



# Regione Siciliana

Assessorato dell'Agricoltura, dello Sviluppo Rurale e della Pesca Mediterranea  
Dipartimento di Pesca Mediterranea

Comune di Siculiana



REGIONE SICILIA

## Porto di Siculiana Marina (AG)

Finanziamento PO FEAMP 2014-2020 - Misura 1.43 (Codice Progetto 09/PP/16)

Lavori di ampliamento della banchina alla radice della diga foranea di sopraflutto da destinare all'ormeggio di imbarcazioni da pesca operativa a seguito dei lavori di dragaggio all'interno dello specchio acqueo del porto occorrenti per il ripascimento del litorale di Cattolica Eraclea Minoa (appaltato dal Commissario di Governo contro il dissesto idrogeologico della Regione Siciliana codice Re.Ndis. 19IR471/GI in corso di esecuzione)

### PROGETTO ESECUTIVO

**All. B.5** - Studio idraulico marittimo

**Palermo, 06.12.2021**

**Il Sindaco:**

Prof. Giuseppe Zambito

**Progettazione:**

Sigma Ingegneria S.r.l.

**Capogruppo Mandataria**

**Il RUP:**

Ing. Vincenzo Piombino

Arcotec Engineering S.r.l.

**Mandante**



## Sommario

Indice delle Figure .....	2
1 Introduzione.....	4
2 Stima degli eventi estremi a largo .....	10
3 Analisi di penetrazione del moto ondoso .....	16

## Indice delle Figure

Figura 1 - Posizione di Siculiana nella costa del Canale di Sicilia .....	4
Figura 2 – Dettaglio del porto di Siculiana, in cui è possibile osservare l'insabbiamento dello stesso allo stato attuale, a causa dell'incompletezza delle opere foranee.....	5
Figura 3 - Ortofoto satellitare storica del porto di Siculiana nel 2003.....	5
Figura 4 - Planimetria opere in progetto .....	7
Figura 5 - Particolare planimetrico opere in progetto .....	7
Figura 6 - Configurazione del porto a seguito di dragaggio.....	8
Figura 7 - Esempio della griglia del modello "Mediterranean Sea Wave Hindcast" forniti dal sistema Copernicus, con risoluzione spaziale della griglia di circa 4.5 km; altezze in metri .....	11
Figura 8 - Punto di estrazione dei dati ondometrici modello CMEMS.....	11
Figura 9 - Elaborazione dati CMEMS - massimi annuali per ogni classe di direzione .....	12
Figura 10 - Risultati elaborazione statistica secondo la distribuzione di Gumbel, la distribuzione Lognormale e la distribuzione Normale .....	13
Figura 11 - Adattamento delle distribuzioni ai dati.....	14
Figura 12 - Risultati delle elaborazioni statistiche per i due periodi di ritorno considerati ai fini progettuali .....	15
Figura 13 – Configurazione del porto modellata – Porto di Siculiana con banchina in progetto realizzata e fondali dragati – Profondità in m .....	17
Figura 14 - Schema dominio CGWAVE.....	20
Figura 15 - Risultati analisi di penetrazione del moto ondoso .....	23
Figura 16 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 5$ anni - direzione di provenienza $157.5^\circ$ N.....	25
Figura 17 -- Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 5$ anni - direzione di provenienza $180^\circ$ N.....	26
Figura 18 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 5$ anni - direzione di provenienza $202.5^\circ$ N.....	27
Figura 19 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 5$ anni - direzione di provenienza $225^\circ$ N.....	28
Figura 20 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 5$ anni - direzione di provenienza $247.5^\circ$ N.....	29

Figura 21 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 5$ anni - direzione di provenienza $270^\circ$ N.....	30
Figura 22 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 50$ anni - direzione di provenienza $157.5^\circ$ N.....	31
Figura 23 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 50$ anni - direzione di provenienza $180^\circ$ N.....	32
Figura 24 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 50$ anni - direzione di provenienza $202.5^\circ$ N.....	33
Figura 25 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 50$ anni - direzione di provenienza $225^\circ$ N.....	34
Figura 26 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 50$ anni - direzione di provenienza $247.5^\circ$ N.....	35
Figura 27 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno $T_r = 50$ anni - direzione di provenienza $270^\circ$ N.....	36

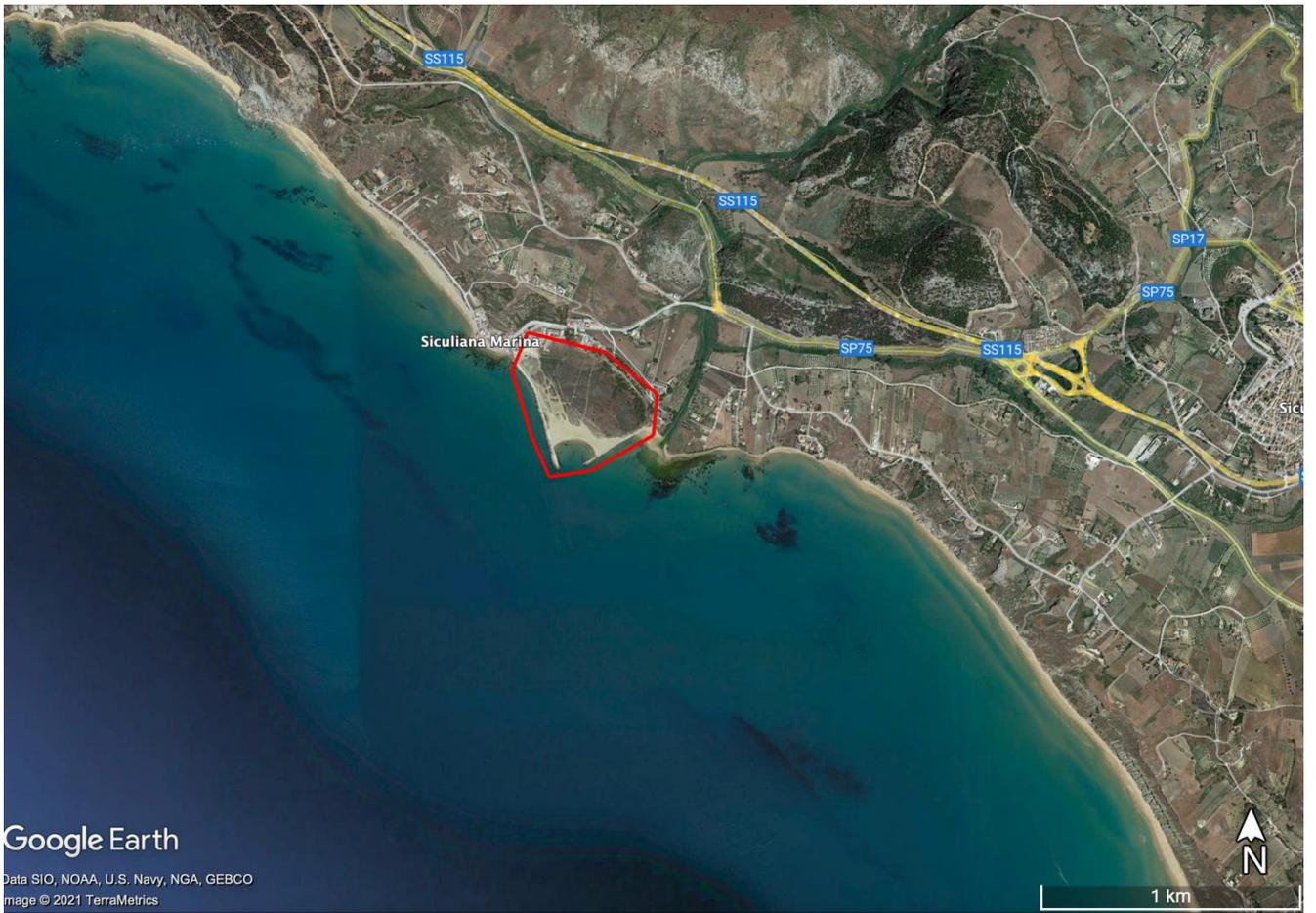
# 1 Introduzione

Il presente studio idraulico marittimo del Porto di Siculiana (Ag) è stato realizzato per il progetto esecutivo “Lavori di ampliamento della banchina alla radice della diga foranea di sopraflutto da destinare all'ormeggio di imbarcazioni da pesca operativa a seguito dei lavori di dragaggio all'interno dello specchio acqueo del porto occorrenti per il ripascimento del litorale di Cattolica Eraclea Minoa (appaltato dal Commissario di Governo contro il dissesto idrogeologico della Regione Siciliana codice Re.Ndis. 19IR471/GI in corso di esecuzione)”.

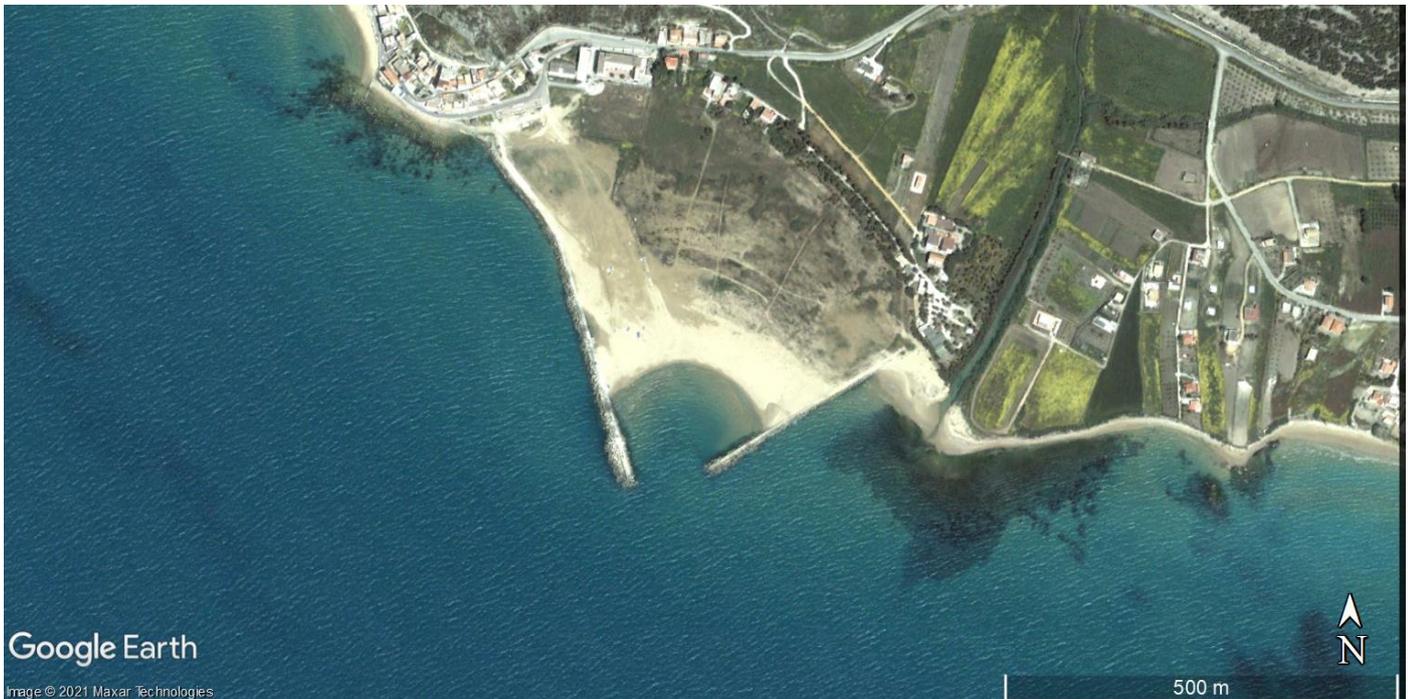
Il Porto di Siculiana è presente sulla costa meridionale della Sicilia, nello specifico in provincia di Agrigento tra Porto Empedocle e Sciacca Figura 1 e Figura 2.



