capitolo 5).

La seconda parte si basa su scenari rappresentativi del clima tipico ed estremo, per analizzare le variazioni del campo d'onda con l'intensità e la direzione dell'onda stessa in presenza del parco eolico modellato come parzialmente riflettente. Si compone dei Capitoli 6, 7 e 8 che, nello specifico, contengono:

- i dati climatici, comprese le fonti e le elaborazioni compiute, per la messa a punto del modello ondoso locale al parco e sotto-costa (Capitolo 6);
- la predisposizione del dominio di calcolo numerico ed il settaggio delle condizioni iniziali ed al contorno (Capitolo 7);
- la presentazione dei risultati e le relative conclusioni (Capitolo 8).

Il Capitolo 9, infine, propone alcune considerazioni complessive di sintesi sull'impatto ambientale del parco.

Le Appendici I e II contengono alcuni risultati di dettaglio utili a complementare il testo, rispettivamente in merito ai risultati della modellazione 3D e 2D.

1. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

La zona di installazione del parco si colloca davanti al litorale di Bisceglie, tra Barletta e Bari, e si estende circa per 34.5 km lungo riva e da 4 a 12 km perpendicolarmente alla riva (Figura 1). L'area è compresa tra le coordinate LONG-LAT: 579300.73 – 692097.72 Est e 4555947.63 - 4678007.73 Nord.

Il cavidotto (linea continua gialla in Figura 1) comporta la realizzazione di uno scavo lungo 41 km in direzione da riva alla Sottostazione 1 al largo e 14.5 km lungo la riva dalla Sottostazione 1 alla Sottostazione 2 attraverso il parco.

L'area di studio (evidenziata in Figura 2) è stata scelta in modo tale da poter rappresentare adeguatamente non solo la zona di installazione e quella corrispondente sotto-costa ma anche la propagazione delle correnti, includendo il promontorio del Gargano, e la zona di probabile dispersione del sedimento a seguito dello scavo per la realizzazione del cavidotto verso Sud. L'area di studio si estende quindi lungo costa per circa 40 km a Nord-Ovest e 50 km a Sud-Est rispetto alla prima fila di turbine a Nord del parco. In direzione perpendicolare a costa, l'area di studio si estende mediamente per 20 km a Est della prima fila di turbine rispetto alla costa (70 km dalla linea di costa), per rappresentare adeguatamente la propagazione delle onde davanti al parco e comprendere l'idrodinamica attorno al promontorio del Gargano.



Figura 1. Area di studio con indicazione del cavidotto (approdo con microtunnel; linea continua verde, posa in appoggio; linea continua gialla, posa con realizzazione di trench), delle sotto-stazioni off-shore (Sottostazione 1 e 2 indicate rispettivamente dai segnaposti kml_1 e kml_2) e del parco eolico (posizione delle turbine rappresentata dai cerchi rossi vuoti), nonché delle principali rotte marittime (linee nere tratteggiate).

2. BATIMETRIA

2.1 FONTI DEI DATI BATIMETRICI

I dati batimetrici utilizzati per questo studio comprendono:

- i dati della batimetria della regione Puglia ottenuti dalla EMODnet Digital Bathymetry (DTM), http://data.europa.eu/88u/dataset/EMODnet_bathymetry.
È un prodotto batimetrico multistrato per i bacini marittimi europei che si basa su più di 7700 set di dati batimetrici e DTM compositi che sono stati raccolti da 27 fornitori di dati provenienti da 18 paesi europei e che coinvolgono 169 creatori di dati. I set di dati raccolti possono essere scoperti e richiesti per l'accesso tramite il servizio di rilevamento e accesso dei dati dell'indice comune di dati (CDI), che contiene anche ulteriori set di dati europei per le acque globali. I DTM Compositi possono essere scoperti attraverso il servizio Catalogo Sextant. Entrambi i servizi di scoperta utilizzano gli standard e i servizi di SeaDataNet e sono stati integrati nel portale web EMODnet Bathymetry (<http://www.emodnet-bathymetry.eu>).
- Il DEM ad alta risoluzione fornito da IRON Solar srl per la sola zona del cavidotto, causa i ritardi nei rilievi in mare dovuti alle autorizzazioni e alle condizioni meteorologiche avverse.

2.2 RICOSTRUZIONE DELLA BATIMETRIA

La batimetria ricostruita è riportata in Figura 2. È stata ottenuta elaborando i dati batimetrici a disposizione con gli strumenti disponibili nell'ambiente MIKE e interpolando seguendo la griglia di calcolo messa a punto per predisporre la modellazione. Nello specifico, si riporta la batimetria per l'area più vasta in direzione Sud utilizzata per la modellazione ondosa 2D (si veda la Sezione 7.2), una batimetria meno estesa in direzione Sud-Est è stata utilizzata per la modellazione 3D delle correnti e del sedimento dragato (si veda la Sezione 4.2).

La profondità in tutta la zona di installazione del parco si colloca tra le isobate -120 m e -200 m. Il fondale davanti al parco verso riva cresce dolcemente con pendenze in media dello 0,15% dalla isobata -120 m alla isobata -100 m, dello 0,29% dalla isobata -100 m alla isobata -50 m e dello 0,40% dalla isobata -50m alla isobata -10m. La profondità nella zona al largo del parco cresce rapidamente, soprattutto nella zona Sud, dove la scarpata raggiunge la quota -700 m in 15 km circa al largo della isobata -200 m (pendenza 3,3%). Questo andamento della profondità del fondale è confermato dalle carte nautiche della zona, Figura 3.

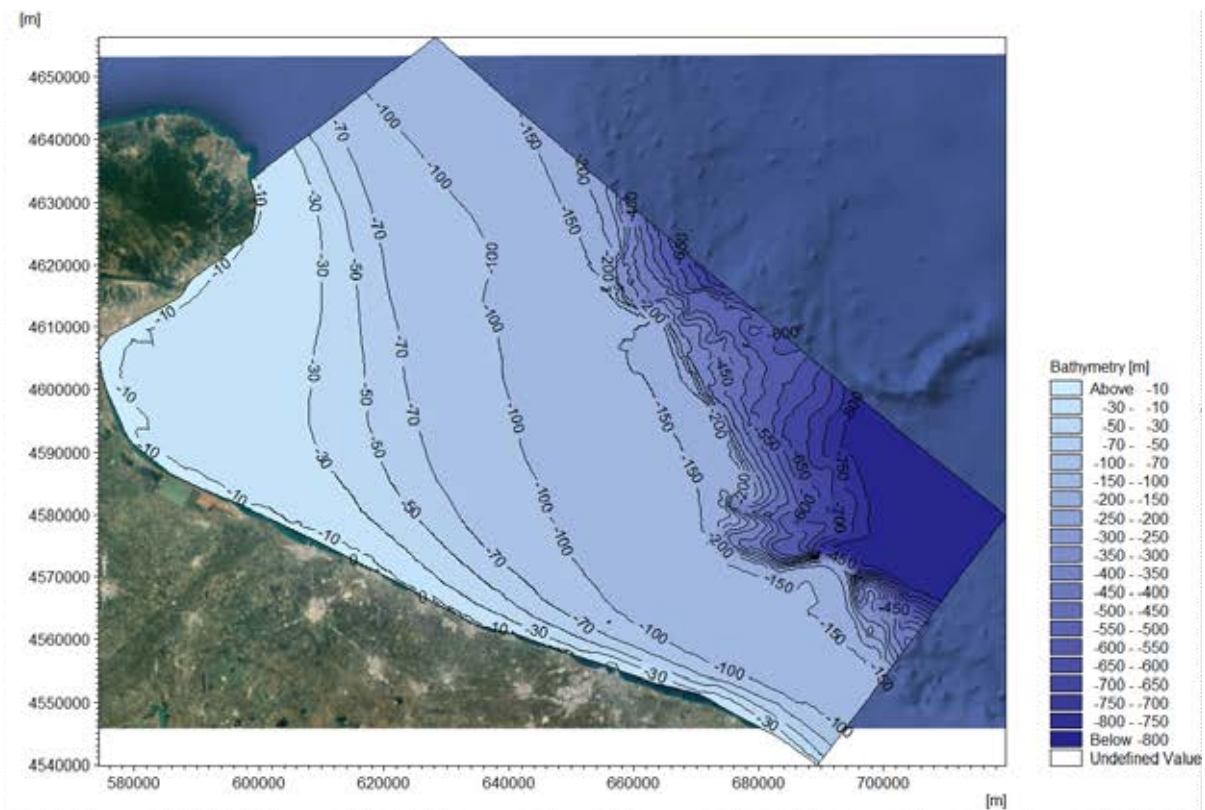


Figura 2. Batimetria della zona di studio ricostruita mediante interpolazione dei dati disponibili.

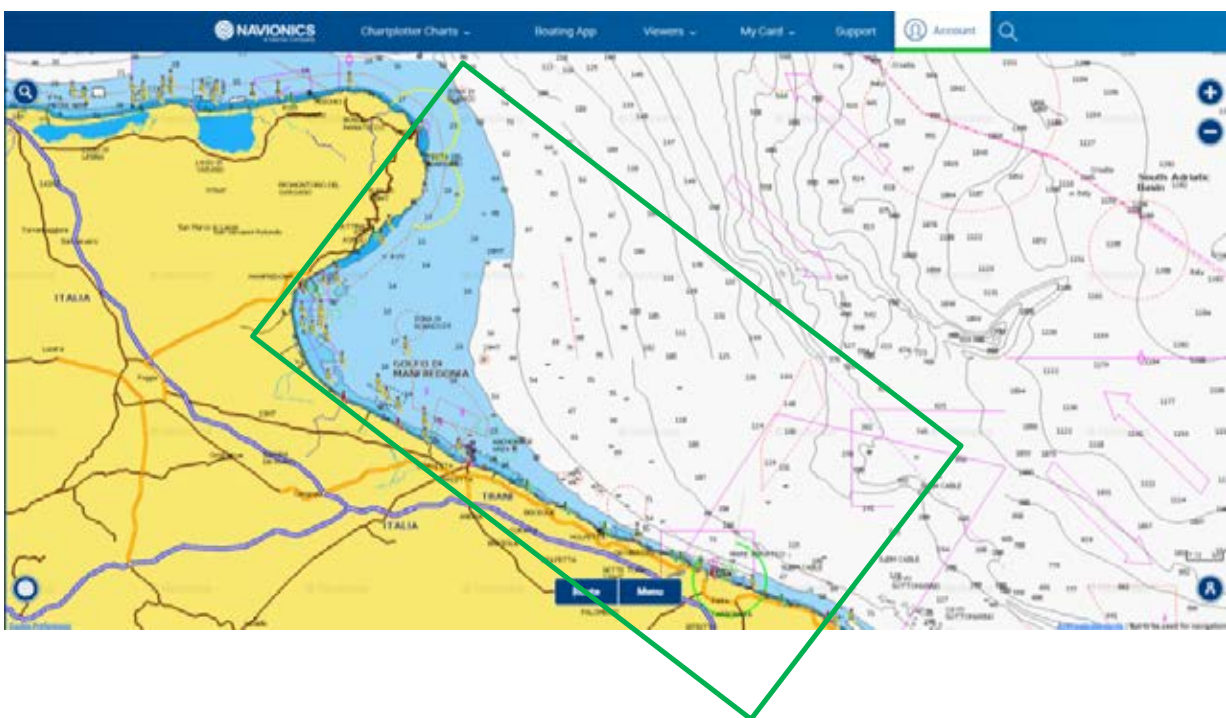


Figura 3. Carta nautica dell'area di studio (riquadrata con linea verde continua), da Navionics.

PARTE I – ANALISI DELLA SOSPENSIONE DEL SEDIMENTO DOVUTA ALLO SCAVO PER LA REALIZZAZIONE DEL CAVIDOTTO

3. DATI CLIMATICI

3.1 FONTI DEI DATI

La modellazione numerica della sospensione, sedimentazione ed eventuale ri-sospensione del sedimento dragato durante lo scavo per la posa del cavidotto richiede la acquisizione di dati accurati relativi alla temperatura, alla salinità, al regime delle correnti ed ai livelli di marea.

I dati di circolazione generale sono stati ottenuti dal Copernicus Marine Service e dal Climate Forecast System.

In particolare, tra i prodotti Copernicus si è utilizzato il database “Mediterranean Sea Physics Re-analysis”, disponibili dal 01/07/1987 al 31/05/2020 (Escudier et al., 2020; CMEMS, 2021). Il database si fonda sul modello baroclino di circolazione marina NEMO (Madec, 2008). I dati ottenuti sono i campi 3D medi giornalieri di temperatura, salinità, velocità delle correnti e i campi 2D medi giornalieri della superficie libera. Si indicheranno questi dati nel prosieguo come dati CMEMS. L’area di estrazione, di estensione maggiore rispetto a quella interessata dal parco eolico, per tenere conto sia della disponibilità dei dati sia della possibile dispersione dei sedimenti, corrisponde alle coordinate UTM33: 4554626 – 4678008 Nord e 564878 – 692098 Est.

Il Climate Forecast System (CFS) è un modello ad alta risoluzione (Saha et al., 2010) implementato a scala globale per la rappresentazione del sistema accoppiato atmosfera-oceano-terra-mare, prodotto e distribuito dal National Centre for Environmental Prediction (NCEP). I dati Climate Forecast System Reanalysis di hindcast (che si indicheranno nel prosieguo come dati CFSR) coprono il periodo da Gennaio 1979 a Dicembre 2010 (31 anni) e, nel periodo successivo fino ad oggi, è stato implementato il modello operativo CFSv2 (Saha et al., 2011). Il modello CFSR presenta una risoluzione spaziale di vento, copertura nuvolosa e temperatura dell’aria pari a 0.3°, mentre la risoluzione spaziale per l’umidità relativa è pari a 0.5°.

Per completare i dati di livello e di velocità delle correnti tenendo conto degli effetti delle maree, si sono utilizzati i dati del modello globale di marea oceanica DTU10 (Yongun & Baltazqar Andersen, 2010) sviluppato dalla Technical University of Denmark. I dati desunti da questo modello sono indicati nel prosieguo come dati DTU10. Mediante procedure Matlab predisposte *ad hoc* si sono estratti i dati del modello DTU10 e si sono sommati i contributi CMEMS e DTU10 per ricavare la profondità totale del fondale ed il campo complessivo delle correnti risultanti.

3.2 SCELTA DELL’ANNO TIPICO

Per scegliere un anno rappresentativo del clima tipico, si è considerata la velocità delle correnti quale parametro essenziale, dato che le profondità elevate della zona di scavo (>35 m) si collocano ben al di fuori della zona dei frangenti.

Si è prima proceduto alla estrazione dei dati relativi alla velocità ed alla direzione delle correnti dal database

“Mediterranean Sea Physics Re-analysis” di Copernicus in un solo punto, lo stesso punto già utilizzato nella relazione meteomarina predisposta da Scientific Engineering Ltd, coincidente con il punto TXPO e MEDSEA (di coordinate 41.5625 N, 16.9167 E), per rendere consistenti tutte la analisi climatiche svolte nell’ambito di questo progetto.

Si sono analizzati i profili di velocità media della corrente e le rose superficiali delle correnti per tutti gli anni dal 1987 al 2019, confrontandole rispettivamente con il profilo medio di tutti i profili medi e con la rosa superficiale media di tutte le rose superficiali.

In Figura I.1 si riportano tutti i profili annuali di velocità media, insieme al profilo medio di tutti i profili, per gli anni 1987-2019. La stessa immagine viene suddivisa nelle Figure I.2, I.3 e I.4 rispettivamente per gli anni 1987-2000, 2001-2009, 2010-2019 per visualizzare se sussista una tendenza legata al cambiamento climatico considerando gli anni remoti, intermedi e recenti.

Negli anni 1987-2000 (Fig. I.2) ci sono anni con velocità minori e maggiori della media, anni in cui il profilo di velocità mostra valori maggiori al fondo piuttosto che alla superficie ed anni in cui la velocità è molto poco variabile già a partire da 30 m di fondale. In questi anni remoti, i profili di velocità che meglio approssimano il profilo medio della velocità sono il 1991, il 1993 e il 1997.

Gli anni 2001-2010 (Fig. I.3) hanno velocità più basse della velocità media, di conseguenza nessuno è un buon candidato a rappresentarla. Ci sono 5 anni contigui (2004 e 2007-2010) con profilo di velocità che mostra valori maggiori al fondo rispetto alla superficie. Il profilo del 2005 è molto poco variabile.

Gli anni 2010-2020 (Fig. I.4) presentano tutti un profilo maggiormente regolare, caratterizzato da valori maggiori alla superficie e variabili dalla superficie al fondo. Considerando di privilegiare i dati relativi ad anni recenti, di osservare la rappresentatività rispetto al profilo medio e di non sottostimare complessivamente le velocità, si scelgono preliminarmente gli anni 2017, 2018 e 2019. Il profilo di velocità della corrente del 2018 è quello che meglio approssima il profilo medio della velocità, mentre il profilo del 2017 parte dagli stessi valori del profilo medio al fondo ma poi sovrastima la velocità media in superficie; infine il profilo del 2019 è praticamente il profilo medio ma tutto traslato a destra e, quindi, sovrastima i valori medi di circa il 12%.

Si considerano nel seguito i profili della velocità media e massima degli anni 2017, 2018 e 2019 a confronto con il profilo medio e massimo delle velocità per gli anni disponibili 1987-2019, Figura I.5. Si evidenzia come il profilo della velocità massima dell’anno 2017 sia quello più prossimo al profilo del massimo della velocità, seguito dal profilo degli anni 2019 e 2018. Tutti i profili delle massime velocità sono significativamente inferiori al profilo del massimo della velocità calcolato su tutti gli anni, risultando l’anno 2018 quello meno cautelativo. Il profilo delle velocità medie/massime dell’anno 2019 risulta quindi rispettivamente più/meno cautelativo dell’anno 2017. Si decide perciò di passare a valutare le rose delle correnti prima di operare una scelta definitiva tra gli anni 2017, 2018 e 2019.

Si sono poi analizzate le rose delle correnti in superficie, a medio fondale e al fondo, riportate nella Tabella I.1. Le rose delle correnti rappresentano contemporaneamente intensità e direzione. Si sono confrontate le rose degli anni 2017, 2018 e 2019 con la rosa ottenuta mediando tutti gli anni 1987-2019. Le correnti di maggiore intensità e frequenza sono dirette a Sud-Est e di fatto sono assolutamente dominanti la idrodinamica tipica a tutte le quote del fondale.

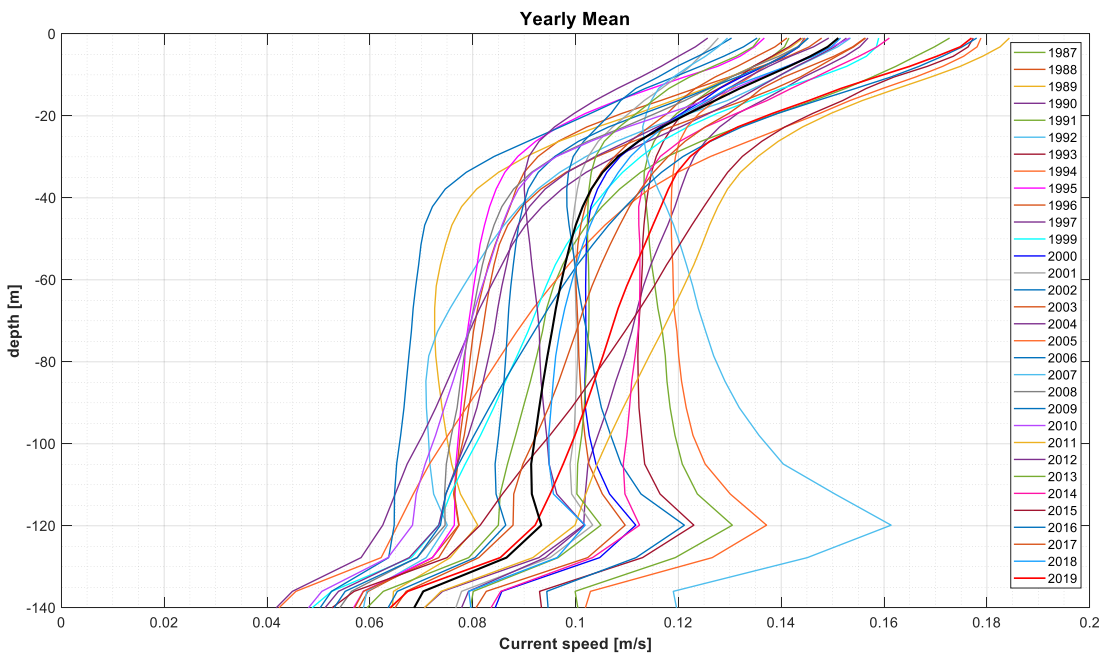


Figura I.1 Profili della velocità media lungo la colonna d'acqua per gli anni dal 1987 al 2020 compreso, desunti dal database CMEMS. Confronto con il profilo mediato su tutti gli anni (in nero).

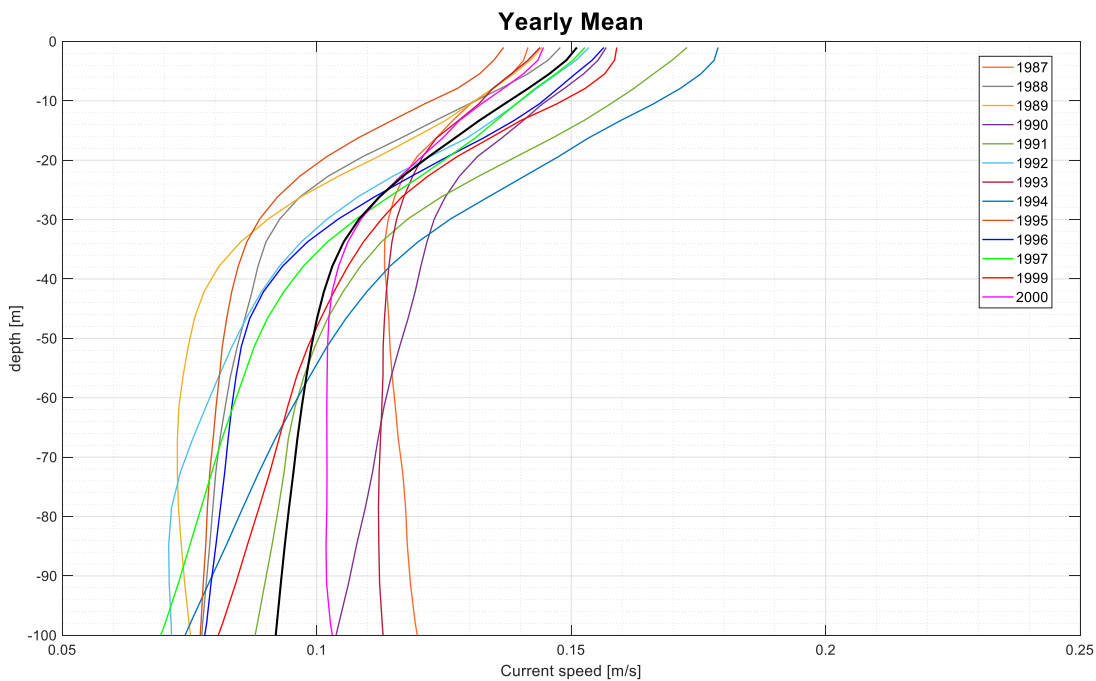


Figura I.2 Profili della velocità media lungo la colonna d'acqua per gli anni dal 1987 al 2000 compreso, desunti dal database CMEMS. Confronto con il profilo mediato su tutti gli anni (in nero).

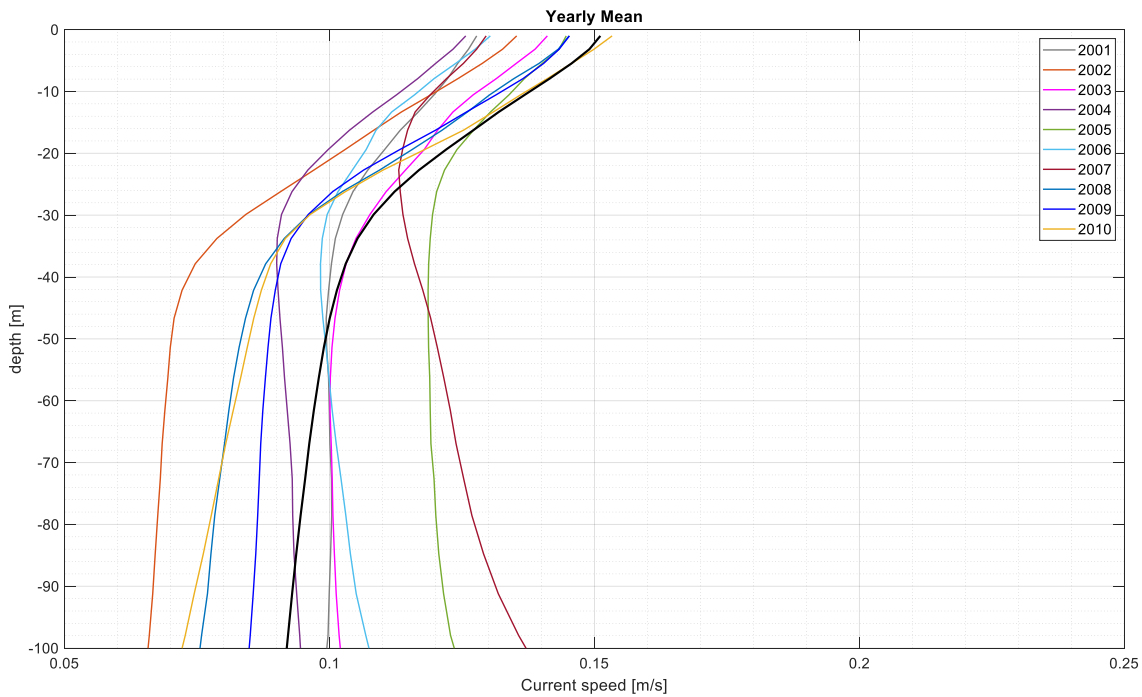


Figura I.3 Profili della velocità media lungo la colonna d'acqua per gli anni dal 2001 al 2010 compreso, desunti dal database CMEMS. Confronto con il profilo mediato su tutti gli anni (in nero).

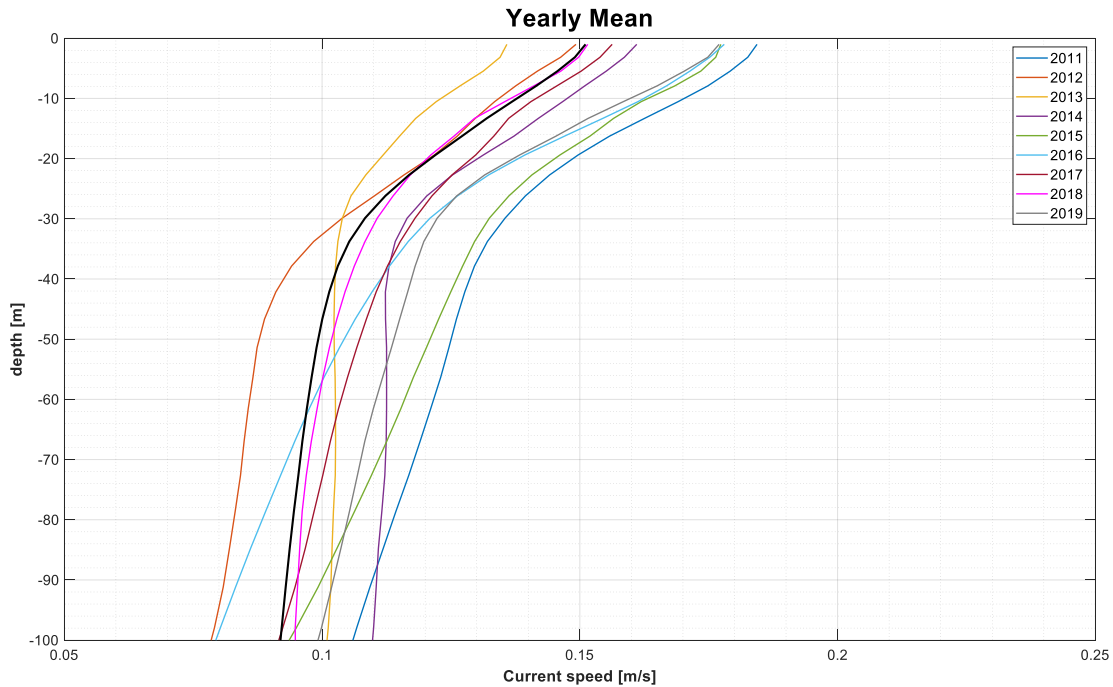


Figura I.4 Profili della velocità media lungo la colonna d'acqua per gli anni dal 2010 al 2019 compreso, desunti dal database CMEMS. Confronto con il profilo mediato su tutti gli anni (in nero).

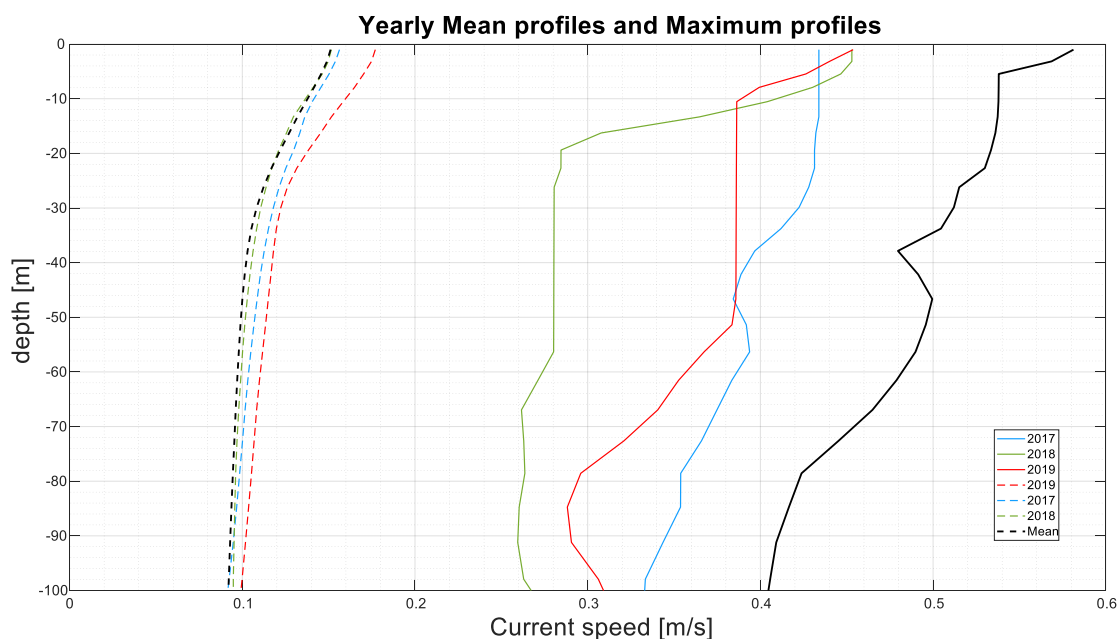


Figura I.5 Profilo della velocità media (curve tratteggiate) e massima (curve a tratto continuo) per gli anni 2017, 2018, 2019, desunti dal database Copernicus. Confronto con il profilo medio e massimo di velocità (in colore nero) su tutti gli anni disponibili 1987-2020.

La rose superficiali relative agli anni 2017, 2018 e 2019 sono caratterizzate dalle medesime direzioni della rosa media di tutti gli anni disponibili e mostrano valori superiori rispetto alla media, come atteso dal confronto dei profili. Per quanto riguarda i valori di velocità, l'anno più vicino alla rosa media è il 2017, mentre per la percentuale delle calme l'anno più prossimo è il 2018 con il 27% rispetto al 31%. Passando alle rose a diverse profondità del fondale, si rileva che la percentuale delle calme è molto superiore negli anni scelti rispetto alla media di tutti gli anni disponibili, risultando il 2017 l'anno più rappresentativo (54% e 69% delle calme a metà fondale ed al fondale rispetto al 49% e 53% nel periodo 1987-2019). I valori massimi dell'anno 2017 a metà fondale ed al fondo non sono tuttavia cautelativi rispetto ai valori massimi delle rose di tutti gli anni disponibili, che risultano meglio approssimati dalle rose dell'anno 2019. Le rose dell'anno 2019 a tutte le profondità presentano valori delle velocità superiori rispetto alla rosa media, risultando più cautelative dell'anno 2017 e meno cautelative dell'anno 2018. In quanto alla percentuale delle calme, l'anno 2019 si colloca in posizione intermedia rispetto al 2017 e al 2018 nel confronto con la media di tutti gli anni disponibili, con valori di 26%, 64%, 84% passando dalla superficie al fondo.

In definitiva, si sceglie quindi l'anno 2019 per la modellazione dell'intero anno con il codice di calcolo MIKE 3 perché consente di rappresentare con buona accuratezza il profilo delle velocità, le intensità e le direzioni delle correnti, sottostimando e sovrastimando rispettivamente la durata delle calme alla superficie ed al fondo in un anno tipico.

Tabella I.1 - Rose delle correnti a diverse quote del fondale, 1987-2019

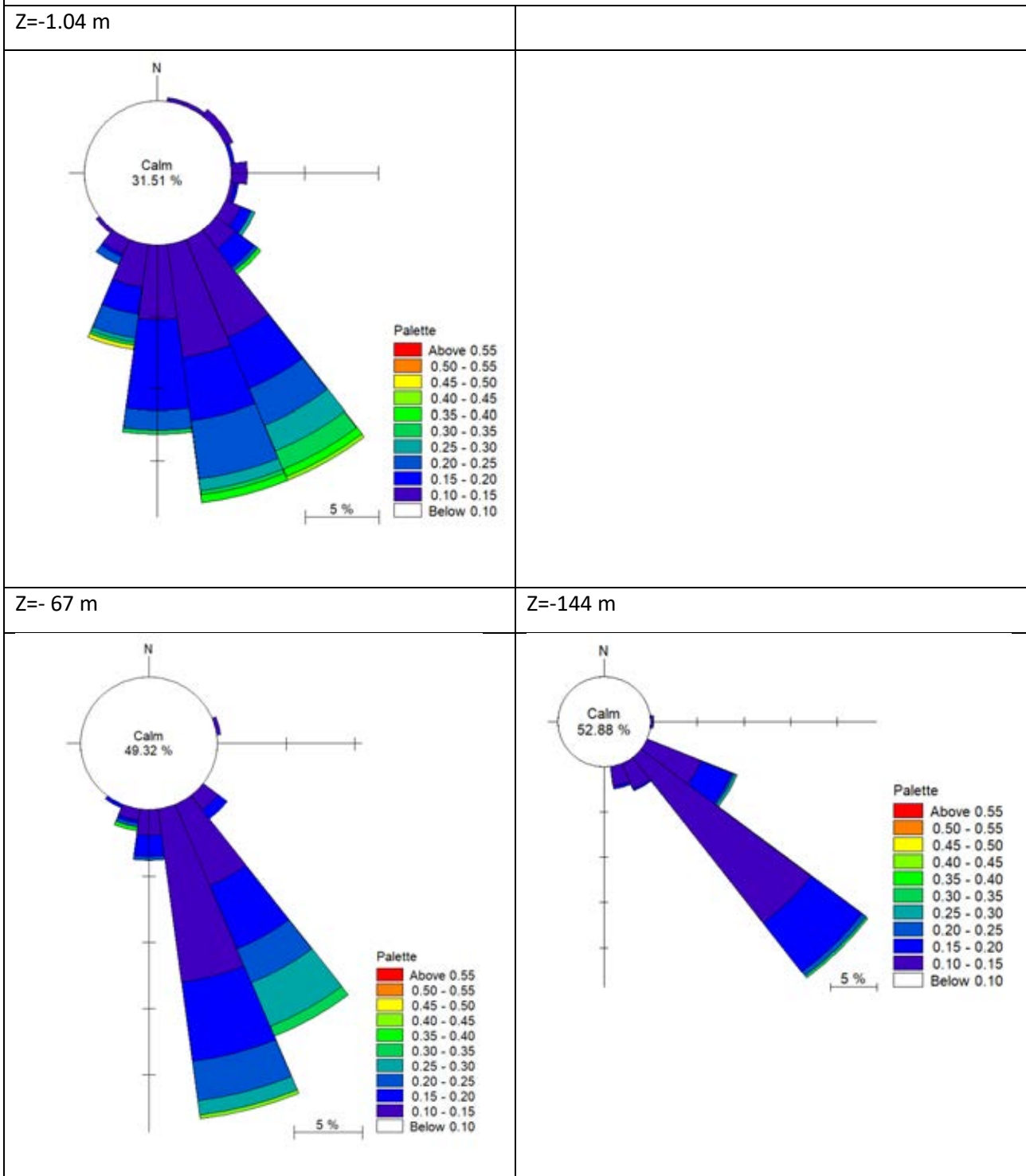
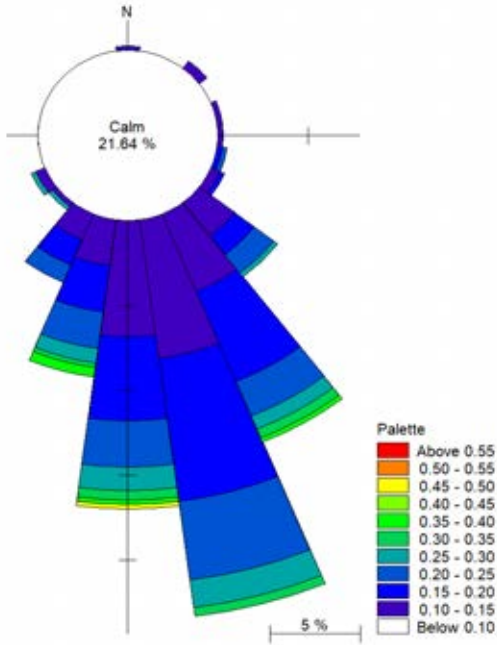
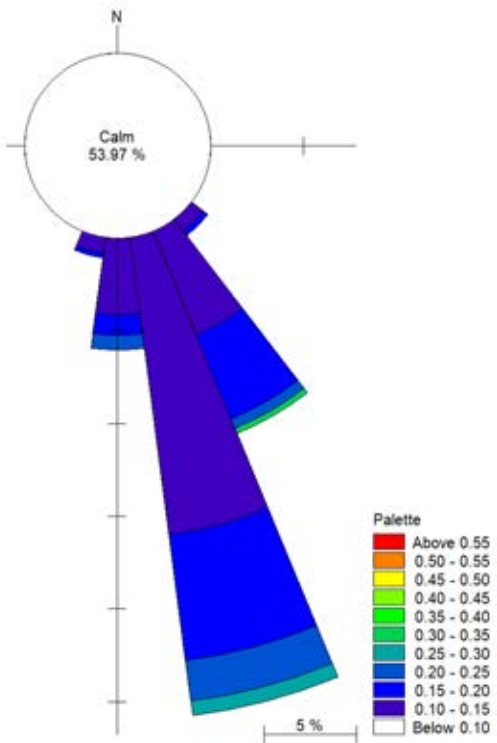


Tabella I.1 - Rose delle correnti a diverse quote del fondale, 2017

Z=-1.04 m



Z=- 67 m



Z=-144 m

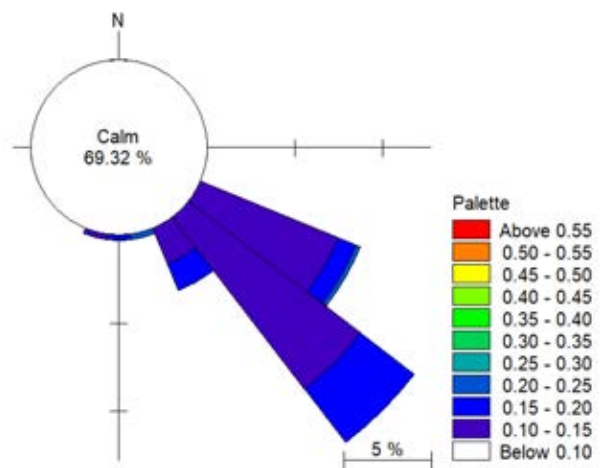
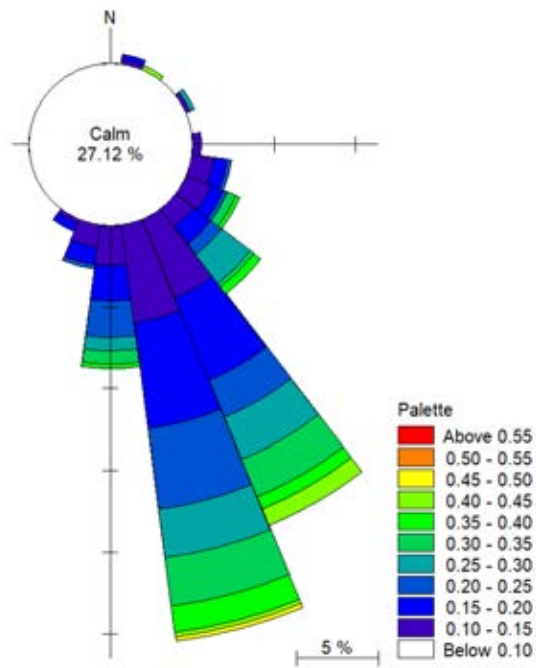
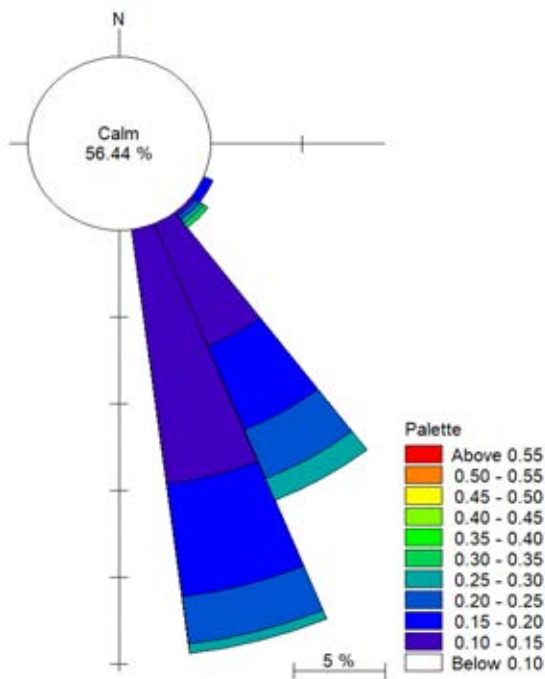


Tabella I.1 - Rose delle correnti a diverse quote del fondale, 2018

Z=-1.04 m



Z=- 67 m



Z=-144 m

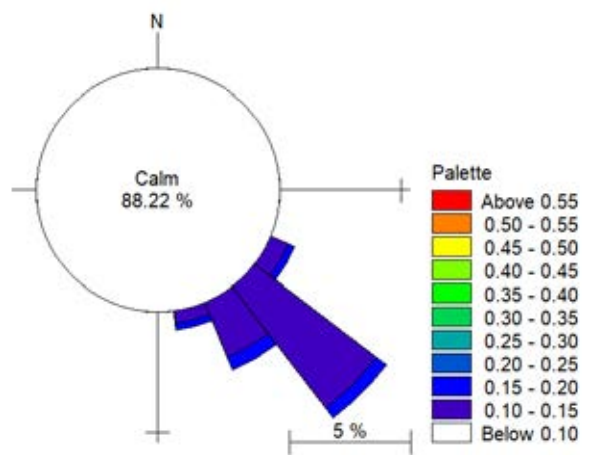
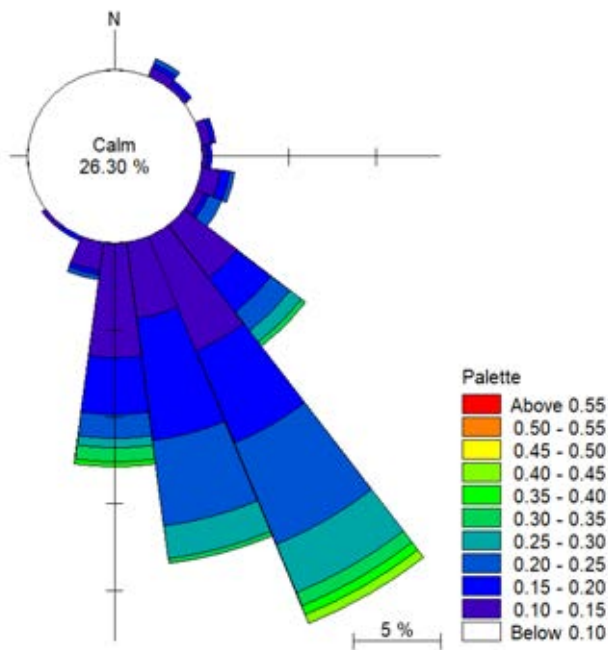
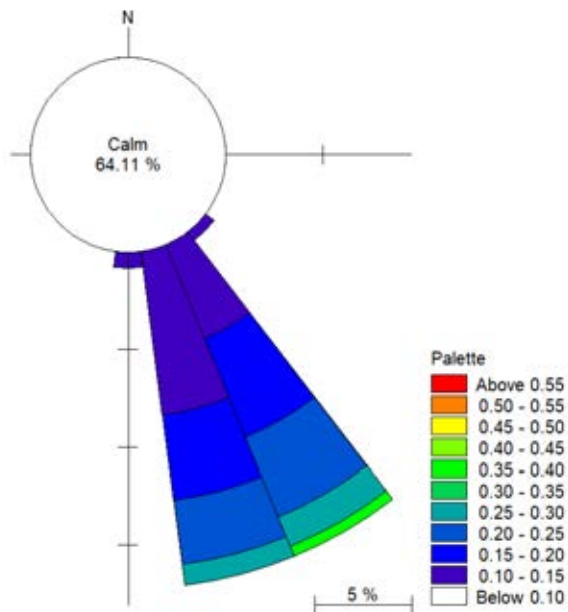


Tabella I.1 - Rose delle correnti a diverse quote del fondale, 2019

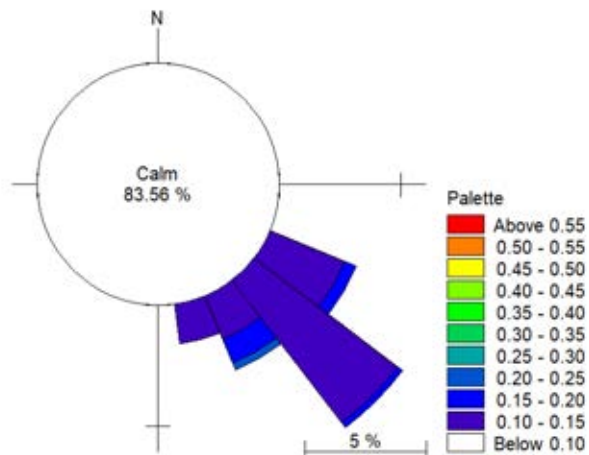
z=-1.04 m



Z=-67 m



Z=-144 m



4. MODELLAZIONE NUMERICA CON MIKE 3

4.1 IL MODELLO NUMERICO MIKE 3

MIKE 3 è un codice di calcolo professionale per la simulazione di correnti a pelo libero in tre dimensioni. MIKE 3 è utilizzabile per lo studio di flussi e correnti, trasporto di sedimenti coesivi e non, qualità delle acque ed ecologia in fiumi, laghi, estuari, baie, aree costiere e mare aperto. MIKE 3 costituisce un pacchetto professionale unico per le attività di ingegneria e consulenza a supporto della progettazione, pianificazione e gestione in ambienti fluviali e marini a diverse scale spaziali.

HD (Hydrodynamics) - Il modulo idrodinamico simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. HD consente la simulazione di un'ampia gamma di fenomeni idraulici e può essere utilizzato per la rappresentazione in tre dimensioni di ogni corrente a pelo libero.

MT (Mud Transport) - il modulo multi-frazione e multi-strato in grado di descrivere l'erosione, il trasporto e la ri-deposizione di materiale coesivo e di sedimenti misti coesivi e non. Particolarmente adatto per studi di dispersione di sedimenti conseguenti a dragaggi dei fondali.

4.2 COSTRUZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO ORIZZONTALE

La griglia di calcolo è stata costruita a partire dalle caratteristiche dello scavo del cavidotto (Figure I.6, I.7). Nella zona dello scavo, la forma della griglia è stata scelta quadrangolare e la dimensione della cella è stata determinata tenendo conto delle seguenti osservazioni:

- deve rappresentare con una accuratezza compatibile con i tempi di calcolo la zona di scavo del fondale, per cui sono disponibili dati ad alta precisione forniti dal committente (una fascia larga 1000 m attorno all'asse della trincea);
- deve tenere conto della velocità di avanzamento della draga, pari a 500 m/h; la dimensione della cella e il corrispondente passo temporale di calcolo devono rappresentare la draga in una singola cella ad ogni passo temporale;
- deve avere un volume tale da rappresentare correttamente la diluizione iniziale delle concentrazioni dei sedimenti messi in sospensione durante le operazioni.

Si identifica come dimensione ottimale per la maglia quadrangolare la dimensione di 160 m per ottimizzare i tempi di calcolo mantenendo una buona discretizzazione della zona di scavo ed adiacente allo stesso, rappresentata da un corridoio di larghezza pari a 3 celle allineate. Il passo temporale deve quindi essere pari a 20 minuti perché la draga possa occupare una singola cella della griglia ad ogni passo temporale.

La restante griglia di calcolo è di tipo triangolare, con le dimensioni delle celle studiate approfonditamente per mantenere una rappresentazione dettagliata in tutta la zona prossima allo scavo, garantire passaggi graduali da una zona all'altra e ottimizzare i tempi di calcolo, da un lato prioritizzando le zone prossime allo scavo e di possibile dispersione del sedimento, dall'altro controllando la dimensione dell'elemento più piccolo della griglia, che di fatto determina i tempi di calcolo.

In particolare, si è creato un corridoio (largo 190 m per parte, simmetrico rispetto all'asse della trincea) che circonda completamente la zona di scavo, per creare una prima fila di triangoli di dimensioni simili a quelle della maglia quadrangolare e rendere graduale il passaggio da una tipologia di maglia all'altra. Per questa

prima zona adiacente lo scavo si è scelta una risoluzione analoga, con massima lunghezza dei cateti pari a 190 m (la massima lunghezza dei cateti si ottiene disponendo a distanza fissata i vertici lungo i bordi esterni di ogni area, i punti rossi lungo le linee nere rappresentati nelle viste della griglia di calcolo in Figura I.6). Nel corridoio mediano e nel corridoio più esterno le massime lunghezze dei cateti sono rispettivamente pari a 250 m e 300 m. La griglia di calcolo si compone anche di due aree a minore risoluzione, sempre a maglia triangolare, con le lunghezze massime dei cateti pari rispettivamente a 600 m e 1000 m. La griglia complessivamente consta di 47'550 elementi e 24'578 nodi.

Il risultato della sovrapposizione tra i dati batimetrici disponibili e la griglia di calcolo è mostrato in Figura I.8.

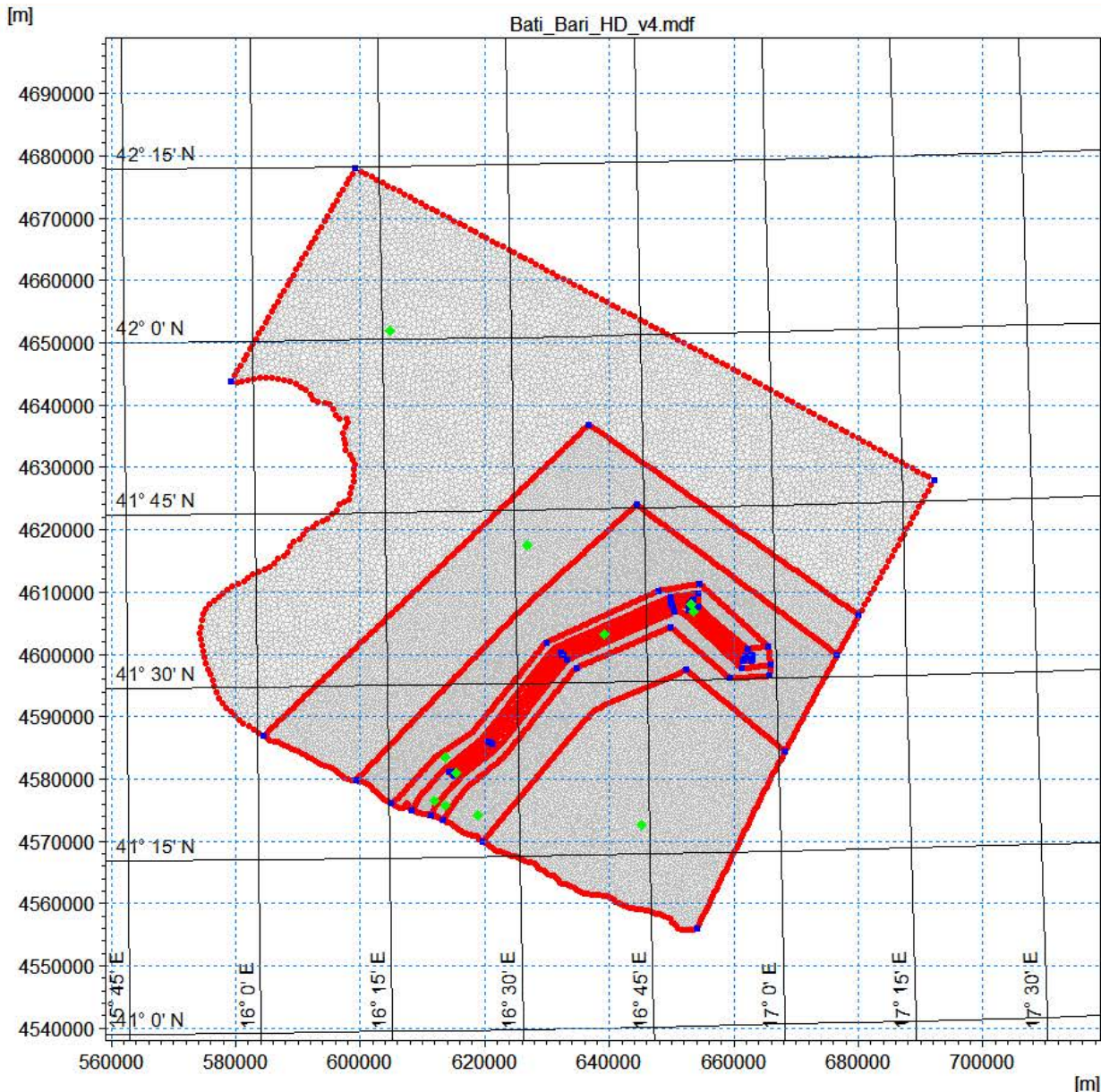


Figura I.6. Immagine della intera griglia di calcolo.

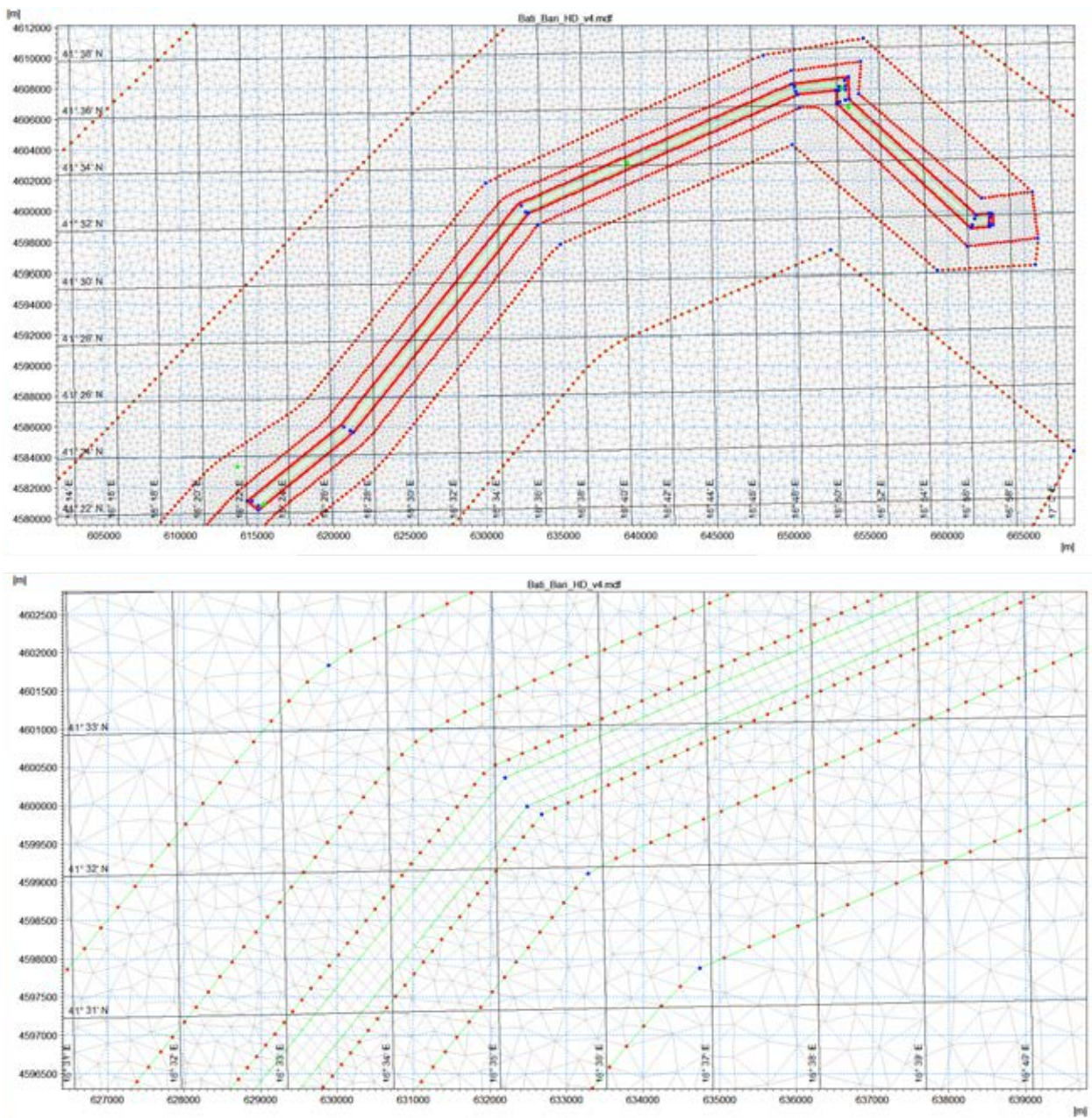


Figura I.7. Immagini della griglia di calcolo che dettagliano con diverso livello di ingrandimento la zona dello scavo.

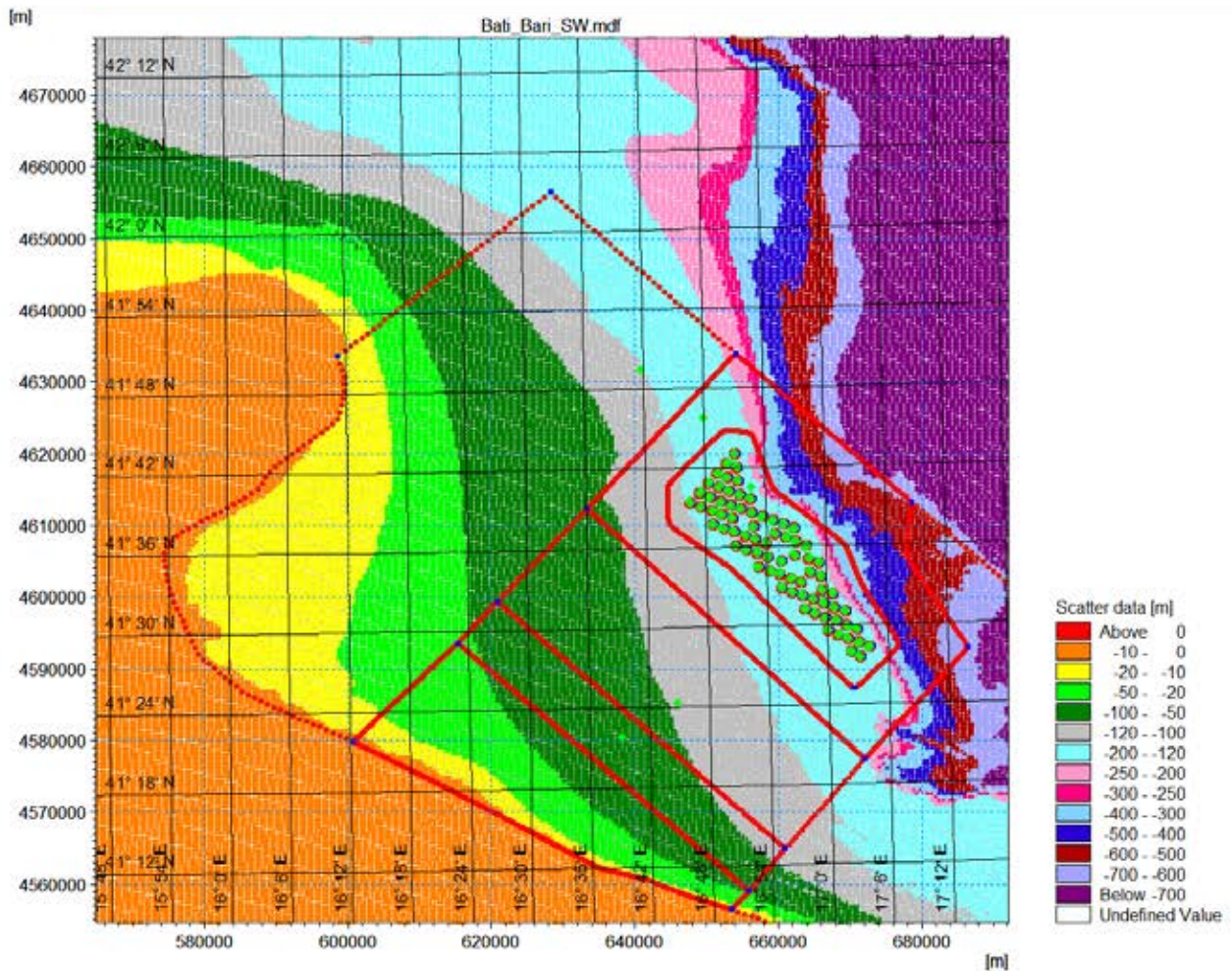


Figura 1.8. Risultato della interpolazione e sovrapposizione con la griglia di calcolo.

4.3 COSTRUZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO VERTICALE

Il modello tridimensionale MIKE 3 segue l'approccio di discretizzazione della colonna d'acqua sia sui cosiddetti livelli "sigma" (strati di spessore variabile in funzione della profondità locale), sia su livelli orizzontali "zeta" sia, infine, su livelli combinati "sigma-zeta".

La dimensione verticale è stata rappresentata nel modello con una discretizzazione ibrida di livelli sigma-zeta, per un totale di 53 livelli (Figura 1.9). In particolare, fino alla profondità di -35 m (profondità di inizio dello scavo) sono stati utilizzati 6 livelli sigma, di spessore variabile da 3.5 m a 8.75 m, con gli spessori minori alla superficie ed al fondo. Per profondità superiori, la colonna d'acqua è stata discretizzata con 47 livelli di tipo zeta, i primi 33 a spessore costante pari a 3.5 m (fino alla profondità di -150 m dove finisce lo scavo) e poi di spessore crescente da 3.5 m a 150 m fino a coprire la quota massima del fondale di -700 m.

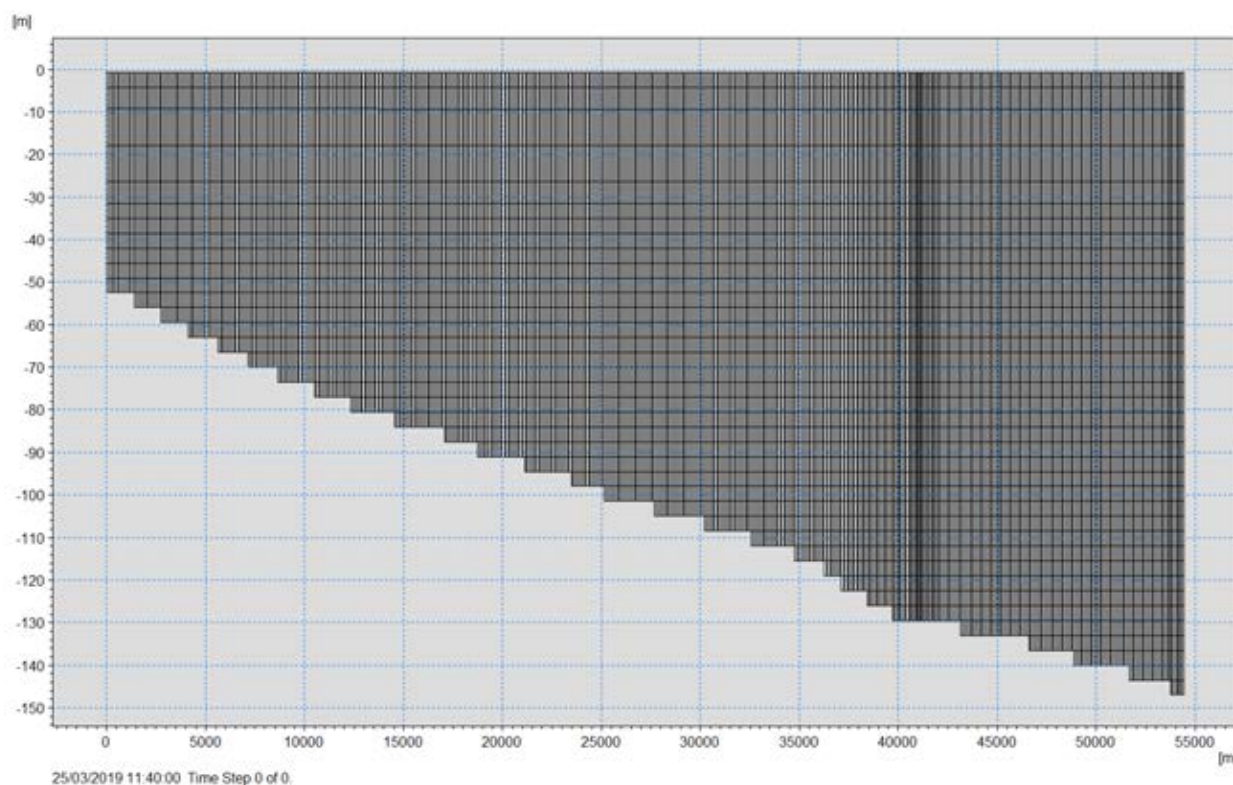


Figura I.9. Strati “sigma” e strati “zeta” utilizzati nella realizzazione della griglia verticale. Sezione lungo la trincea.

4.4 SETTAGGIO DEL MODELLO MIKE 3 HD

Il modello MIKE3 HD risolve le equazioni alle acque basse, con la scelta del modello “higher order” per la risoluzione spazio-temporale tenendo conto della convergenza, per cui si assume il numero critico di Courant CFL pari a 0.8. Si risolvono, sempre con la stessa tecnica “higher order”, le equazioni per la variazione della temperatura e salinità nello spazio e nel tempo, dato che la densità del fluido è considerata funzione della temperatura e la salinità.

La viscosità turbolenta adotta per la componente orizzontale la formulazione di Smagorinsky, con coefficiente costante pari a 0.28, e per la componente verticale il modello $k-\varepsilon$, lo stesso modello adottato per risolvere la turbolenza della corrente. La scabrezza del fondale è costante, con la scabrezza pari a 0.01 m.

Si integra la correzione di Coriolis, variabile nello spazio e nel tempo. Si rappresenta la forzante del vento, variabile nello spazio e nel tempo, mediante dati CFSR (Sezione 3.1).

Le condizioni iniziali consistono nella imposizione, su tutto il dominio,

- della profondità e velocità della corrente, ottenute combinando i dati CMEMS, che non includono l’effetto della marea, e i dati ottenuti dal modello globale di marea oceanica DTU10 (Sezione 3.1);
- della temperatura e della salinità ottenute estraendo i dati disponibili CMEMS e quindi interpolando tra questi dati per ottenere valori su ciascun elemento della griglia di calcolo orizzontale e verticale.

Le condizioni al contorno (Sud, al largo e Nord, Figura I.10) sono

- livelli e velocità della corrente, variabili nel tempo e lungo il contorno, ottenuti come sopra dalla combinazione dei dati CMEMS e DTU10. A terra vale la condizione di velocità normale nulla;
- temperatura e salinità, variabili nel tempo e lungo il contorno, ottenuti come sopra dai dati CMEMS.

I risultati della simulazione consistono dei livelli della superficie libera su tutta l'area di calcolo e della velocità e direzione delle correnti, della temperatura, della salinità e del numero di Courant CFL (per verificare la stabilità del modello) su tutto il volume di calcolo.

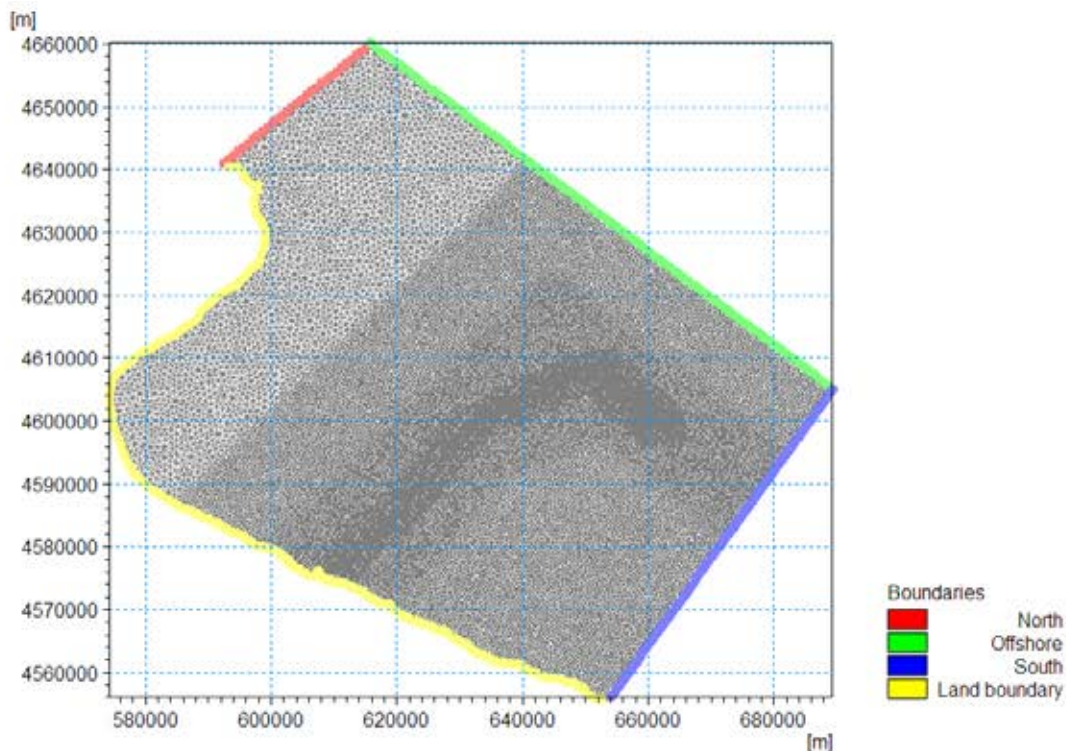


Figura I.10. Griglia di calcolo con i contorni evidenziati.

4.5 APPROCCIO A FINESTRE MOBILI

La modellazione della circolazione nella zona di studio per l'intero anno tipico consente di rappresentare la sospensione e successiva dispersione del materiale di scavo per tutte le possibili combinazioni di corrente, vento, temperatura, salinità, livelli del mare durante l'intero anno.

Per tenere conto del fatto che le operazioni di scavo possono iniziare in qualunque momento dell'anno ed ottenere una statistica accurata, si adotta l'approccio "a finestre mobili". La finestra in questo caso è l'intervallo di tempo (giorni) in cui si immagina di iniziare l'operazione di scavo, terminarla e attendere un tempo idoneo alla sospensione, dispersione, sedimentazione ed eventuale ri-sospensione dei sedimenti. Si simulano tante finestre nell'arco dell'anno quanti sono i giorni dell'anno divisi per i giorni della finestra.

In questo caso, la draga procede a velocità di 500 m/h e quindi completa lo scavo, lungo 75.5 km, in 115 h, di fatto circa 4.8 giorni. Si stima quindi ragionevole attendere un tempo simile, pari a 5.2 giorni, per la dispersione, sedimentazione ed eventuale ri-sospensione del materiale. La finestra risulta complessivamente pari a 10 giorni e le simulazioni da effettuare col modello di trasporto MIKE3 MT sono quindi 37 per coprire l'intero anno. Ogni operazione di scavo e attesa di dispersione, sedimentazione e ri-sospensione si ripete uguale per 37 volte, modificando ogni volta il tempo di inizio e di fine, modellando quindi le operazioni con sempre diverse condizioni di corrente, livelli, temperatura e salinità.

L'approccio per le simulazioni di trasporto di sedimento a "finestre mobili" è in piena conformità alle indicazioni riportate nelle linee guida ISPRA di settore (Feola et al., 2016).

4.6 SETTAGGIO DEL MODELLO MIKE 3 MT

Il MIKE 3 MT calcola il trasporto solido di materiali coesivi utilizzando come base i risultati "decoupled" del modello MIKE 3 HD. Le equazioni sono risolte con metodo "higher order" sia nello spazio sia nel tempo.

Le frazioni di materiale sono tre, sabbia, limo e argilla, di diametri medi assunti pari al centro classe secondo la classificazione granulometrica di Udden-Wentworth: 0.25 mm, 0.0156 mm e 0.00163 mm.

Per limo e argilla si indicano le velocità di sedimentazione w_s , pari rispettivamente a 56.7 ml/s e 0.6 m/s, ottenute applicando la legge di Stokes

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho) g d^2}{\rho \cdot 18\nu}$$

dove ρ è la densità dell'acqua, g è l'accelerazione di gravità, d è il diametro del materiale, ν è la viscosità cinematica. La concentrazione di flocculazione e la concentrazione per la sedimentazione sono fissate rispettivamente pari a 0.01 kg/m³ e 10 kg/m³.

Le percentuali di sabbia, limo e argilla sono rispettivamente 6%, 72% e 22% nella zona di scavo da riva a largo e 64%, 31% e 5% nella zona di scavo lungo il parco eolico, tra la Sottostazione 1 e la Sottostazione 2, come mediamente si desume dai campionamenti resi disponibili nell'area di studio. Si sono quindi definite due "draghe virtuali" a percorrere in sequenza le due tratte della trincea, con diverse caratteristiche del sedimento dragato, a parità di tutti gli altri parametri del sedimento e dello scavo.

Il materiale si deposita quando la tensione tangenziale è superiore alla tensione critica di scorrimento, che viene considerata costante e pari a 0.07 N/m². La concentrazione di materiale viene stimata mediante il profilo di Teeter (Teeter, 1986). La dispersione del materiale viene modellata in orizzontale e verticale utilizzando la formulazione "scaled eddy viscosity" con coefficienti di dispersione costanti (1 in orizzontale, 0.1 in verticale).

Le condizioni iniziali ed al contorno corrispondono ad acqua limpida, senza alcuna frazione di sedimento in movimento o introdotta nel dominio.

Come spiegato nella Sezione 4.5, si sono predisposti 37 modelli MIKE 3 MT con lo stesso settaggio dei parametri e gli stessi risultati in uscita. Ogni simulazione dura per un periodo di 10 giorni, con un passo temporale pari a 20 minuti, per consentire di seguire il passaggio della draga da una cella alla successiva della griglia messa a punto per rappresentare la zona di scavo. In Appendice I è riportata, a titolo esemplificativo, la evoluzione nel tempo della sospensione, dispersione e sedimentazione del materiale nell'arco di una

finestra mobile.

Per ogni simulazione MT, si sono predisposti due files esterni dove rappresentare le operazioni di scavo nel tempo, in particolare

- la posizione della draga, ottenuta dalla estrazione delle coordinate della trincea lungo l'asse mediano della stessa,
- la quantità di materiale scavato, pari a -735 kg/m (negativa a indicare che il materiale viene localmente versato nel dominio di calcolo dalla draga).

Sono state infatti definite due draghe, per tenere conto delle diverse concentrazioni delle tre frazioni nelle due zone dello scavo. Una draga si sposta da riva a largo e un'altra si sposta lungo il parco; le due draghe operano in successione e dragano la stessa quantità di materiale per ogni cella, ma con percentuali diversi di possibile sospensione. Sulla base del lavoro di Gooding et al. (2021), si considera la sospensione tipica del jet-trench: 50-70% per sedimenti coesivi nel caso di argilla fine, e 15-30% per sedimenti non coesivi nel caso di sabbia compatta. Dato che nel lavoro citato si considera la posa di una condotta, mentre qui si sta studiando un cavidotto, si assumono per ciascuna classe le percentuali di sospensione minime (15% per la prima draga, da riva a largo, e 50% per la seconda draga, lungo il parco), senza tuttavia applicare coefficienti riduttivi e quindi a vantaggio di sicurezza.

I risultati estratti da MIKE 3 MT sono di due tipi:

- un file di volume, che contiene la concentrazione del sedimento in sospensione per ciascuna frazione e la concentrazione del sedimento totale in sospensione;
- un file di superficie, che contiene la variazione totale del fondale e la variazione totale di massa al fondo nel tempo.

5. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE CON MIKE 3

5.1 CAMPO TRIDIMENSIONALE DELLE CORRENTI

Si riportano alcuni istanti esemplificativi della idrodinamica che si verifica nell'arco dell'anno tipico. Nello specifico, si riportano i campi delle correnti alla superficie ed al fondo: per la tipica circolazione da Nord-Ovest a Sud-Est (Figura I.11), per la circolazione da Nord-Ovest a Sud-Est con formazione di vortici e circolazione sottocosta in direzione Sud-Est (Figura I.12) e in direzione Nord-Ovest (Figura I.13) e, caso molto meno frequente, per la circolazione da largo a riva con formazione di vortici attorno al promontorio del Gargano (Figura I.14). Le mappe mostrano in scala di colori e in vettori la intensità e direzione delle correnti.

A livello generale, si nota come le correnti al fondo siano, come atteso dall'esame delle rose delle correnti in Tabella I.1, significativamente inferiori alle correnti in superficie e presentino sostanzialmente le medesime direzioni.

Le Figure I.11 e I.12 rappresentano una corrente superficiale intensa da Nord-Ovest, con velocità massime di 0.6 m/s e 0.4 m/s rispettivamente. La corrente superficiale in Figura I.11 risulta distribuita in modo quasi uniforme, con una accelerazione in direzione Sud-Est e sotto-costa rispetto al promontorio del Gargano e una decelerazione immediatamente a valle del promontorio stesso legata al distacco della corrente. Una zona caratterizzata da minore intensità della corrente si evidenzia anche in corrispondenza di fondali variabili tra $h=50$ m e $h=80$ m, dinanzi alla zona di installazione del parco.

La Figura I.12 mostra in modo più evidente la circolazione della Figura I.11, con la corrente da Nord a Sud che si stacca dal promontorio, creando una fascia con una velocità apprezzabile, mentre su entrambi i lati di questa fascia la corrente pressoché ristagna. La circolazione in Figura I.13 è simile a quella evidenziata in Figura I.12 sia per valori di velocità sia per la distribuzione, con la fascia a maggiore velocità che si stacca dal promontorio, tuttavia si nota in questo caso la formazione di vortice sottocosta con circolazione a riva diretta da Sud-Est verso il promontorio.

La Figura I.14 mostra una rara condizione di corrente che si muove da largo a costa con due grandi vortici che si creano in corrispondenza del promontorio del Gargano. La corrente assume i valori massimi di velocità di 0.4 m/s nella zona di installazione del parco.

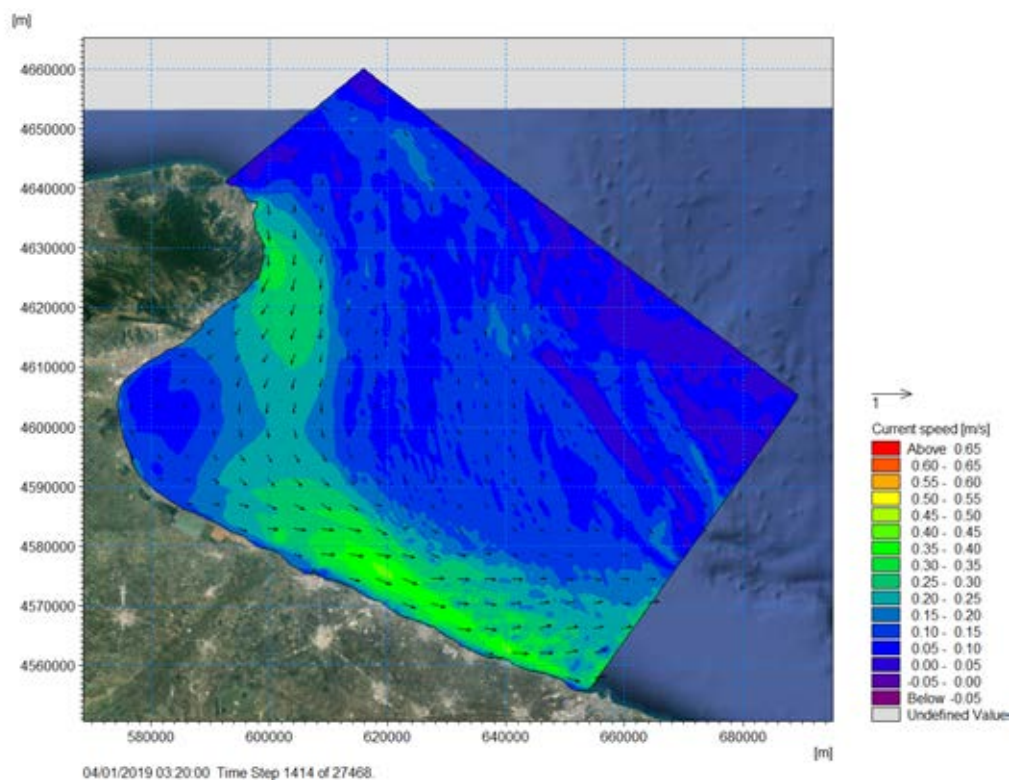
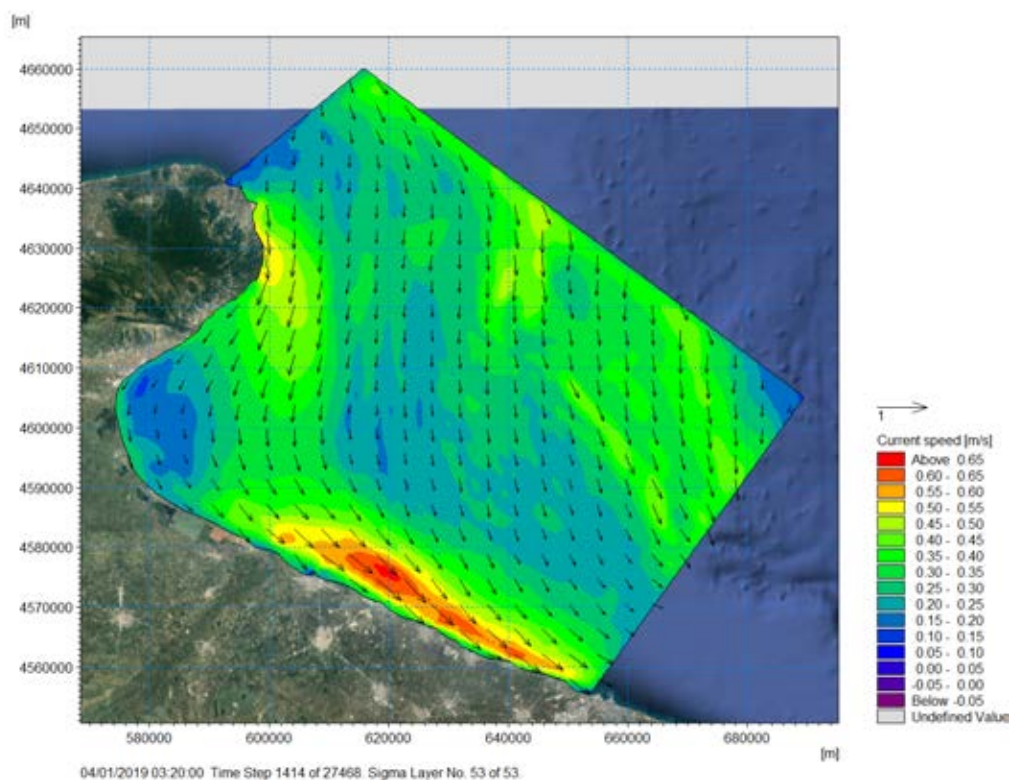


Figura I.11 Corrente in superficie (in alto) e corrente al fondo (in basso) per una circolazione tipica da Nord-Ovest a Sud-Est.

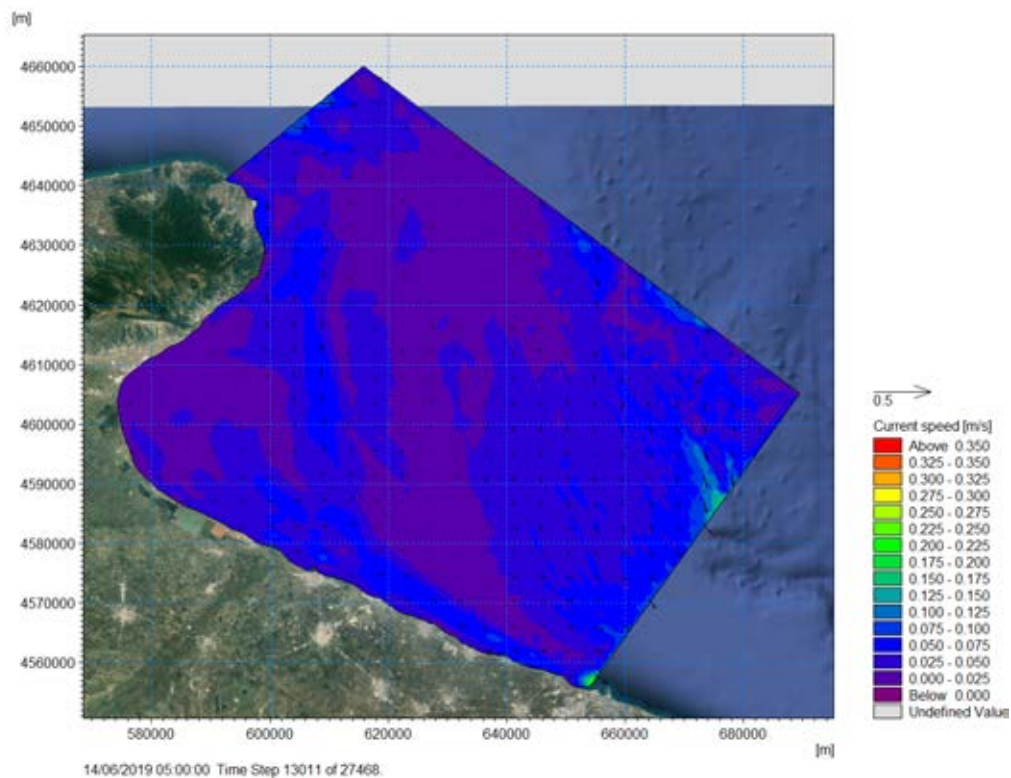
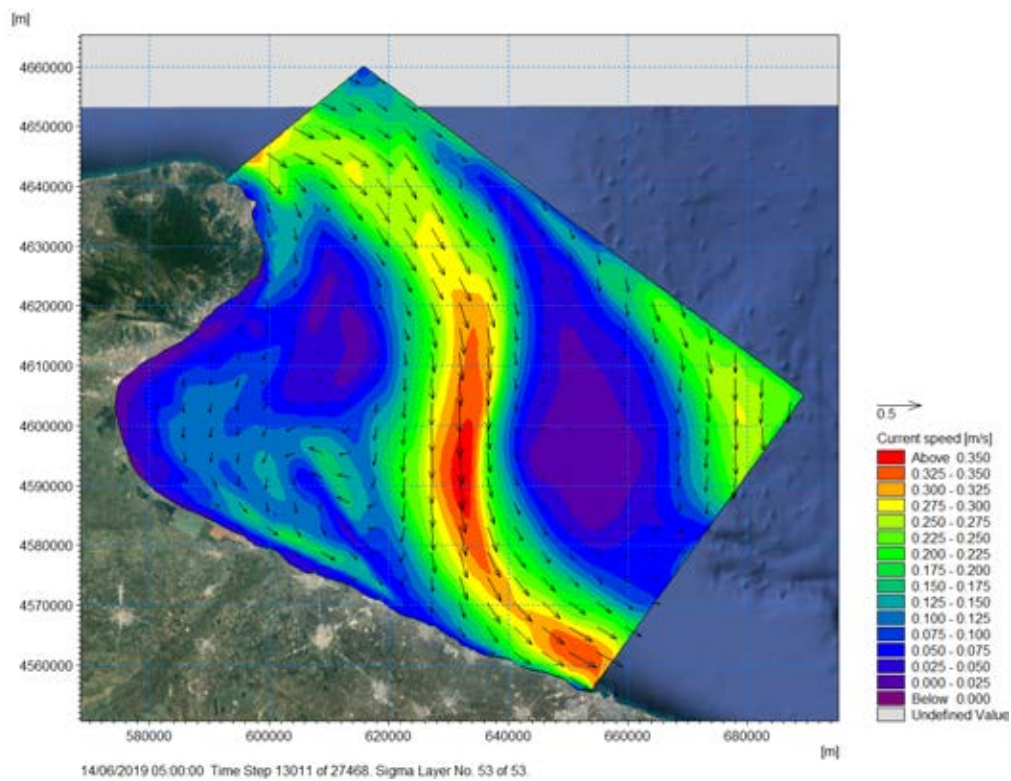


Figura I.12 Corrente in superficie (in alto) e corrente al fondo (in basso) per una circolazione tipica da Nord-Ovest a Sud-Est con formazione di vortici e circolazione sottocosta in direzione Sud-Est.

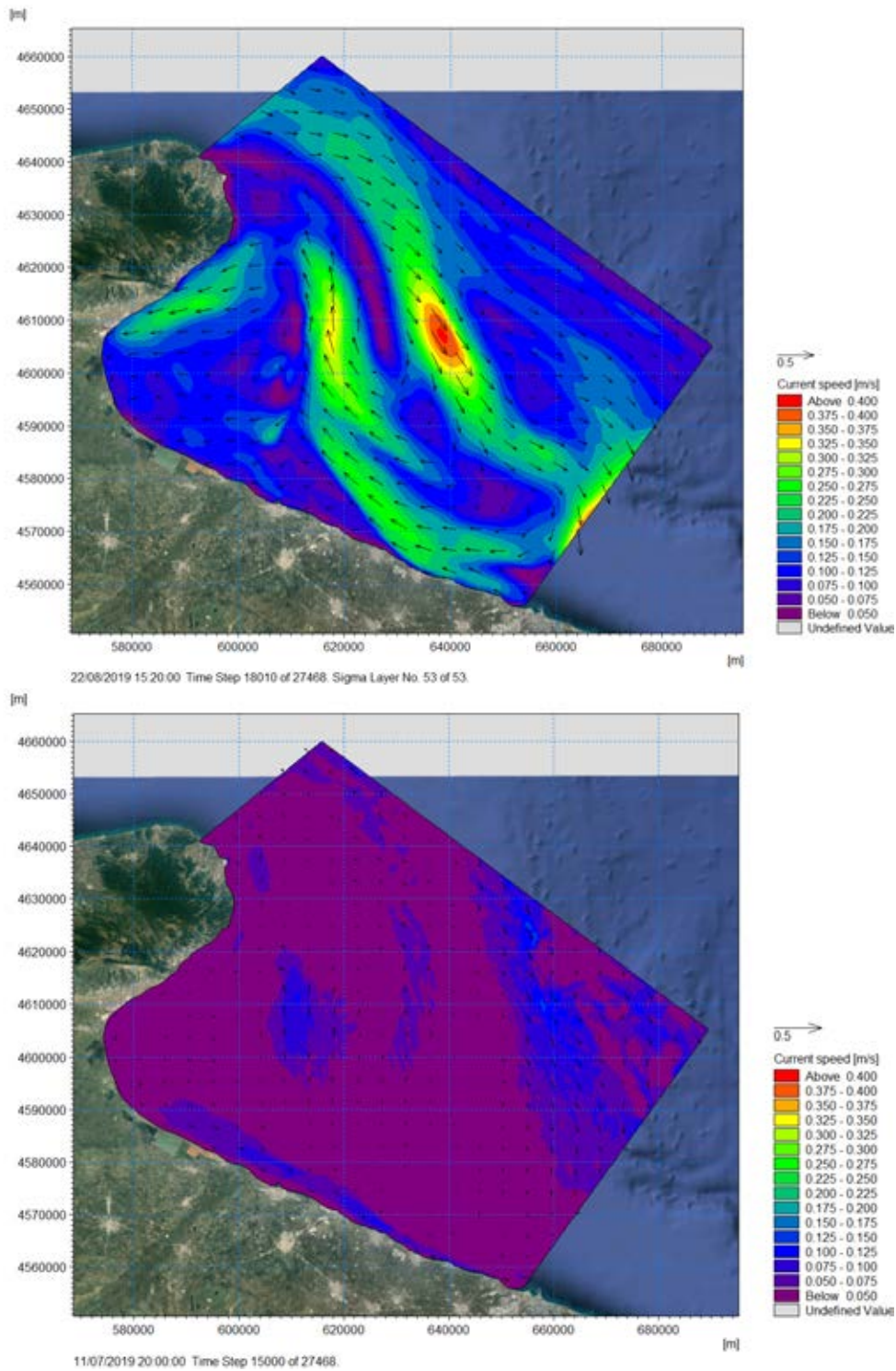


Figura I.13 Corrente in superficie (in alto) e corrente al fondo (in basso) per una circolazione tipica da Nord-Ovest a Sud-Est con formazione di vortici e circolazione sottocosta in direzione Nord-Ovest.