*Figura 1 - Posizione di Siculiana nella costa del Canale di Sicilia*



*Figura 2 – Dettaglio del porto di Siculiana, in cui è possibile osservare l'insabbiamento dello stesso allo stato attuale, a causa dell'incompletezza delle opere foranee*



*Figura 3 - Ortofoto satellitare storica del porto di Siculiana nel 2003*

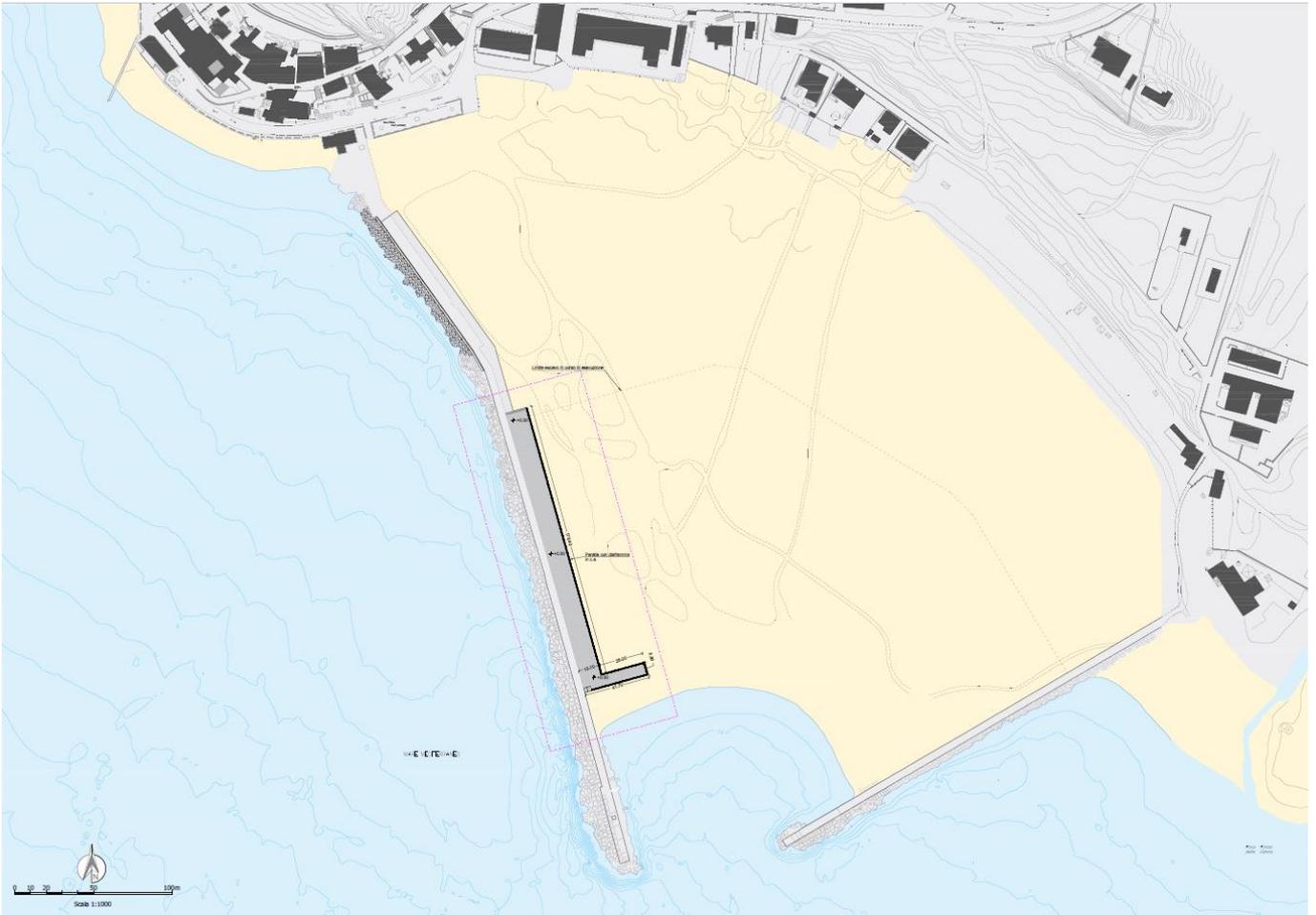
Il porticciolo di Siculiana risulta allo stato attuale (e da alcuni decenni - Figura 3) quasi totalmente insabbiato a causa del trasporto solido longitudinale esistente sul litorale e da una configurazione incompleta delle opere foranee, che non permette di evitare l'ingresso all'interno del bacino portuale dei sedimenti.

L'accumulo dei sedimenti all'interno del Porto di Siculiana è stato, inoltre, una delle cause dell'elevata erosione costiera della spiaggia di Eraclea Minoa, presente ad Ovest del porto.

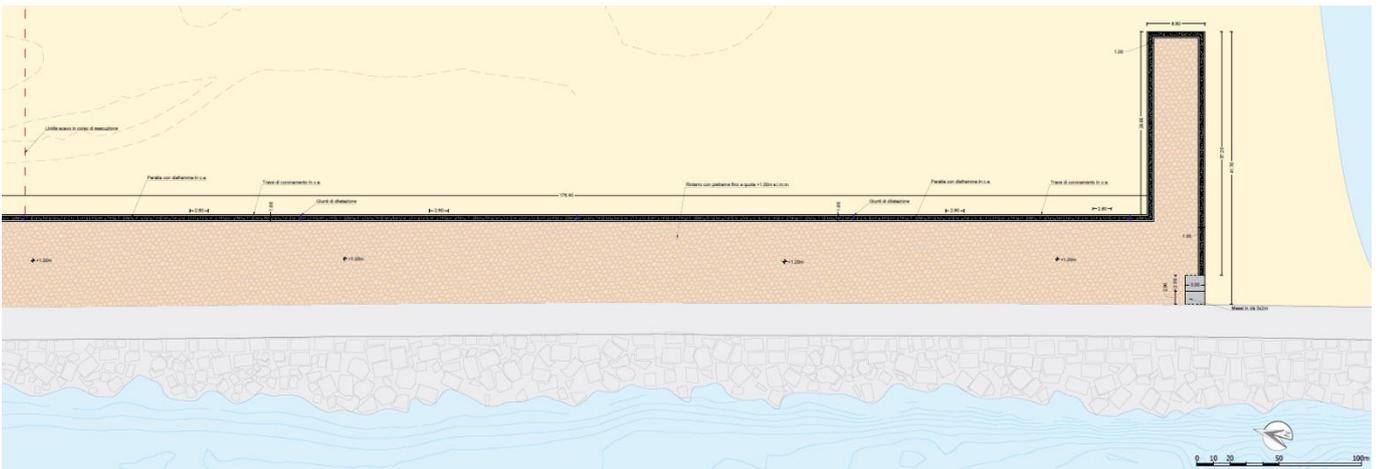
Allo stato attuale è in essere, tramite altra procedura, un progetto di ripascimento della spiaggia di Eraclea Minoa che prevede l'utilizzo di parte dei sedimenti accumulati all'interno del porto di Siculiana, per cui sarà possibile da un lato proteggere un tratto di costa dall'erosione e dall'altro ripristinare la navigabilità del porto di Siculiana (in attesa del completamento delle opere foranee, unica soluzione per scongiurare un futuro insabbiamento).

Come indicato nel restante dossier di progetto si prevede, prima dell'esecuzione del dragaggio del porto, la realizzazione di un intervento di allargamento della banchina esistente sul molo foraneo, tramite la realizzazione di un muro di sponda della banchina con diaframmi in c.a. che saranno realizzati da terra.

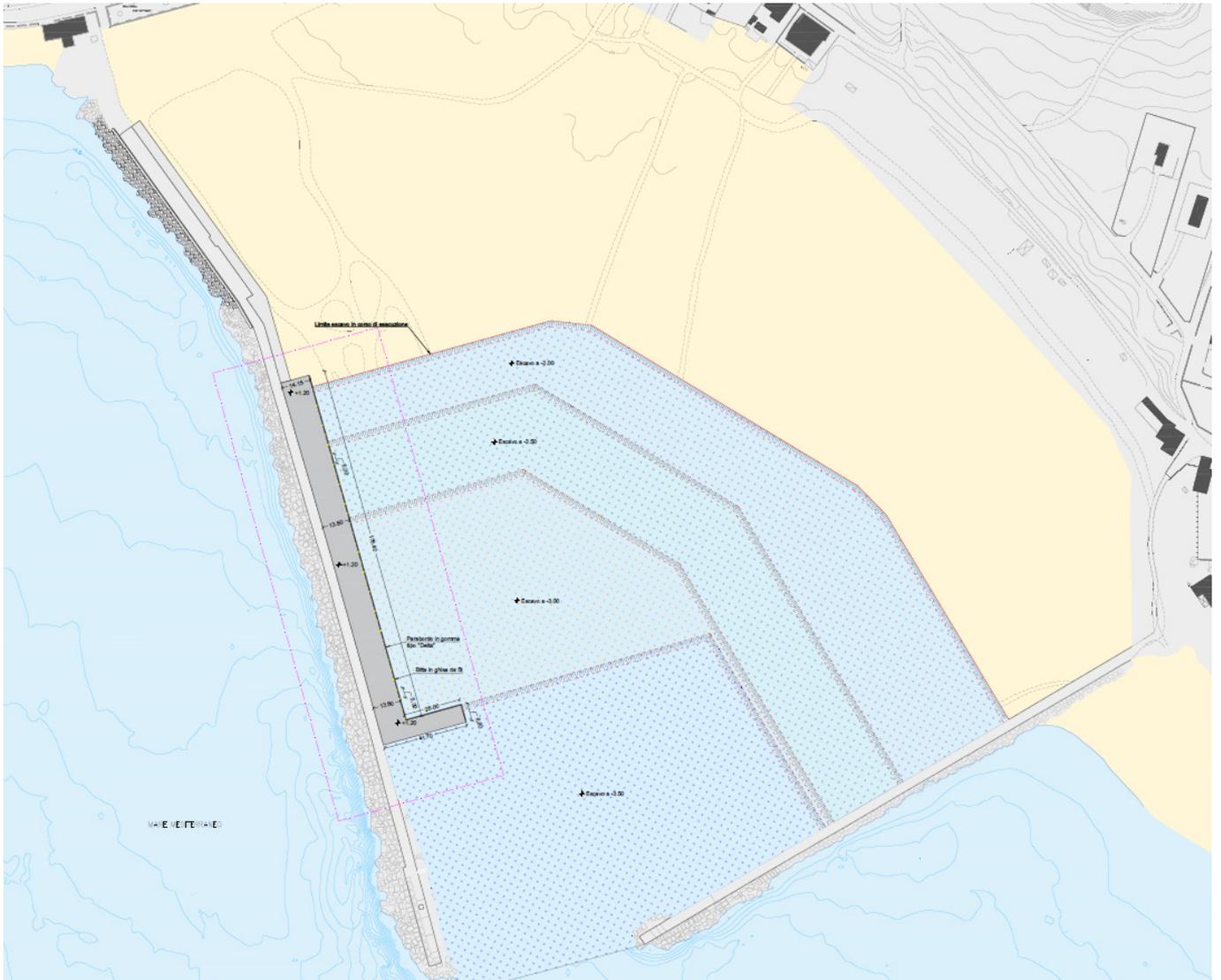
Si prevede, successivamente rispetto all'esecuzione della banchina, il completamento del dragaggio del porto.



*Figura 4 - Planimetria opere in progetto*



*Figura 5 - Particolare planimetrico opere in progetto*



*Figura 6 - Configurazione del porto a seguito di dragaggio*

Il presente studio idraulico marittimo, a partire dalla stima degli eventi estremi a largo, contiene i risultati delle simulazioni di penetrazione del moto ondoso all'interno del bacino portuale nella configurazione a seguito del dragaggio.

Nello specifico, i dati di partenza per quanto riguarda di clima ondoso a largo sono stati i dati forniti dal sistema satellitare Copernicus – Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). A partire da questi dati di onda è stato possibile effettuare un'analisi statistica per definire, in termini di altezza d'onda, l'onda caratteristica di un certo periodo di ritorno  $T_r$  per ogni direzione.

Il presente studio di agitazione interna, congiuntamente allo studio idraulico marittimo e alle verifiche di funzionalità idraulica e stabilità delle opere foranee, vogliono dunque dimostrare come la soluzione progettuale proposta sia in grado di risolvere definitivamente le condizioni di insicurezza del porto e di garantire il raggiungimento degli obiettivi espressi dall'amministrazione nel quadro esigenziale contenuto nel documento di indirizzo alla progettazione.

Successivamente, si è andati a simulare l'agitazione all'interno del bacino portuale sia nello stato attuale che nelle condizioni di progetto (completo e di primo stralcio). Per eseguire queste simulazioni si è utilizzato il modello CGWAVE, facente parte del pacchetto Software SMS, sviluppato dall' U.S. Army Corp of Engineers (USACE).

## 2 Stima degli eventi estremi a largo

La stima degli eventi estremi agenti su un paraggio deve necessariamente partire da una fonte di dati storici meteomarini collezionati su un punto quanto più prossimo al reale luogo di interesse. Nello specifico, il database deve essere ritenuto affidabile nel senso di precisione dei dati in esso contenuti e deve possedere una serie storica di dati abbastanza lunga da permettere una stima degli eventi estremi significativa da un punto di vista statistico.

Ad oggi il database che meglio risponde alle sopracitate condizioni è quello fornito dal sistema Copernicus - CMEMS (Copernicus Maritime Copernicus - Marine Environment Monitoring Service), finanziato dall'Unione Europea. In particolare, sul sistema Copernicus – CMEMS (<http://marine.copernicus.eu/>) sono disponibili diversi modelli riguardanti aspetti meteo marini. In particolare, per il caso in esame, è andato ad utilizzare il seguente database:

- Il database [MEDSEA HINDCAST WAV 006 012](#) (*Mediterranean Sea Waves Hindcast*), da cui è possibile estrarre i dati ondametrici orari (altezza d'onda significativa, periodo di picco, direzione di provenienza etc.) da Gennaio 1993 a Gennaio 2020 (n. 27 anni) su tutto il bacino del mediterraneo, discretizzato su una griglia con maglia spaziale di  $1/24^\circ$  di grado (interesse  $\approx 4.5$  Km)

Da questi database, di cui si riporta in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** un esempio nel bacino di mediterraneo, è dunque possibile estrarre le serie storiche di dati ondametrici per i punti di interesse per tutto il time-frame indicato.

Nello specifico, per il caso in esame, sono stati acquisiti i dati storici relativi al punto aventi le seguenti coordinate:

- Punto CMEMS: Latitudine  $37.31^\circ\text{N}$  – Longitudine  $13.38^\circ\text{E}$

I dati estratti, contenenti l'altezza d'onda significativa, il periodo e la direzione di provenienza orari per tutto il periodo sono stati elaborati successivamente tramite un software in house che permette di individuare i massimi annuali per ogni direzione di provenienza significativa.

Nel caso in esame sono state considerate la  $135$ ,  $157.5$ ,  $180$ ,  $202.5$ ,  $225$ ,  $247.5$  e  $270^\circ\text{N}$  in base all'esposizione del pareggio.

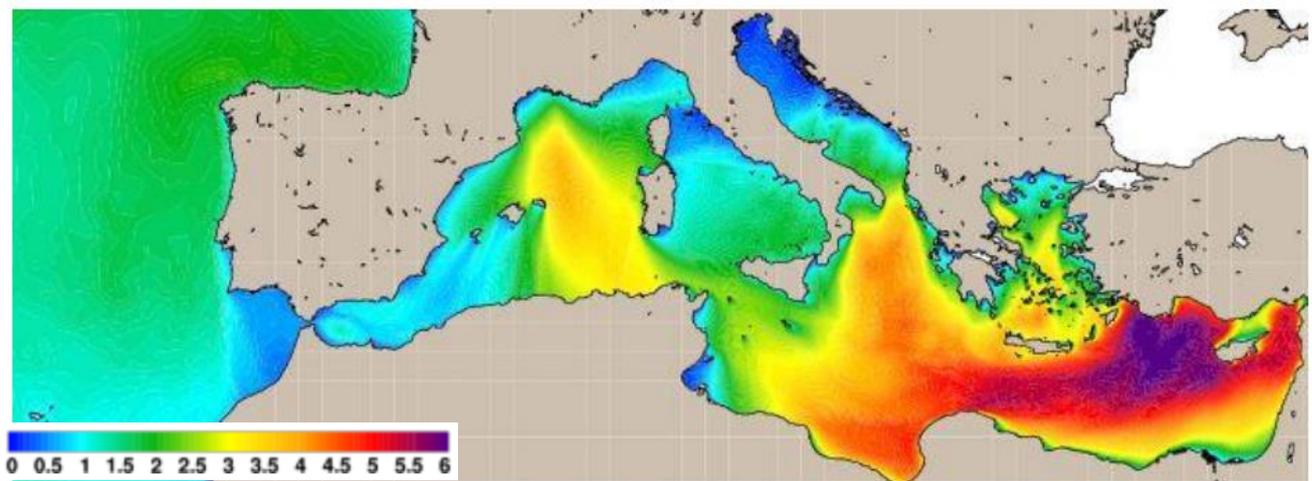


Figura 7 - Esempio della griglia del modello "Mediterranean Sea Wave Hindcast" forniti dal sistema Copernicus, con risoluzione spaziale della griglia di circa 4.5 km; altezze in metri

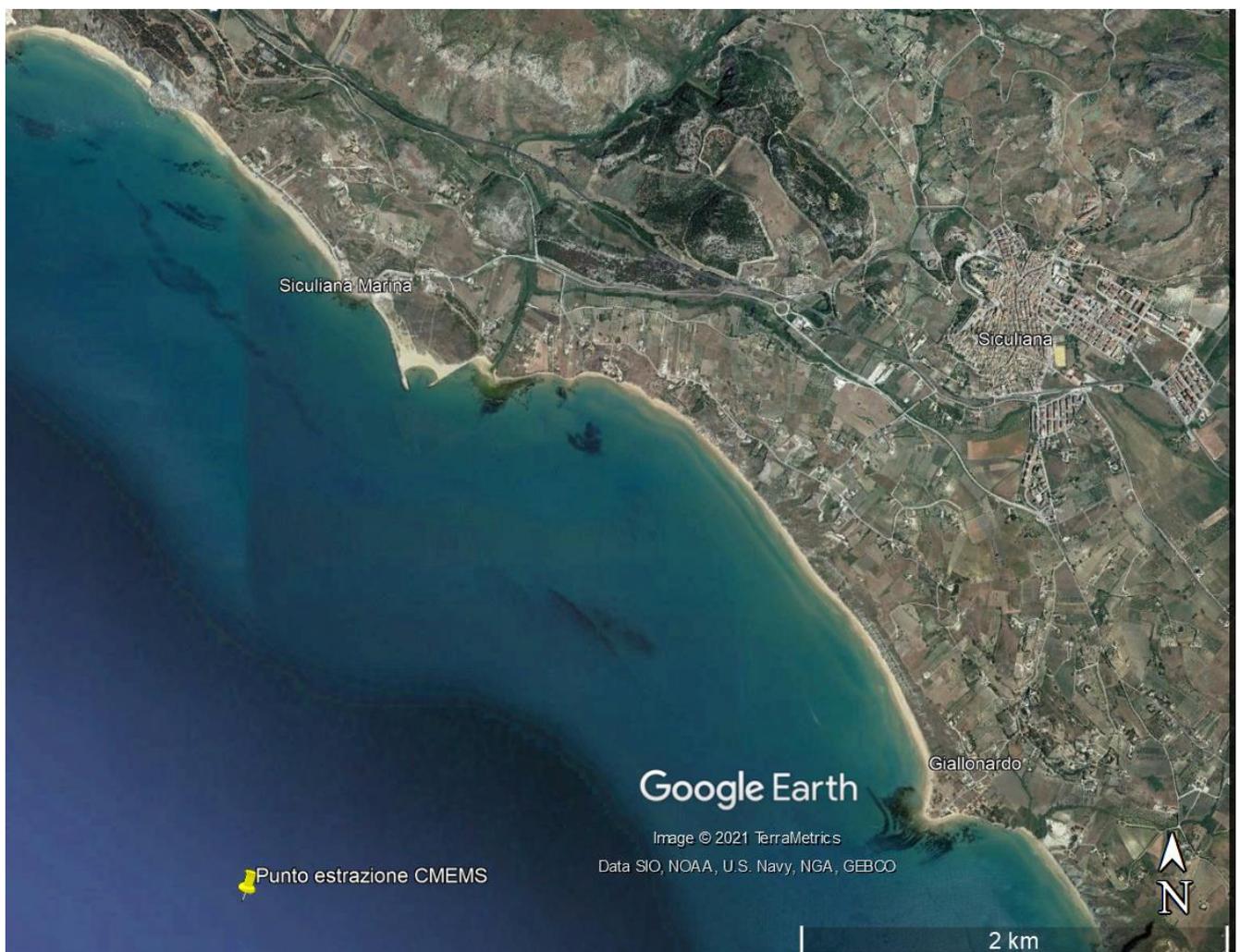


Figura 8 - Punto di estrazione dei dati ondametrici modello CMEMS

In particolare, a seguito di una riorganizzazione dei dati ondametrici estratti in classi di direzione di provenienza (come da consuetudine di ampiezza pari a 22.5 °) in Figura 9.

ANNO	Hs [m] massima annuale per classe di direzione [°N]						
	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270
1993	0.92	1.92	2.15	3.51	3.39	4.56	4.56
1994	1.33	1.94	2.01	2.21	2.28	2.94	3.73
1995	1.47	1.77	1.80	1.70	1.51	2.01	3.66
1996	1.55	2.56	2.47	2.15	2.34	2.61	3.68
1997	1.27	2.08	2.41	2.44	2.08	2.41	3.03
1998	0.66	1.77	1.64	2.57	3.45	3.59	4.11
1999	0.93	2.31	1.86	2.09	2.27	3.12	3.73
2000	1.01	1.64	1.85	2.61	2.26	4.32	3.51
2001	0.58	1.17	2.84	2.12	2.03	3.91	3.35
2002	1.17	1.97	2.04	2.10	2.07	2.69	3.90
2003	1.25	2.10	2.18	2.23	2.64	3.07	4.00
2004	0.95	2.72	4.23	4.41	4.05	2.64	3.22
2005	1.05	2.24	1.81	1.87	3.59	3.46	3.77
2006	1.38	2.36	1.59	1.89	1.63	3.54	3.78
2007	1.20	1.95	1.95	1.83	1.63	2.71	3.15
2008	0.66	2.46	3.25	2.73	2.39	3.26	4.19
2009	1.92	2.34	2.99	3.80	2.97	3.69	4.25
2010	1.11	3.26	3.39	2.78	3.08	3.68	3.93
2011	1.25	2.31	2.51	1.85	2.22	3.79	3.09
2012	1.66	1.91	2.54	2.50	2.79	2.73	4.42
2013	0.45	2.52	2.56	3.23	3.30	4.55	4.77
2014	0.50	2.29	2.35	2.26	2.70	3.55	3.83
2015	1.07	2.25	2.27	2.05	2.55	3.84	3.87
2016	1.34	2.98	3.38	2.23	2.59	3.58	3.46
2017	0.70	2.86	1.42	2.93	2.91	3.85	3.60
2018	1.63	1.84	2.62	2.51	2.43	3.73	3.68
2019	1.37	2.32	3.31	4.45	4.48	4.88	4.05
<b>MAX</b>	1.92	3.26	4.23	4.45	4.48	4.88	4.77

*Figura 9 - Elaborazione dati CMEMS - massimi annuali per ogni classe di direzione*

A partire dai massimi annuali è possibile andare a fittare delle distribuzioni di probabilità, per completare lo studio statistico sugli eventi estremi.

In particolare, nel caso in esame, sono state utilizzate la distribuzione di Gumbel, la distribuzione normale e la distribuzione Lognormale i cui parametri sono stati stimati

tramite il metodo dei momenti (calcolo media e deviazione standard dei dati del campione).

A partire dalle distribuzioni di probabilità, è possibile invertire le stesse per ottenere i quantili tipici dei diversi periodi di ritorno d'interesse (e dunque probabilità di superamento  $F$ ). In particolare, come noto, è possibile connettere la probabilità di superamento  $F$  con il tempo di ritorno  $Tr$  tramite la seguente relazione:  $F = 1 - \frac{1}{Tr}$

Nelle seguenti tabelle sono riportate dunque, per le tre diverse distribuzioni di probabilità utilizzate, le altezze d'onda significative  $H_s$  [m] per i vari tempi di ritorno e direzioni di provenienza di interesse a largo.

GUMBEL FIT $H_s$ [m]							
TR	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270
5	1.39	2.53	2.90	3.09	3.17	3.94	4.10
10	1.61	2.79	3.29	3.53	3.59	4.35	4.35
20	1.82	3.04	3.67	3.94	3.99	4.75	4.59
30	1.94	3.18	3.88	4.18	4.23	4.97	4.73
50	2.09	3.36	4.15	4.48	4.52	5.26	4.91

LOGNORMAL FIT $H_s$ [m]							
TR	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270
5	1.45	2.59	2.93	3.07	3.21	4.02	4.14
10	1.71	2.84	3.29	3.45	3.61	4.41	4.36
20	1.96	3.06	3.63	3.79	3.98	4.77	4.54
30	2.10	3.18	3.81	3.98	4.18	4.96	4.64
50	2.29	3.33	4.04	4.21	4.44	5.20	4.76

NORMAL FIT $H_s$ [m]							
TR	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270
5	1.44	2.59	2.98	3.18	3.26	4.02	4.15
10	1.60	2.78	3.28	3.51	3.57	4.33	4.34
20	1.74	2.94	3.52	3.78	3.83	4.59	4.50
30	1.81	3.03	3.65	3.92	3.97	4.72	4.58
50	1.89	3.12	3.79	4.08	4.13	4.88	4.68