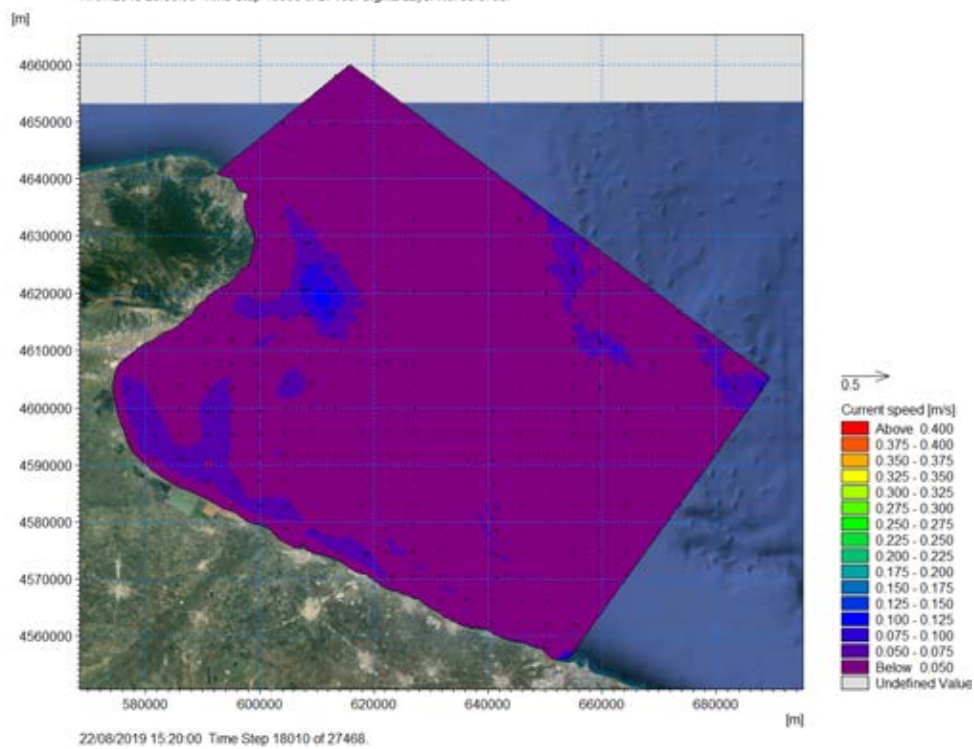
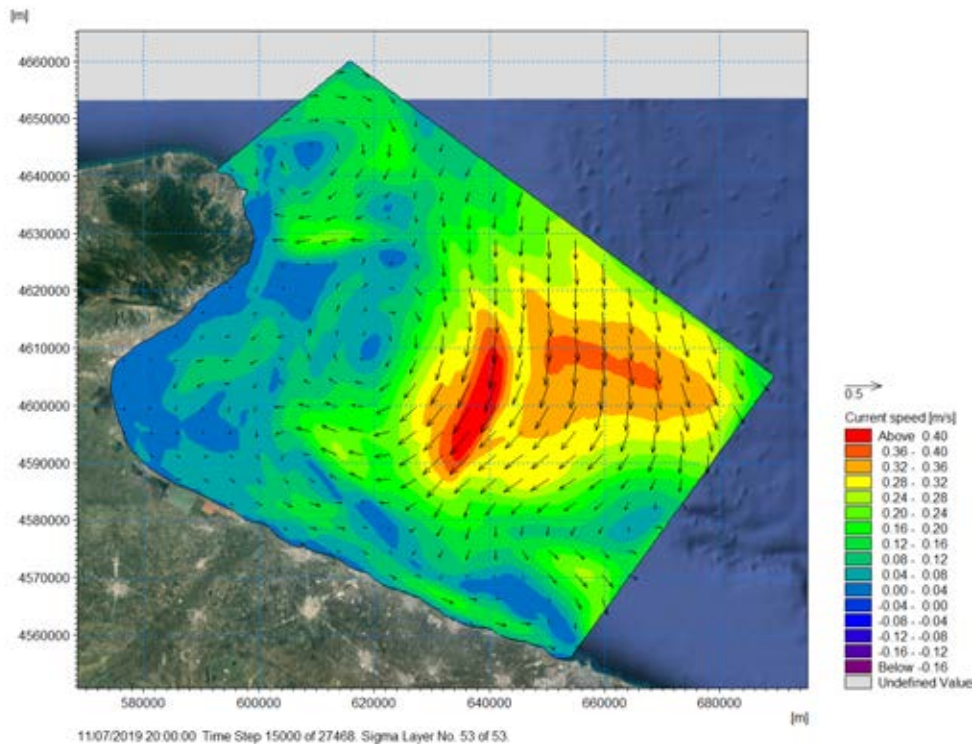


Figura I.14 Corrente in superficie (in alto) e corrente al fondo (in basso) per una circolazione tipica da Nord a Sud con formazione di vortici al promontorio del Gargano.

5.2 CAMPO TRIDIMENSIONALE DI SALINITÀ E TEMPERATURA

Le Figure I.15-I.18 mostrano le mappe stagionali della temperatura in scala di colori, a cui è sovrapposta la velocità della corrente in vettori. La temperatura si mantiene più elevata al largo, rispecchiando la tipica circolazione con corrente da Nord-Ovest che si stacca dal promontorio del Gargano e si riavvicina alla costa più a Sud-Est, riducendo il mescolamento immediatamente a Sud del promontorio stesso. Al fondo, la temperatura risulta più elevata sotto-costa rispetto al largo soltanto in Estate e in Autunno. In superficie, il gradiente maggiore da largo a riva si verifica in Inverno. Nello specifico, le variazioni nelle distribuzioni superficiali sono: 9°-15°C in Primavera, 23°-28°C in Estate, 15°-21°C in Autunno, 7°-15°C in Inverno. Al fondo, la fascia sotto-costa a temperatura maggiore si spinge fino a fondali più elevati nella zona Sud piuttosto che nella zona Nord dell'area di studio, a evidenziare ancora la circolazione della corrente che dal promontorio si riattacca alla riva in corrispondenza di una distanza pari circa a 2/3 dell'estensione lungo costa da Nord del dominio di calcolo rispetto al promontorio stesso. Oltre una certa profondità (fondale superiore a $h=100$ m) la temperatura è pressoché la stessa in tutte le stagioni (circa 14.5°C). Questo perché alle alte profondità, al di sotto del termoclino, l'acqua non risente più delle condizioni atmosferiche e quindi si mantiene a ugual temperatura durante tutto l'anno.

Figura I.19 mostra i profili di temperatura stagionale lungo la verticale estratti in corrispondenza della Sottostazione 1, su fondale di circa $h=120$ m. Lo scopo della Figura I.19 è visualizzare la presenza del termoclino, che è una indicazione importante per la possibile instaurazione di correnti di densità. Nello strato di termoclino, la temperatura diminuisce dal valore assunto nello strato di mescolamento a quello corrispondente alla temperatura dell'acqua profonda, che è stabile nel corso dell'anno in quanto non è influenzata dalla radiazione solare. Sotto il termoclino, la temperatura rimane costantemente bassa. La repentina variazione di densità costituisce uno sbarramento per la dispersione dei sedimenti quando le acque più calde e quindi le correnti meno dense galleggiano sopra quelle più fredde. In inverno accade, invece, che le acque superficiali possano scendere a temperature inferiori a quelle dello strato profondo e quindi le correnti profonde tendano a risalire perché meno dense, trascinando verso l'alto i sedimenti in sospensione. Nel Mare Mediterraneo, i termoclini sono due, uno estivo stagionale, che si instaura fra i 15 e i 40 m, e l'altro invernale più profondo, ad una profondità variabile fra i 150 e i 400 m.

I profili ottenuti in Figura I.19 sono perfettamente coerenti con le indicazioni di letteratura: si visualizza l'inizio dello strato di termoclino circa a -40 m in Primavera, -30 m in Estate, -35 m in Autunno, mentre in Inverno la temperatura superficiale è mediamente di 0.5°C inferiore rispetto alla temperatura al fondo. I profili mettono in evidenza l'elevata stratificazione termica verticale durante il periodo estivo, che diminuisce gradualmente durante l'anno fino ad arrivare ad una colonna d'acqua completamente rimescolata in inverno. La presenza di un termoclino ben sviluppato durante i mesi caldi influisce sull'effetto di confinamento al fondo; al contrario, durante i mesi invernali, contraddistinti da una differenza di densità tra il fondo e la superficie molto limitata, viene meno questo effetto di confinamento (si veda Sezione 5.4).

Per completezza si riportano anche le mappe tipiche della salinità, sia alla superficie sia al fondo, associate alle diverse stagioni: Primavera in Figura I.20, Estate in Figura I.21, Autunno in Figura I.22 e Inverno in Figura I.23. Le mappe di salinità corrispondono agli stessi istanti scelti per mostrare le mappe stagionali di temperatura. Le mappe mostrano le intensità della salinità in scala di colori e della velocità della corrente in vettori. Si nota come la salinità abbia una variabilità estremamente ridotta, sia da un punto di vista stagionale, sia tra superficie e fondo, mantenendosi sempre strettamente tra valori compresi tra 36 e 39 PSU.

La distribuzione della salinità presenta generalmente valori maggiori al largo che sotto-costa e la distribuzione al fondo si avvicina maggiormente alla distribuzione superficiale in Primavera ed in Inverno. Essendo le differenze molto modeste in ogni mappa (dell'ordine di 2 PSU per ciascuna distribuzione tra sotto-costa e largo), è ininfluente al fine di questo studio analizzare i dettagli delle distribuzioni stagionali.

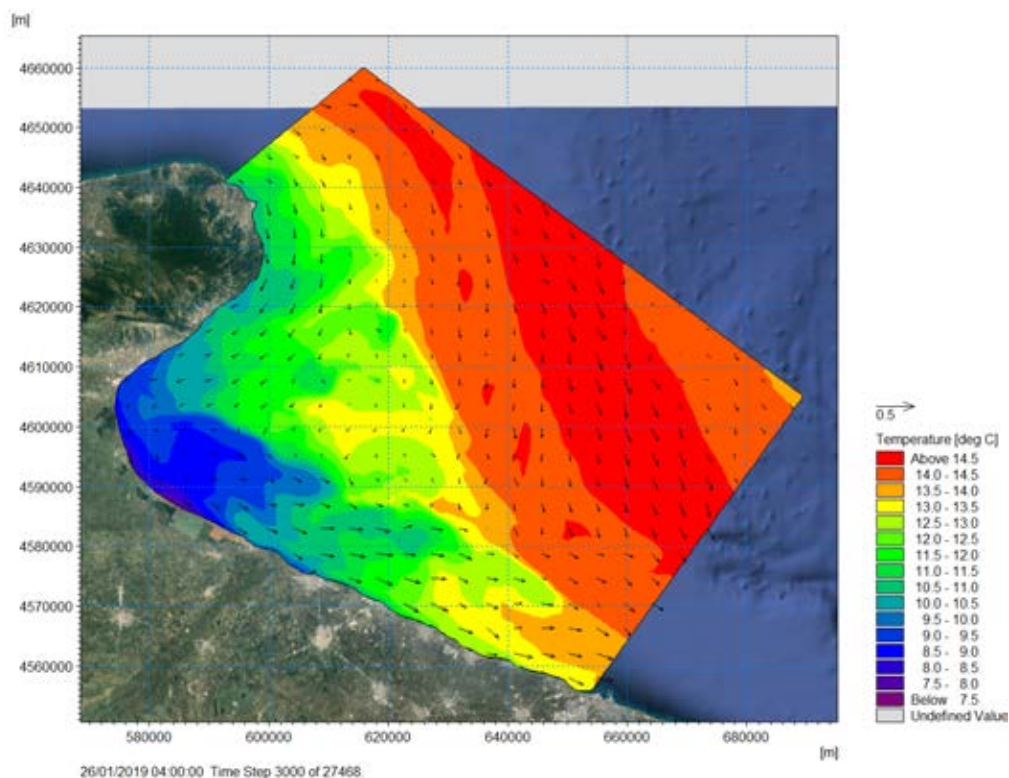
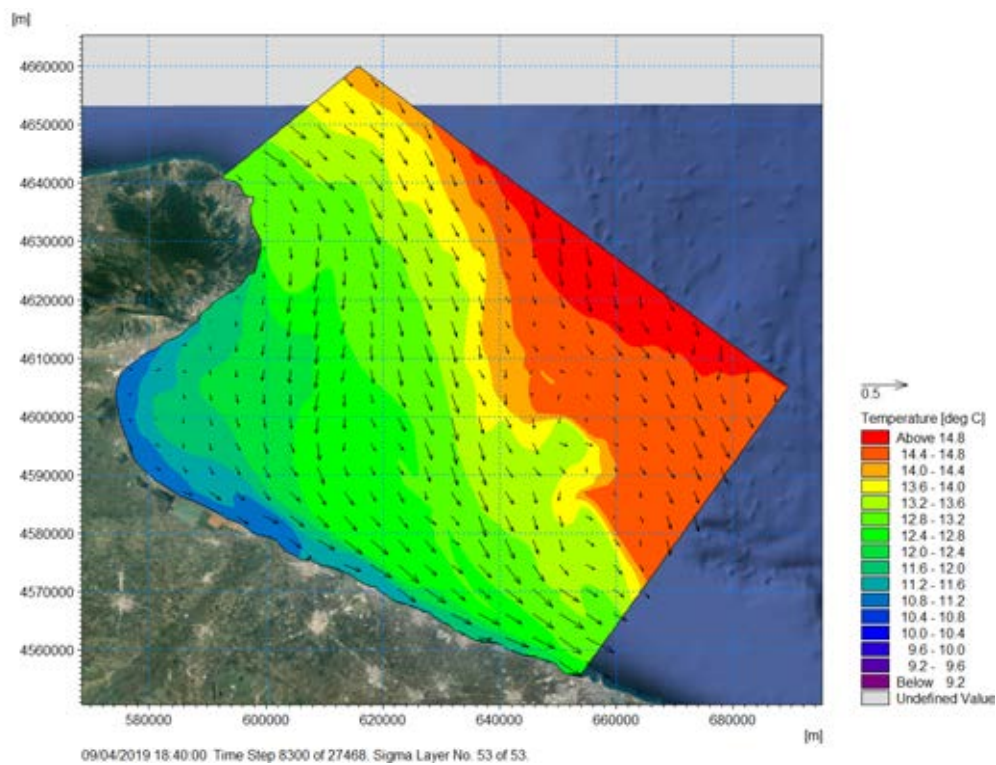


Figura I.15 Mappe di temperatura in superficie (in alto) e al fondo (in basso) per una tipica situazione Primavera. Temperatura in scala di colori, intensità della corrente in vettori.

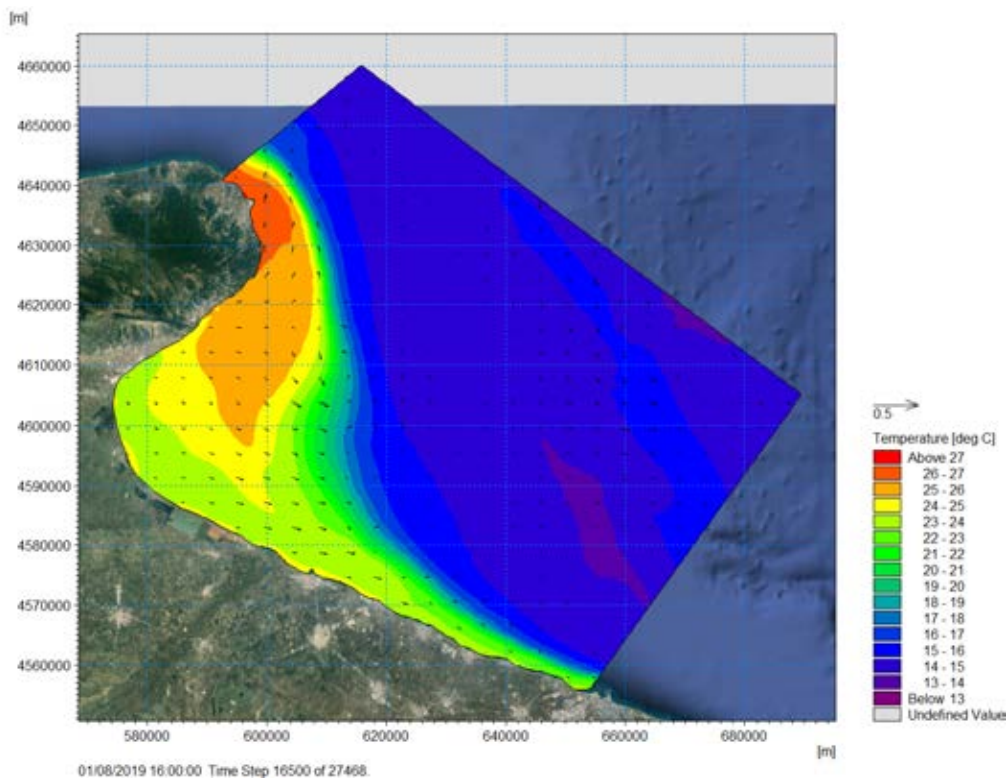
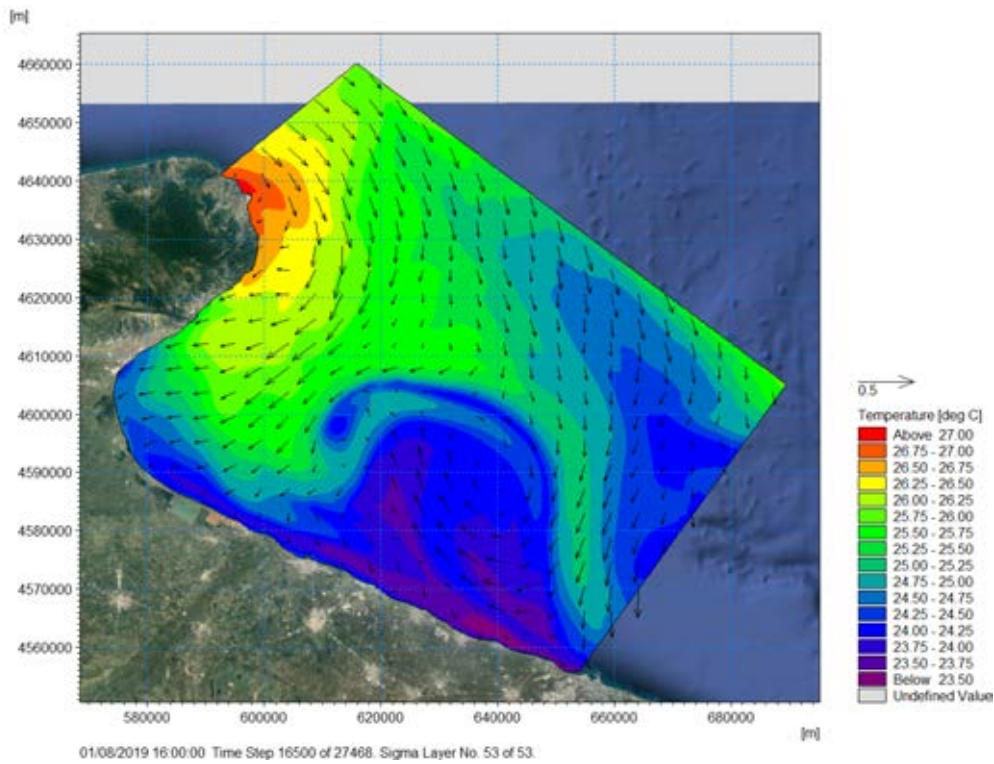


Figura I.16 Mappe di temperatura in superficie (in alto) e al fondo (in basso) per una tipica situazione Estiva. Temperatura in scala di colori, intensità della corrente in vettori.

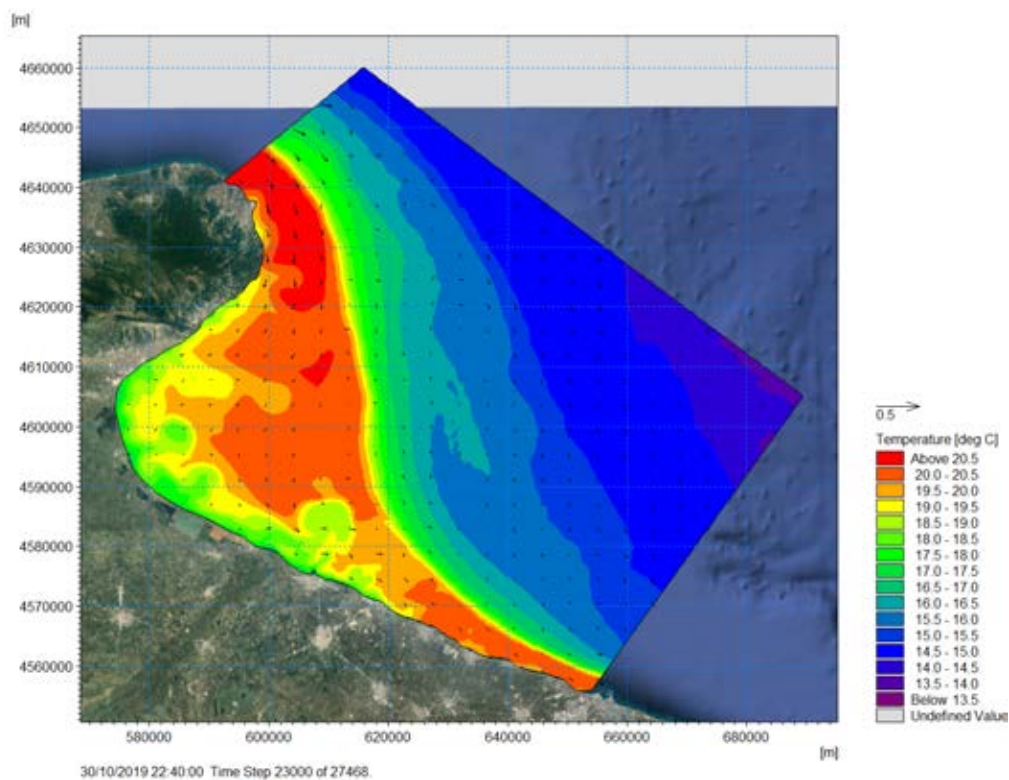
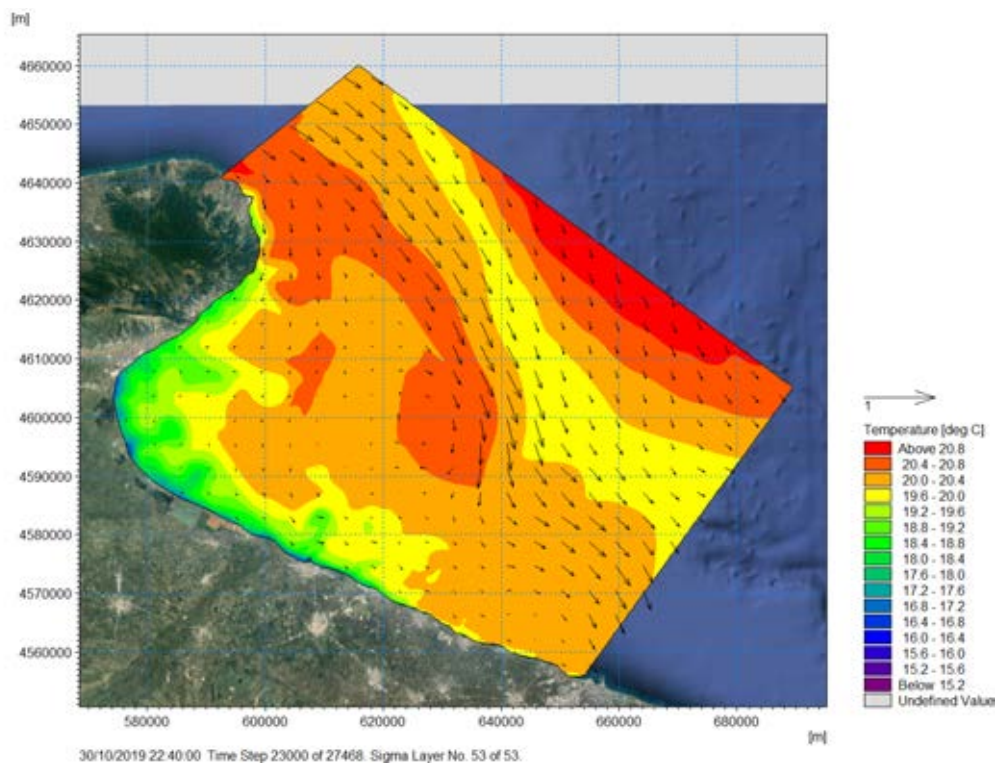


Figura I.17 Mappe di temperatura in superficie (in alto) e al fondo (in basso) per una tipica situazione Autunnale. Temperatura in scala di colori, intensità della corrente in vettori.

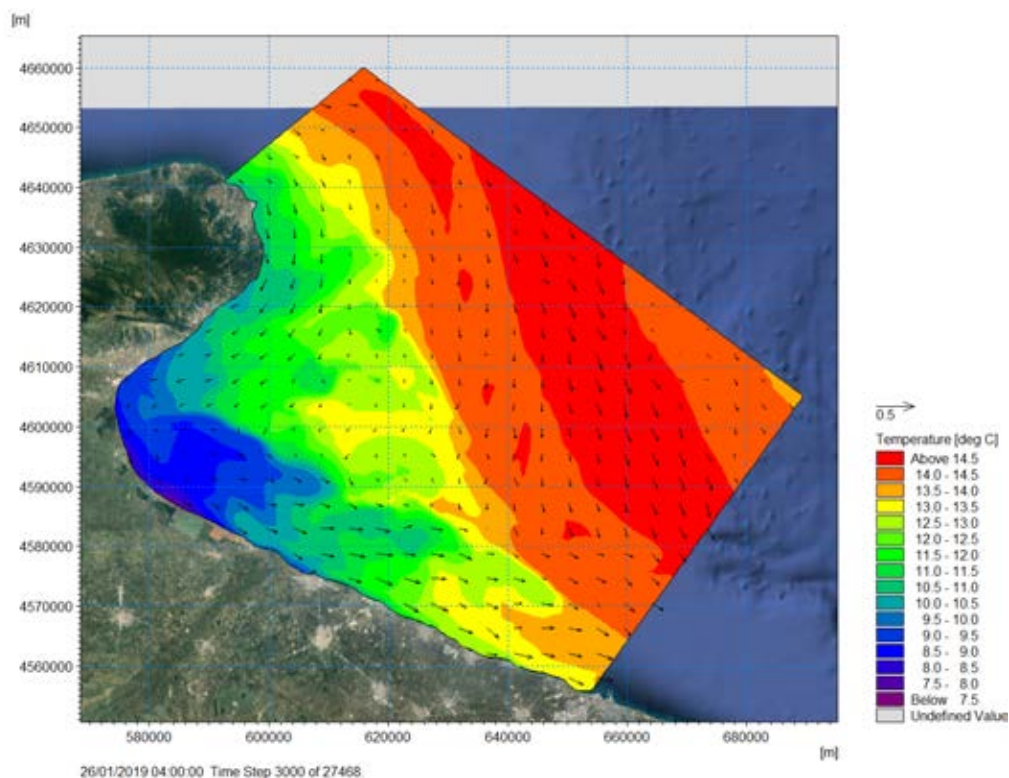
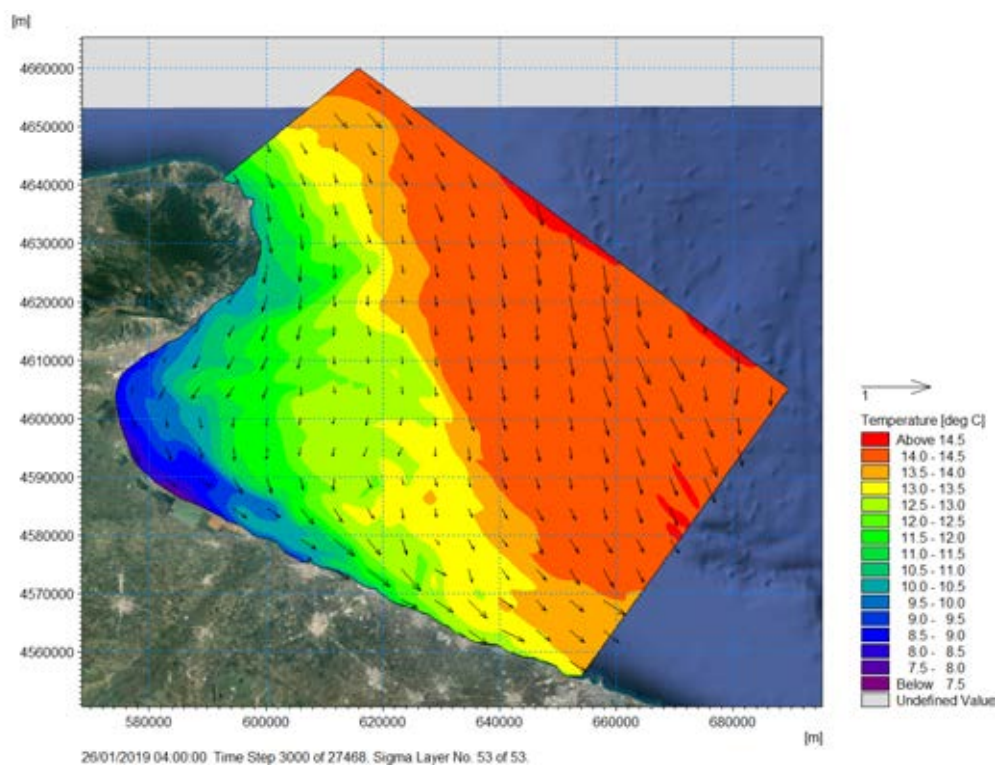


Figura I.18 Mappe di temperatura in superficie (in alto) e al fondo (in basso) per una tipica situazione Invernale. Temperatura in scala di colori, intensità della corrente in vettori.

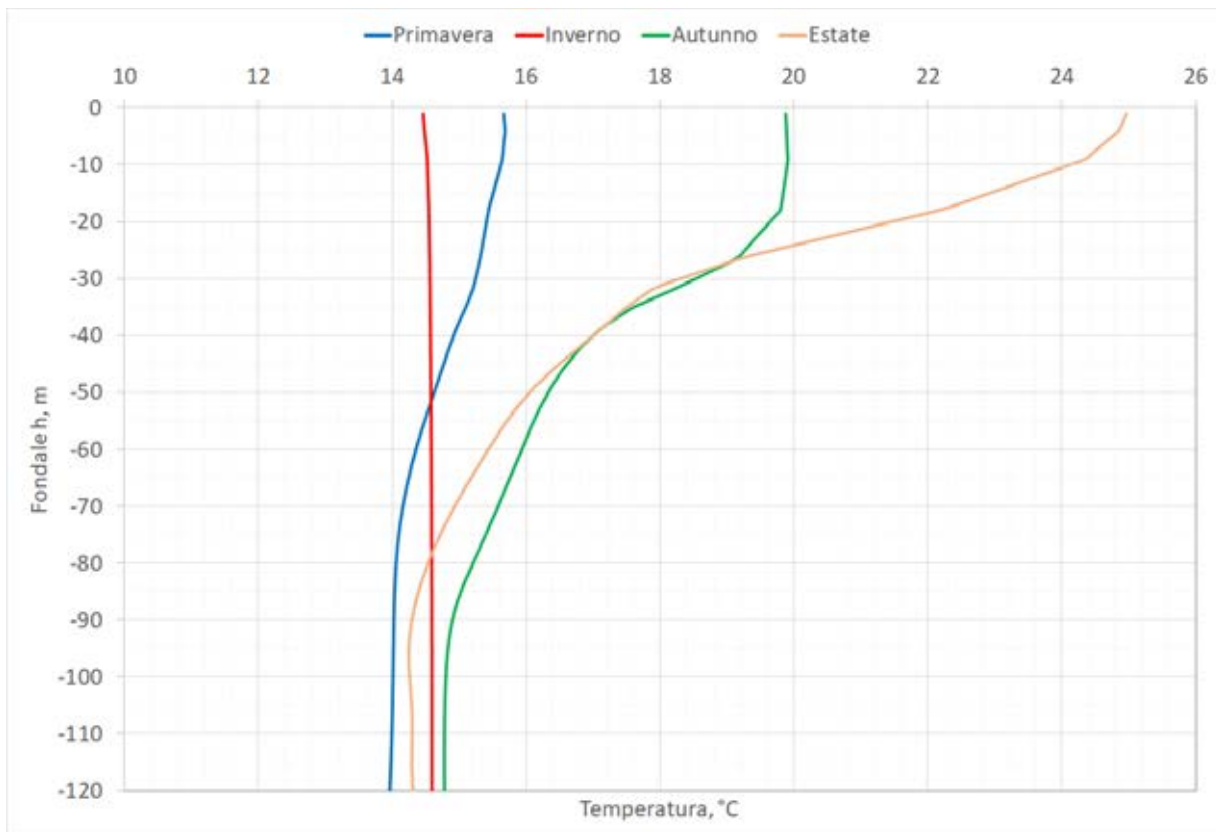


Figura I.19 Profili di temperatura lungo la verticale per condizioni tipiche Primaverili, Estive, Autunnali ed Invernali. Profili estratti in corrispondenza della Sottostazione 1.

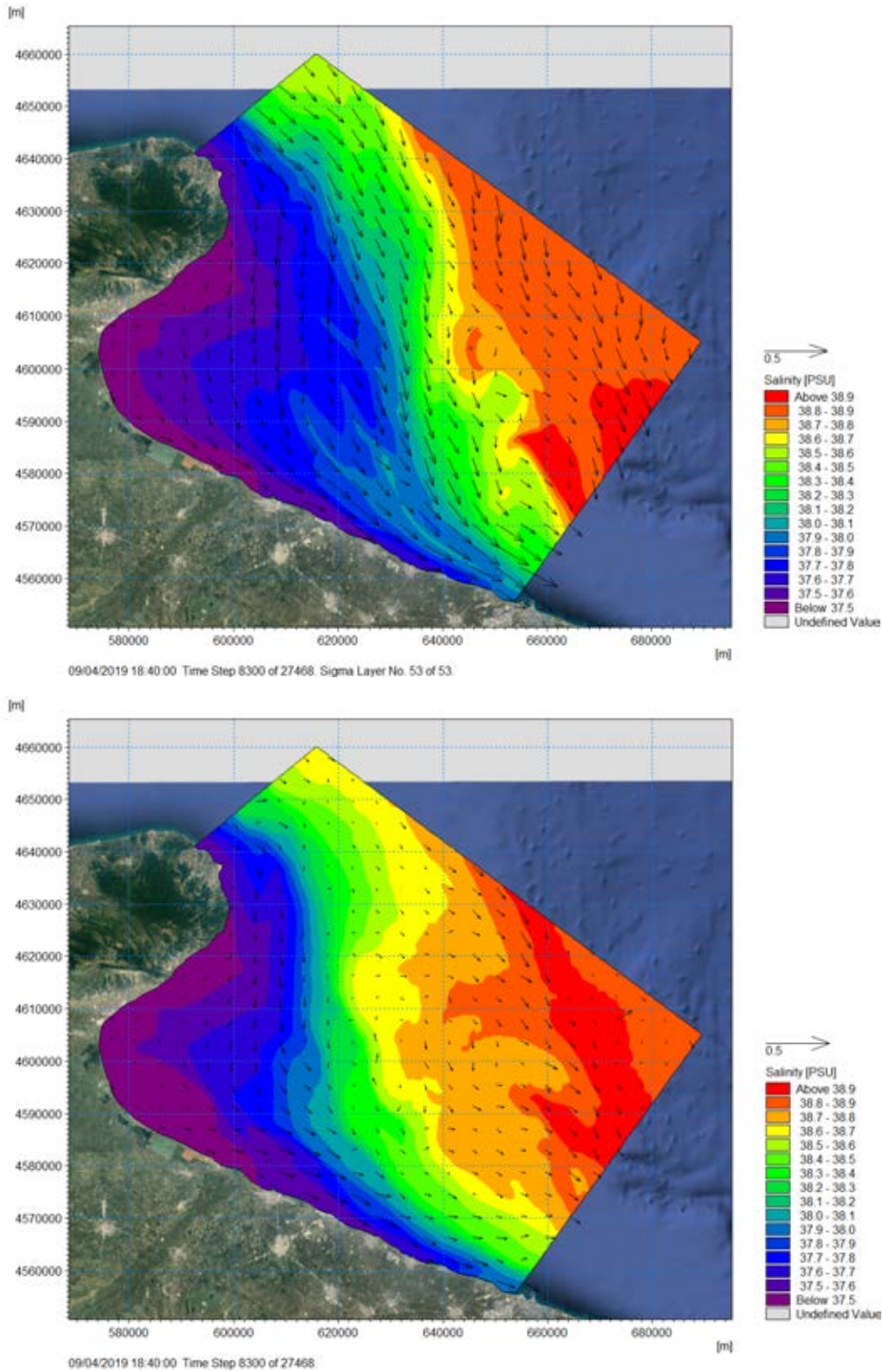


Figura I.20 Mappe di salinità in superficie (in alto) e al fondo (in basso) per una tipica situazione Primaverile. Salinità in scala di colori, intensità della corrente in vettori.

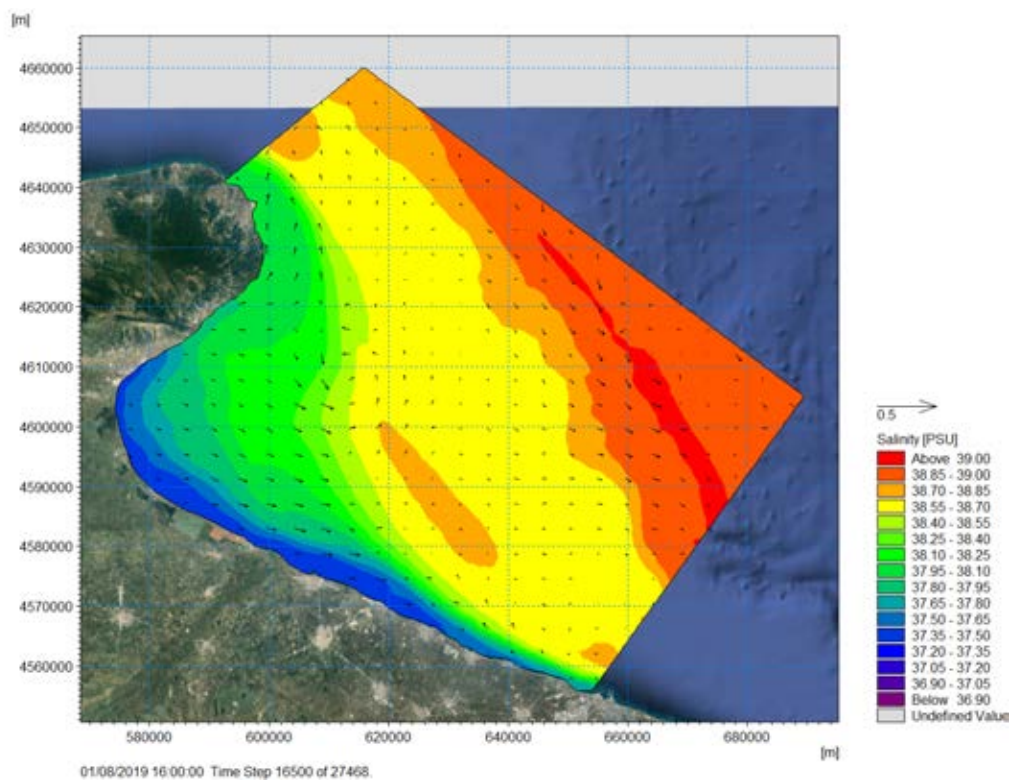
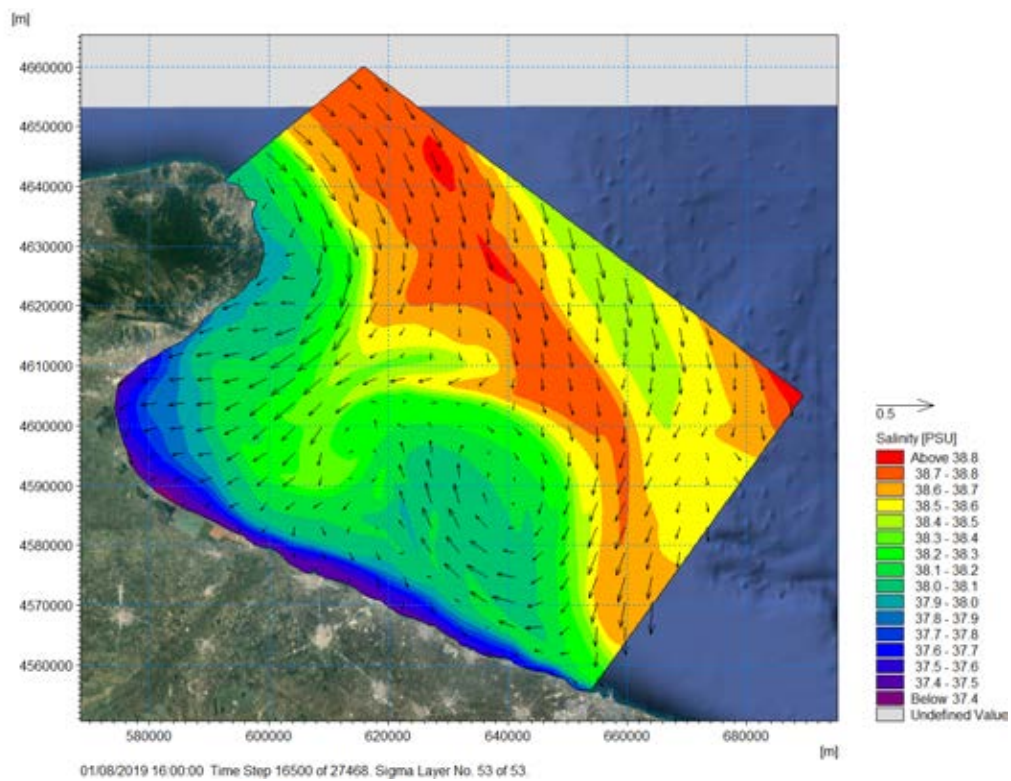


Figura I.21 Mappe di salinità in superficie (in alto) e al fondo (in basso) per una tipica situazione Estiva. Salinità in scala di colori, intensità della corrente in vettori.

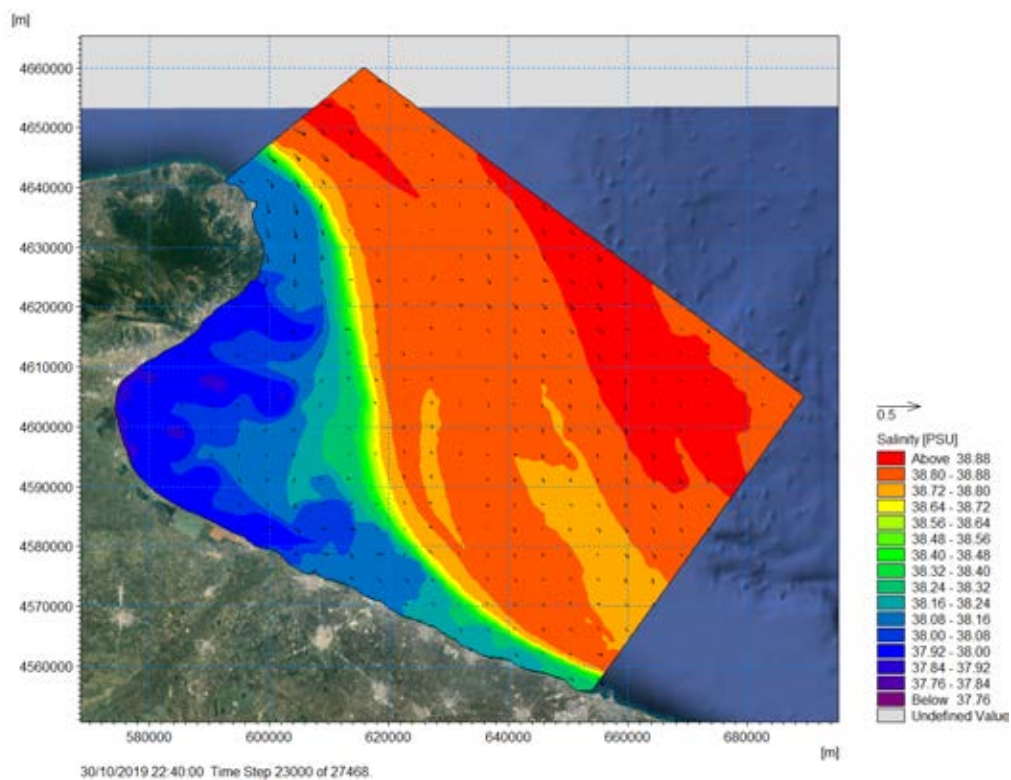
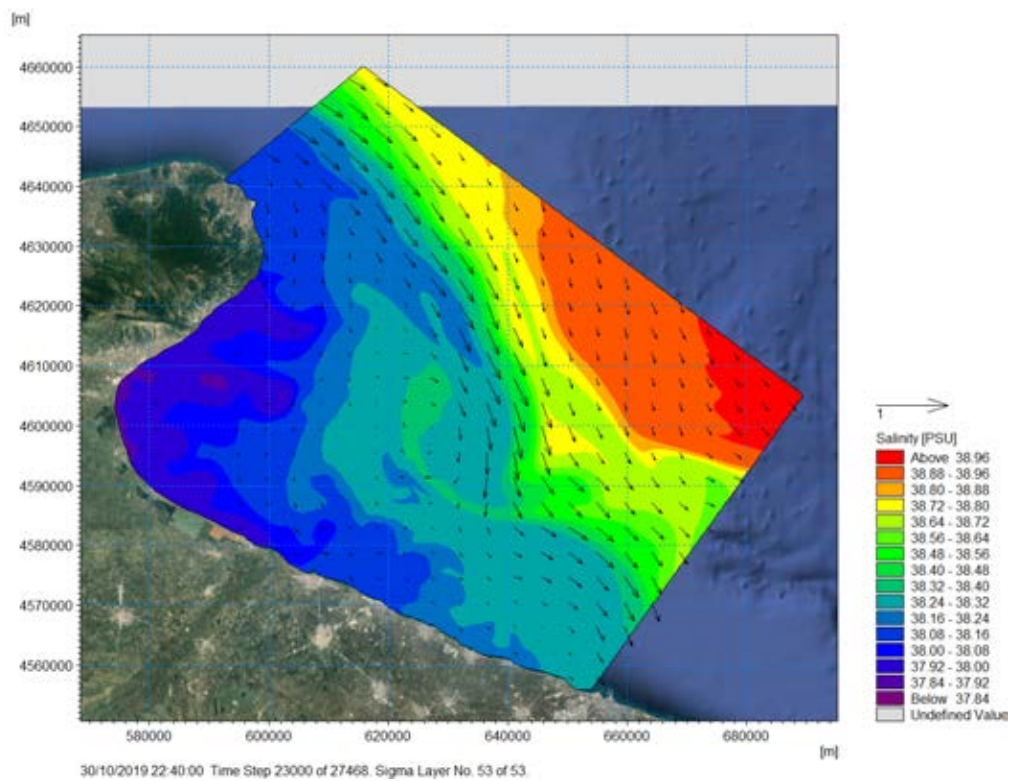


Figura I.22 Mappe di salinità in superficie (in alto) e al fondo (in basso) per una tipica situazione Autunnale. Salinità in scala di colori, intensità della corrente in vettori.

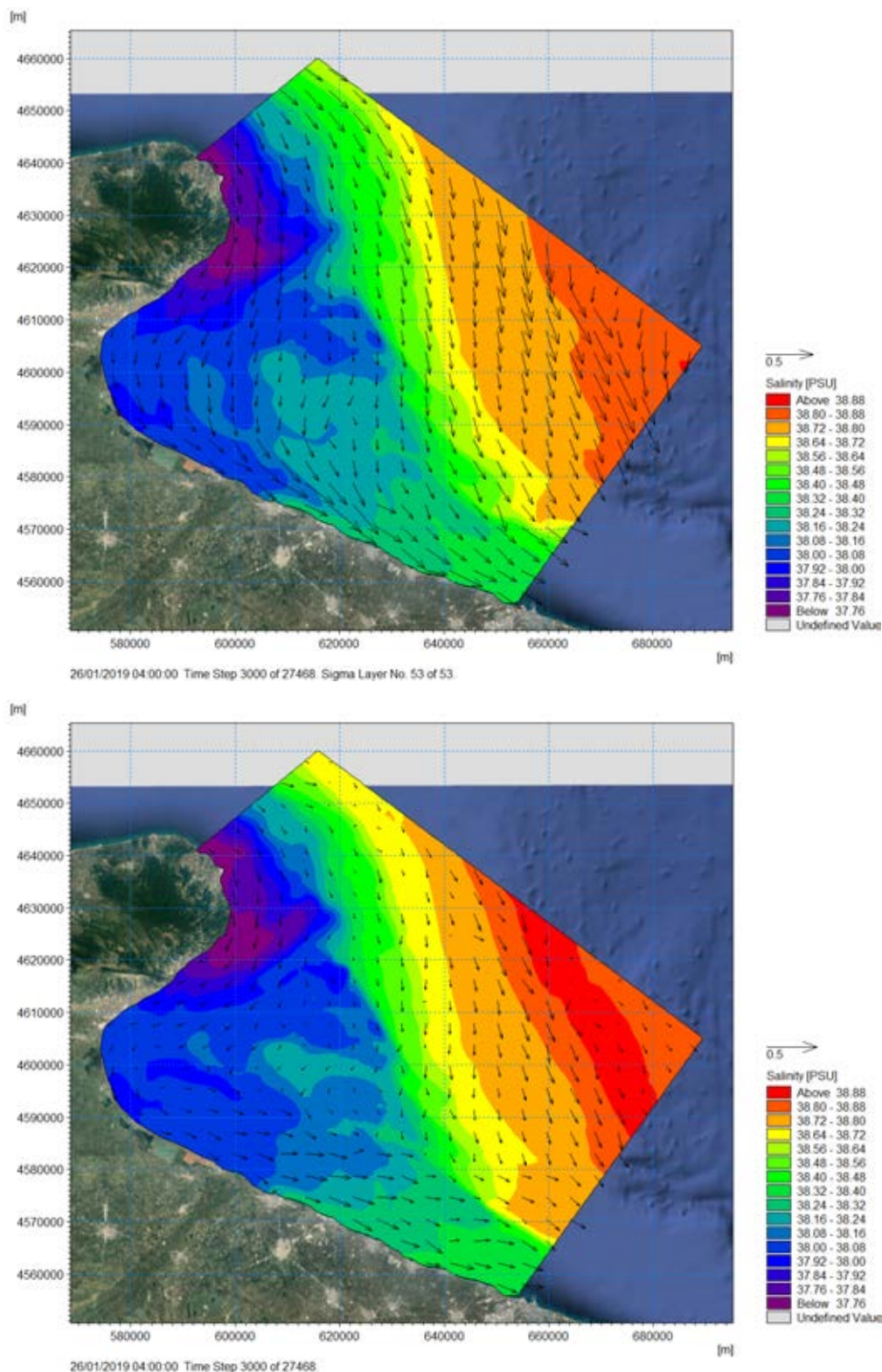


Figura I.23 Mappe di salinità in superficie (in alto) e al fondo (in basso) per una tipica situazione Invernale. Salinità in scala di colori, intensità della corrente in vettori.

5.3 MAPPE DELLE CONCENTRAZIONI DEL SEDIMENTO IN SOSPENSIONE

Al termine della modellazione di tutte le 37 finestre mobili del modello MIKE 3 MT, si sono analizzati i risultati di ciascuna finestra, seguendo la posizione della draga e la evoluzione temporale del pennacchio di sedimenti (in Appendice I è riportato un caso esemplificativo).

Si è estratta, per ciascuna delle 37 simulazioni, la mappa dei valori massimi raggiunti in ogni punto del dominio dalla concentrazione dei sedimenti in sospensione durante tutta la durata della simulazione. Si è quindi applicata la elaborazione statistica, ottenendo la concentrazione media delle concentrazioni massime su tutto l'anno e su tutte le possibili condizioni di esecuzione dei lavori di scavo.

La Figura I.24 mostra la mappa dei valori medi delle concentrazioni di sedimenti in sospensione calcolate rispetto ai valori delle concentrazioni massime registrate per ogni finestra mobile. La scala di colori arcobaleno è stata scelta in modo che il valore di 2 mg/l risulti bianco. Infatti, a livello internazionale la concentrazione di 2 mg/l viene diffusamente considerata la soglia al di sotto della quale l'acqua è da considerarsi "limpida", offrendo quindi garanzia per la salute di qualsiasi specie naturale. La concentrazione media dei valori massimi rappresenta una condizione cautelativa dato che la statistica è elaborata sui valori massimi ottenuti in ciascuna finestra mobile di modellazione. La forma del pennacchio è asimmetrica rispetto all'asse della trincea, con una maggiore estensione sul lato Sud-Est dello stesso a causa della tipica idrodinamica con corrente da Nord-Ovest a Sud-Est che si stacca dal promontorio del Gargano per riattaccarsi di fronte circa a Molfetta. Nella zona di scavo verso largo, la concentrazione del materiale in sospensione decade a valori rispettivamente di 200 mg/l, 20 mg/l e 2 mg/l alle distanze mediamente di 1.5 km, 9 km e 15 km lato Sud-Est rispetto all'asse della trincea. Il pennacchio si estende nella direzione principale di corrente, quindi nel tratto di trincea verso largo il pennacchio è più largo e si estende al massimo per 25 km lato Sud-Est verso costa, mentre nel tratto che attraversa il parco (che va da Ovest verso Est) il pennacchio ha una forma più allungata e si estende fino a massimo 8 km dall'asse della trincea lato verso costa e per 18 km lungo la direzione della trincea verso il contorno Sud del dominio di calcolo. Il pennacchio non si diffonde mai su fondali inferiori a $h=50$ m e non esce mai dal dominio Sud di calcolo.

Le Figure I.25-I.28 mostrano le mappe dei valori medi delle concentrazioni massime al fondo del materiale in sospensione per le diverse stagioni, con la stessa scala di colori della Figura I.24. Le mappe stagionali sono state ottenute eseguendo la media delle mappe delle massime concentrazioni al fondo per le simulazioni relative alla specifica stagione. Si nota come l'entità della dispersione sia del tutto simile nelle diverse stagioni, mentre la estensione del pennacchio sia molto diversa. Infatti le massime estensioni si hanno in Primavera ed in Autunno, dove il pennacchio interessa una porzione molto maggiore della zona antistante il parco, rispetto alle altre stagioni. In Estate il pennacchio è distribuito quasi simmetricamente rispetto all'asse della trincea, con una maggiore estensione sul lato Nord legata al prevalere di vortici e circolazione sotto-costa diretta verso il promontorio del Gargano. In Inverno si verifica la minima estensione del pennacchio, quasi tutto concentrato lato Sud-Est rispetto all'asse della trincea.

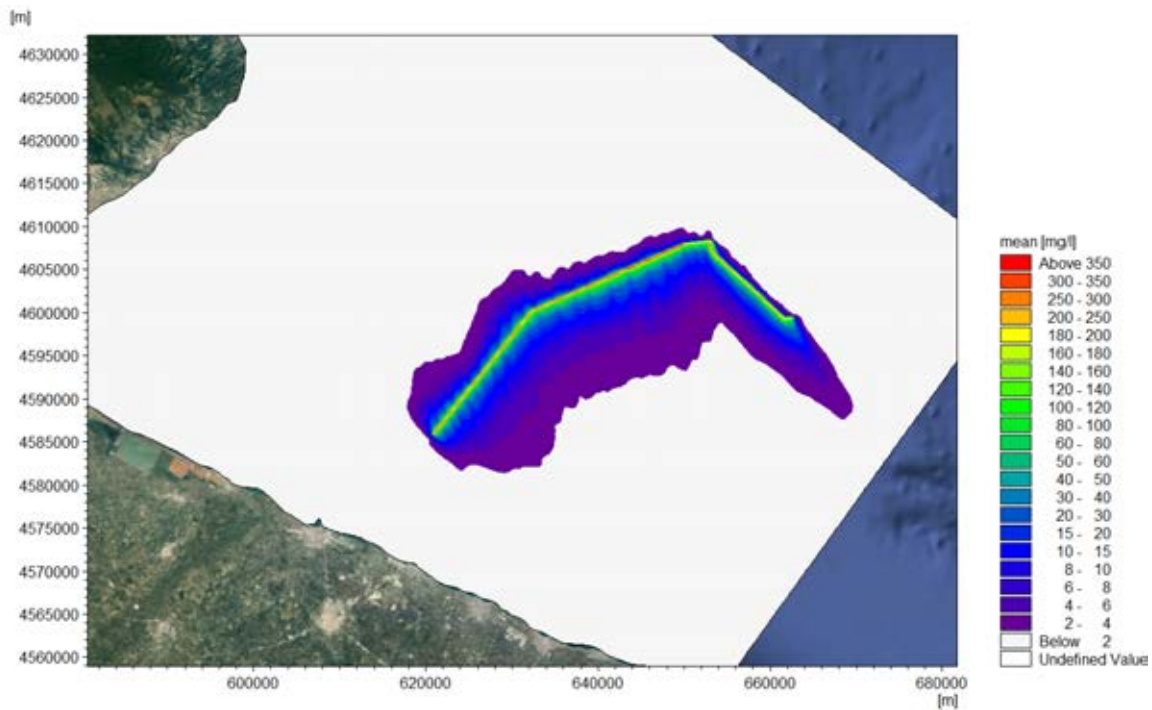


Figura I.24 Mappa della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni al fondo del materiale in sospensione ottenute in ciascuna finestra mobile durante tutto l'anno.

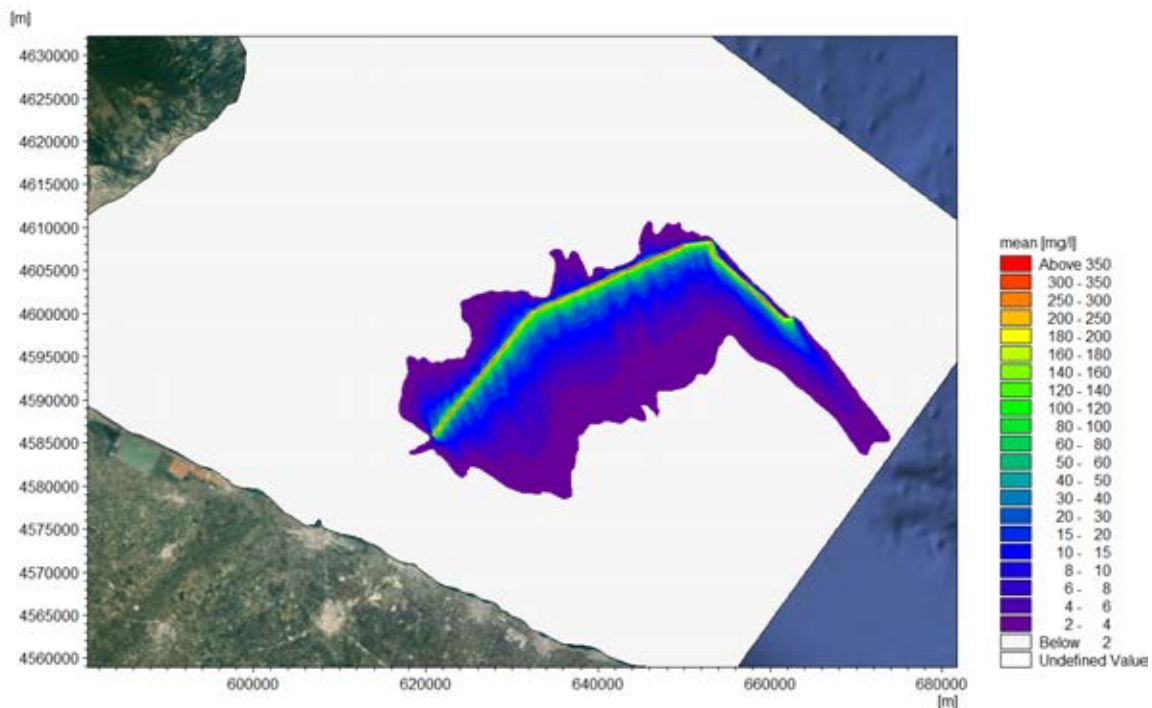


Figura I.25 Mappa della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni al fondo del materiale in sospensione ottenute in ciascuna finestra mobile durante i mesi Primaveraili.

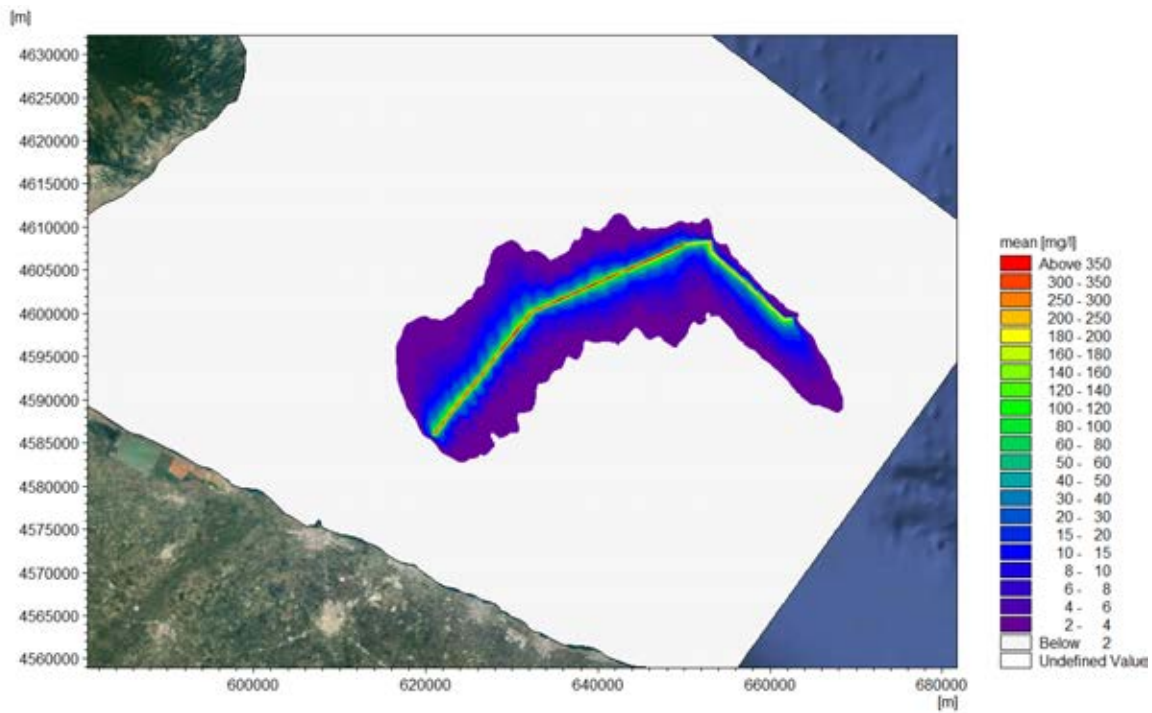


Figura I.26 Mappa della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni al fondo del materiale in sospensione ottenute in ciascuna finestra mobile durante i mesi Estivi.

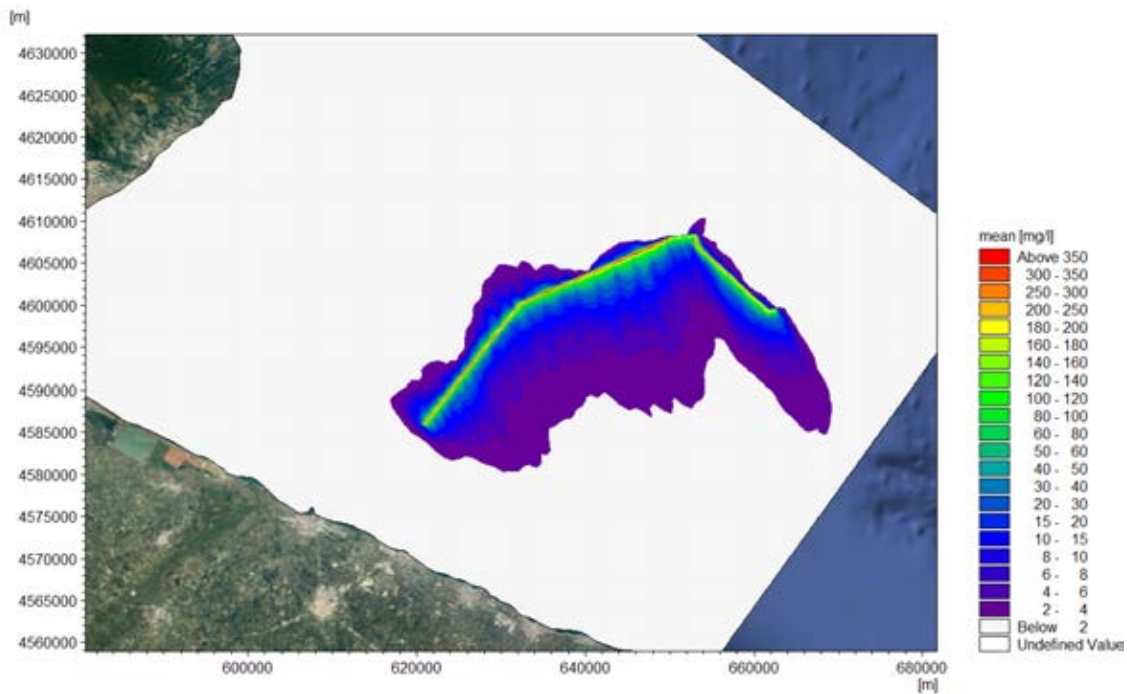


Figura I.27 Mappa della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni al fondo del materiale in sospensione ottenute in ciascuna finestra mobile durante i mesi Autunnali.

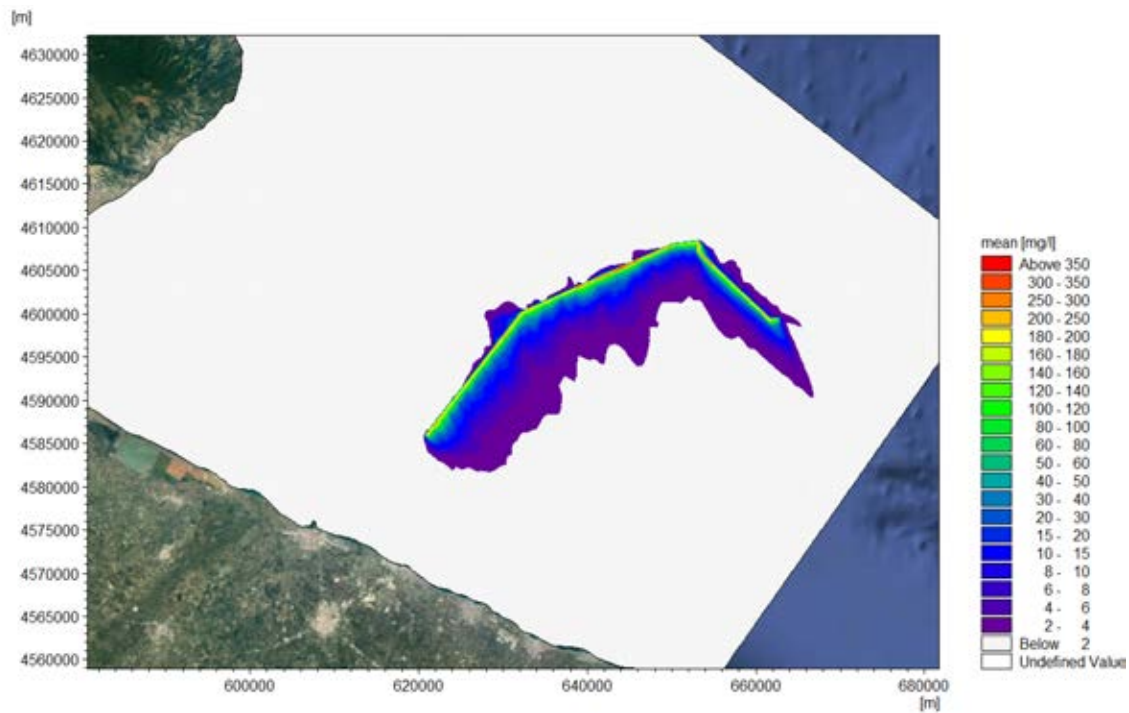


Figura I.28 Mappa della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni al fondo del materiale in sospensione ottenute in ciascuna finestra mobile durante i mesi Invernali.

5.4 PROFILI DELLE CONCENTRAZIONI DEL SEDIMENTO IN SOSPENSIONE

Per ogni mappa dei valori massimi della concentrazione dei sedimenti presentata in Sezione 5.3 si sono ricavati i profili verticali lungo l'asse della trincea. In particolare, Figura I.29 mostra il profilo dei valori medi di tutte le massime concentrazioni nell'arco di tutte le finestre mobili dell'anno 2019, mentre le Figure I.30-I.33 sono relative ai profili dei valori medi di tutte le massime concentrazioni stagionali. La intensità della concentrazione è riportata con la stessa scala arcobaleno in tutte le figure, in accordo con la scala di colori già usata nelle mappe di Sezione 5.3.

Gli strati interessati da una concentrazione apprezzabile ($>10\text{mg/l}$) di materiale in sospensione sono concentrati al fondo, variando da un minimo di 2 ad un massimo di 10 strati in corrispondenza della Sottostazione 1, dove si modificano la percentuale di sedimenti sabbiosi, argillosi e limosi. Le concentrazioni maggiormente significative ($>50\text{ mg/l}$) si verificano sempre nei primi 2 strati al fondo, tranne che in corrispondenza della Sottostazione 1, dove interessano i primi 3 strati al fondo. Le concentrazioni più significative si verificano per fondali h di quota compresa tra 100 e 120 m, dove interessano tutto lo strato 1 dal fondo.

La sospensione di minore entità ($>2\text{ mg/l}$ ma $<10\text{ mg/l}$) resta maggiormente confinata nei primi 5 strati dal fondo su fondali $h>80\text{ m}$ e $h<120\text{ m}$, viceversa si osserva una maggiore dispersione per quote del fondale superiori ed inferiori. In corrispondenza dell'origine della trincea, e per tutta la zona di inizio dello scavo fino a fondale $h<80\text{ m}$, la sospensione ($>2\text{ mg/l}$) interessa fino a 11 strati dal fondo, non arrivando comunque mai a quote del fondale inferiori a $h=35\text{ m}$. La massima dispersione lungo la verticale si raggiunge nella zona di gomito in corrispondenza della Sottostazione 1, a quote del fondale $h=125\text{-}130\text{ m}$, dove la sospensione ($>2\text{ mg/l}$) interessa i primi 18 strati, raggiungendo quote $h=70\text{ m}$.

Osservando i profili stagionali, si nota come la maggiore dispersione lungo la verticale si realizzi in Inverno nella parte più prossima all'inizio dello scavo, per fondali inferiori a $h=100\text{ m}$, ed in Primavera per la parte dello scavo lungo il parco, in corrispondenza di fondali superiori a $h=100\text{ m}$. Complessivamente, la Primavera risulta comunque la stagione di maggiore dispersione del sedimento lungo il fondale. Le minime variazioni della concentrazione del sedimento lungo il fondale si verificano in Estate ed in Autunno, risultando complessivamente l'Estate il caso migliore per estensione limitata del pennacchio (Sezione 5.3) e dispersione del sedimento lungo il fondale. In Estate ed in Inverno si nota una maggiore uniformità della concentrazione del sedimento lungo la colonna, si veda ad esempio la distribuzione praticamente costante in tutte le sezioni della concentrazione più elevata ($>350\text{ mg/l}$) che occupa tutto lo strato 1 dal fondo.

I mesi estivi ed autunnali sono caratterizzati da una significativa stratificazione termica (come mostrato in Figura I.19) e, quindi, da un termoclino ben sviluppato, fattore influente sull'effetto di confinamento negli strati più profondi della colonna d'acqua del pennacchio di torbida. Al contrario, i mesi invernali e primaverili sono contraddistinti da una colonna d'acqua completamente rimescolata (come mostrato in Figura I.19), con una differenza di densità tra il fondo e la superficie molto limitata, che quindi porta alla perdita dell'effetto di confinamento negli strati più profondi.

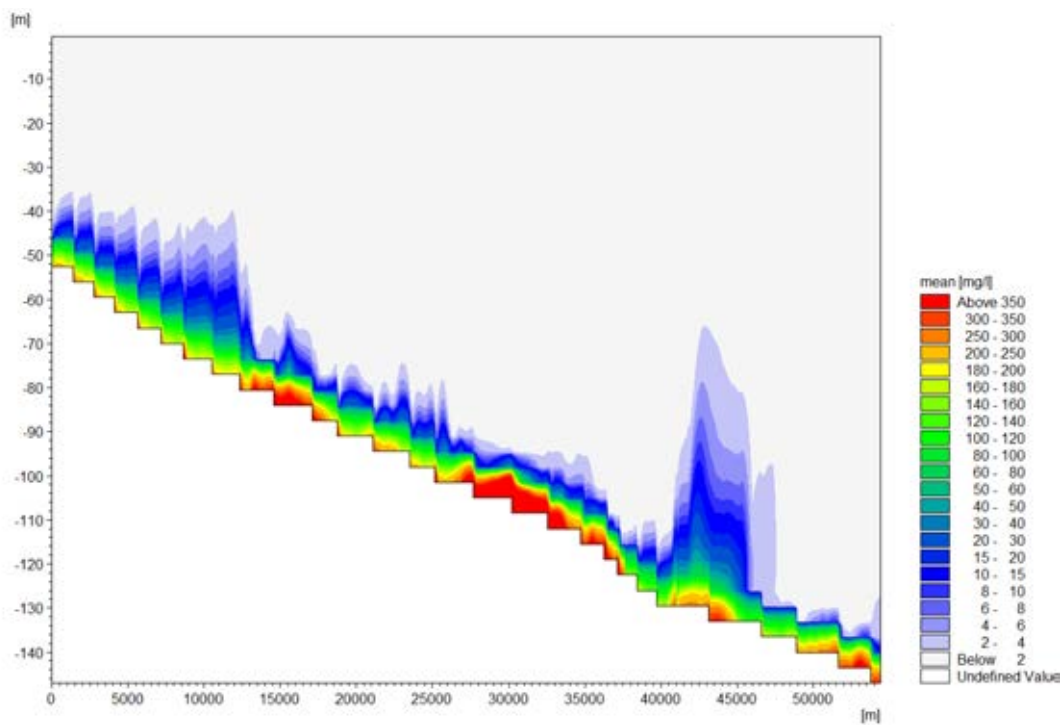


Figura I.29 Sezione verticale della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni lungo la trincea durante tutto l'anno di modellazione.

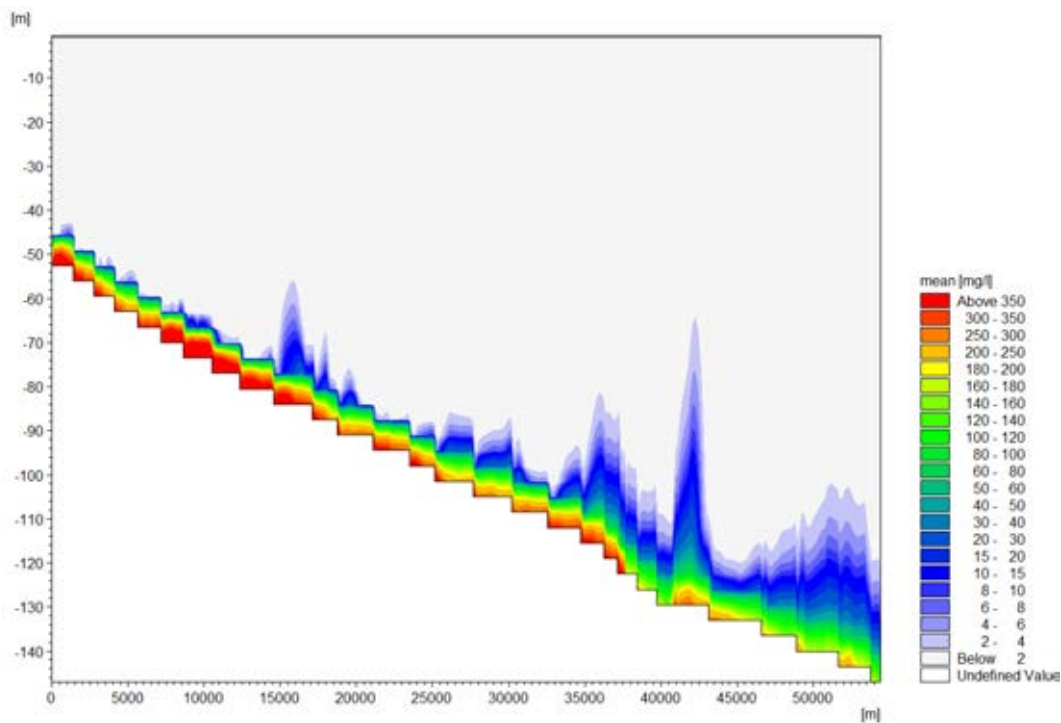


Figura I.30 Sezione verticale della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni in Primavera lungo la trincea.

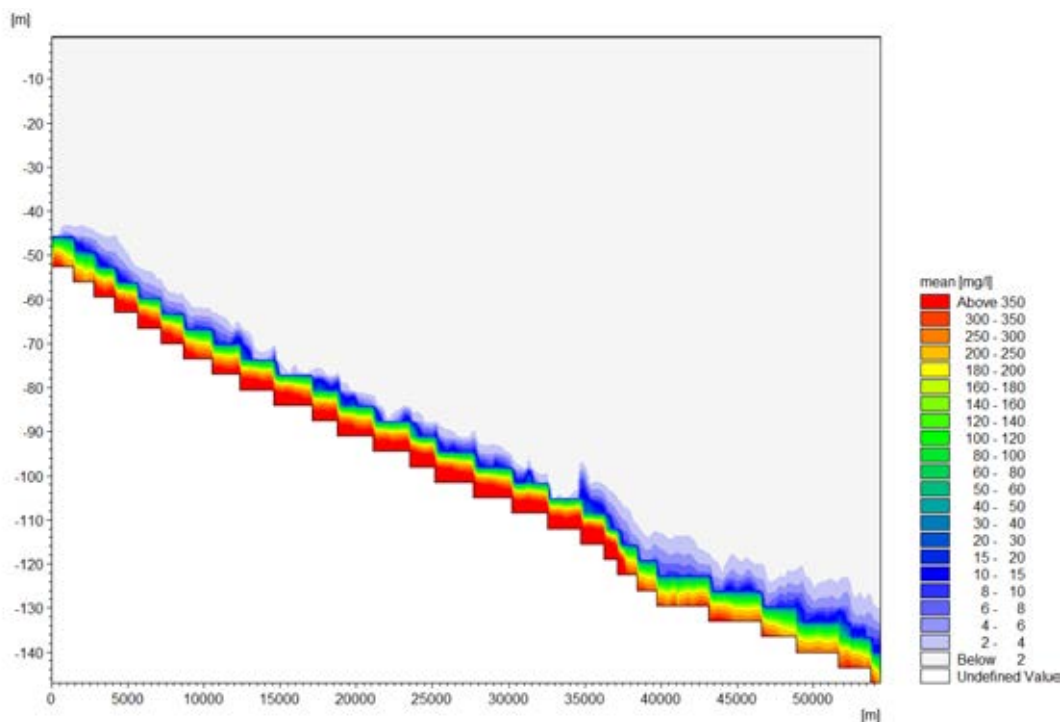


Figura I.31 Sezione verticale della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni in Estate lungo la trincea.

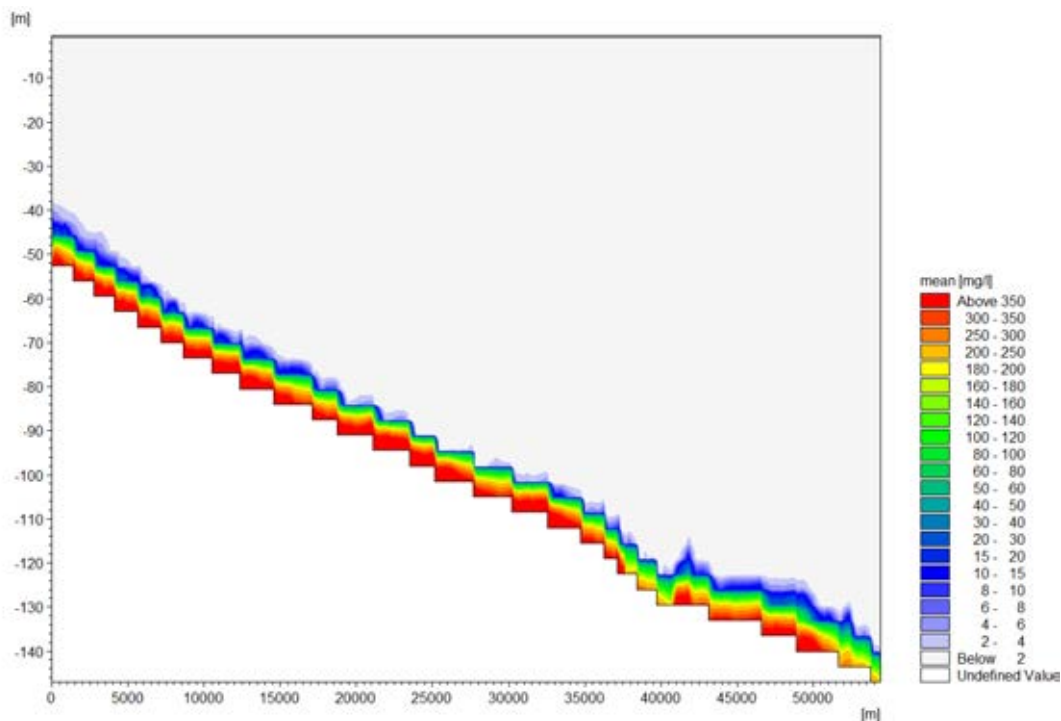


Figura I.32 Sezione verticale della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni in Autunno lungo la trincea.

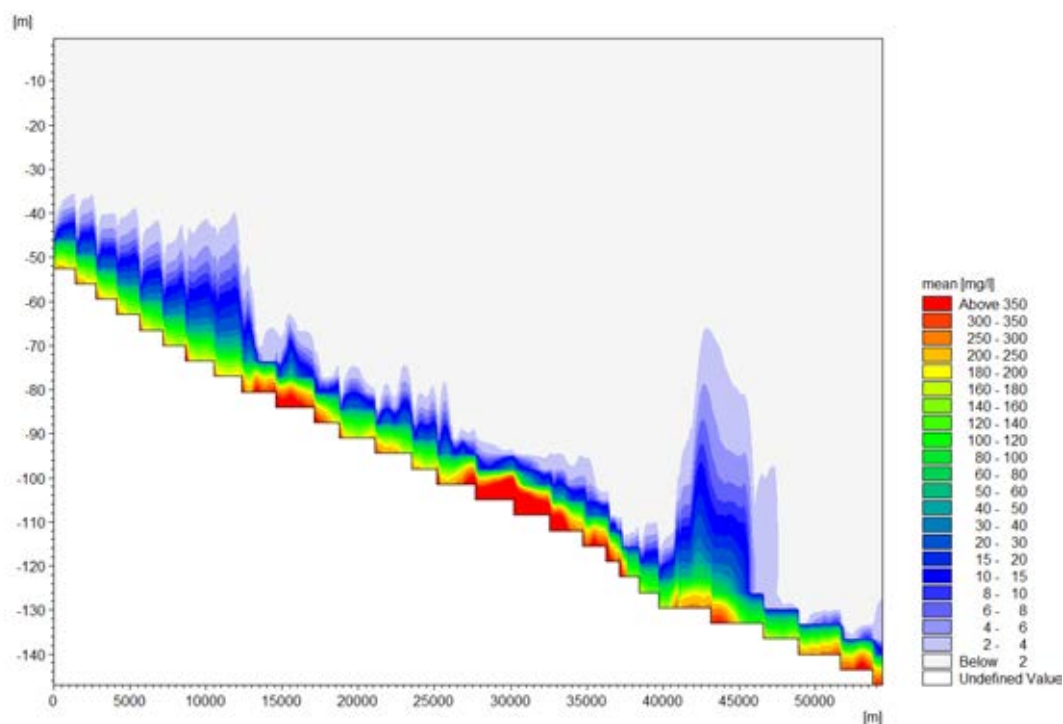


Figura I.33 Sezione verticale della concentrazione media di tutte le massime concentrazioni in Inverno lungo la trincea.

5.5 SUPERAMENTO DELLA CONCENTRAZIONE DI ACQUE LIMPIDE

Si è estratta, per ciascuna delle 37 simulazioni di MT, la mappa di “exceedence” ovvero la mappa relativa alla eccedenza o superamento dei valori della concentrazione della sospensione al di sopra di 2 mg/l (indicazione di acque limpide, Sezione 5.3). Sulla base delle concentrazioni ottenute e della durata della dispersione del pennacchio, si sono costruite le corrispondenti mappe di persistenza, in ore, delle condizioni di superamento della concentrazione di 2 mg/l ovvero le mappe di durata delle condizioni di acque torbide.

Si è effettuata una elaborazione statistica, ottenendo la mappa dei valori medi delle massime persistenze delle condizioni di acque torbide rispetto alle massime persistenze di ciascuna finestra mobile su tutto l’anno, Figura I.34. Lo stesso procedimento è stato ripetuto per le diverse stagioni, ottenendo quindi le mappe delle massime persistenze delle condizioni di superamento della concentrazione di 2mg/l in Primavera, Figura I.35, in Estate, Figura I.36, in Autunno, Figura I.37 e in Inverno, Figura I.38.

Le Figure I.34-I.38 mostrano la mappa dei valori delle persistenze in scala di colori arcobaleno, che è mantenuta costante per le diverse immagini, a favorire un confronto immediato. Il valore medio delle massime persistenze relative all’anno tipico mostra come la persistenza di condizioni di acque torbide resti concentrata attorno all’asse della trincea e come il valore massimo della persistenza raggiunga solo localmente nella zona di scavo le 36 ore. La persistenza è di maggiore intensità e maggiore ampiezza nel tratto di scavo da sottocosta a largo piuttosto che lungo il parco. Mediamente la persistenza è di 24 ore attorno alla zona di scavo da riva a largo e di 12 ore nel tratto di scavo lungo il parco. La distribuzione della persistenza è asimmetrica rispetto all’asse della trincea causa la idrodinamica tipica, con correnti da Nord-

Ovest a Sud-Est. La massima estensione della persistenza, con concentrazioni molto basse 2-6 mg/l, raggiunge i 30 km nella prima parte di scavo da costa a largo, su fondali comunque sempre superiori a h=50 m.

Dal punto di vista stagionale, la minima persistenza sia quantitativa sia spaziale si verifica in Inverno, mentre la combinazione più gravosa sia quantitativa sia spaziale si verifica in Estate. In Estate infatti c'è il termoclino ben sviluppato, quindi il pennacchio rimane confinato negli strati più profondi, quindi la persistenza al fondo è massima. In Inverno invece la colonna è mixata, quindi non c'è confinamento, quindi i sedimenti sono più distribuiti lungo la colonna e quindi al fondo la persistenza è minima. In Primavera ed in Autunno le mappe sono simili, molto più estese rispetto all'Inverno e decisamente meno intense rispetto all'Estate.

L'analisi del deposito al termine di ciascuna finestra mobile dimostra, come evidenziato in Figura I.39 per un caso esemplificativo, che la variazione di fondale è irrilevante (<0.2 m) ed è limitata alla trincea, per una larghezza complessiva di 860 m distribuiti simmetricamente attorno all'asse della trincea.

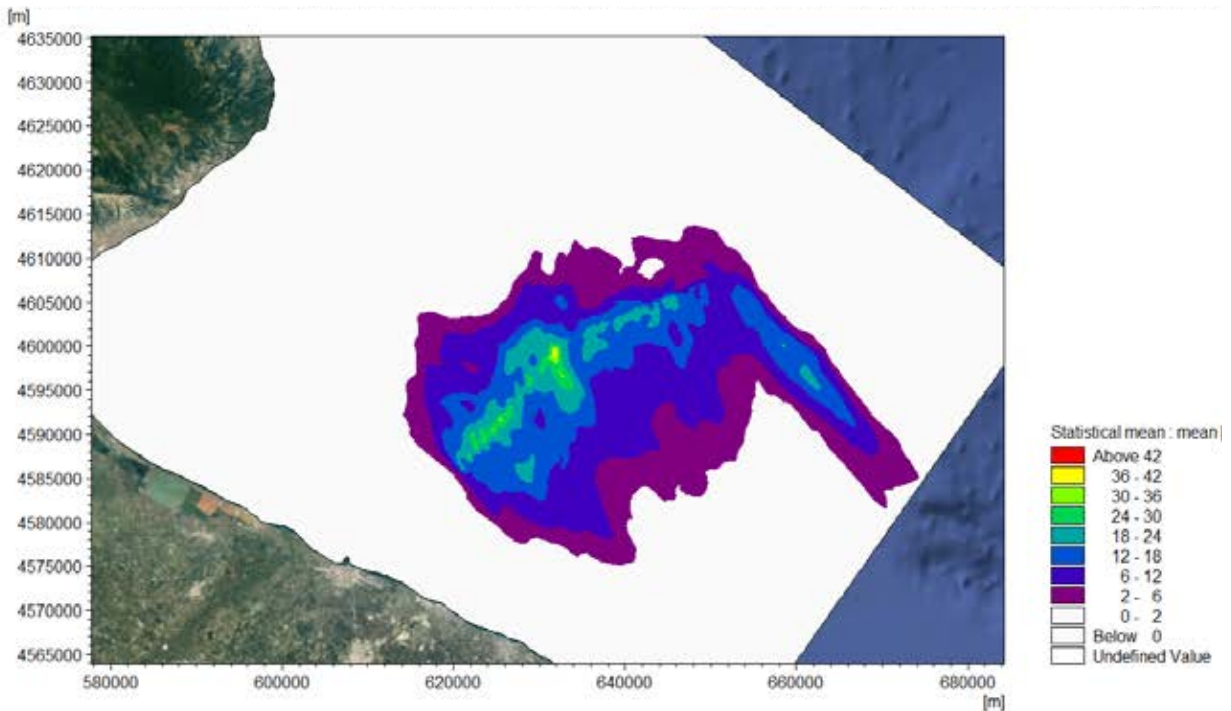


Figura I.34 Mappa della persistenza media (in ore) del materiale in sospensione in eccedenza (>2mg/l) valutata sulle massime persistenze di tutte le finestre mobili.

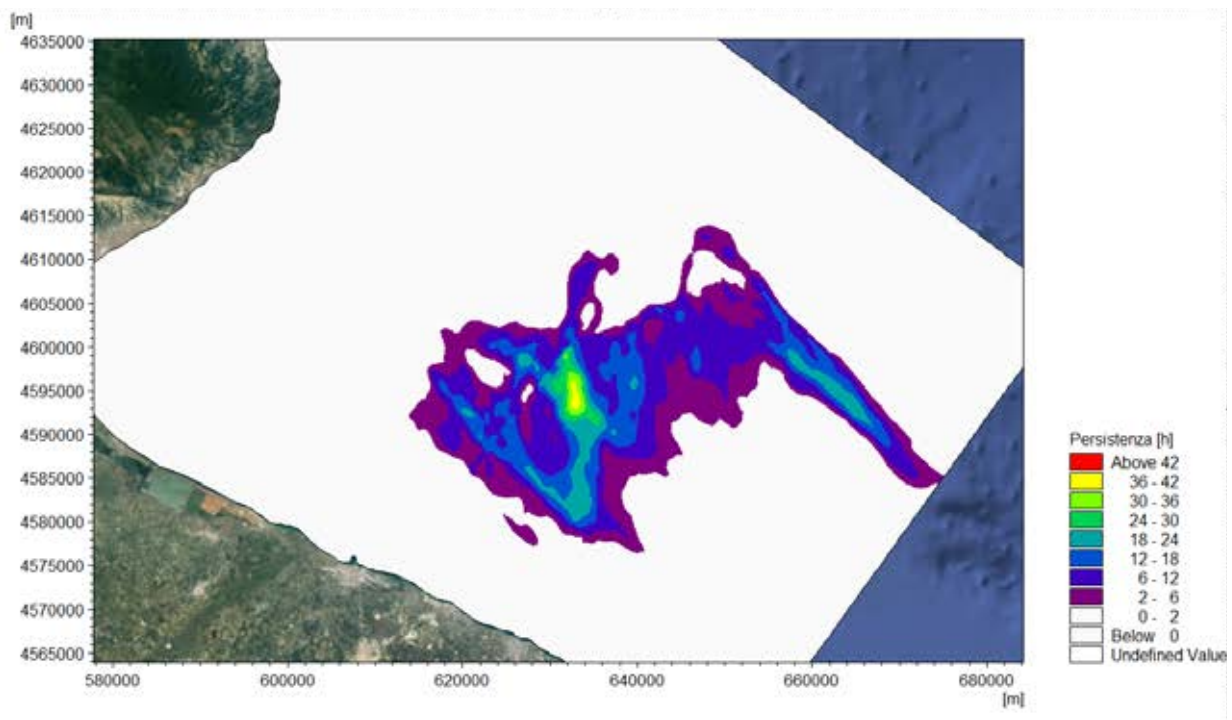


Figura I.35 Mappa della persistenza media (in ore) del materiale in sospensione in eccedenza (>2mg/l) valutata sulle massime persistenze del periodo Primaverile.

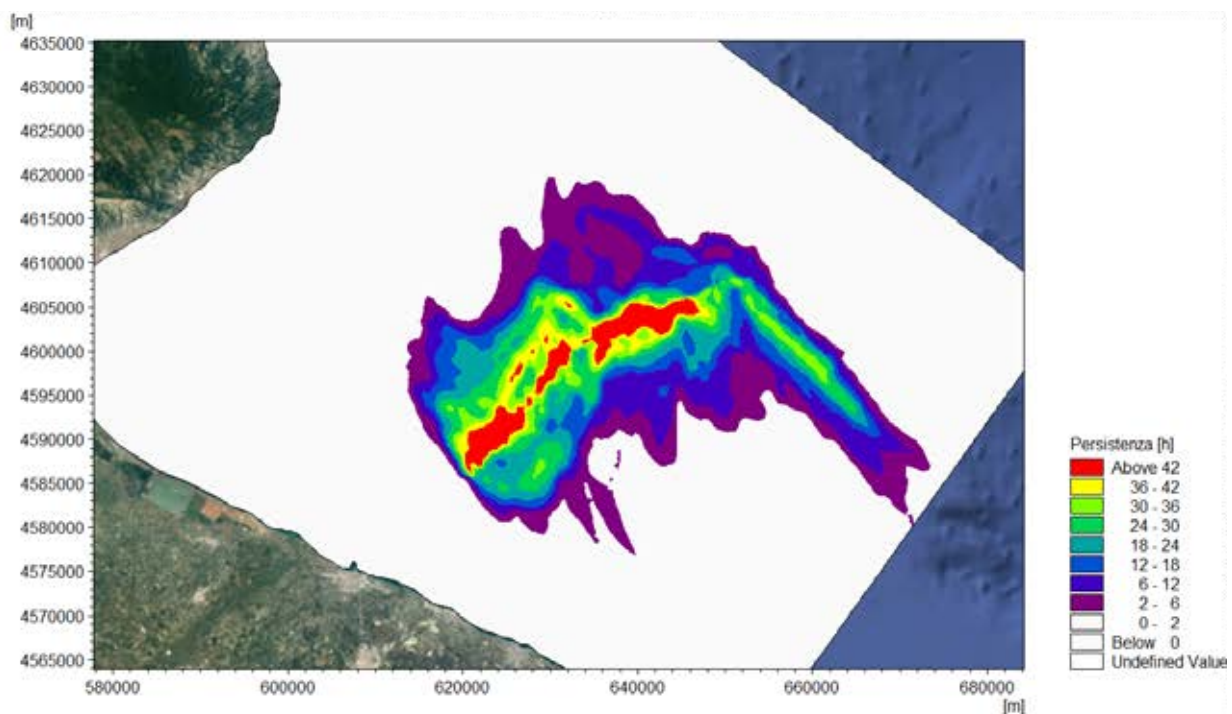


Figura I.36 Mappa della persistenza media (in ore) del materiale in sospensione in eccedenza (>2mg/l) valutata sulle massime persistenze del periodo Estivo.