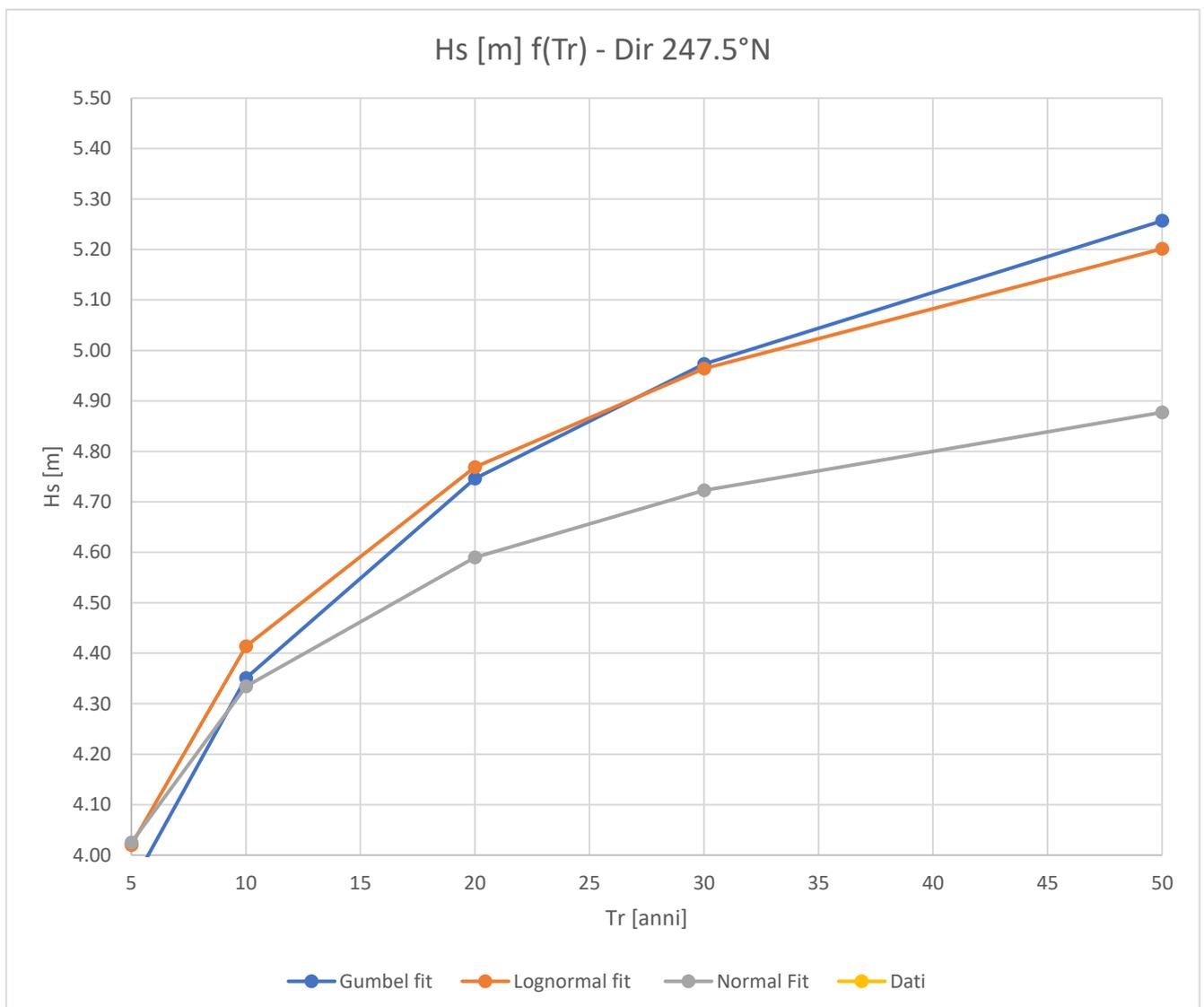
*Figura 10 - Risultati elaborazione statistica secondo la distribuzione di Gumbel, la distribuzione Lognormale e la distribuzione Normale*

Come è possibile osservare, in tutte le tabelle considerate, si osserva come previsto data l'esposizione del paraggio, che le direzioni di provenienza in cui sono presenti le mareggiate più significative sono la 225°N, 247.5°N e 270°N (SW, WSW e W) mentre non

sono presenti mareggiate significative provenienti dalla direzione 135°N, che può dunque essere tralasciata nelle successive analisi.

Per verificare l'adattamento della distribuzione ai dati meteorologici osservati si è andati a rappresentare in un grafico le altezze d'onda previste per i diversi periodi di ritorno dalle tre distribuzioni di probabilità utilizzate con il periodo di ritorno apparente dei dati osservati:

$$Tr_{\text{apparente } H_s} = \frac{n \text{ anni osservazioni} + 1}{n \text{ anni} \geq H_s}$$



*Figura 11 - Adattamento delle distribuzioni ai dati*

Il confronto è stato eseguito per la direzione da cui si osservano le mareggiate più significative (247.5°N). Dal confronto eseguito risulta evidente come la funzione di probabilità che meglio si adatta ai dati eseguiti è la Log-normale. Difatti, mentre la distribuzione normale non risulta completamente adatta a descrivere il fenomeno fisico, la distribuzione di Gumbel tende a sottostimare l'altezza d'onda per brevi periodi di

ritorno ed a sovrastimarla significativamente per periodi di ritorno maggiori, per cui la Log-normale è stata selezionata in definitiva.

Il periodo di picco, per le diverse mareggiate estreme con i vari tempi di ritorno, è stato stimato con la formula di Botticotti (1997):

$$T_p = 8.5\pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}}$$

Di seguito si riportano dunque i risultati delle condizioni estreme considerate per il successivo modello numerico ad elementi finiti:

<b>Tr 5 anni</b>	<b>Dir largo [°N]</b>	<b>157.50</b>	<b>180.00</b>	<b>202.50</b>	<b>225.00</b>	<b>247.50</b>	<b>270.00</b>
	<b>Hs sottocosta [m]</b>	2.59	2.93	3.07	3.21	4.02	4.14
	<b>Tp [s]</b>	6.86	7.29	7.47	7.64	8.55	8.68
<b>Tr 50 anni</b>	<b>Dir largo [°N]</b>	<b>157.50</b>	<b>180.00</b>	<b>202.50</b>	<b>225.00</b>	<b>247.50</b>	<b>270.00</b>
	<b>Hs sottocosta [m]</b>	3.33	4.04	4.21	4.44	5.20	4.76
	<b>Tp [s]</b>	7.78	8.57	8.75	8.98	9.72	9.30

*Figura 12 - Risultati delle elaborazioni statistiche per i due periodi di ritorno considerati ai fini progettuali*

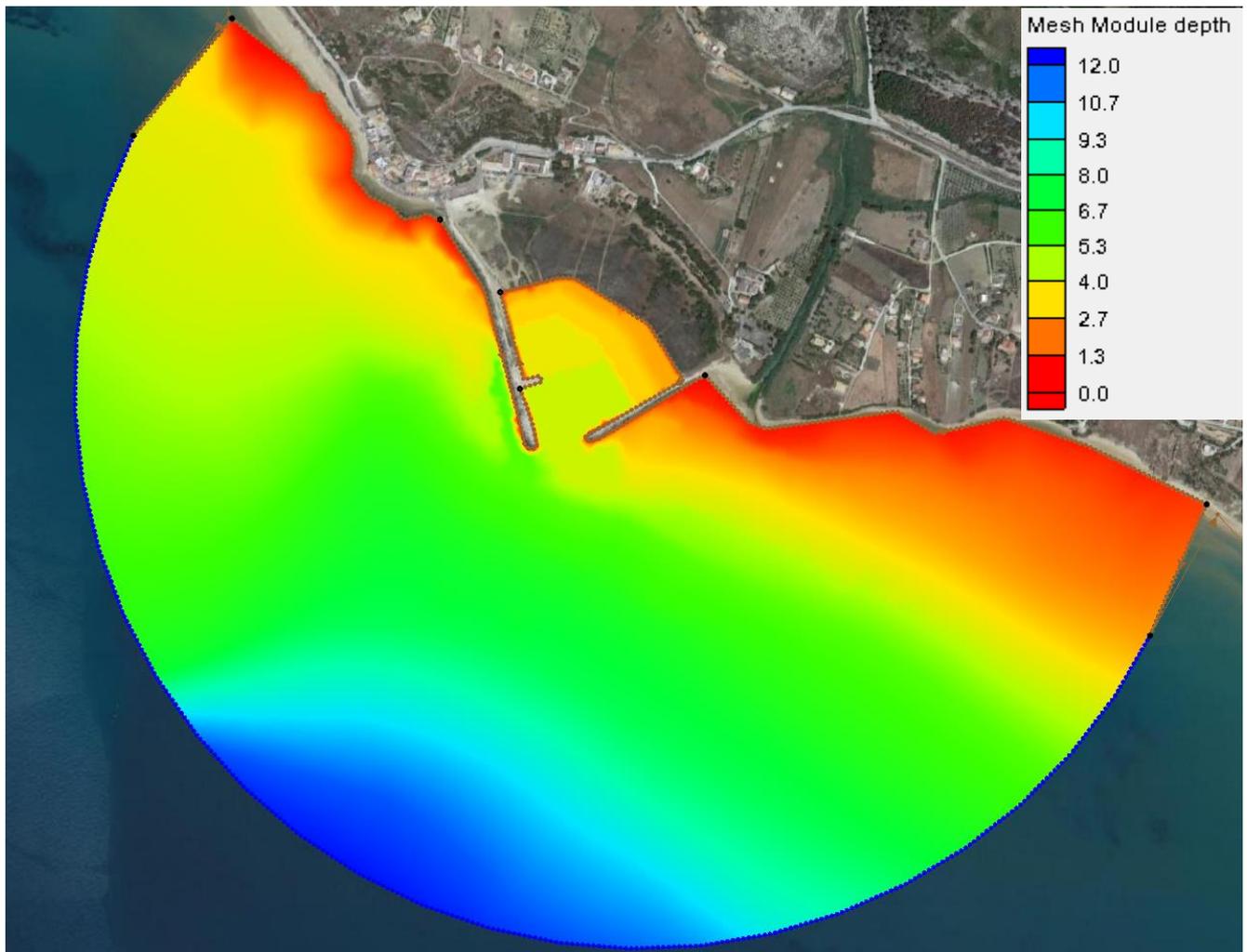
### 3 Analisi di penetrazione del moto ondoso

A partire dall'analisi degli eventi estremi riportata nel capitolo precedente è stato possibile ottenere le condizioni al contorno per le successive analisi numeriche di penetrazione del moto ondoso all'interno del porto di Siculiana. Nello specifico, la condizione simulata è stata quella con la realizzazione delle opere in progetto (banchinamento diga foranea) e successivo dragaggio del porto.

Per eseguire queste simulazioni, come meglio specificato nel capitolo, si è utilizzato il modello CGWAVE, facente parte del pacchetto Software SMS, sviluppato dall' U.S. Army Corp of Engineers (USACE). Nel modello si è andati ad inserire come condizione a contorno "open sea", per le diverse direzioni di provenienza a largo analizzate e tempi di ritorno  $T_r$ , riportate in Figura 12.

Le batimetrie dell'area intorno al porto di Siculiana sono state acquisite dal database Garmin – Navionics (<https://www.navionics.com/fin/>), che risulta essere uno di quelli più mantenuti.

Il modello ad elementi finiti della configurazione del porto è riportato nella seguente Figura 13. Nello specifico, si è considerato lo stato delle opere foranee attuali del porto di Siculiana mentre si è considerato lo stato di progetto per la realizzazione della banchina e del dragaggio dei fondali del porto. Il range di profondità presenti nel dominio di calcolo analizzato va dai +0.00 m s.l.m. ai circa - 12.00 m s.l.m. a largo.



*Figura 13 – Configurazione del porto modellata – Porto di Siculiana con banchina in progetto realizzata e fondali dragati – Profondità in m*

Per fare le suddette analisi di agitazione interna è stato utilizzato il modello CGWAVE, sviluppato dall'United States Army Corps of Engineers.

Lo studio della diffrazione consiste in quell'insieme fenomenologico conseguente alla propagazione delle onde in base a leggi che non seguono quelle della propagazione rettilinea nei mezzi omogenei, secondo i dettami dell'ottica geometrica.

Occorre precisare che il fenomeno della diffrazione si manifesta in modo sensibilmente apprezzabile solo se le onde incontrano un ostacolo capace di limitare l'estensione utile dei fronti a dimensioni dell'ordine della lunghezza d'onda.

L'esame teorico della diffrazione del moto ondoso viene, com'è noto, condotto con gli stessi metodi elaborati per lo studio degli analoghi fenomeni nell'ottica e nell'acustica.

Il fenomeno della diffrazione può essere, infatti, spiegato con il seguente principio di Huygens-Fresnel.

"Sia  $S$  una sorgente puntiforme ed  $s$  una superficie chiusa che la contiene in cui ogni elemento  $dA$  diviene a sua volta sorgente di onde elementari che, con opportune intensità e fase, si propagano in tutte le direzioni".

Ciò, ovviamente, comporta che in un punto posto al di fuori della superficie  $s$ , l'intensità della perturbazione che vi giunge è la risultante dell'interferenza di tutte le onde elementari emesse da ciascun elemento di  $s$ ; allorquando, in particolare, la superficie sia una superficie d'onda, le diverse onde elementari risultano in fase.

Ove, per ricondurre subito il discorso al problema della diffrazione, vi sia un ostacolo che taglia la superficie  $s$ , in un punto al di fuori di essa perverranno solo le onde elementari emesse dalla porzione di  $s$  non intercettata dall'ostacolo.

Ogni punto del fronte che avanza deve, pertanto, essere considerato come il centro di una perturbazione secondaria che si dirama in tutte le direzioni.

La successiva configurazione assunta dai fronti d'onda, dopo un intervallo finito di tempo, nasce dall'involuppo delle suddette perturbazioni secondarie.

Allorquando un treno d'onde supera un'opera foranea, accade che un'aliquota di energia posseduta dal treno d'onde incidente si propaga a tergo dell'ostacolo. Ove ciò non fosse, infatti, nella zona di ombra si avrebbe la calma assoluta.

L'aliquota dell'energia riflessa dall'opera dipende, invece, dalla geometria della stessa e, mentre per opere con parete verticale può assumersi un coefficiente di riflessione compreso tra 0,90 e 1, per strutture del tipo a gettata è sufficientemente realistico assumere per il coefficiente di riflessione il valore di  $0,30 \div 0,50$ .