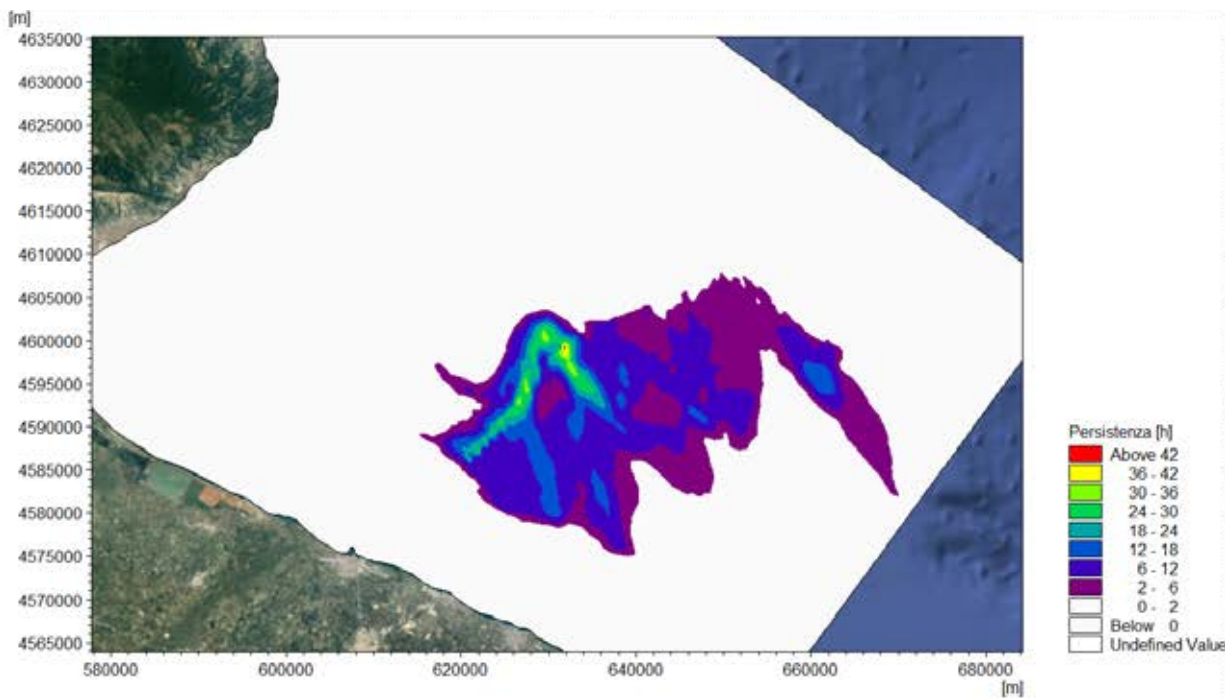


Figura I.37 Mappa della persistenza media (in ore) del materiale in sospensione in eccedenza (>2mg/l) valutata sulle massime persistenze del periodo Autunnale.

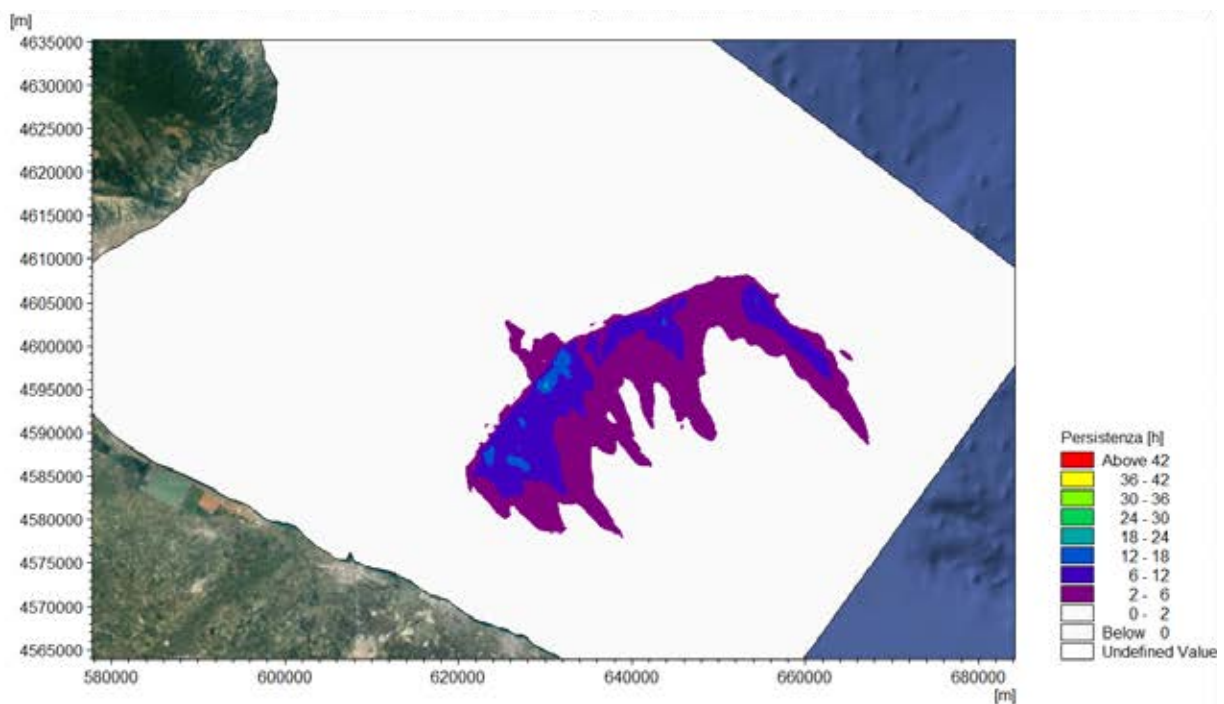


Figura I.38 Mappa della persistenza media (in ore) del materiale in sospensione in eccedenza (>2mg/l) valutata sulle massime persistenze del periodo Invernale.

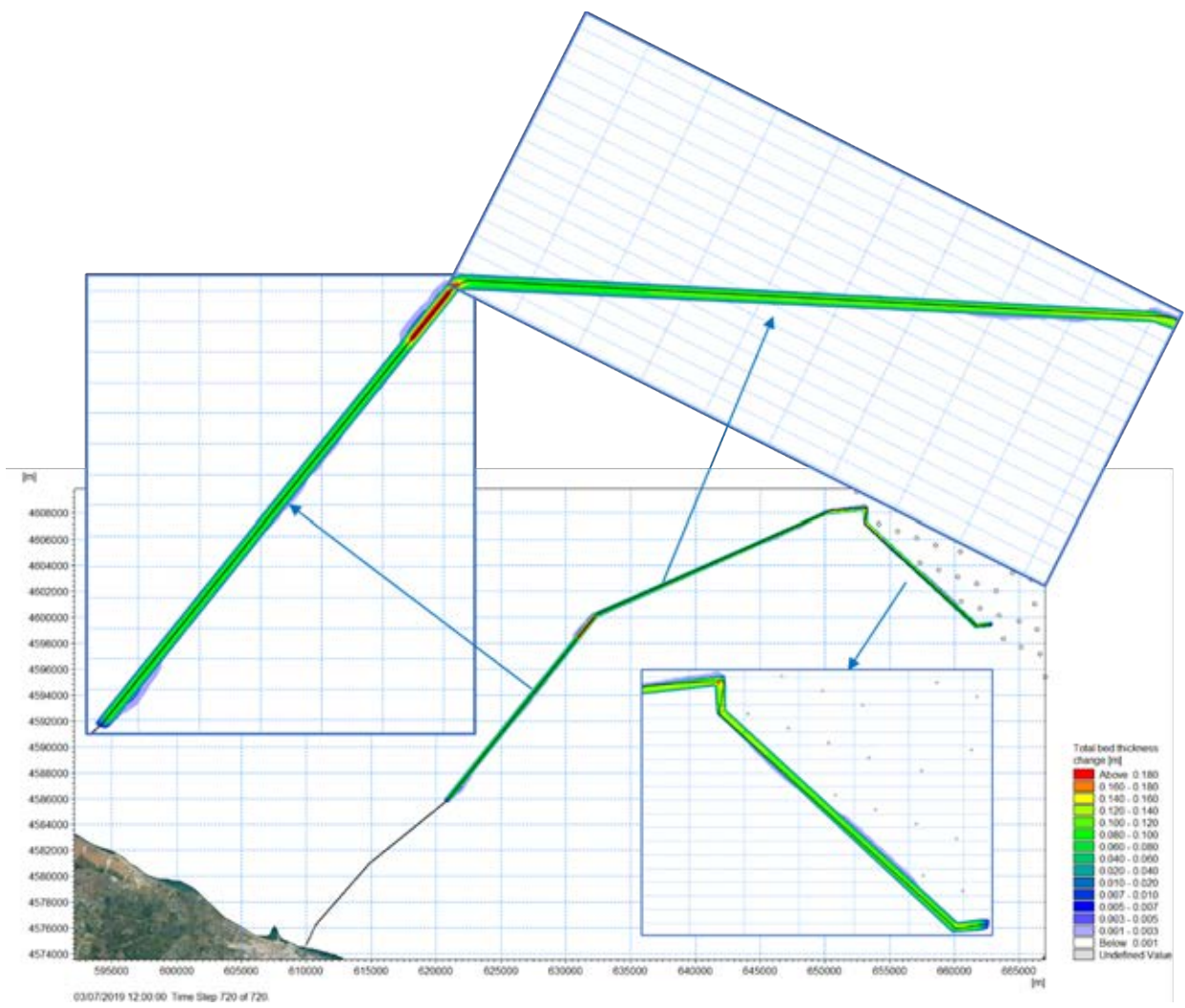


Figura I.39 Deposito di materiale al termine di una finestra mobile modellata con MT.

5.6 CONCLUSIONI

Al fine di modellare tutte le possibili combinazioni di correnti, temperatura e salinità in corrispondenza delle operazioni di scavo, si sono elaborati i dati climatici per scegliere l'anno rappresentativo del clima tipico, che è risultato l'anno 2019. La modellazione con MIKE 3 HD ha consentito di riprodurre le condizioni di circolazione tipiche per tutto l'anno 2019, ottenendo campi tridimensionali di corrente, temperatura e salinità. I campi di intensità delle correnti sono risultati in buon accordo con le rose delle correnti di superficie ed al fondo elaborate sulla base dei dati CMEMS.

Utilizzando in ingresso i risultati della modellazione di MIKE 3 HD, la modellazione con MIKE 3 MT è stata effettuata per 37 finestre mobili, a coprire tutte le possibili condizioni ambientali per effettuare le operazioni di scavo durante tutto l'arco dell'anno tipico. Ciascuna finestra mobile simula, infatti, le condizioni di corrente, temperatura, salinità, livelli del mare e sospensione del sedimento per 10 giorni, di cui circa 4.8 di scavo e i restanti di osservazione della dispersione dei sedimenti. I risultati sono stati quindi elaborati statisticamente, al fine di determinare le concentrazioni massime del sedimento sospeso e la media di tutti i valori massimi, in termini di mappe spaziali, per valutarne l'estensione, e di profili, per valutare gli strati di colonna d'acqua interessati e la durata delle condizioni di superamento del valore di soglia per acque limpide, pari a 2mg/l.

La sospensione del materiale resta confinata, in riferimento ai valori medi annuali delle concentrazioni massime, in un'area estesa circa 35 km complessivi nella direzione principale di propagazione della corrente Nord-Ovest Sud-Est nel tratto dello scavo verso largo, con distribuzione asimmetrica del pennacchio rispetto all'asse dello scavo. Nel tratto dello scavo lungo il parco, la estensione del pennacchio attorno all'asse della trincea non supera i 12 km e si propaga per circa 18 km oltre la Sottostazione 2. Durante le stagioni primaverile ed autunnale, grazie alla forte stratificazione della colonna d'acqua che fornisce un effetto di confinamento ai sedimenti, si osserva che il pennacchio è decisamente più esteso lato Sud-Est della trincea ed anche caratterizzato da una maggiore distribuzione lungo la colonna d'acqua rispetto alle stagioni estiva ed invernale.

La sospensione interessa gli strati più profondi (raggiungendo i valori massimi soltanto nei primi tre strati dal fondo) e dà luogo ad un deposito non apprezzabile e confinato nella zona adiacente la trincea. La persistenza delle acque torbide è maggiore nel tratto di scavo da costa a largo, in particolare per fondali inferiori a h=80 m. In questo tratto, localmente alla trincea si verificano persistenze di 24-36 ore mentre la persistenza si mantiene inferiore a 24 ore già a una distanza di circa 3 km dall'asse dello scavo. Nel tratto di scavo da costa a largo per fondali superiori a h=80 m e ancora di più nel tratto di scavo lungo il parco la persistenza solo localmente arriva alle 20 ore, mantenendosi per la maggior parte nelle 12 ore. Si nota un forte effetto stagionale, con valori minimi e massimi delle mappe della persistenza, sia in termini di estensione spaziale sia in termini di ore, rispettivamente in Inverno ed in Estate. In Estate infatti c'è il termoclino ben sviluppato, quindi il pennacchio rimane confinato negli strati più profondi, quindi la persistenza al fondo è massima. In Inverno invece la colonna è mixata, quindi non c'è confinamento, quindi i sedimenti sono più distribuiti lungo la colonna e quindi al fondo la persistenza è minima.

PARTE II – ANALISI DEGLI EFFETTI DEL PARCO EOLICO SUL CAMPO ONDOSI LOCALE E SOTTO-COSTA

La II parte della relazione analizza gli effetti del parco eolico sul campo ondoso, in termini sia di intensità sia di direzione, al largo (in corrispondenza del fondale antistante il parco, con profondità di 100 m) e sotto-costa (in corrispondenza del fondale di 20 m, dove le onde più frequenti non sono ancora frante).

Si presentano prima gli scenari climatici scelti per la modellazione, quindi la griglia di calcolo e infine i risultati più significativi, rimandando all'Appendice II per i risultati di tutti gli scenari modellati.

6. CLIMA

6.1 FONTI DEI DATI CLIMATICI E RICOSTRUZIONE DEL CLIMA TIIPICO

La fonte dei dati climatici utilizzati per la modellazione con MIKE 21 SW è la relazione predisposta da Scientific Engineering ltd per questo progetto. In particolare, si riportano di seguito le Tabelle riassuntive del clima in termini di altezza d'onda significativa H_s , periodo di picco T_p , Tabella II.1, e direzione dir, Tabella II.2.

Si è fatto riferimento infine alla seguente equazione

$$V_{10jm,1h} = aH_s^b, \text{ con } a=6.4242 \text{ e } b=0.6071 \quad (1)$$

per ricostruire la velocità del vento associata all'onda, assumendo che il vento soffi nella stessa direzione dell'onda generata.

6.2 RICOSTRUZIONE DEL CLIMA TIPICO

Si sono analizzate le Tabelle II.1 e II.2 al fine di ricostruire alcuni scenari rappresentativi del clima tipico. In particolare, gli scenari rappresentativi devono sia riprodurre le caratteristiche tipiche di altezza d'onda, periodo, direzione delle onde, sia dare luogo ad un clima equivalente a quello totale in termini di Potenza P ed Energia E annuali, calcolate mediante le seguenti equazioni:

$$P_i = \frac{\rho g^2}{64\pi} \cdot T_{m-1,0} \cdot f_i \cdot H_s^2 / 1000, \text{ [kW/m]} \quad (2)$$

$$P = \sum_i P_i, \text{ [kW/m]} \quad (3)$$

$$E = \sum_i P_i \cdot 8760, \text{ [kWh/m]} \quad (4)$$

dove $T_{m-1,0} = T_p / 1.1$ è il periodo energetico e P_i è la potenza associata al singolo stato ondoso i di frequenza f_i .

Partendo dalla Tabella II.1, si è costruita la Tabella II.3 valutando mediante la eq. (2) il valore di P_i per ogni stato ondoso. Si sono quindi ottenute, mediante le eq. (3) e (4), la potenza annuale $P=4.07$ kW/m e la energia annuale $E=35.66$ MWh/m. Si è poi proceduto ad accorpate gli stati ondosi in Tabella II.4, considerando le coppie H_s - T_p caratterizzate dalla maggiore frequenza (Tabella II.1), e andando a calcolare i valori di P_i per ciascuno stato ondoso, correggendo le frequenze f_i fino a determinare gli stessi valori di P e di E desunti dalla Tabella II.3.

Tabella II.1. Tabella riassuntiva del clima annuale derivata dalla relazione di Scientific Engineering Ltd. Frequenza di accadimento per classi di altezza d'onda significativa Hs e periodo di picco Tp.

H _s -T _p		Altezza significativa H _s [m]													
		0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
Periodo di picco T _p [s]	TOT	32.029%	33.284%	17.766%	8.480%	4.132%	2.111%	1.147%	0.561%	0.240%	0.141%	0.067%	0.029%	0.011%	0.001%
	0.50	0.000%													
	1.50	0.000%													
	2.50	9.812%	0.009%												
	3.50	23.229%	14.517%	8.377%	0.334%	0.001%									
	4.50	24.877%	6.373%	13.865%	4.280%	0.348%	0.011%								
	5.50	20.184%	1.045%	8.056%	7.966%	2.751%	0.345%	0.019%	0.002%						
	6.50	12.282%	0.118%	2.370%	3.631%	3.690%	1.952%	0.465%	0.052%	0.004%					
	7.50	6.191%	0.080%	0.550%	1.255%	1.184%	1.346%	1.181%	0.511%	0.074%	0.010%	0.001%			
	8.50	2.502%	0.011%	0.025%	0.249%	0.379%	0.358%	0.370%	0.514%	0.416%	0.135%	0.038%	0.000		
	9.50	0.802%	0.072%	0.015%	0.048%	0.118%	0.105%	0.064%	0.059%	0.061%	0.090%	0.096%	0.000	0.000	0.000
	10.50	0.112%	0.008%	0.013%	0.002%	0.007%	0.015%	0.012%	0.008%	0.007%	0.004%	0.005%	0.000	0.000	0.000
11.50	0.009%	0.001%	0.004%	0.001%	0.000%		0.000%		0.000%	0.000%	0.001%	0.000		0.000	

Tabella II.2. Tabella riassuntiva del clima annuale derivata dalla relazione di Scientific Engineering Ltd. Frequenza di accadimento per classi di altezza d'onda significativa Hs e direzioni dir.

H _s -dir.		Altezza significativa H _s [m]													
		0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75
Direzioni [deg N]	TOT	32.029%	33.284%	17.766%	8.480%	4.132%	2.111%	1.147%	0.561%	0.240%	0.141%	0.067%	0.029%	0.011%	0.001%
	0	10.188%	3.056%	2.348%	1.738%	1.174%	0.755%	0.488%	0.290%	0.180%	0.075%	0.053%	0.024%	0.007%	0.001%
	30	4.624%	1.450%	1.356%	0.758%	0.464%	0.256%	0.158%	0.090%	0.051%	0.027%	0.014%	0.001%		
	60	3.717%	1.434%	1.083%	0.609%	0.283%	0.150%	0.075%	0.042%	0.021%	0.011%	0.003%	0.002%	0.003%	
	90	4.895%	2.563%	1.210%	0.490%	0.259%	0.159%	0.099%	0.068%	0.031%	0.010%	0.004%	0.001%		
	120	14.732%	5.684%	5.310%	1.991%	0.826%	0.442%	0.249%	0.131%	0.054%	0.026%	0.012%	0.007%	0.000%	
	150	11.537%	2.494%	3.639%	2.521%	1.462%	0.767%	0.339%	0.190%	0.073%	0.028%	0.016%	0.005%	0.002%	0.002%
	180	3.890%	1.020%	1.494%	0.867%	0.378%	0.100%	0.023%	0.006%	0.001%					
	210	2.418%	0.682%	0.980%	0.536%	0.169%	0.043%	0.004%	0.002%	0.000%					
	240	2.858%	0.696%	1.132%	0.639%	0.255%	0.092%	0.030%	0.009%	0.002%	0.001%				
	270	3.118%	1.064%	1.088%	0.597%	0.249%	0.087%	0.026%	0.006%	0.001%	0.000%				
	300	7.464%	2.229%	2.569%	1.561%	0.580%	0.286%	0.127%	0.063%	0.029%	0.011%	0.008%	0.002%	0.001%	0.000%
	330	30.561%	9.657%	11.074%	5.459%	2.381%	0.995%	0.492%	0.251%	0.118%	0.051%	0.031%	0.026%	0.015%	0.009%

Tabella II.3. Potenze associate a ciascuna coppia Hs-Tp della Tabella II.1. Potenza ed Energia annuale.

Potenza [kW]	Altezza significativa H _s [m]										Totale Potenza	Energia	
	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75			
6.82	0.05												
14.13	73.41	8.13	0.06										
7.98	156.21	133.95	21.34	1.16									
1.60	110.93	304.72	206.27	42.71	3.52	0.42							
0.21	38.57	164.13	326.92	285.90	101.74	15.94	1.66						
0.17	10.32	65.45	121.09	227.39	298.06	180.33	34.55	5.90	0.41				
0.03	0.54	14.74	43.96	68.56	105.92	205.46	221.38	92.43	32.46				
0.19	0.36	3.19	15.33	22.56	20.58	26.57	36.01	68.87	91.99				
0.02	0.35	0.12	1.01	3.60	4.13	4.16	4.28	3.44	5.73				
		0.11	0.09	0.04					0.63				
	31.15	390.86	694.51	736.04	651.88	533.95	432.87	297.88	170.63	131.21	4070.98 W/m	35661.8 kWh/M	
											4.071 kW/m	35.66 MWh/m	

Si sono determinate le direzioni caratteristiche dalla Tabella II.2 e nella Tabella II.5 sono state evidenziate in giallo e in azzurro le celle da accoppiare al fine di rappresentare le due direzioni caratterizzate dalla maggiore frequenza di accadimento. Le due direzioni risultanti β sono ottenute calcolando due medie pesate, dove il

peso è dato dalle frequenze, sulle direzioni corrispondenti alle celle evidenziate in giallo e alle celle evidenziate in azzurro, secondo la seguente equazione

$$\beta = \frac{\sum_i \beta_i f_i}{\sum_i f_i} \tag{5}$$

La Tabella II.6 riporta gli stati ondosi rappresentativi del clima annuale ottenuti dalla combinazione della Tabella II.4 e delle direzioni medie ottenute dalla Tabella II.5.

Tabella II.4. Stati ondosi Hs-Tp ottenuti mediante accorpamento dalla Tabella II.1 con le corrispondenti frequenze di accadimento.

Potenza [W]	Tp	Altezza significativa H _s [m]										
		TOT	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25	4.75
3.50	10.0%	6.95										
4.50	24.3%	14.60	81.49									
5.50	26.8%	8.76	163.36	165.87								
6.50	22.6%		145.96	330.48	248.90							
7.50	12.0%			197.55	487.31	304.65						
8.50	3.8%					346.44	305.47	204.51				
9.50	2.2%						228.89	227.78	297.94	170.84		
10.50	0.1%										133.56	
			30.32	390.82	693.90	736.21	651.09	534.36	432.29	297.94	170.84	133.56

Totale Potenza
4071.33 W/m
4.071 kW/m

Energia
35664.9 kWh/M
35.66 MWh/m

Tabella II.5. Tabella del clima annuale in termini di Hs-dir, con evidenziazione delle direzioni adiacenti che sono considerate per ottenere la direzione media attraverso la media pesata con peso pari alla frequenza di accadimento, eq. (5).

Direzione [deg N]	H _{s-dir}	Altezza significativa H _s [m]									
		TOT	0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	3.75	4.25
		32.029%	33.284%	17.766%	8.480%	4.132%	2.111%	1.147%	0.561%	0.240%	0.141%
360	10.156%	3.056%	2.348%	1.738%	1.174%	0.755%	0.488%	0.290%	0.180%	0.075%	0.053%
30	4.623%	1.450%	1.356%	0.758%	0.464%	0.256%	0.158%	0.090%	0.051%	0.027%	0.014%
60	3.712%	1.434%	1.083%	0.609%	0.283%	0.150%	0.075%	0.042%	0.021%	0.011%	0.003%
90	4.893%	2.563%	1.210%	0.490%	0.259%	0.159%	0.099%	0.068%	0.031%	0.010%	0.004%
120	14.725%	5.684%	5.310%	1.991%	0.826%	0.442%	0.249%	0.131%	0.054%	0.026%	0.012%
150	11.528%	2.494%	3.639%	2.521%	1.462%	0.767%	0.339%	0.190%	0.073%	0.028%	0.016%
180	3.890%	1.020%	1.494%	0.867%	0.378%	0.100%	0.023%	0.006%	0.001%		
210	2.418%	0.682%	0.980%	0.536%	0.169%	0.043%	0.004%	0.002%	0.000%		
240	2.858%	0.696%	1.132%	0.639%	0.255%	0.092%	0.030%	0.009%	0.002%	0.001%	
270	3.118%	1.064%	1.088%	0.597%	0.249%	0.087%	0.026%	0.006%	0.001%	0.000%	
300	7.461%	2.229%	2.569%	1.561%	0.580%	0.286%	0.127%	0.063%	0.029%	0.011%	0.008%
330	30.509%	9.657%	11.074%	5.459%	2.381%	0.995%	0.492%	0.251%	0.118%	0.051%	0.031%

Tabella II.6. Tabella riassuntiva degli stati ondosi rappresentativi del clima tipico in termini di altezza significativa H_s , periodo di picco T_p , direzione dir e frequenza %. Si è tenuto conto anche del vento associato a tali stati ondosi, secondo la eq. (1).

	H_s , m	T_p , s	Dir , °	%	V10
1	0.25	4.56	337	16.40%	2.77
2	0.75	4.73	334	17.30%	5.39
3	1.25	6.55	335	9.50%	7.36
4	1.75	7.16	340	4.60%	9.02
5	2.25	8.03	343	2.20%	10.51
6	2.75	8.50	346	1.30%	11.87
7	3.25	9.03	347	0.69%	13.14
8	3.75	9.50	350	0.38%	14.33
9	4.25	9.50	351	0.16%	15.46
10	4.75	10.50	351	0.10%	16.54
11	0.25	4.56	125	11.76%	2.77
12	0.75	4.73	134	11.65%	5.39
13	1.25	6.55	139	5.87%	7.36
14	1.75	7.16	141	2.92%	9.02
15	2.25	8.03	136	1.47%	10.51
16	2.75	8.50	132	0.71%	11.87
17	3.25	9.03	130	0.39%	13.14
18	3.75	9.50	128	0.16%	14.33
19	4.25	9.5	129	0.06%	15.46
20	4.75	10.5	131	0.03%	16.54

6.3 SCELTA DEGLI STATI ONDOSI DA MODELLARE

Si è scelto di rappresentare con la modellazione numerica tutti gli stati ondosi in Tabella II.6, al fine di

- ricostruire gli effetti del parco eolico sul clima tipico al largo e sottocosta,
- considerare gli effetti derivanti dalla bidirezionalità, e di fatto modellare due direzioni per ogni coppia H_s - T_p ,
- rappresentare sia onde molto frequenti sia onde con bassa probabilità di accadimento
- rappresentare diverse ripidità,

per un totale di 20 stati ondosi, da modellare in assenza ed in presenza delle turbine (40 simulazioni).

7. MODELLAZIONE NUMERICA CON MIKE 21 SW

7.1 IL MODELLO NUMERICO

MIKE 21 è un modello numerico professionale per la simulazione di correnti, onde, trasporto solido e qualità delle acque in fiumi, laghi, baie, aree costiere e mare aperto. MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali.

SW (Spectral Wave Model). Modulo di propagazione spettrale di onde *sea* ed onde *swell* in aree off-shore e costiere. Permette di simulare rifrazione, diffrazione, *shoaling*, attrito con il fondo, frangimento, diffrazione e riflessione semplice utilizzando un approccio con maglia flessibile.

7.2 DEFINIZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO

La dimensione e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa e nell'intorno delle turbine, ottimizzando al contempo i tempi di calcolo.

Nello specifico, la griglia di calcolo deve rappresentare con la massima accuratezza possibile l'effetto dovuto alla presenza delle turbine galleggianti. La struttura su cui poggiano le turbine corrisponde alla configurazione più probabilmente scelta, la WindFloat di Principle Power. Si compone di 3 pile cilindriche connesse da un reticolato e disposte come vertici di un triangolo equilatero, richiamata in Figura II.1. I cilindri hanno diametro di 15 m e pescaggio di 20 m.

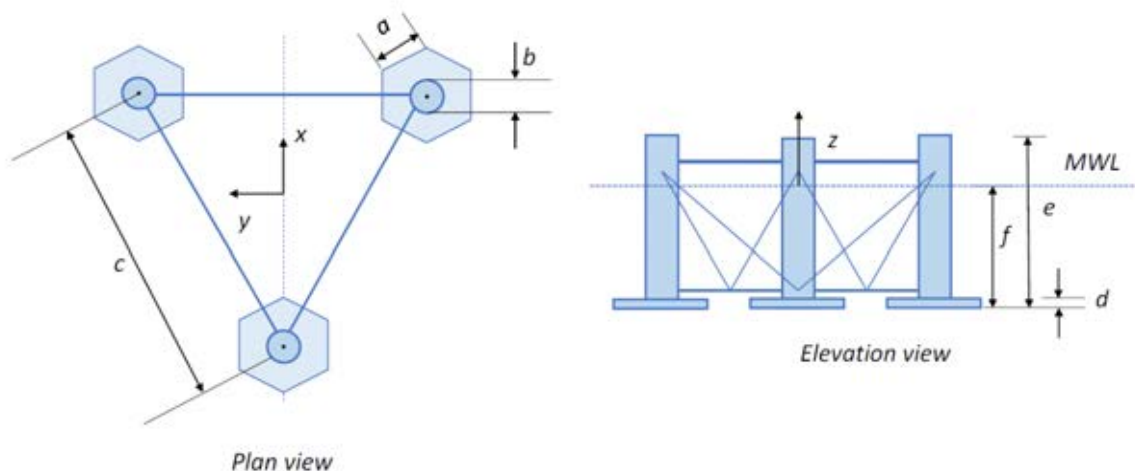


Figura II.1 Viste dall'altro (a sinistra) e di lato (a destra) della base della turbina WindFloat di Principle Power. Le dimensioni di interesse per la modellazione sono il diametro $b=15$ m e l'interasse $c=80$ m.

Nella griglia di calcolo, Figure II.2 e II.3, le pile delle turbine sono rappresentate mediante cerchi di diametro 15 m, con risoluzione di 1 m (15 vertici della griglia lungo l'arco del cerchio). Esternamente al cerchio delle pile (Figura II.3), un secondo cerchio da 30 m di diametro, con risoluzione di 2 m (15 vertici della griglia lungo l'arco del cerchio) serve a creare una griglia di calcolo ad elevata precisione attorno alle pile (area massima dell'elemento di griglia pari a 16 m^2). Un altro cerchio di diametro 140 m e risoluzione di 7 m racchiude la zona delle 3 pile (area massima dell'elemento di griglia pari a 31 m^2), mentre altri due cerchi esterni concentrici aumentano progressivamente le dimensioni della griglia fino alla zona di installazione del parco. I due cerchi concentrici hanno rispettivamente diametro 330 m e 880 m, risoluzione di 11 m e di 44 m, area massima dell'elemento di griglia pari a 63 m^2 e 1210 m^2 . La zona di installazione del parco è delimitata da un rettangolo a bordi curvi, con risoluzione di 50 m e area massima dell'elemento di griglia pari a 6250 m^2 . Dal parco a riva la risoluzione della griglia cresce progressivamente fino a raggiungere un'area massima dell'elemento di griglia pari a 1563 m^2 . La griglia si compone in totale di 508'248 elementi.

La Figura II.4 mostra la sovrapposizione della griglia di calcolo con i dati batimetrici disponibili e la Figura II.5 mostra la batimetria ottenuta per interpolazione.

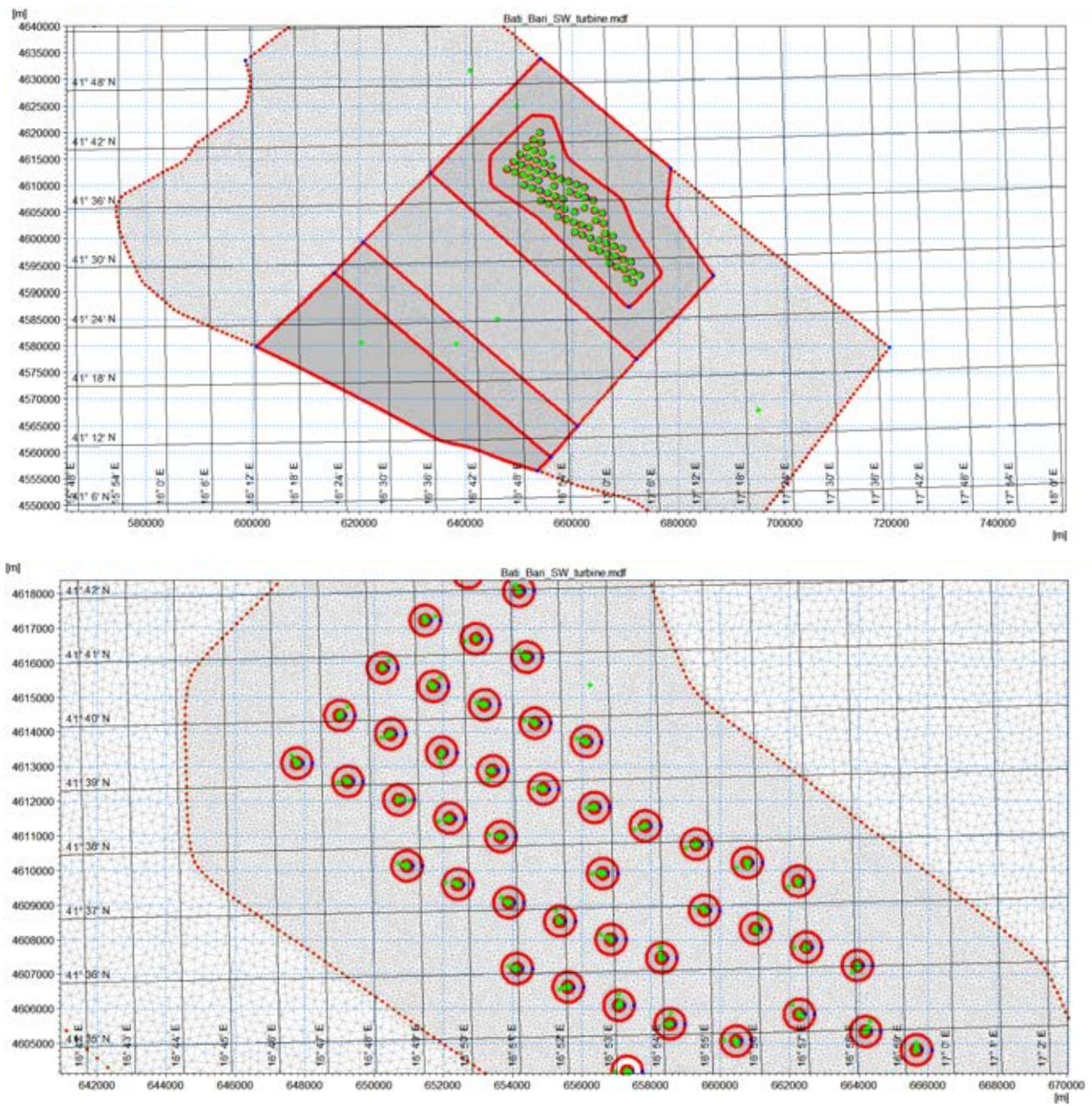


Figura II.2 Griglia di calcolo utilizzate per il modello SW: in alto, vista complessiva, in basso particolari della zona di installazione del parco.

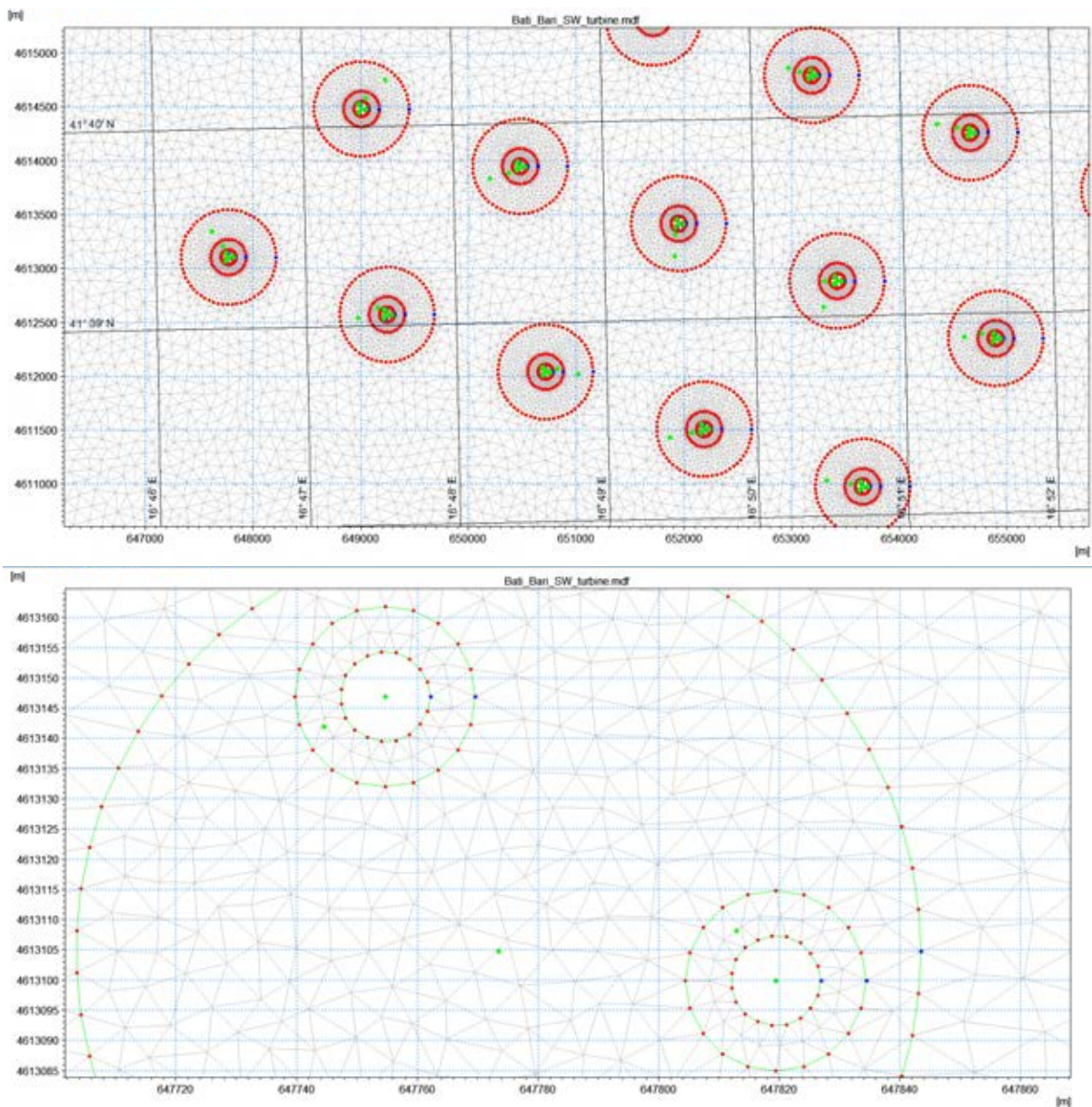


Figura II.3. Griglia di calcolo utilizzata nella modellazione con SW, particolari dei cerchi utilizzati per la rappresentazione delle pile cilindriche galleggianti di ciascuna turbina. In alto, vista di tutti i cerchi, da quello più interno che racchiude le 3 pile di diametro 140 m fino a quello più esterno di diametro 880 m. In basso, vista dei 3 cerchi relativi a ciascuna pila e ad una singola turbina: si vede la zona dove si esclude la generazione della griglia di calcolo, di diametro 15 m, ed il diametro immediatamente esterno, di diametro 30 m, che racchiude le 3 pile.

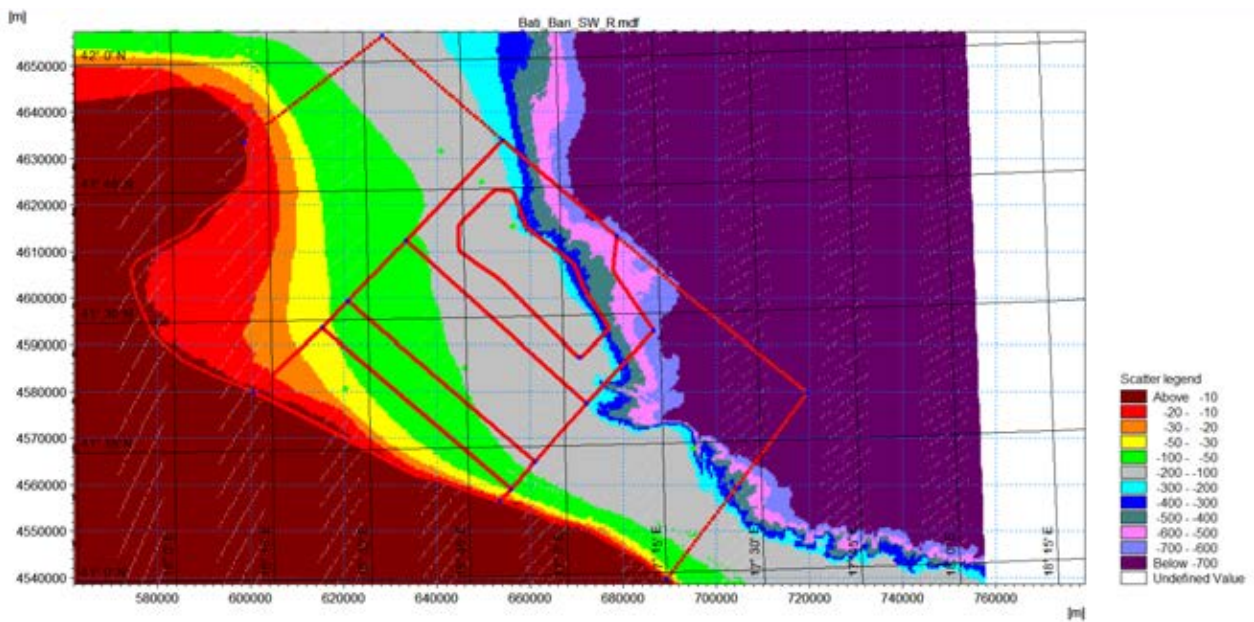


Figura II.4 Interpolazione dei dati sulla griglia di calcolo per la modellazione con SW.

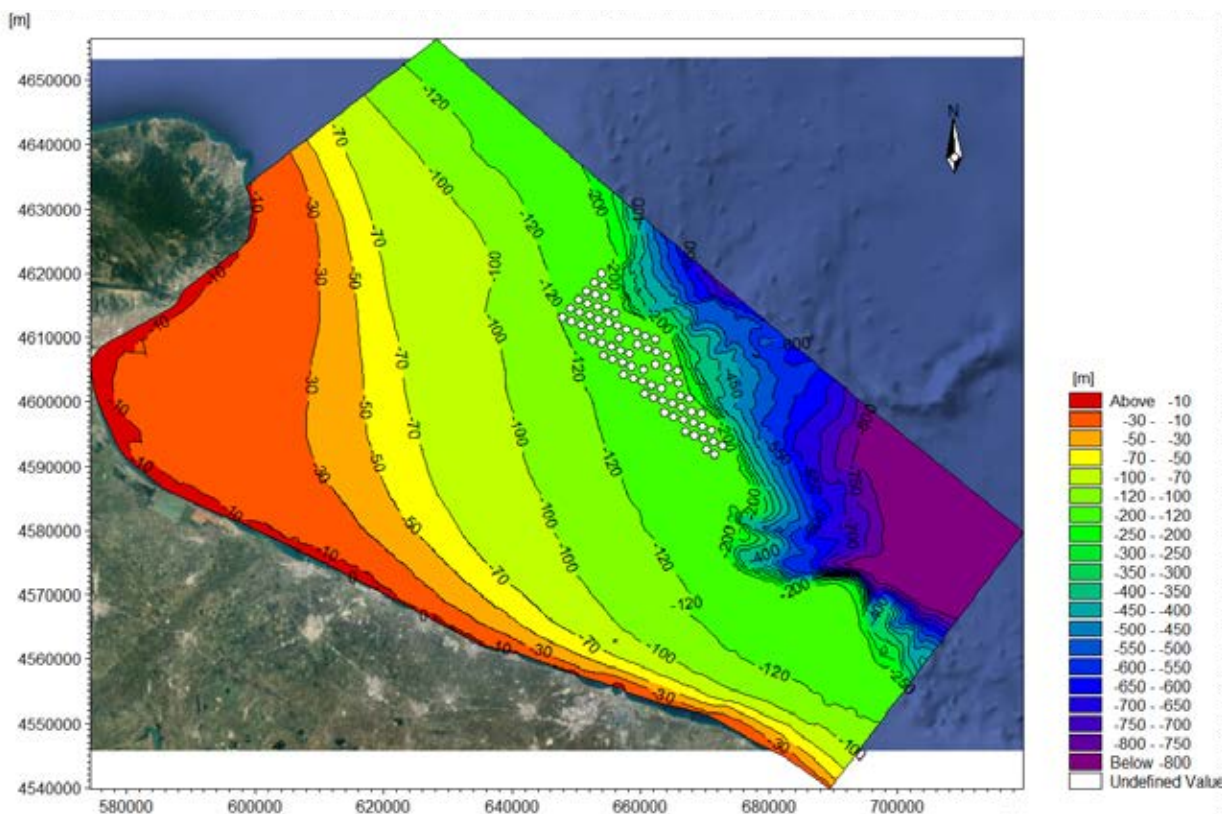


Figura II.5 Batimetria risultante dalla interpolazione sulla griglia con le linee di estrazione (in nero) delle condizioni ondose (altezza d'onda significativa, direzione) sotto-costa e dinanzi al parco.

7.3 IL SETTAGGIO DEL MODELLO MIKE21 SW E LE CONFIGURAZIONI ESAMINATE

La griglia di calcolo così costruita presenta tre contorni aperti: uno al largo, parallelo al parco ed alla costa, e due laterali, ortogonali a costa (Fig. II.6).

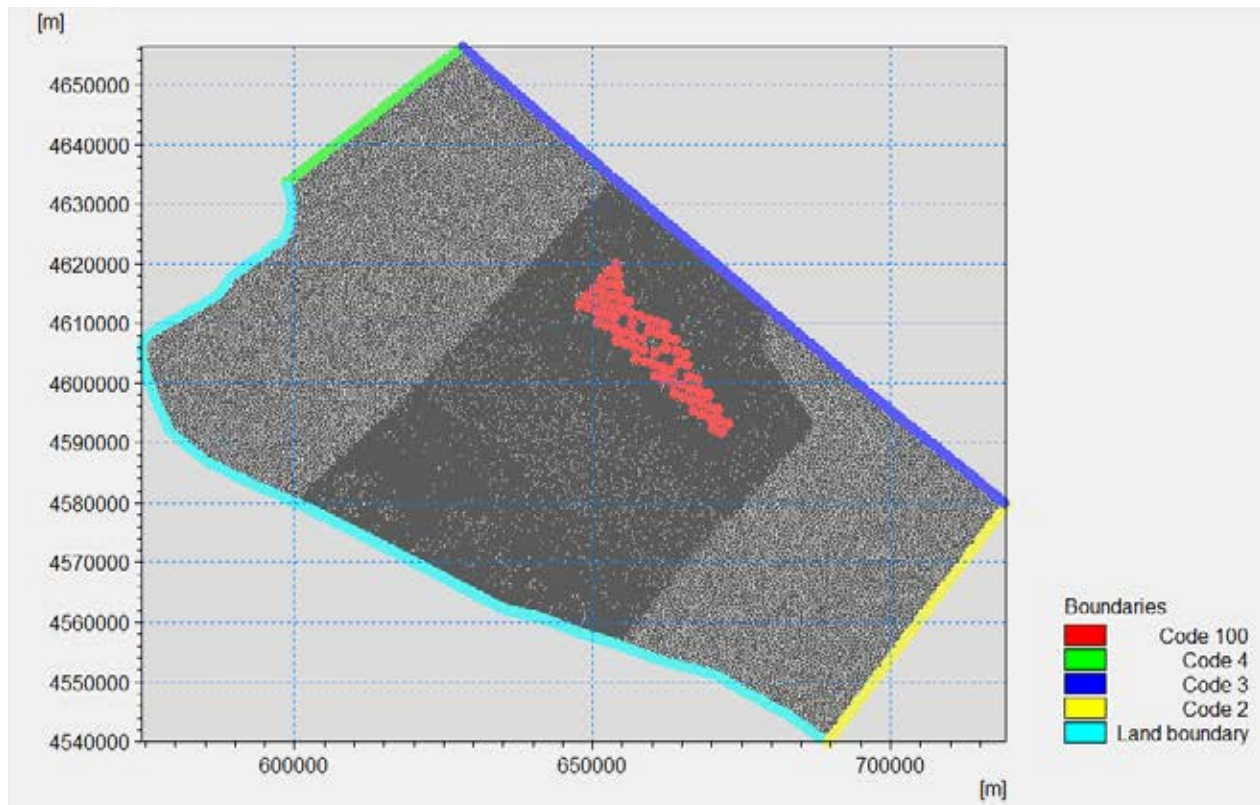


Figura II.6. Griglia di calcolo con i contorni evidenziati.

Per quanto riguarda il contorno al largo, è stata impostata una condizione di moto ondoso costante lungo tutto il contorno e basata sulle condizioni scelte in Tabella II.6. Per le condizioni al contorno laterali sono state definite delle “Lateral boundary conditions”. In corrispondenza di una condizione al contorno di tipo “lateral boundary” il modello calcola una soluzione semplificata delle equazioni lungo il contorno (approccio monodimensionale) a partire dalle caratteristiche dell’onda nel punto di incontro tra il contorno laterale e quello offshore ed in funzione del profilo batimetrico lungo il contorno laterale stesso. Tale condizione al contorno consente, quindi, alle onde di propagarsi da e verso l’esterno del dominio di calcolo senza influenzare il risultato all’interno del dominio stesso.

Nel caso della configurazione con le turbine eoliche, esiste un’altra condizione al contorno, che è stata scelta di tipo “Reflective boundary”. Il cerchio di diametro 15 m, rappresentativo delle pile, è riprodotto come una parete riflettente e profonda quanto il fondale, in modo cautelativo. Si è scelto di dare a questa parete cilindrica ideale il valore del coefficiente di riflessione $R=50\%$, valore cautelativo dato che di norma il coefficiente di riflessione di strutture galleggianti, come ad esempio i dispositivi per la conversione di energia ondosa oppure i pontili, si attesta intorno al 25% (Zanutigh & Angelelli, 2013). L’affondamento delle pile è comunque dell’ordine del 20% del fondale, quindi non trascurabile, e la interferenza tra le pile può dare luogo ad effetti non lineari che intensifichino il processo di riflessione.

In definitiva si sono quindi considerate due configurazioni, sulla base della condizione al contorno imposta in caso siano presenti le turbine eoliche

- configurazione 0: assenza di turbine, stato ante operam;
- configurazione 1: presenza di turbine parzialmente riflettenti ($R=50\%$), configurazione cautelativa ma vicina alla configurazione realistica, stato post operam.

I risultati di ciascuna simulazione consistono nella distribuzione delle altezze significative e delle direzioni medie d'onda su tutto il dominio di calcolo. Sono state predisposte anche le estrazioni di questi parametri al largo, su fondale di 100 m, a riva della zona di installazione del parco, e sotto-costa, su fondale di 20 m, così da rappresentare ancora non frante tutte le onde tipiche e da quantificare gli eventuali effetti sui processi di trasporto costiero e protezione del litorale.

8. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE CON MIKE 21 SW

Le simulazioni hanno permesso di ottenere la distribuzione delle principali grandezze di moto ondoso (altezza d'onda significativa, periodo medio e di picco e direzione media di propagazione) in tutti i punti del dominio di calcolo per le tre configurazioni (senza turbine, con turbine parzialmente e totalmente riflettenti) per tutte le 20 condizioni ondose prese a riferimento in Tabella II.6. Al fine di determinare l'influenza del campo eolico sul moto ondoso, tali risultati sono stati successivamente processati in modo da ottenere la mappa delle differenze di altezza d'onda significativa nel caso di presenza del parco eolico rispetto allo stato attuale. Tutte le mappe dei risultati sono mostrate in Appendice II.1. Si sono, inoltre, estratte le condizioni ondose al largo e sotto-costa al fine di quantificare le differenze di altezza d'onda significativa e direzione media prodotte dal campo eolico in corrispondenza di due specifici fondali, $h=100$ m e $h=20$ m. Tutti i grafici che confrontano le altezze e le direzioni, al largo e sotto-costa, per ogni stato ondoso in Tab. II.6 sono riportati in Appendice II.2.

8.1 VARIAZIONE DEL CAMPO ONDOSI D'ONDA IN PROSSIMITÀ DEL PARCO EOLICO

Da una prima analisi qualitativa dei risultati, emerge che il campo eolico non determina un'influenza apprezzabile sul moto ondoso, ad eccezione delle zone immediatamente prossime alle pile. Nello specifico, analizzando il campo d'onda di dettaglio nell'intorno delle strutture, si osserva, come atteso, un incremento dell'altezza d'onda significativa nella zona immediatamente antistante la struttura stessa, dovuta al fenomeno della riflessione. Viceversa, nell'area retrostante alla pila, si verifica una significativa riduzione locale dell'altezza d'onda dovuta all'effetto blocco delle pile.

Si riportano, a titolo di esempio, le mappe di altezza d'onda significativa in riferimento alle due configurazioni simulate per due condizioni ondose tipiche, caratterizzate da diversa direzione di provenienza, nello specifico le condizioni WS8 e WS18 della Tabella II.6. Le Figure II.7 e II.10 sono relative a tutto il dominio di calcolo per la configurazione 0, assenza delle turbine, mentre le Figure II.8 e II.11 sono relative a tutto il dominio di calcolo per la configurazione con turbine eoliche parzialmente riflettenti $R=50\%$. Le Figure II.9 e II.12 rappresentano localmente ad una singola turbina l'effetto attorno alle pile, rappresentato come rapporto tra l'altezza d'onda locale significativa e l'altezza d'onda significativa davanti al parco eolico.

Considerando che gli stati ondosi WS8 e WS18 sono caratterizzati dalla stessa altezza d'onda significativa al largo ($H_s=3.75$ m), si nota (Figure II.7, II.8, II.10, II.11) che

- l'effetto del parco a livello globale, ovvero l'effetto di scia, si propaga dalla zona di installazione del parco verso riva, interessando rispettivamente la zona Nord o la zona Sud del dominio di calcolo nel caso dello stato ondoso WS18 o WS8. La zona di scia si raccorda al campo ondoso in assenza del parco per fondali superiori già a $h=50$ m,
- gli effetti quantitativi del parco sono molto modesti, come dimostrato dalla conservazione delle direzioni ondose (osservando i vettori) e dalla riduzione delle altezze d'onda significativa H_s in scia (mediamente di 0.3 m ovvero di $-10\% \cdot H_s$). La riduzione di H_s in scia è a vantaggio della sicurezza delle rotte marittime e della erosione del litorale.

Localmente alle pile (Figure II.9, II.12), gli effetti davanti alle pile sono simili in entrambi gli stati ondosi WS8 e WS18, con incremento modesto del 5% di H_s , mentre gli effetti di riduzione dell'altezza d'onda dietro alle pile sono maggiori nel caso di Scirocco (WS18), con una riduzione fino al 50% di H_s rispetto al caso di Bora (WS8) con una riduzione fino al 70% di H_s .

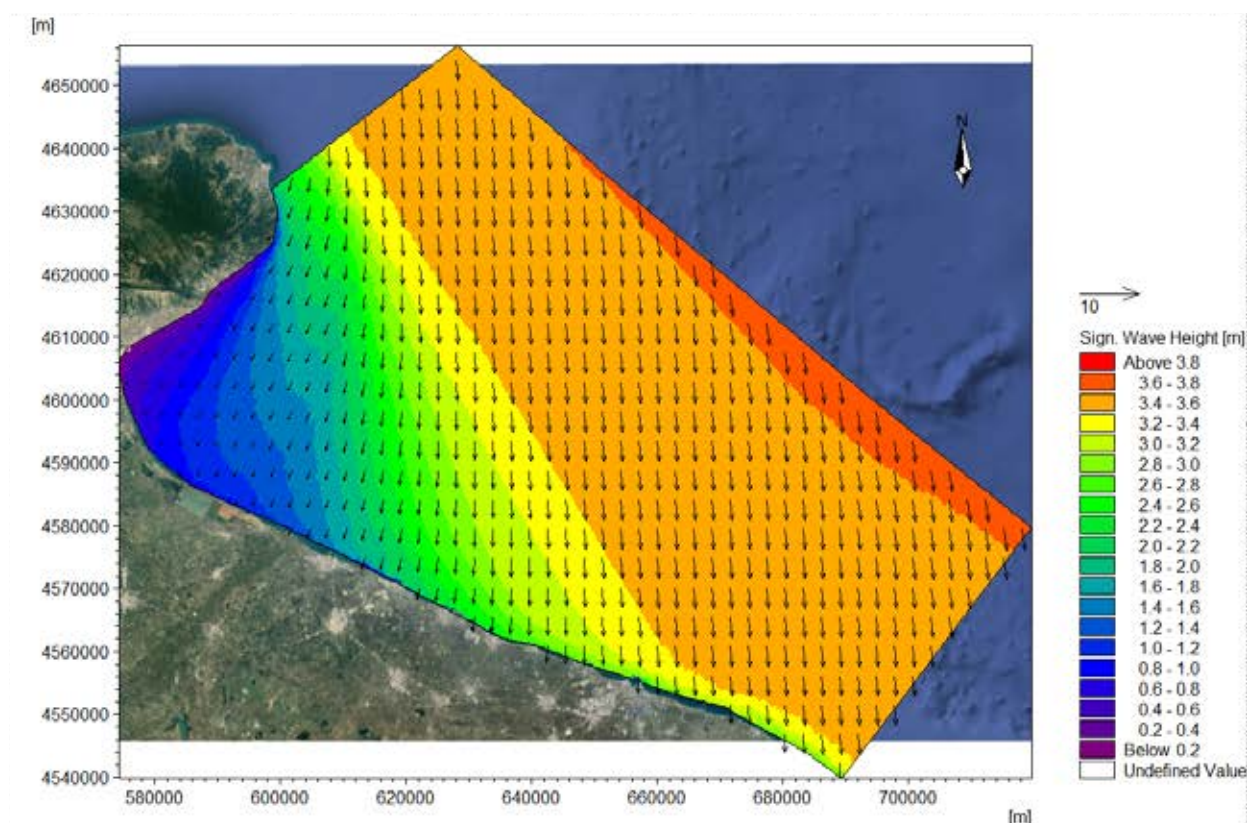


Figura II.7 Stato ondoso WS8, assenza di turbine eoliche, vista completa.

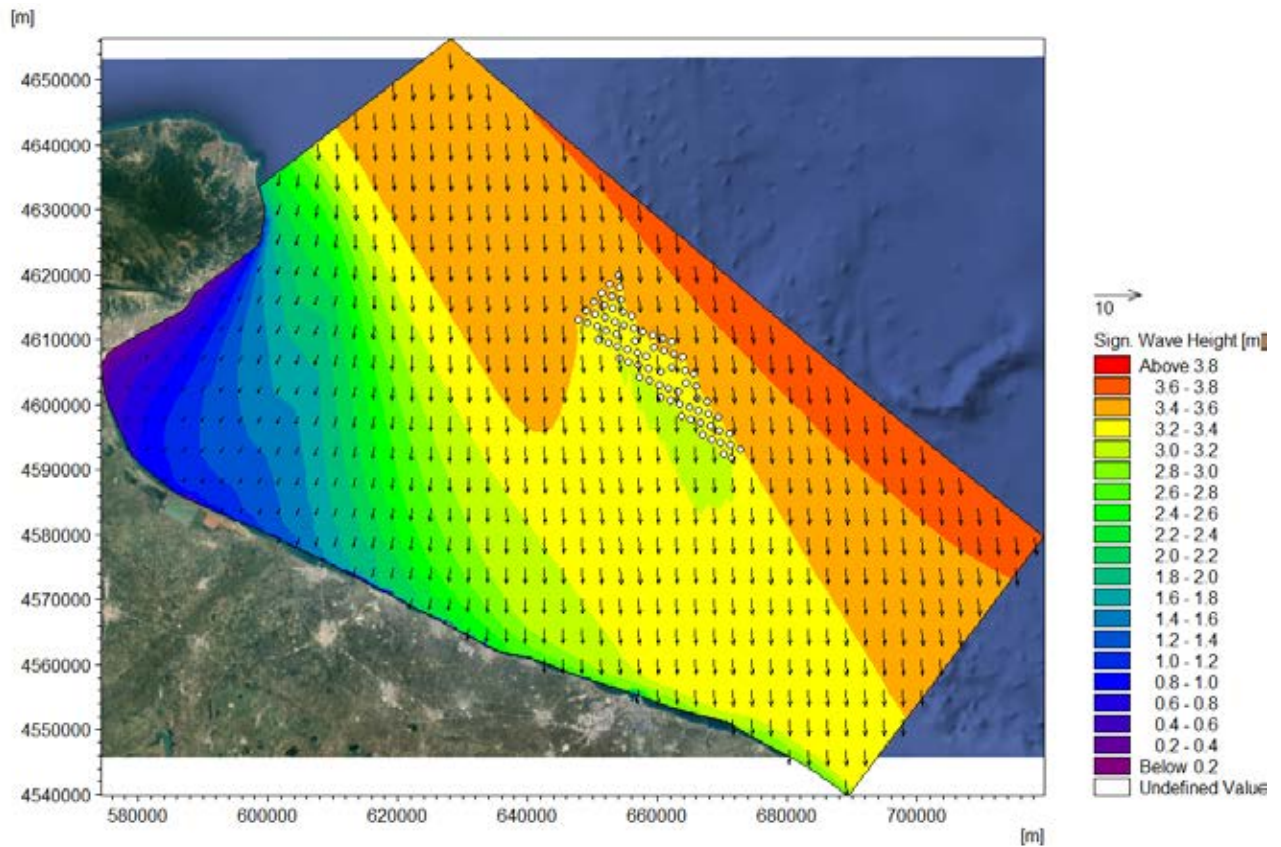


Figura II.8 Stato ondoso WS8, turbine eoliche R=50%, vista completa.

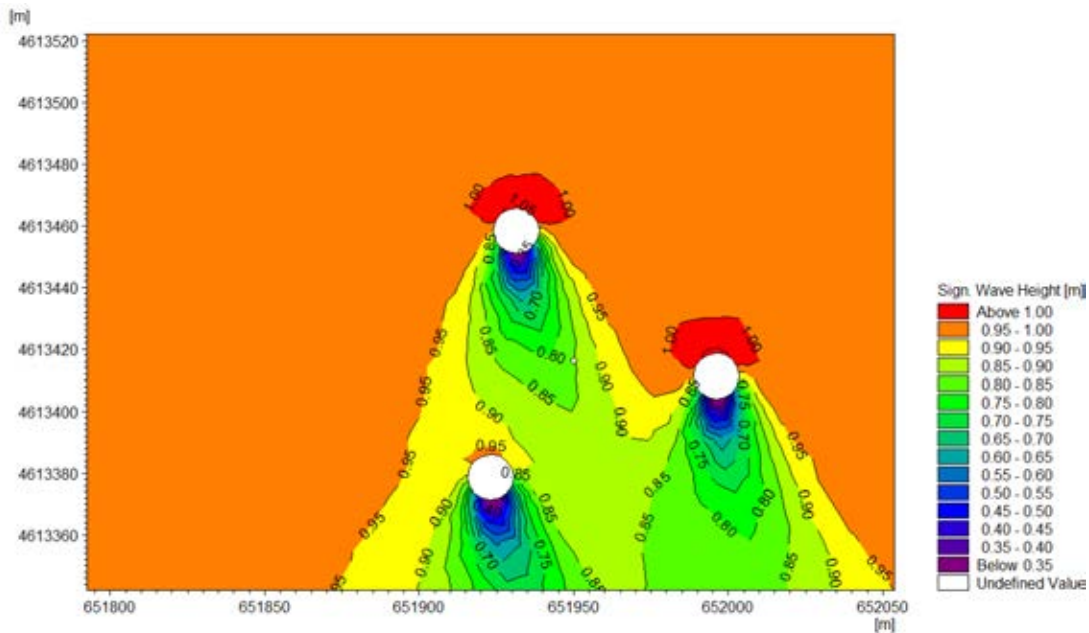


Figura II.9 Stato ondoso WS8, dettaglio del campo ondoso attorno alle pile delle turbine rappresentato come rapporto tra l'altezza d'onda locale e quella di target.

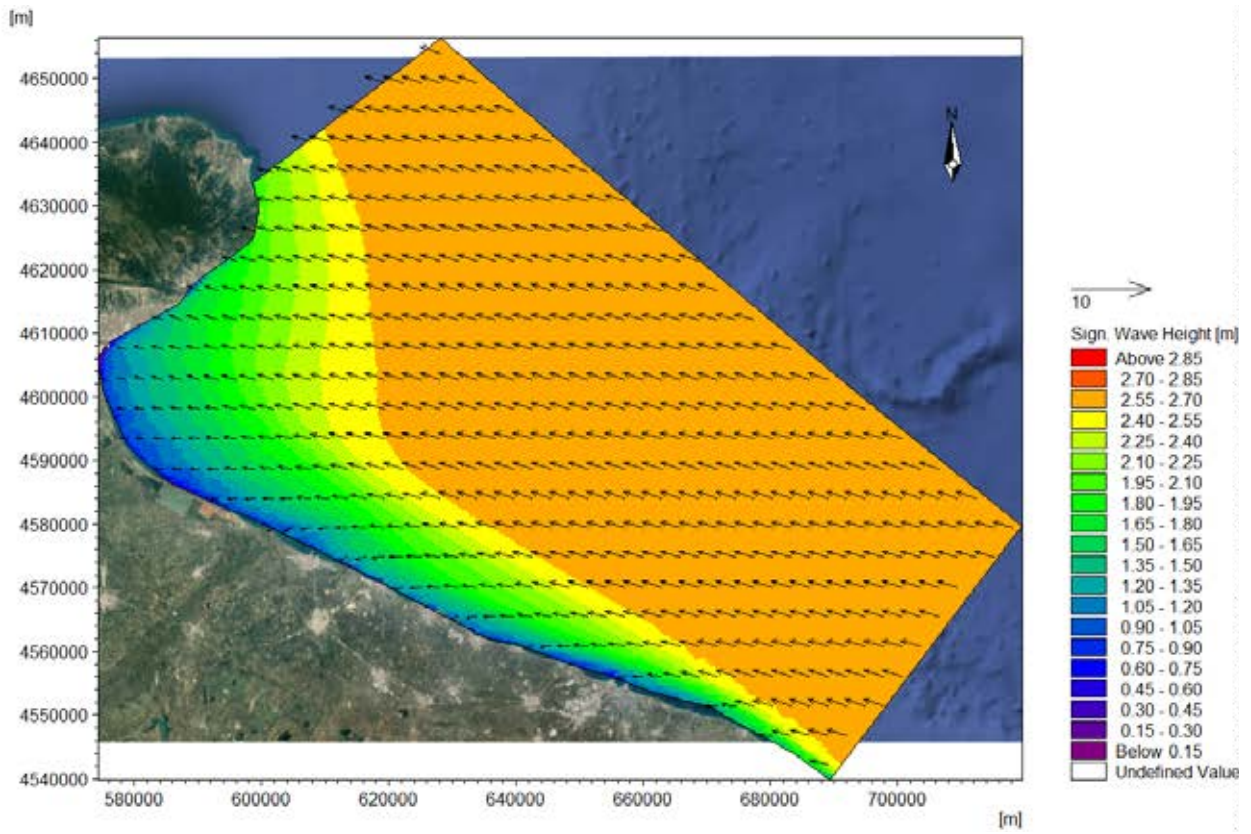


Figura II. 10 Stato ondoso WS18, assenza di turbine eoliche, vista completa.

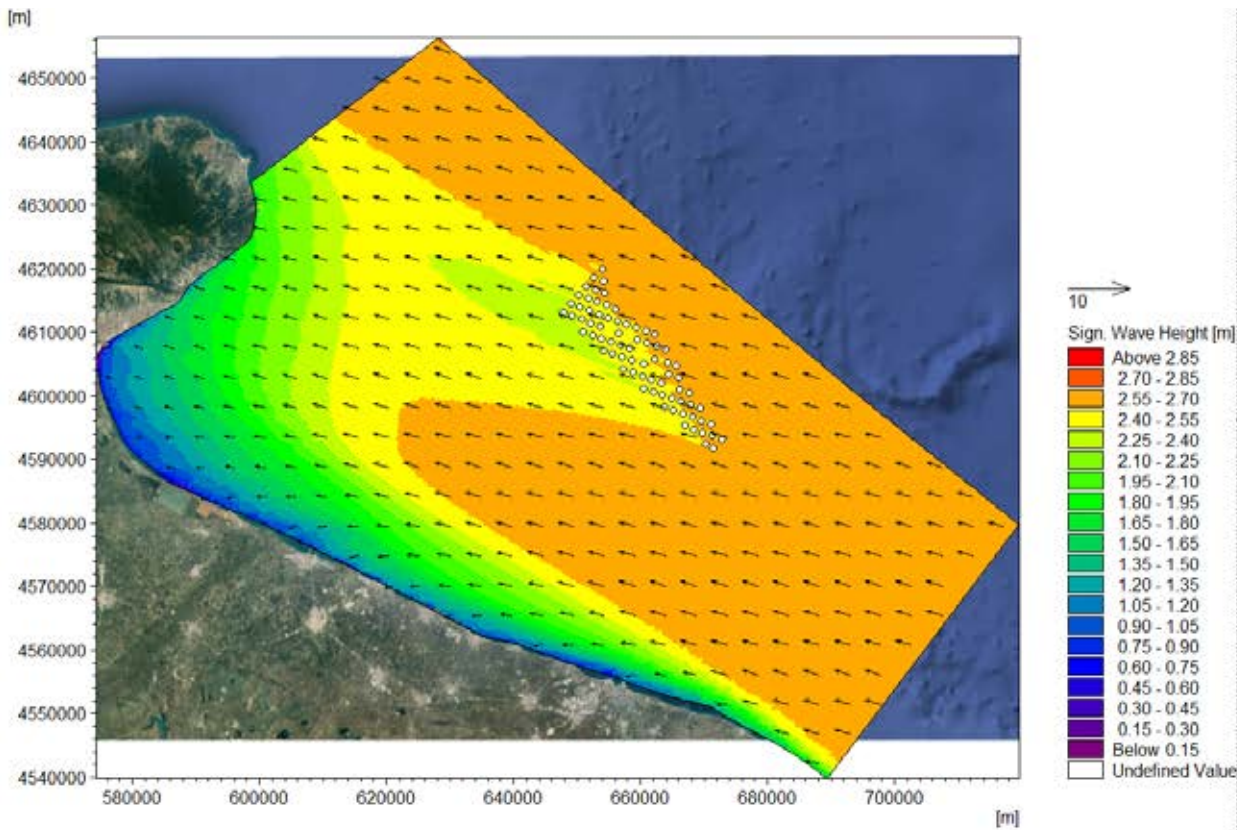


Figura II. 11 Stato ondoso WS18, turbine eoliche R=50%, vista completa.

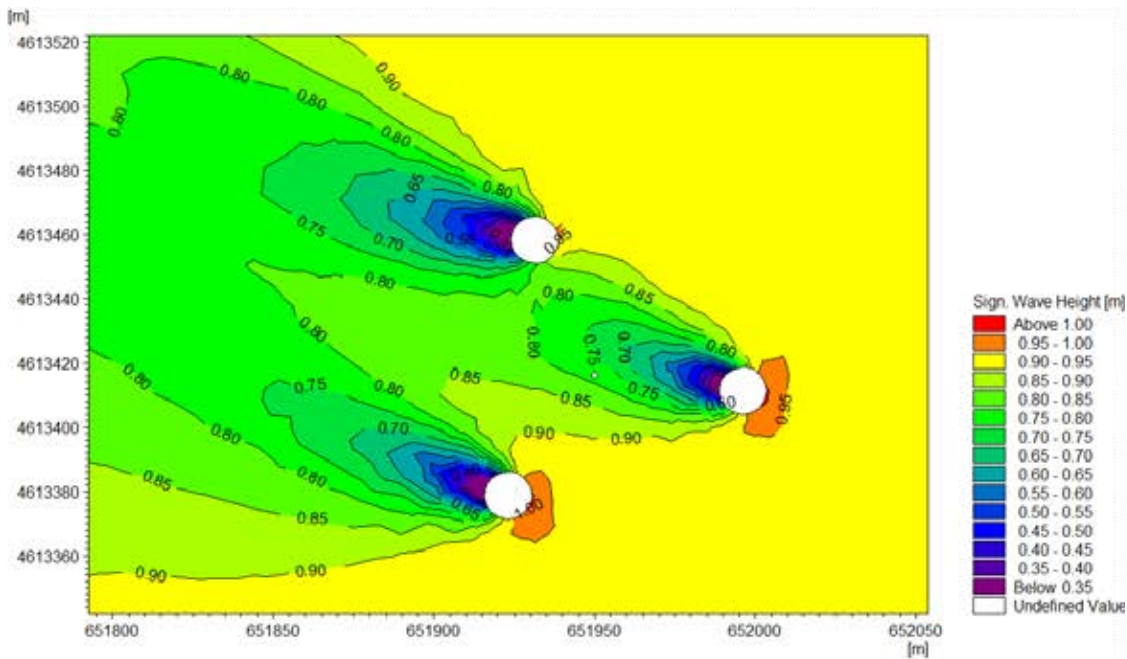


Figura II.12 Stato ondoso WS18, dettaglio del campo ondoso attorno alle pile delle turbine rappresentato come rapporto tra l'altezza d'onda locale e quella di target.

8.2 MAPPE DELLE VARIAZIONI DELLE ALTEZZE D'ONDA NELL'AREA DI STUDIO

Per ciascuno stato ondoso in Tabella II.6 si sono elaborate le mappe delle differenze di altezza d'onda significativa H_s tra la configurazione con le turbine e lo stato attuale. Tutte le elaborazioni sono riportate nella Appendice II.

Si riportano qui come esempio le mappe delle differenze, per tutta l'area di studio e localmente alle turbine eoliche, per due condizioni ondose, una di Bora, WS8 in Figura II.13, e una di Scirocco, WS18 in Figura II.14, per il caso di parziale riflettanza delle pile $R=50\%$. Entrambi gli stati ondosi WS8 e WS18 sono caratterizzati dalla stessa altezza d'onda significativa al largo ($H_s=3.75$ m).

Come già osservato nella Sezione 8.1

- l'effetto di scia del parco a livello globale interessa la zona di installazione e si propaga verso riva, comportando una riduzione dell'agitazione ondosa nella zona Sud-Est per WS8 e nella zona Nord-Ovest per WS18, rispetto al caso senza parco eolico. La zona Nord-Ovest interessa il lato Sud del promontorio del Gargano, mentre la zona Sud-Est va da Bisceglie a Mola di Bari. Gli effetti quantitativi del parco a riva sono molto modesti, la riduzione delle altezze d'onda significativa H_s in scia a riva non è superiore a -0.1 m per entrambi gli stati ondosi WS8 e WS18, pari circa al 3% di H_s .
- In entrambi i casi di Bora e Scirocco, le maggiori variazioni dell'altezza d'onda si notano localmente alle pile. L'incremento dinanzi alle pile e la riduzione dietro alle pile sono fino a $+0.15$ m e a -0.25 m rispetto al valore di H_s in assenza del parco eolico, di fatto fino a $+4\%$ e fino a -7% il valore di H_s in assenza del parco eolico. La distribuzione del campo ondoso suggerisce che gli effetti locali non producono variazioni significative per il traffico marittimo o altre attività all'interno del parco, essendo l'incremento di H_s locale e limitato.

La modesta riduzione di altezza d'onda H_s in tutta la zona di installazione del parco eolico suggerisce che le operazioni di mantenimento del parco possono essere effettuate sia in presenza di Bora sia in presenza di Scirocco. Inoltre, si potrebbe valutare la co-installazione di impianti per l'acquacoltura, che beneficerebbero della riduzione di H_s in tutta la zona del parco.

Le Figure II.15, II.16, II.17 mostrano la mappa delle differenze di altezza d'onda significativa in presenza ed assenza del parco eolico rispettivamente per gli stati ondosi da Bora, da Scirocco e per l'anno tipico. Per realizzare queste differenze si sono fatte le differenze per ciascuno stato ondoso tra il campo d'onda in presenza ed assenza del parco e si sono quindi sommate le differenze pesandole con la frequenza di accadimento di ciascuno stato ondoso in Tabella II.6. Per la Figura II.15 si è fatta la media pesata di tutti gli stati ondosi da Scirocco in Tabella II.6 (WS11-20); per la Figura II.16 si è fatta la media pesata di tutti gli stati ondosi da Bora in Tabella II.6 (WS1-10); per la Figura II.17 si sono considerati nella media pesata tutti gli stati ondosi rappresentativi del clima tipico in Tabella II.6 (WS1-WS20). Si nota che sia gli stati ondosi da Bora sia da Scirocco sono caratterizzati da un modesto aumento della altezza d'onda immediatamente a largo del parco (fino a un massimo di 0.05 m); negli stati ondosi da Scirocco c'è una diffusa, modesta riduzione dell'altezza d'onda in tutto il campo a riva (fino a un minimo di -0.05 m), mentre negli stati ondosi da Bora si verifica la situazione opposta, con un diffuso, modesto aumento dell'altezza d'onda (fino a un massimo di $+0.05$ m) tranne che nella zona di ristagno lato Sud-Est del promontorio del Gargano. Localmente al parco, entrambi gli stati di mare comportano una modesta riduzione dell'altezza d'onda. Combinando i due effetti nella mappa del clima tipico annuale, si determina una diffusa, modesta riduzione dell'altezza d'onda in tutto il dominio di calcolo (fino a un minimo di -0.05 m) tranne che lato Sud-Est a valle del promontorio del Gargano

e davanti al parco eolico. Di fatto, a meno di considerare come significative delle variazioni irrisorie di ± 0.05 m, il parco eolico non comporta alcun effetto rilevante sul moto ondoso.

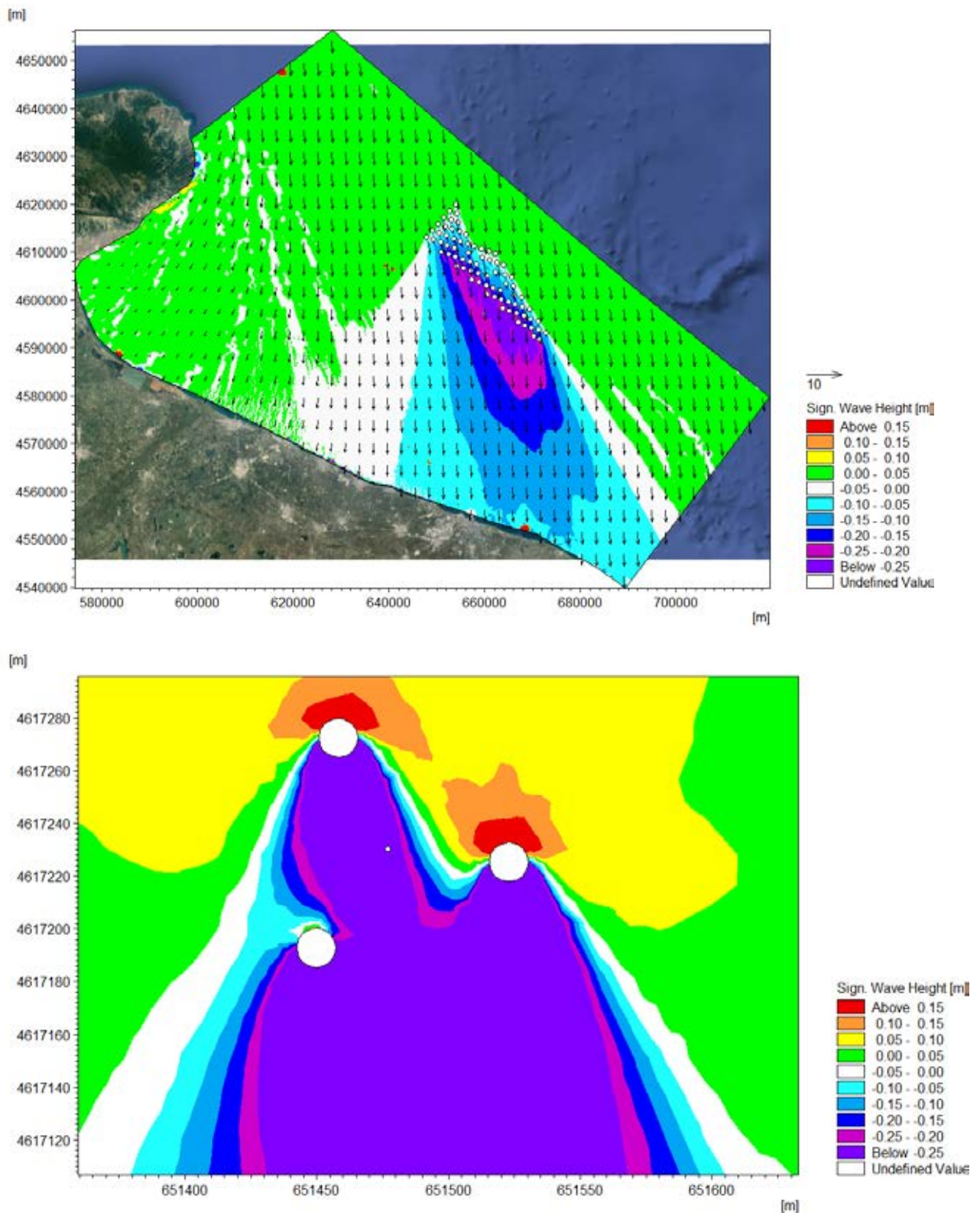


Figura II. 13 Stato ondoso WS8, differenza tra presenza e assenza delle turbine eoliche: vista completa (in alto) e particolare attorno alle pile di una singola turbina (in basso).

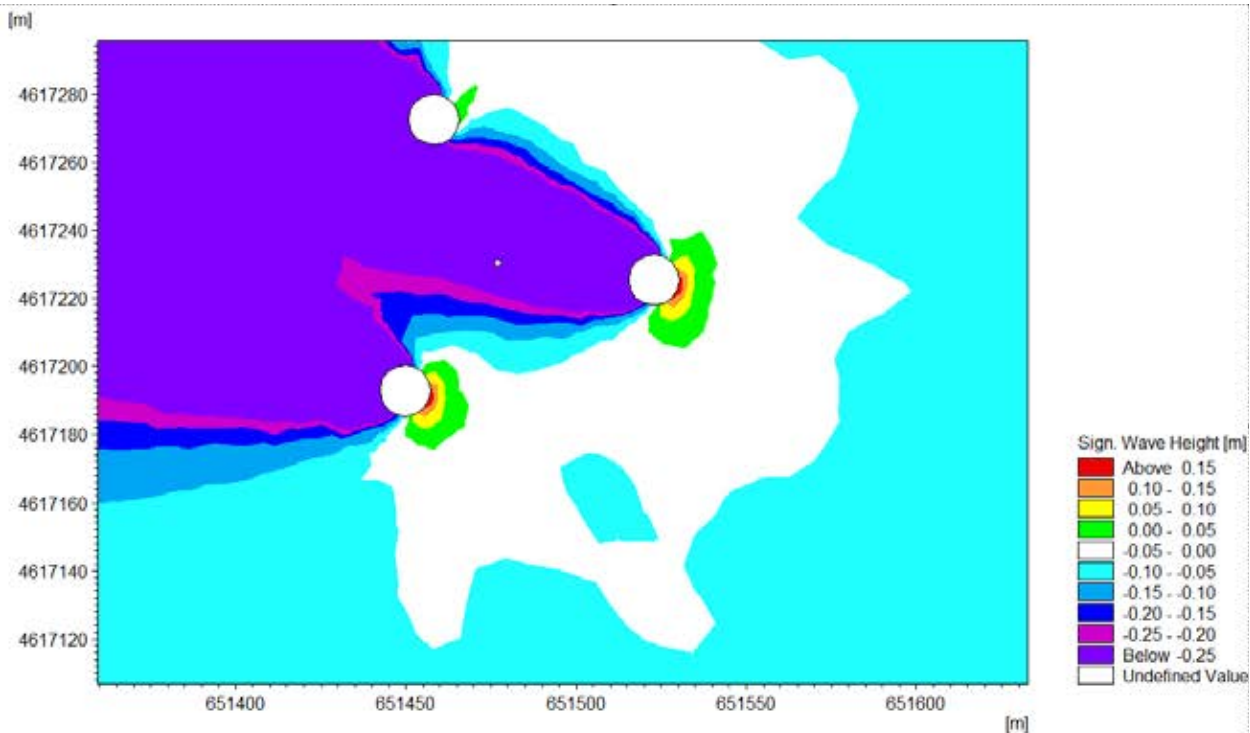
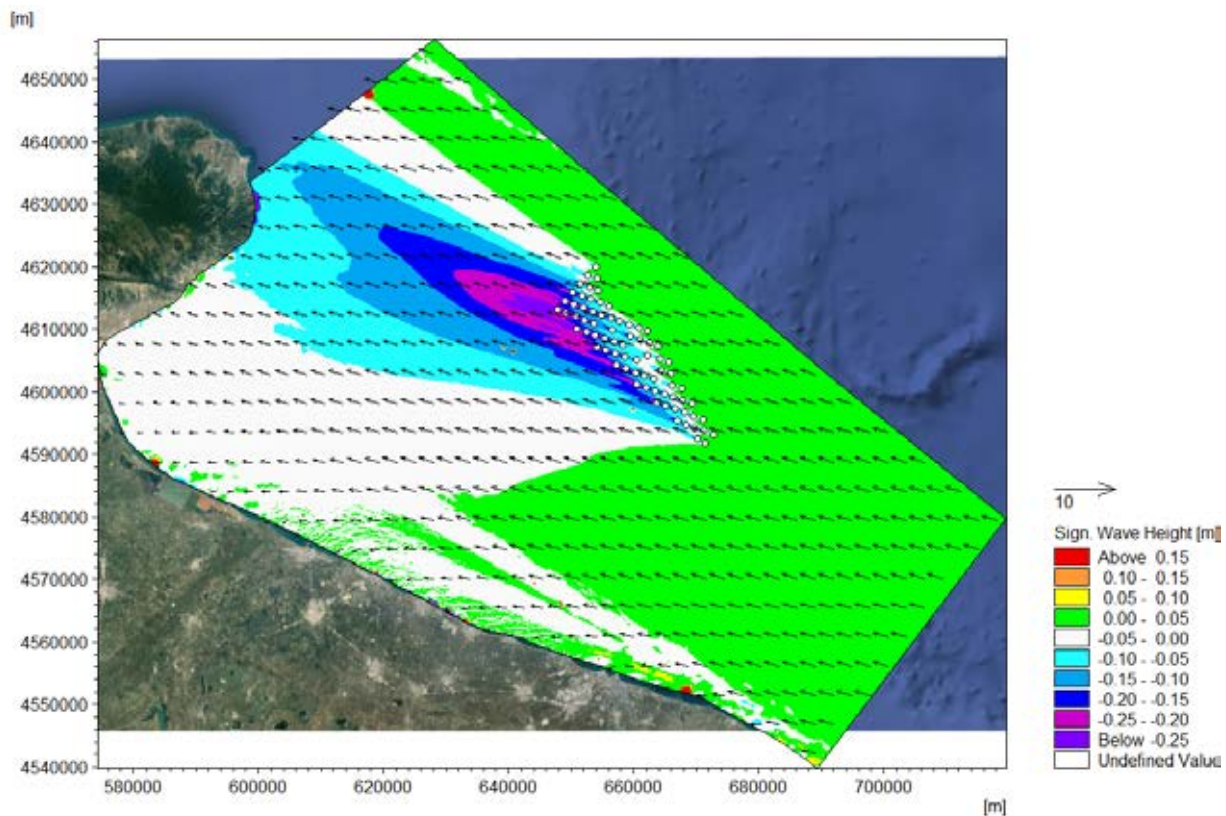


Figura II. 14 Stato ondoso WS18, differenza tra presenza e assenza delle turbine eoliche: vista completa (in alto) e particolare attorno alle pile di una singola turbina (in basso).

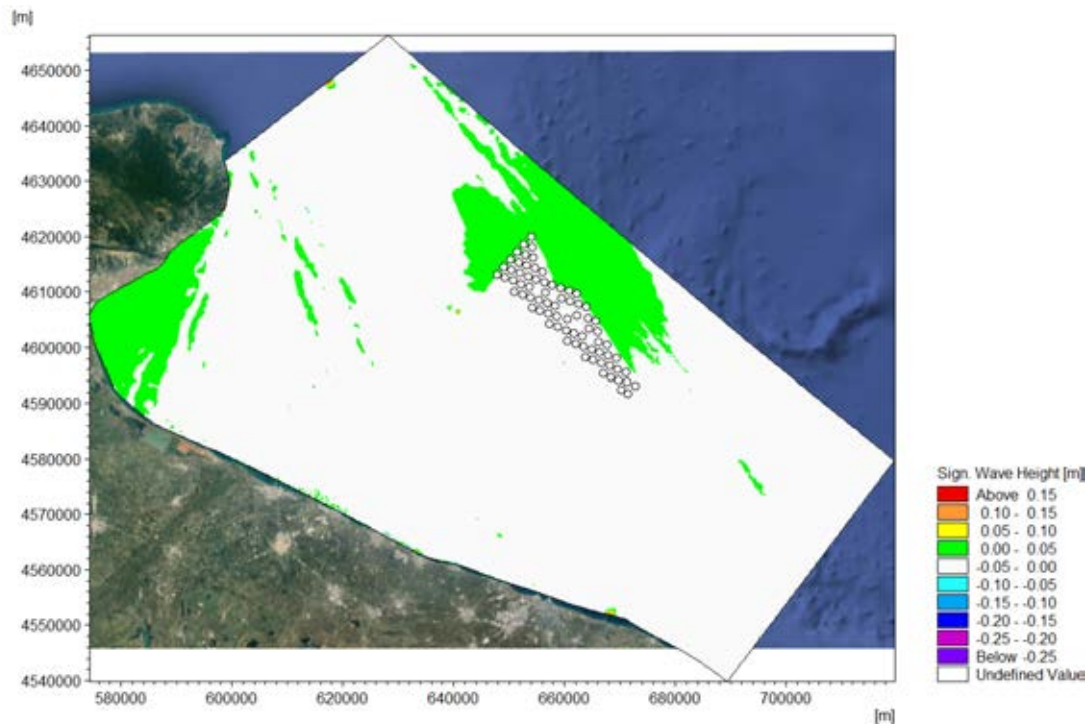


Figura II. 15 Effetto della presenza del parco per onde di Scirocco pesate secondo le frequenze di accadimento nell'anno.

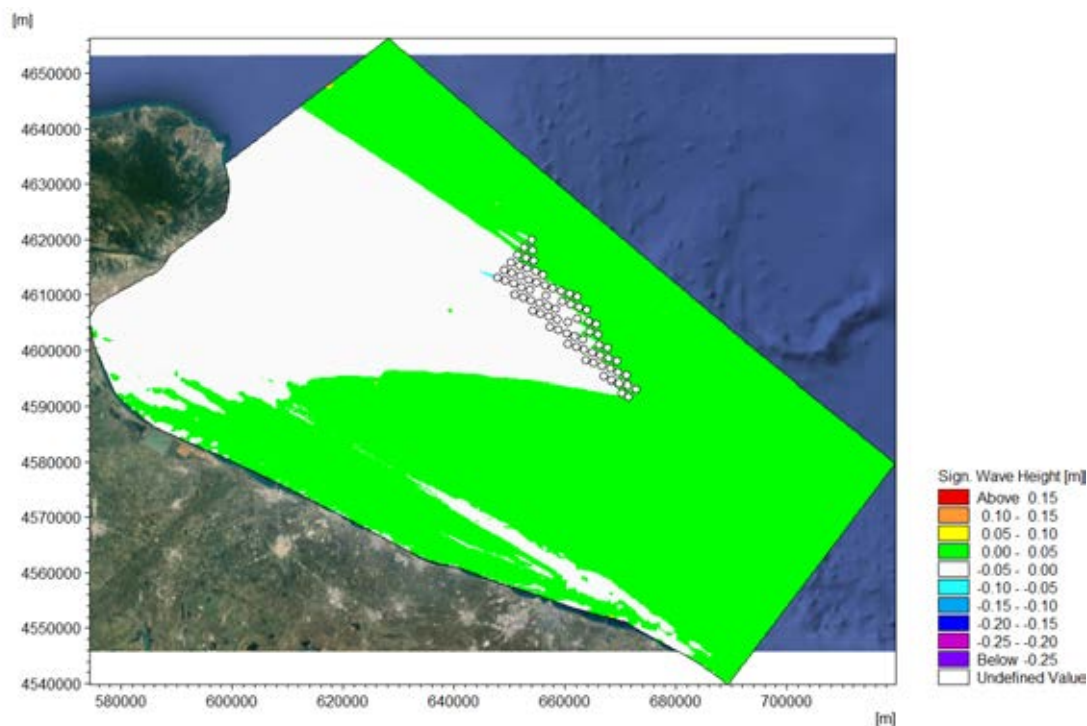


Figura II. 16 Effetto della presenza del parco per onde di Bora pesate secondo le frequenze di accadimento nell'anno.

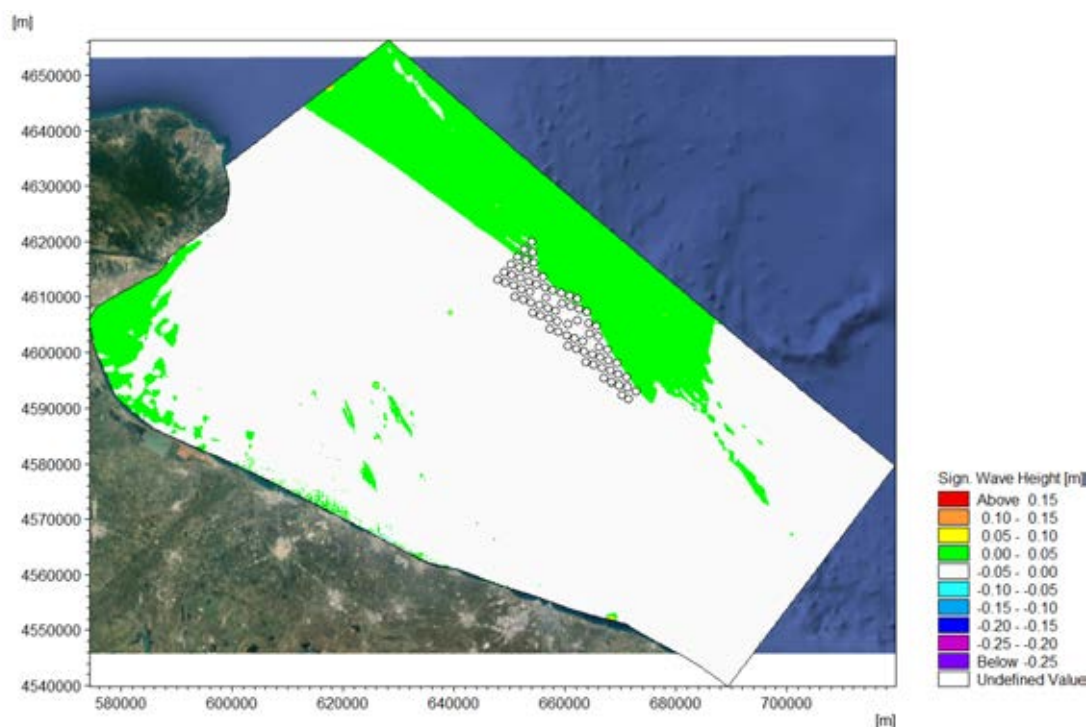


Figura II. 17 Effetto della presenza del parco considerando il tipico clima annuale.