Lo studio della diffrazione, nel senso più generale del termine, affronta la valutazione delle caratteristiche del moto ondoso sia nella zona di riflessione dello stesso, sia nella zona protetta a tergo dell'ostacolo.

La conoscenza dell'agibilità e dell'affidabilità del dispositivo portuale implica quindi un approfondimento dello studio del fenomeno di che trattasi, la cui soluzione è stata posta sotto forma di grafici e tabelle dal Wiegel nel caso di ostacolo rettilineo semidefinito e perfettamente riflettente che si erge su profondità costante.

Il modello numerico utilizzato nel nostro caso è un modello agli elementi finiti all'avanguardia per calcolare le altezze d'onda all'interno dell'area in esame per tutte le condizioni di moto ondoso incidente.

Note le altezze d'onda, è possibile stimare, con un'unica simulazione, l'agitazione ondosa in diversi punti, per particolari condizioni di moto ondoso incidente. Il modello numerico utilizzato è CGWAVE (Coastal and Hydraulics Laboratory -United States Army Corps of Engineering) che utilizza come interfaccia grafica il modello SMS (Surface modeling system).

CGWAVE include: la diffrazione delle onde provocata dalle strutture emergenti e quella dovuta alle caratteristiche del fondale marino; la rifrazione e gli effetti di shoaling derivati dalle variazioni di profondità; la riflessione parziale o totale causata dalle strutture costiere e portuali; gli effetti d'attrito di fondo e frangimento delle onde.

Il problema è risolto sulla base dell'equazione per i fondali a debole pendenza (Mild Slope Equation) o di quella di Berkhoff, cioè:

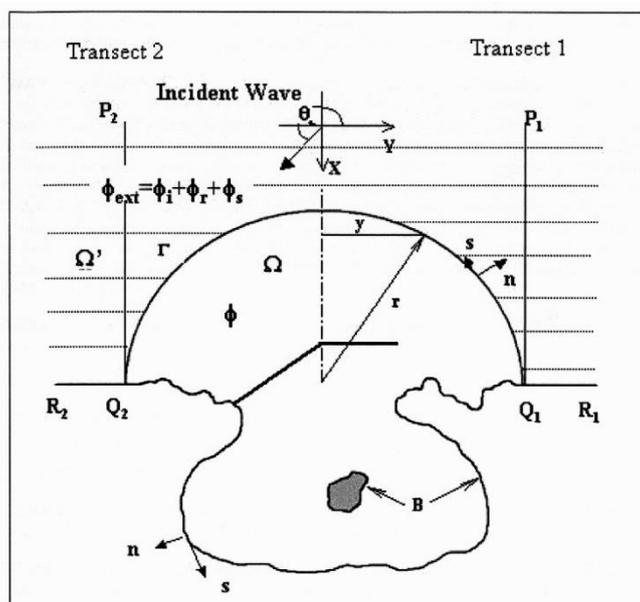
$$\nabla[\mathbf{C} \cdot \nabla \phi] + \omega^2 \frac{C_g}{C} \phi = 0$$

Dove C e C<sub>g</sub> sono, rispettivamente, le velocità di fase e di gruppo, definiti da:

$$C = \frac{\omega}{k} \quad C_g = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \cdot C$$

dove ω è la frequenza angolare, h è la profondità medio mare, e k è il numero d'onda definito da 2π/L, con L (=CT) lunghezza d'onda.

La discretizzazione agli elementi finiti dell'equazione per fondali a debole pendenza comporta il problema di specificare le condizioni al contorno lungo tutto il confine del dominio di calcolo come illustrato nella figura sottostante.



*Figura 14 - Schema dominio CGWAVE*

In CGWAVE vi sono molte condizioni al contorno che possono essere selezionate. Per esempio, condizioni al contorno relative alle onde incidenti (anche quelle riflesse), definite dall'altezza d'onda, il periodo e la direzione; condizioni sui contorni assorbenti, specificate in termini di una direzione d'onda; condizioni ai contorni parzialmente o completamente riflettenti, definite da un coefficiente di riflessione, il cambio di fase e la direzione d'onda. La definizione dei coefficienti di riflessione lungo i contorni parzialmente riflettenti permette di esaminare diversi tipi di strutture, per esempio frangiflutti a parametro verticale o inclinato.

I calcoli sono eseguiti su una maglia d'elementi finiti triangolari. Per ottenere dei risultati accurati, è importante rappresentare con una certa precisione le lunghezze d'onda alle diverse profondità.

Il vantaggio di usare una maglia d'elementi finiti triangolari è che la risoluzione di tale reticolo può essere personalizzata in base al periodo dell'onda ed alla profondità, in modo da minimizzare la quantità di calcoli necessari che, ricordiamo, dipende dal numero di nodi.

CGWAVE può essere usato in modalità mono-frequenza o random, e inoltre come modello mono-direzionale o multi-direzionale. In modalità "mono-frequenza" il modello considera una sola componente di periodo e direzione. In alcune situazioni, questo tipo d'applicazione fornisce una descrizione ragionevolmente precisa dello stato di mare. A

causa dell'interferenza costruttiva e distruttiva dovuta all'interazione delle onde caratterizzate dallo stesso periodo, qualche volta, è possibile avere una descrizione più esauriente del campo di moto ondoso usando onde incidenti di tipo random. In questo caso possono essere simulate e combinate automaticamente nel modello molte componenti di periodo e direzione, in funzione dello spettro delle onde incidenti.

Il modello CGWAVE rilascia, come risultato di una simulazione, le altezze d'onda sotto forma, normalmente, di grafici a colori ottenuti con l'applicazione del pacchetto software SMS.

SMS è un modello con capacità di pre-processing e post-processing per tutti i modelli numerici CHL (Coastal and Hydraulics Laboratory -United States Army Corps of Engineering), inclusi ADCIRC, TABS (RMA2, RMA4, SED2D), ADH, HiVEL, M2D, STWAVE, BOUSS2D e CGWAVE.

SMS è diviso in moduli: Scatter, Map and Mesh. Il modulo Scatter utilizza dati anche disomogenei, per esempio dati batimetrici, e interpola questi dati in maglie e reticoli del modello. Il Modulo Map è usato per creare e manipolare modelli concettuali. L'utente può creare e definire attributi per oggetti caratteristici, come punti, archi e poligoni, che definiscono il sistema modellato. Immagini, come raster o fotografie possono essere utilizzate in questo processo e possono anche rendere l'output più facile da interpretare. Il Modulo Mesh e altri moduli sono usati per creare e implementare modelli numerici. Questi moduli consentono:

- (a) interazione grafica con editing delle maglie e della rete, condizioni al contorno, parametri del modello e materiali,
- (b) visualizzazione della configurazione del modello numerico e dei dati di output.

Ognuno dei moduli utilizzati per creare e gestire modelli numerici, può avere differenti collegamenti alle cosiddette "coverages" (utilities). Per esempio, il Modulo Mesh ha tante coverages, una per ognuno dei modello supportati.

I risultati del modello numerico CGWAVE sono presentati di solito sotto forma di grafici contenenti le altezze d'onda in specifici punti d'analisi, interni all'area d'interesse. Il modello CGWAVE può rilasciare anche altri parametri fisici e, nel caso di simulazioni con singolo periodo e direzione, può calcolare la quota di pelo libero e la fase dell'onda, oltre a molte altre grandezze. Usando l'altezza e la fase dell'onda si può calcolare, in un

secondo momento, la quota di pelo libero a step temporali in cui è stato suddiviso un singolo periodo dell'onda.

Il modello può essere usato, per esempio, per esaminare gli effetti del cambiamento di lunghezza od orientamento di un frangiflutti sulla sua azione schermante nei confronti degli ormeggi in progetto.

Grafici dell'altezza d'onda in funzione del periodo dell'onda in diversi punti interni allo specchio acqueo ridossato. Questi diagrammi possono essere usati per identificare i periodi d'onda a cui lo specchio acqueo ridossato è particolarmente sensibile. Con il modello CGWAVE possono essere esaminate le diverse alternative planimetriche, per selezionare lo schema planimetrico ottimale per lo stato di ridosso dello specchio acqueo protetto.

Nel caso in esame la maglia ad elementi finiti è stata generata in modo che il modello CGWAVE fosse rappresentativo della batimetria e delle strutture proposte, ed inoltre simulasse in modo corretto le onde che si propagano a tergo dell'opera.

Le proprietà riflettenti al contorno delle opere foranee in progetto sono state rappresentate nel modello CGWAVE assegnando appropriati coefficienti di riflessione ( $k_r$ ) per ogni tipologia di struttura.

Un coefficiente di riflessione 1.0 indica che tutta l'energia dell'onda incidente viene riflessa, mentre un valore inferiore indica che parte dell'energia sarà dissipata.

In questo studio, per ogni tipologia di struttura, si sono assegnati i seguenti coefficienti di riflessioni inseriti nel modello CGWAVE:

- Scarpate in massi artificiali e naturali 0.30;
- Banchine antiriflettenti 0.60 (non presenti nel caso in esame);
- Banchine a parete verticale (banchina di nuova realizzazione) 0.99;

Si fa osservare che l'opera è sempre stata inserita nella modellazione del fondale a livello di batimetria. Per ogni simulazione eseguita con il modello CGWAVE sono necessarie le condizioni di moto ondoso al largo. Il limite al largo del modello CGWAVE è stato ubicato in acque relativamente profonde, quindi ogni condizione d'onda incidente poteva essere assunta approssimativamente costante lungo il confine del modello. Utilizzando il modello matematico esposto, si è studiato lo stato di agitazione nello specchio liquido a tergo dell'opera, secondo le previsioni di progetto.

## RISULTATI MODELLO

Come dati di input si sono considerate le caratteristiche delle mareggiate indicate al capitolo precedente con tempi di ritorno di 5 e 50 per le direzioni soprarichiamate. Complessivamente, sono state eseguite 12 simulazioni di penetrazione del moto ondoso ed agitazione interna.

I risultati sono riportati nelle seguenti tabelle. In particolare nelle tabelle viene riportato: la classe di provenienza a largo dell'onda [°N]; l'altezza d'onda significativa utilizzata come condizione al contorno [m]; il periodo di picco  $T_p$  [s]; l'altezza media d'onda significativa presente all'ingresso del porto, di fronte al pennello foraneo e di fronte la banchina di nuova realizzazione [m] derivante dalle simulazioni di agitazione interna eseguite.

RISULTATI ANALISI - STATO DI PROGETTO							
Tr 5 anni	Dir largo [°N]	157.50	180.00	202.50	225.00	247.50	270.00
	Hs sottocosta [m]	2.59	2.93	3.07	3.21	4.02	4.14
	$T_p$ [s]	6.86	7.29	7.47	7.64	8.55	8.68
	Hs imboccatura [m]	1.93	1.98	2.03	1.92	2.05	1.89
	Hs fronte pennello [m]	0.82	0.77	0.67	0.61	0.43	0.39
	Hs banchina [m]	0.31	0.25	0.24	0.22	0.21	0.16
RISULTATI ANALISI - STATO DI PROGETTO							
Tr 50 anni	Dir largo [°N]	157.50	180.00	202.50	225.00	247.50	270.00
	Hs sottocosta [m]	3.33	4.04	4.21	4.44	5.20	4.76
	$T_p$ [s]	7.78	8.57	8.75	8.98	9.72	9.30
	Hs imboccatura [m]	2.08	2.21	2.30	2.05	2.23	1.98
	Hs fronte pennello [m]	1.04	0.89	0.81	0.70	0.56	0.47
	Hs banchina [m]	0.45	0.41	0.37	0.31	0.29	0.24

*Figura 15 - Risultati analisi di penetrazione del moto ondoso*

Dai dati riportati nelle tabelle si nota come, benché caratterizzate da un'altezza significativa a largo minore, le mareggiate provenienti da 157.50 e 180° N, a causa del loro allineamento con l'imboccatura del porto di Siculiana, causano delle agitazioni interne al porto del tutto comparabili con le mareggiate provenienti dal III quadrante, caratterizzate da valori di altezza d'onda più elevati.

Addirittura, come era prevedibile osservando il layout portuale del Porto di Siculiana, le mareggiate dal 157.50 e 180° causano un'agitazione del fronte della banchina in progetto significativamente maggiore a quello delle mareggiate provenienti dal III

quadrante (sino a 0.31 m per  $Tr = 5$  anni e 0.45 m per  $Tr = 50$  anni). In ogni caso, i valori di agitazione osservati non presentano criticità e rientrano nei valori accettabili dalle piccole imbarcazioni da pesca e da diporto che li andranno ad ormeggiare.

Dove i valori di agitazione residui non sono compatibili con le normative internazionali di settore è all'imboccatura portuale. Difatti, come evidente, il layout delle opere foranee non permette un adeguato riparo all'imboccatura portuale ( $H_s$  residua sino a 2.05 m per  $Tr = 5$  anni e 2.30 m per  $Tr = 50$  anni), evidenziando quindi che gli ormeggi che saranno realizzati sulla nuova banchina saranno in sicurezza mentre potrebbero essere presenti delle criticità, in attesa del completamento delle opere foranee del Porto di Siculiana, per piccoli natanti in transito sull'imboccatura in caso di mareggiate significative.

Di seguito si riportano i grafici risultati da tutte le simulazioni effettuate per il Porto di Siculiana. In particolare, nei grafici viene riportata la geometria della configurazione in questione e graficamente i valori d'altezza d'onda significativa [m] presenti. Viene inoltre riportato un particolare dei risultati delle simulazioni all'interno del bacino portuale.

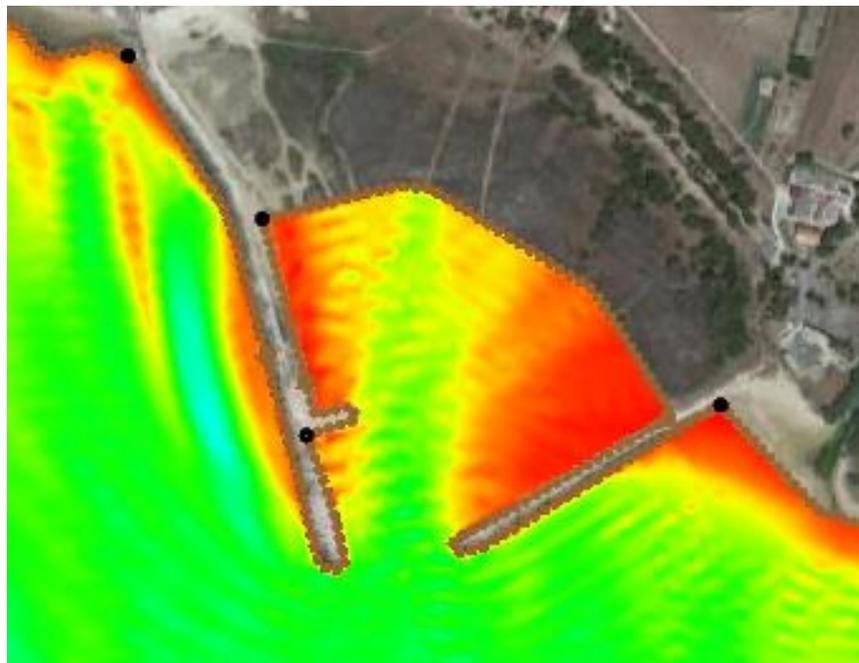
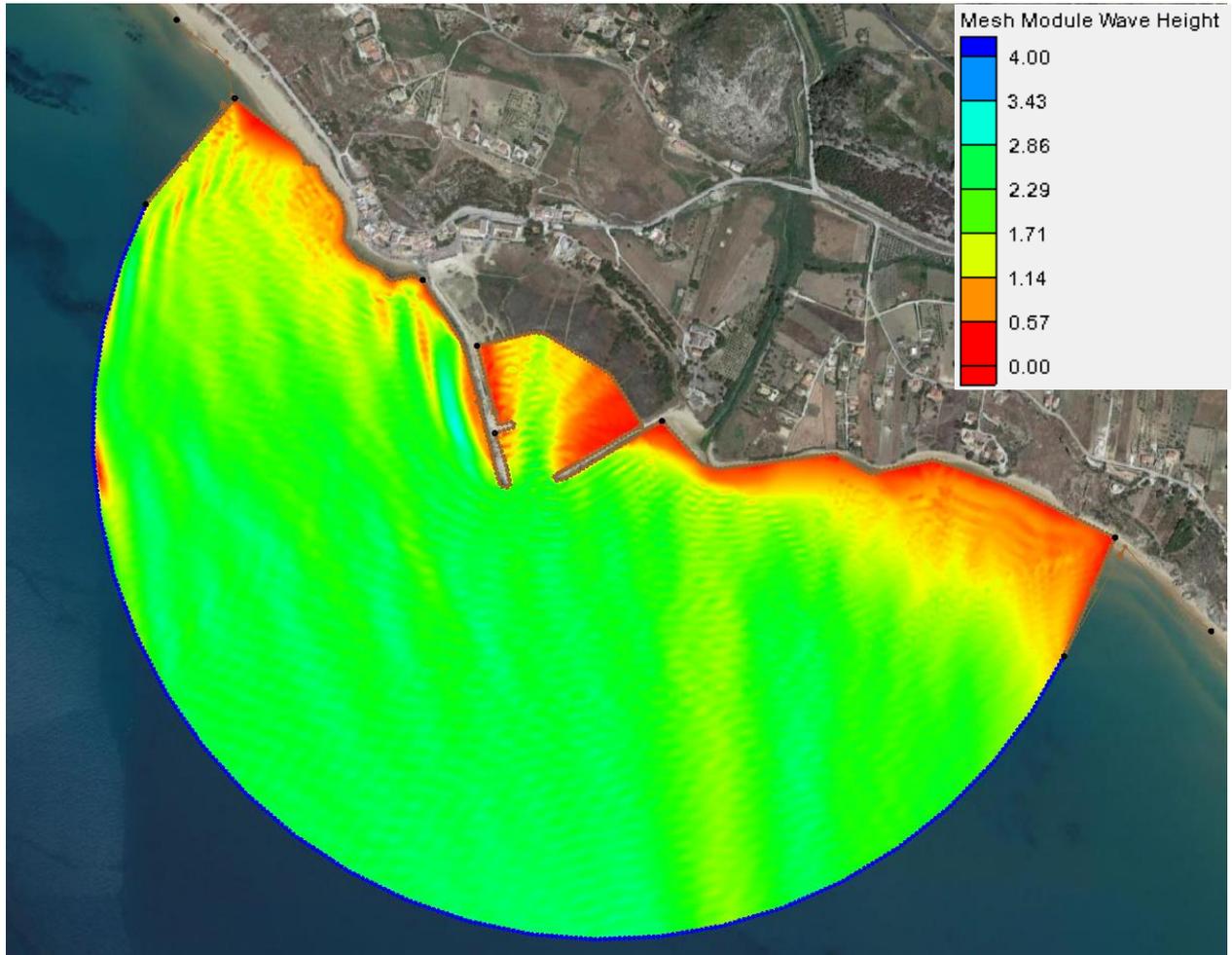


Figura 16 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 5$  anni - direzione di provenienza  $157.5^\circ N$

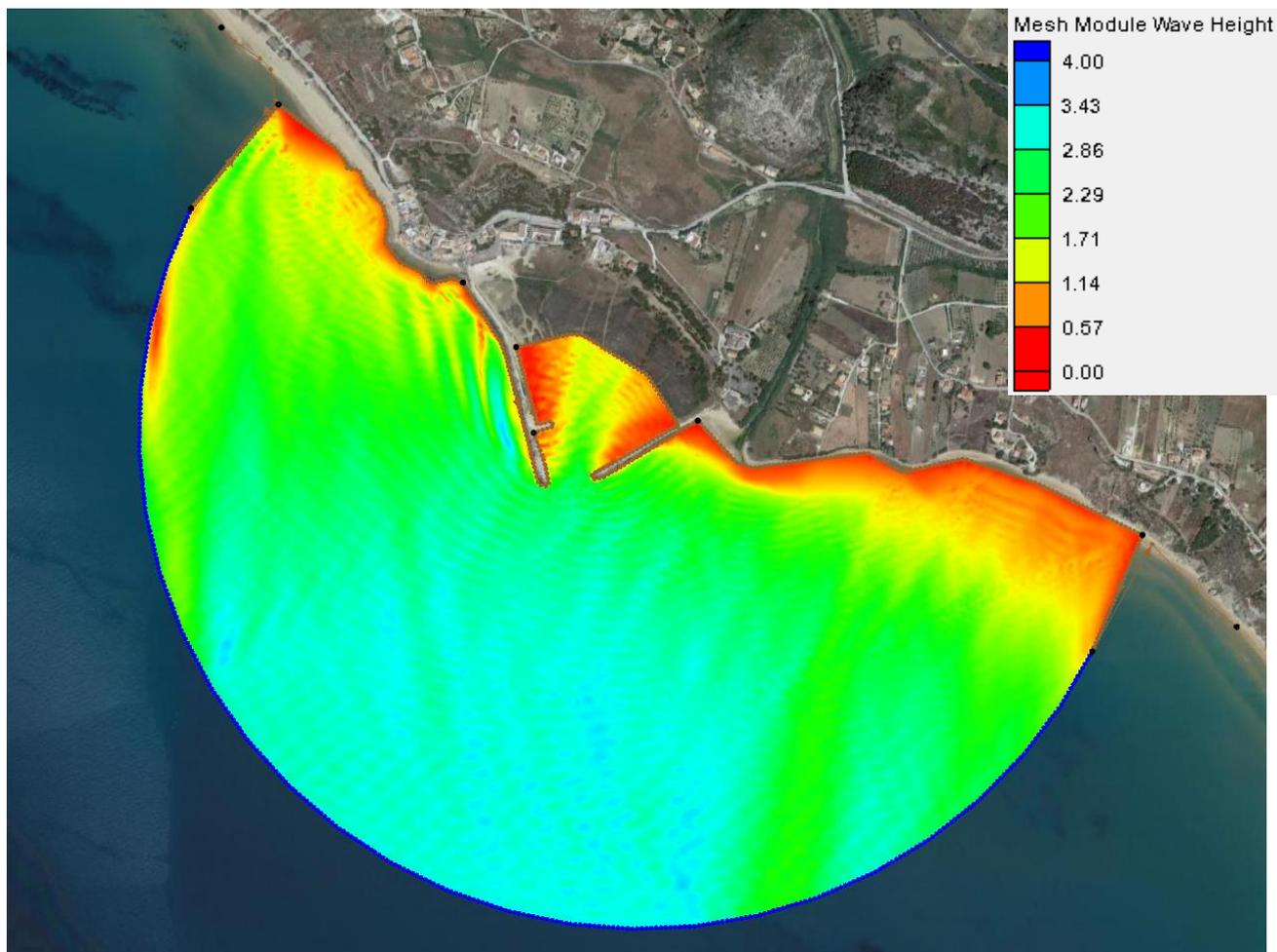


Figura 17 -- Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 5$  anni - direzione di provenienza  $180^\circ N$

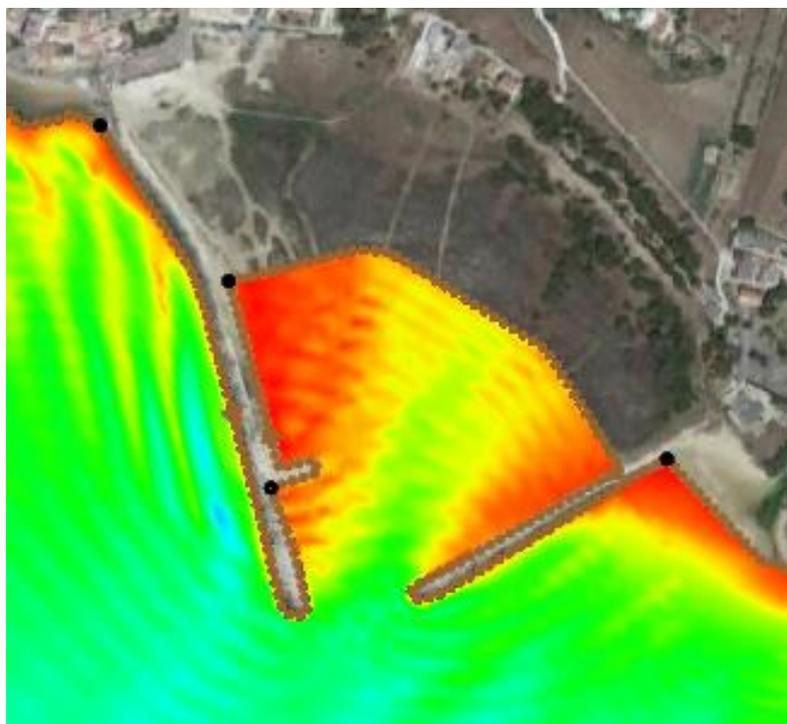
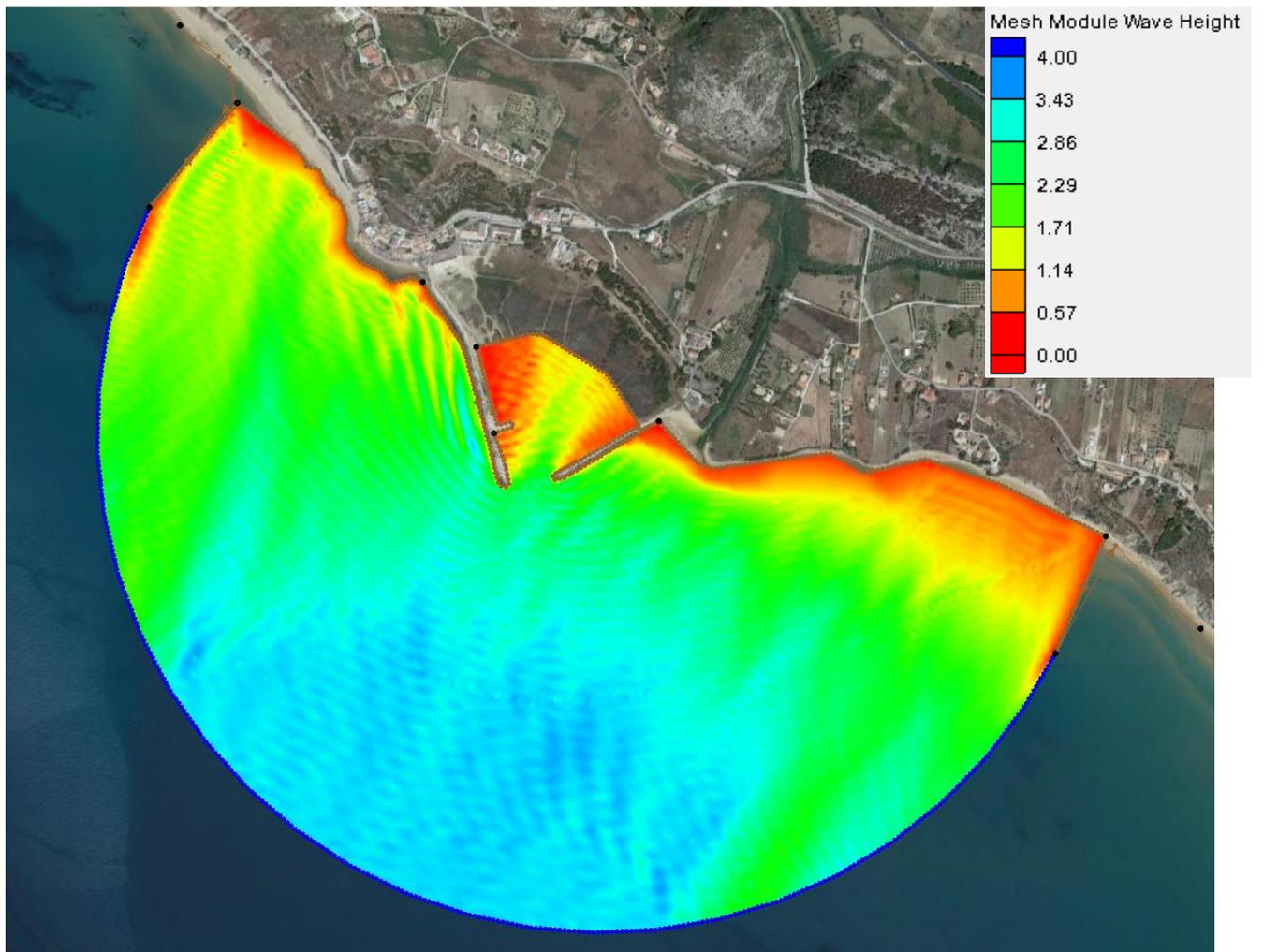