8.3 VARIAZIONE DELLE ALTEZZE E DIREZIONI D'ONDA AL LARGO

Per ciascuno stato ondoso in Tabella II.6 e per ciascuna configurazione, si sono estratti i valori di altezza d'onda significativa e direzione media in corrispondenza della isobata -100 m dinanzi al parco eolico, per una lunghezza di 55 km complessivi. Tutte le elaborazioni sono riportate nella Appendice II.2.

Si riportano qui due grafici per due casi esemplificativi di Bora e Scirocco, rispettivamente WS8 (Figura II.18 per le altezze d'onda e Figura II.19 per le direzioni) e WS18 (Figura II.20 per le altezze d'onda e Figura II.21 per le direzioni). Le Figure contengono il confronto tra l'assenza e la presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$). Entrambi gli stati ondosi WS8 e WS18 sono caratterizzati dalla stessa altezza d'onda significativa al largo ($H_s=3.75$ m).

Nel caso di Bora (Figura II.18), le onde in presenza del parco tendono a ridursi in modo crescente lungo il dominio verso Sud-Est fino ad un massimo di 0.18 m, ovvero fino al 3% di H_s , rispetto al caso di assenza del parco. La riduzione di altezza d'onda nel tratto a Sud non comporta una riduzione dell'altezza d'onda sotto-costa, come si vedrà nella seguente Sezione 8.4. Nel caso di Scirocco (Figura II.20) le onde in presenza del parco si riducono nella zona in prossimità del dominio lato Nord-Ovest fino ad un massimo di 0.18 m, ovvero fino al 3% di H_s , per poi ricrescere alla stessa altezza del caso senza parco a circa 30 km dal dominio lato Nord.

Per quanto concerne la direzione, si riscontrano differenze irrisorie ($<2^\circ$) sia nel caso di Bora sia nel caso di Scirocco, in presenza ed assenza del parco (Figure II.19, II.21).

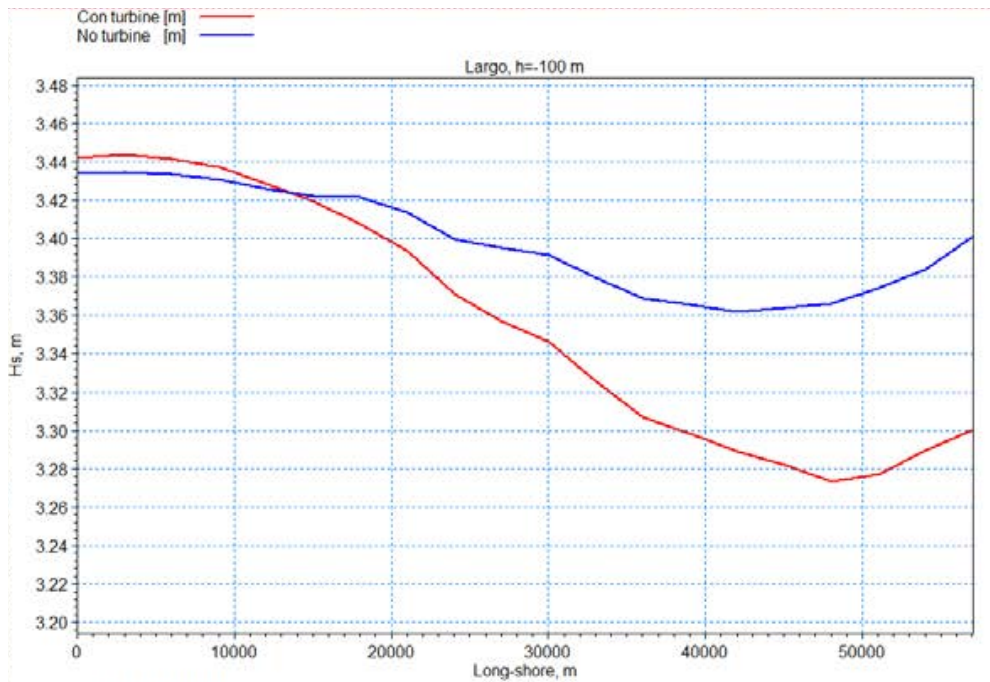


Figura II. 18 Stato ondoso WS8, differenza di altezza ondosa significativa H_s lungo costa, fondale $h=-100$ m dinanzi al parco eolico, nel caso di assenza del parco (No Turbine) e in presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$).

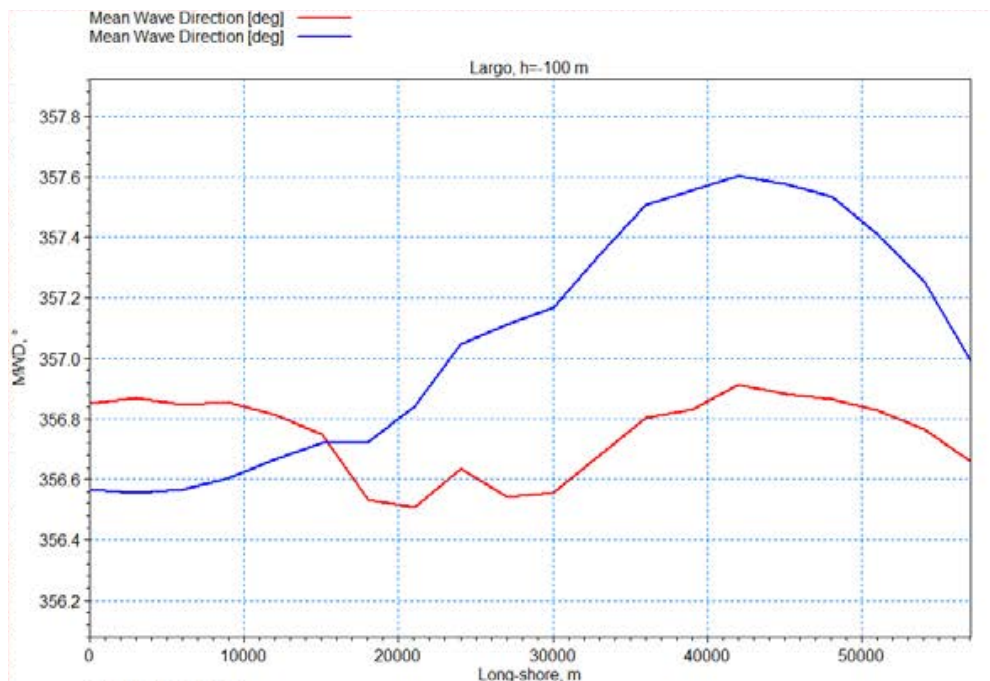


Figura II. 19 Stato ondoso WS8, differenza di direzione media MWD lungo costa, fondale $h=-100$ m dinanzi al parco eolico, nel caso di assenza del parco (No Turbine) e in presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$).

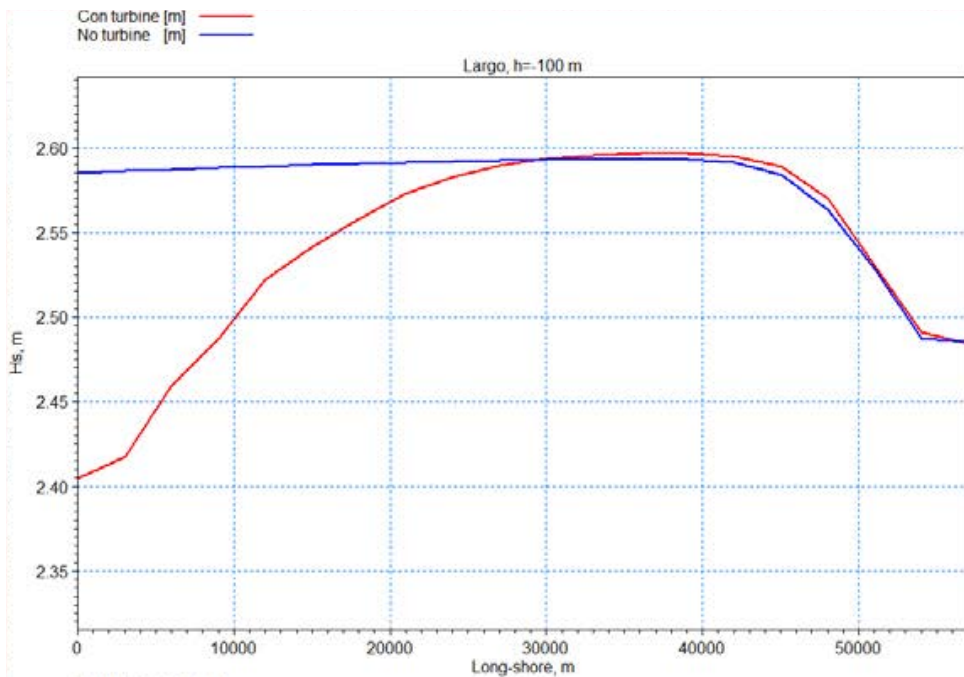


Figura II. 20 Stato ondoso WS18, differenza di altezza ondosa significativa H_s lungo costa, fondale $h=-100$ m dinanzi al parco eolico, nel caso di assenza del parco (No Turbine) e in presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$).

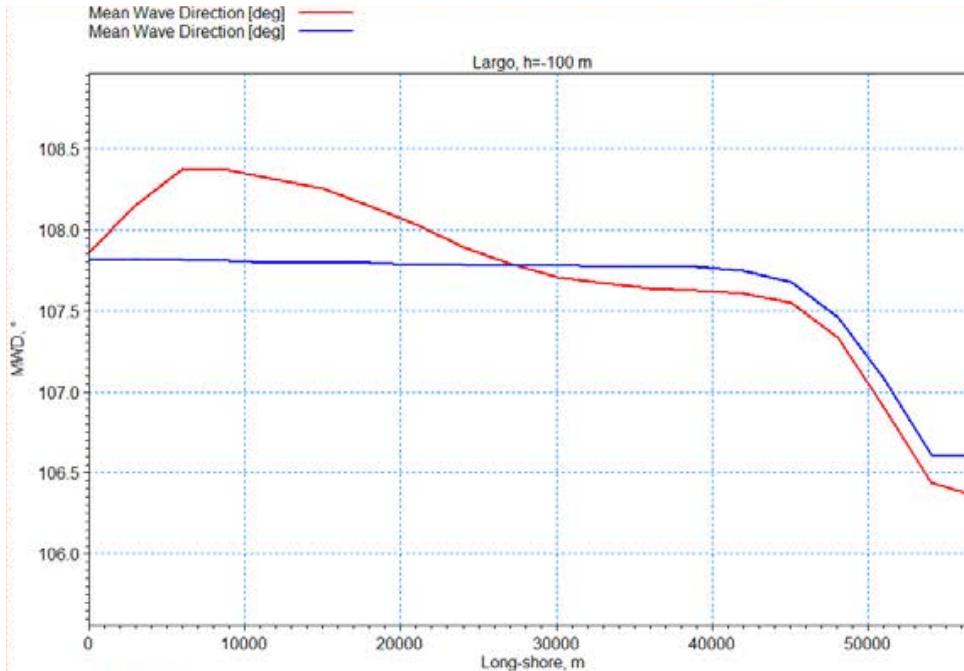


Figura II. 21 Stato ondoso WS18, differenza di direzione media MWD lungo costa, fondale $h=-100$ m dinanzi al parco eolico, nel caso di assenza del parco (No Turbine) e in presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$).

8.4 VARIAZIONE DELLE ALTEZZE E DIREZIONI D'ONDA SOTTO-COSTA

Per ciascuno stato ondoso in Tabella II.6 e per ciascuna configurazione, si sono estratti i valori di altezza d'onda significativa e direzione media in corrispondenza della isobata -20 m per una lunghezza di 55 km complessivi. Tutte le elaborazioni sono riportate nella Appendice II.2.

Si riportano qui due grafici per due casi esemplificativi di Bora e Scirocco, rispettivamente WS8 (Figura II.22 per le altezze d'onda e Figura II.23 per le direzioni) e WS18 (Figura II.24 per le altezze d'onda e Figura II.25 per le direzioni). Le Figure contengono il confronto tra l'assenza del parco (No Turbine), la presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$). Entrambi gli stati ondosi WS8 e WS18 sono caratterizzati dalla stessa altezza d'onda significativa al largo ($H_s=3.75$ m).

Sia nel caso di Bora sia nel caso di Scirocco le altezze d'onda e le direzioni seguono in presenza di turbine lo stesso andamento che si ha attualmente senza le turbine. Per quanto concerne le altezze, si osservano degli incrementi molto modesti dei valori in presenza delle turbine (<2 cm, $<1\%$ di H_s incidente). Le direzioni tendono a crescere, seppure in modo estremamente modesto, sia per Bora sia per Scirocco ($<3^\circ$).

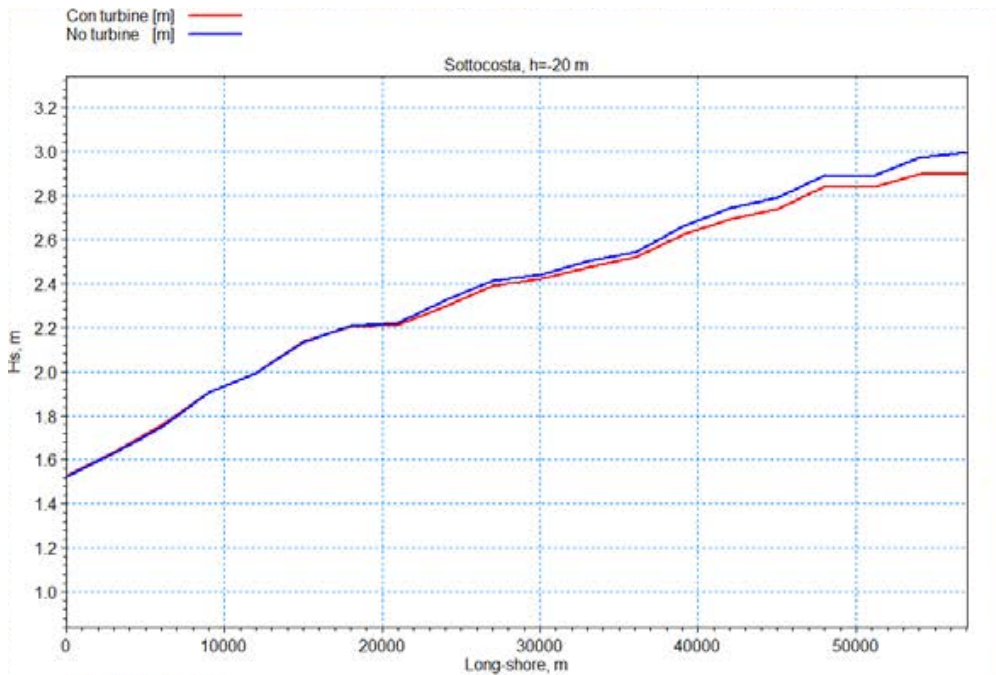


Figura II.22 Stato ondoso WS8, differenza di altezza ondosa significativa H_s lungo costa, fondale $h=-20$ m dinanzi al parco eolico, nel caso di assenza del parco (No Turbine) e in presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$).

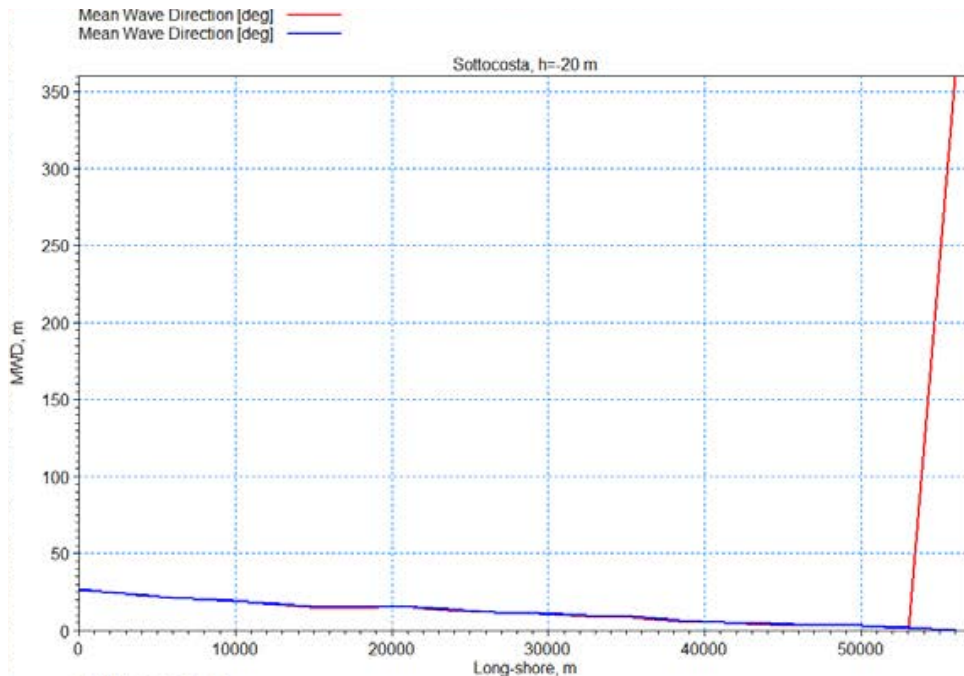


Figura II.23 Stato ondoso WS8, differenza di direzione media MWD lungo costa, fondale $h=-200$ m dinanzi al parco eolico, nel caso di assenza del parco (No Turbine) e in presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$).

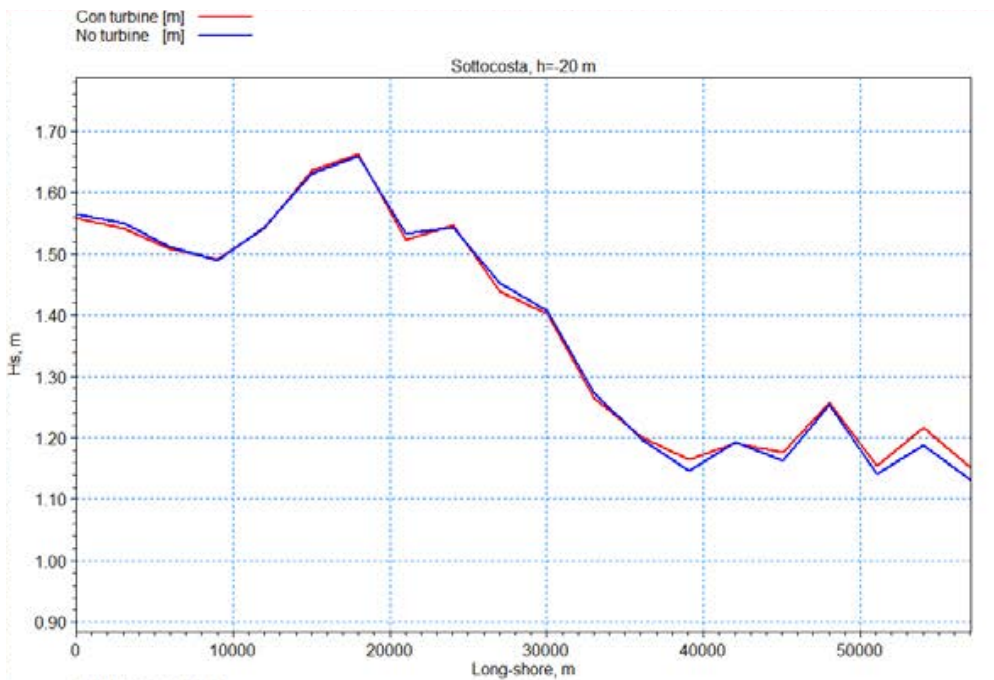


Figura II.24 Stato ondoso WS18, differenza di altezza ondosa significativa H_s lungo costa, fondale $h=-200$ m dinanzi al parco eolico, nel caso di assenza del parco (No Turbine) e in presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$).

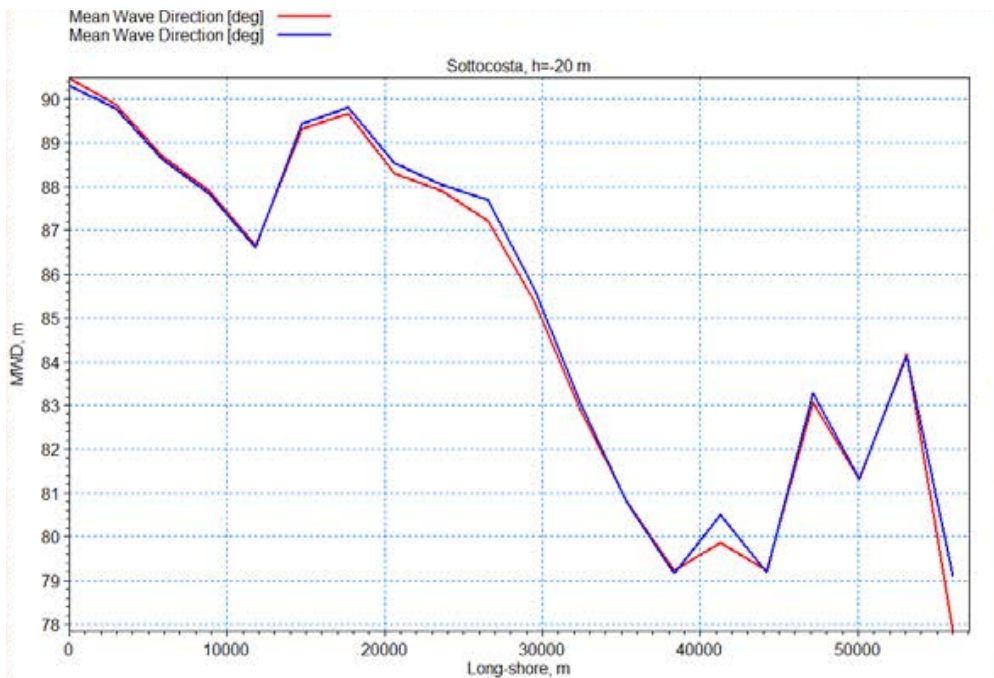


Figura II.25 Stato ondoso WS18, differenza di direzione media MWD lungo costa, fondale $h=-100$ m dinanzi al parco eolico, nel caso di assenza del parco (No Turbine) e in presenza del parco parzialmente riflettente ($R=50\%$).

8.5 CONCLUSIONI

La modellazione numerica con SW ha consentito di mappare le altezze d'onda significative e le direzioni medie in tutta la zona di studio, per la situazione attuale e per il caso di turbine con pile parzialmente riflettenti $R=50\%$. Si sono confrontate le mappe delle differenze tra il campo ondoso in presenza ed in assenza delle turbine, nonché estratte le condizioni ondose in corrispondenza di due isobate significative, al largo e sotto-costa, per una verifica puntuale dello scostamento quantitativo tra la situazione attuale e la situazione col parco eolico.

La presenza del parco eolico non impatta sul moto ondoso in modo significativo, ad eccezione delle zone immediatamente prossime alle pile. Nello specifico, si verifica un incremento dell'altezza d'onda significativa del 10-15% di Hs nella zona immediatamente antistante le pile, dovuta al fenomeno della riflessione, mentre, nell'area retrostante alla pila, si verifica una riduzione dell'altezza d'onda significativa del 15-30% di Hs.

L'effetto della presenza del parco eolico sul campo ondoso a larga scala è modesto sia per onde di Bora sia di Scirocco. Si traduce, infatti, in una riduzione delle altezze d'onda significativa Hs in scia al parco dell'ordine del 10-15% di Hs. Nel caso di onde di Bora, la scia si propaga da largo verso riva, interessando la zona a Sud dell'area di studio, da Molfetta a Mola di Bari. Nel caso di onde di Scirocco, la scia si propaga da largo a riva, interessando il lato Sud-Est del promontorio del Gargano. La riduzione di Hs sottocosta può comportare una modesta riduzione della energia ondosa incidente il litorale nella zona Sud dell'area di studio, con conseguente vantaggio per la protezione dello stesso. La mappa delle differenze del campo ondoso per il clima tipico annuale dimostra che le variazioni di altezza d'onda significativa attese sono dell'ordine al massimo di ± 0.05 m.

In prossimità della costa, le altezze e direzioni d'onda non sono impattate in modo significativo dalla presenza del parco eolico, con un aumento o una riduzione massimi locali dei valori di altezza d'onda rispettivamente del 2% e del 5% di Hs. L'incremento delle direzioni di pochi gradi ($<5^\circ N$) sia per Bora sia per Scirocco non determina affetti apprezzabili sul trasporto litoraneo.

9. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SULL'IMPATTO AMBIENTALE DEL PARCO EOLICO BASATE SULLA MODELLAZIONE NUMERICA

L'analisi di impatto ambientale in questo studio si basa sulla modellazione numerica della idrodinamica indotta dalla presenza del parco eolico e della sospensione del sedimento dovuta ai lavori di scavo per la posa del cavidotto.

L'analisi degli effetti dello scavo si è proposta di valutare l'entità del materiale in sospensione, la estensione del pennacchio, il possibile superamento delle condizioni di acque limpide e la relativa durata di tale superamento.

L'analisi degli effetti sul campo ondoso si è proposta di quantificare le variazioni di altezza e direzione delle onde in presenza del parco eolico al largo, per valutare gli effetti locali per le rotte marittime e gli usi dello spazio marino, e sotto-costa, per valutare gli effetti a larga scala per il trasporto litoraneo.

9.1 EFFETTI DEL PARCO EOLICO SULLA TORBIDITA' DELL'ACQUA

Si sono modellate numericamente tutte le possibili combinazioni di correnti, temperatura e salinità in cui potesse realizzarsi l'operazione di scavo, realizzando la modellazione tridimensionale della circolazione con MIKE 3 HD per un intero anno rappresentativo del clima tipico. I campi di intensità delle correnti sono risultati in buon accordo con le rose delle correnti di superficie ed al fondo elaborate sulla base dei dati CMEMS.

I campi tridimensionali di corrente, temperatura e salinità sono stati utilizzati in ingresso alla modellazione tridimensionale della sospensione dei sedimenti coesivi con MIKE 3 MT. Tale modellazione ha utilizzato l'approccio "a finestre mobili" considerando un intervallo temporale fisso in cui realizzare le operazioni di scavo (di circa 4.8 giorni considerando una draga a velocità 500 m/h che lavori h24) e in cui attendere la dispersione e sedimentazione del pennacchio, per una durata complessiva della finestra mobile di 10 giorni. Si sono quindi simulate 37 finestre mobili mediante altrettanti modelli MIKE 3 MT, per ottenere tutte le possibili sospensioni, dispersioni e sedimentazioni dovute allo scavo in qualunque momento dell'anno si iniziassero le operazioni. I risultati sono stati quindi elaborati statisticamente al fine di determinare la i valori medi della massima concentrazione del sedimento sospeso, predisponendo nello specifico

- mappe spaziali delle concentrazioni del sedimento sospeso al fondo, per valutare l'estensione spaziale del pennacchio anche in relazione alla stagionalità,
- profili verticali lungo l'asse della trincea per valutare gli strati del fondale interessati dalla sospensione e la dipendenza dalla stagionalità,
- mappa della durata delle condizioni di superamento del valore di soglia per acque limpide, pari a 2mg/l,
- mappa del deposito di sedimento alla fine della finestra mobile.

La sospensione del materiale resta confinata, in riferimento ai valori medi annuali delle concentrazioni massime, in un'area estesa circa 35 km complessivi nella direzione principale di propagazione della corrente Nord-Ovest Sud-Est nel tratto dello scavo verso largo, con distribuzione asimmetrica del pennacchio rispetto all'asse dello scavo. Nel tratto dello scavo lungo il parco, la estensione del pennacchio attorno all'asse della trincea non supera i 12 km e si propaga per circa 18 km oltre la Sottostazione 2. Durante le stagioni primaverile ed autunnale, grazie alla forte stratificazione della colonna d'acqua che fornisce un effetto di

confinamento ai sedimenti, si osserva che il pennacchio è decisamente più esteso lato Sud-Est della trincea ed anche caratterizzato da una maggiore distribuzione lungo la colonna d'acqua rispetto alle stagioni estiva ed invernale.

La sospensione interessa gli strati più profondi (raggiungendo i valori massimi soltanto nei primi tre strati dal fondo) e dà luogo ad un deposito non apprezzabile e confinato nella zona adiacente la trincea. La persistenza delle acque torbide è maggiore nel tratto di scavo da costa a largo, in particolare per fondali inferiori a $h=80$ m. In questo tratto, localmente alla trincea si verificano persistenze di 24-36 ore mentre la persistenza si mantiene inferiore a 24 ore già a una distanza di circa 3 km dall'asse dello scavo. Nel tratto di scavo da costa a largo per fondali superiori a $h=80$ m e ancora di più nel tratto di scavo lungo il parco la persistenza solo localmente arriva alle 20 ore, mantenendosi per la maggior parte nelle 12 ore. Si nota un forte effetto stagionale, con valori minimi e massimi delle mappe della persistenza, sia in termini di estensione spaziale sia in termini di ore, rispettivamente in Inverno ed in Estate. Complessivamente la stagione invernale risulta quella in cui il pennacchio resta maggiormente confinato, la sospensione lungo la colonna d'acqua è inferiore e la persistenza anche è inferiore; tuttavia le condizioni ondose della stagione invernale possono non dare luogo ad una finestra temporale continua di buon tempo per svolgere i lavori di scavo.

9.2 EFFETTI DEL PARCO EOLICO SUL MOTO ONDOSO: USI DELLO SPAZIO MARINO AL LARGO E DINAMICA DEL LITORALE

Si è effettuata la modellazione bidimensionale con MIKE21 SW di 20 condizioni ondose, rappresentative del clima tipico. La presenza del parco eolico è stata rappresentata considerando le basi delle turbine eoliche come cilindri fissi al fondale caratterizzati da uno specifico valore della riflettività R , cautelativa rispetto alla base cilindrica galleggiante, $R=50\%$, superiore a quella tipicamente misurata in letteratura per dispositivi galleggianti per la conversione di energia. La modellazione è stata effettuata per due configurazioni: situazione attuale e presenza di turbine con pile parzialmente riflettenti $R=50\%$.

La modellazione ha consentito di quantificare il campo d'onda in termini di altezza d'onda significativa e direzione media, ottenendo ed elaborando i seguenti risultati

- mappe di altezza significativa e direzione in assenza e in presenza del parco eolico,
- mappe delle differenze tra il campo ondoso in presenza ed in assenza delle turbine,
- estrazione dei valori dell'altezza d'onda significativa e della direzione media in corrispondenza di due isobate significative, al largo e sotto-costa, per una verifica puntuale dello scostamento quantitativo tra la situazione attuale e la situazione col parco eolico.

La presenza del parco eolico comporta una variazione locale del moto ondoso nella zona prossima alle pile. Sia per onde di Bora sia per onde di Scirocco, si verifica l'atteso incremento dell'altezza d'onda a monte delle pile, causato dal processo di riflessione ondosa, mentre a tergo delle pile l'altezza d'onda si riduce. All'interno del parco stesso la interazione tra le scie delle singole pile determina una riduzione modesta e diffusa del moto ondoso (circa 5% di H_s) che non solo non comporta rischi per il traffico marittimo o per altri usi dello spazio marino, suggerisce viceversa la possibilità di co-locazione di un impianto di acquacultura.

L'effetto del parco eolico a larga scala è modesto e si traduce in una riduzione del 10-15% della altezza d'onda H_s in scia al parco. Nel caso di onde di Bora, la scia del parco si propaga da largo verso riva interessando la zona a Sud dell'area di studio, mentre nel caso di onde di Scirocco, la scia del parco eolico si propaga a Nord-

Ovest verso il promontorio del Gargano.

In prossimità della costa, la presenza del parco produce localmente una riduzione oppure un aumento molto limitati dei valori di altezza d'onda (dell'ordine del 5% di Hs) ed una variazione irrisoria delle direzioni medie di pochi gradi ($<5^\circ\text{N}$). Queste minime variazioni non determinano effetti apprezzabili sul trasporto litoraneo.

10. BIBLIOGRAFIA

- Becker, J., E. van Eekelen, J. van Wiechen, W. de Lange, T. Damsma, T. Smolders and M. van Koningsveld, 2015. Estimating source terms for far field dredge plume modelling, *Journal of Environmental Management*, vol. 149, 282-293.
- CMEMS - Copernicus Marine Environment Monitoring Service, 2021, Quality Identification Document (QUID) - Global Ocean Physics Reanalysis," Global High Resolution Production Centre, 29 04 2021. <https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-030.pdf>.
- DHI, 2022. MIKE 3 Flow Model HD FM, Hydrodynamics Flexible Mesh, Scientific Documentation, MIKE by DHI, Hørsholm, 2022.
- Escudier, R., Clementi, E., Omar, M., Cipollone, A., Pistoia, J., Aydogdu, A., Drudi, M., Grandi, A., Lyubartsev, V., Lecci, R., Cretí, S., Masina, S., Coppini, G., & Pinardi, N. (2020). Mediterranean Sea Physical Reanalysis (CMEMS MED-Currents) (Version 1) set. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004_E3R1
- Feola, A., I. Lisi, A. Salmeri, F. Venti, A. Pedroncini, M. Gabellini & E. Romano, 2016, Platform of integrated tools to support environmental studies and management of dredging activities, *Journal of Environmental Management*, vol. 166, 357-373.
- Gooding, S., Black, K., Boyde, P. e S. Boyes. 2012. Environmental impact of subsea trenching operations. *Offshore Site Investigation and Geotechnics: Integrated Technologies - Present and Future*, London, UK, September 2012.
- John, S. A., S. Challinor, M. Simpson, T. N. Burt and J. Spearman, 2000. Scoping the assessment of sediment plumes from dredging, CIRIA, 2000.
- Madec, G., 2008. NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) ocean engine, *Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)*, vol. 27 ISSN, 1288-1619.
- Saha, S. 2011. Updated monthly. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6N877VB>.
- Saha, S., et al., 2010. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6513W89>.
- Teeter, A.M. 1986. Vertical Transport in Fine-Grained Suspension and Newly-Deposited Sediment. In: Mehta, A.J. (eds) *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*, vol 14. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4936-8_9
- Yongcun C. e O. Baltazar Andersen, 2010. Improvement in global ocean tide model in shallow water regions, in *Poster, SV.1-68 45, OSTST, Lisbon, Oct.18-22, 2010*.
- Zanuttigh, B. & E. Angelelli, 2013. Experimental investigation of wave energy converters for coastal protection purpose, *Coastal Engineering*, 80, 148-159, Elsevier.

11. APPENDICE I

11.1 EVOLUZIONE DELLA DISPERSIONE DEI SEDIMENTI IN UNA FINESTRA MOBILE DI MODELLAZIONE CON MIKE 3 MT

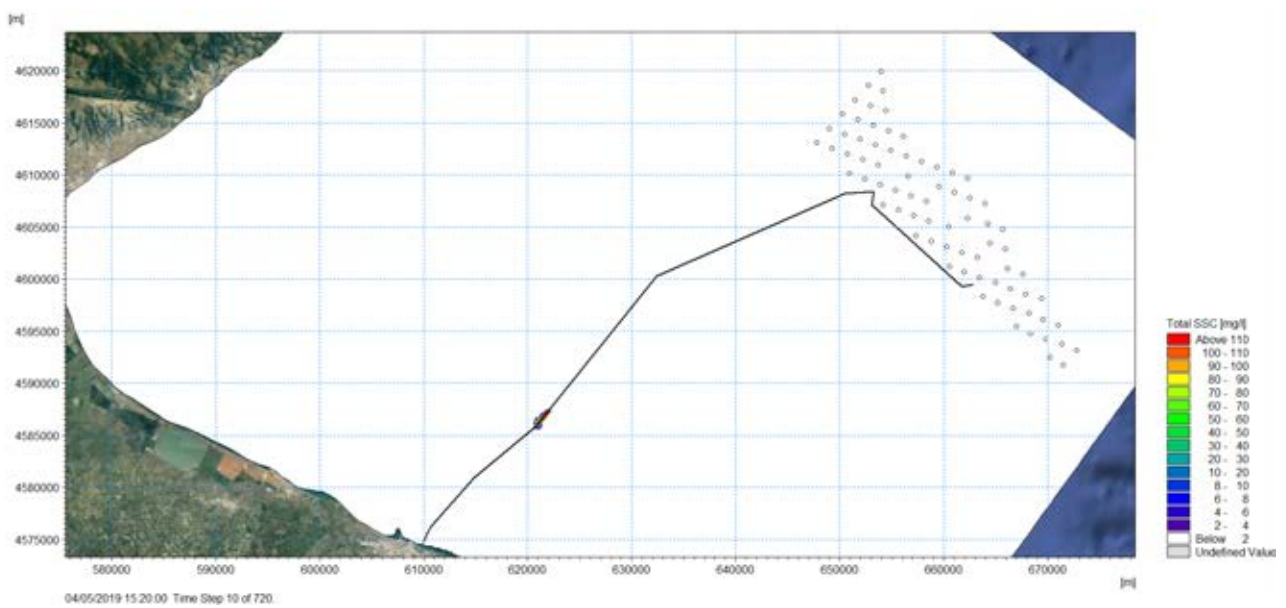
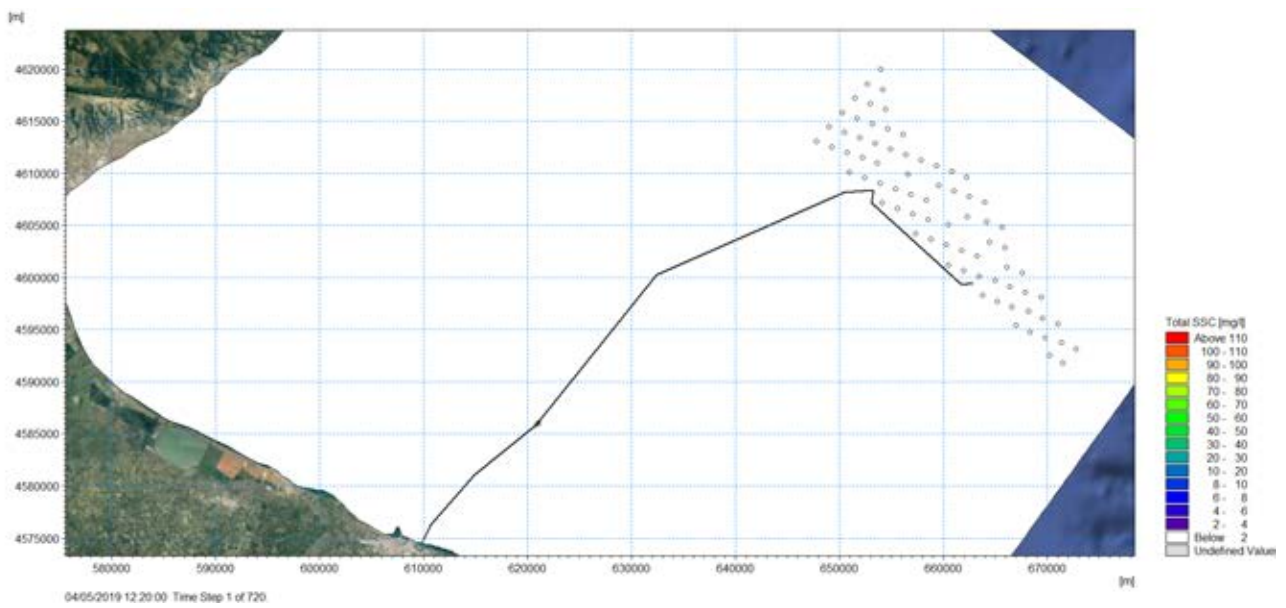
I grafici in questa sezione mostrano la dispersione del sedimento totale movimentato per una finestra mobile esemplificativa di ciascuna delle 37 simulazioni con MT. Ogni finestra mobile copre un periodo di 10 giorni, di cui 110 ore sono il tempo effettivo dello scavo e il restante tempo è lasciato per osservare la sospensione, dispersione e sedimentazione del materiale. La concentrazione del sedimento è rappresentata in scala di colori. Il passo di calcolo è di 20 minuti per tenere conto della velocità di spostamento della draga e della dimensione della griglia di calcolo.

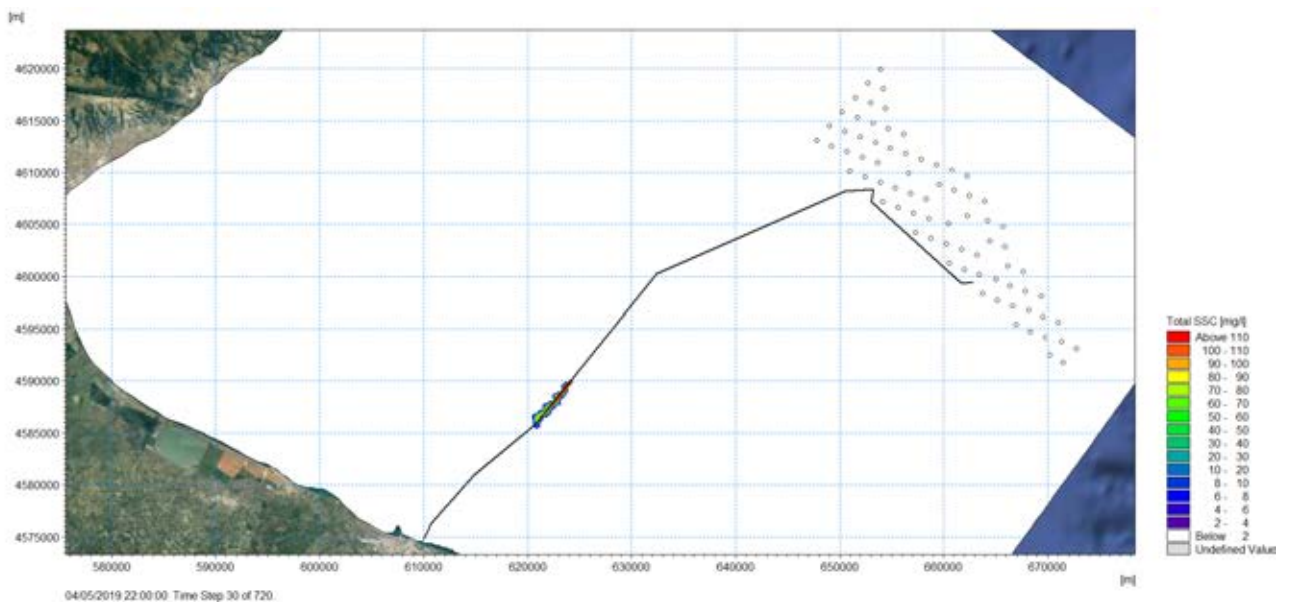
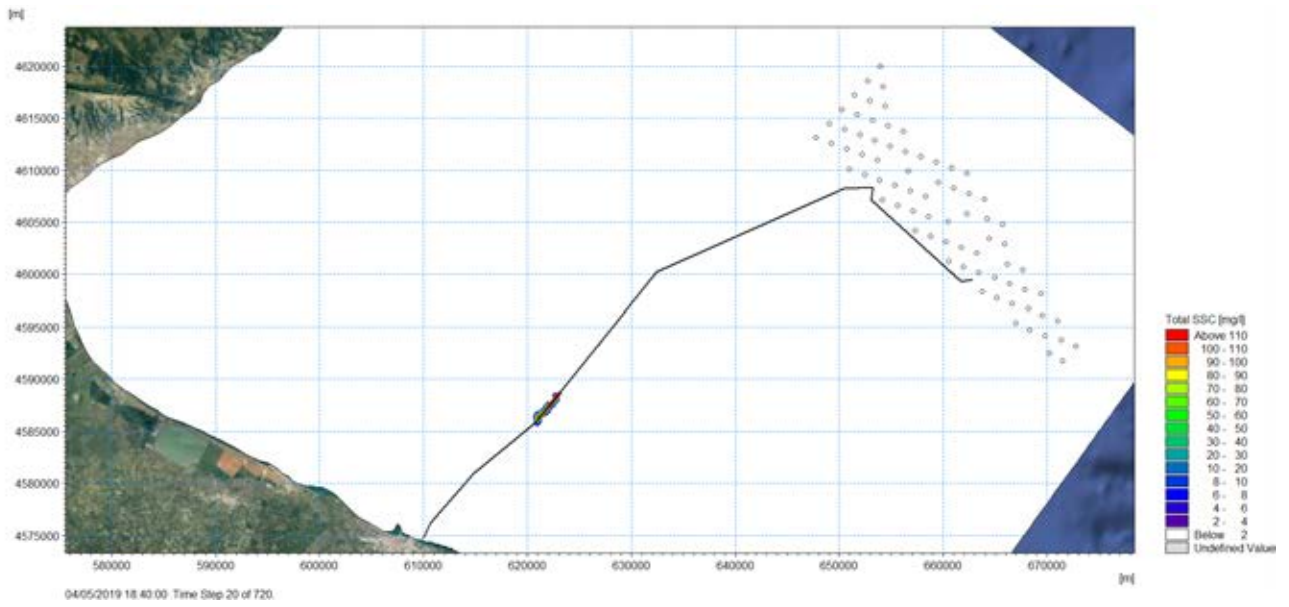
Sono riportati diversi passi temporali, in modo da seguire lo spostamento della draga lungo lo scavo. La draga inizia a scavare al passo temporale (timestep) 1, in questo caso il giorno 04/05/2019 alle 12.20, e termina il giorno 09/05/2019 alle 02.00, corrispondente al timestep 330. Al termine dello scavo, la dispersione continua fino al timestep 620, ovvero circa 96 ore dopo la fine dello scavo.

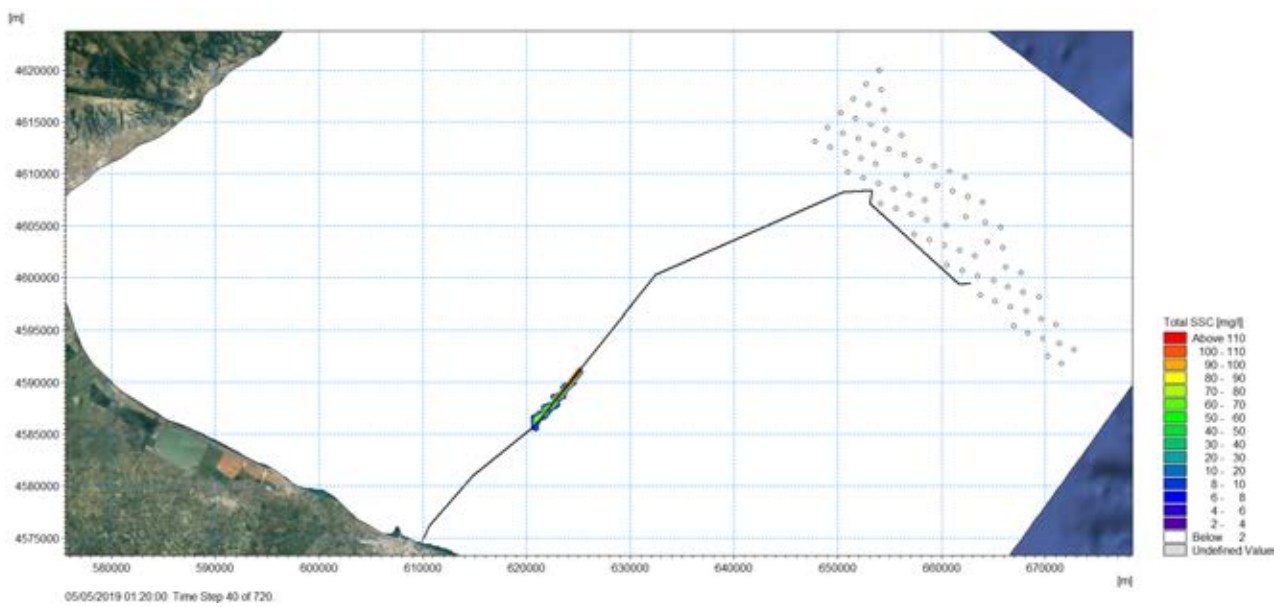
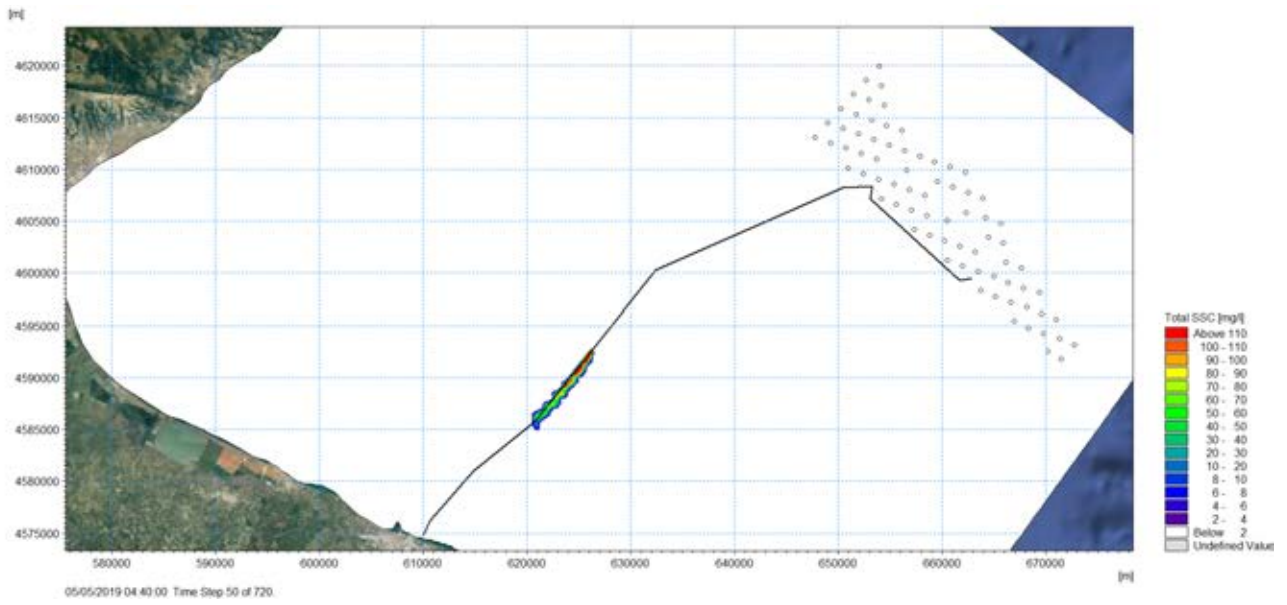
In entrambe le tratte dello scavo, da sottocosta al largo e lungo costa, la sospensione del sedimento è sostanzialmente concentrata nella sezione di scavo, dove raggiunge localmente valori di 110 mg/l. La dispersione del pennacchio è invece caratterizzata da valori più modesti.

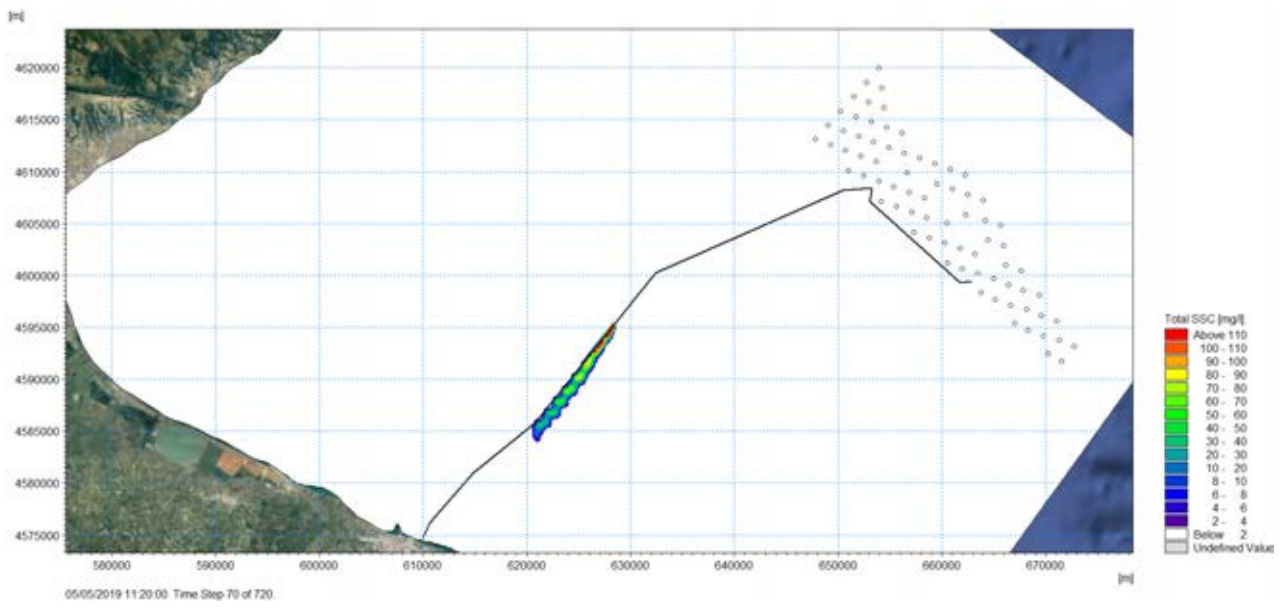
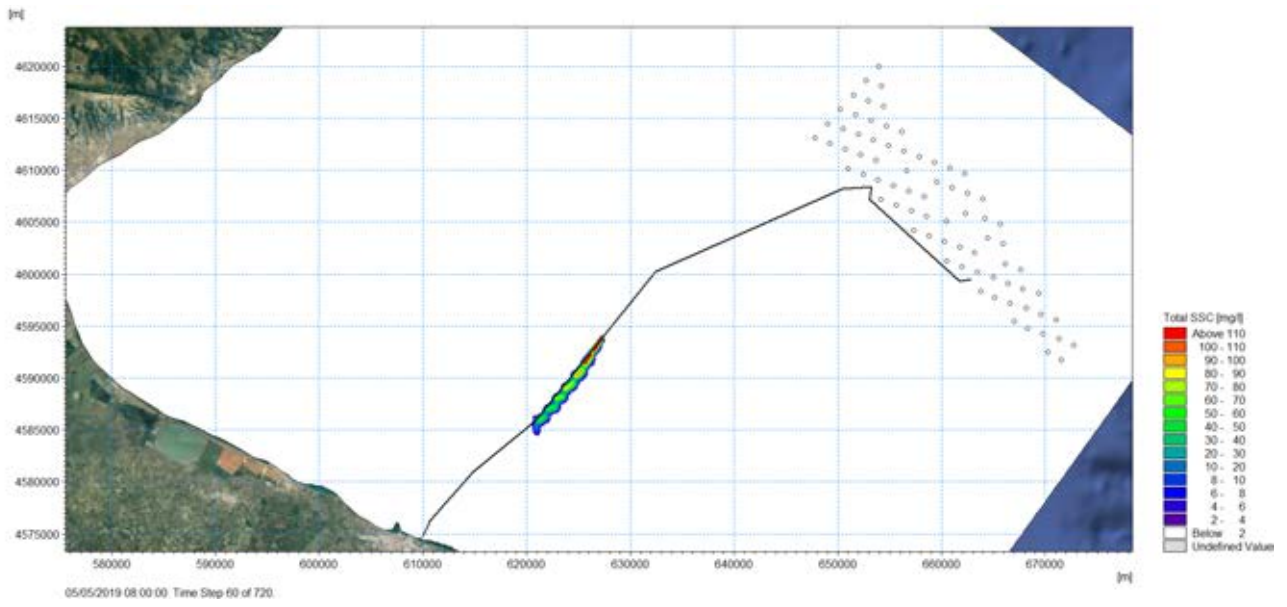
Nello specifico, nello scavo da sottocosta a largo, la dispersione raggiunge concentrazioni locali di 50 mg/l per decadere a 2-4 mg/l sottocosta; il pennacchio ha una larghezza variabile da 500 m al largo a 1500 m sottocosta, con una lunghezza fino a 20 km. Il pennacchio si dispone asimmetricamente rispetto all'asse dello scavo, interessando solo il "lato Sud" e rispecchia anche nella forma la circolazione da Nord verso Sud. Il pennacchio interessa fondali non inferiori a $h=50$ m e si mantiene a concentrazione 2-10 mg/l per fondali non inferiori a $h=100$ m.

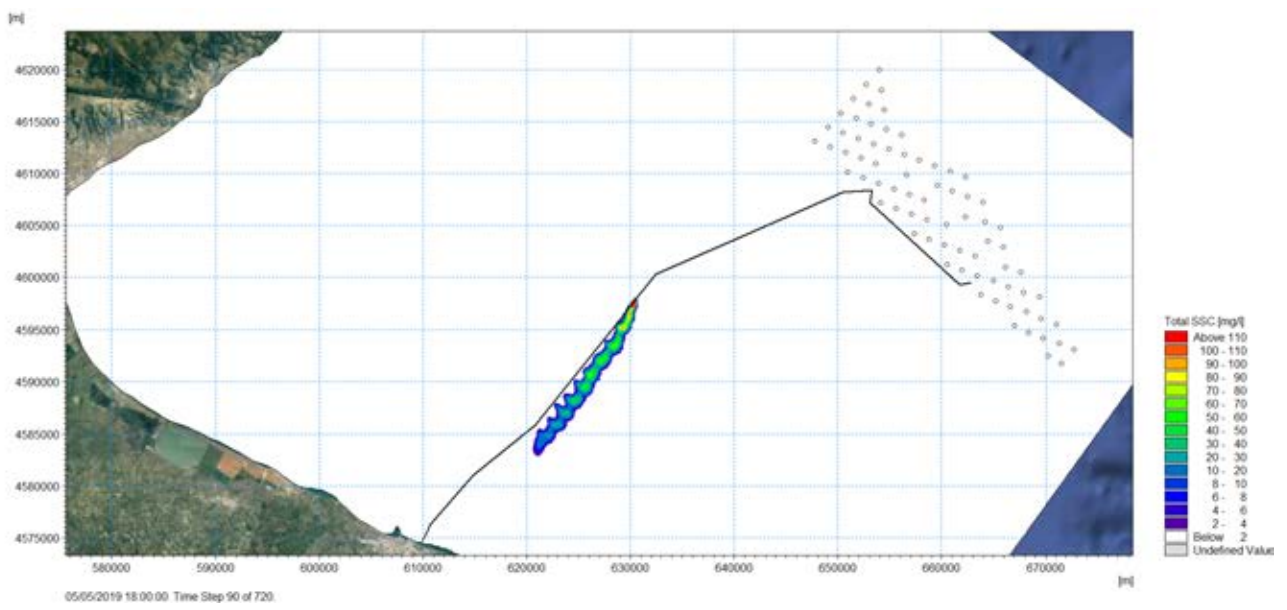
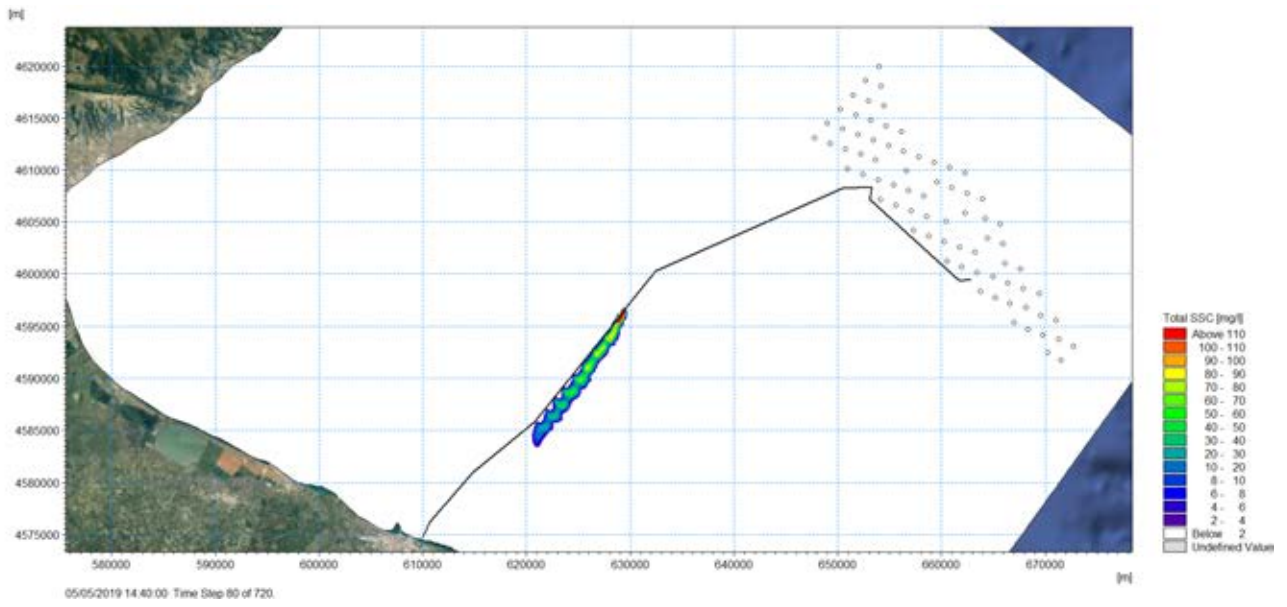
Nello scavo lungo costa, dalla Sottostazione 1 alla Sottostazione 2, il pennacchio diminuisce progressivamente in estensione verso costa, dove la concentrazione assume comunque valori molto bassi 2-6 mg/l. Come nello scavo da costa a largo, il pennacchio non interessa fondali inferiori a $h=50$ m. Nella zona di scavo, la concentrazione raggiunge anche in questo caso valori massimi locali di 110 mg/l. Al termine dello scavo, il pennacchio migra lungo il parco in direzione Sud, mantenendosi sempre "lato costa" rispetto alla trincea, per poi disperdersi uscendo dal dominio di calcolo con concentrazioni esigue, 2-6 mg/l.

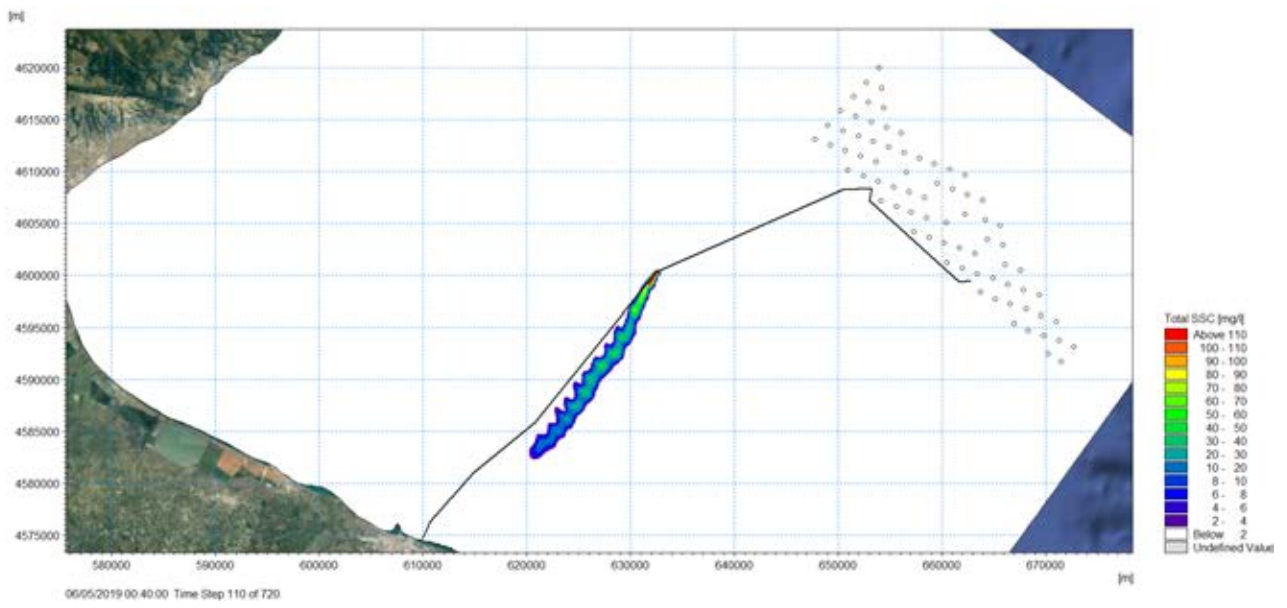
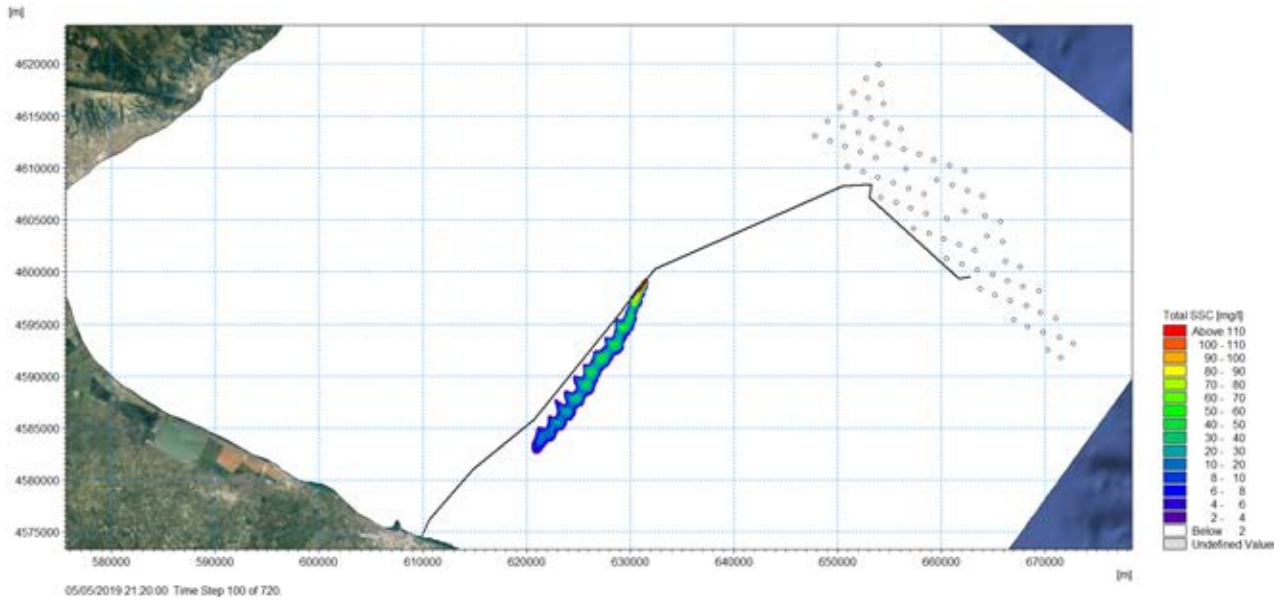


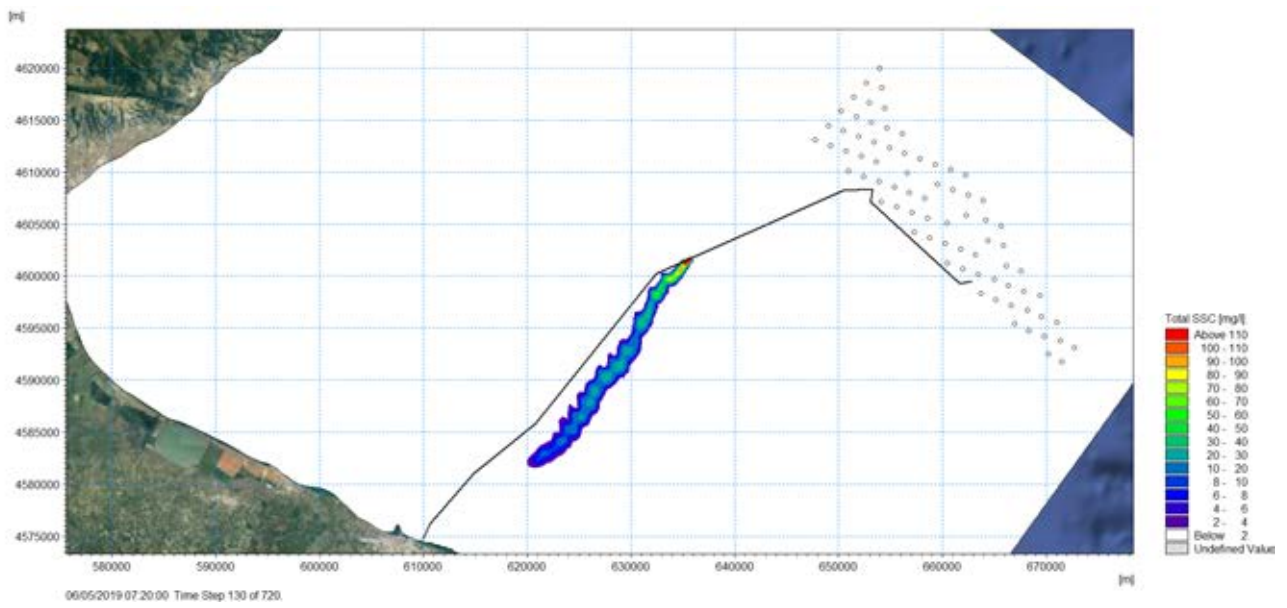
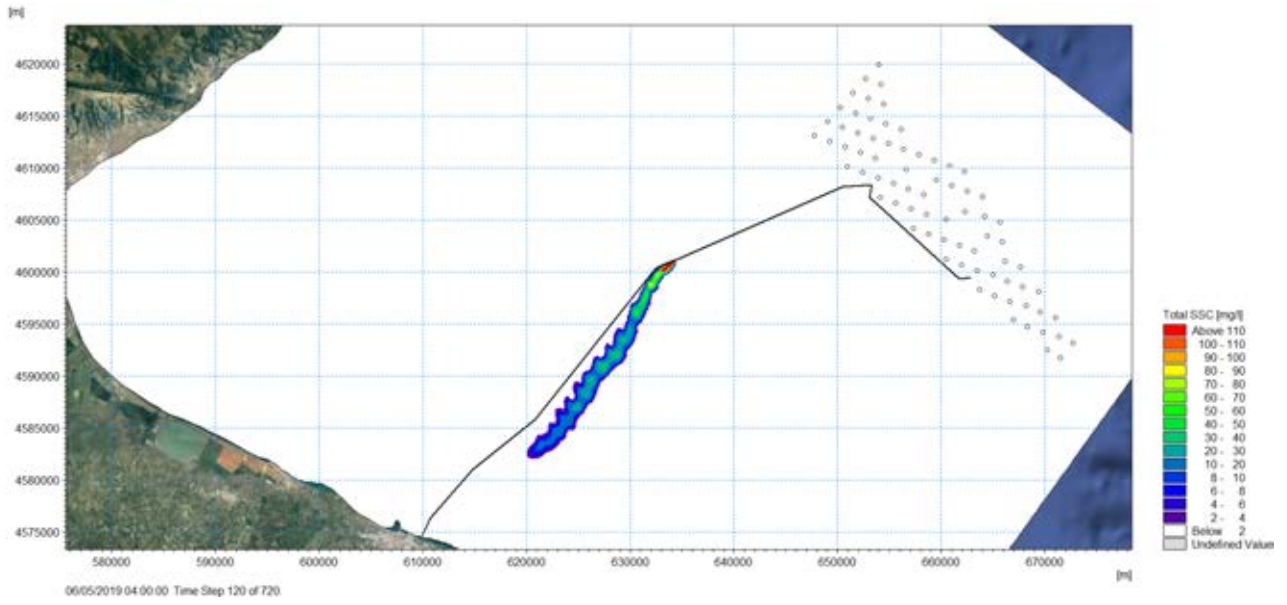


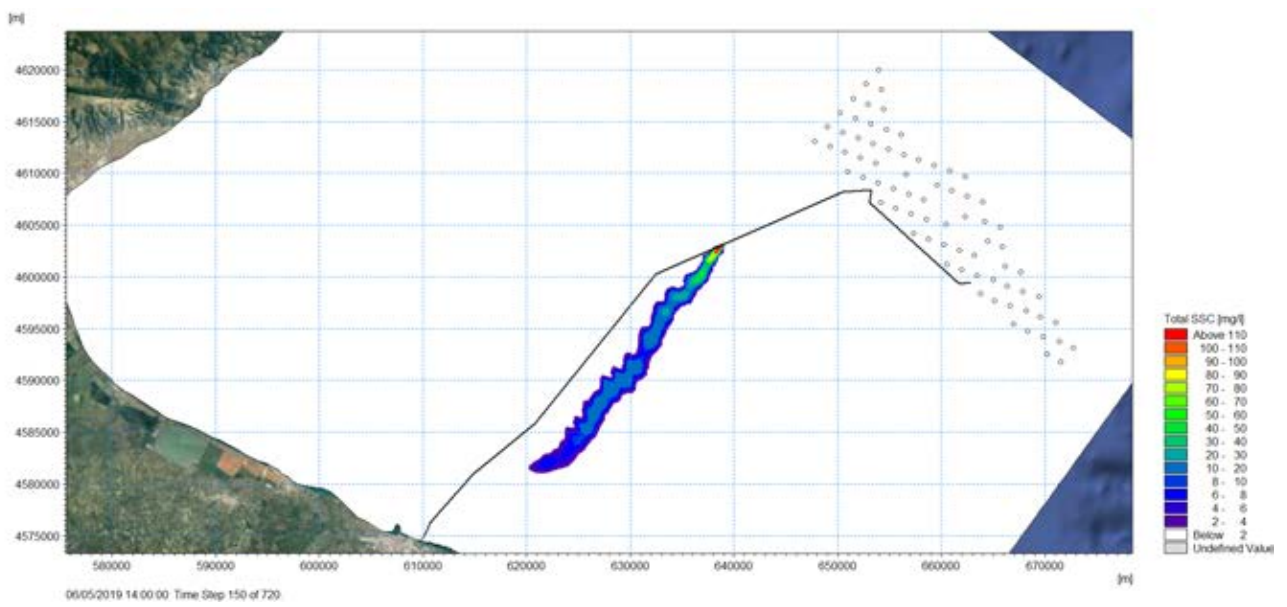
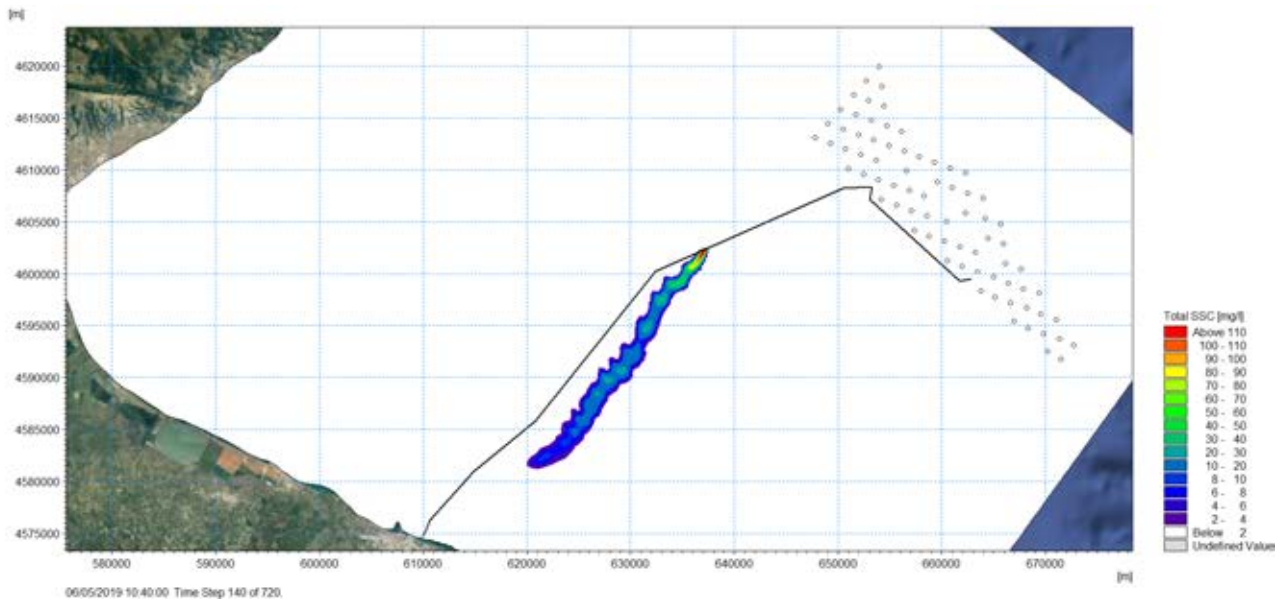


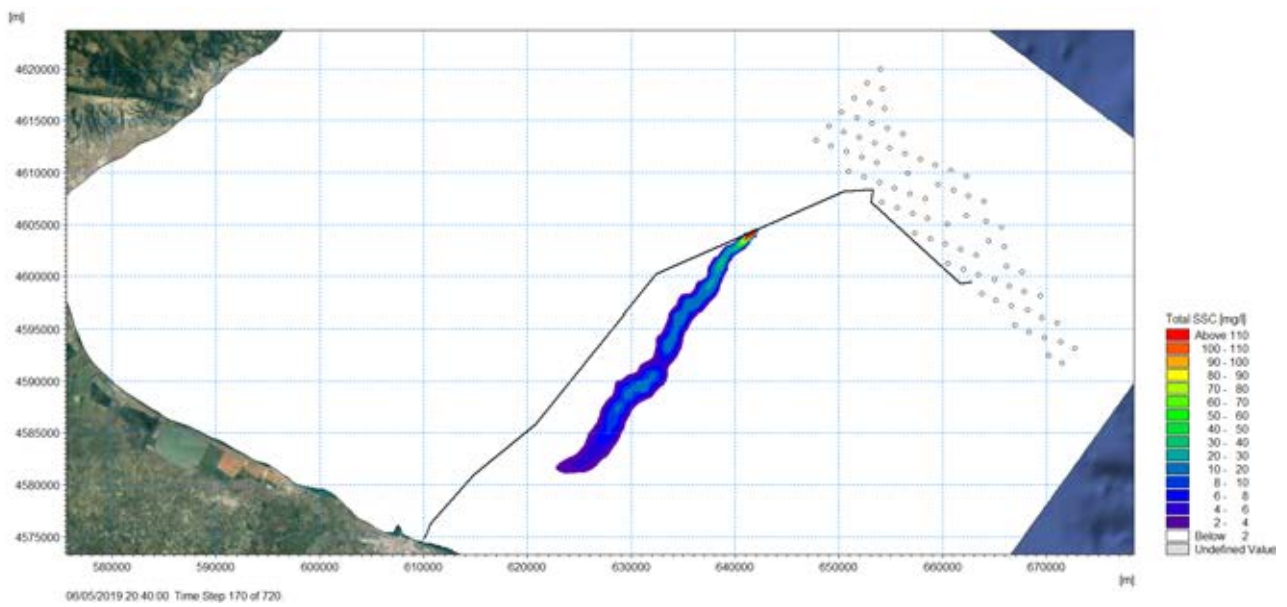
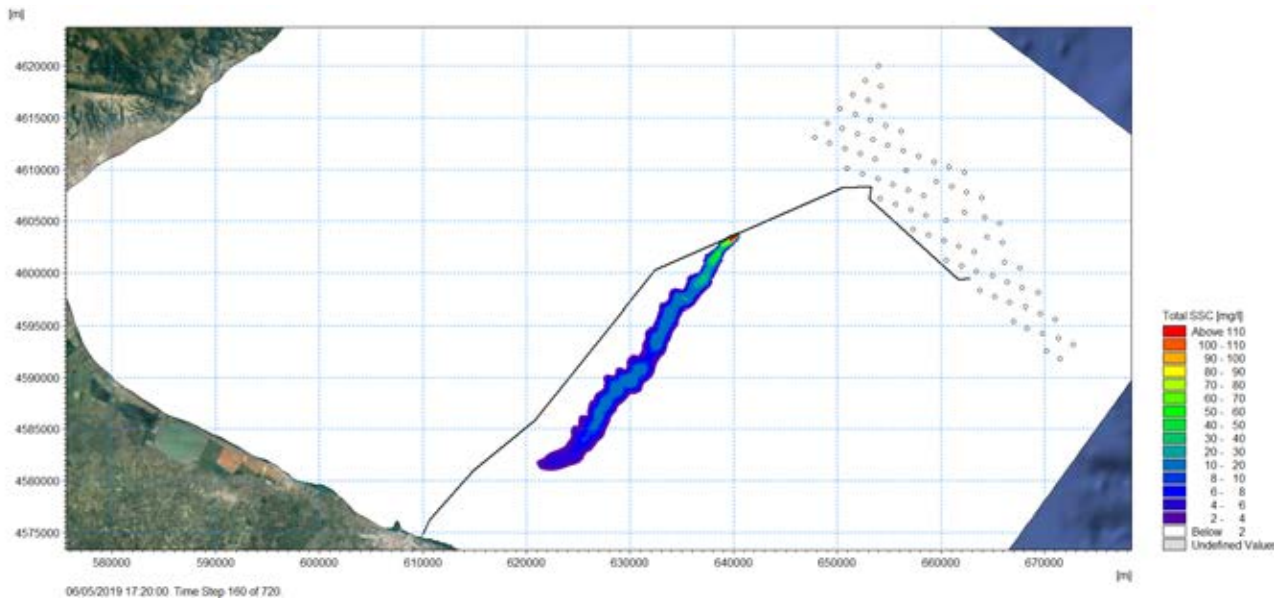


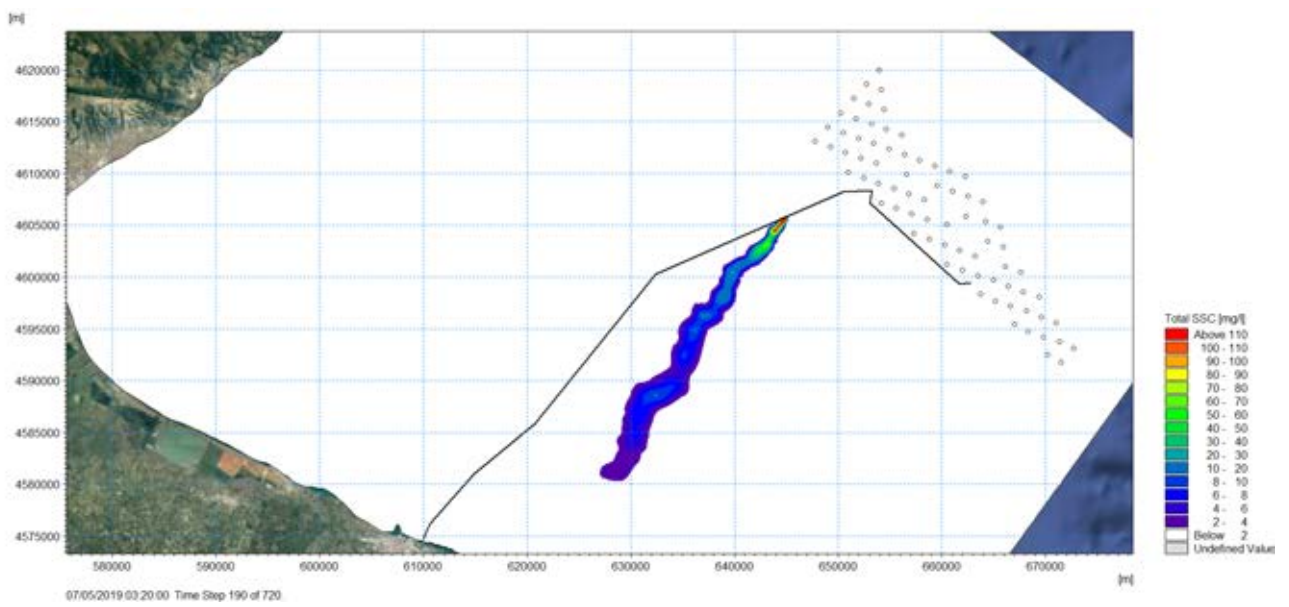
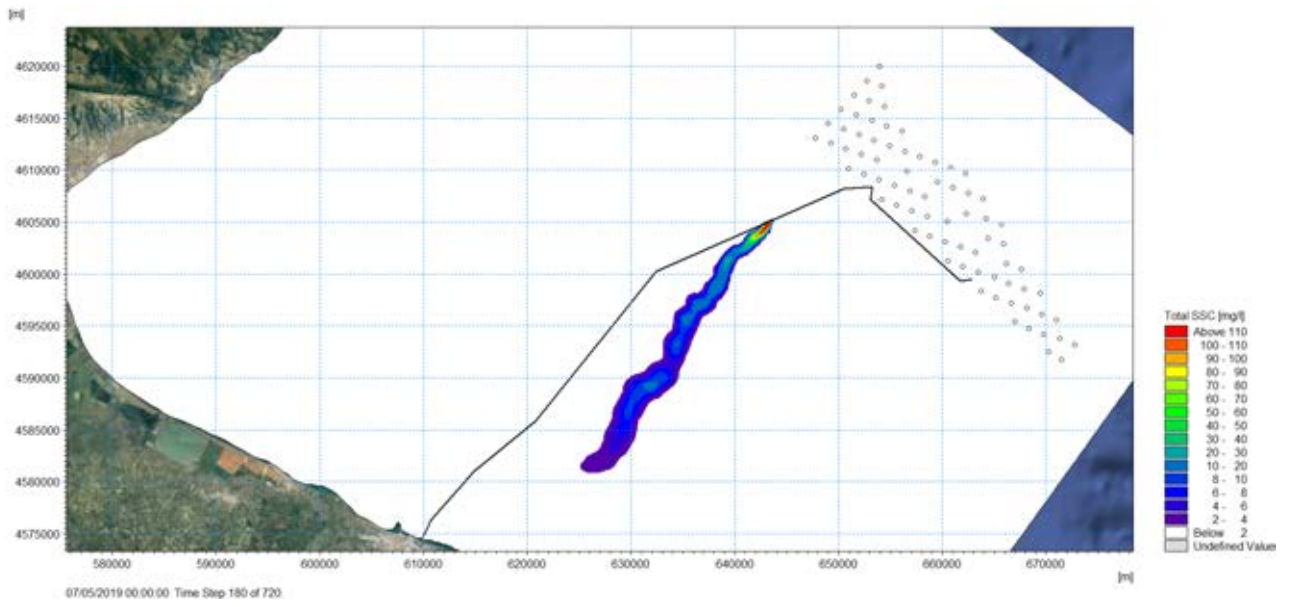


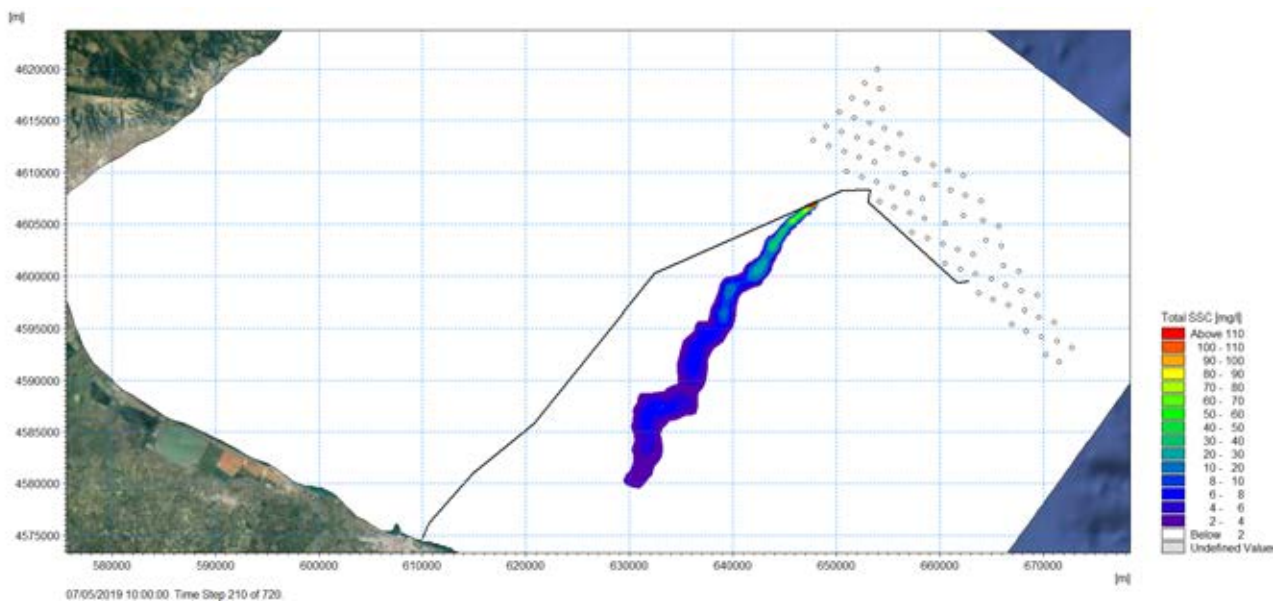
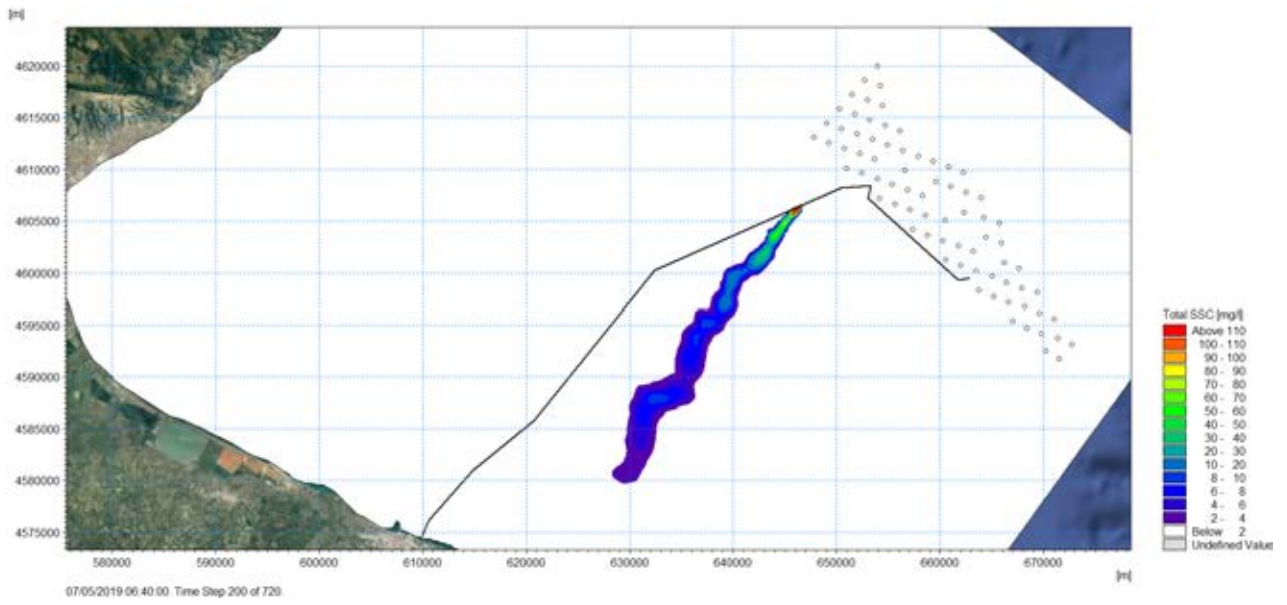


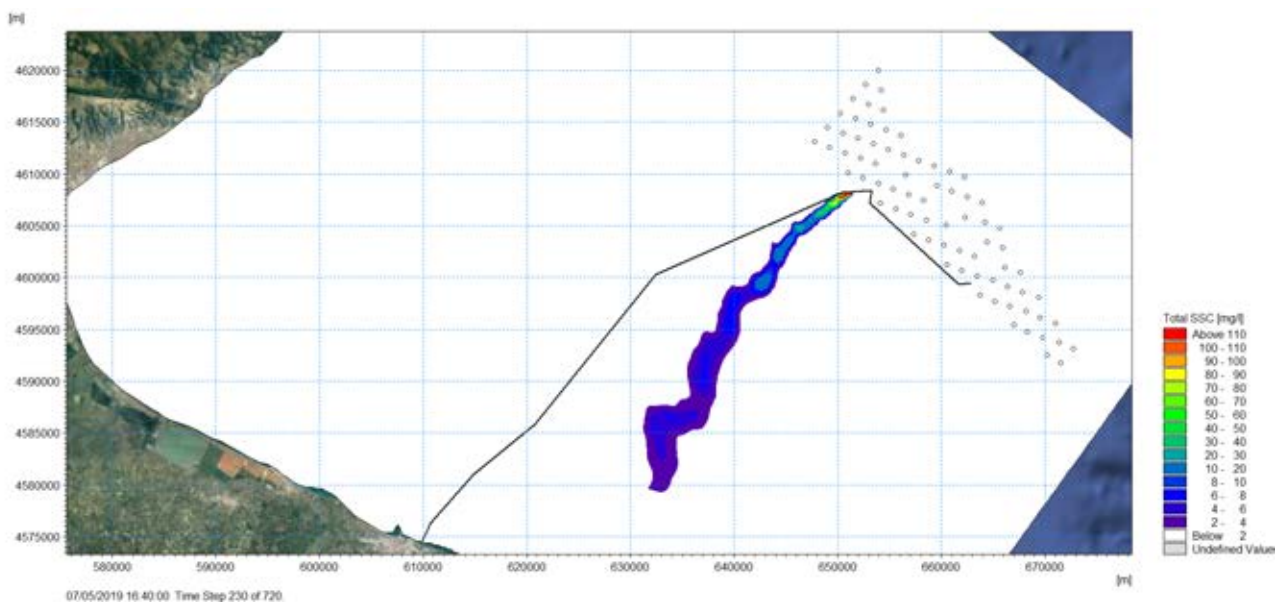
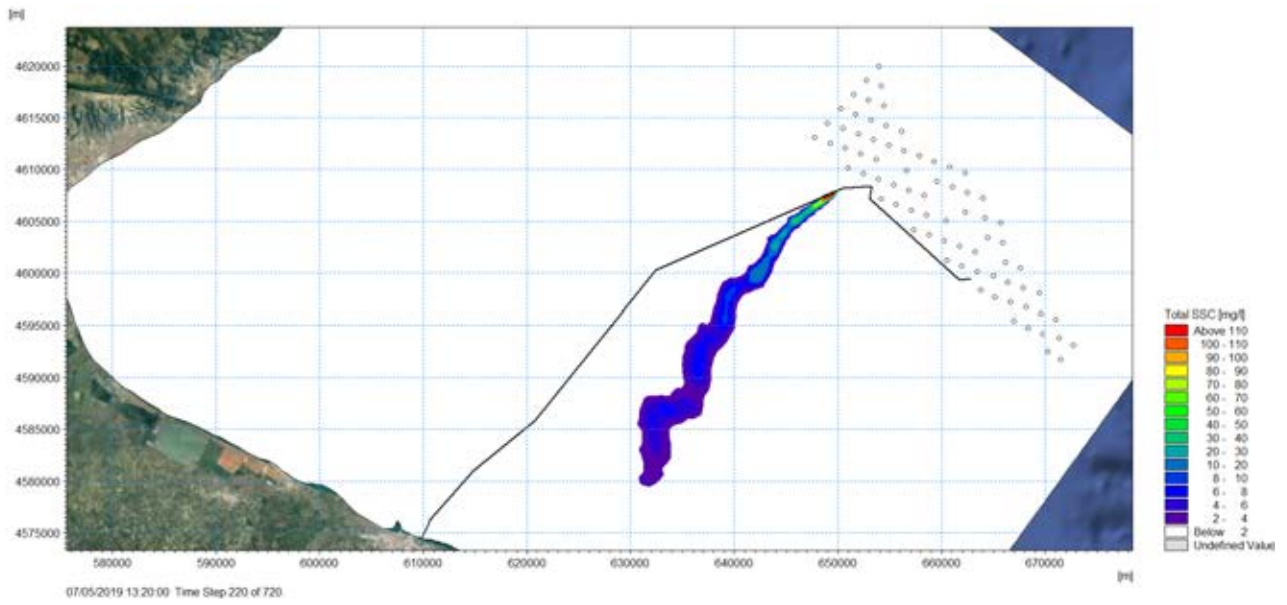