Figura 18 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 5$  anni - direzione di provenienza  $202.5^\circ N$

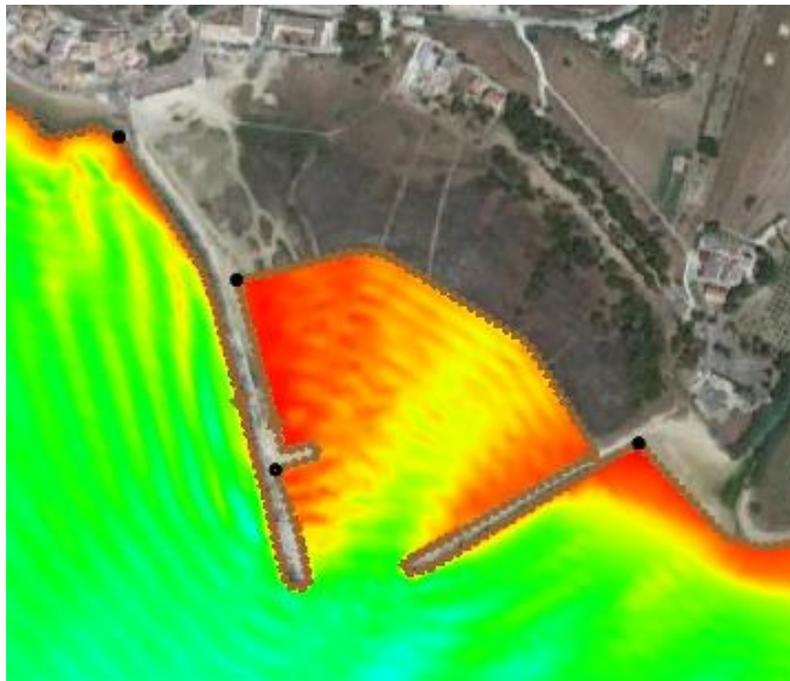
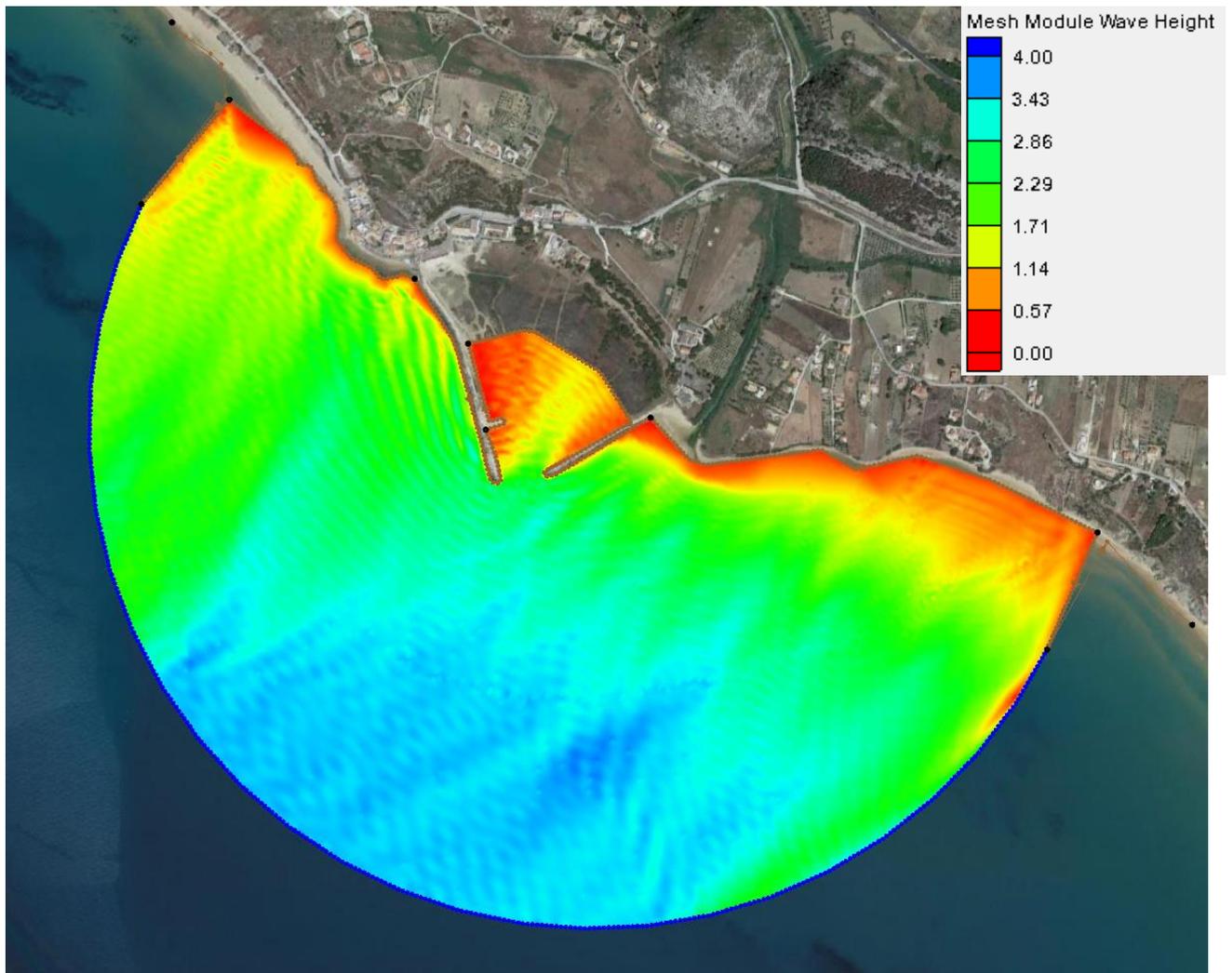


Figura 19 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 5$  anni - direzione di provenienza  $225^\circ N$

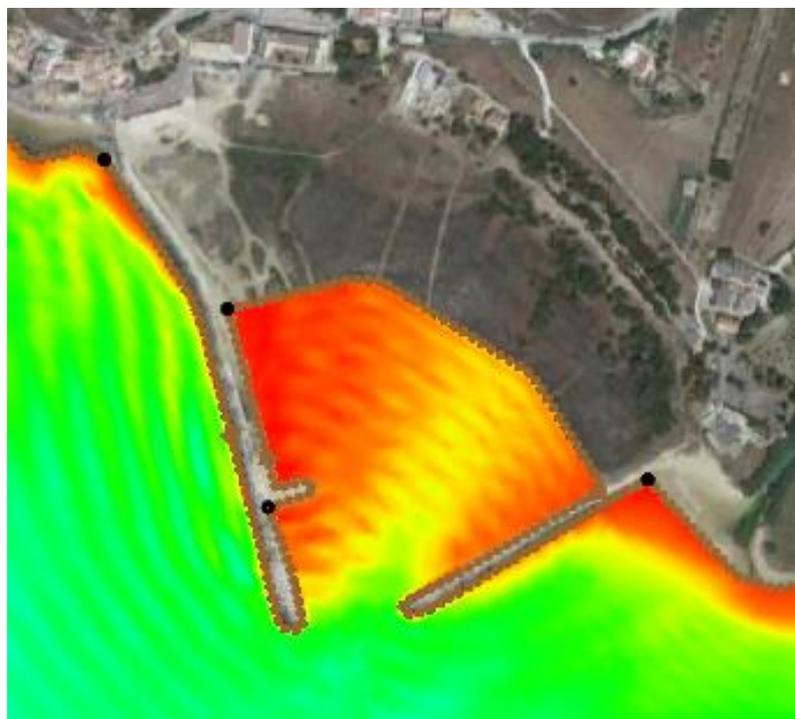
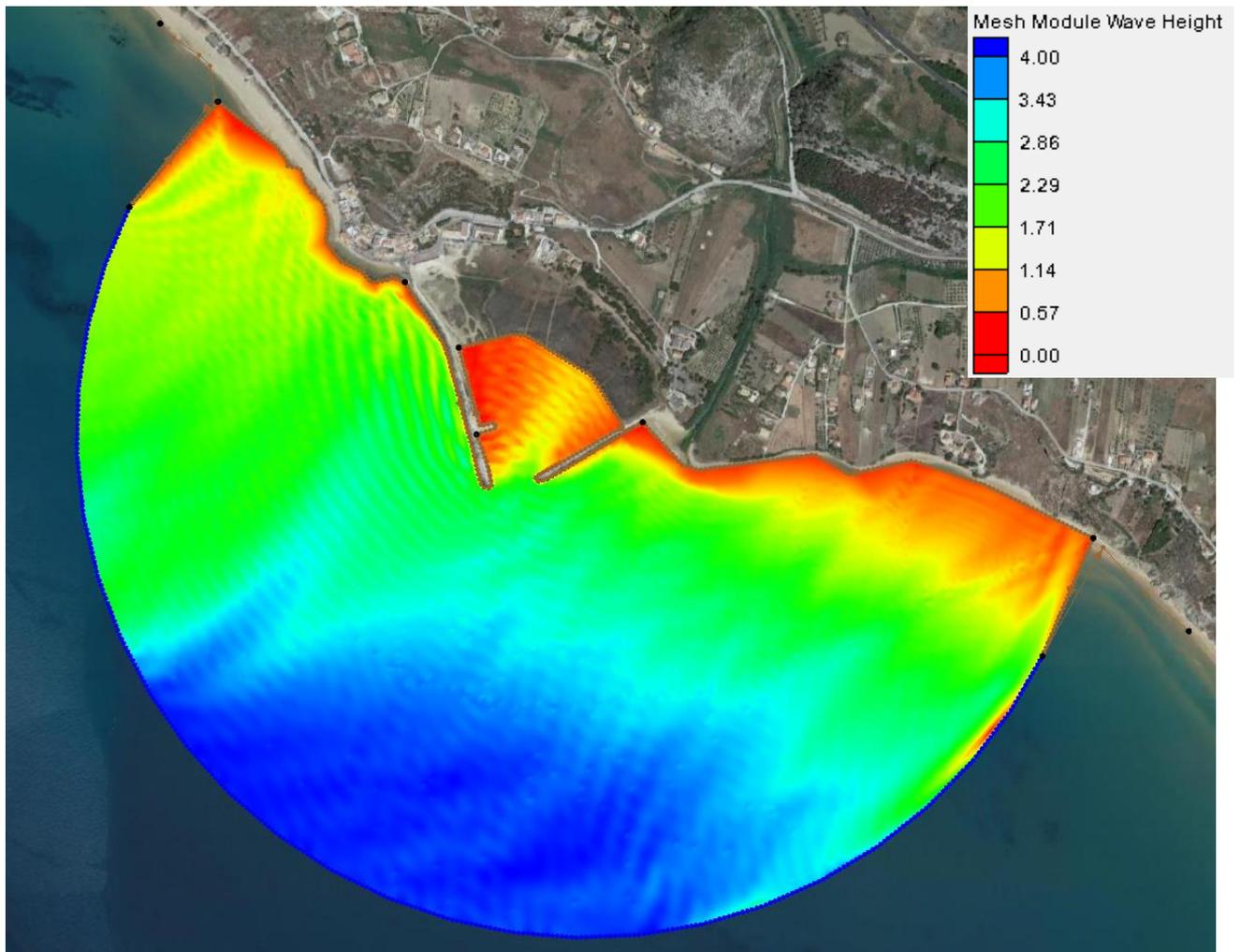