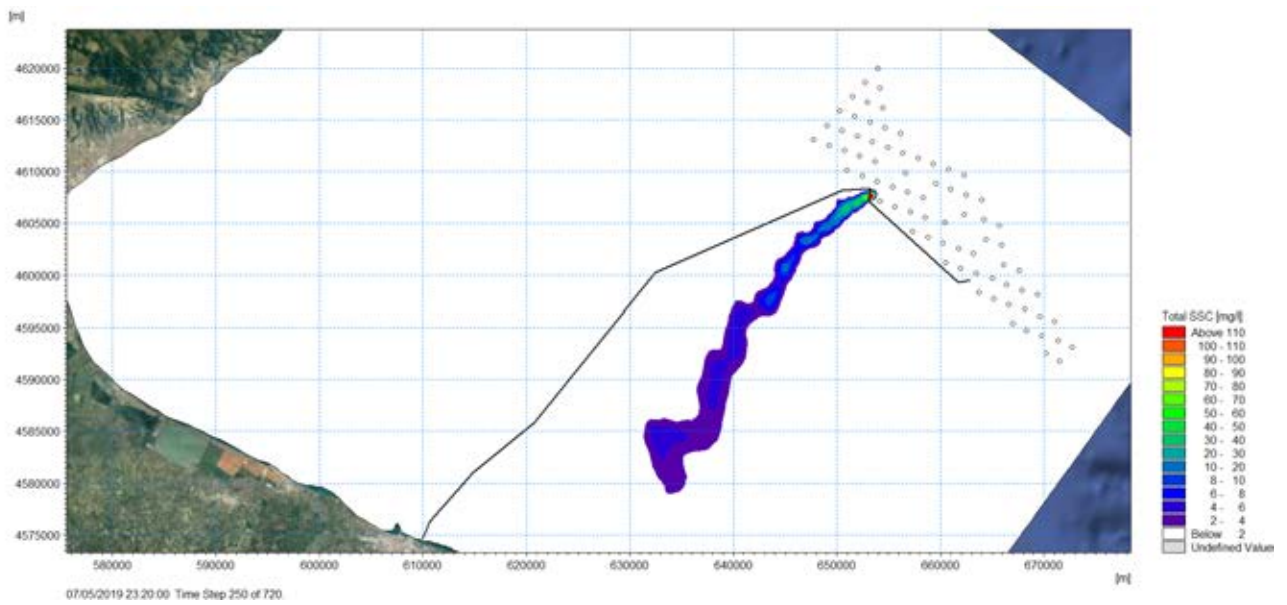
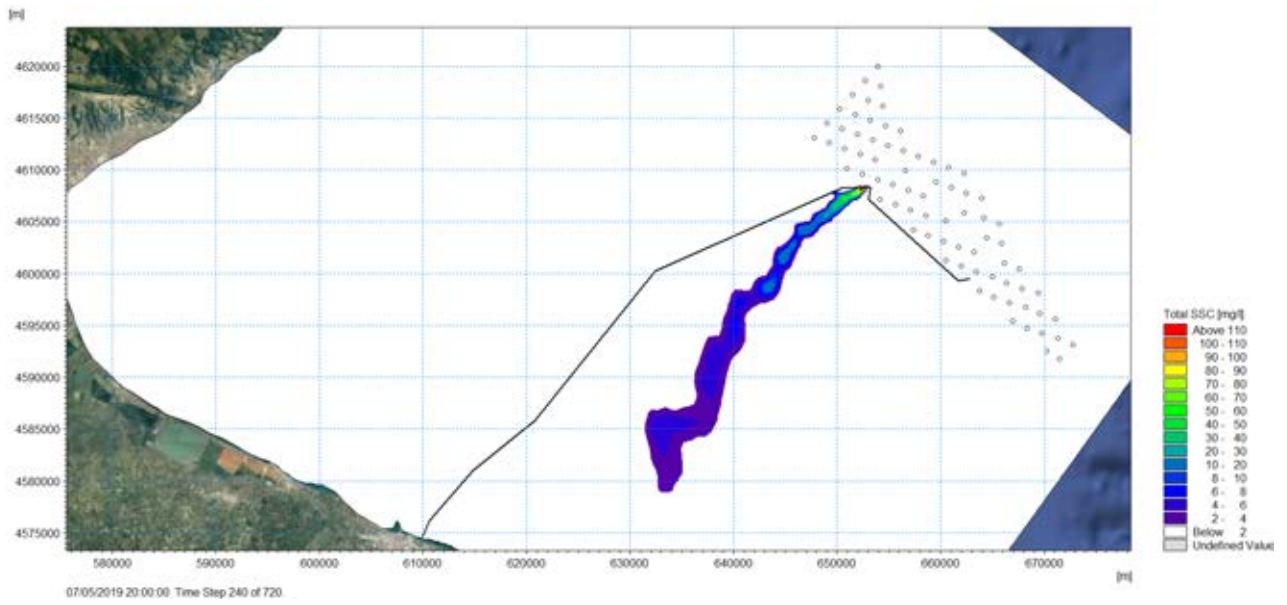


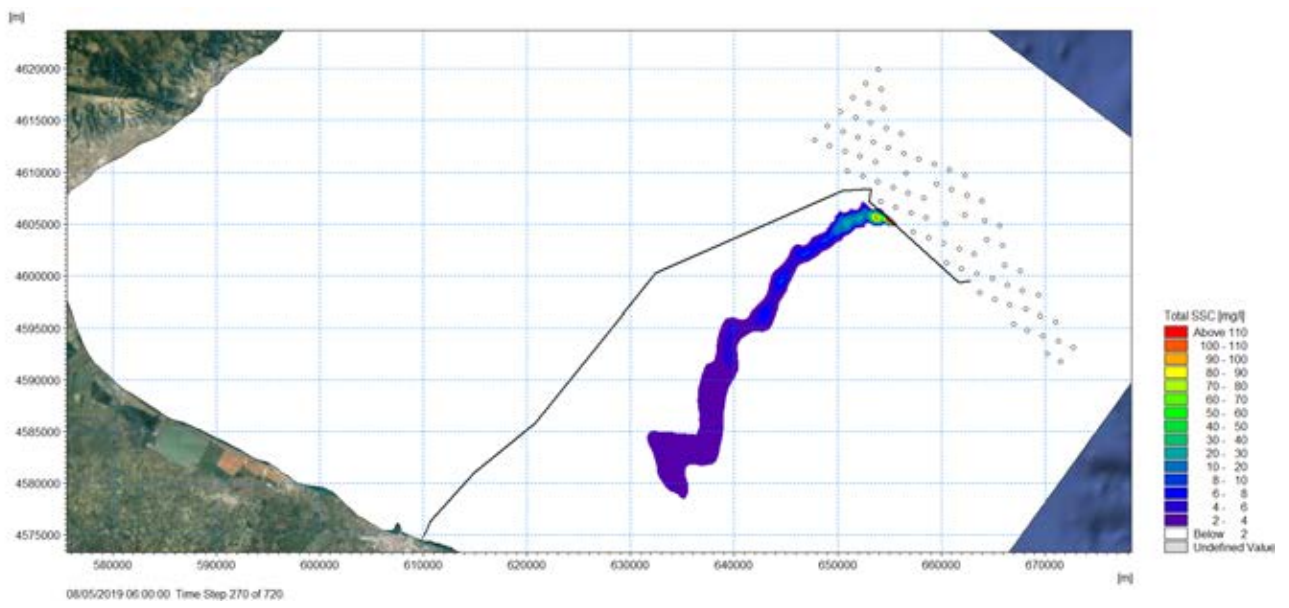
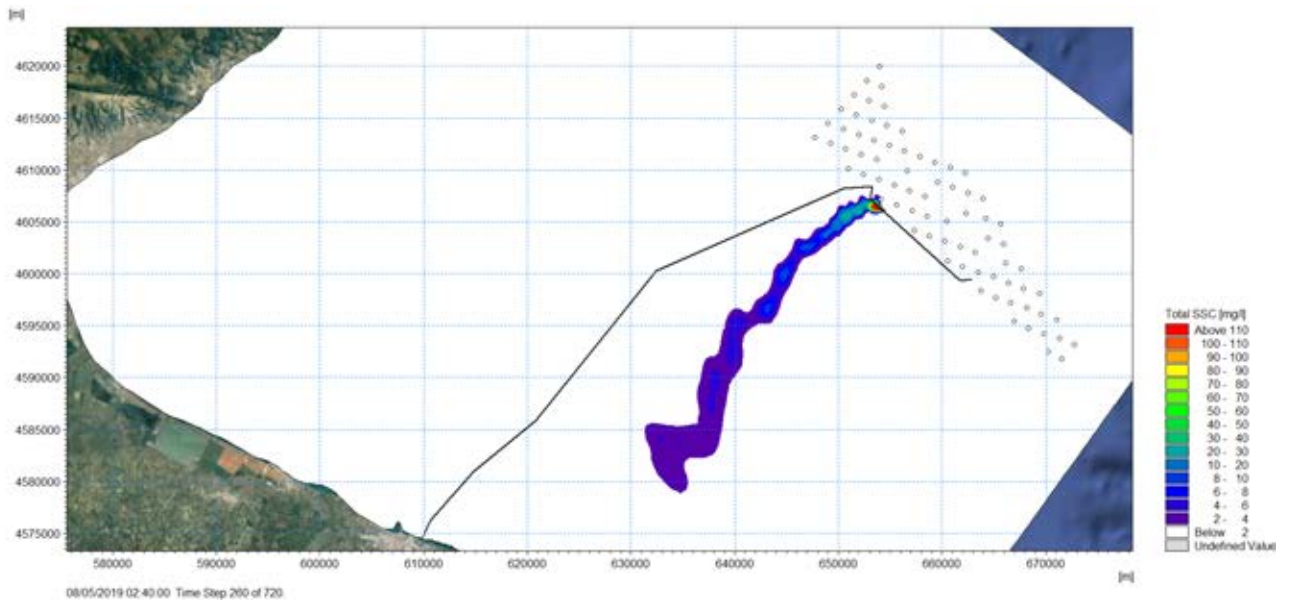


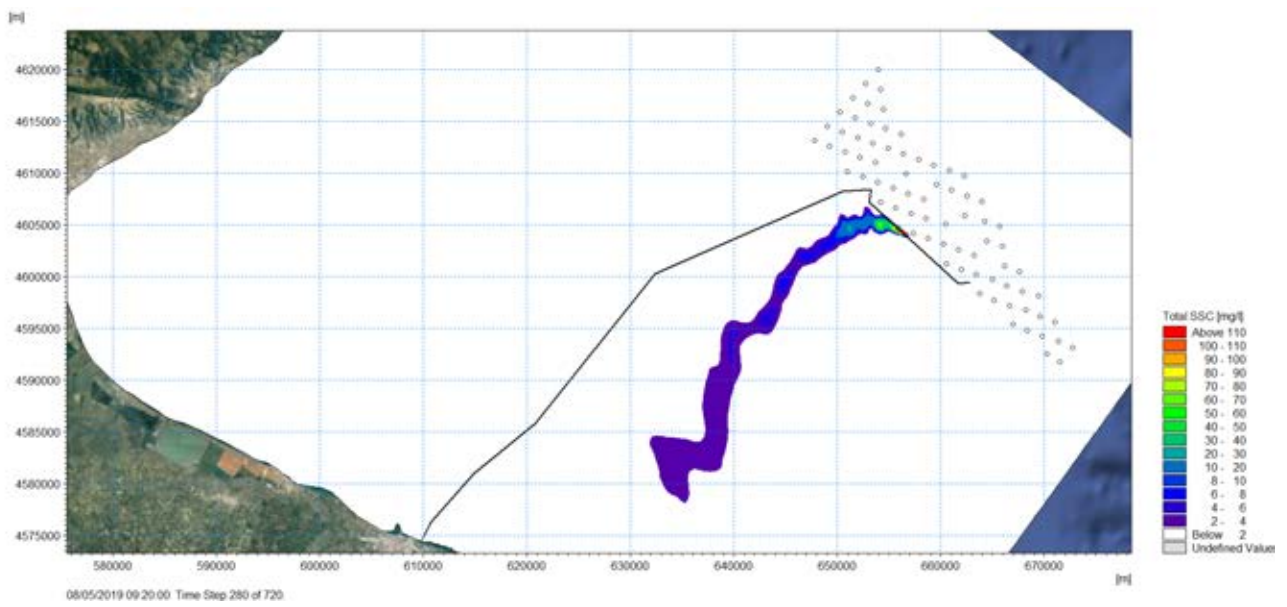
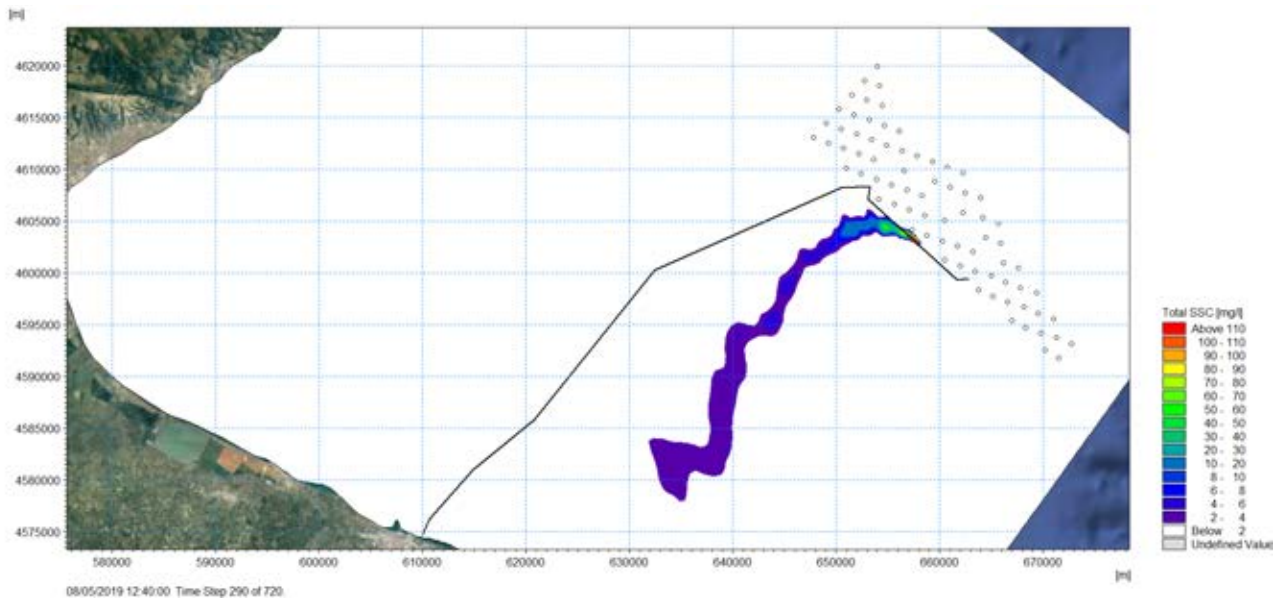


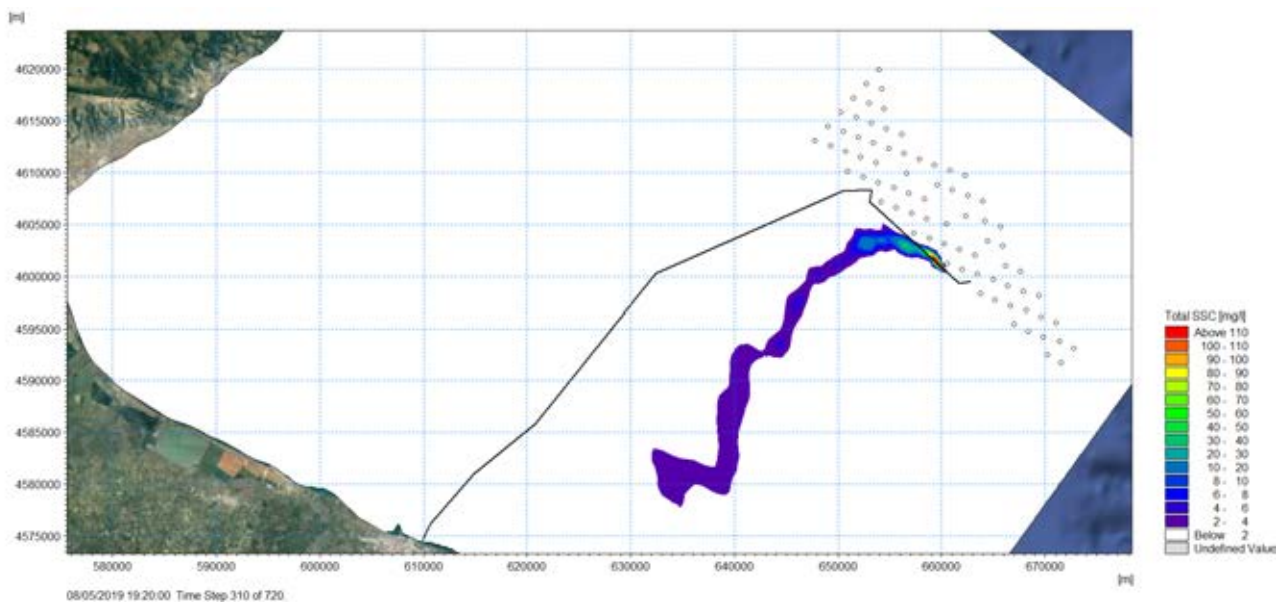
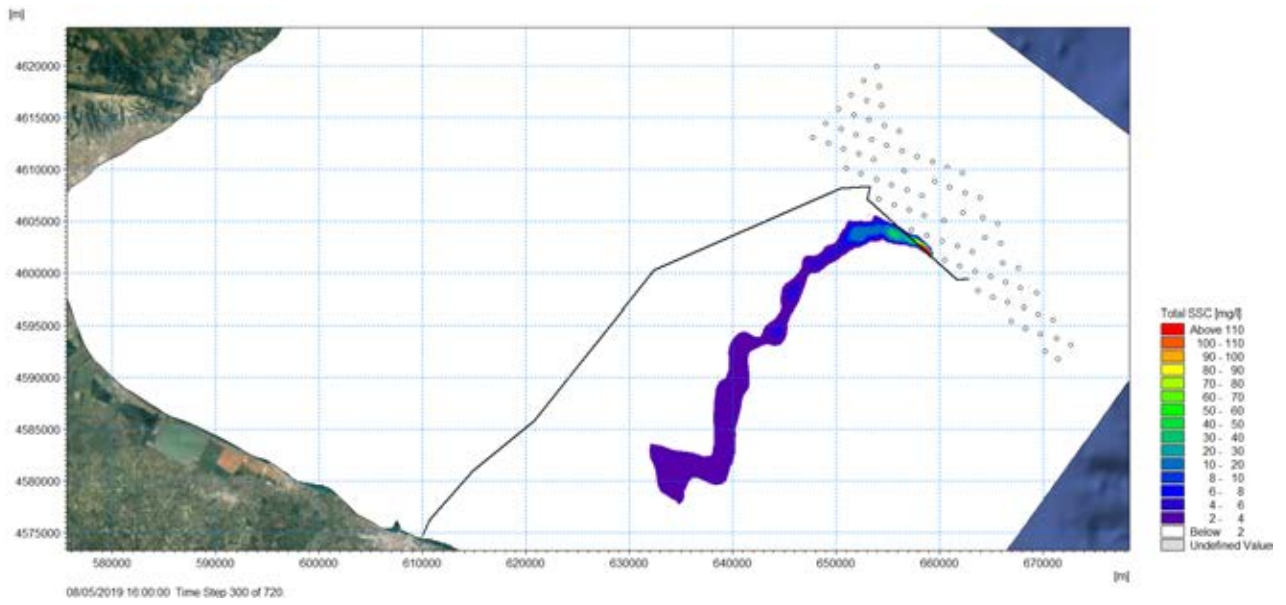


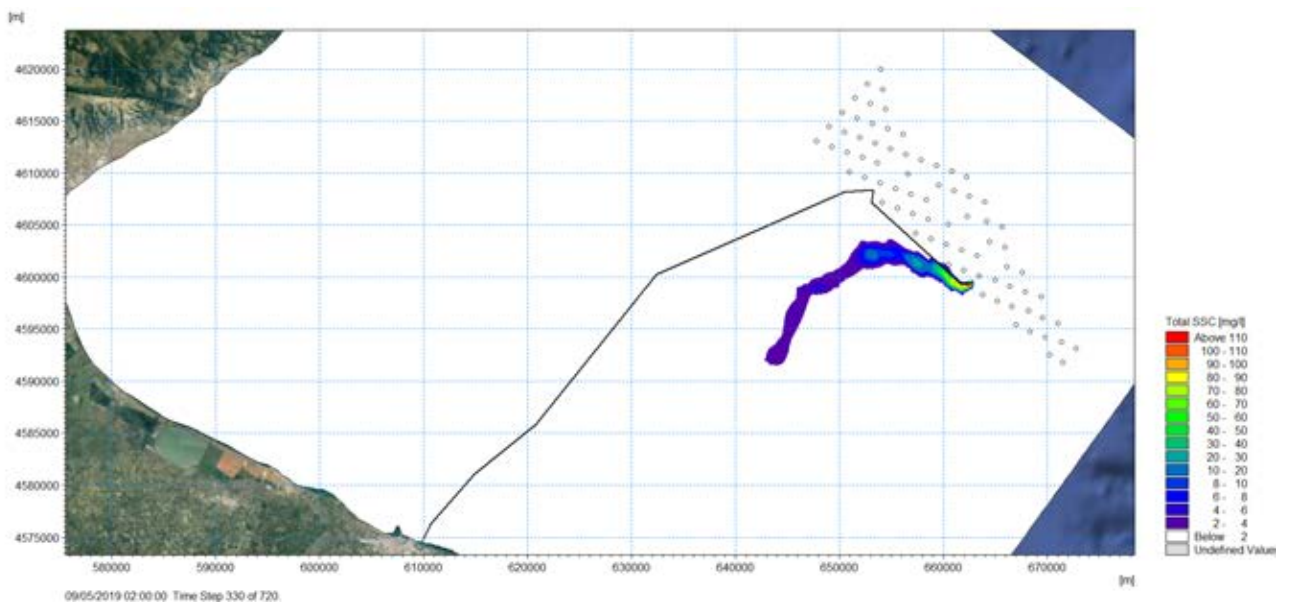
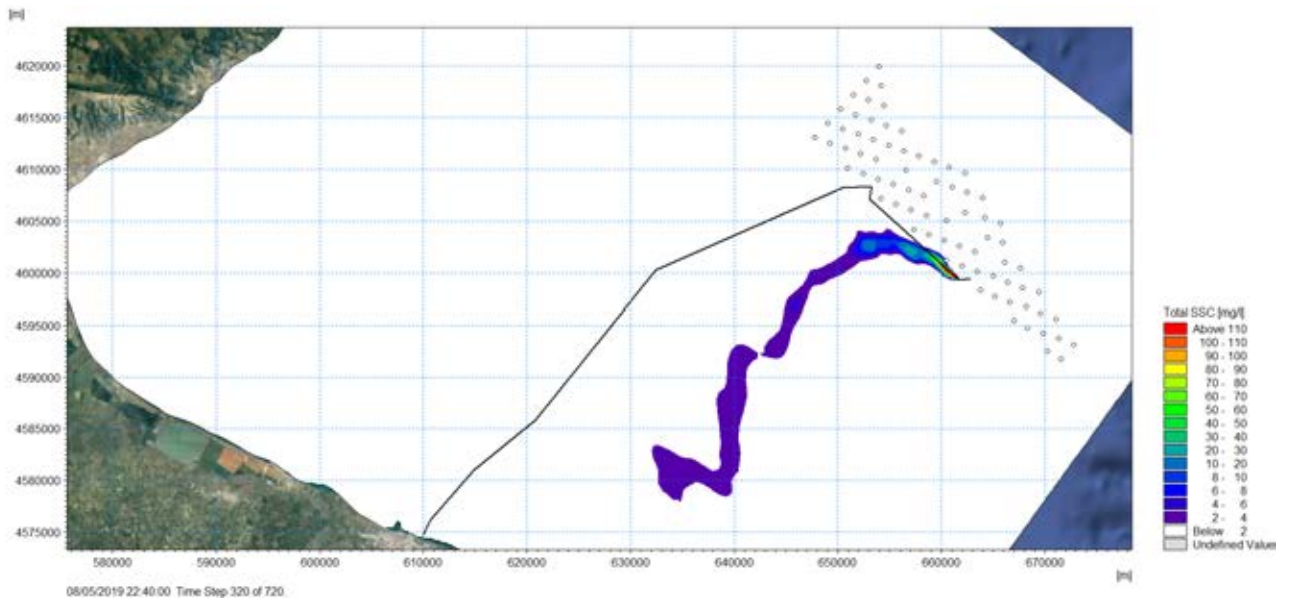


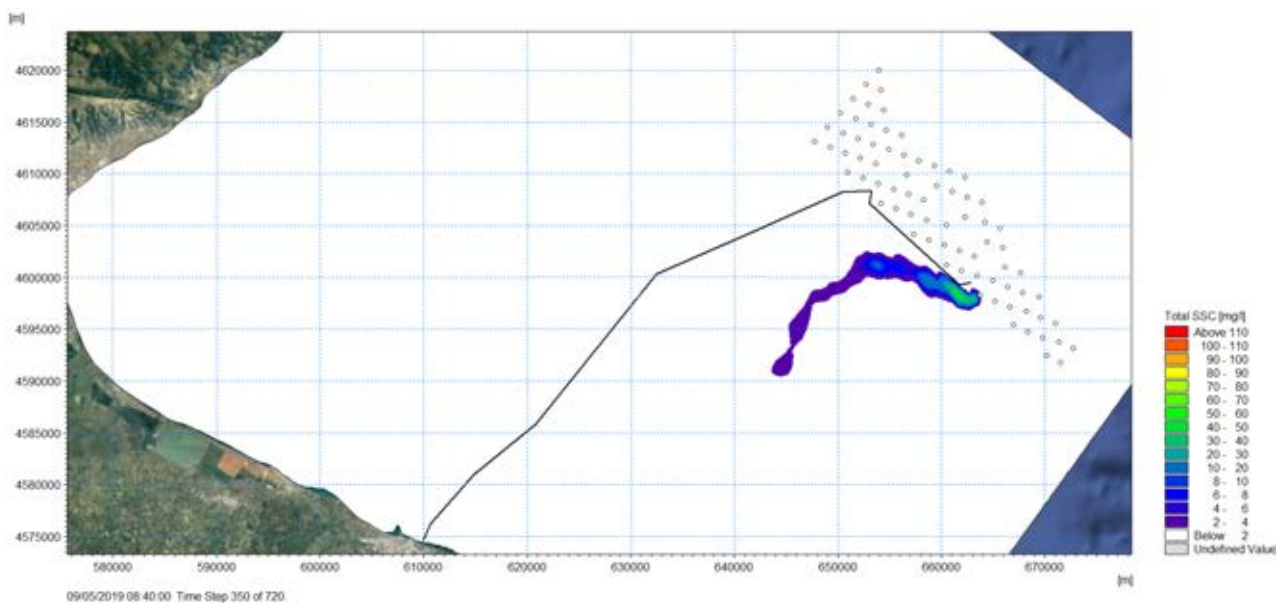
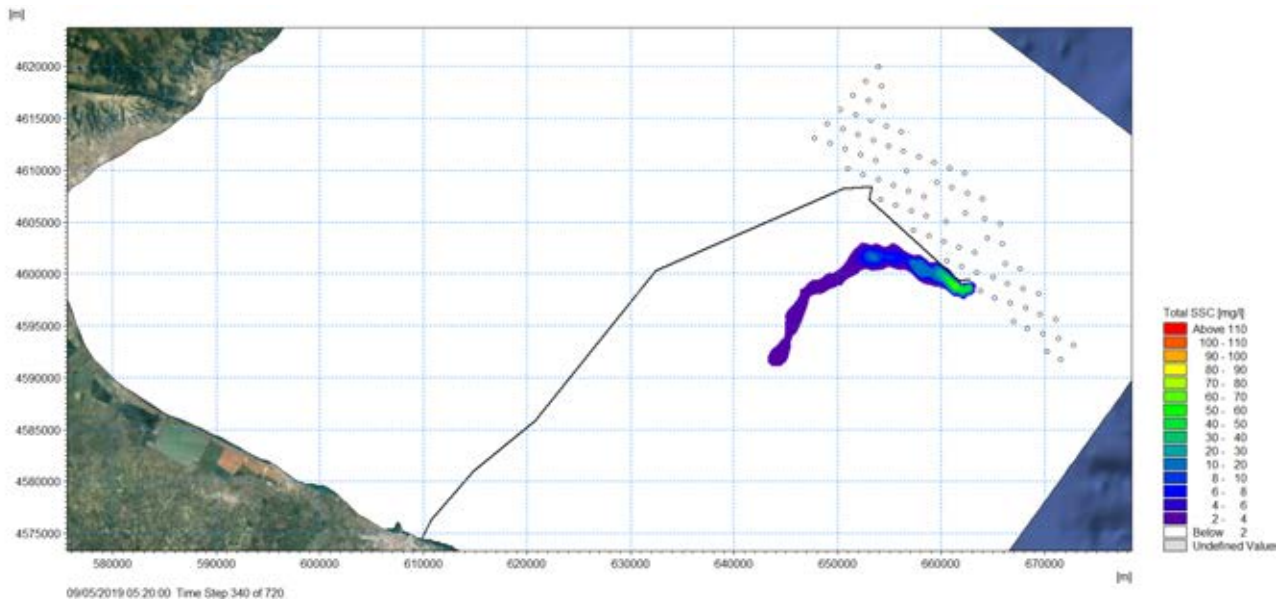


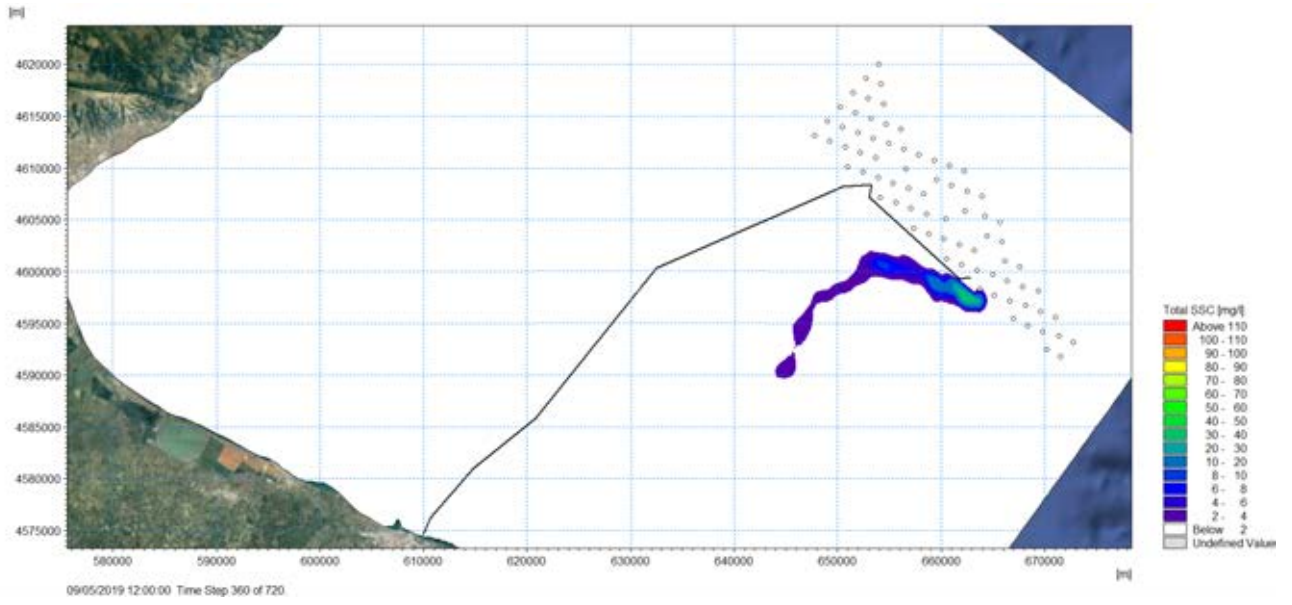


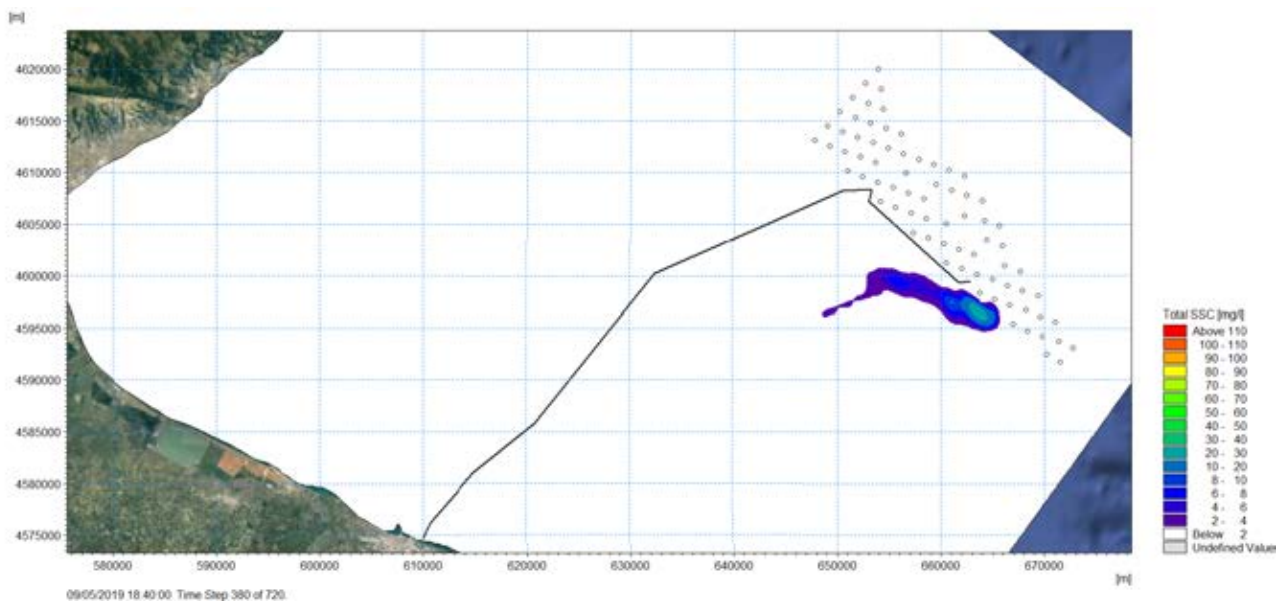
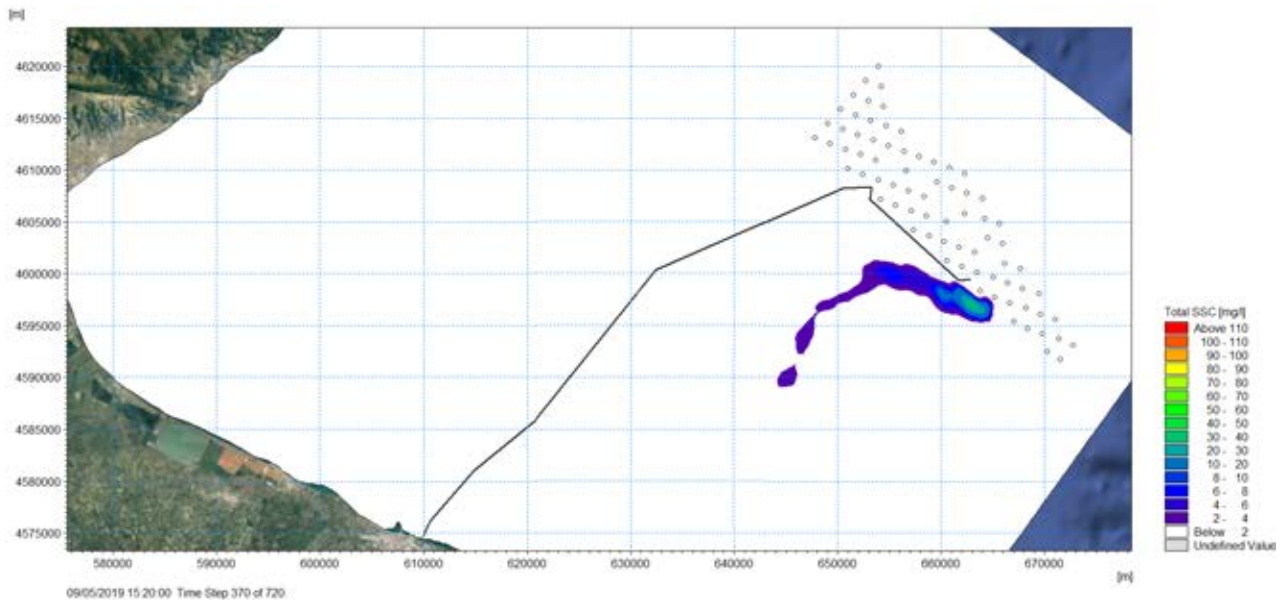


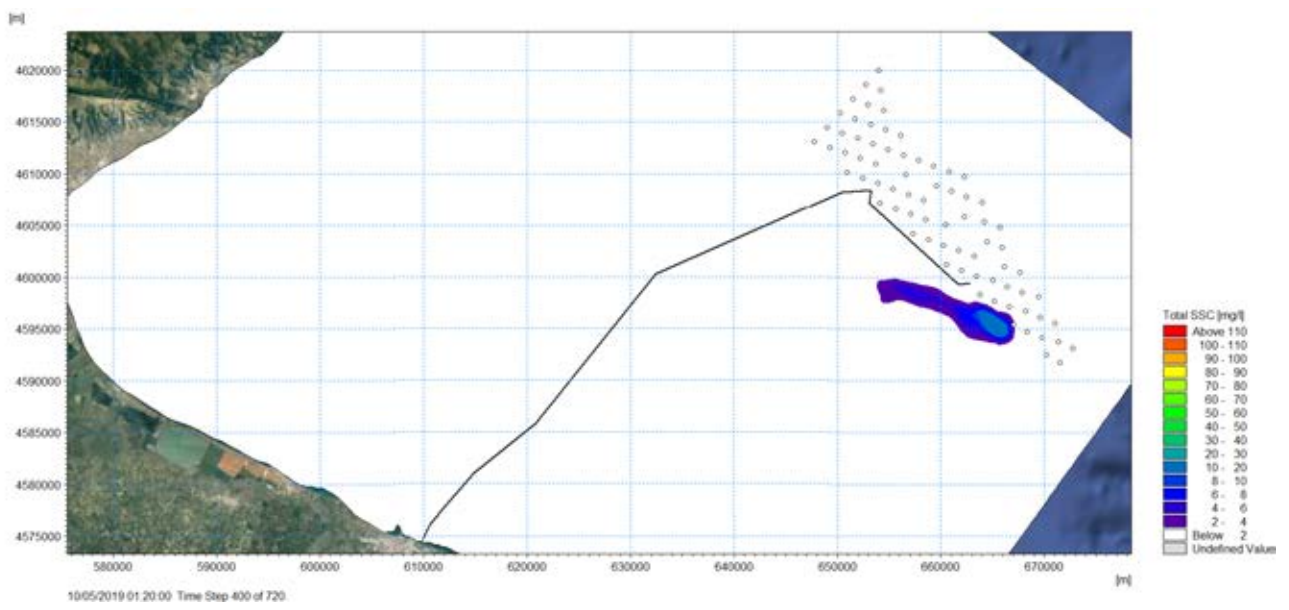
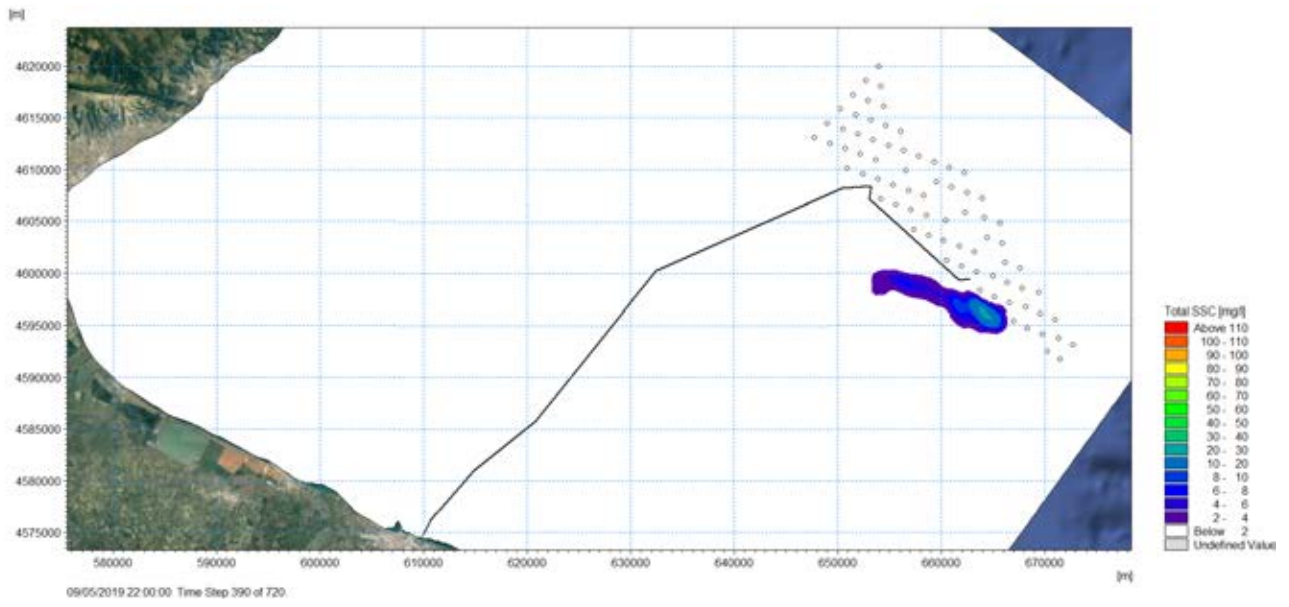


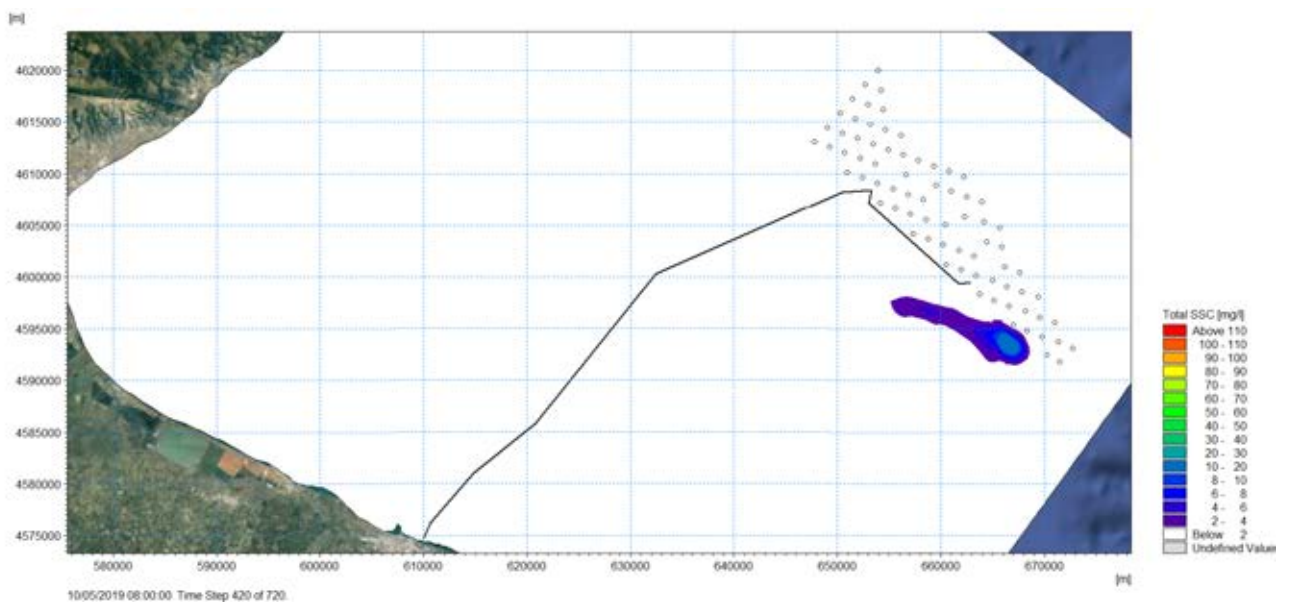
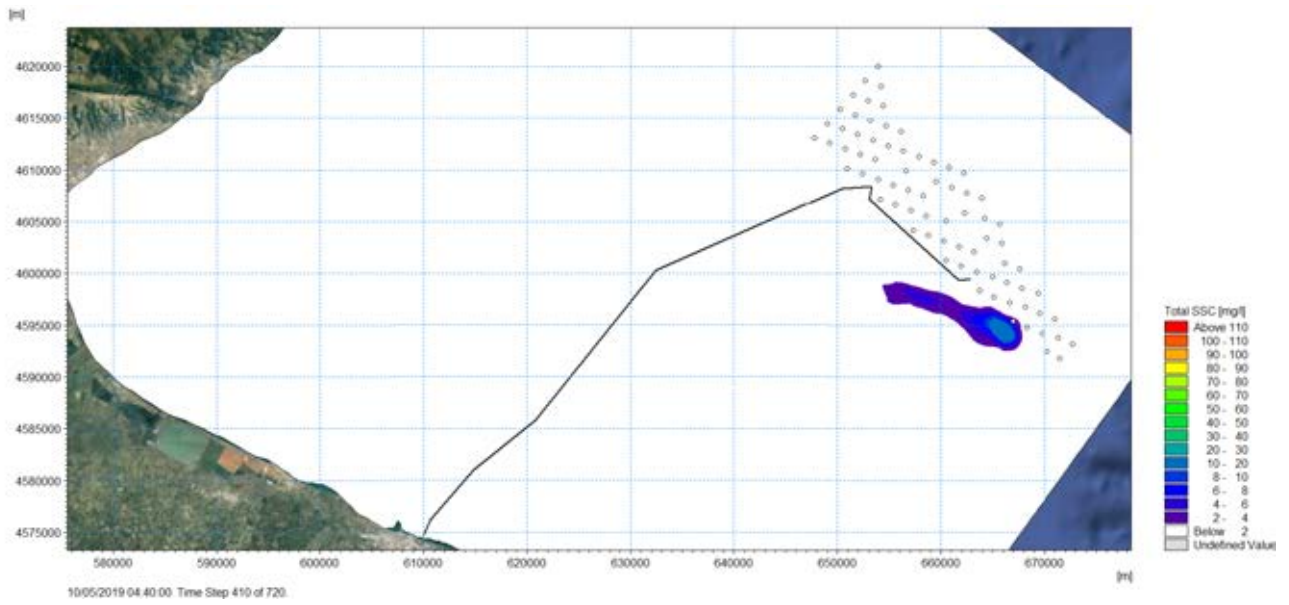


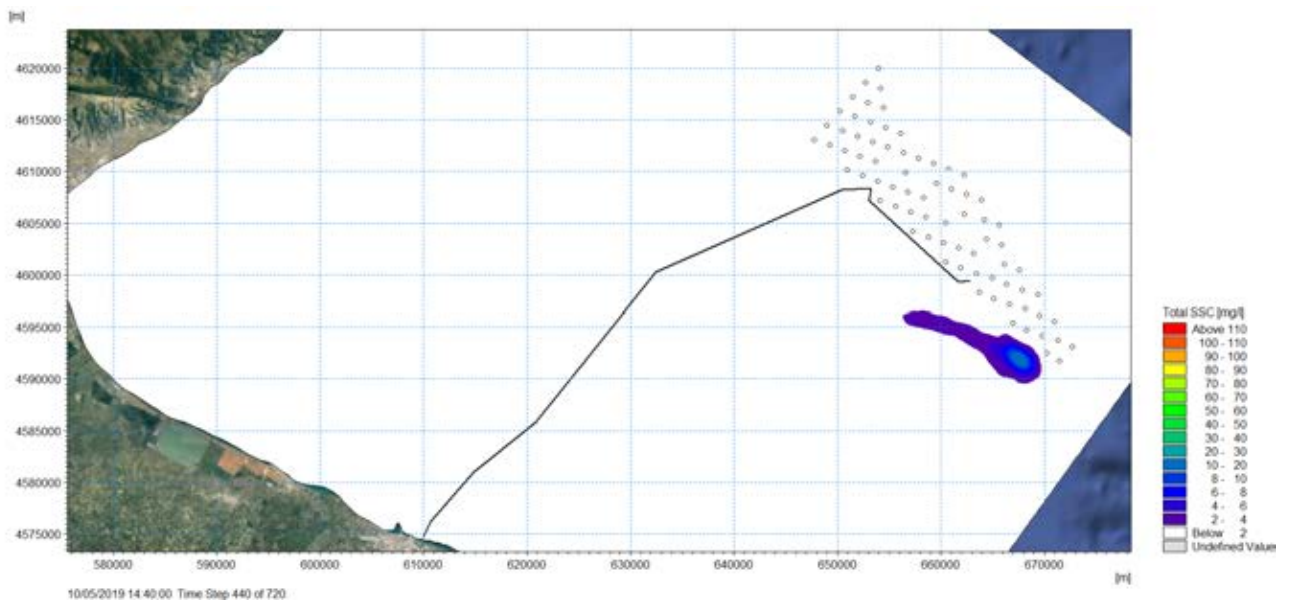
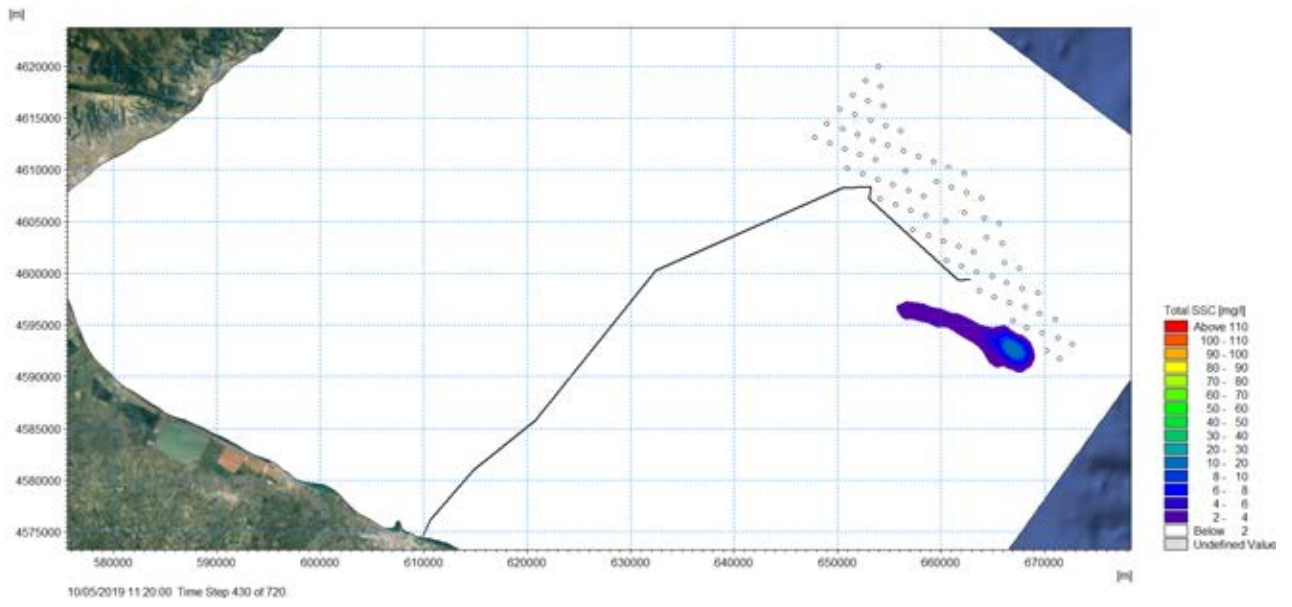


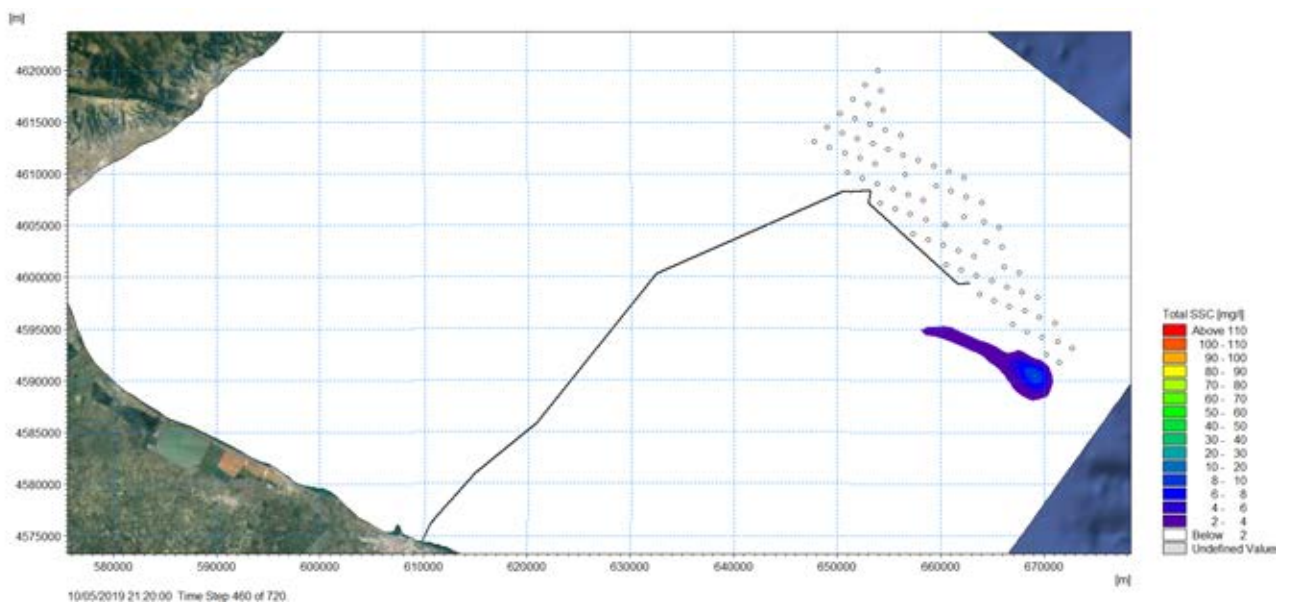
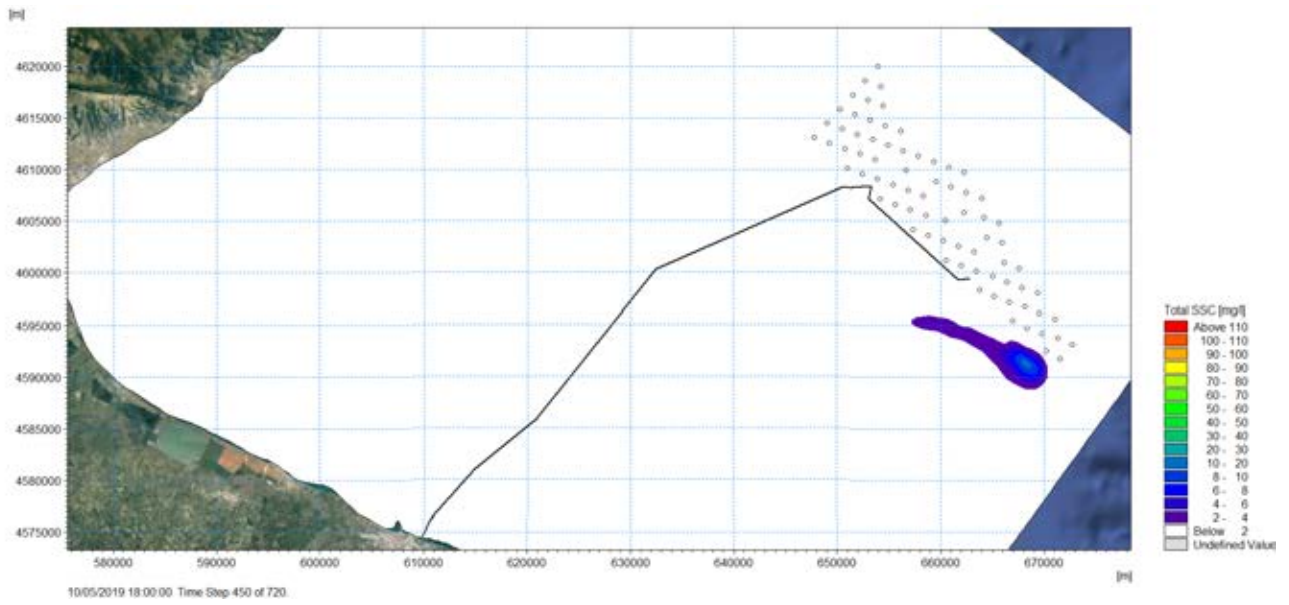


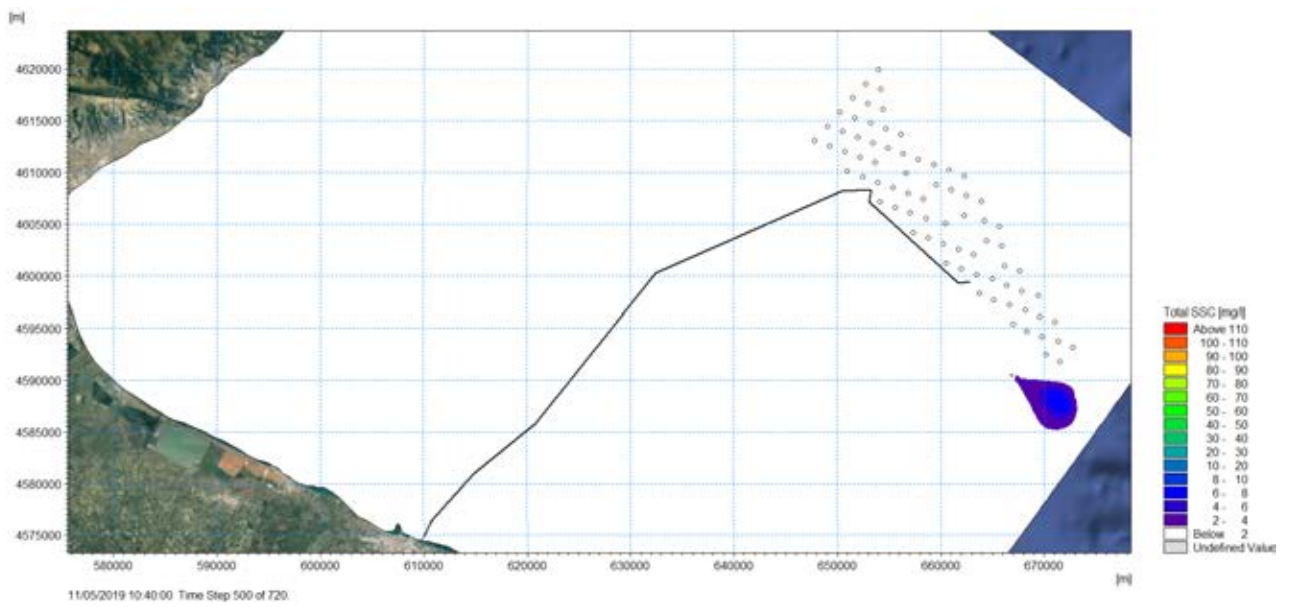
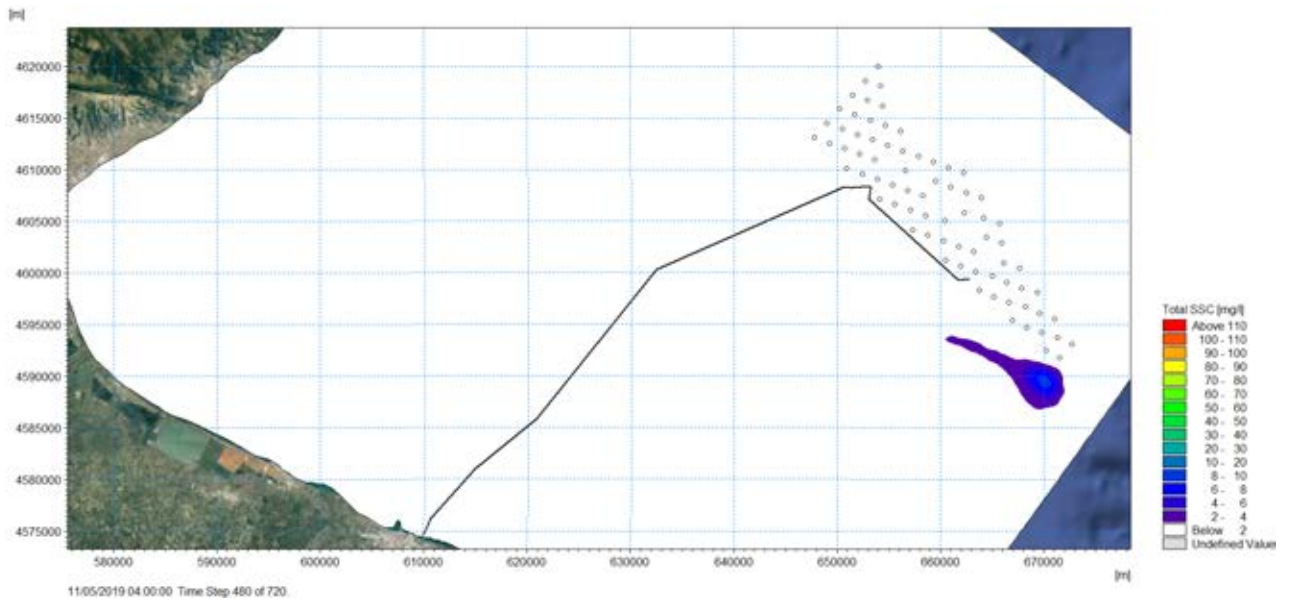


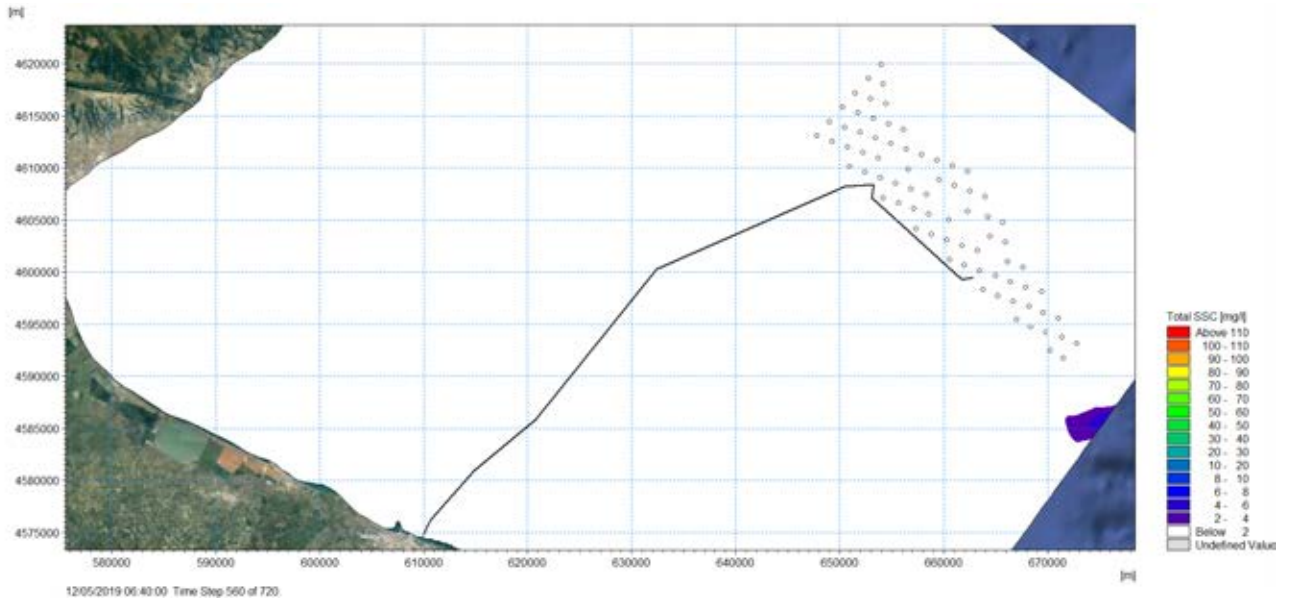












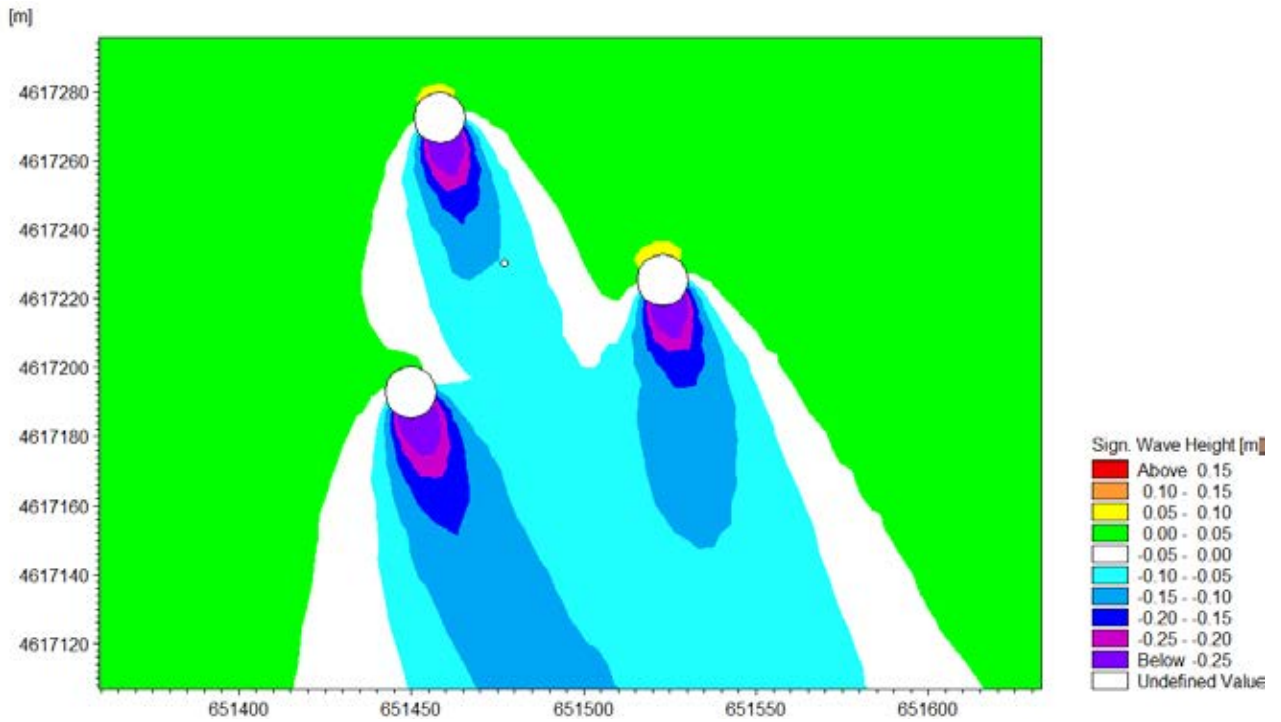
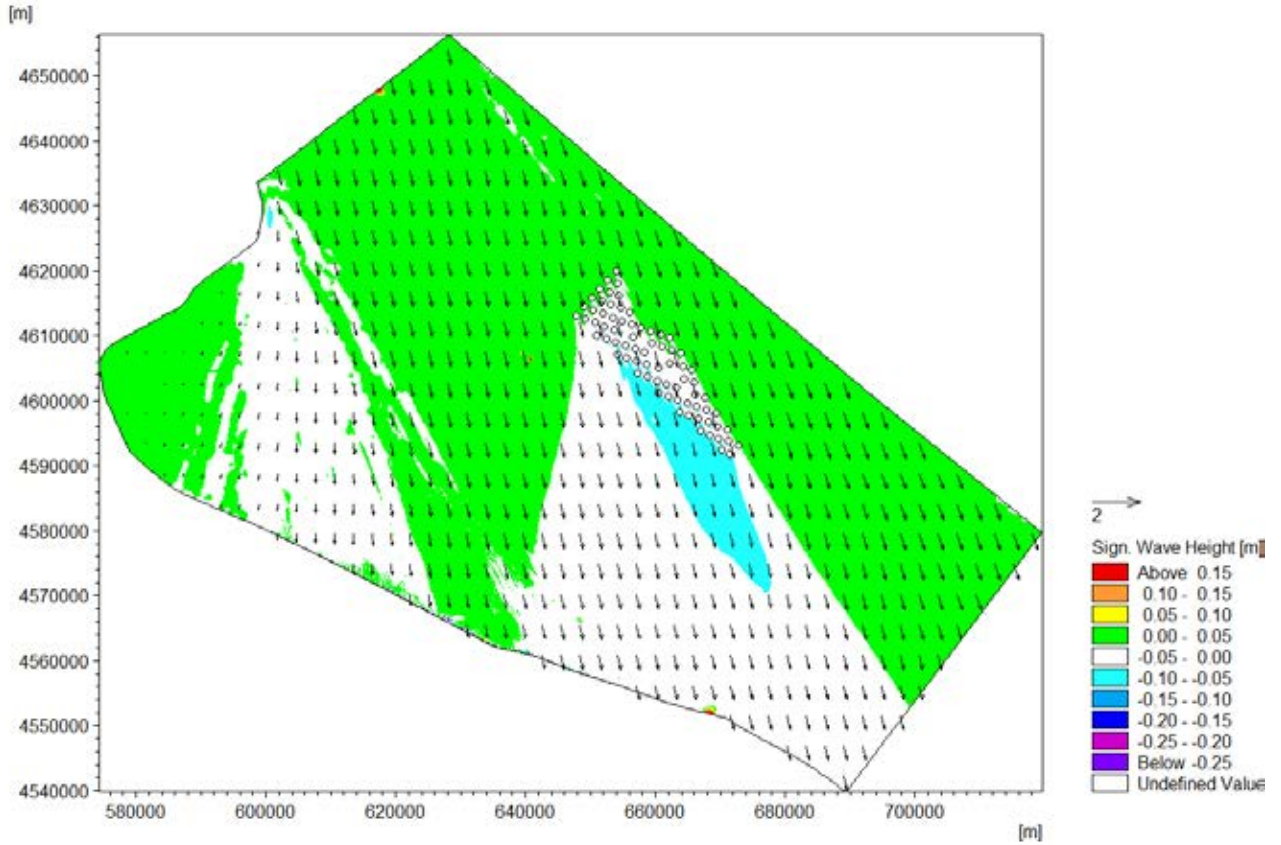
12.APPENDICE II

12.1 MAPPA DELLE VARIAZIONI DELLE ALTEZZE D'ONDA PER CIASCUNO STATO ONDOSI

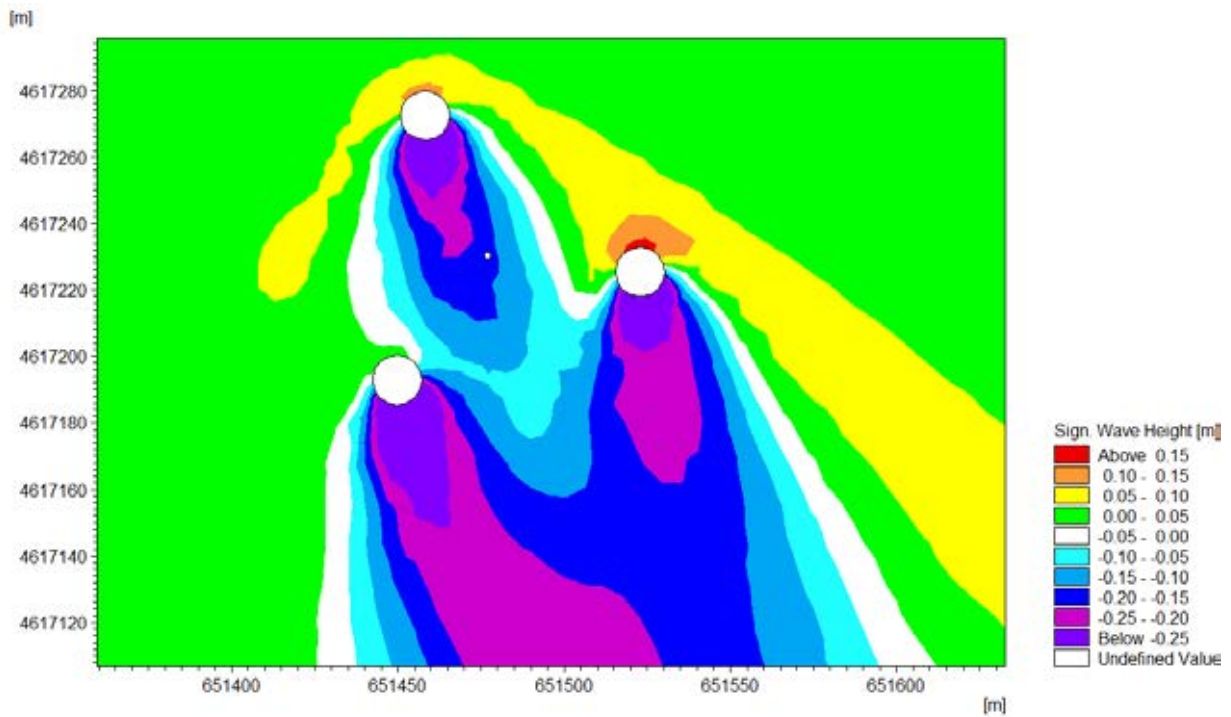
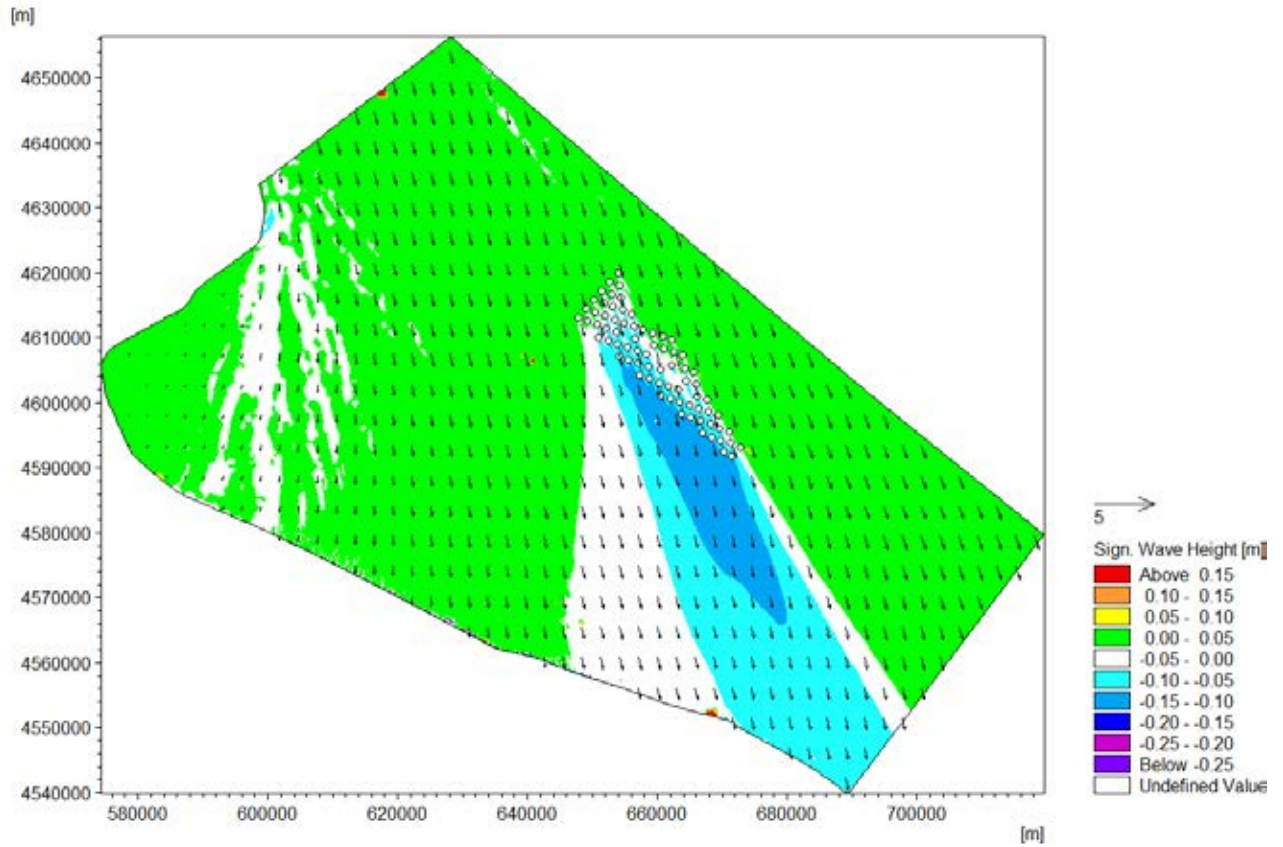
Per tutti gli stati ondosi in Tab. II.6, le mappe nelle pagine seguenti mostrano in scala di colori le differenze di altezze d'onda tra il caso di presenza ed assenza del campo eolico. Il colore bianco indica che non ci sono differenze.

In ogni pagina sono riportate due mappe per ciascuno stato ondoso: la mappa in alto illustra tutta l'area di studio e l'altra in basso si concentra sul campo attorno alla fondazione della singola turbina.

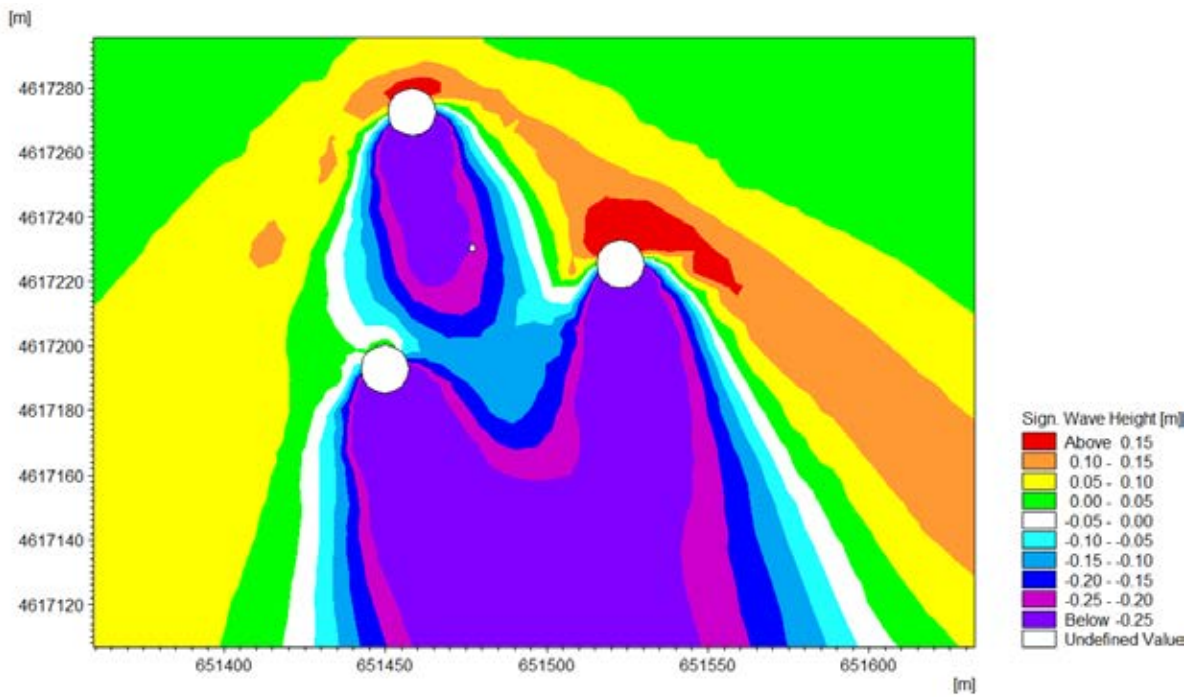
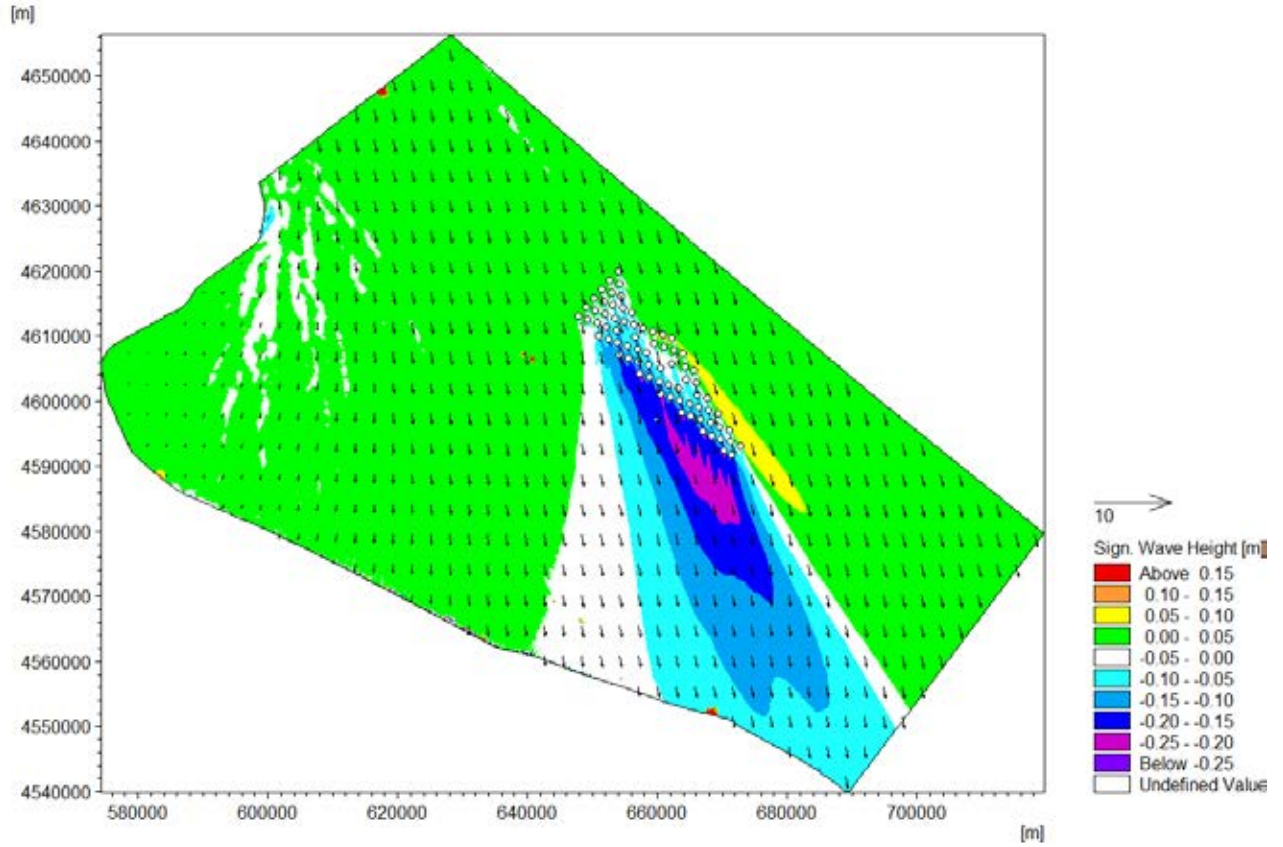
Stato ondoso 2, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



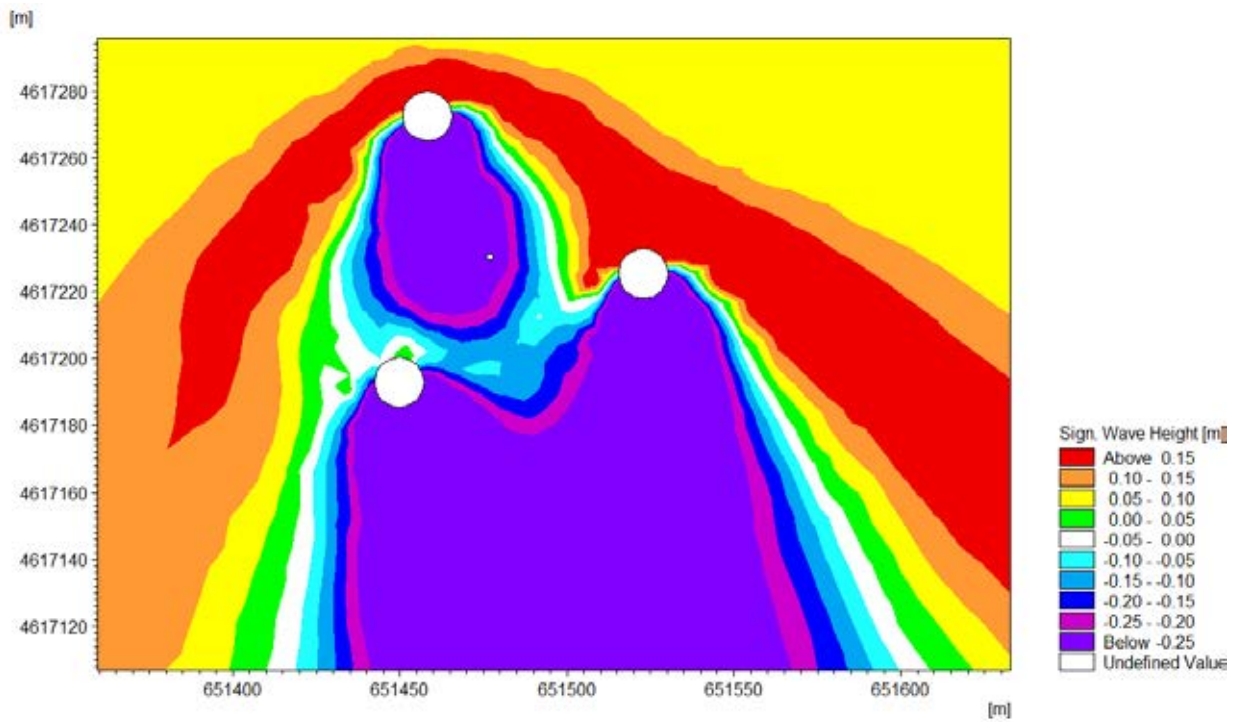
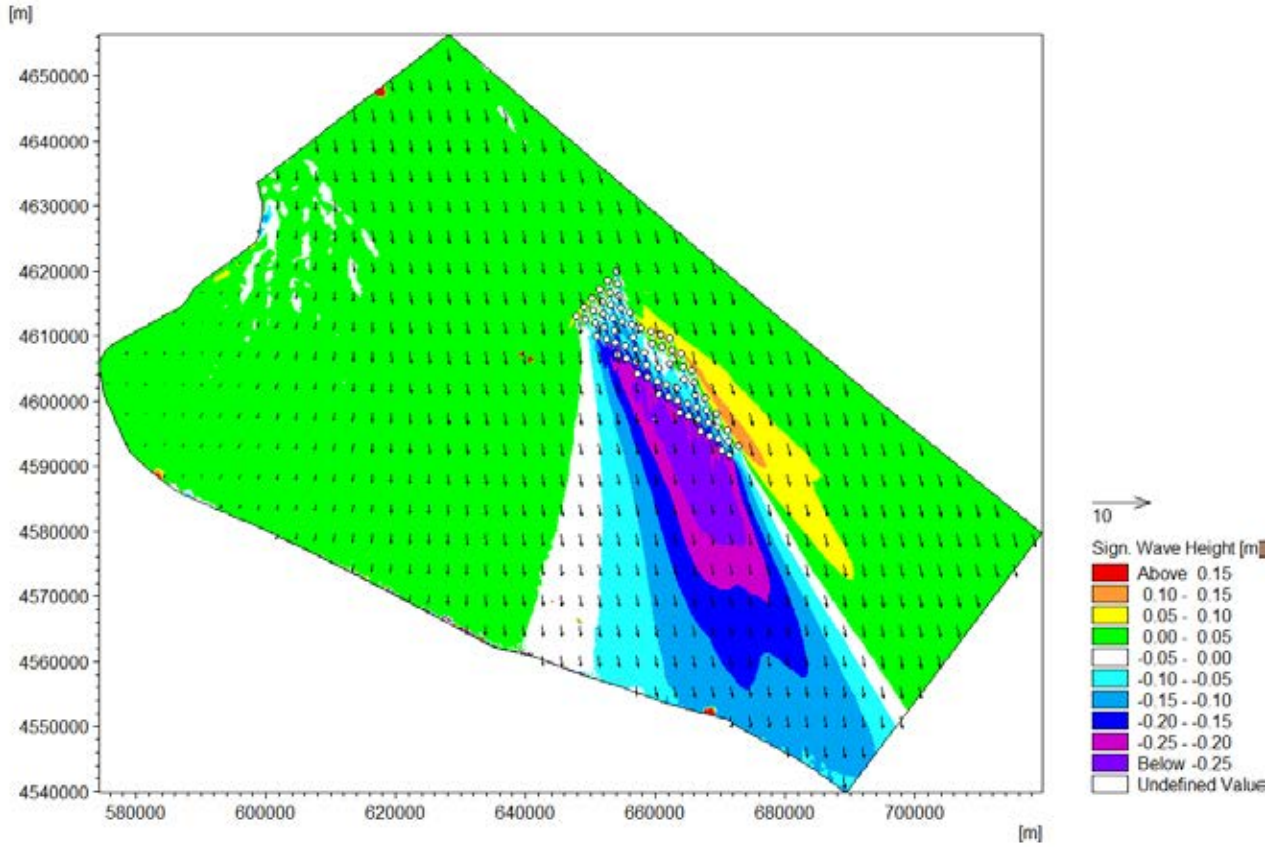
Stato ondoso 3, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



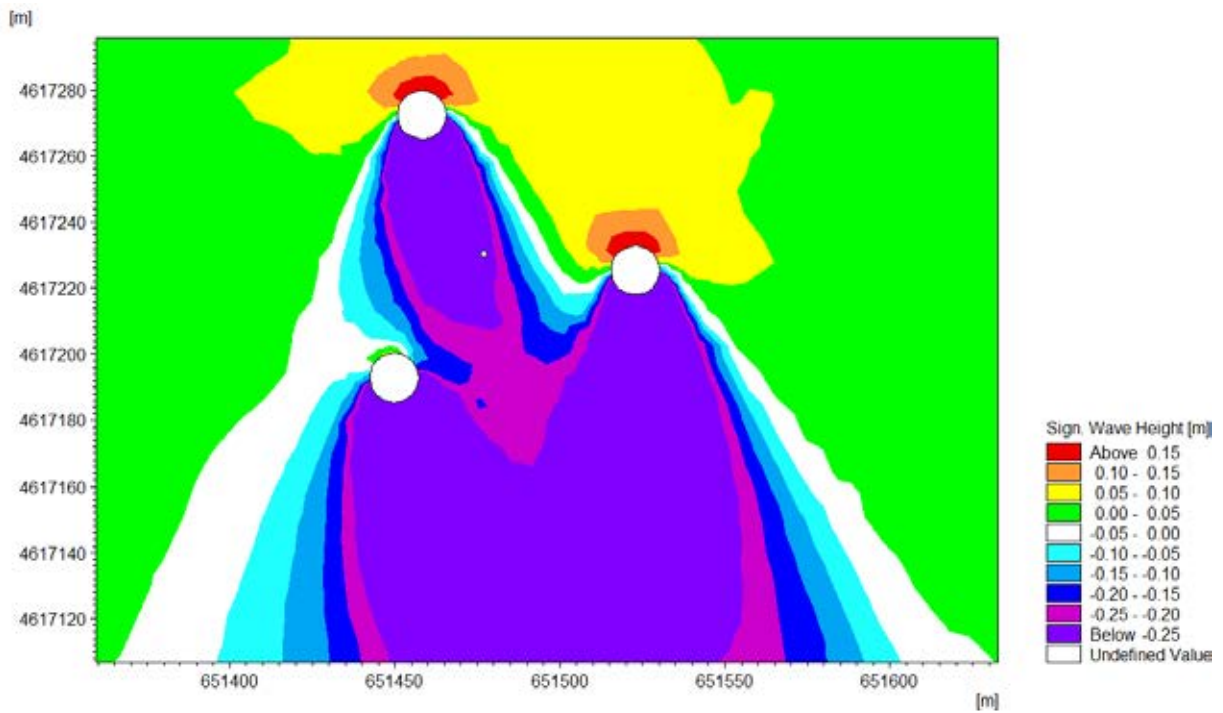
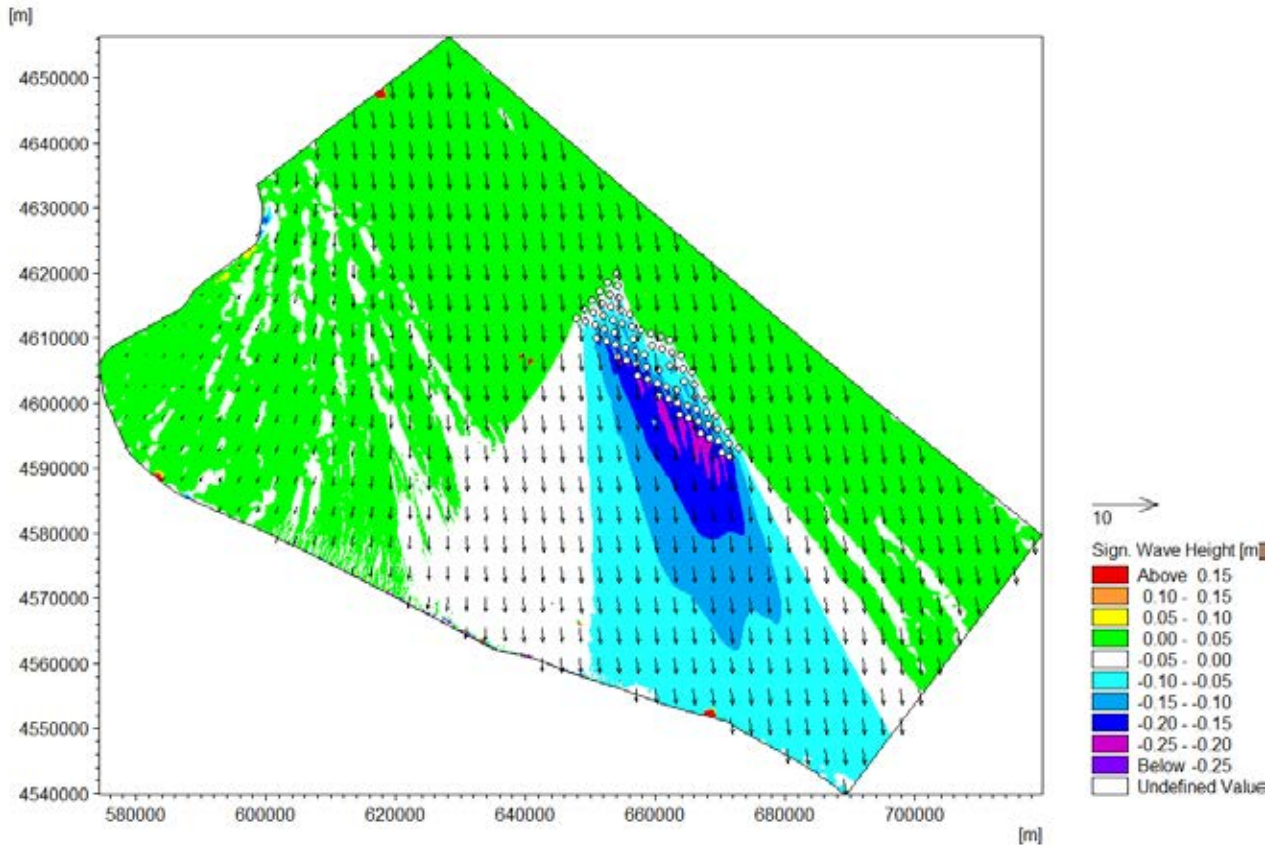
Stato ondoso 4, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



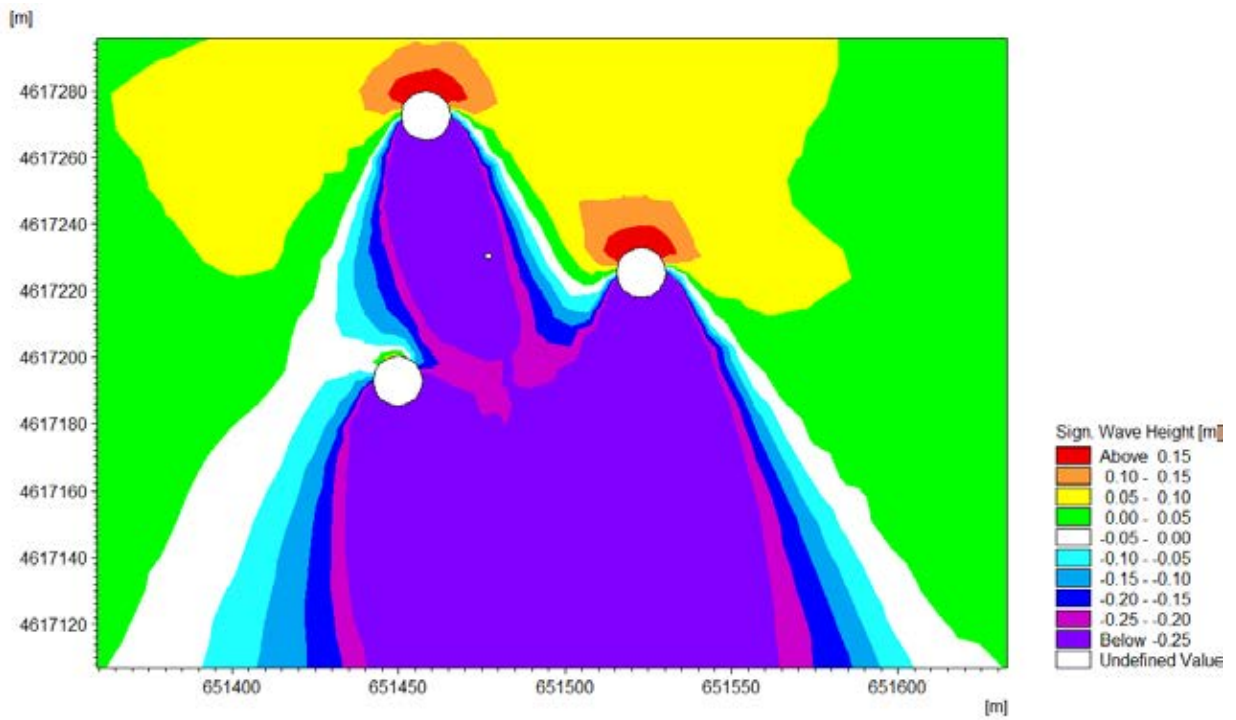
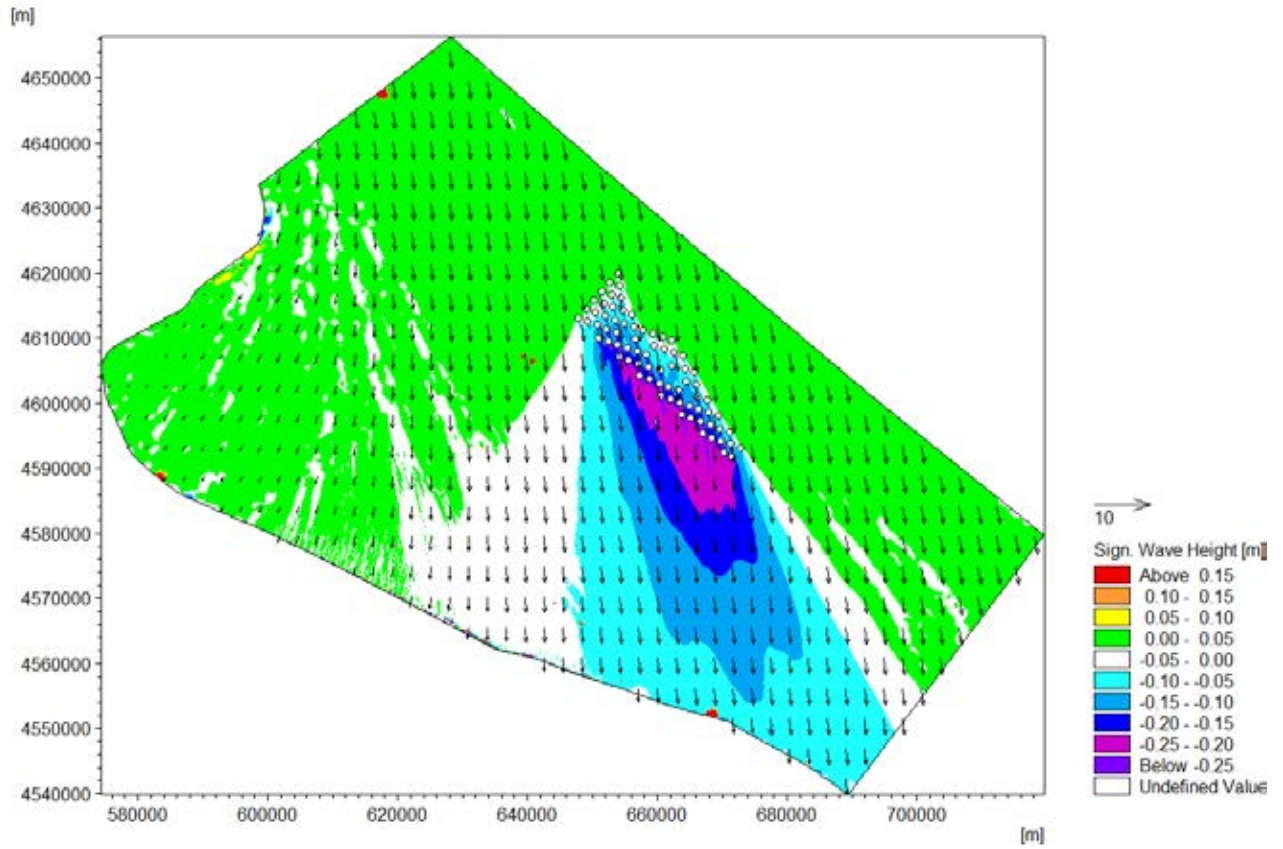
Stato ondoso 5, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



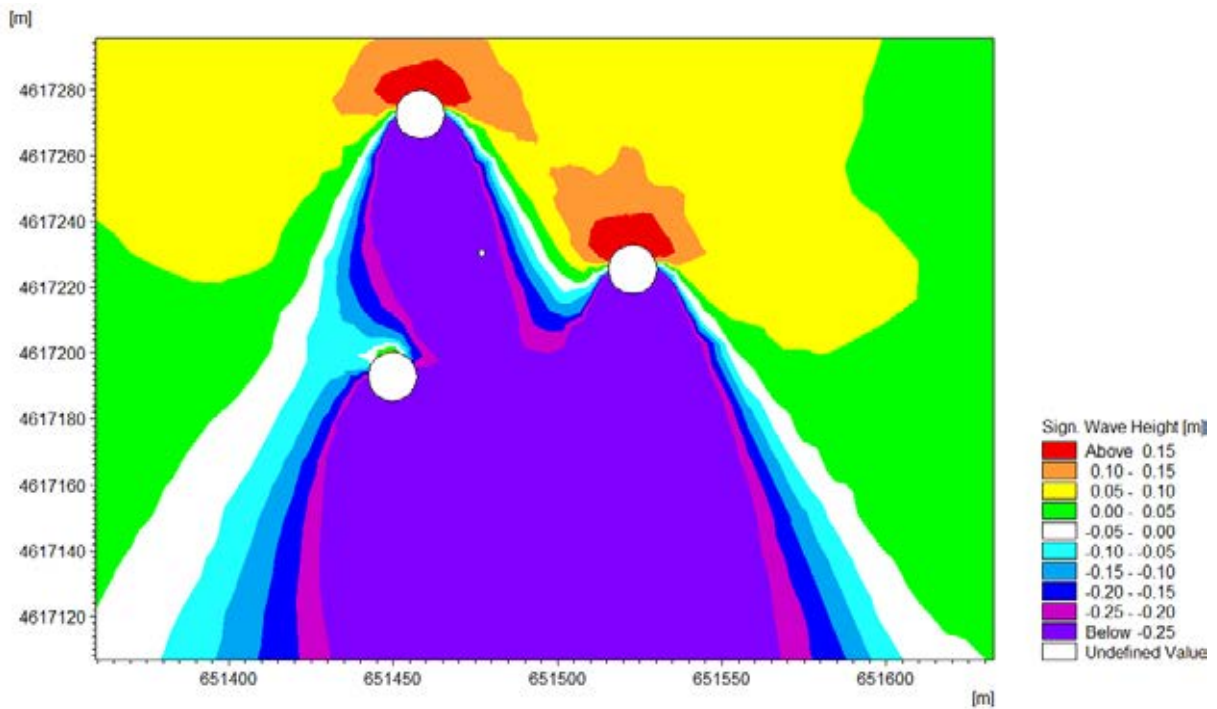
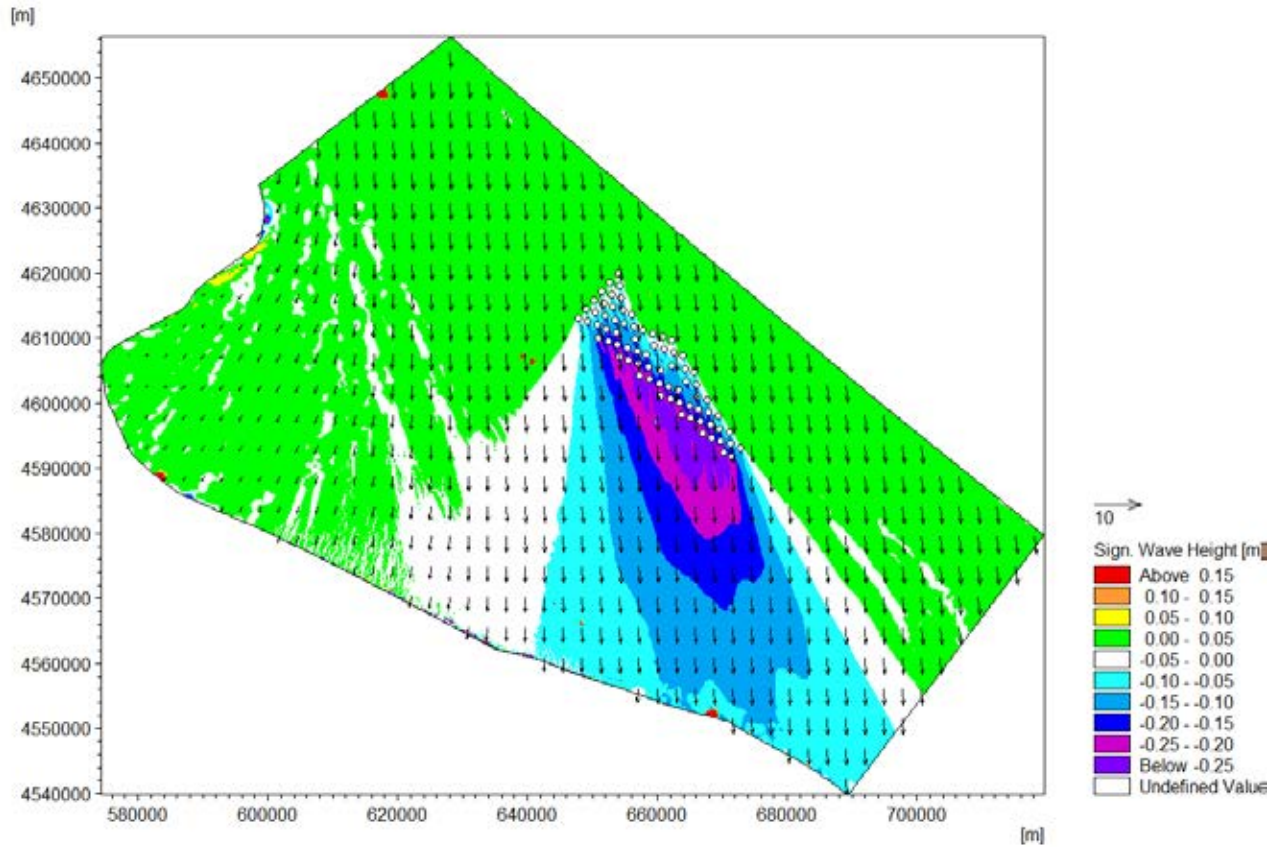
Stato ondoso 6, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



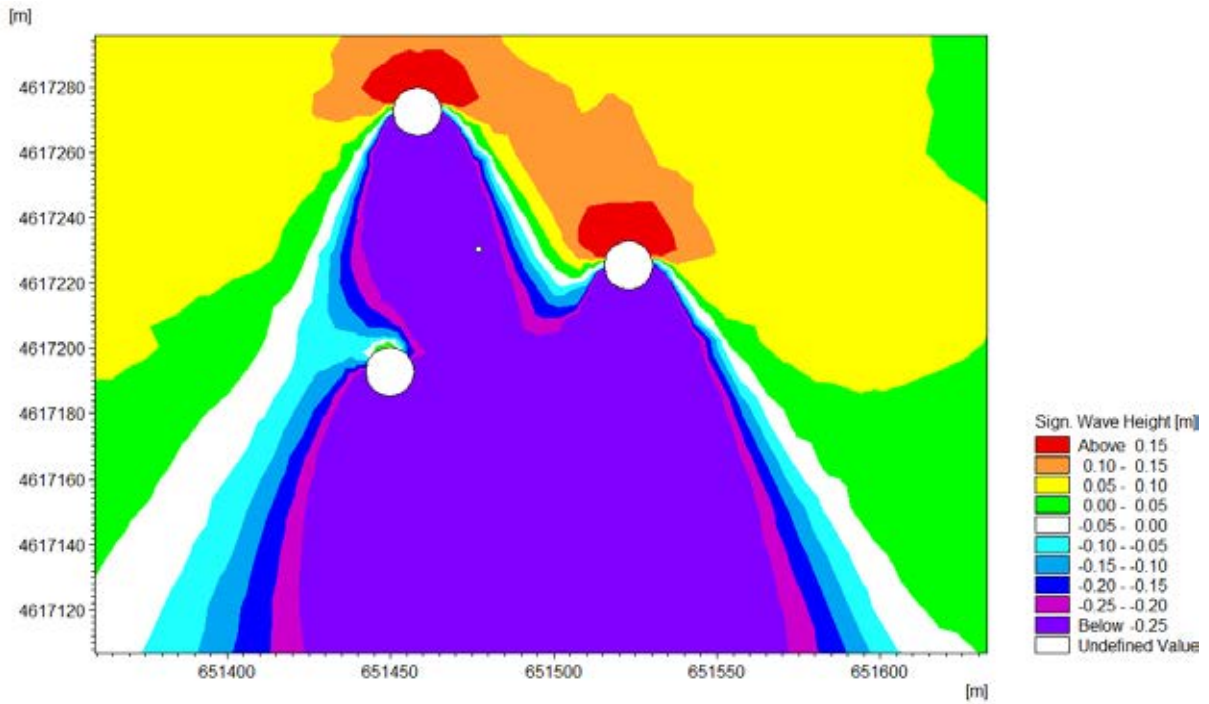
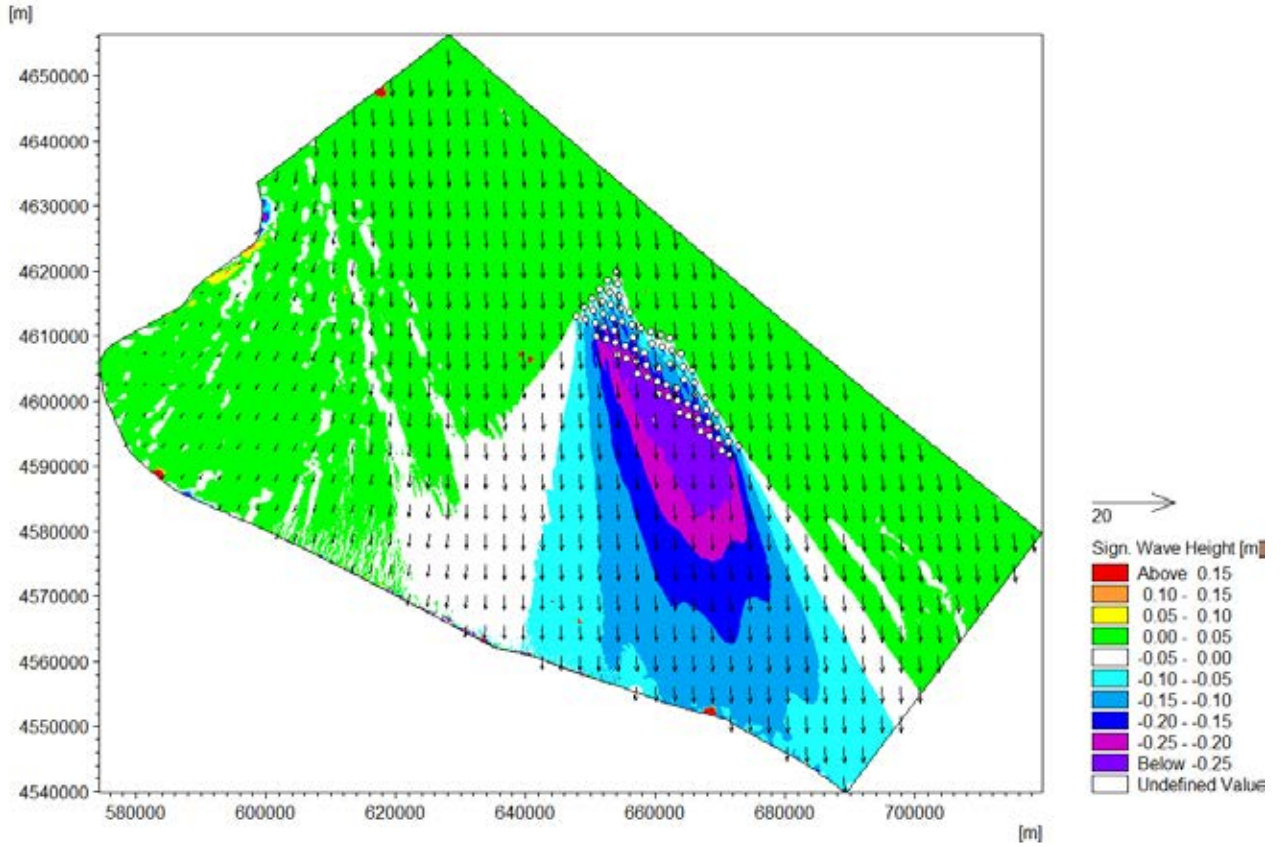
Stato ondoso 7, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



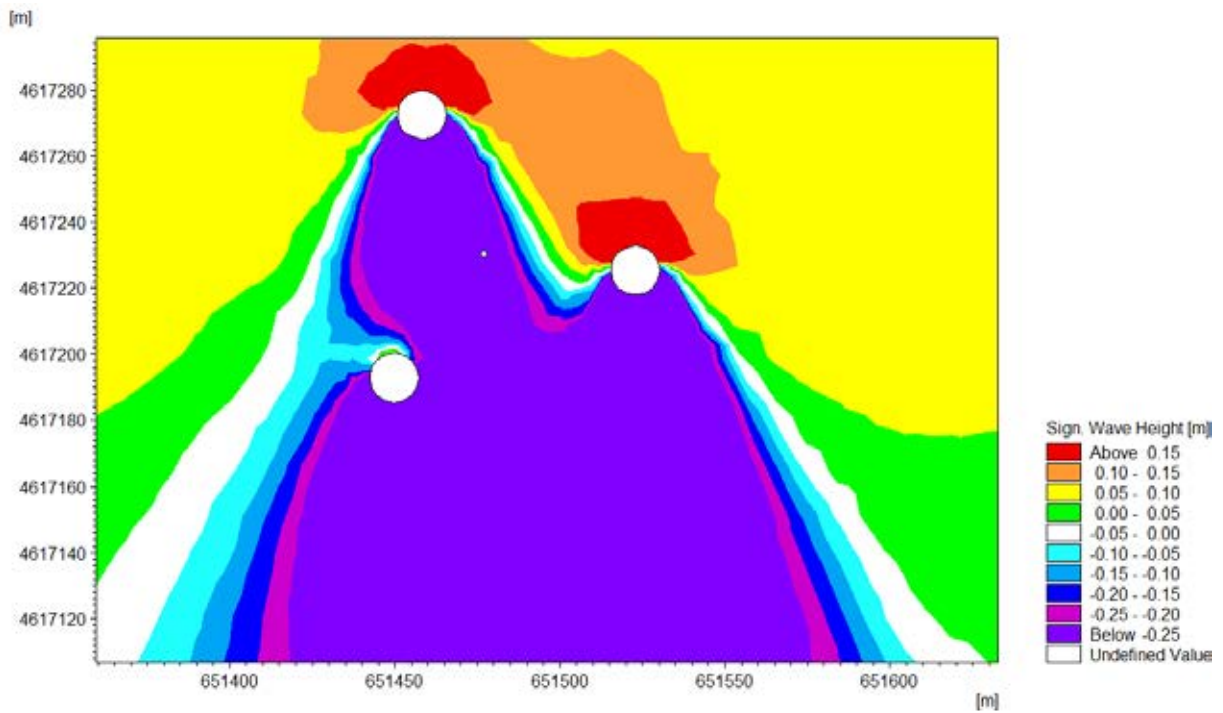
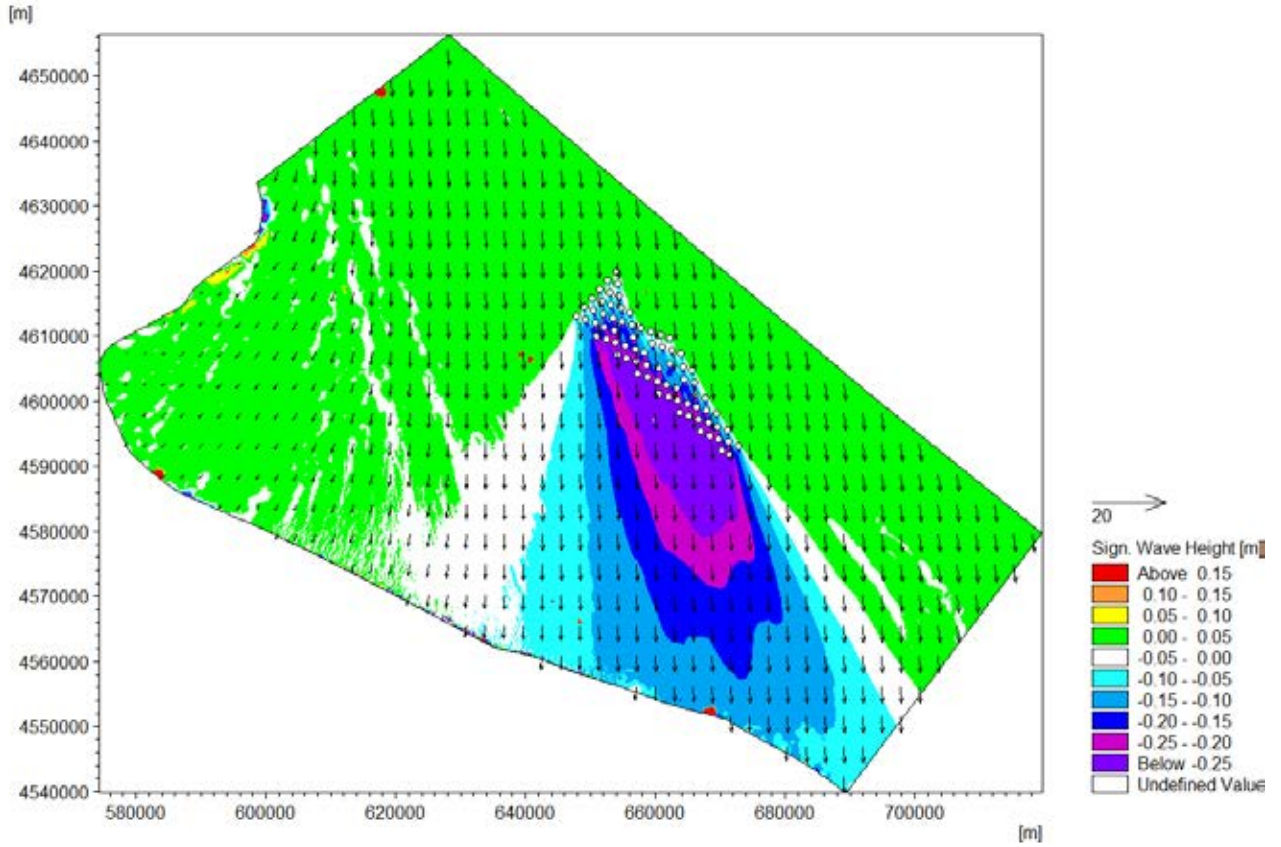
Stato ondoso 8, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



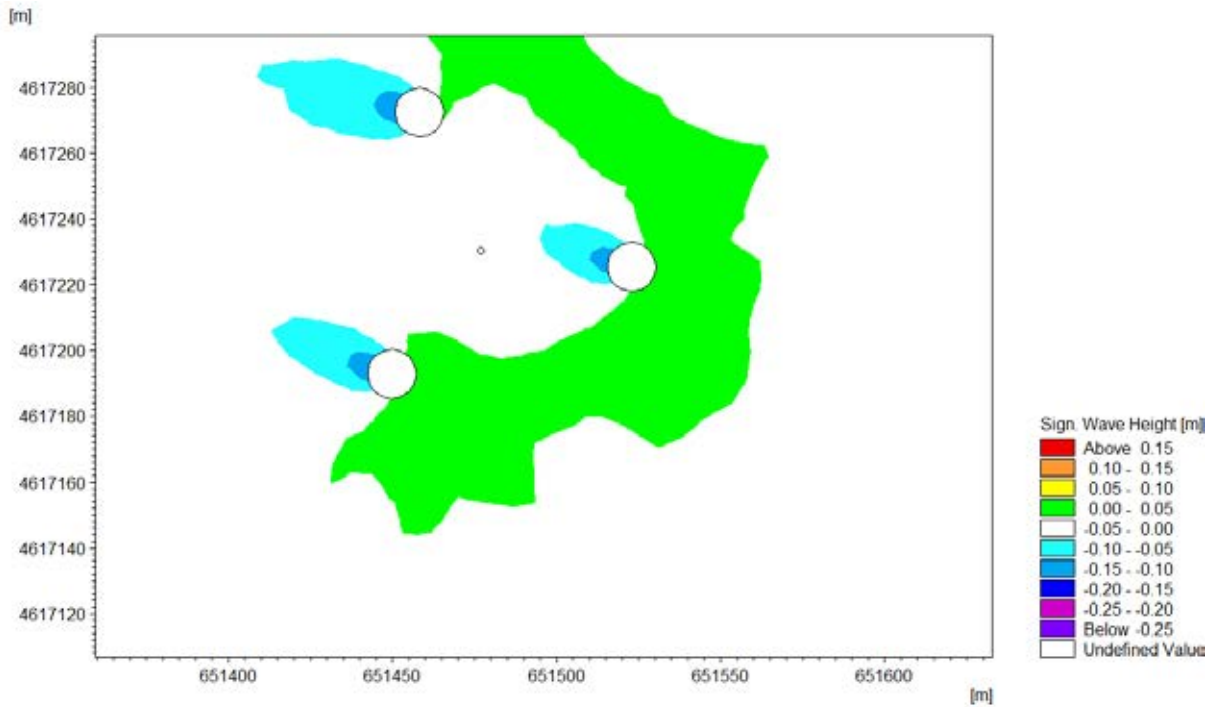
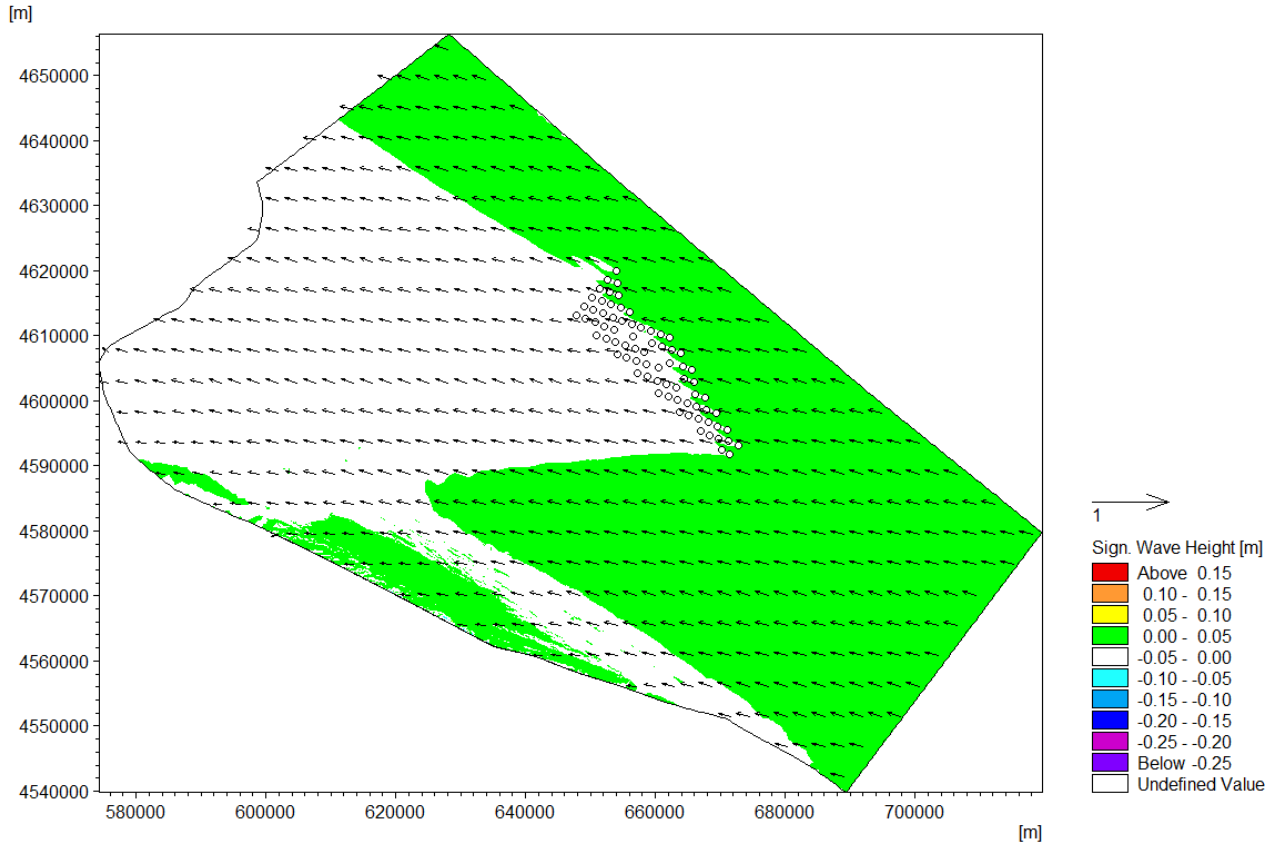
Stato ondosio 9, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



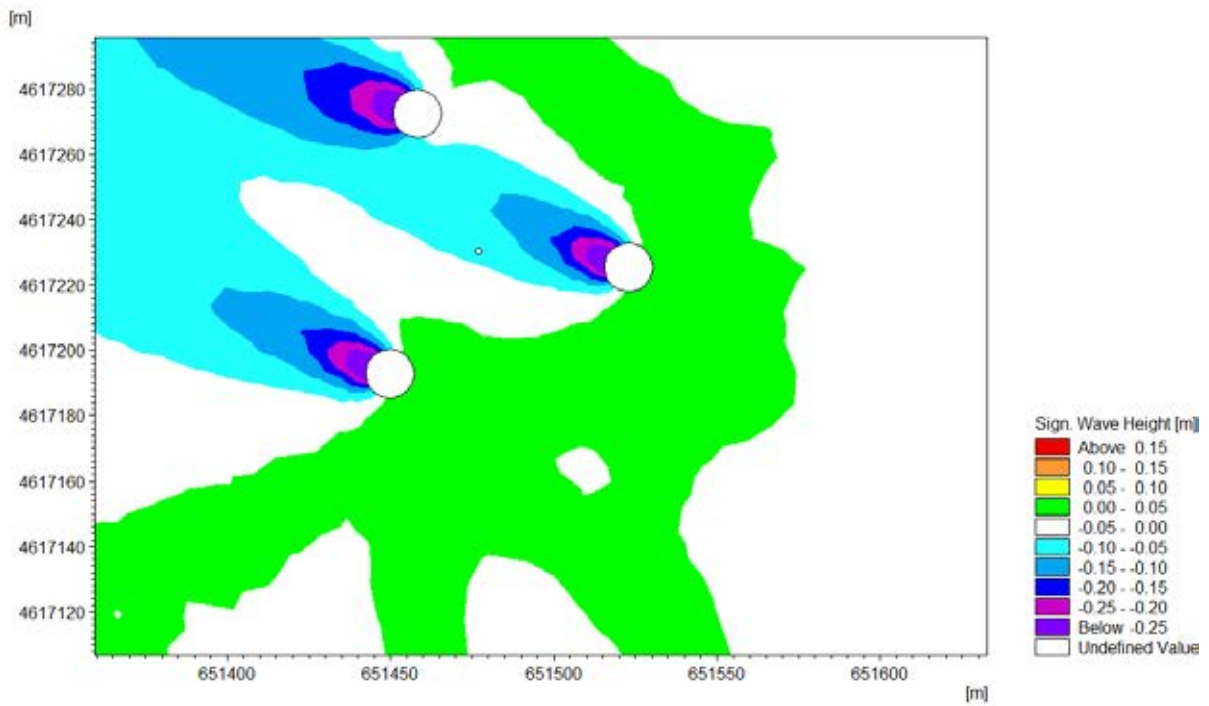
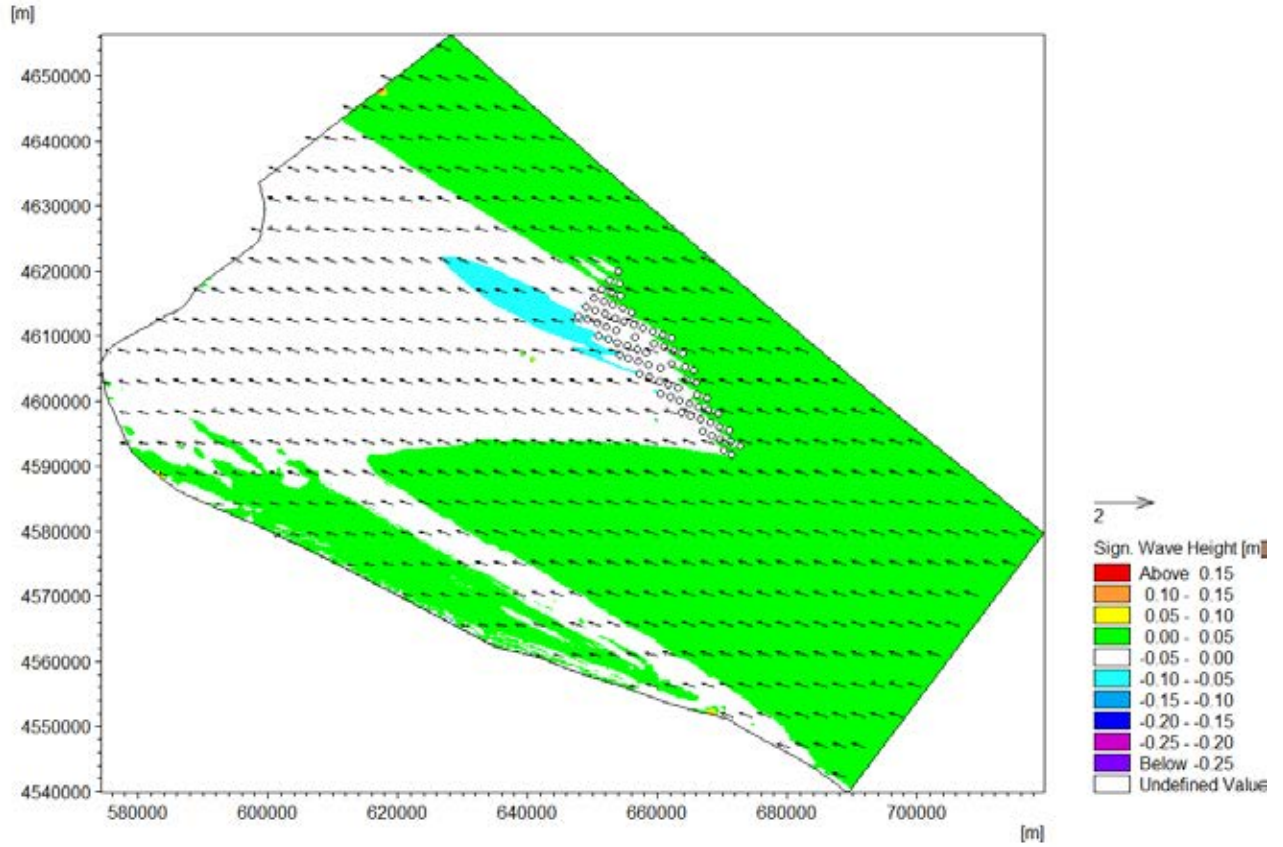
Stato ondoso 10, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



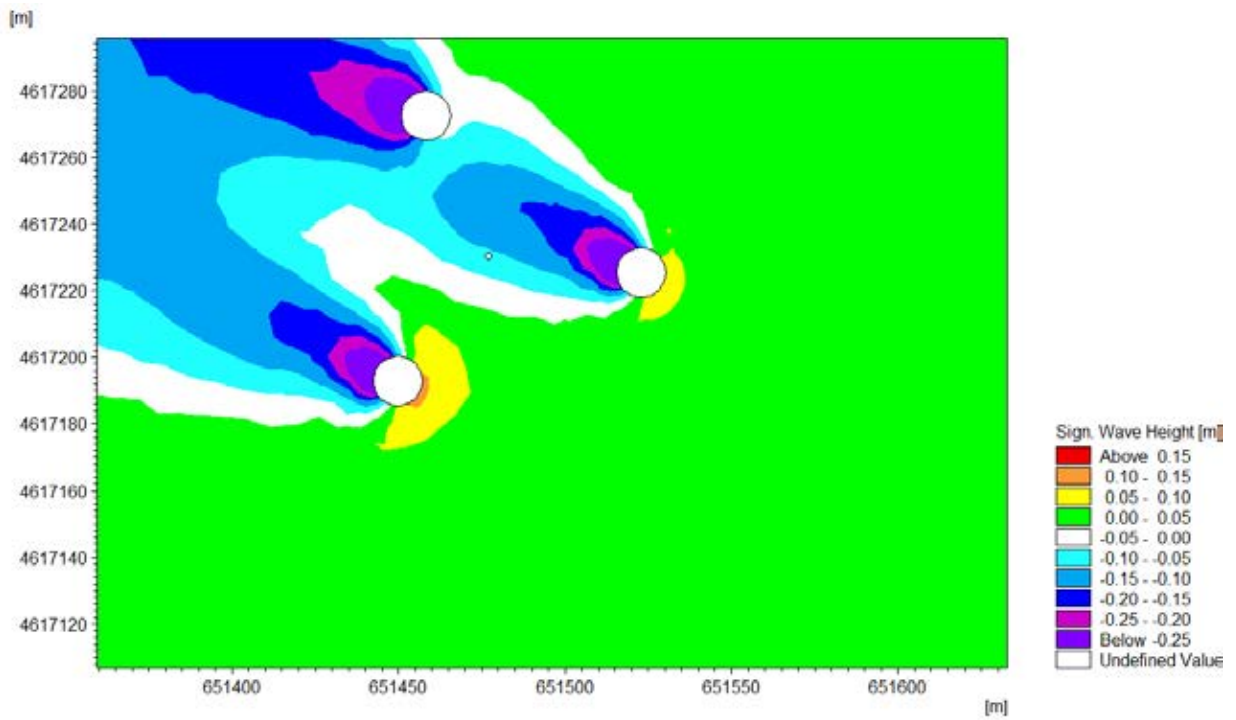
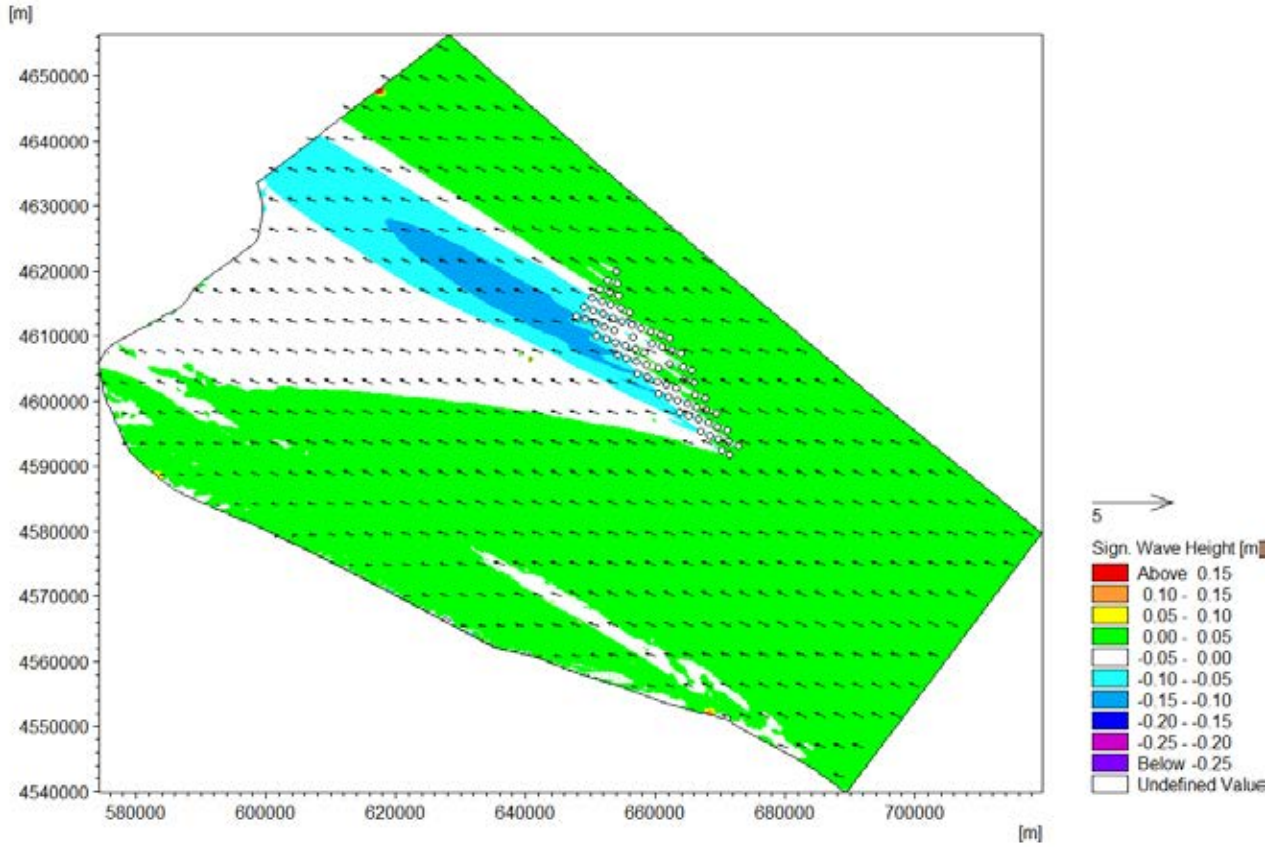
Stato ondoso 11, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



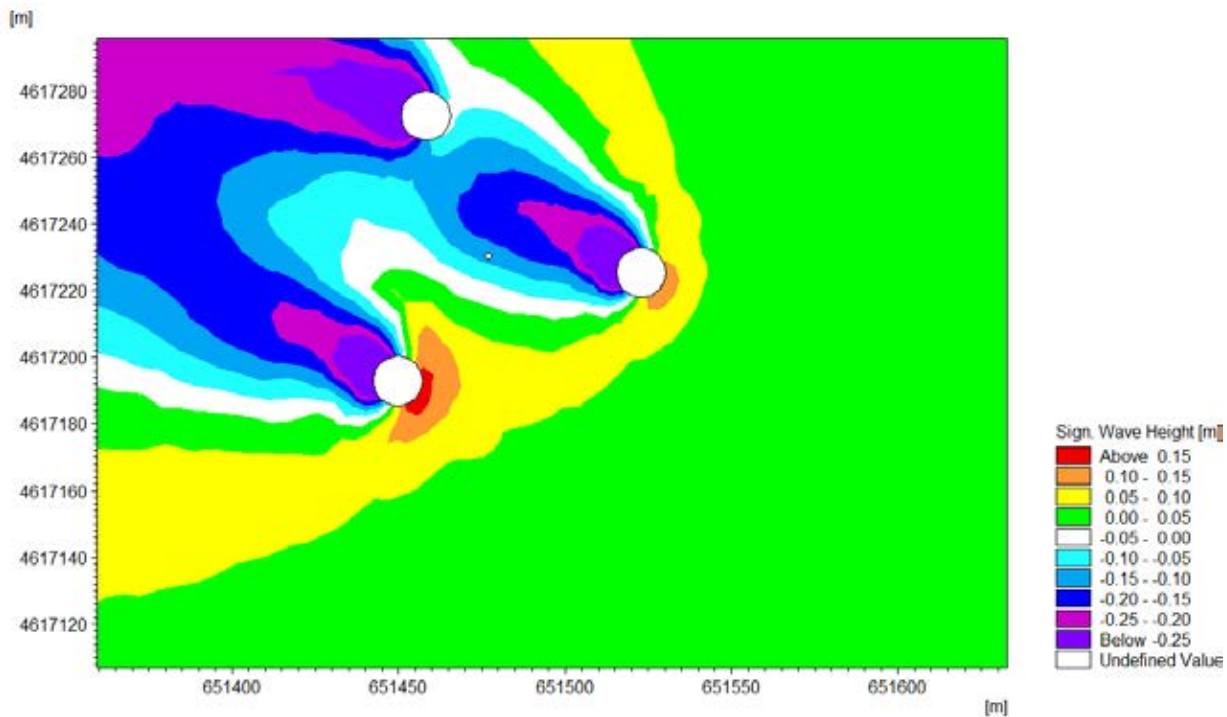
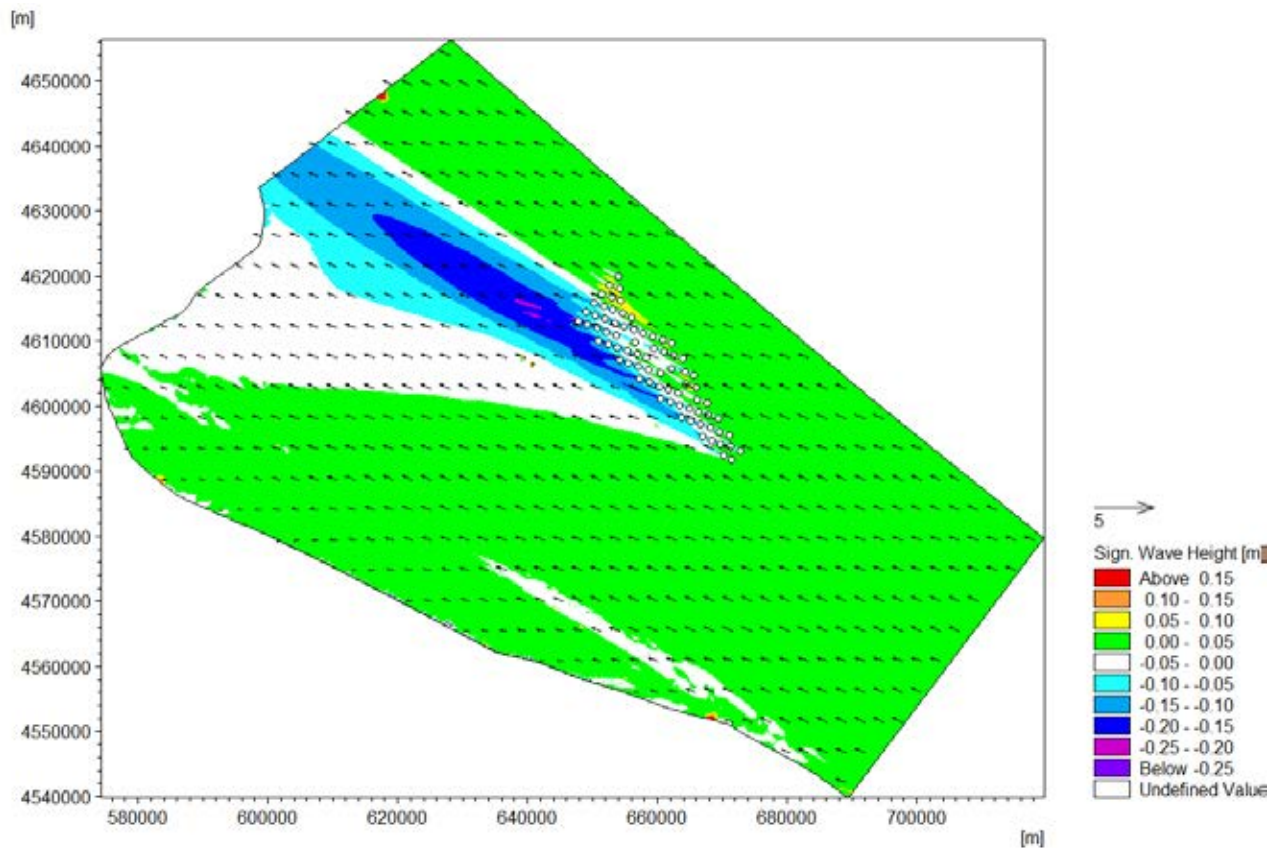
Stato ondoso 12, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



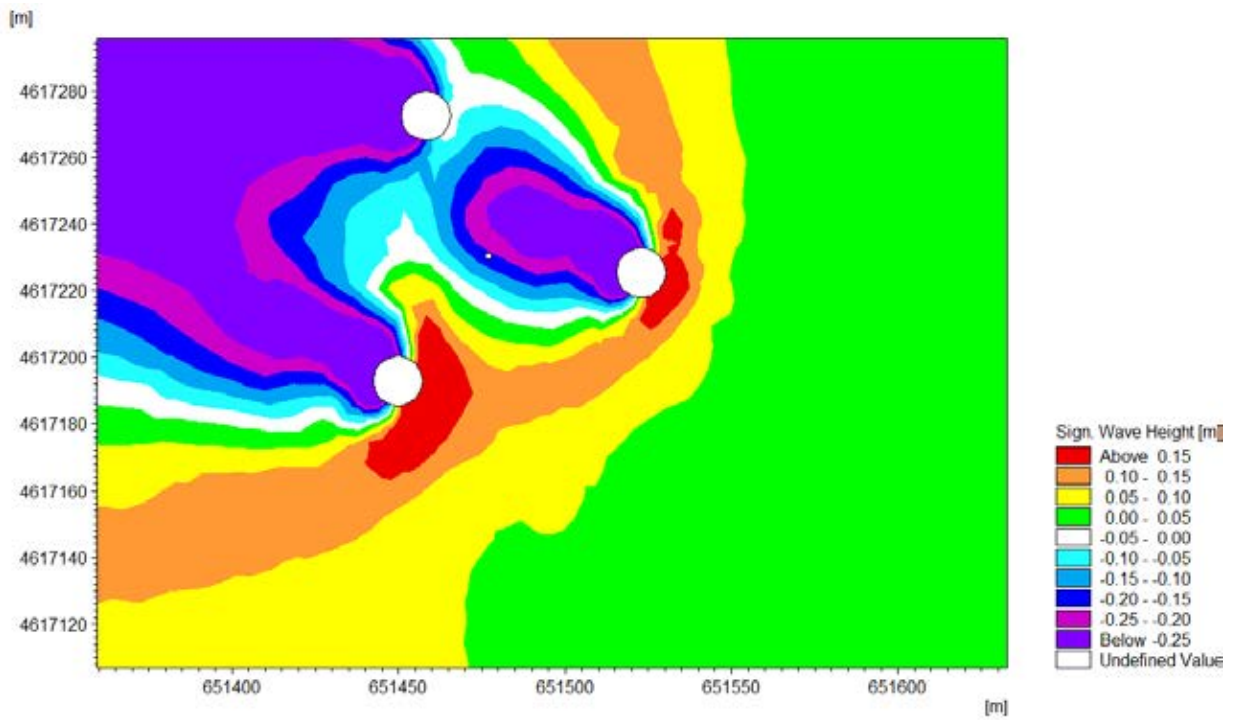
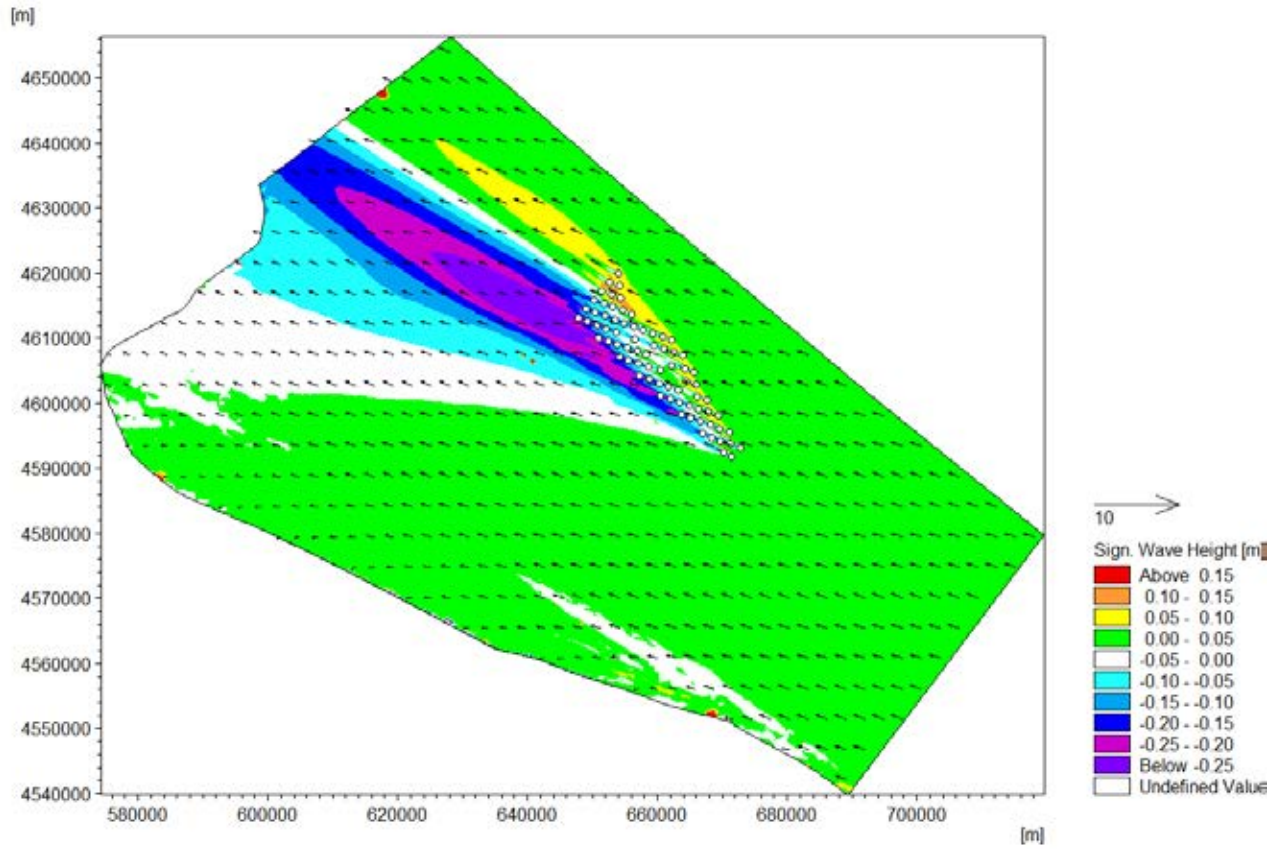
Stato ondoso 13, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



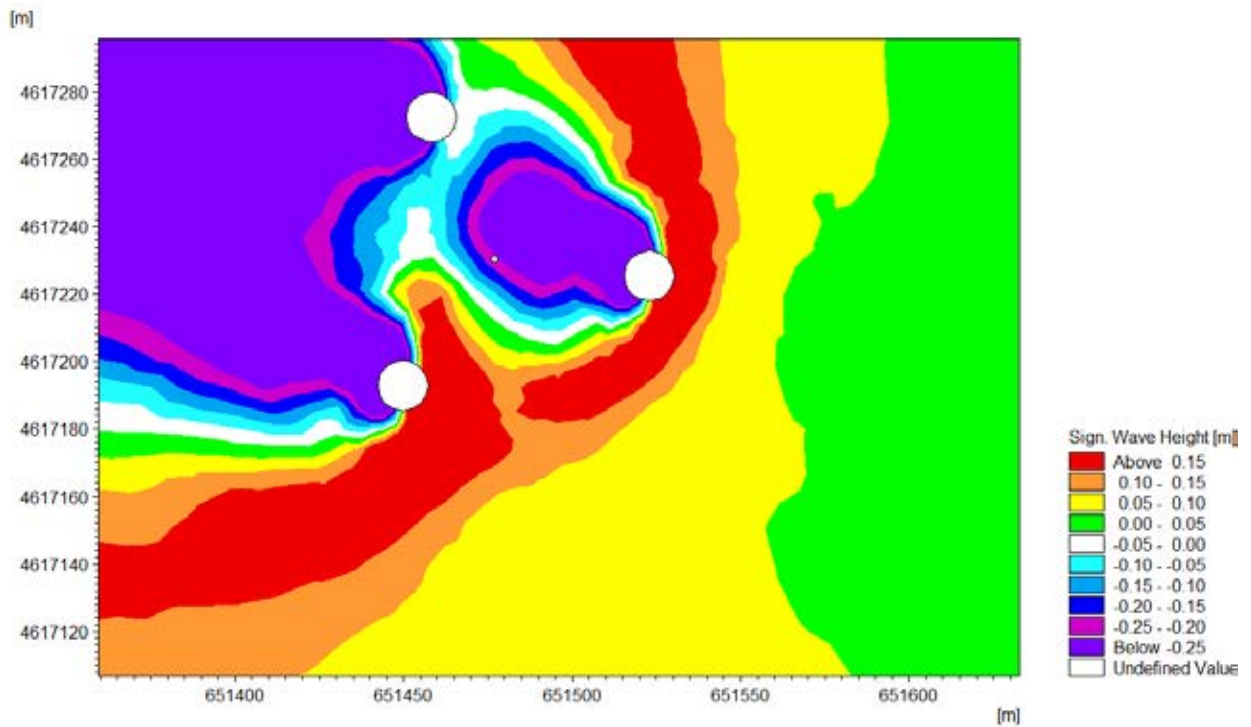
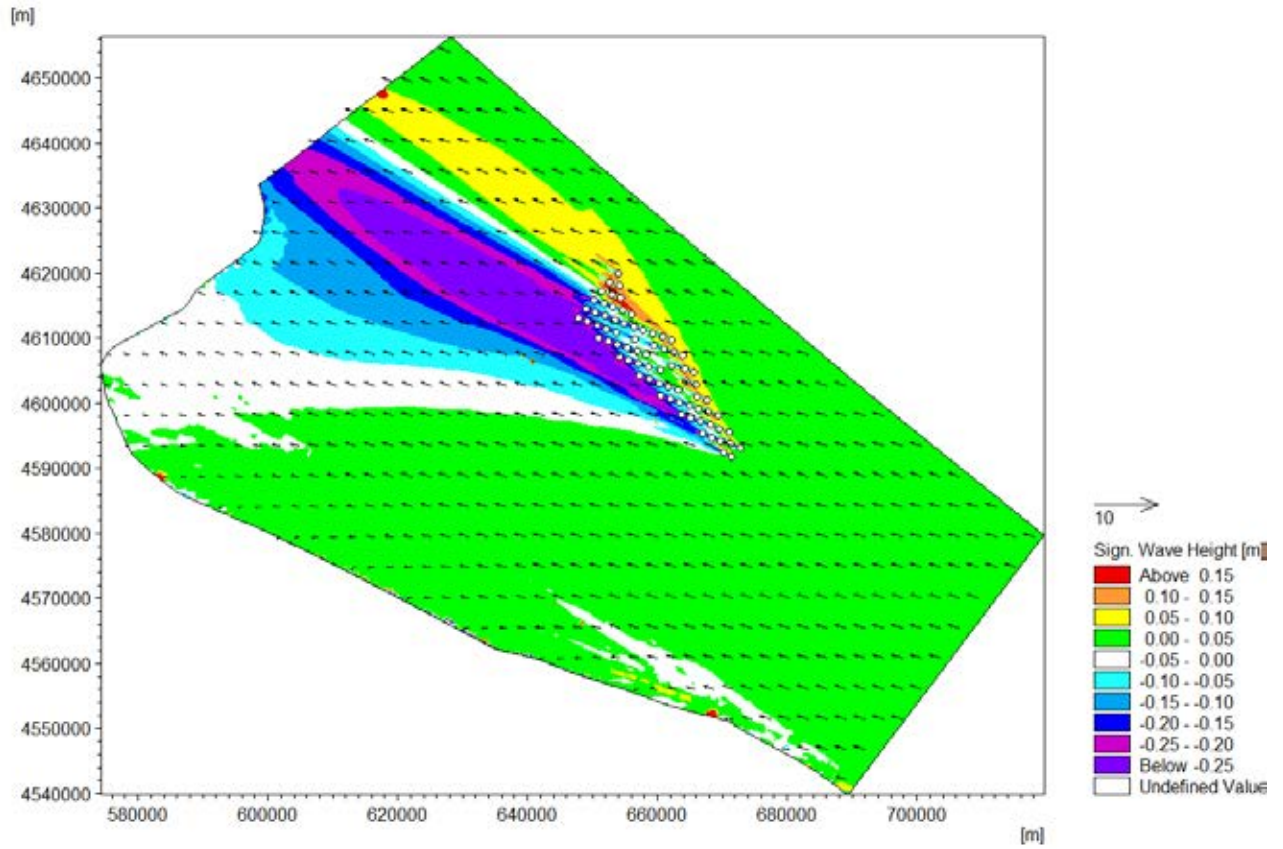
Stato ondoso 14, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



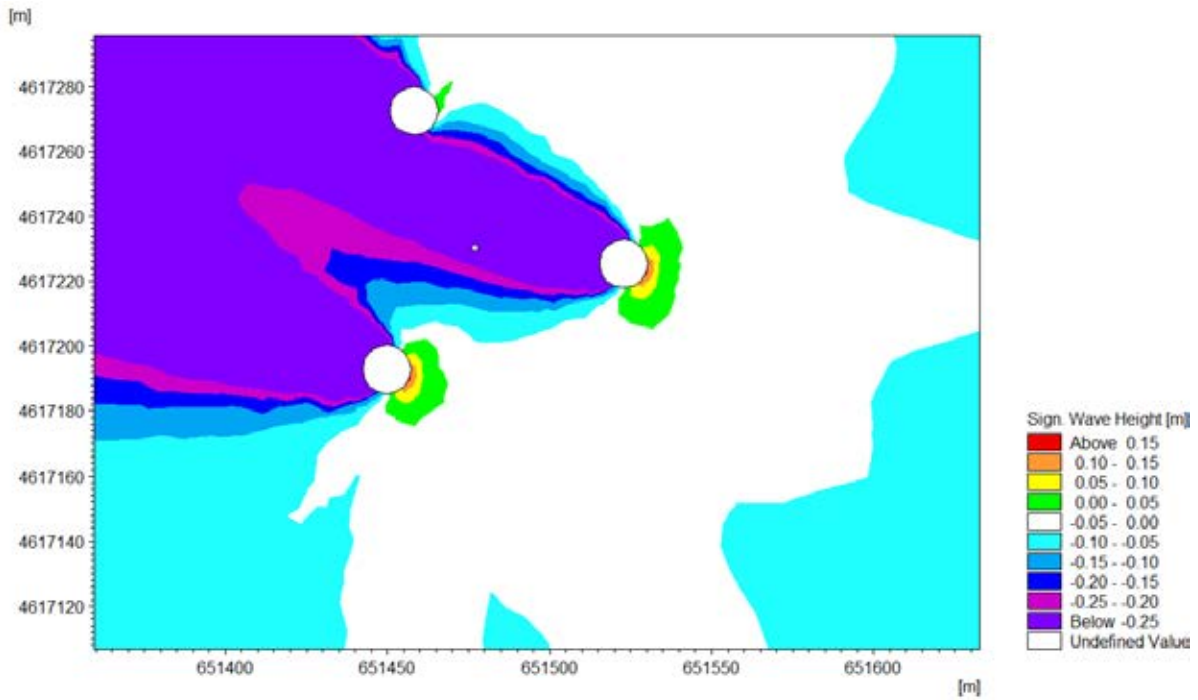
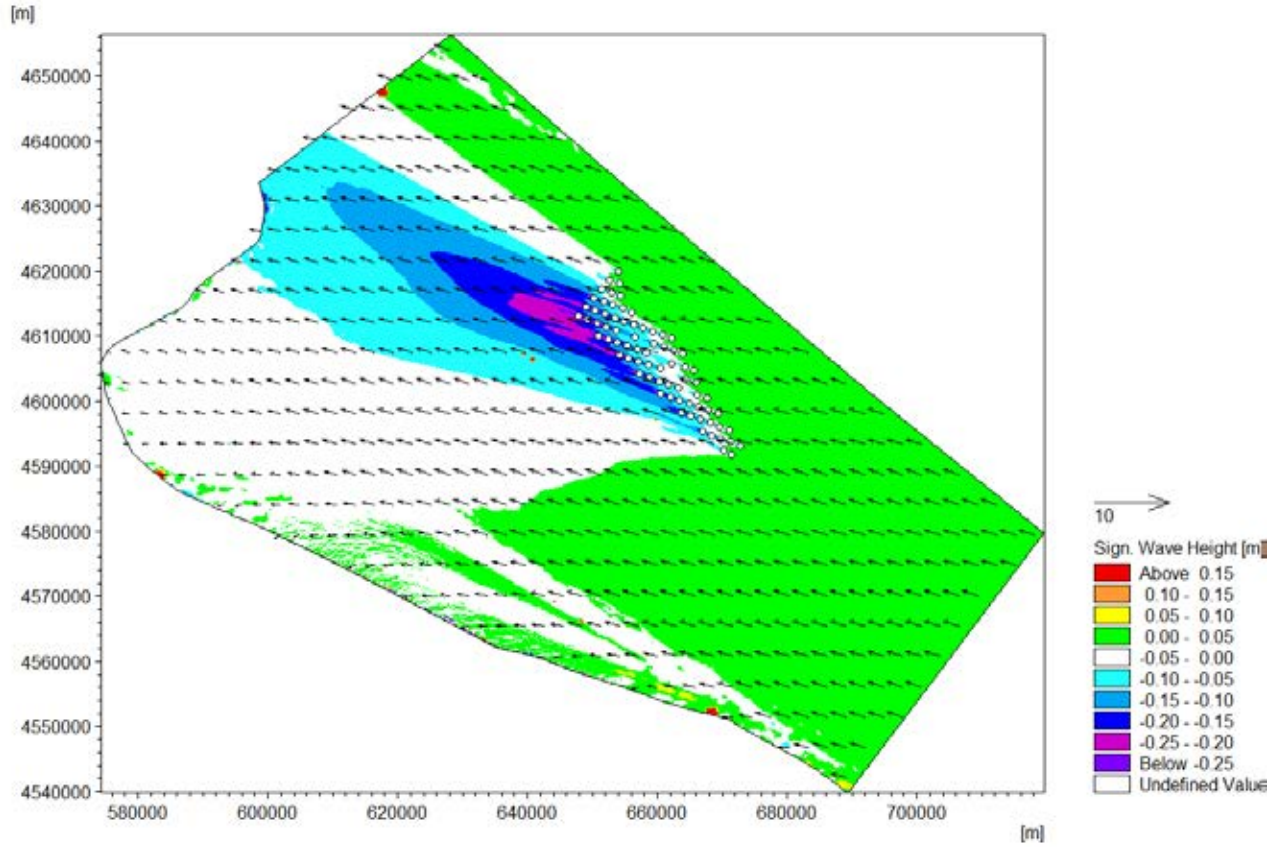
Stato ondoso 15, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



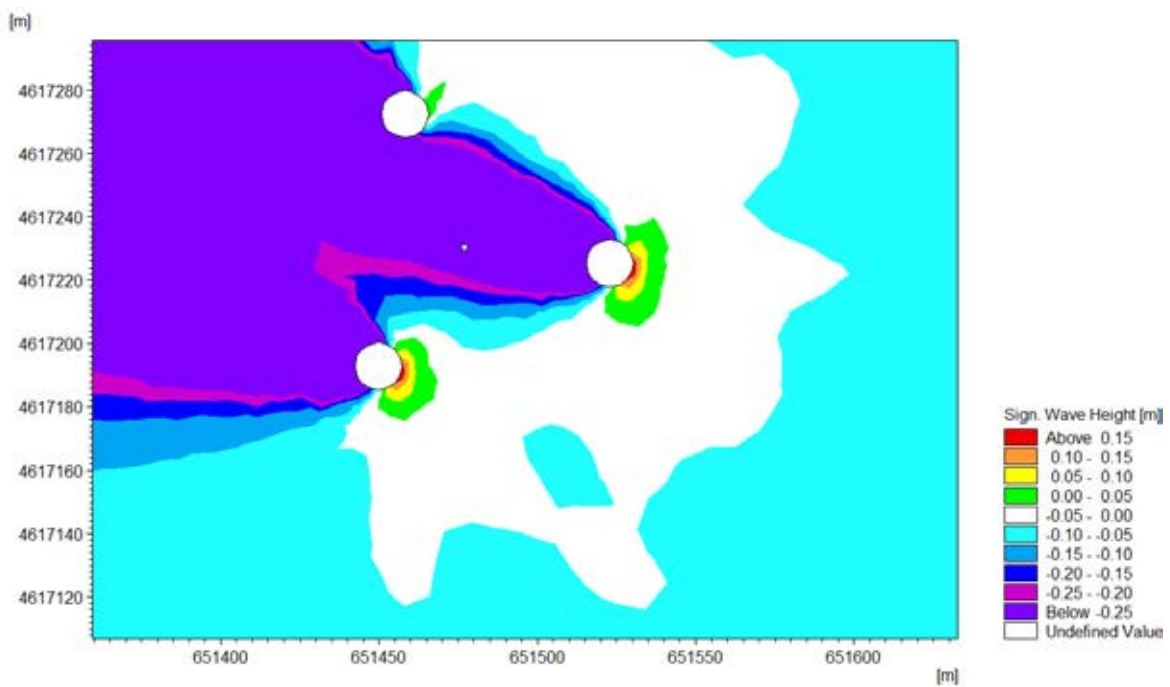
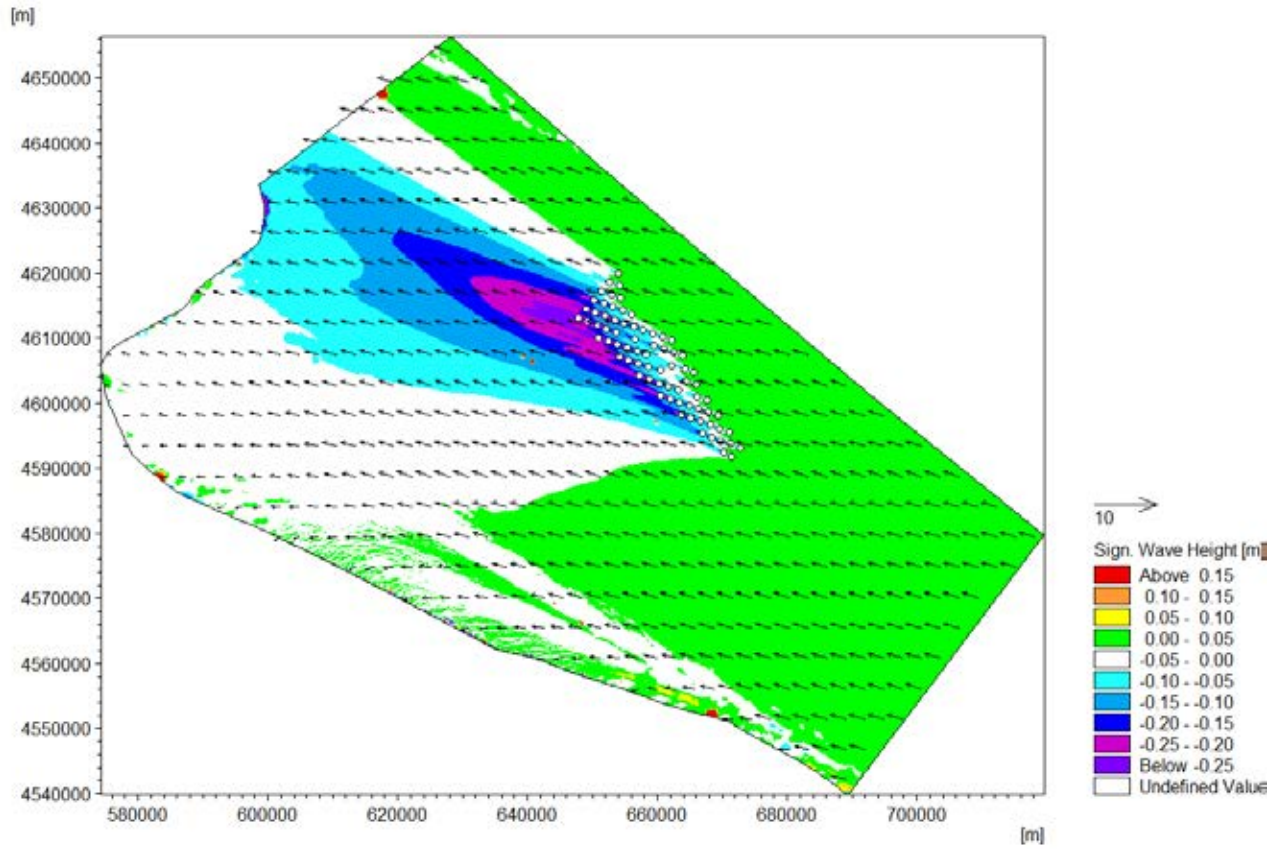
Stato ondoso 16, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



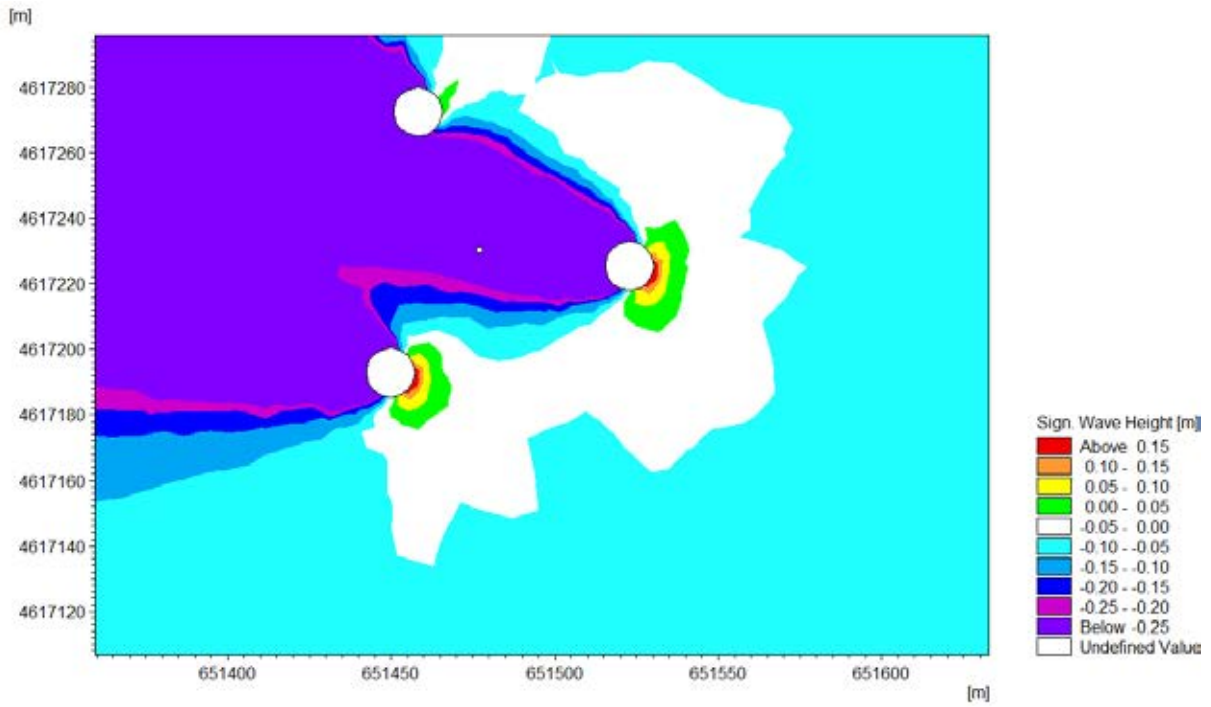
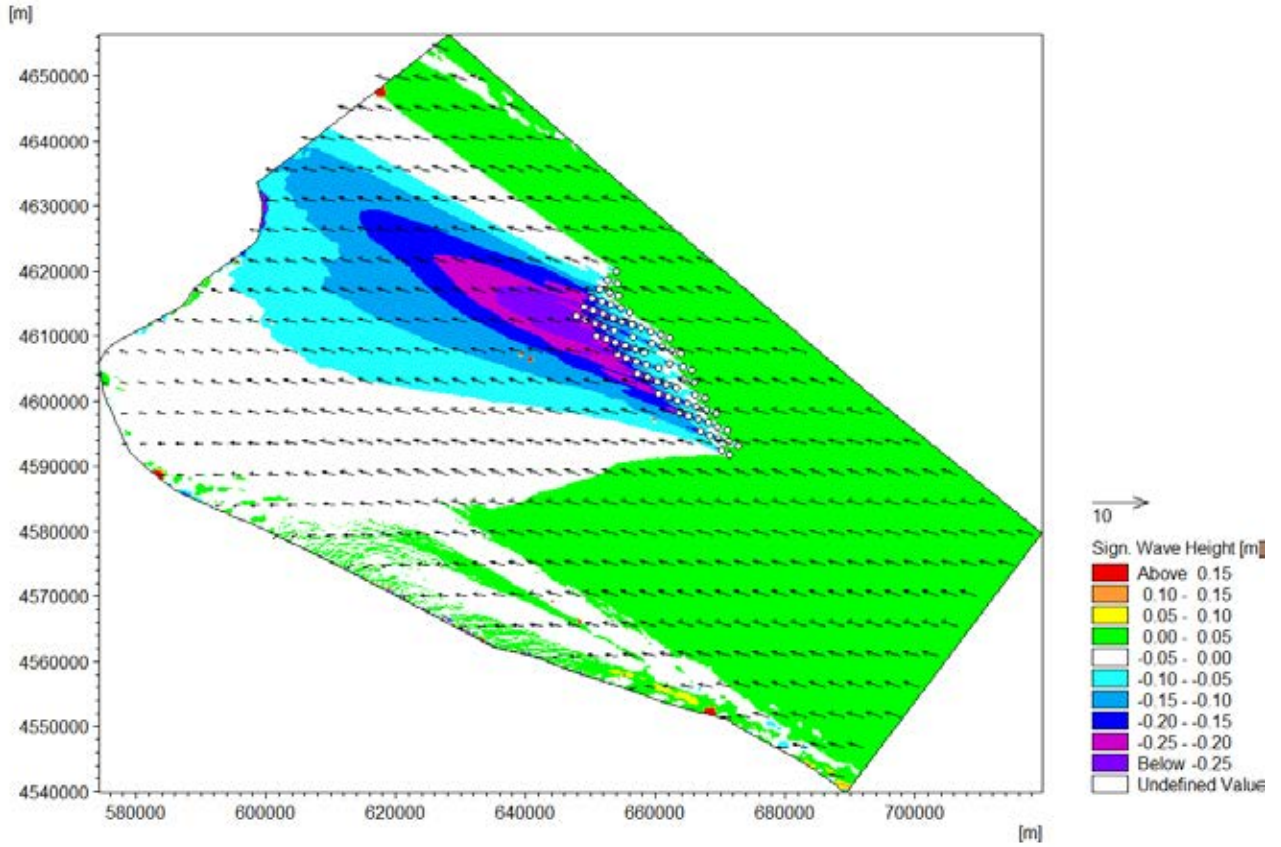
Stato ondoso 17, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



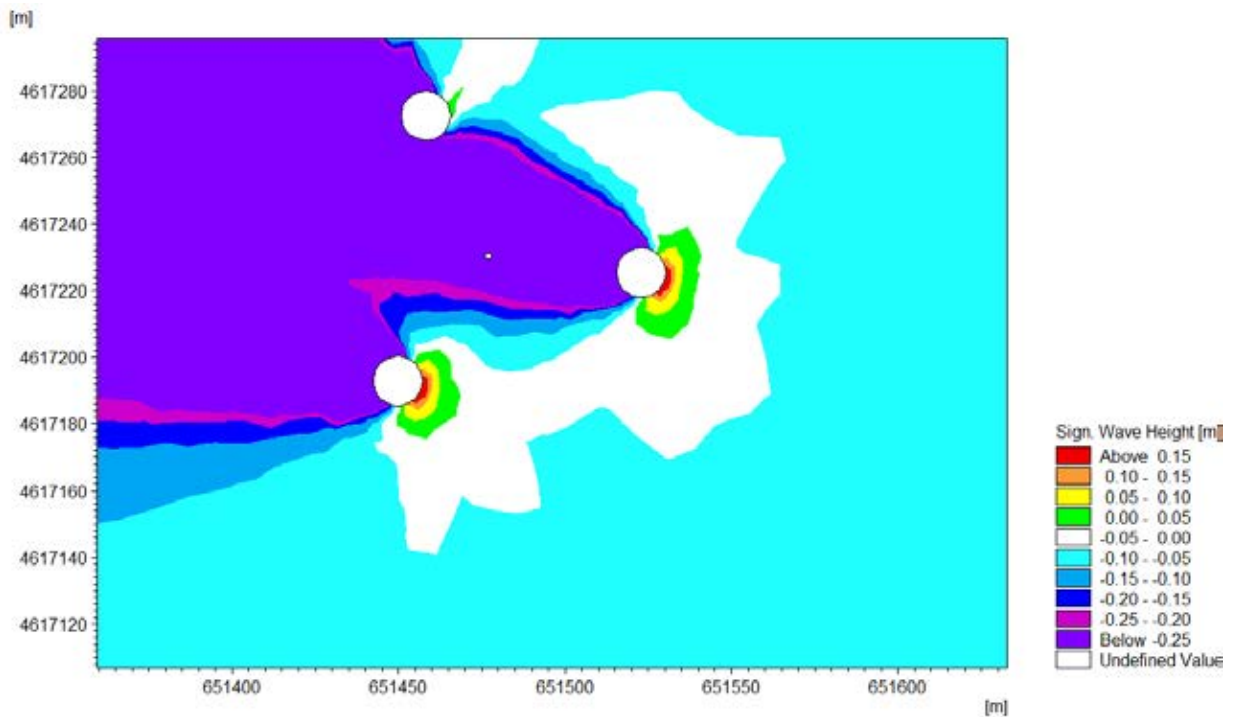
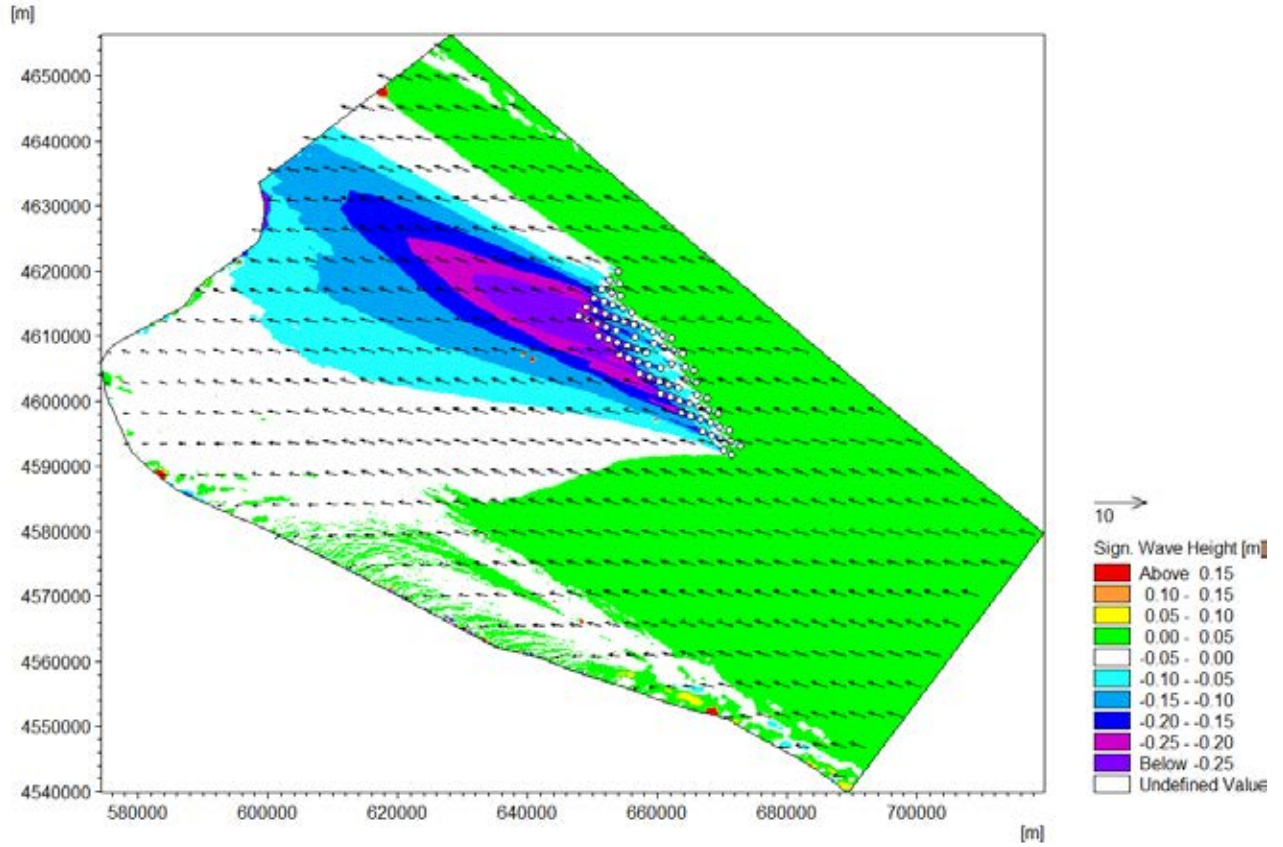
Stato ondoso 18, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettagli



Stato ondoso 19, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



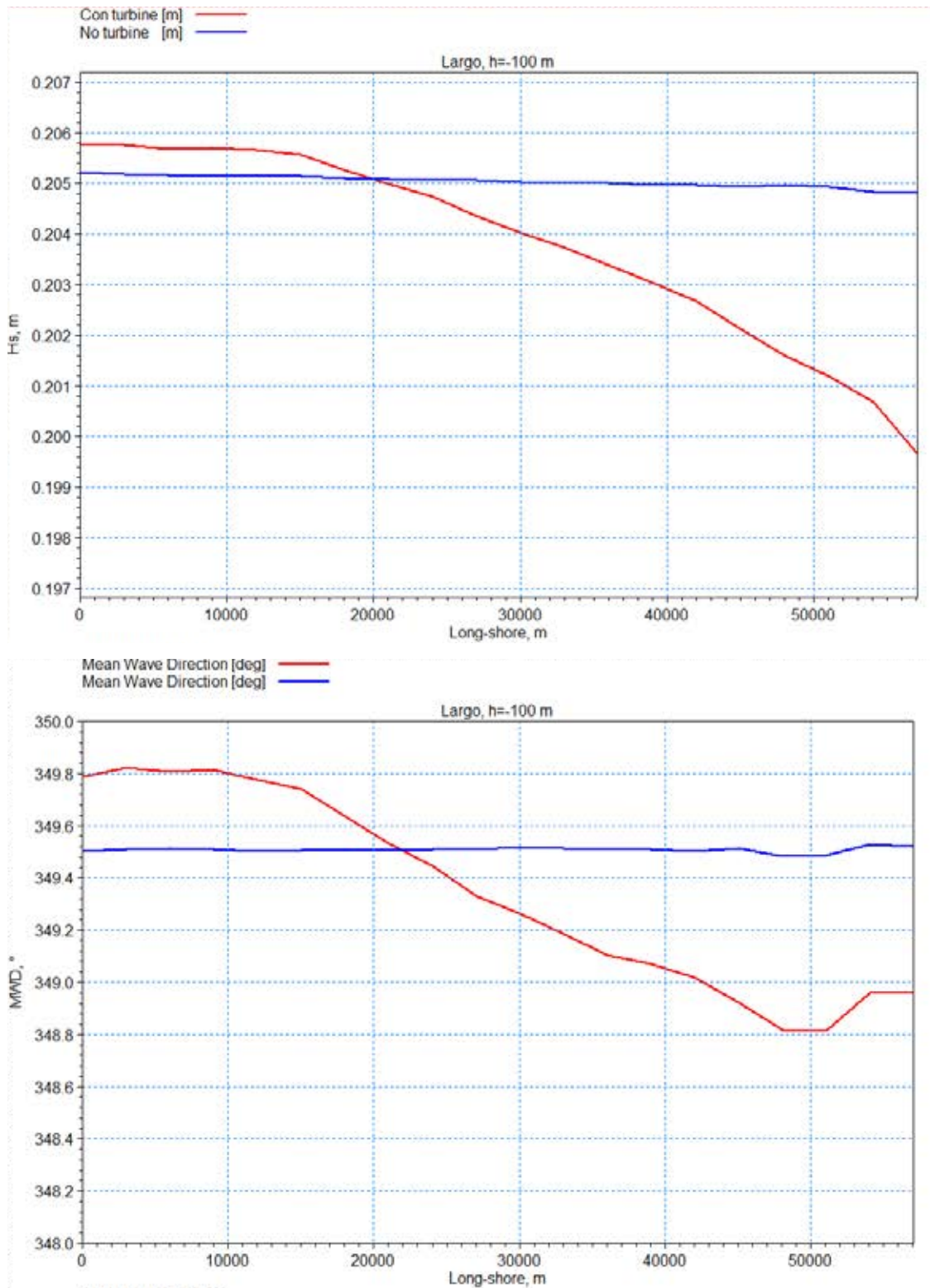
Stato ondoso 20, differenza del campo delle altezze d'onda in presenza di turbine R=50% e in assenza di turbine eoliche, vista completa e dettaglio



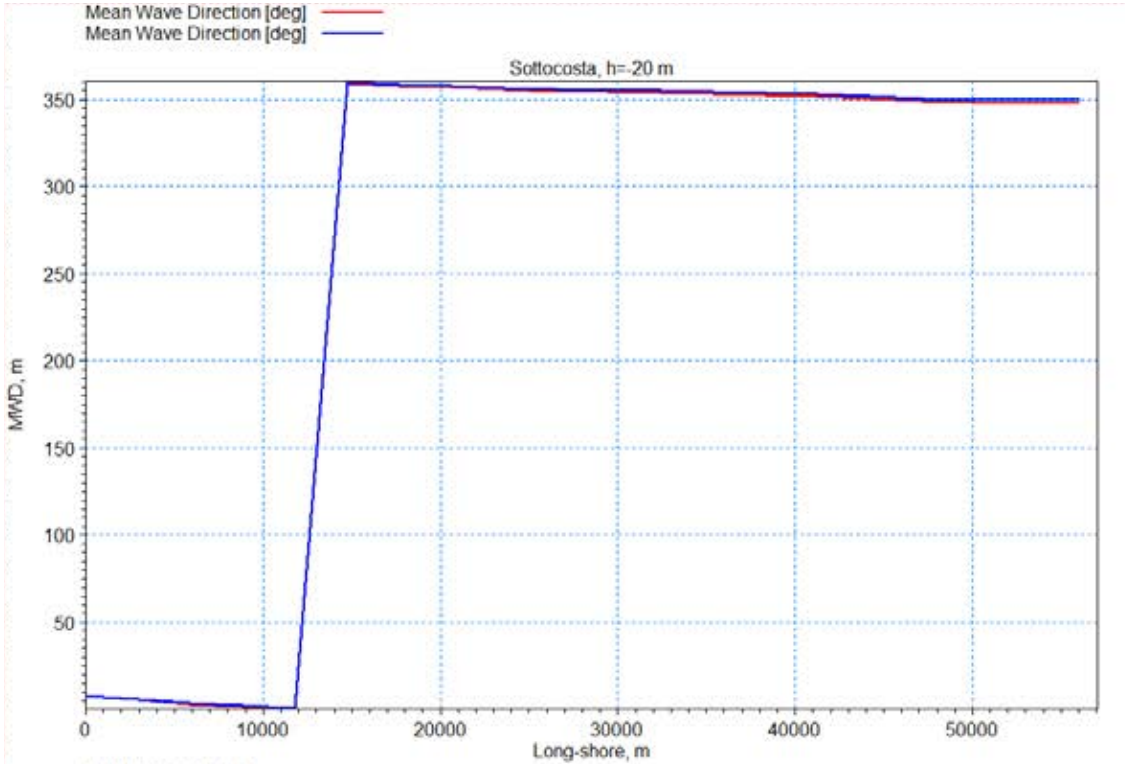
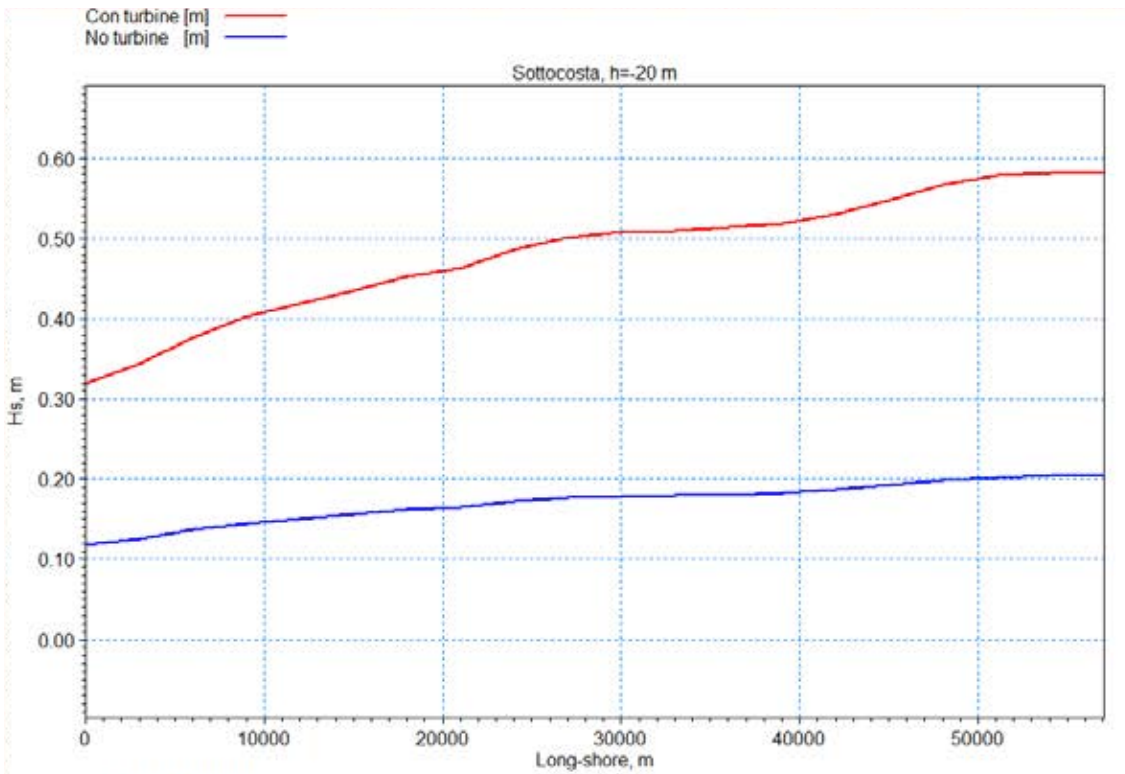
12.2 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA D'ONDA E DELLA DIREZIONE AL LARGO E SOTTOCOSTA

Per tutti gli stati ondosi in Tab. II.6, sono dapprima riportati i grafici delle altezze d'onda e delle direzioni estratte al largo davanti al parco, lungo l'isobata corrispondente al fondale $h=100$ m, e quindi i grafici delle altezze d'onda e delle direzioni estratte sotto-costa, lungo l'isobata corrispondente al fondale $h=20$ m.

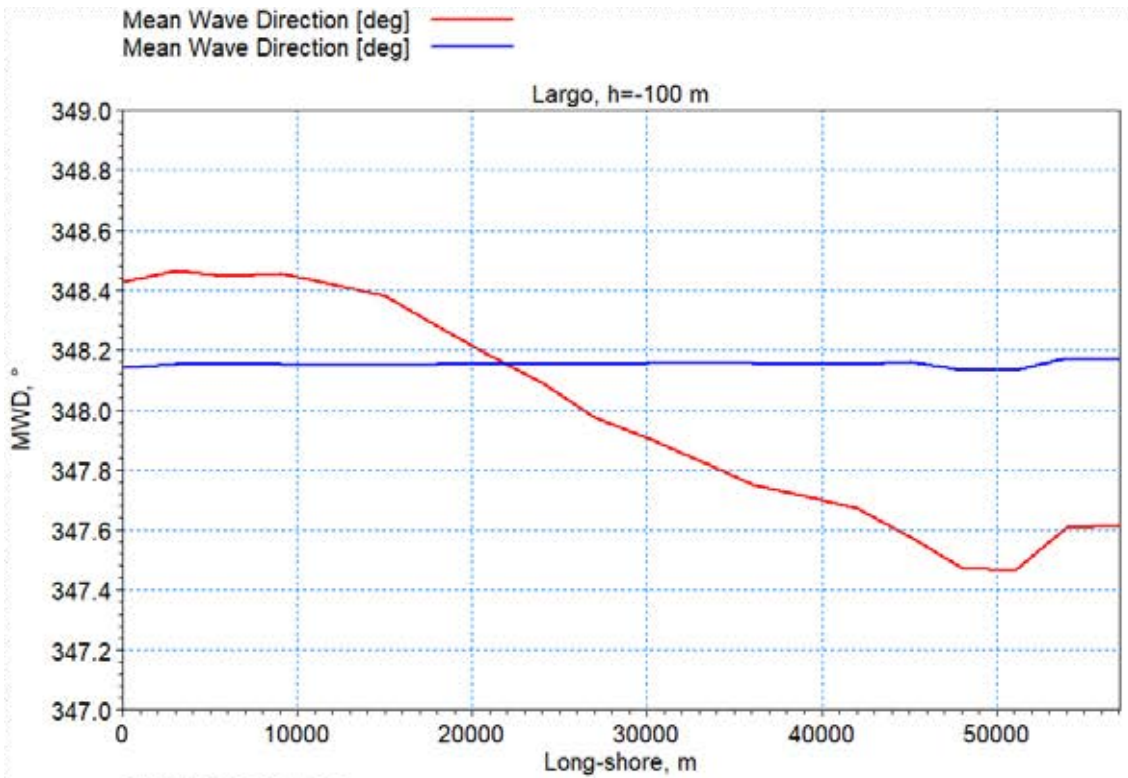
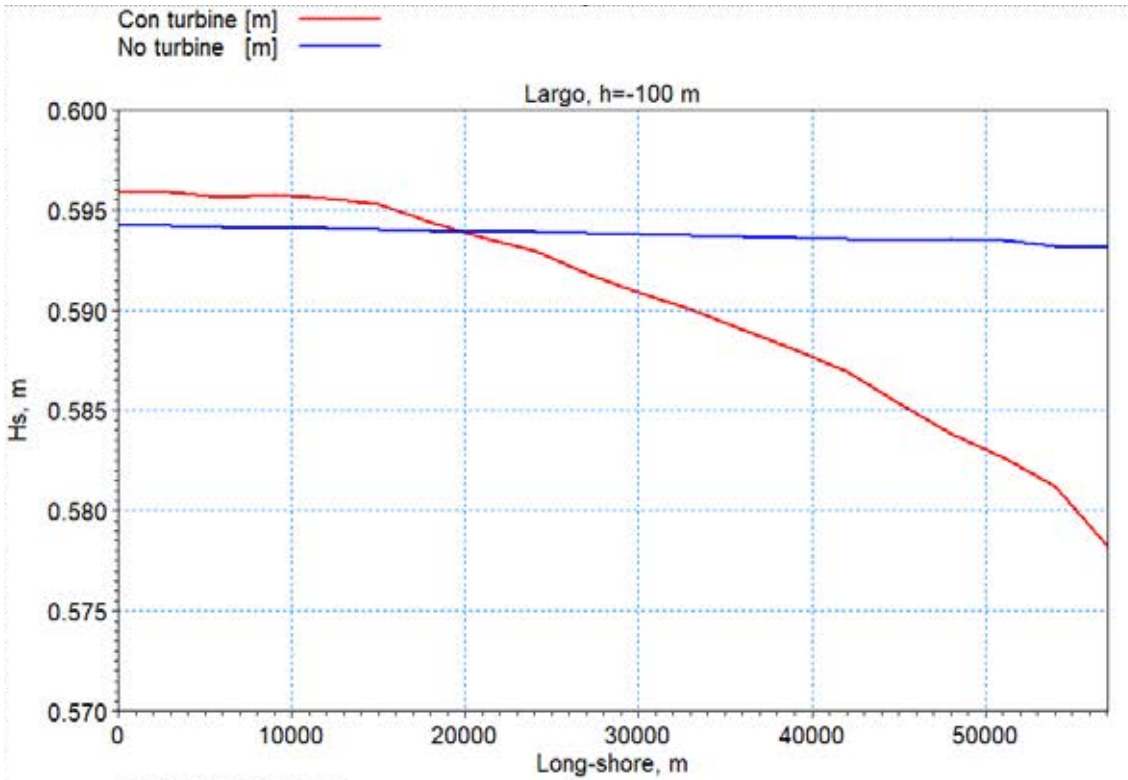
I grafici nelle pagine seguenti mostrano i valori di altezza d'onda significativa e della direzione nel caso di presenza ed assenza del campo eolico. In ogni pagina, per ciascuno stato ondoso, sono riportati due grafici: il grafico in alto mostra le altezze d'onda significativa e il grafico in basso mostra la direzione media.

Stato ondoso 1, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m

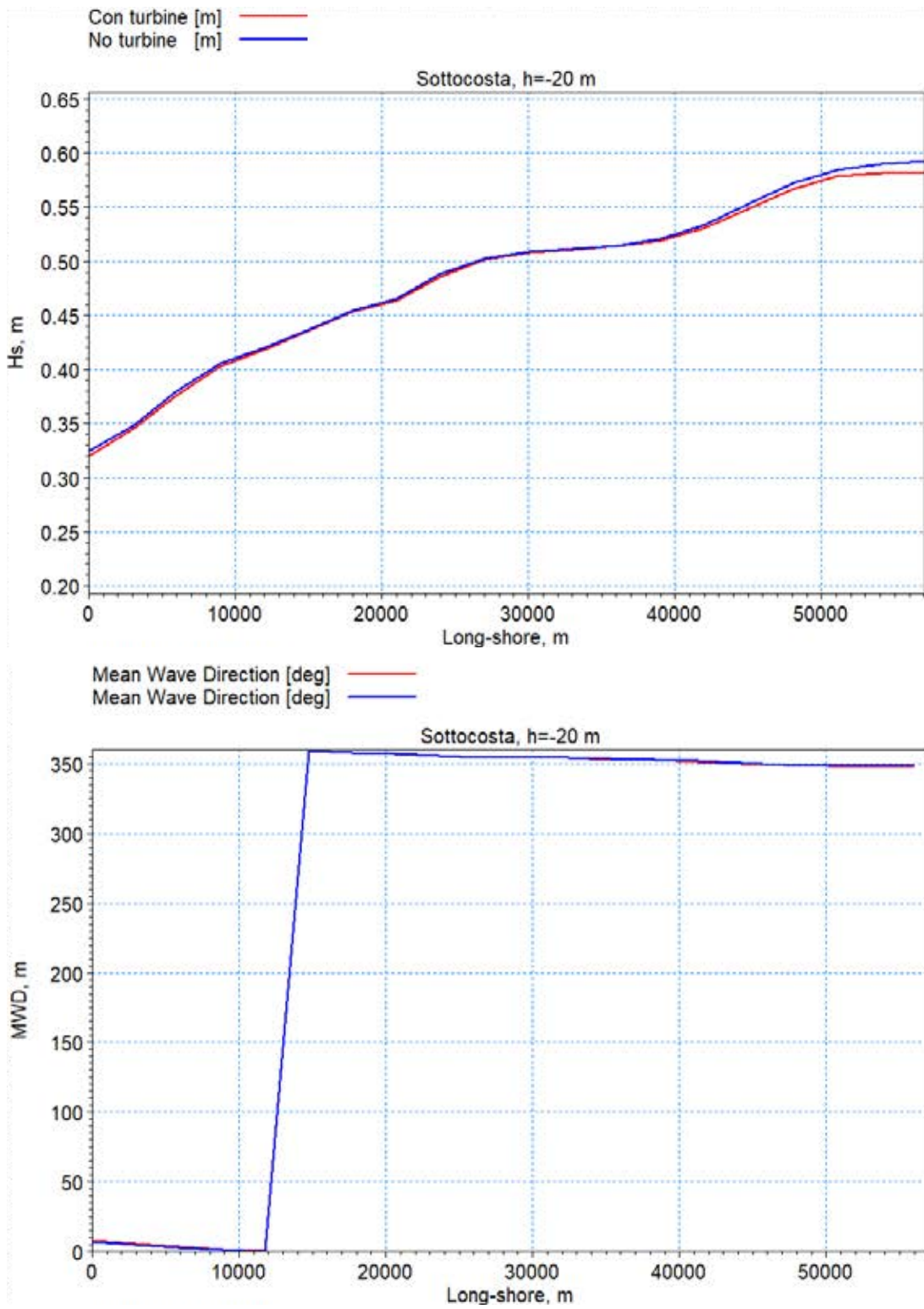
Stato ondoso 1, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



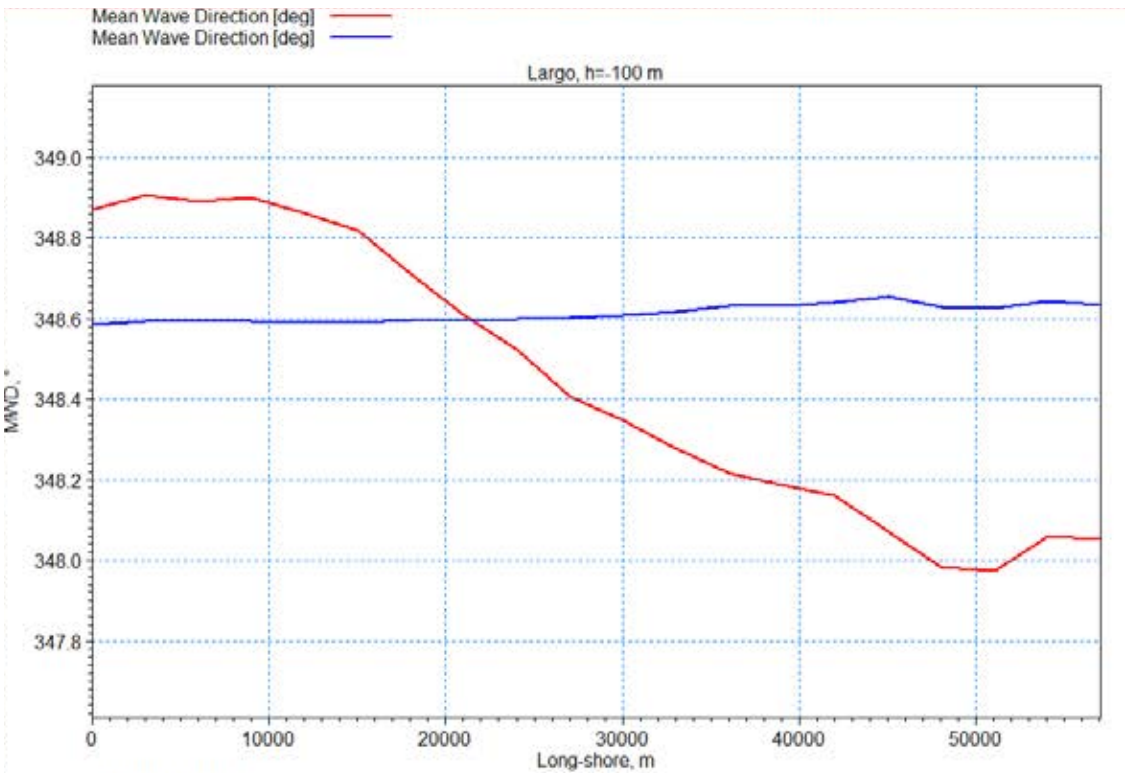
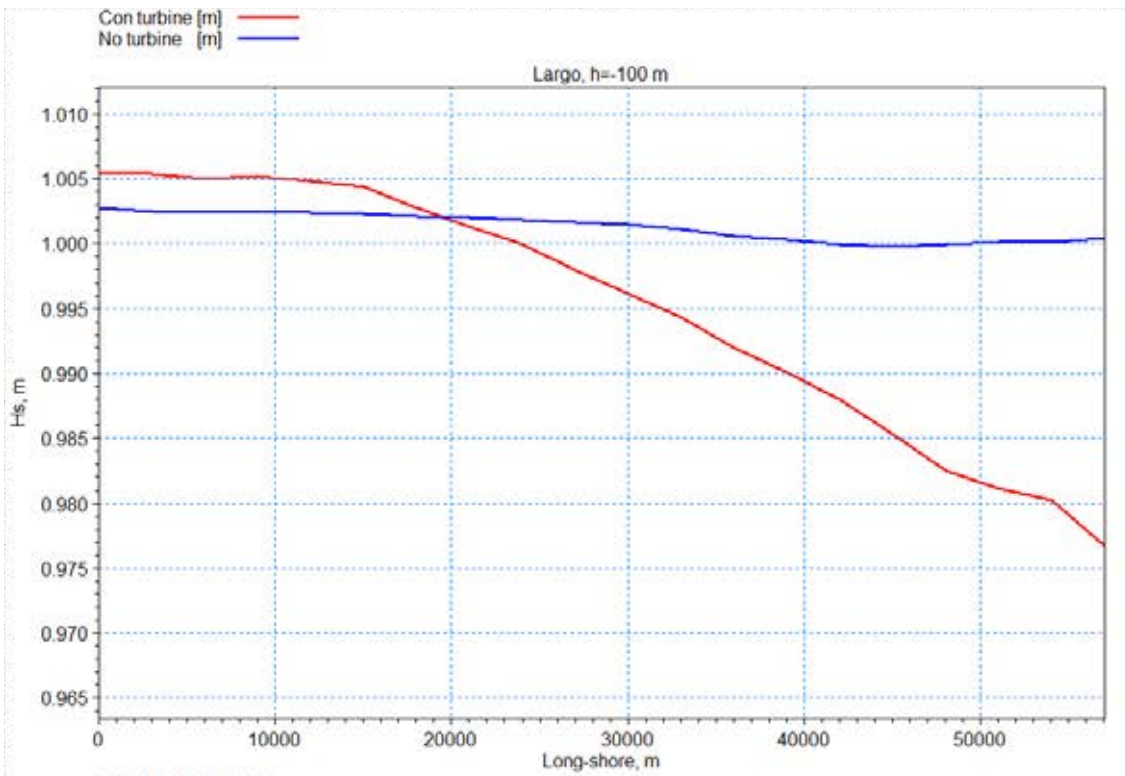
Stato ondoso 2, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



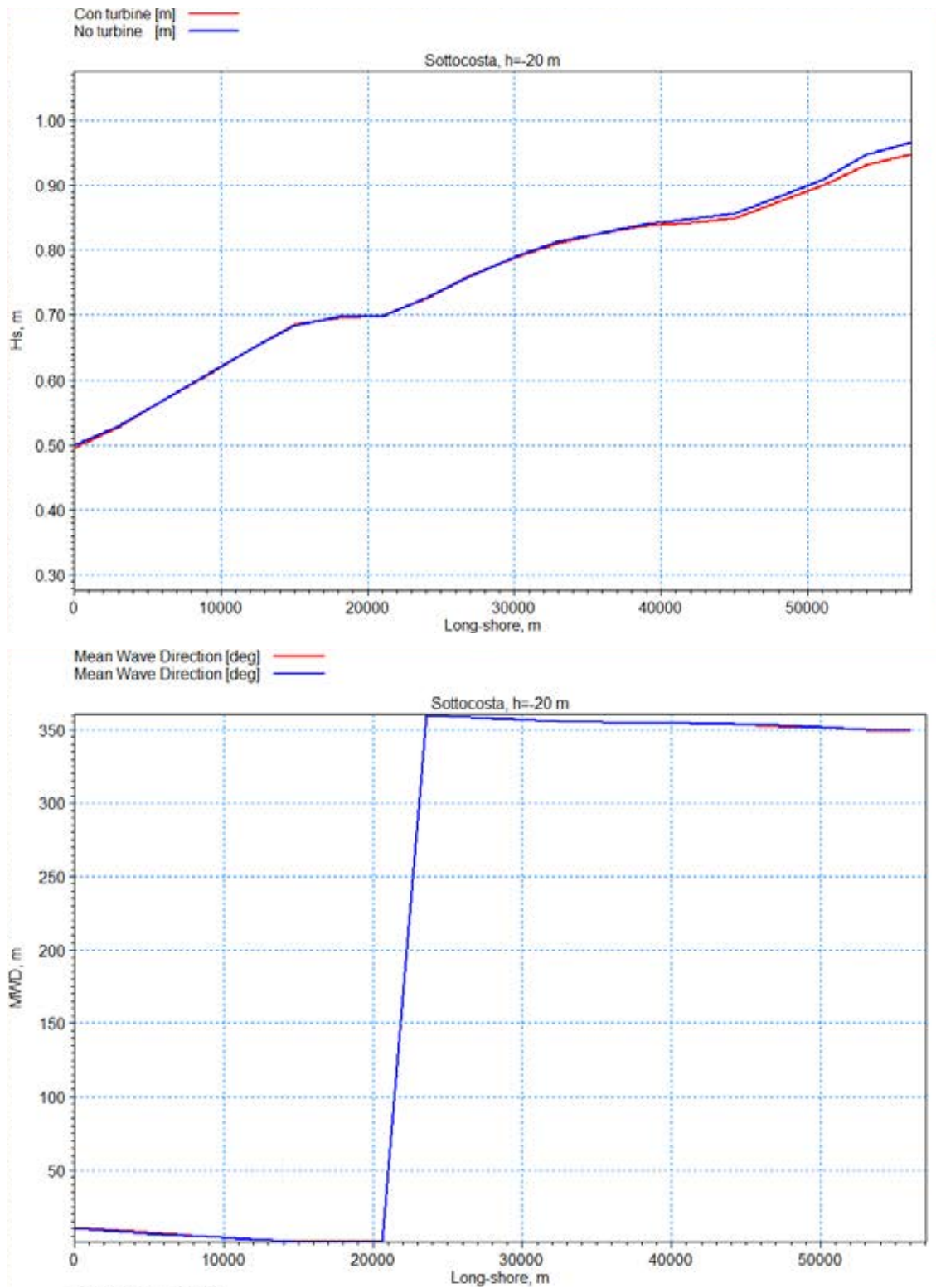
Stato ondoso 2, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



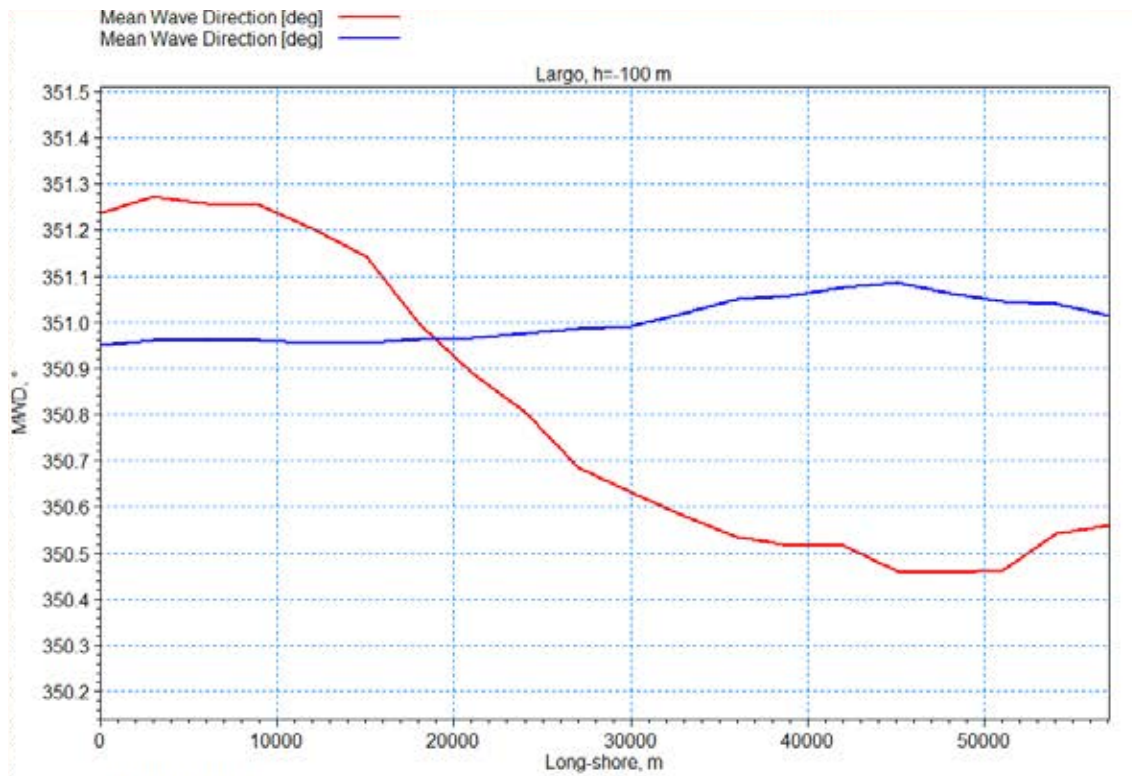
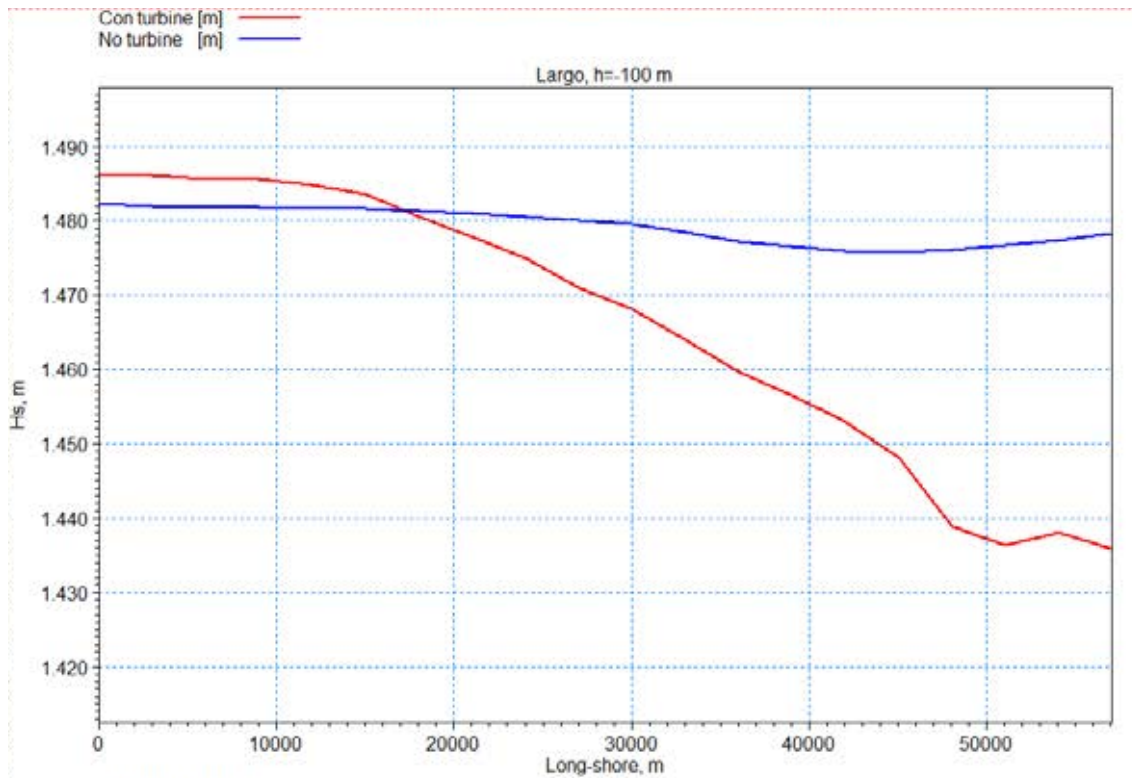
Stato ondoso 3, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



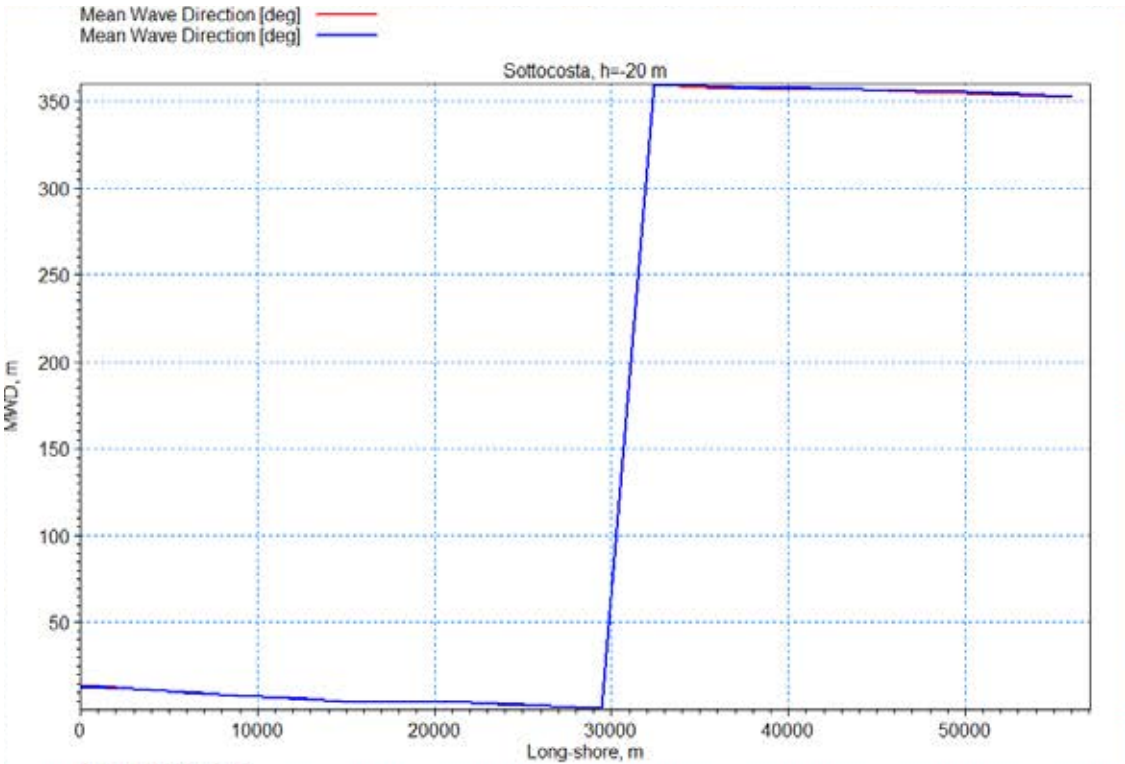
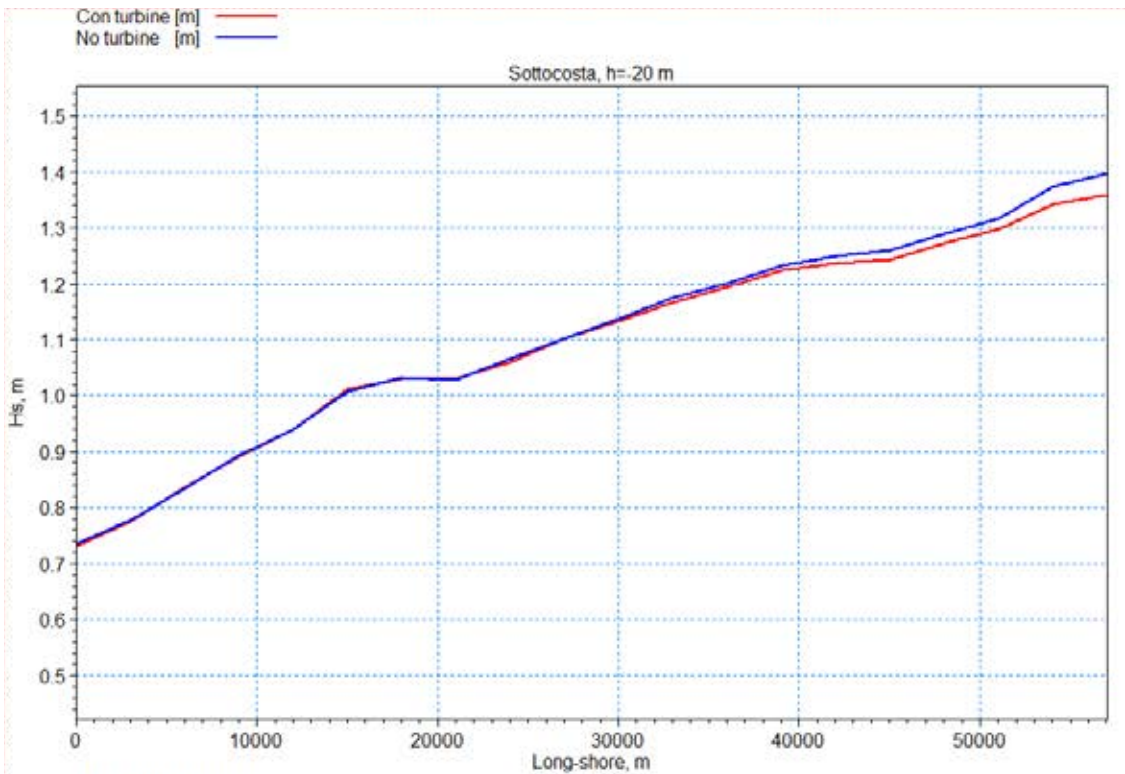
Stato ondoso 3 altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



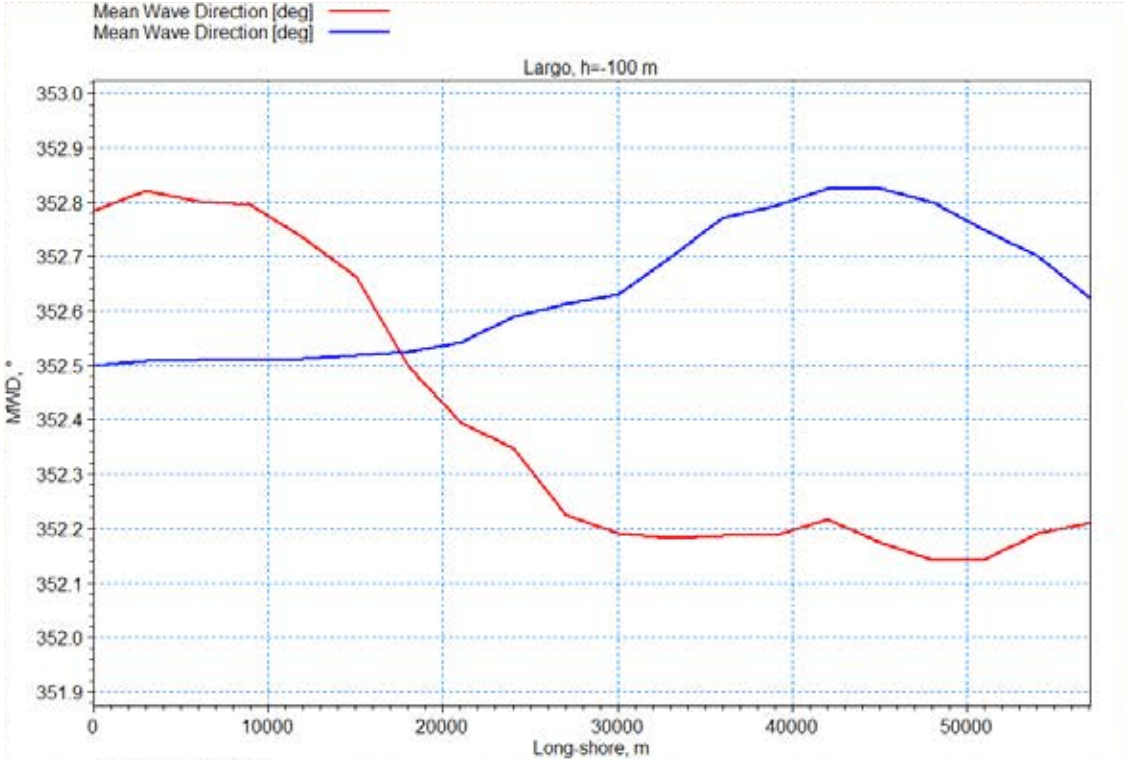
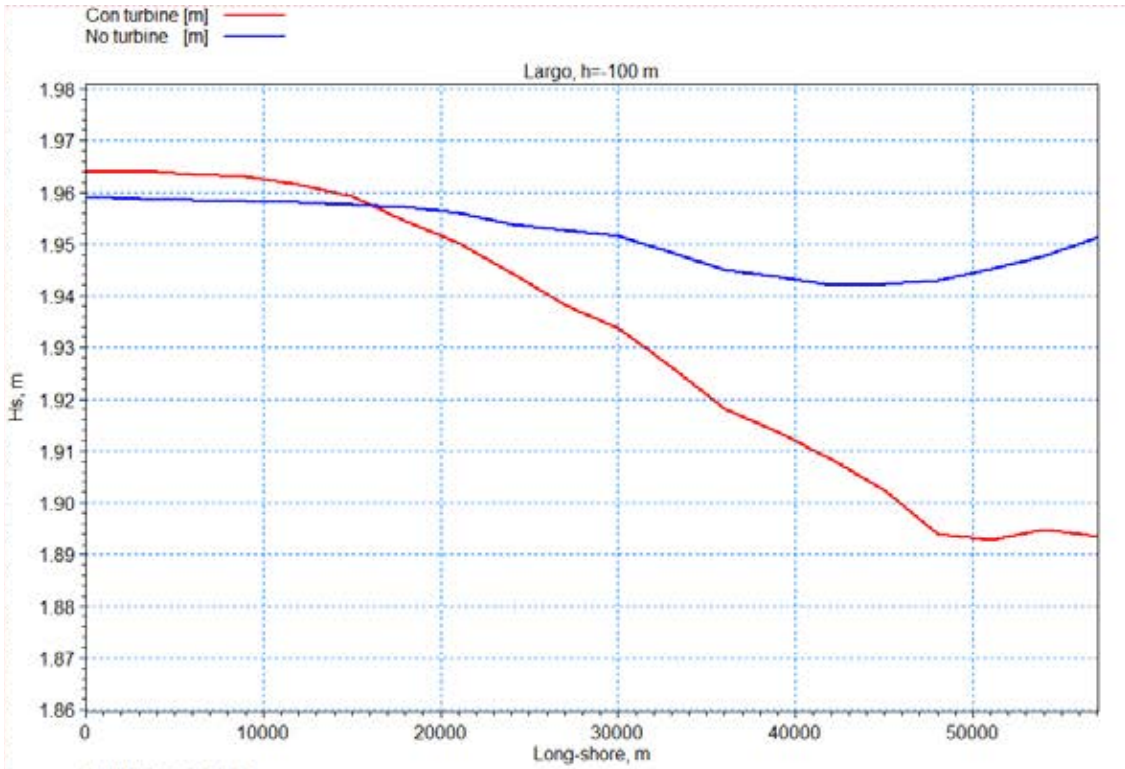
Stato ondoso 4, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



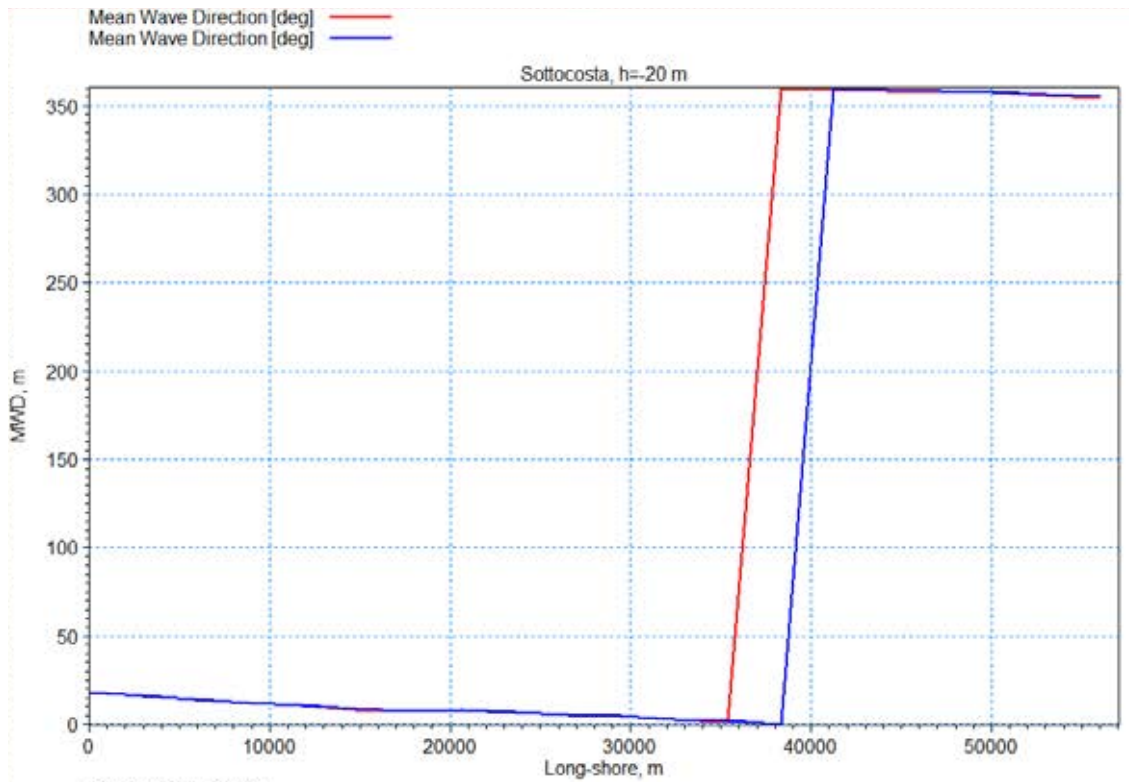
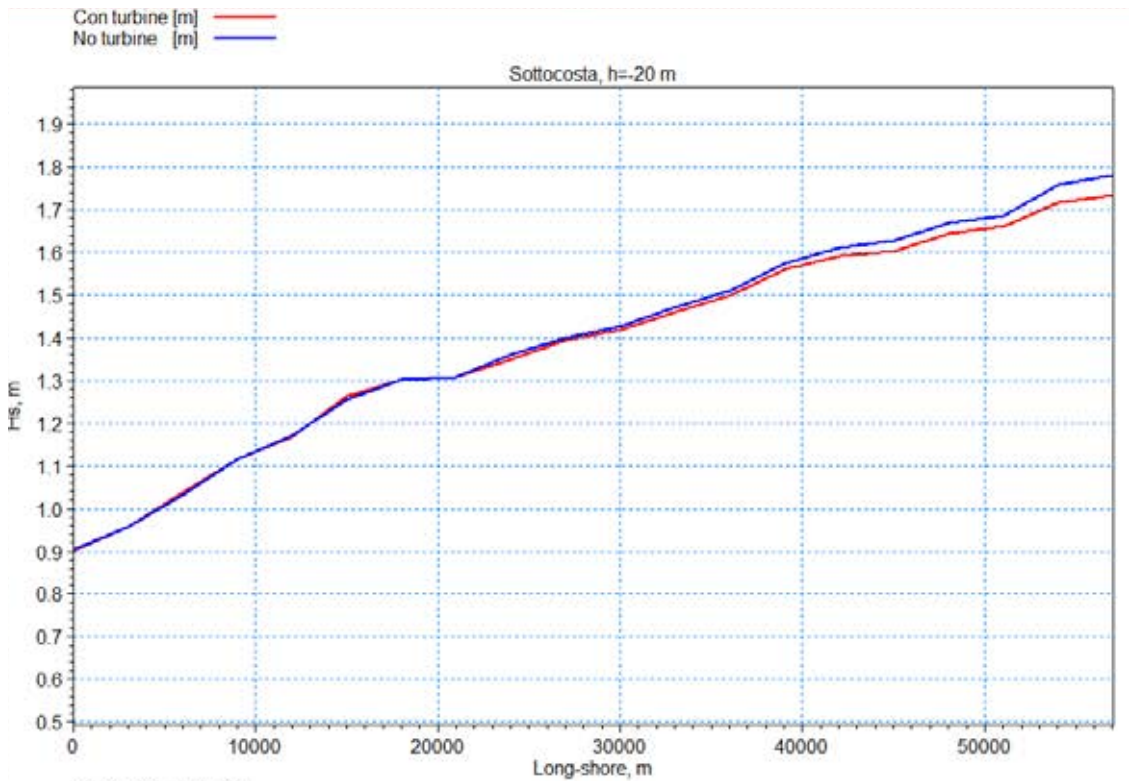
Stato ondoso 4 altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



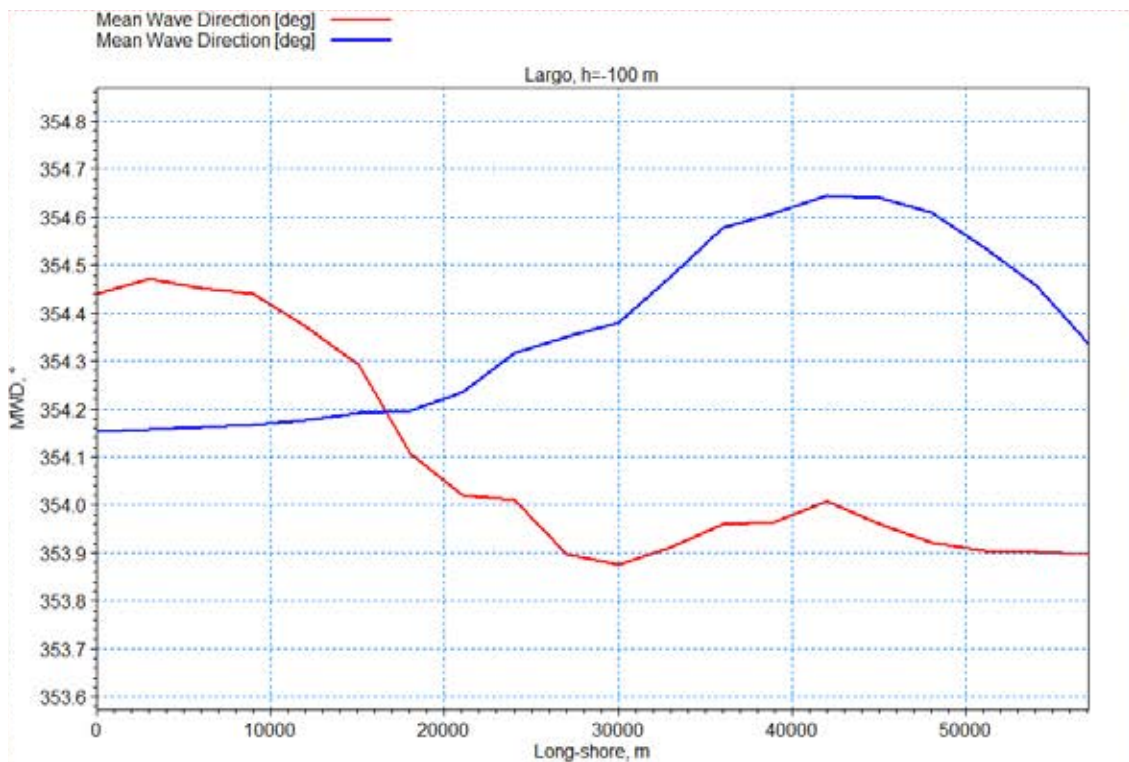
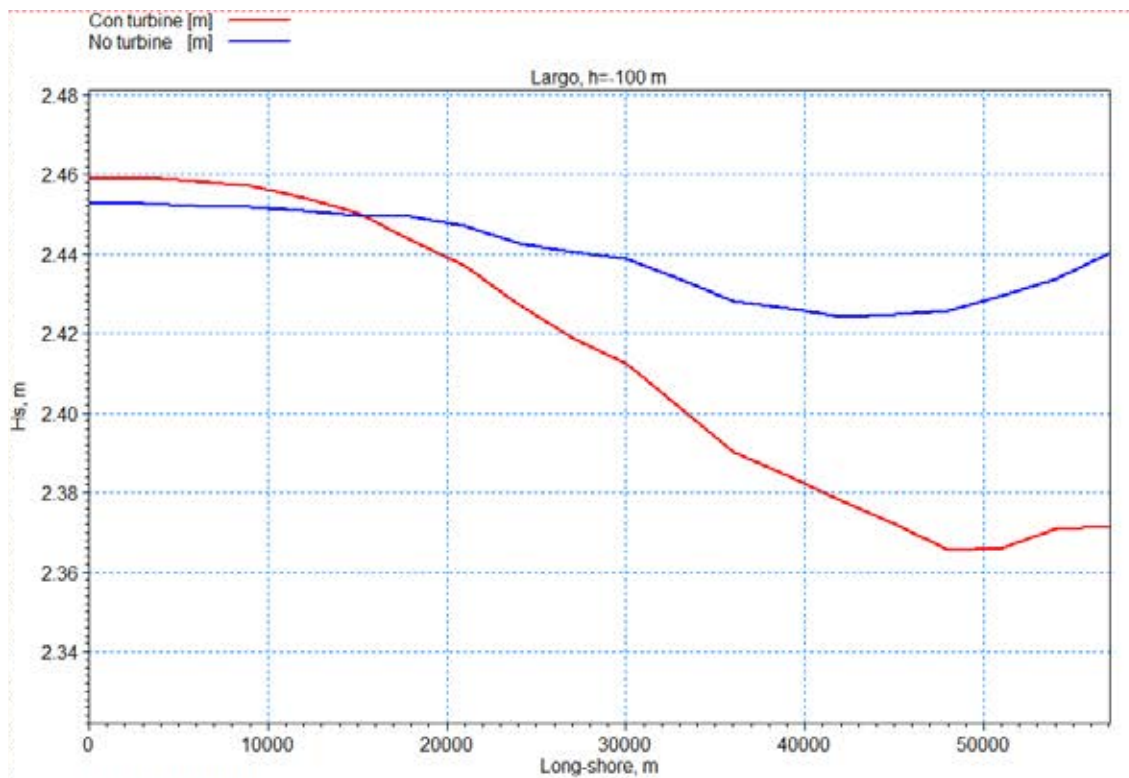
Stato ondoso 5, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m

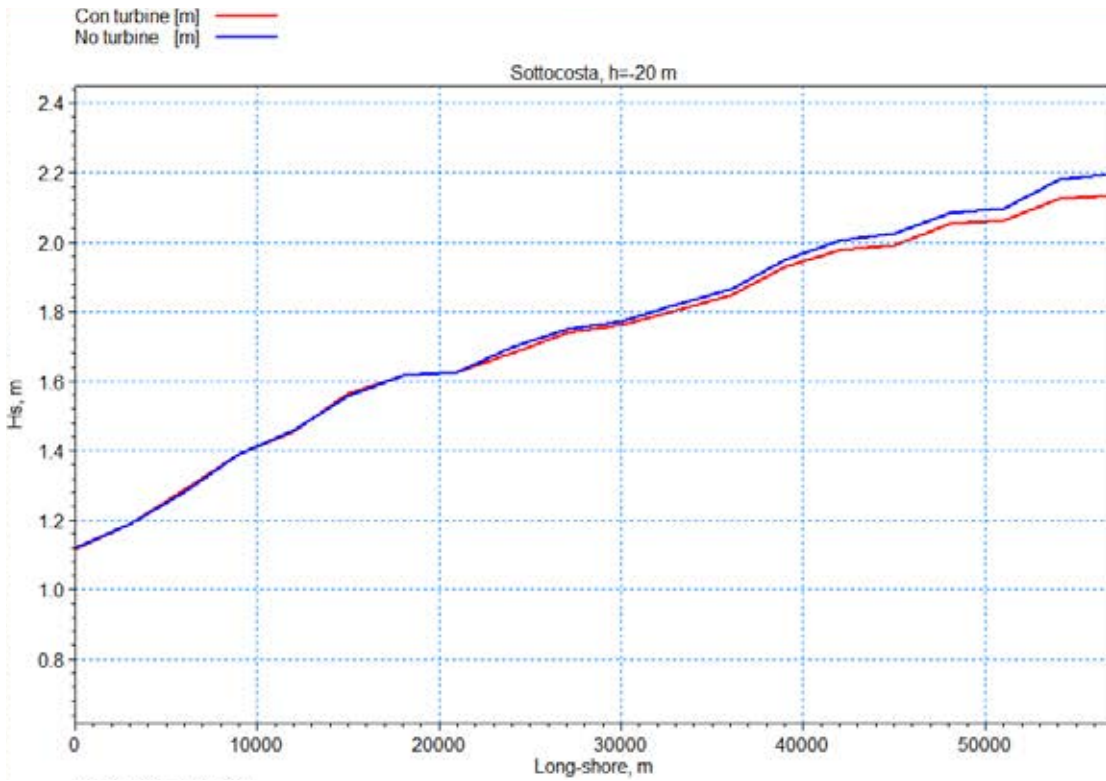


Stato ondoso 5, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



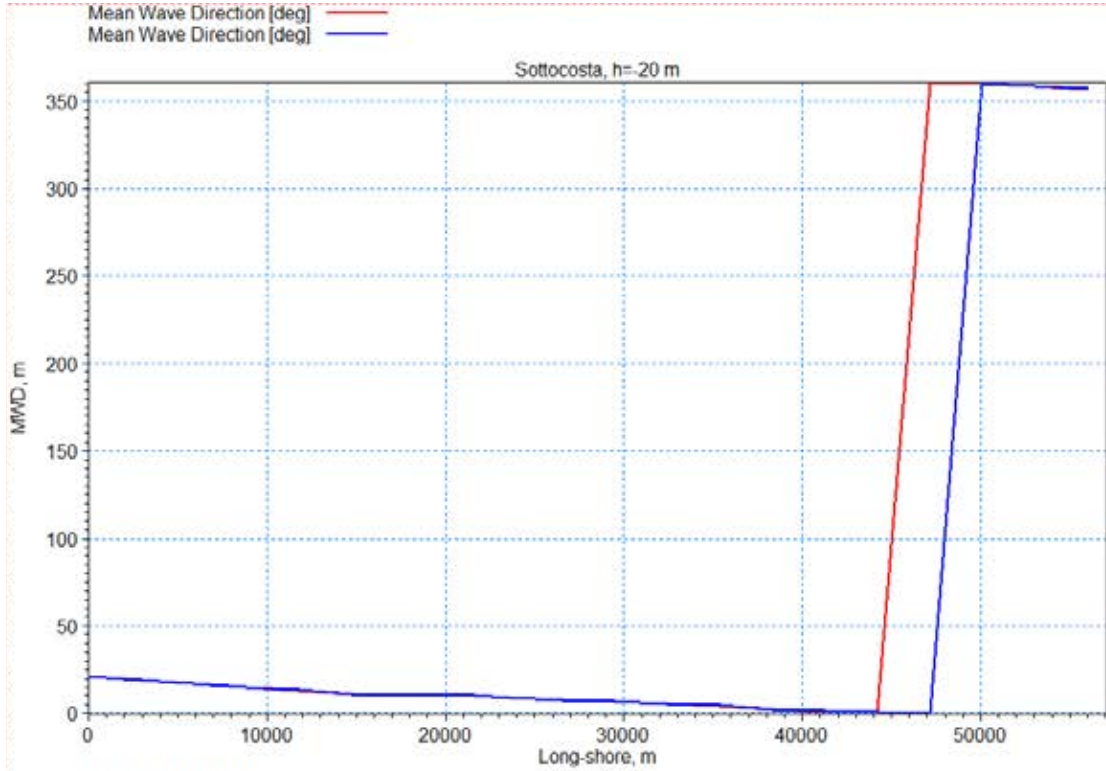
Stato ondoso 6, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



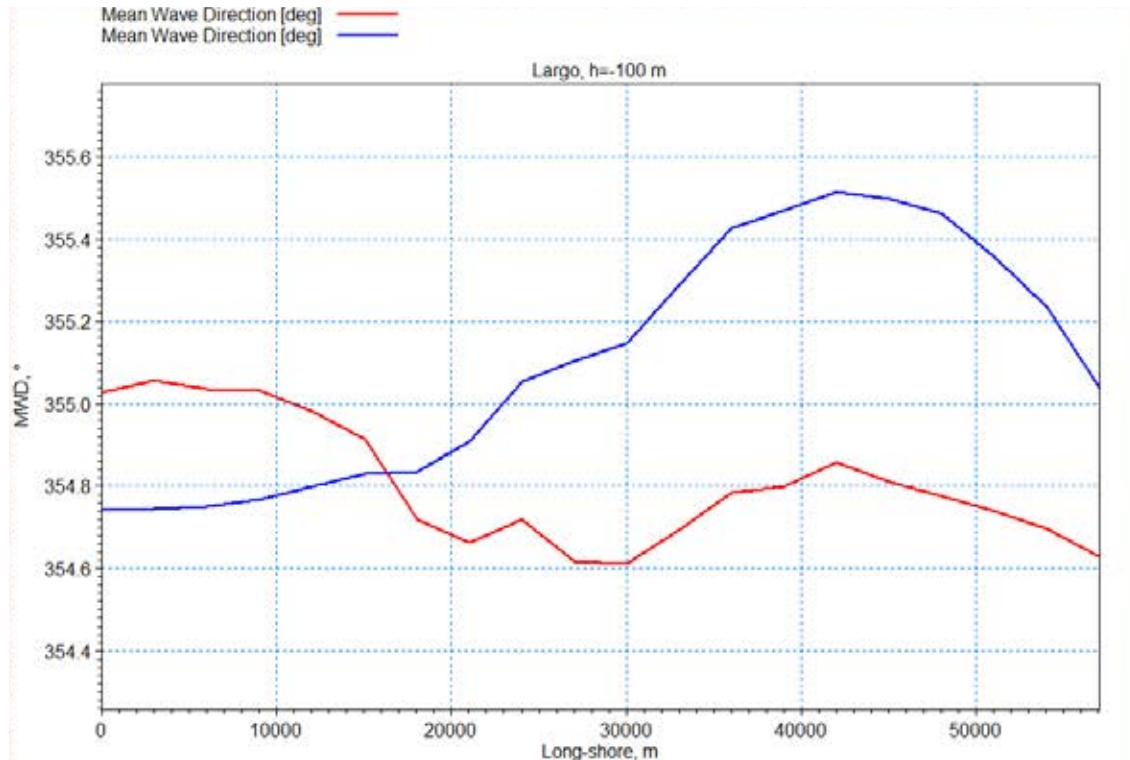
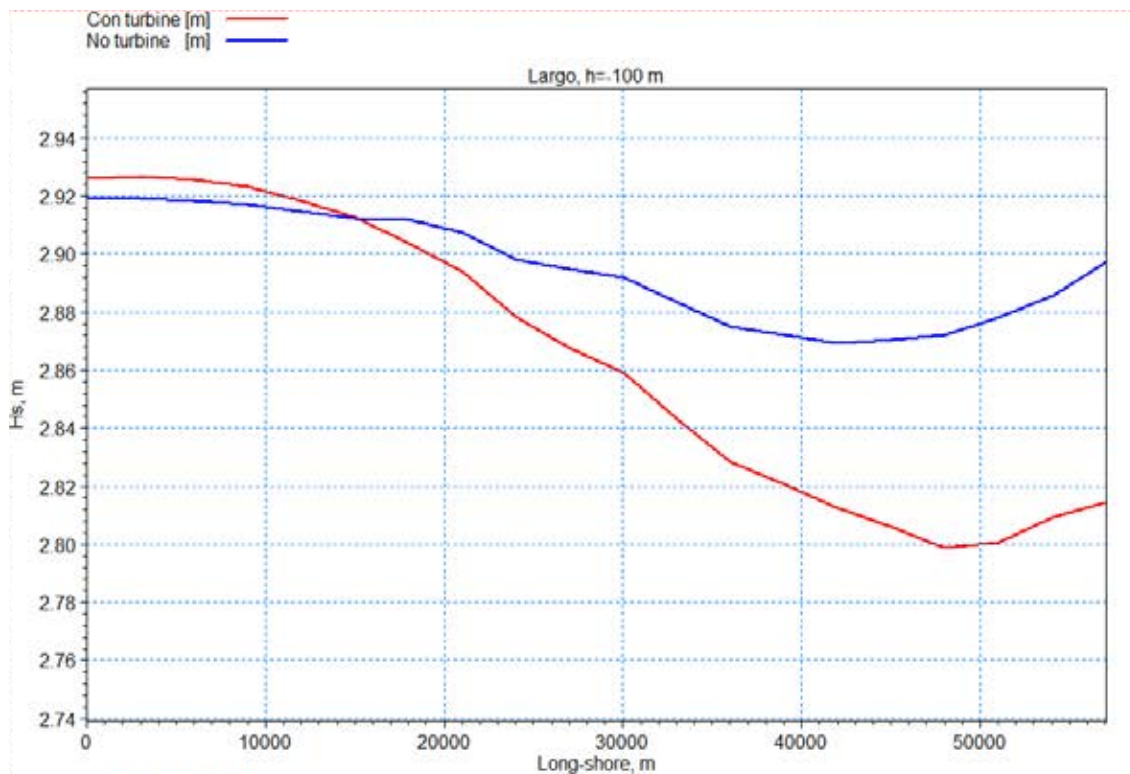


Stato

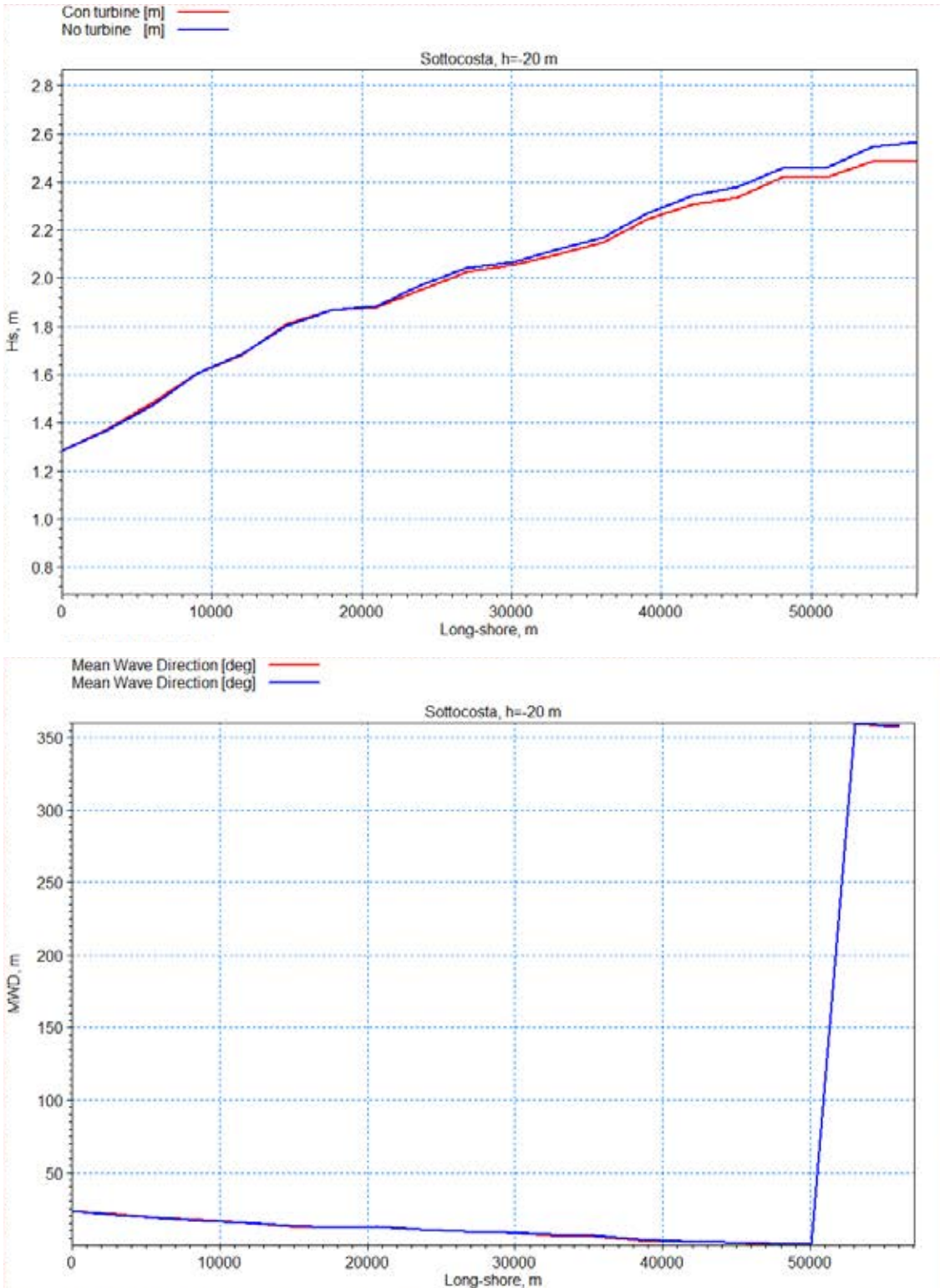
ondoso 6, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



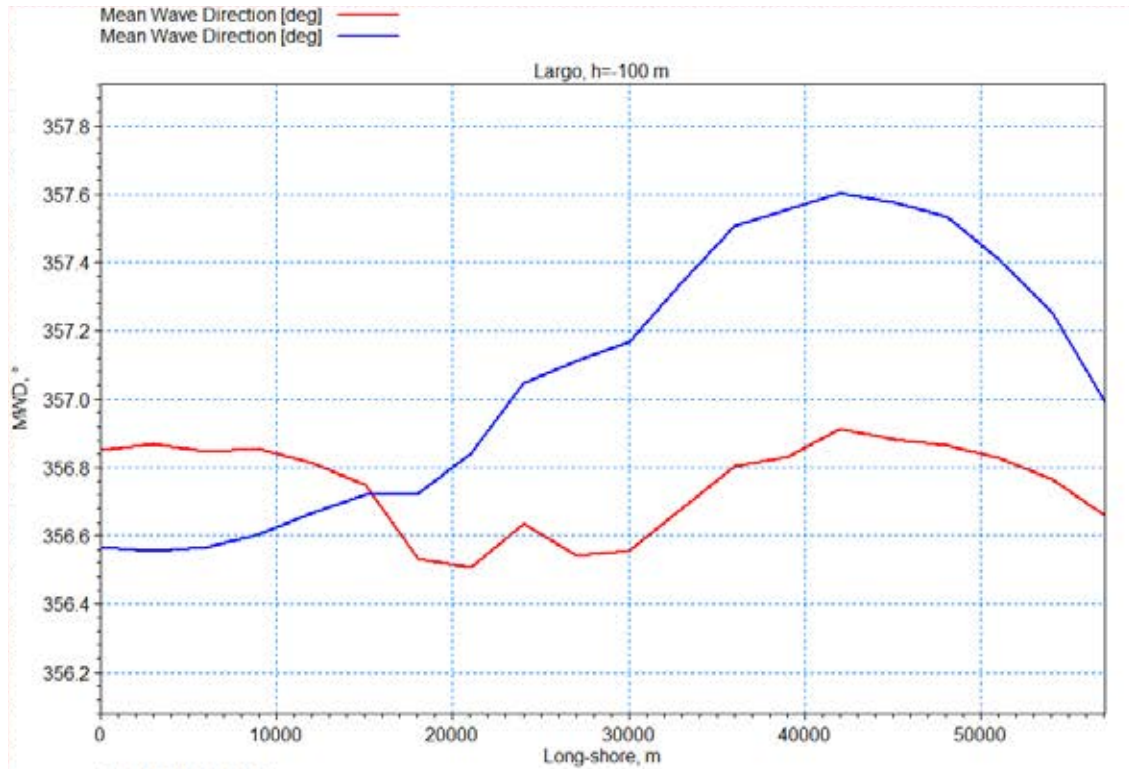
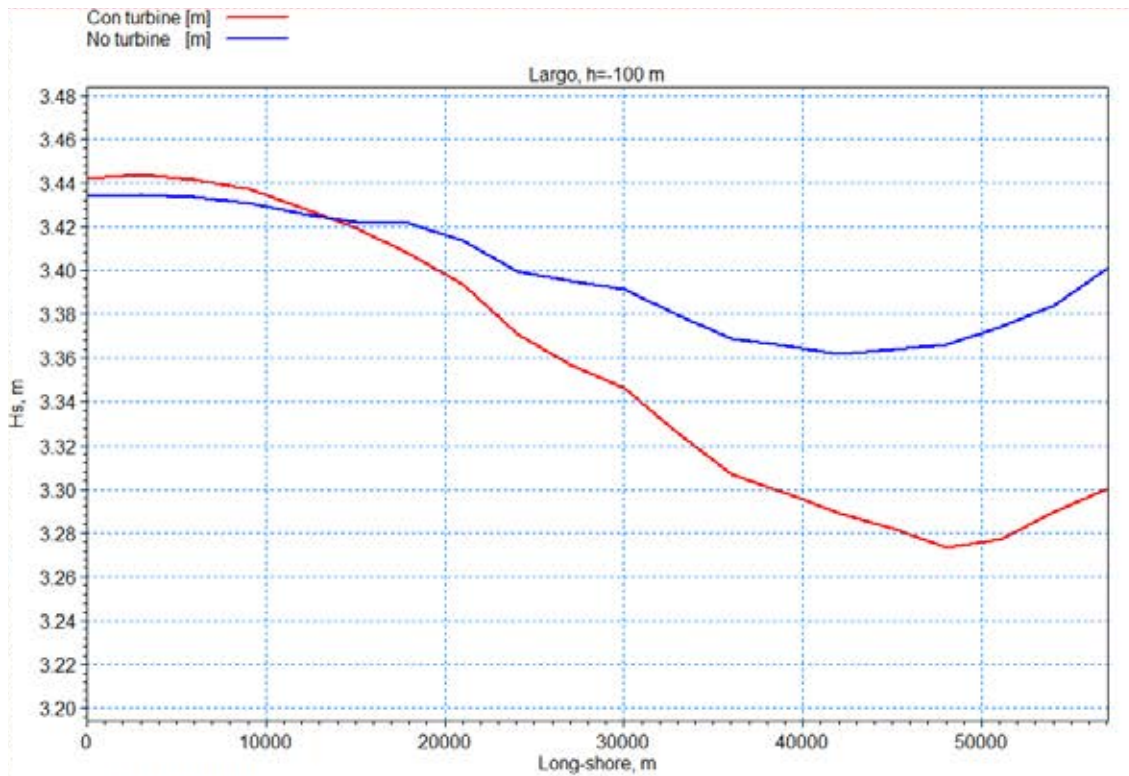
Stato ondoso 7, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



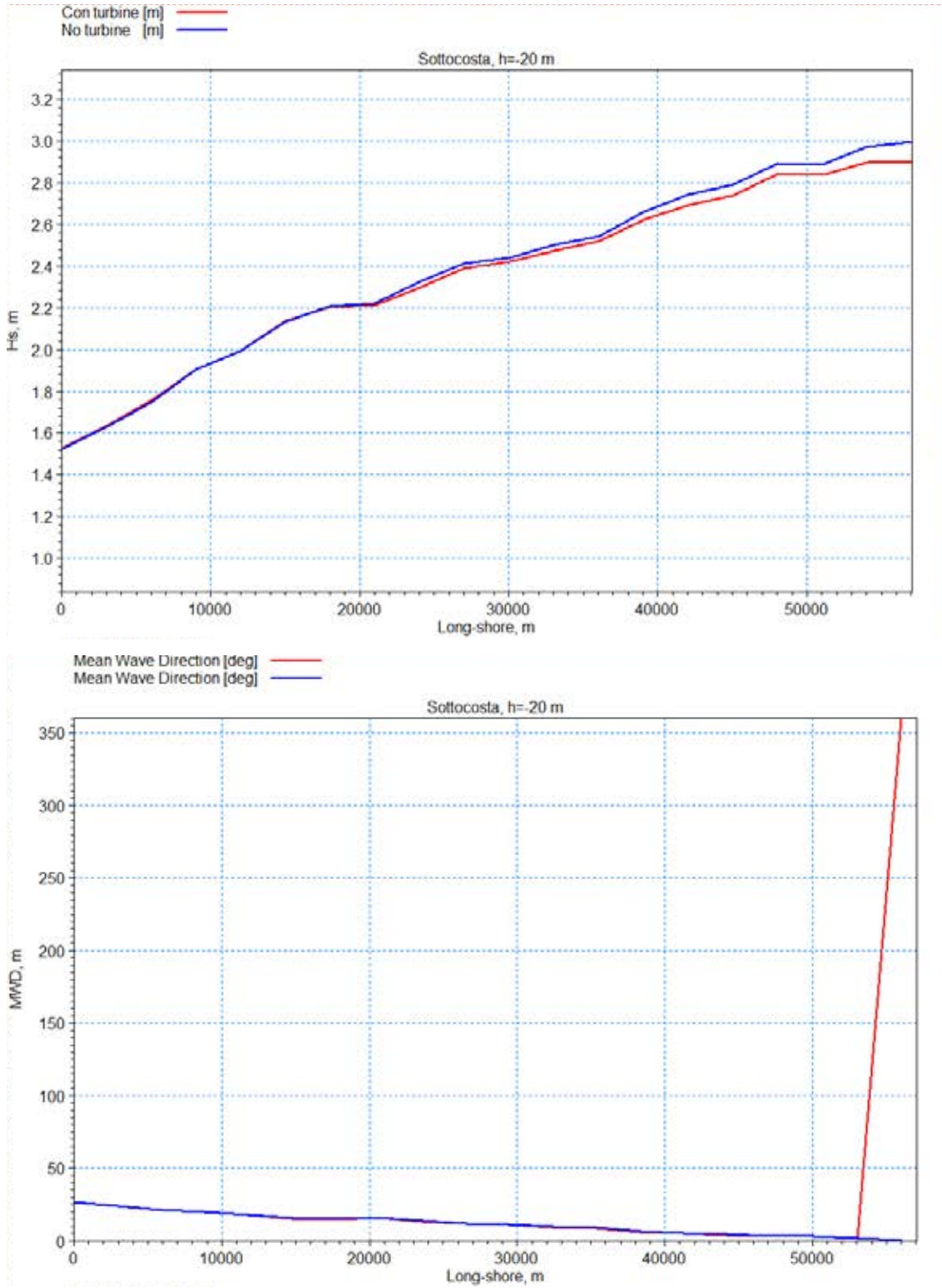
Stato ondoso 7, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



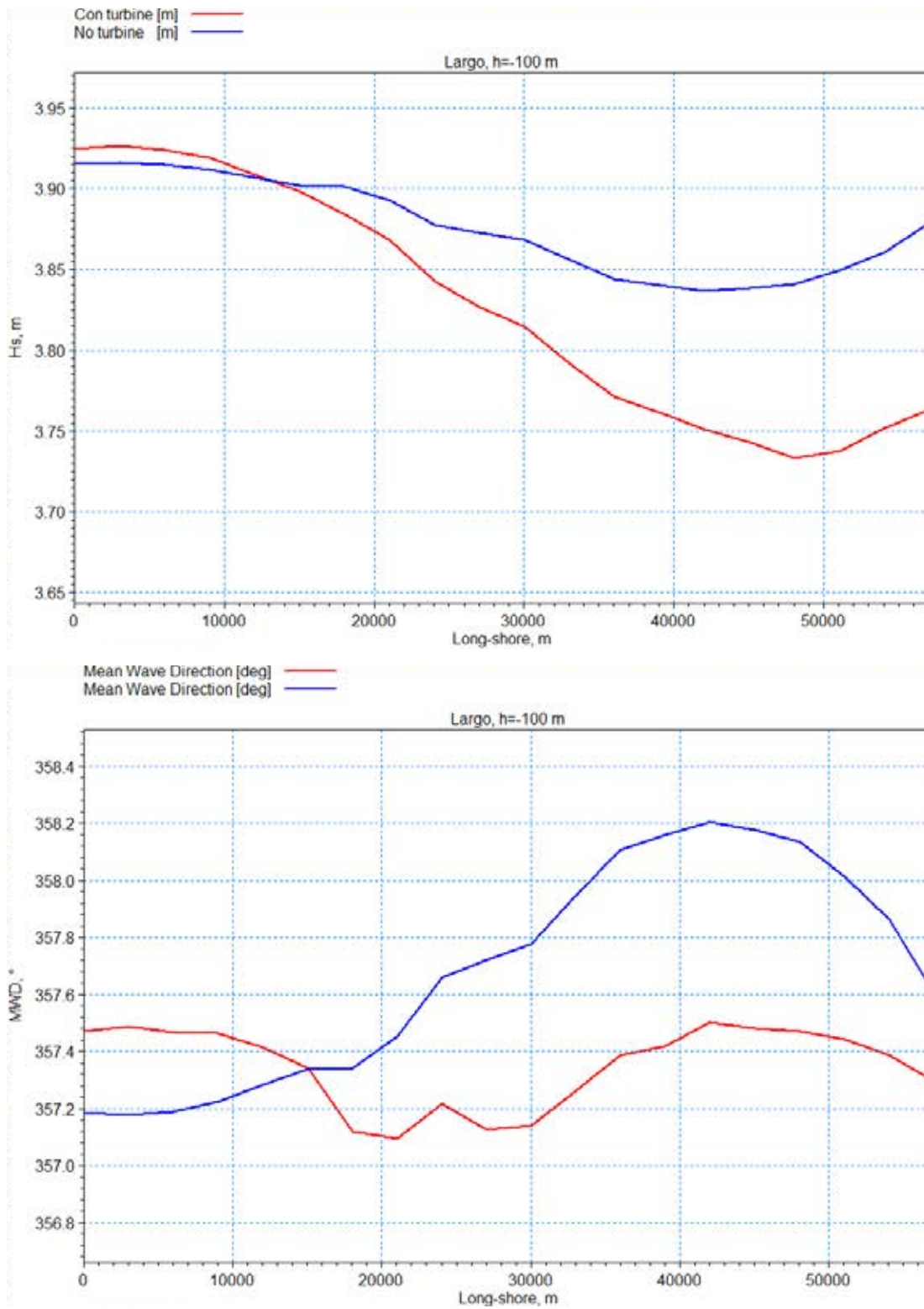
Stato ondoso 8, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



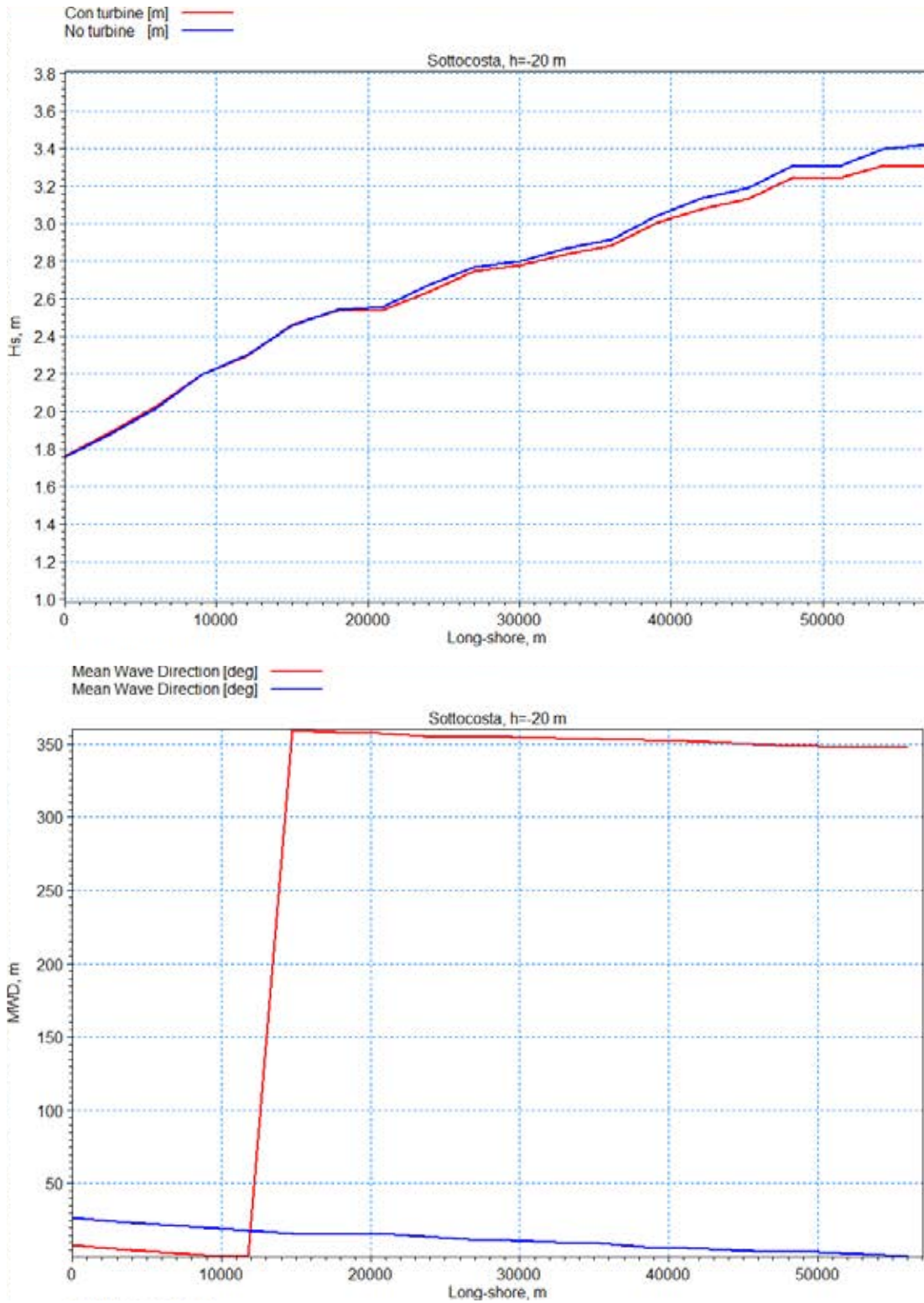
Stato ondoso 8, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



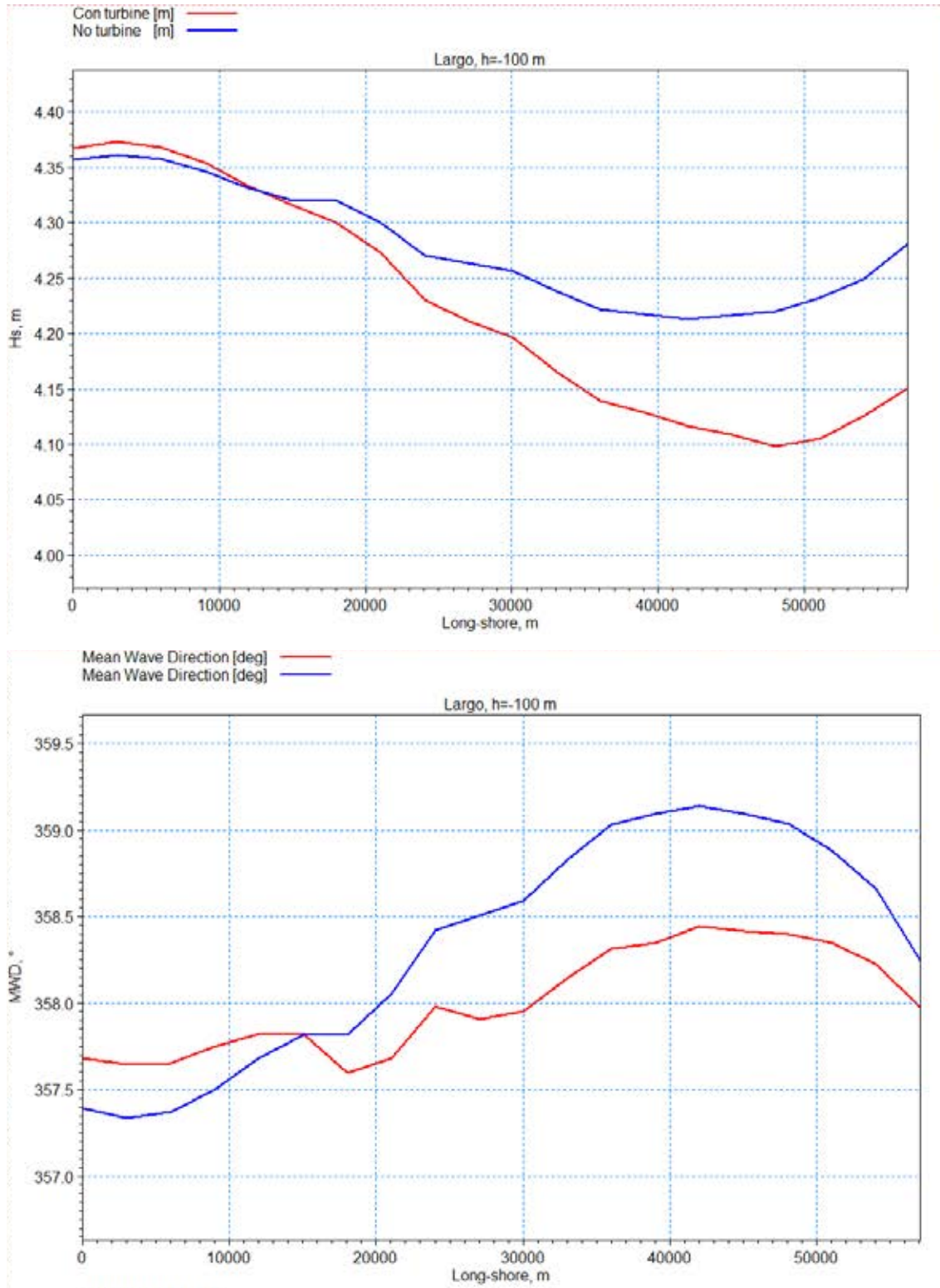
Stato ondoso 9, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



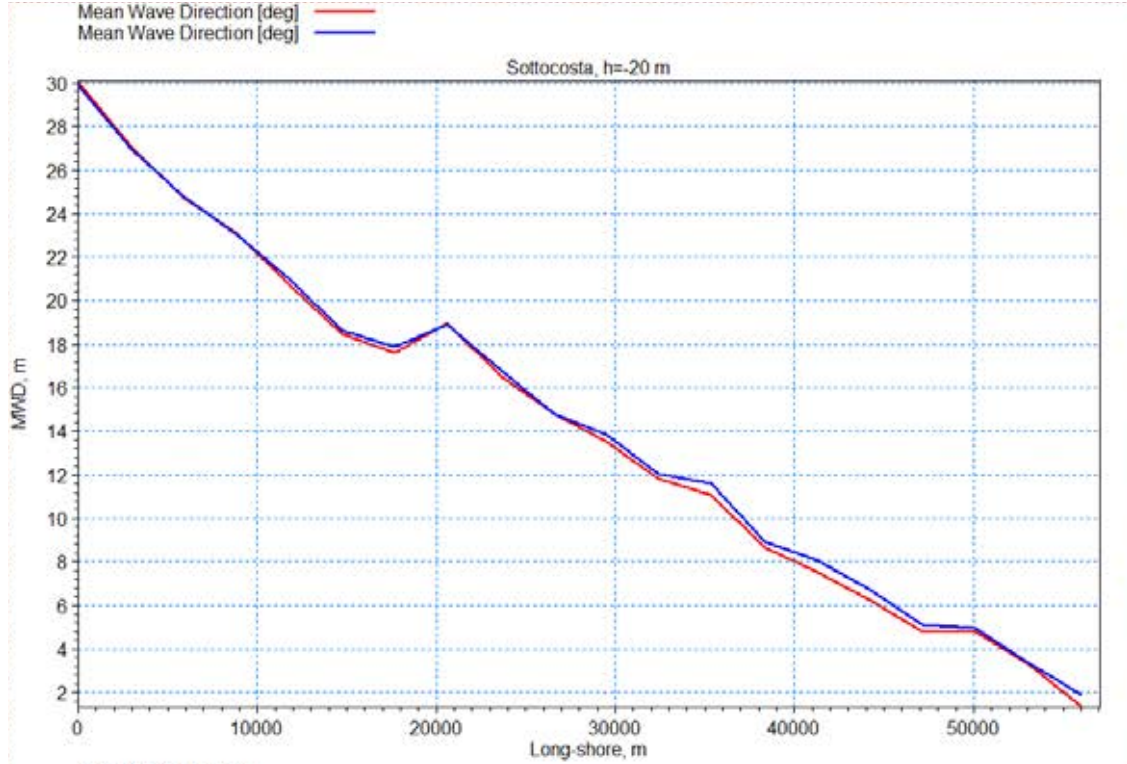
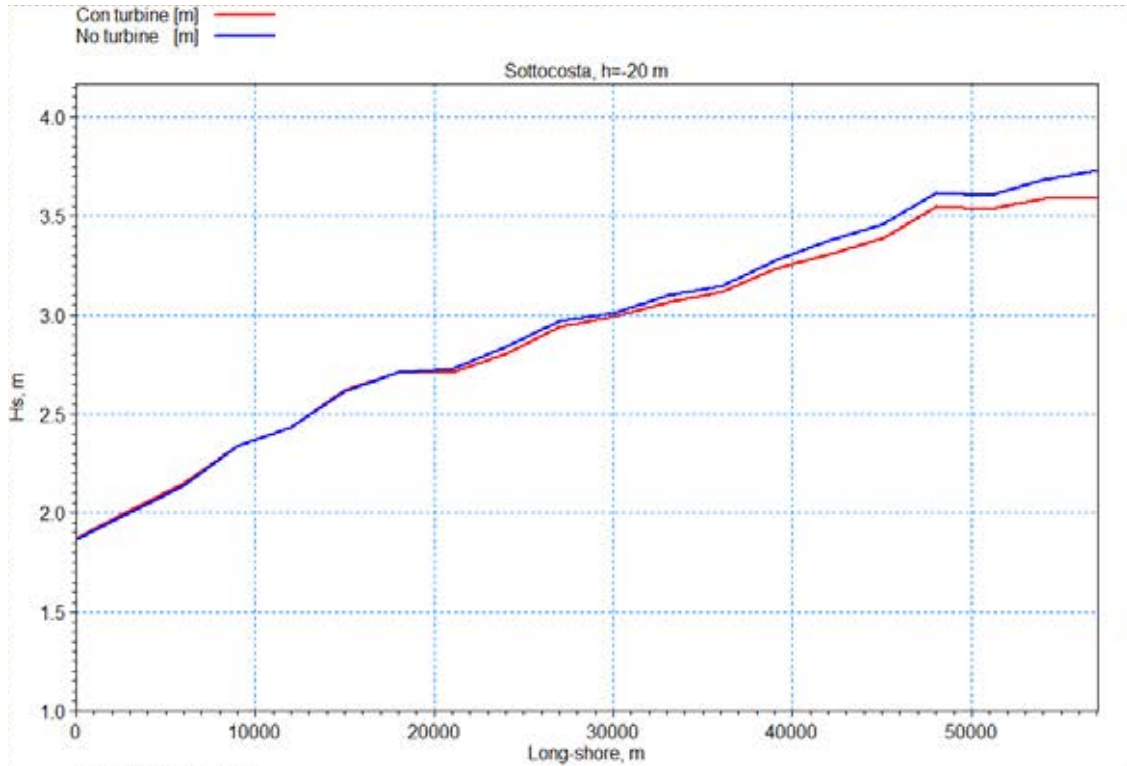
Stato ondoso 9, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



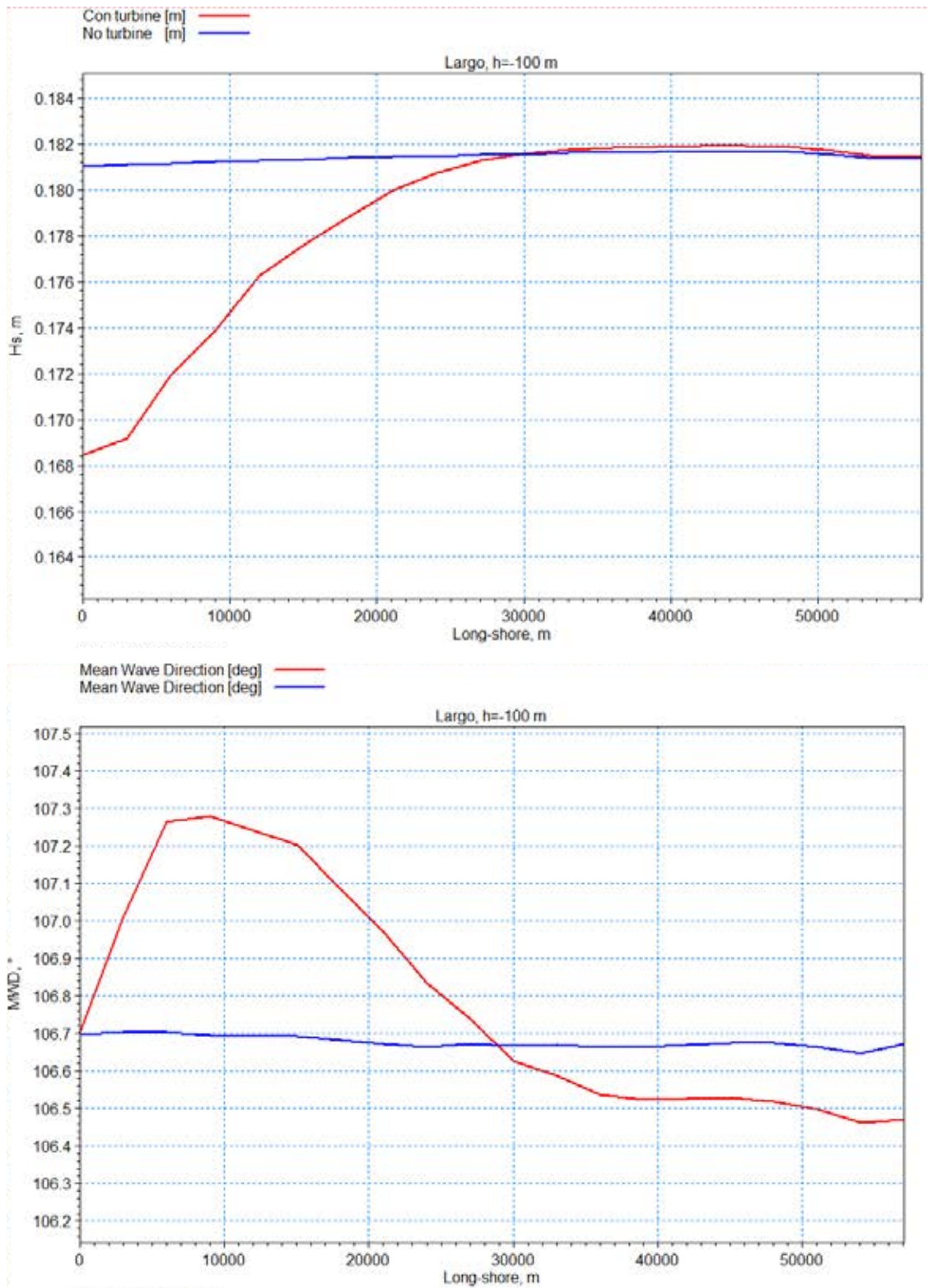
Stato ondoso 10, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



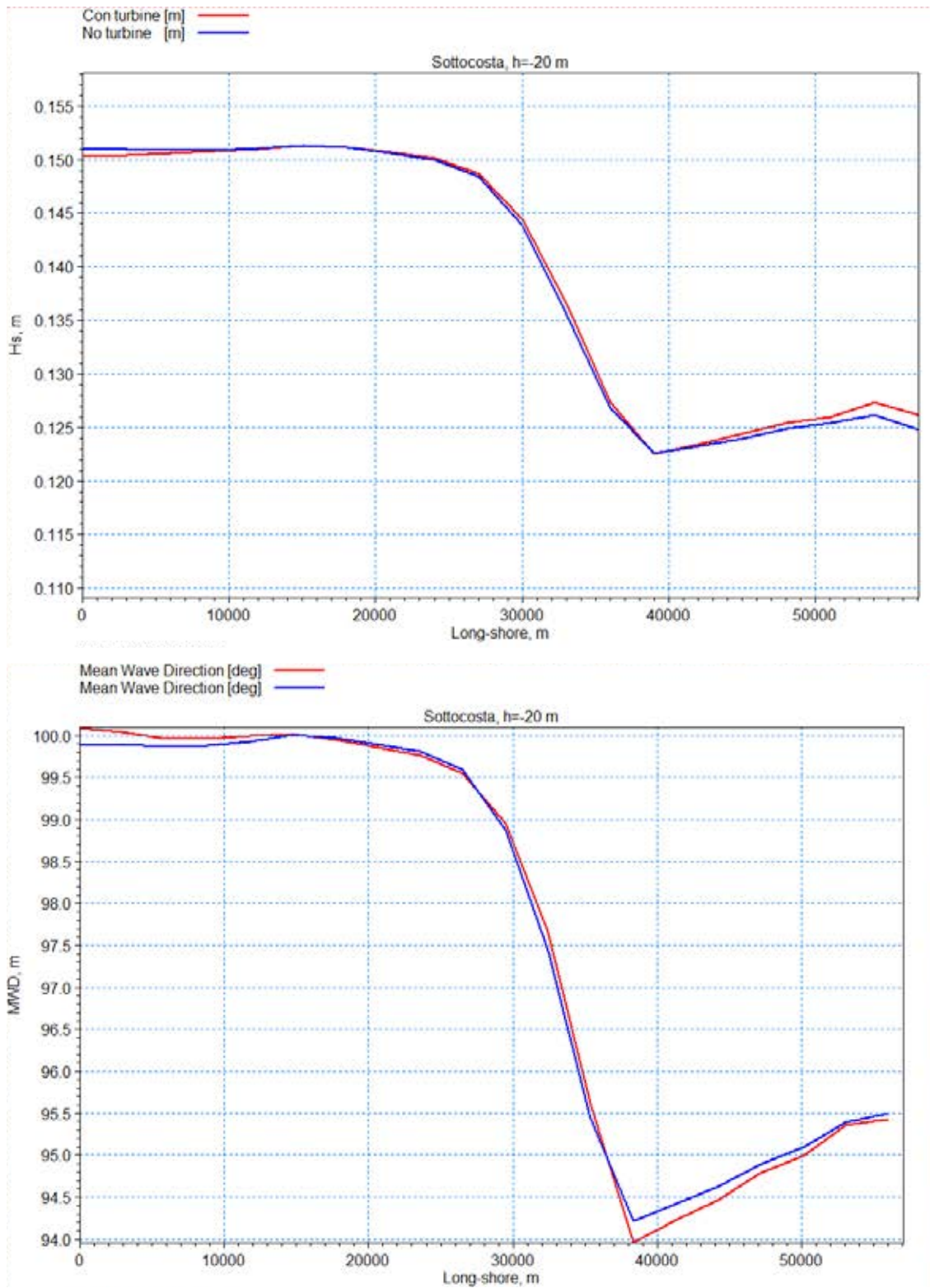
Stato ondoso 10, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



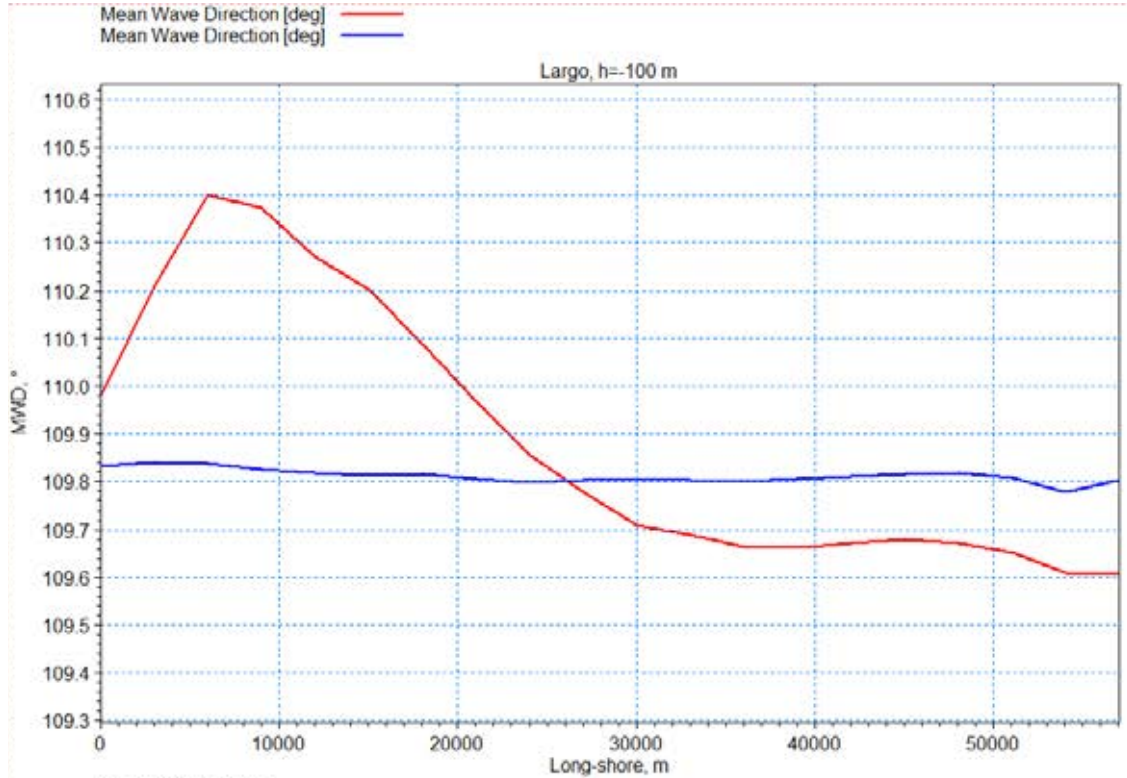
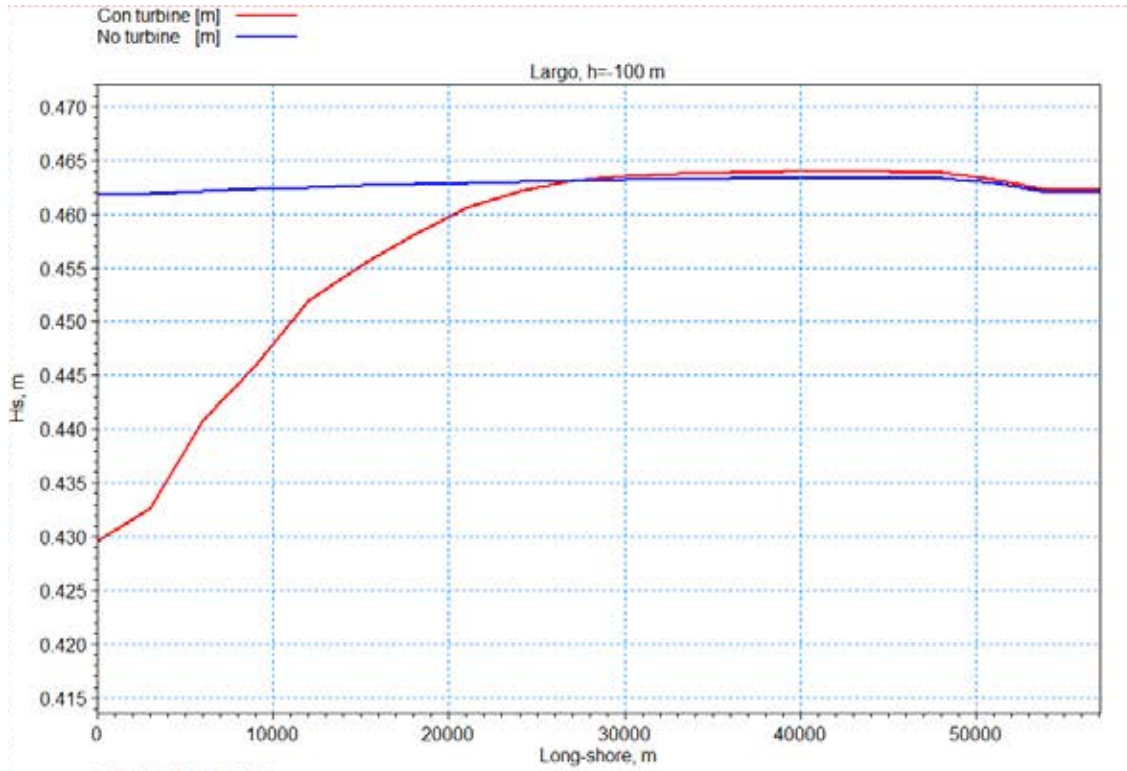
Stato ondoso 11, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



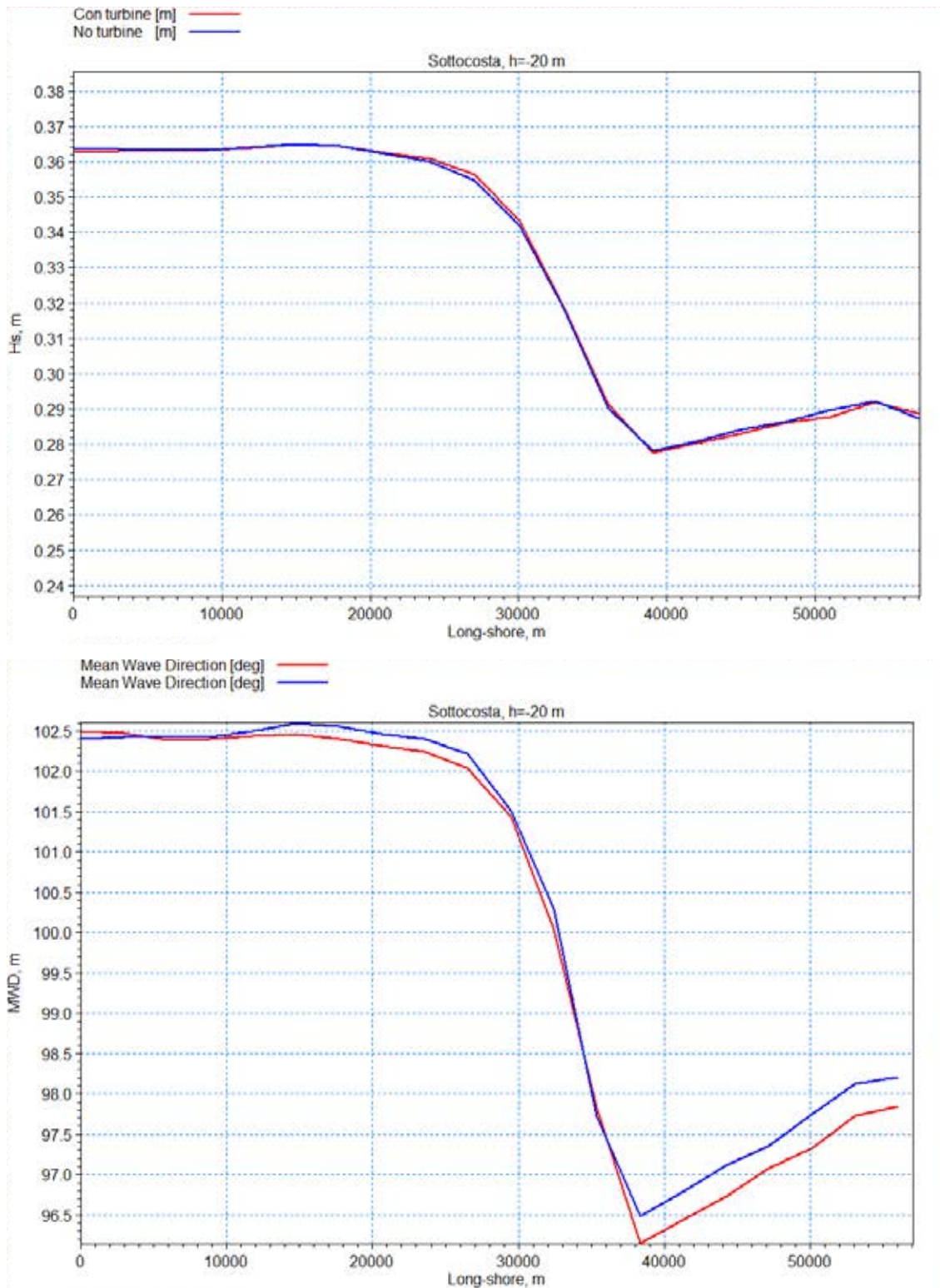
Stato ondoso 11, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



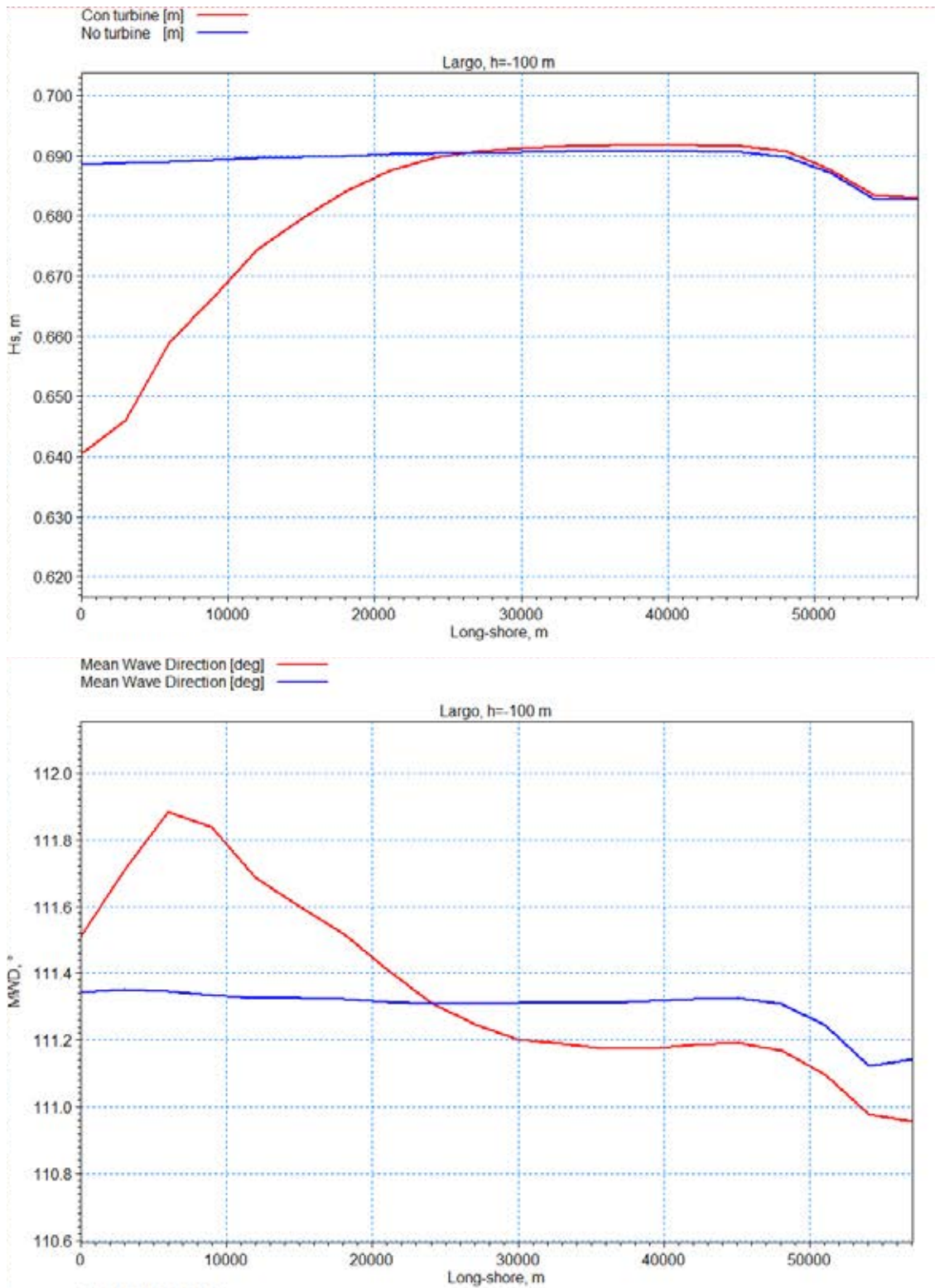
Stato ondoso 12, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



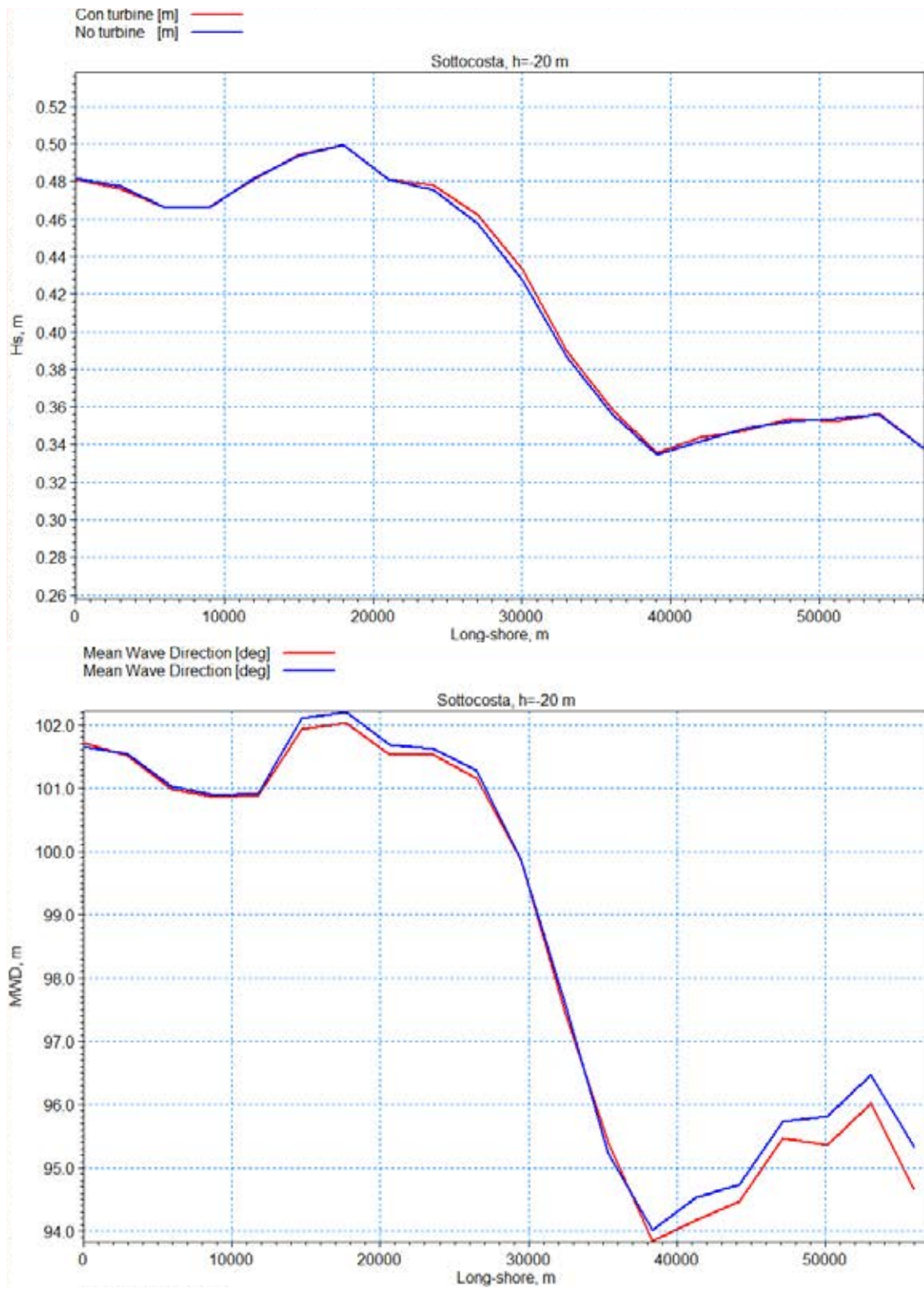
Stato ondoso 12, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



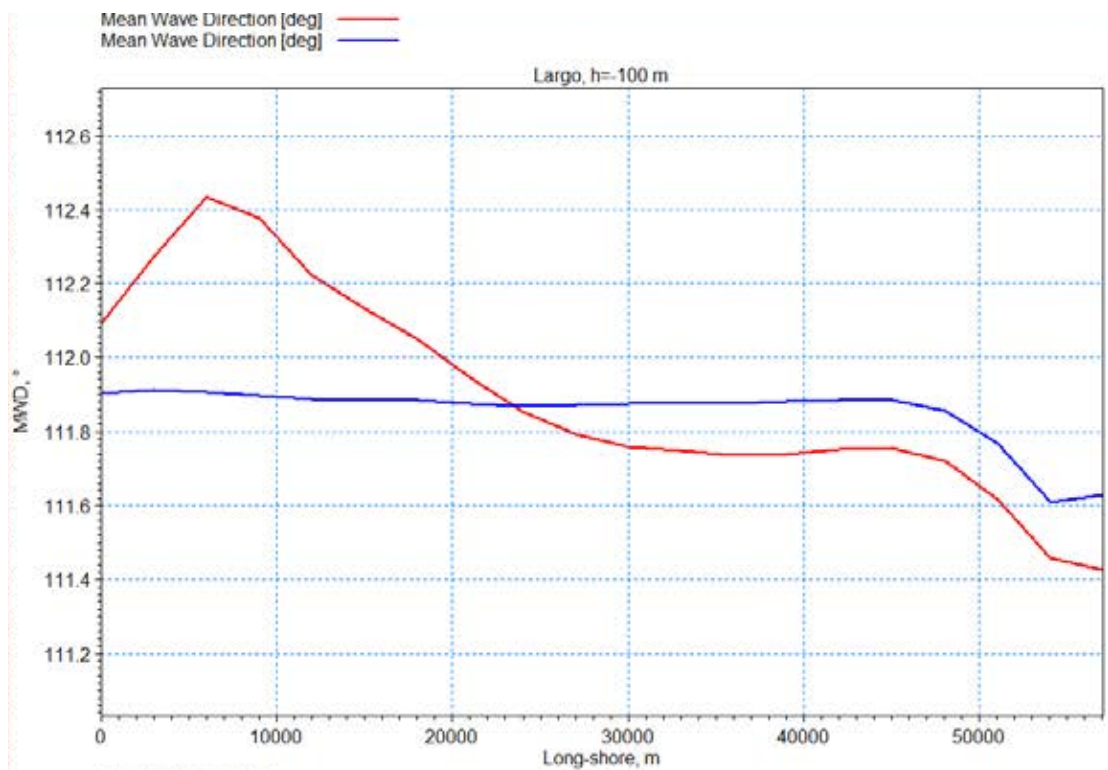
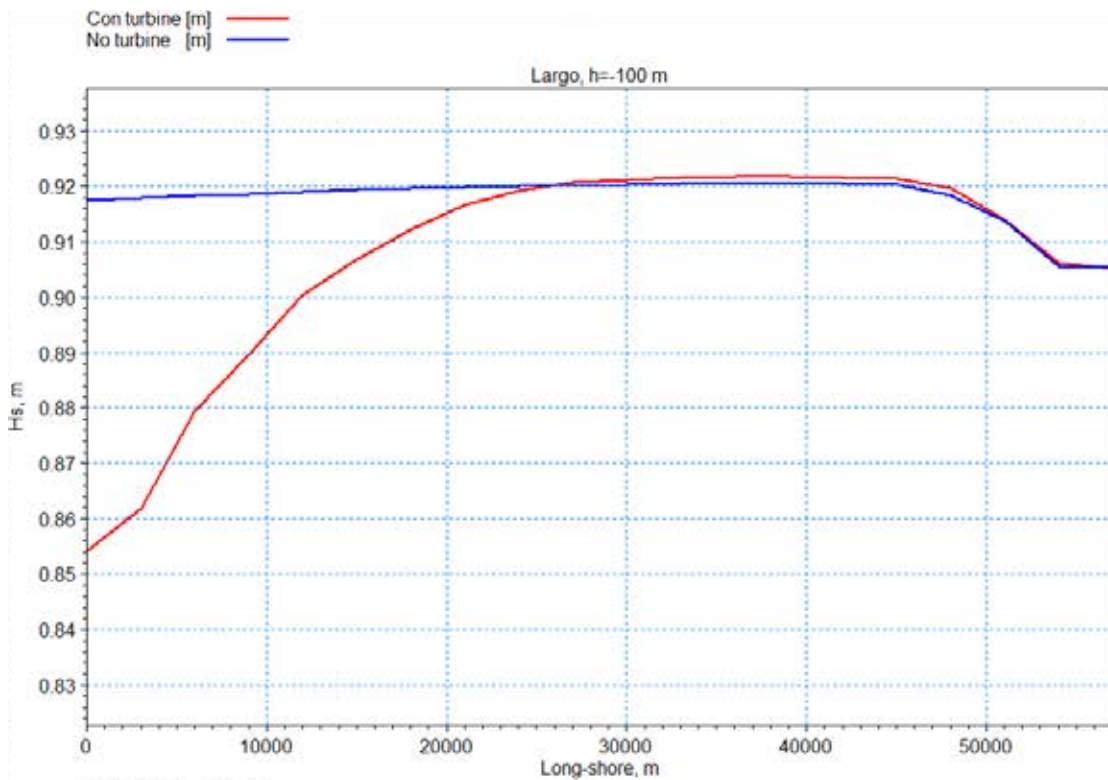
Stato ondoso 13, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



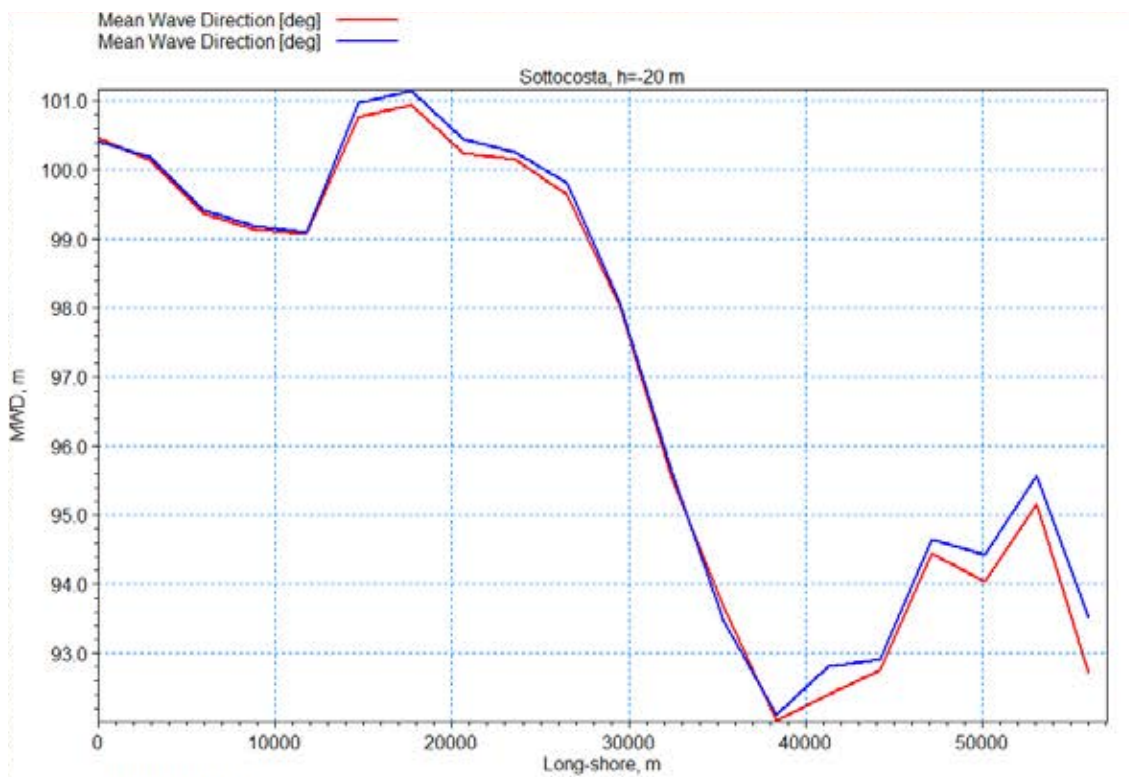
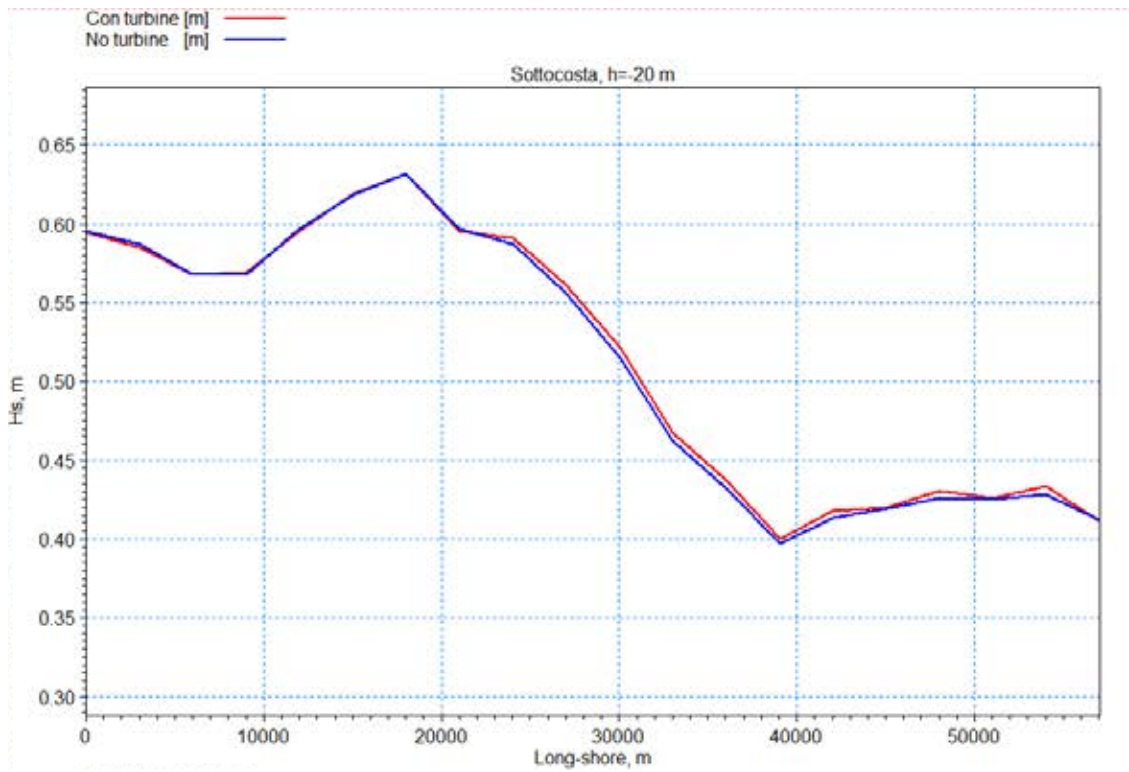
Stato ondoso 13, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



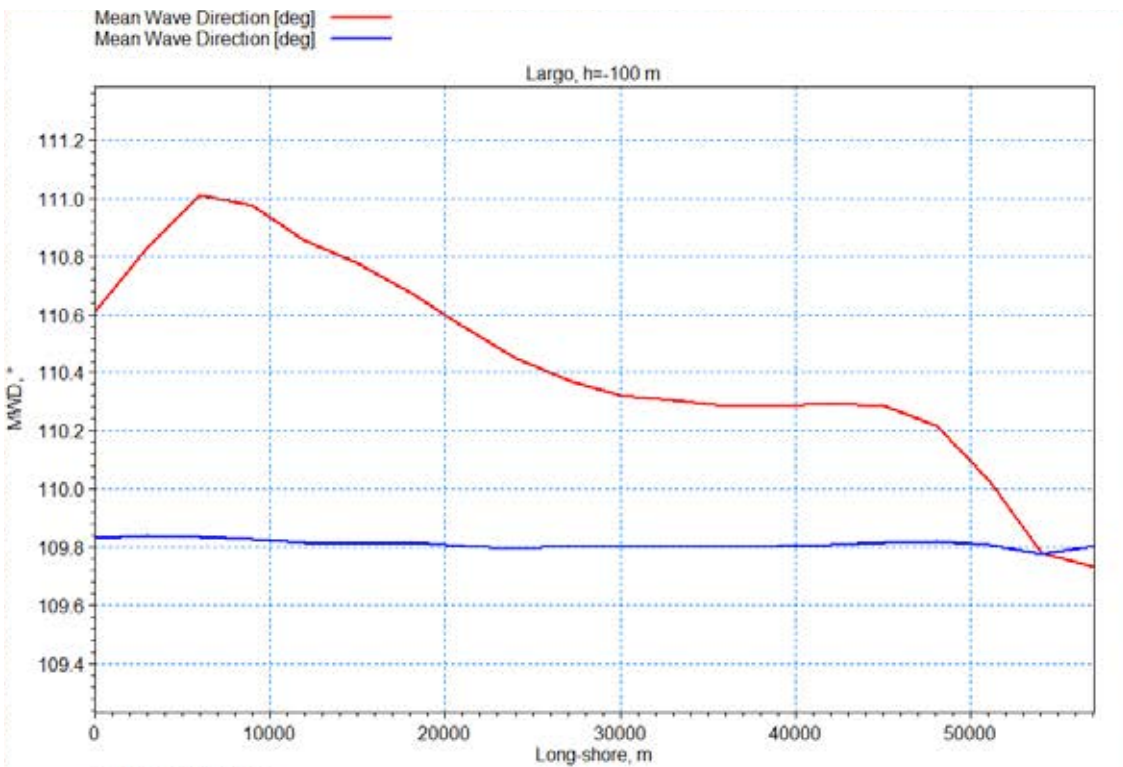
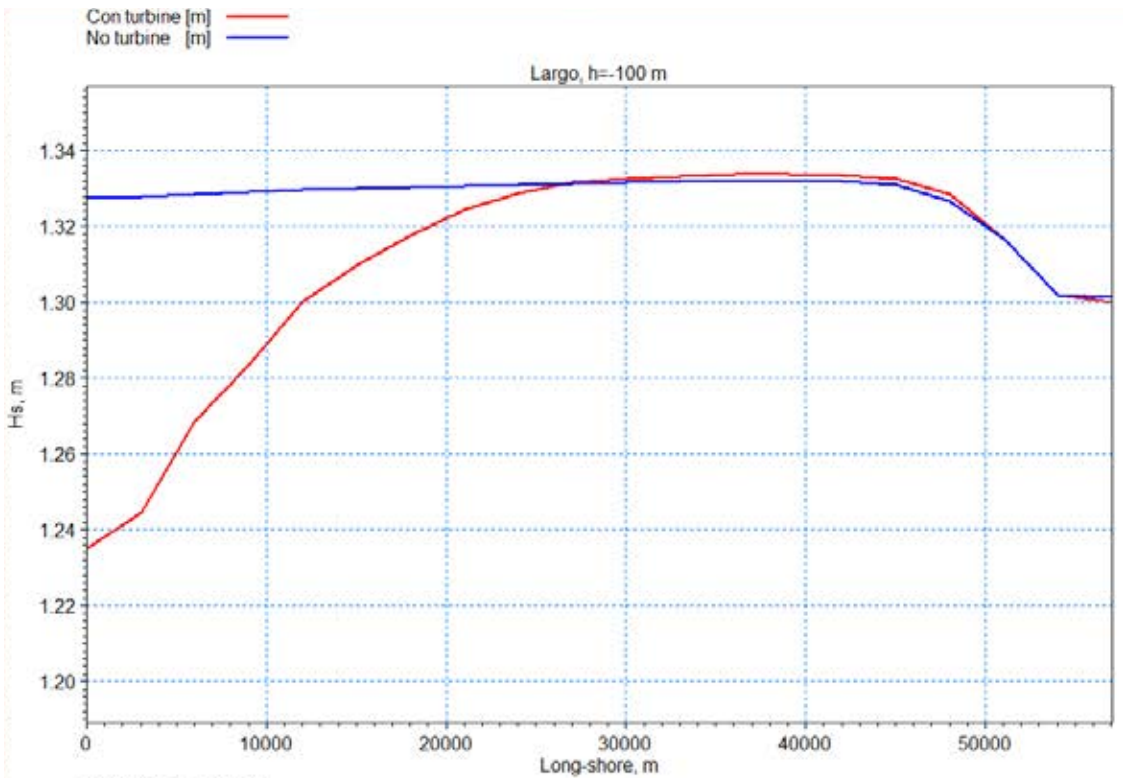
Stato ondoso 14, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



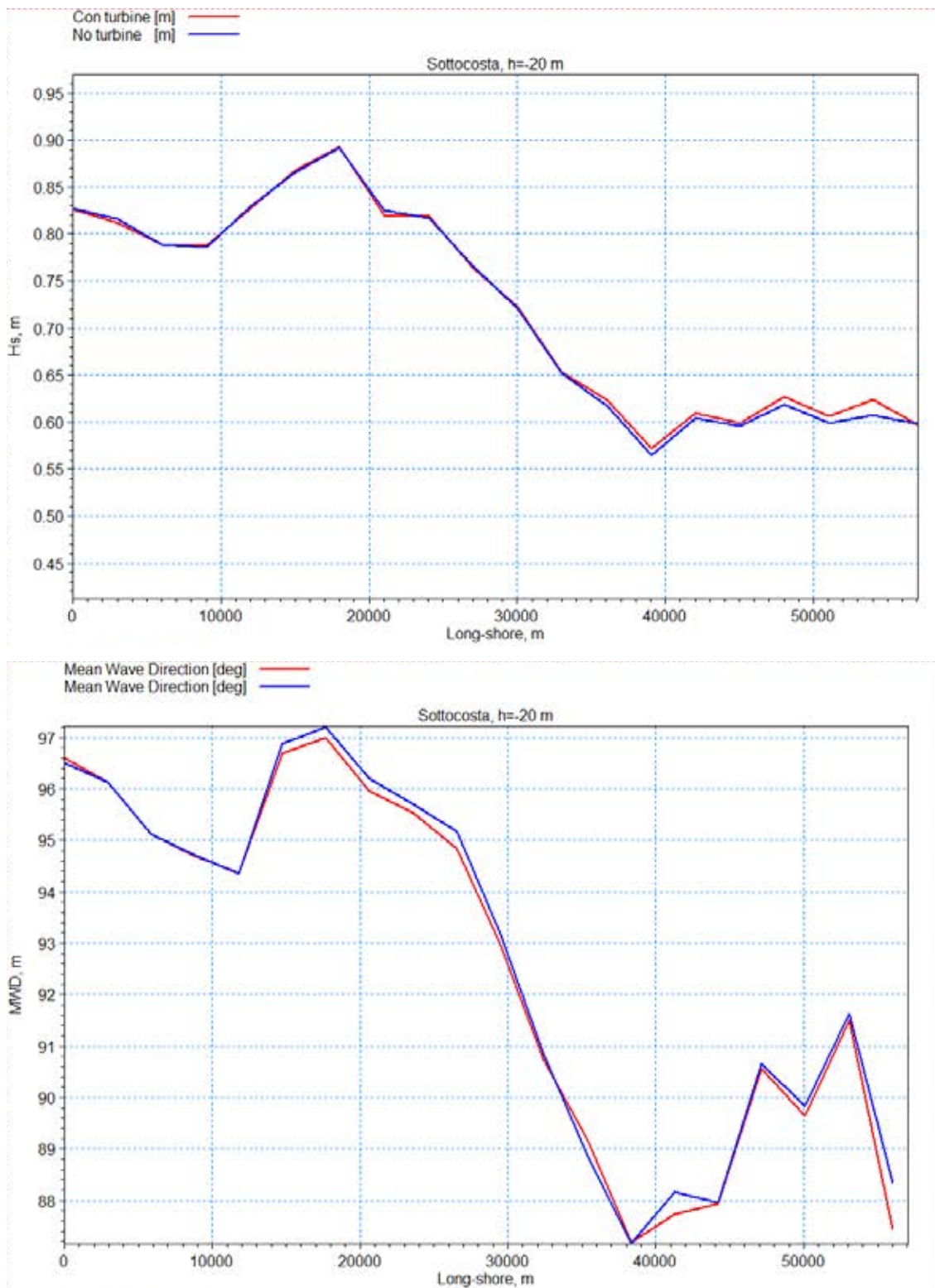
Stato ondoso 14, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



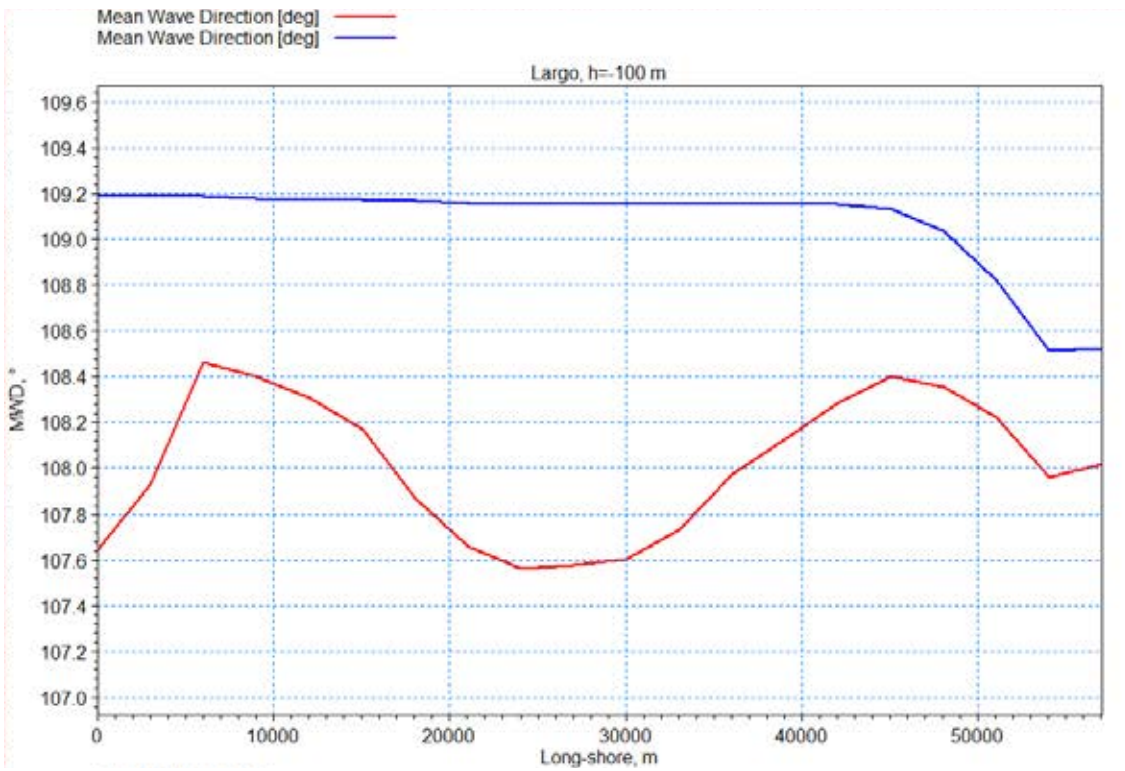
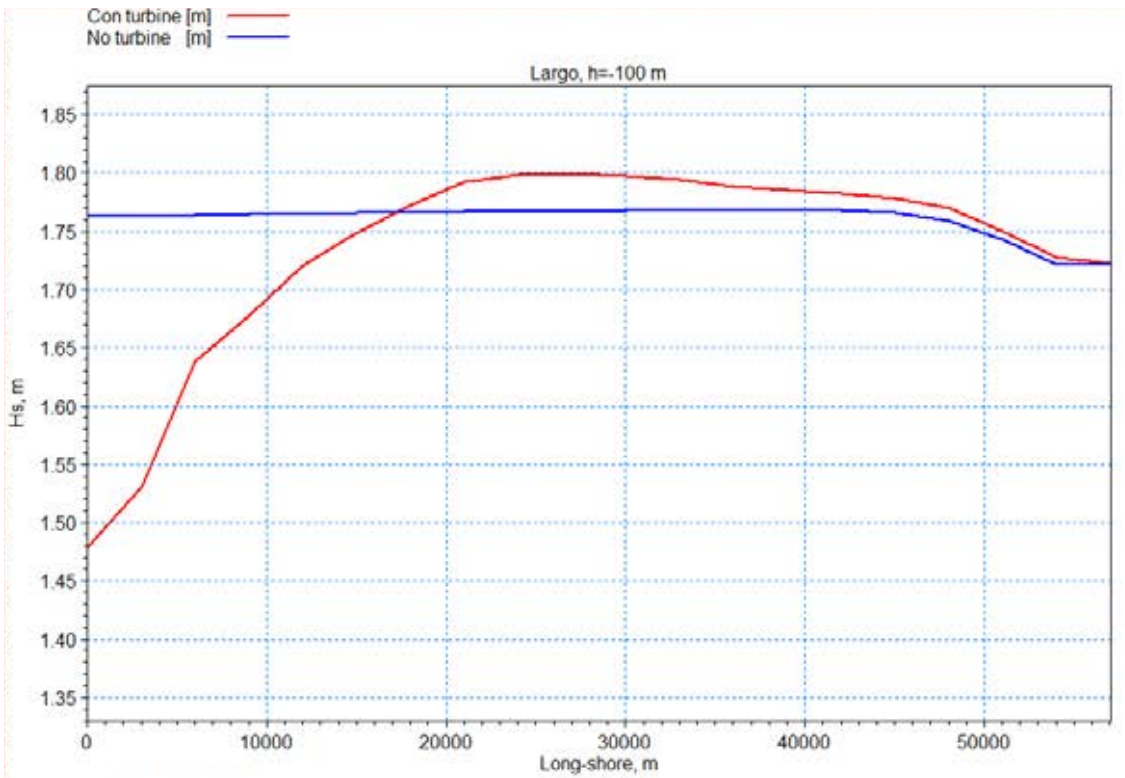
Stato ondoso 15, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



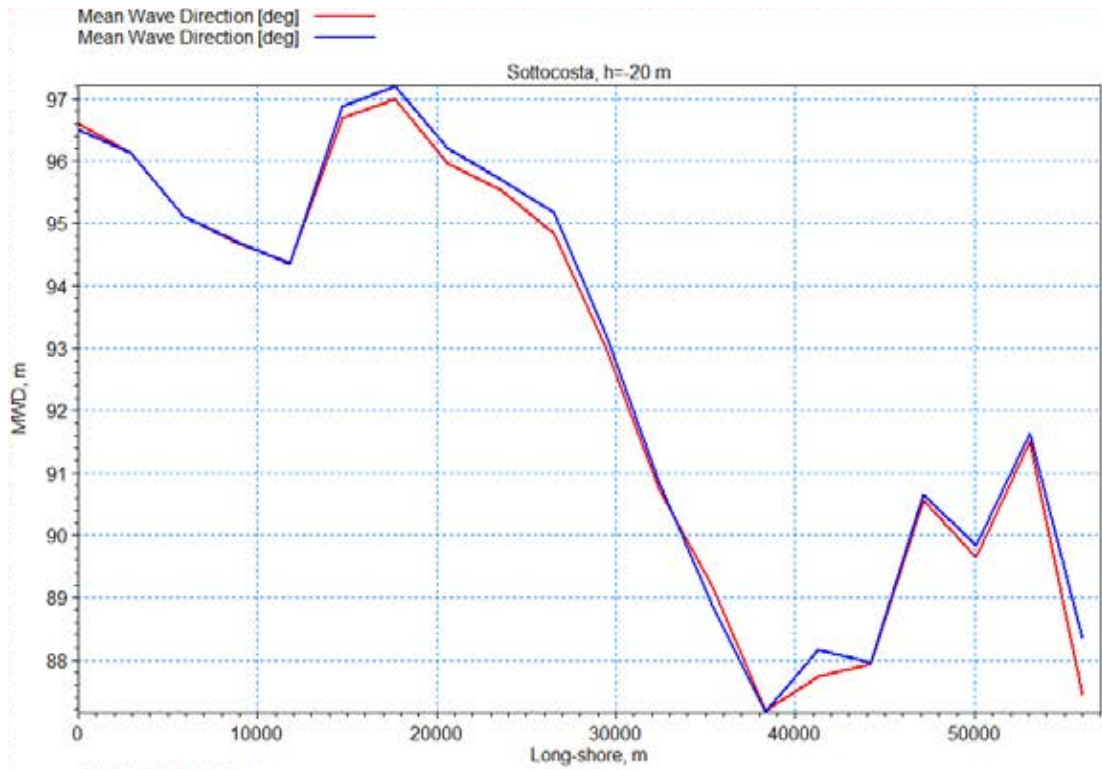
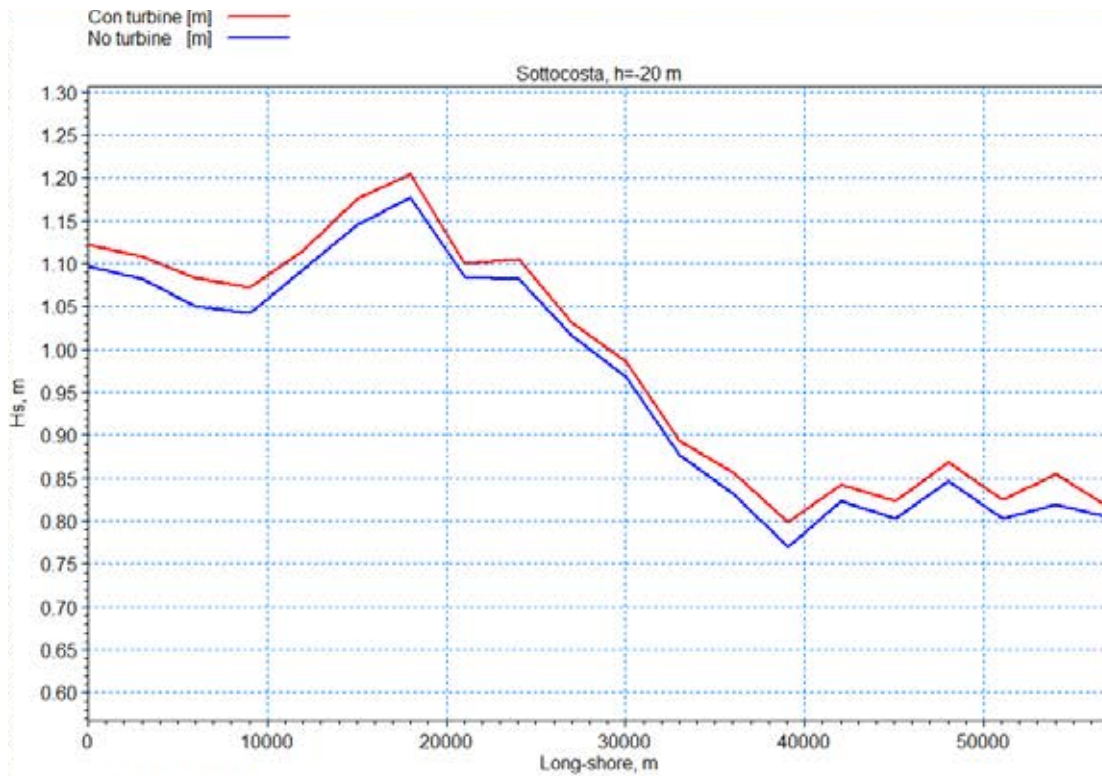
Stato ondoso 15, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



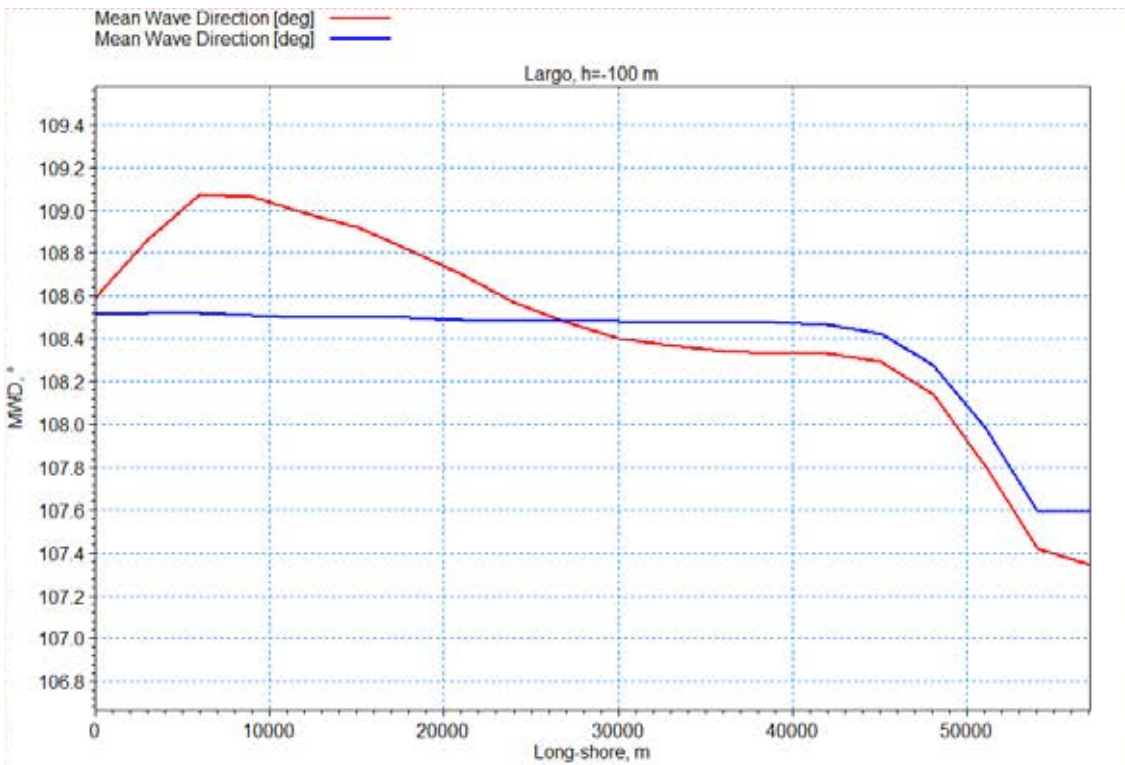
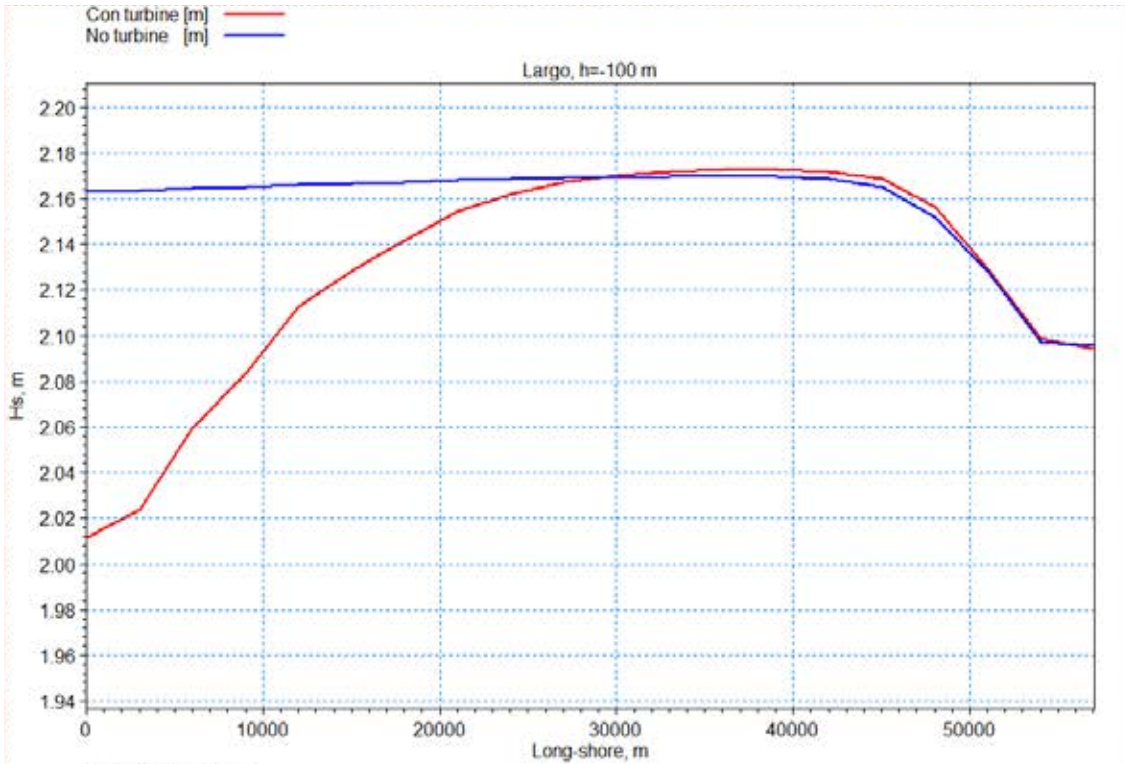
Stato ondoso 16, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



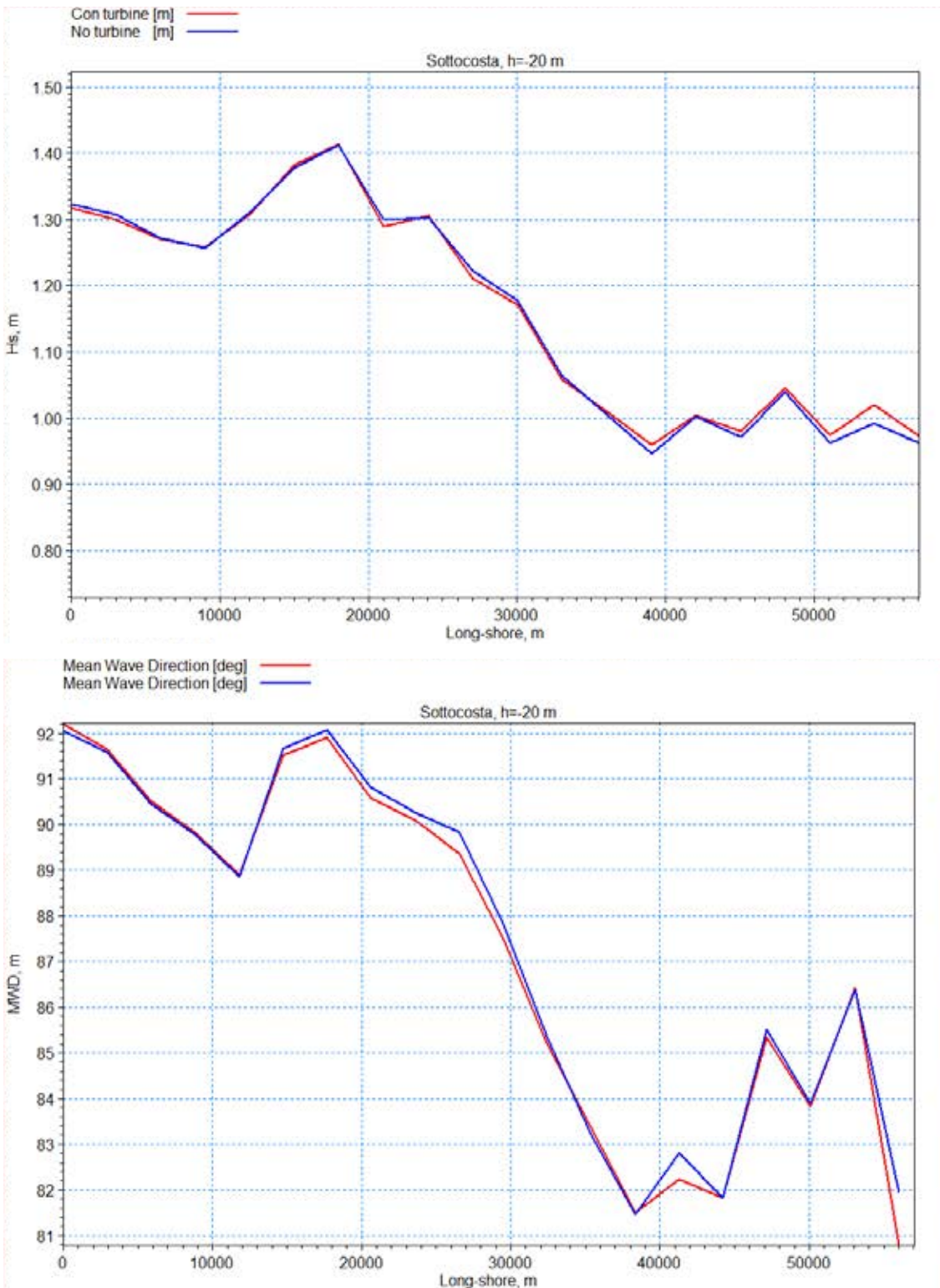
Stato ondoso 16, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



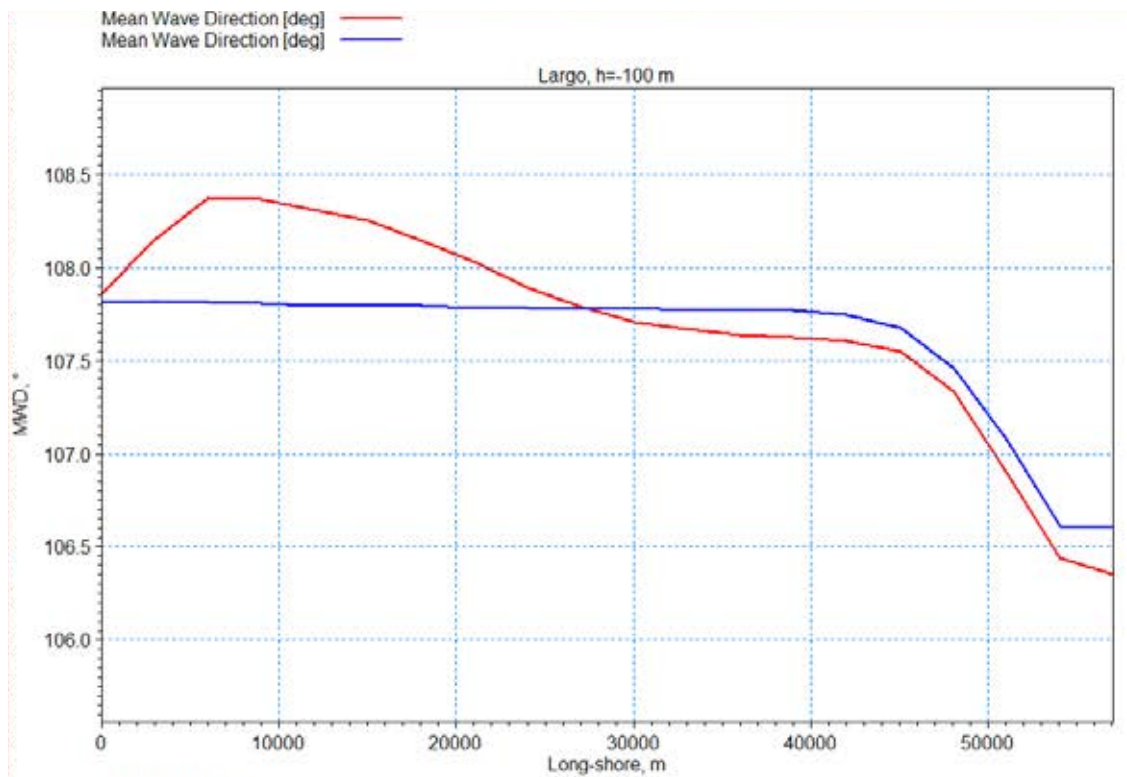
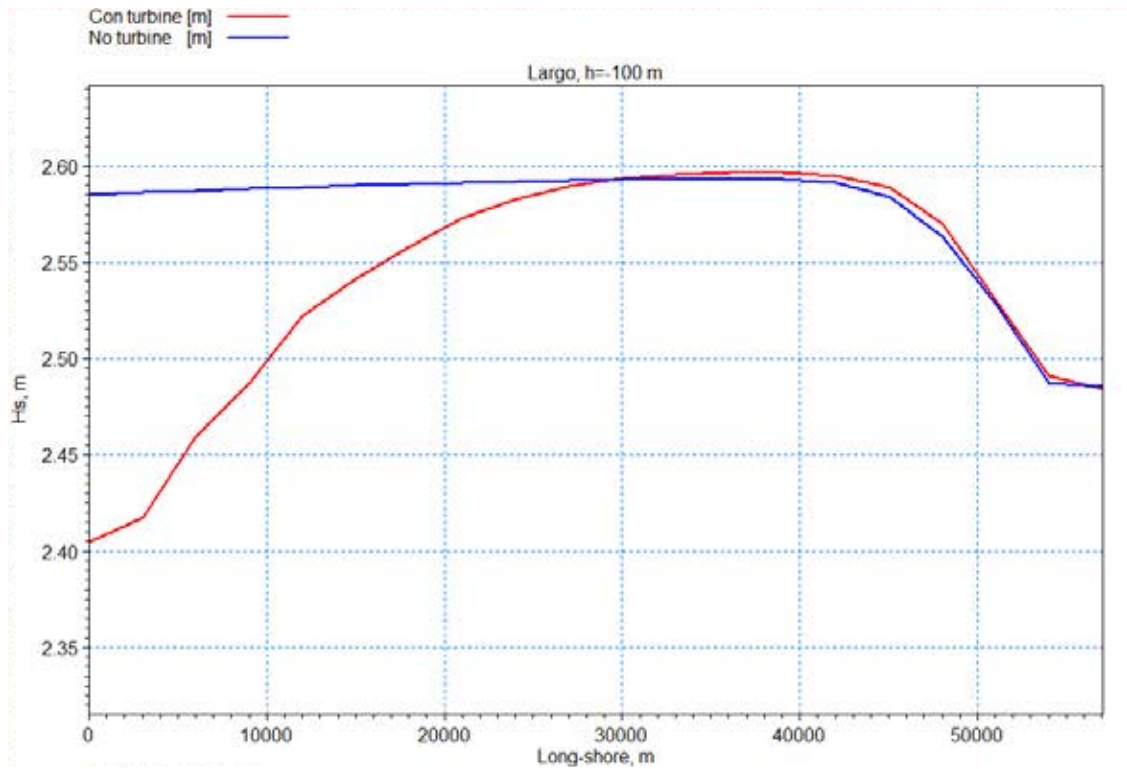
Stato ondoso 17, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



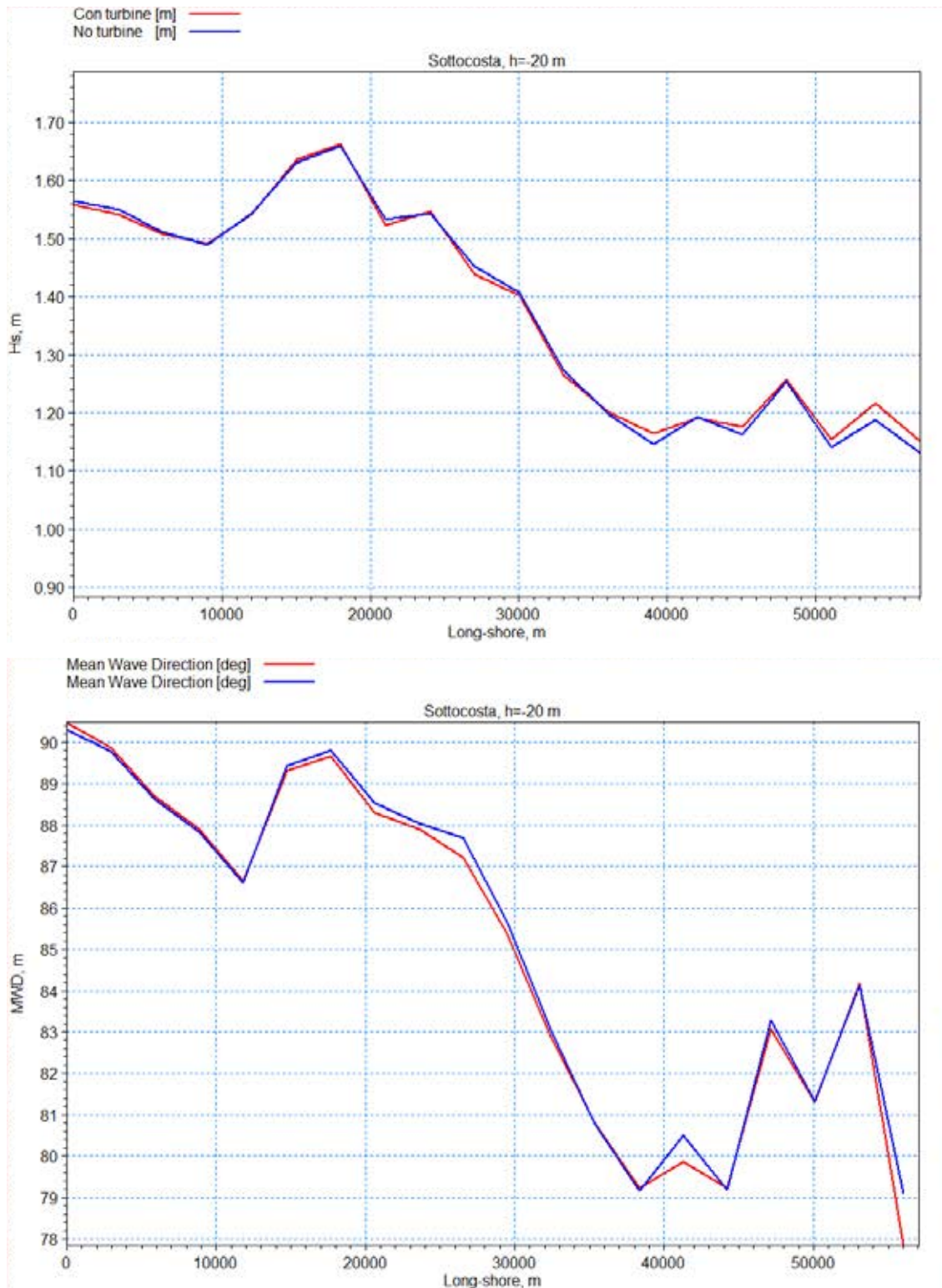
Stato ondoso 17, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



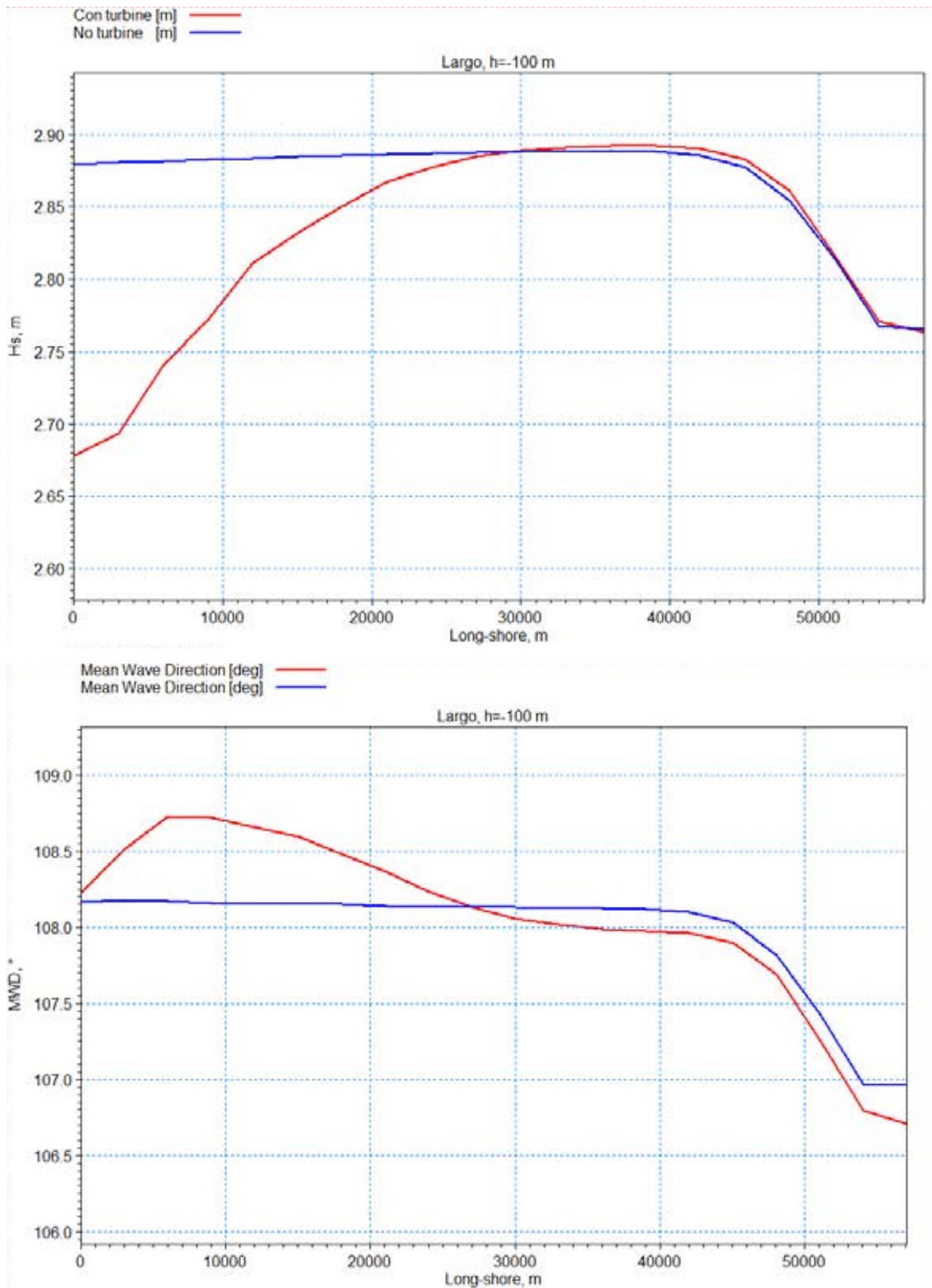
Stato ondoso 18, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



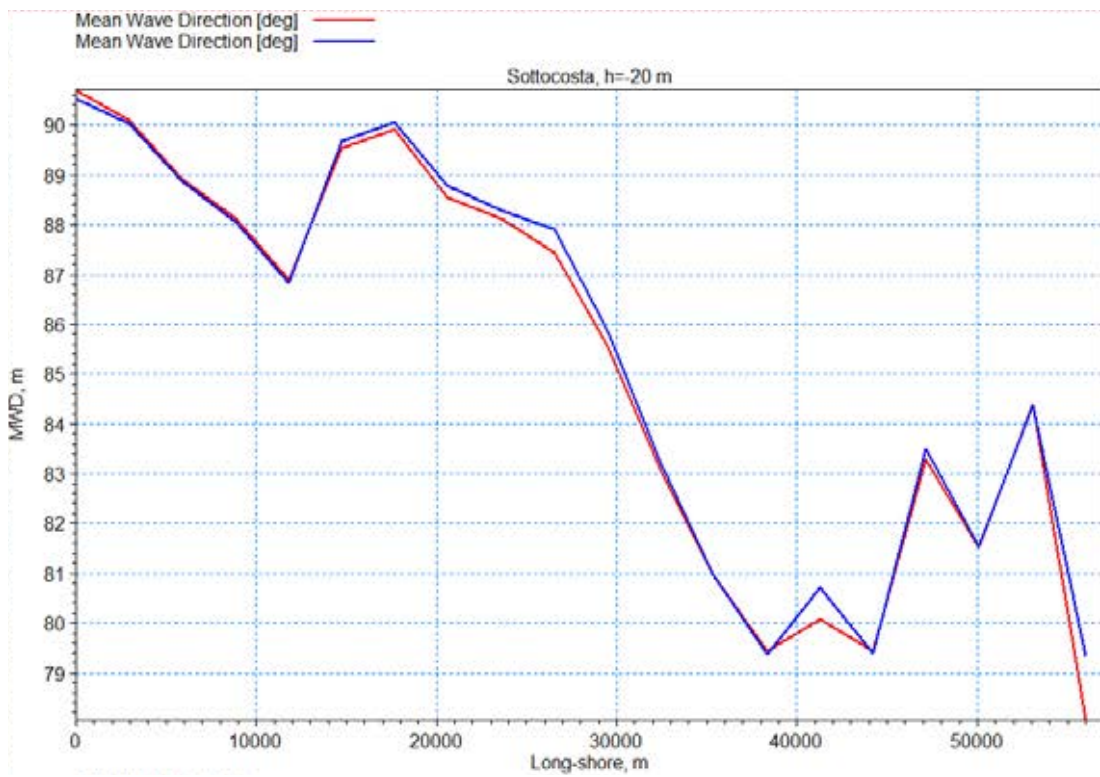
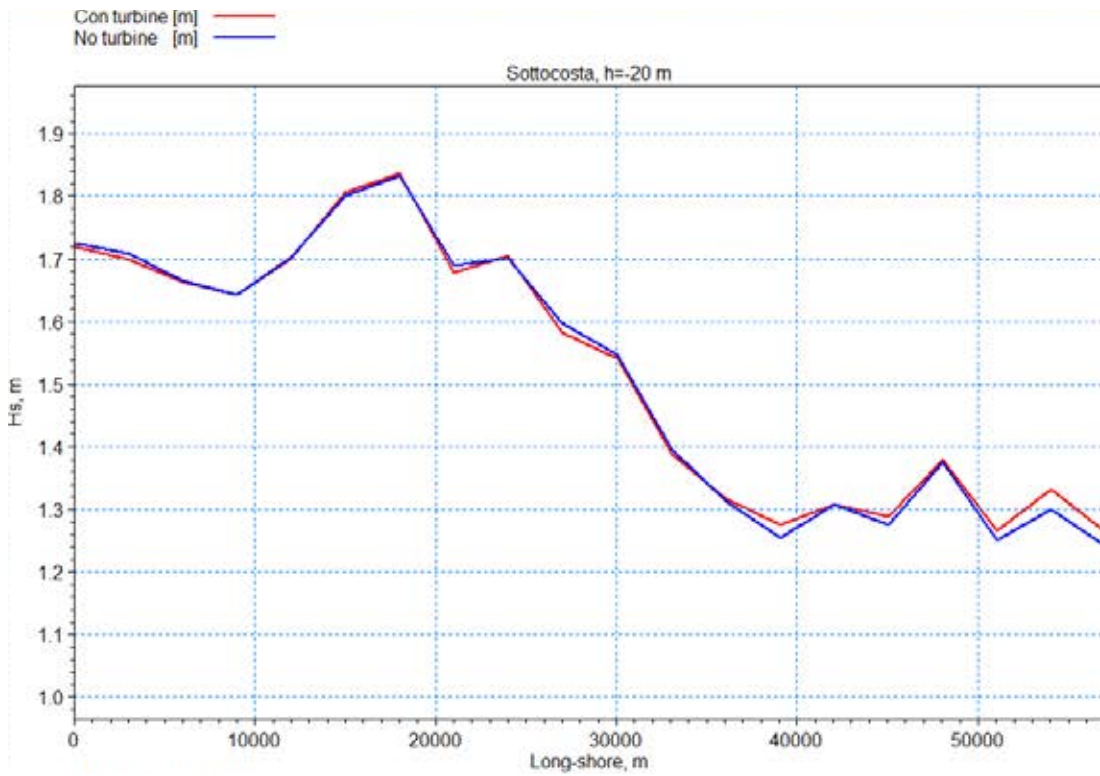
Stato ondoso 18, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



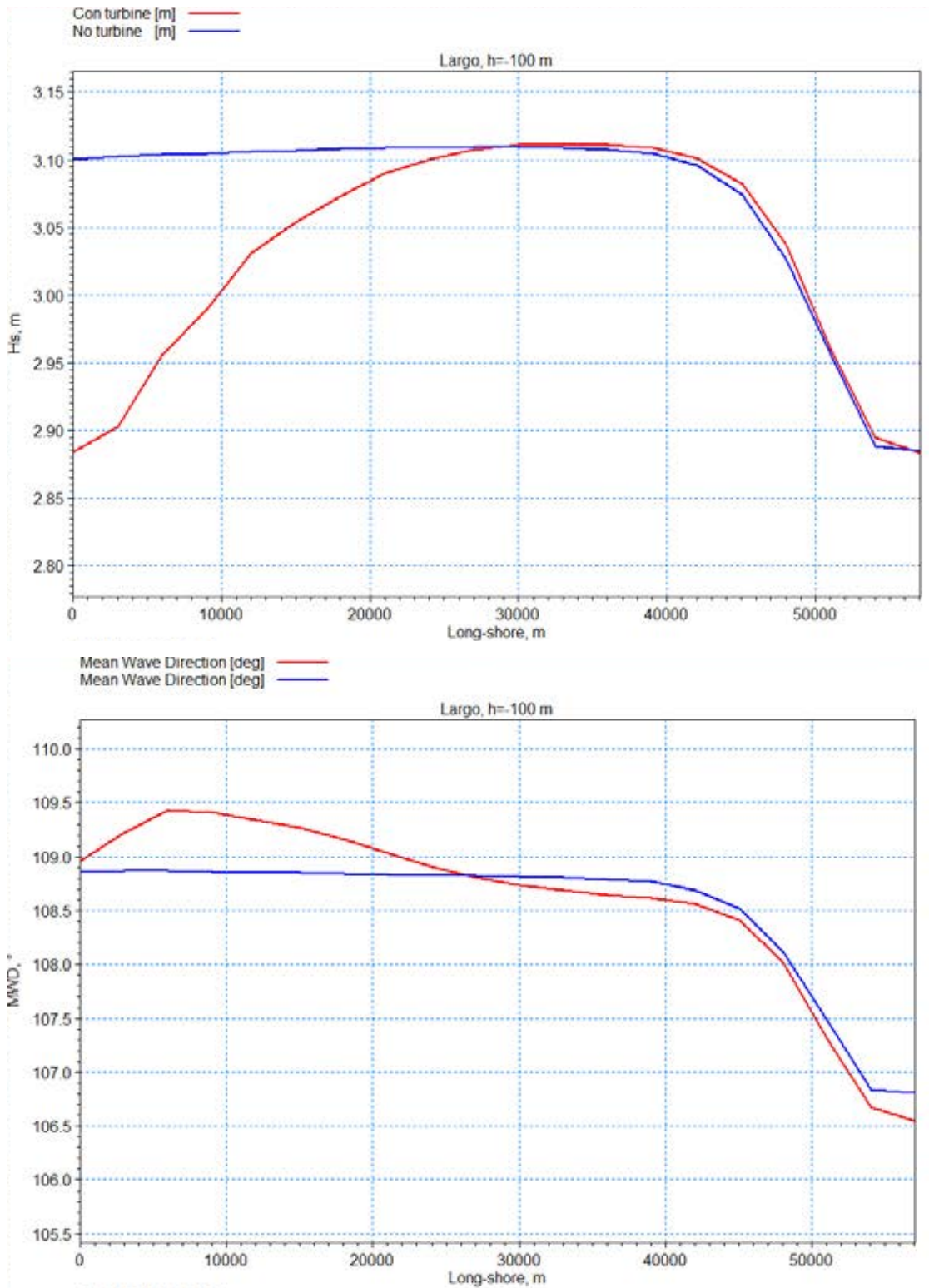
Stato ondoso 19, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



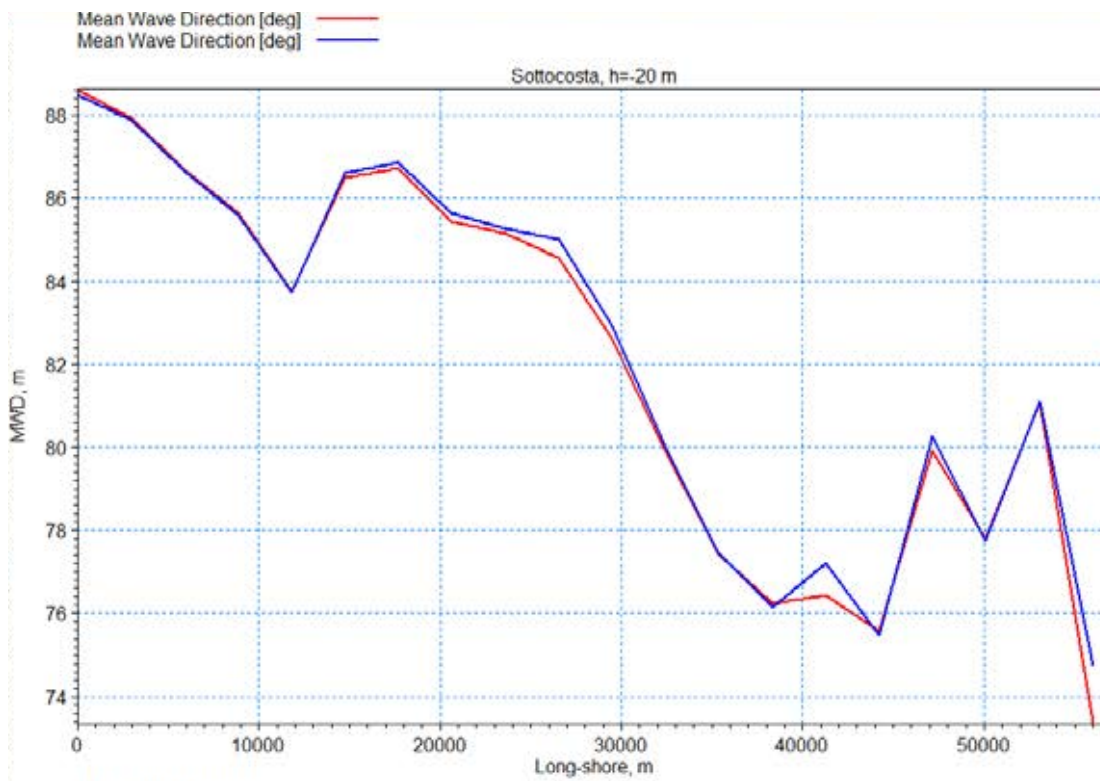
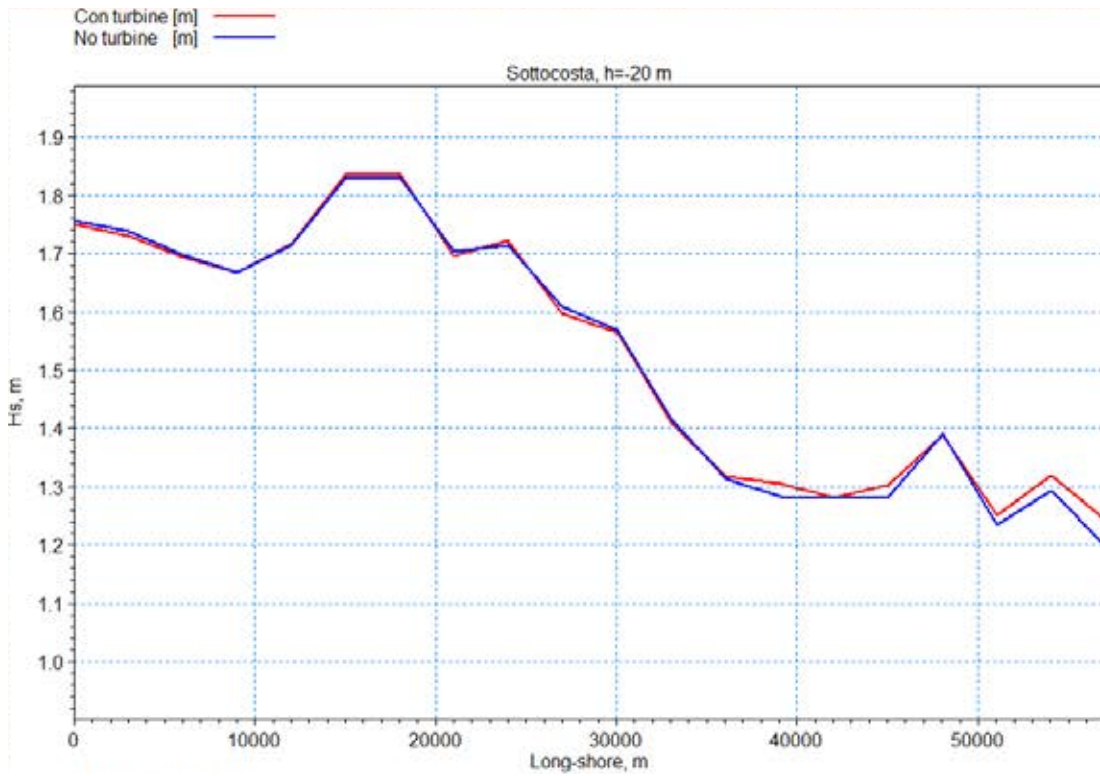
Stato ondoso 19, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



Stato ondoso 20, altezze significative e direzioni medie al largo h=-100 m



Stato ondoso 20, altezze significative e direzioni medie sottocosta h=-20 m



13. APPENDICE III

13.1 EFFETTI SUL MICROCLIMA

Nel 2004, la ricerca di Keith, et al., ha concluso che erano presenti microclimi all'interno di parchi eolici onshore su larga scala (Keith, et al., 2004). Queste aree sono create mescolando strati d'aria, spesso spostando aria o umidità più calda, che porta a un riscaldamento localizzato nelle scie all'interno dei parchi eolici, generalmente di notte. Questa ricerca è stata interpretata erroneamente dai giornalisti e dal pubblico in generale per implicare che i parchi eolici causano il riscaldamento delle temperature. In realtà, nel caso di riscaldamento localizzato, le turbine estraggono l'aria più calda da dove sale durante la notte e mescolano l'aria calda con l'aria più fredda sulla superficie del suolo, provocando una scia sottovento di aria più calda. Questa scia più calda è una redistribuzione dell'aria calda esistente, non un riscaldamento netto dell'atmosfera (Stromberg, 2014).

Sono state condotte ricerche per studiare l'influenza della riduzione della velocità del vento sottovento, o effetto scia, sulla disposizione delle turbine nei parchi eolici. La prima fila di turbine rallenta il vento attraverso il movimento delle pale della turbina, riducendo la velocità del vento e aumentando la turbolenza dietro la turbina. Le successive file di turbine sono quindi disposte per evitare le scie delle turbine posizionate controvento all'interno del parco. Allo stesso modo, sono stati condotti studi all'interno di parchi eolici onshore e offshore per osservare e modellare la miscelazione delle masse d'aria che si verificano sopra, sotto o all'interno dei parchi eolici. Fattori come temperatura, velocità del vento, umidità, pressione atmosferica e flusso d'aria vengono misurati con strumenti all'interno di parchi eolici, su aerei o da dati satellitari. Anche altri componenti come la resistenza, l'attrito superficiale, la turbolenza e la direzione del vento vengono presi in considerazione. I dati raccolti vengono poi applicati per creare modelli per valutare come i parchi eolici possono influenzare il clima locale. (Frandsen, et al., 2004; Platis, et al., 2018; Musial, 2018; Meyers & Meneveau, 2012; Deutsche Windguard, 2018).

Due manifestazioni molto visibili ma atipiche dell'effetto scia si sono verificate nel Mare del Nord al largo della costa della Danimarca. Questi casi sono spesso citati come esempi preoccupanti di microclimi che potrebbero verificarsi lungo la costa atlantica. In particolare, questi parchi eolici offshore si trovano al largo della costa occidentale della Danimarca, dove il vento generalmente si sposta attraverso il mare verso terra. (Hasager, et al., 2017)

Il parco eolico offshore Horns Rev 1 nel Mare del Nord è stato fotografato il 12 febbraio 2008, alle 10:10 Coordinated Universal Time (UTC), mostrando scie di nebbia che seguono la fila principale di turbine in movimento. Questo ha acceso la curiosità degli scienziati di capire quali fossero i fattori climatologici all'origine della condensa dietro le pale rotanti. In questo caso, un fenomeno unico di aria fredda e umida si trovava sopra uno strato marino caldo. Mentre le turbine ruotavano, l'aria fredda e umida veniva trascinata verso il basso, sopra l'aria più calda vicino al mare, creando condensa in una vorticoso scia di nebbia che andava alla deriva sottovento, sulla scia delle pale rotanti. La Figura 1 mostra l'evento di nebbia a Horns Rev 1. (Hasager, Rasmussen, Pena, Jensen e Rethore, 2013; Hasager, et al., 2017; Emeis, 2010).

Otto anni dopo, un altro fenomeno di scia di nebbia si è verificato a Horns Rev 2, situato a meno di 20 km da Horns Rev 1. Tuttavia, le condizioni meteorologiche all'origine di questo evento erano diverse. Semplificando, l'aria calda e umida è stata trascinata verso l'aria più fresca vicino al livello del mare, che si è mescolata e ha creato la nebbia sulla scia delle file principali di turbine. Sebbene le turbine sopravvento mostrino le scie di

nebbia, la miscelazione dello strato di aria calda superiore da parte delle turbine sottovento provoca una condizione di essiccazione all'interno di tali scie. Questa situazione è spesso misurata nei parchi eolici onshore. La Figura 2 mostra la nebbia e le scie secche di Horns Rev 2 del 25 gennaio 2016, alle 12:45 UTC. (Hasager, et al., 2017).



Figura 2.1.1. Scie di nebbia a Horns Rev 1 (Hasager, Rasmussen, Pena, Jensen, & and Rethore, 2013).



Figura 2.2.2. Scie a Horns Rev 2 (Hasager, et al., 2017).

In entrambi i casi, numerosi fattori aggiuntivi come la presenza di strati nuvolosi o nebbiosi, i venti prevalenti e l'instabilità atmosferica hanno portato alla formazione della scia di nebbia. Questi eventi sono noti grazie alle fotografie scattate dagli elicotteri in rotta verso località offshore, la durata degli eventi è incerta. A causa dei numerosi fattori che contribuiscono a questi rari eventi, è probabile che la persistenza di scie visibili duri solo da minuti a forse ore. La ricerca ha stabilito che se anche un solo fattore della formazione della scia dovesse cambiare, non sarebbero presenti scie visibili (Joulin, et al., 2020; Hasager, et al., 2017; Hasager, Rasmussen, Pena, Jensen e Rethore, 2013).

I venti prevalenti sulla costa atlantica sono generalmente diretti lontano dalla costa, a seconda della stagione (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), ND,a; NOAA, ND,b). In circostanze normali, le scie dei parchi eolici offshore si estenderanno lontano dalla costa e nell'Oceano Atlantico. Se il vento soffia verso la riva e le turbine sono in funzione, nella maggior parte dei casi la distanza dalla riva è abbastanza grande da dissipare la maggior parte della turbolenza di scia prima che raggiunga la riva. L'evento di scia di nebbia che arriva a terra è estremamente improbabile date le condizioni meteorologiche uniche necessarie per creare questo fenomeno (Hasager, Rasmussen, Pena, Jensen, & and Rethore, 2013; Hasager, et al., 2017)

Questi due esempi visibili mostrano che nei parchi eolici sono presenti microclimi localizzati. Anche gli studi e le ricerche sui parchi eolici onshore e offshore, in combinazione con modelli complessi, forniscono la prova che all'interno dei parchi eolici si creano microclimi (Hasager, Rasmussen, Pena, Jensen, & and Rethore, 2013; Hasager, et al., 2017; Wang & Prinn, 2010).

A parte eventi molto rari, i microclimi non si traducono nelle uniche scie visibili viste a Horns Rev 1 o 2. Quando le turbine girano, creano scie sottovento e, in alcuni casi, mescolamento di strati atmosferici. La ricerca sostiene che sebbene la temperatura o l'umidità siano ridistribuite nelle scie della turbina, questo non è un cambiamento netto di temperatura o vapore acqueo a causa delle turbine. La superficie dell'oceano è più liscia della terraferma, creando meno resistenza alle lente scie sottovento, consentendo quindi alle scie di raggiungere una maggiore estensione che sulla terraferma. Le scie tendono ad essere più brevi in condizioni di vento stabile, con velocità e direzione del vento costanti (Wang & Prinn, 2010; Hasager, et al., 2017; Siedersleben, et al., 2018; Vautard, et al., 2014; Platis, et al., 2018).

Per quanto riguarda **il parco eolico di Barium Bay**, sulla base dei risultati presentati nella letteratura analizzata, si può verosimilmente ipotizzare che le intensità del vento si possano ridurre fino a circa il 20% all'interno del parco, con valori anche del 50% alla navicella della turbina, e fino al 10% sottovento delle turbine più esterne al parco, con un recupero entro una distanza di 30/40 km sottovento.

Inoltre, per quanto riguarda gli effetti attesi sul regime anemometrico sotto la costa, ubicata alla distanza di circa 20 km dal centro del campo eolico, si può verosimilmente ritenere che:

- nel caso di venti di Maestrale/Tramontana, provenienti da Nord Nord - Ovest, frequenti e abbastanza intensi, la zona sotto scia delle turbine si propagherebbe longitudinalmente alla costa fino a attenuarsi entro una lunghezza di 30/40 km, causando effetti a terra difficilmente apprezzabili;
- nel caso di venti di Scirocco, provenienti da Sud Sud-Est, frequenti e più intensi, la zona sotto scia delle turbine si propagherebbe verso il largo, in direzione opposta alla costa, causando effetti a terra difficilmente apprezzabili."

Inoltre, per turbine galleggianti, è stato stimato che il loro moto oscillatorio in risposta alle onde incidenti

causa una maggiore miscelazione dei vortici indotta dalla risposta dinamica delle strutture, che potenzialmente riduce la lunghezza di recupero della scia sottovento alla turbina.

Bologna, 30 Luglio 2023

Responsabile scientifico

Prof. Barbara Zanuttigh

Direttore

Prof. Stefano Gandolfi