Figura 20 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $Tr = 5$  anni - direzione di provenienza  $247.5^\circ N$

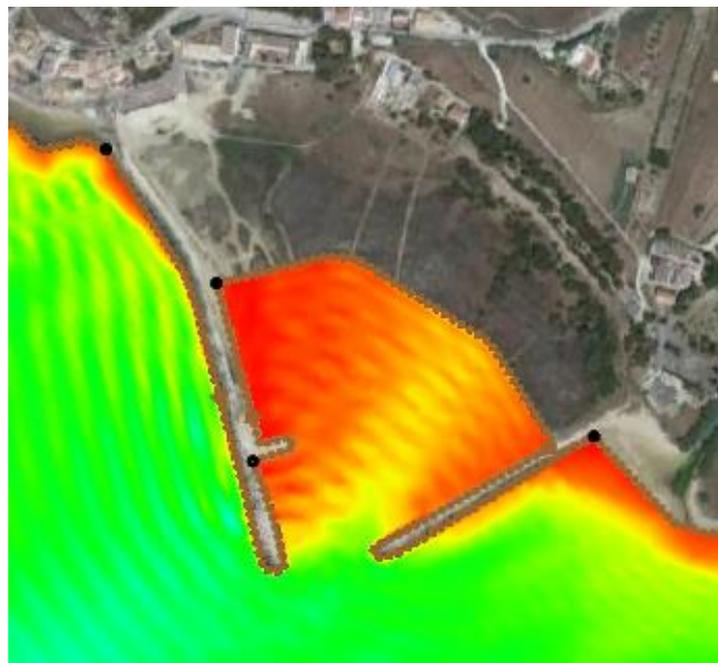
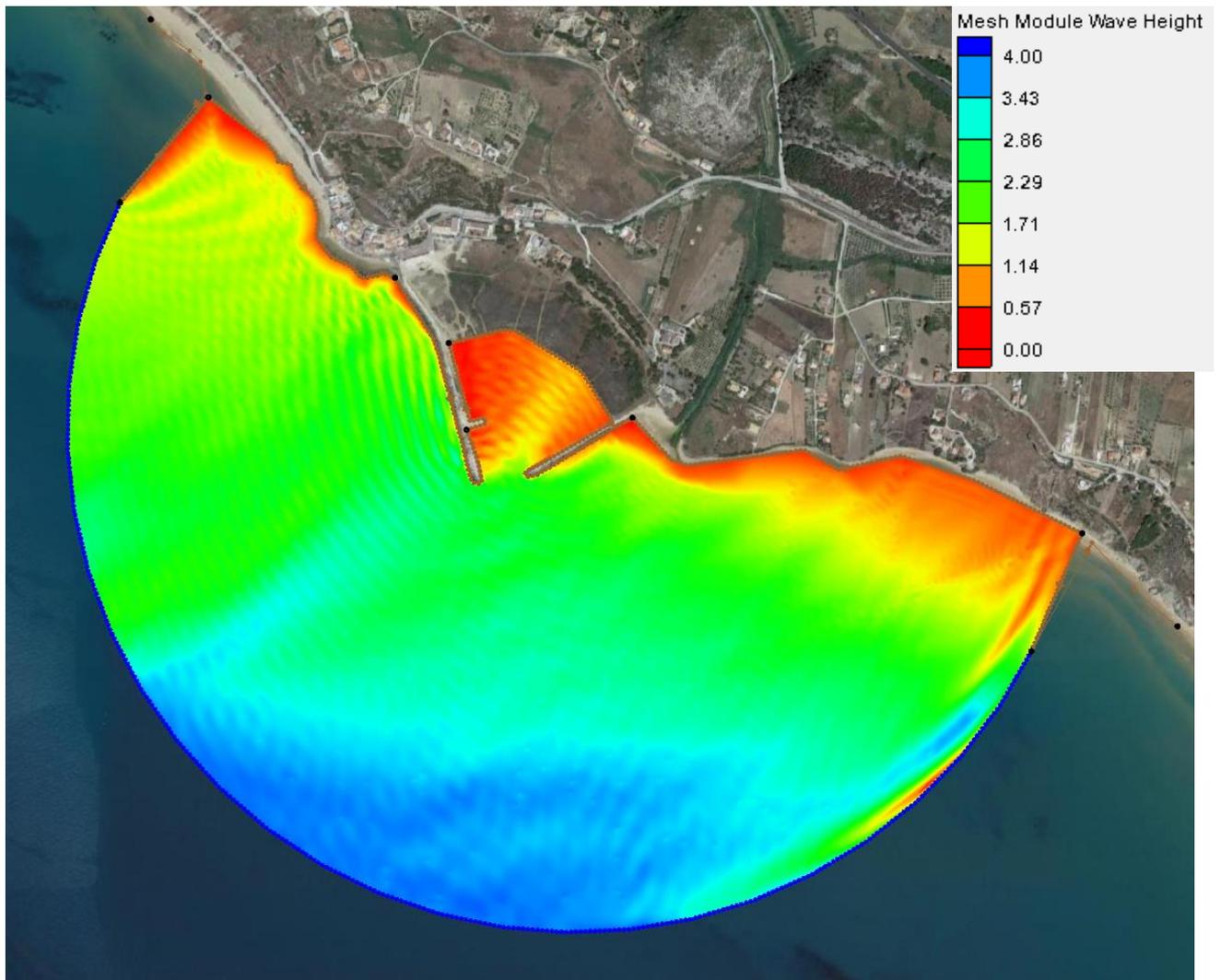


Figura 21 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 5$  anni - direzione di provenienza  $270^\circ$  N

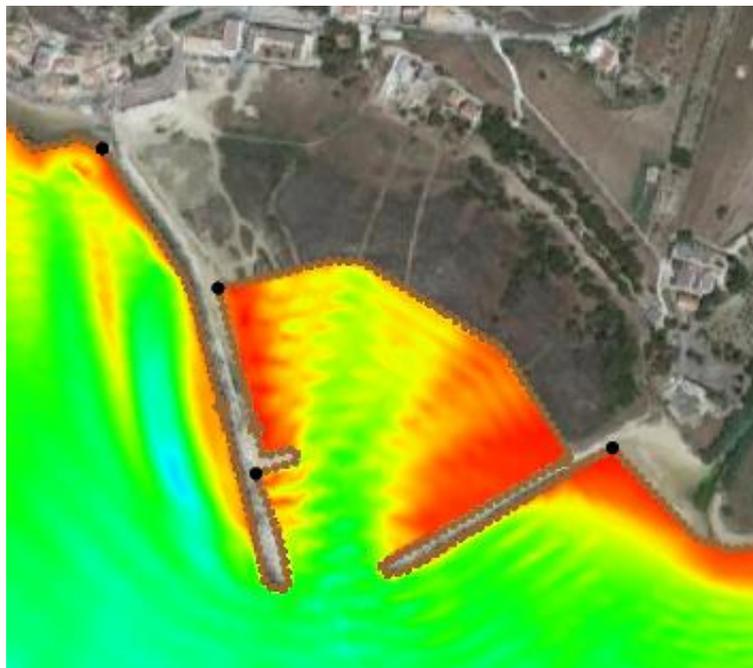
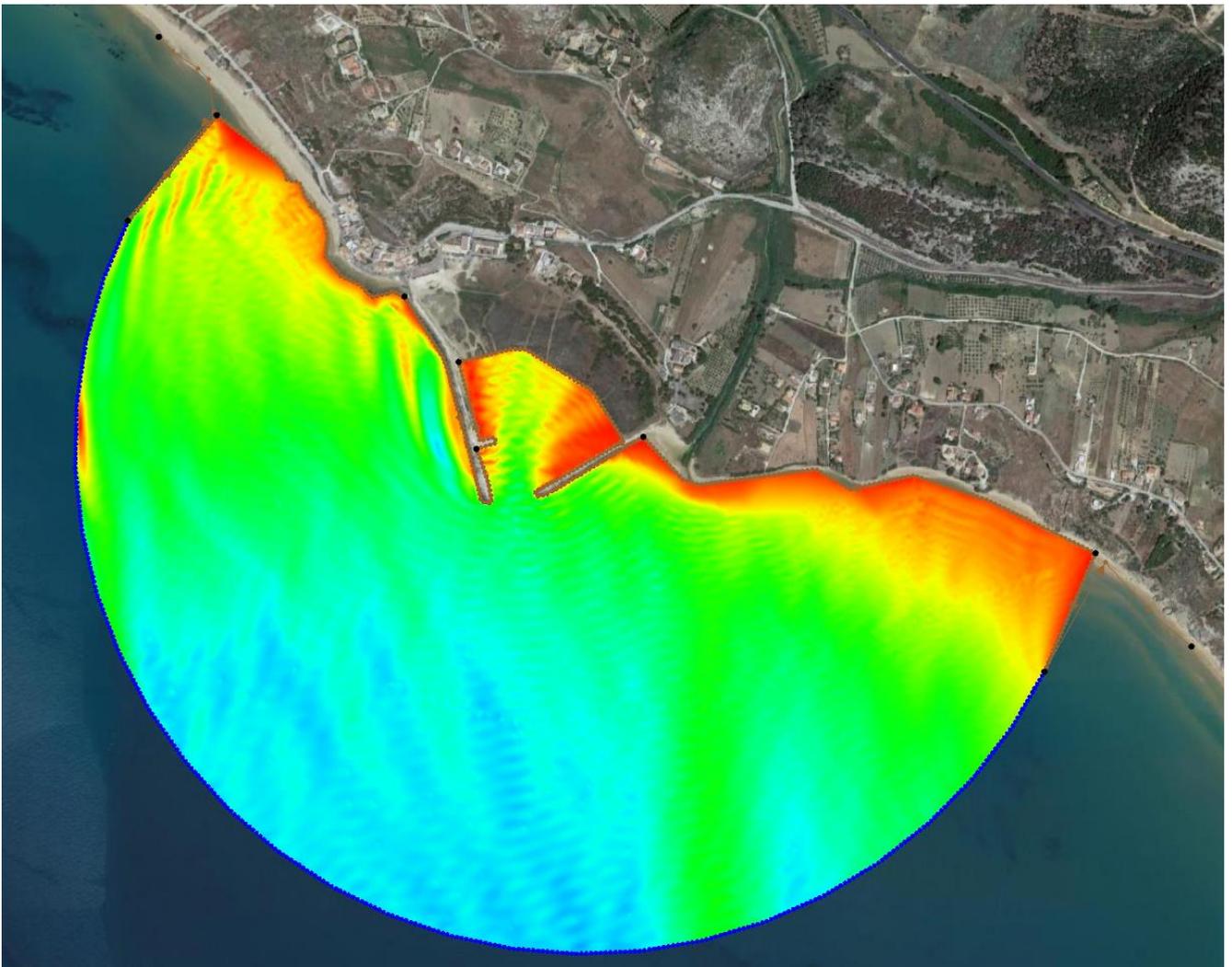
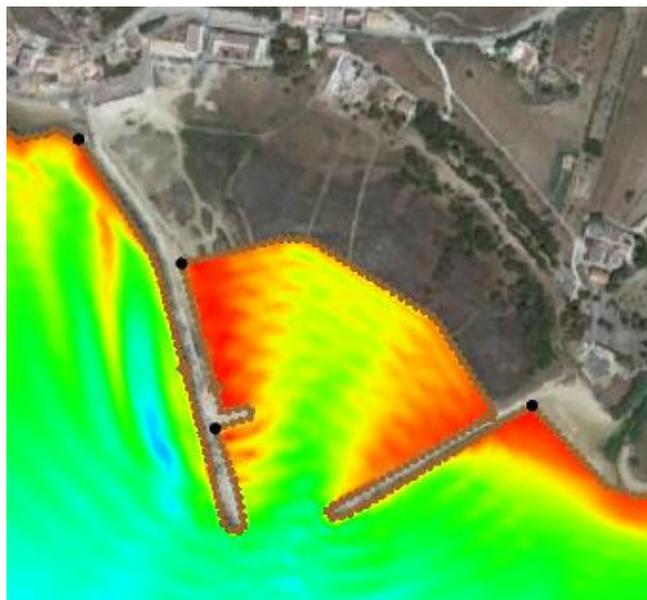
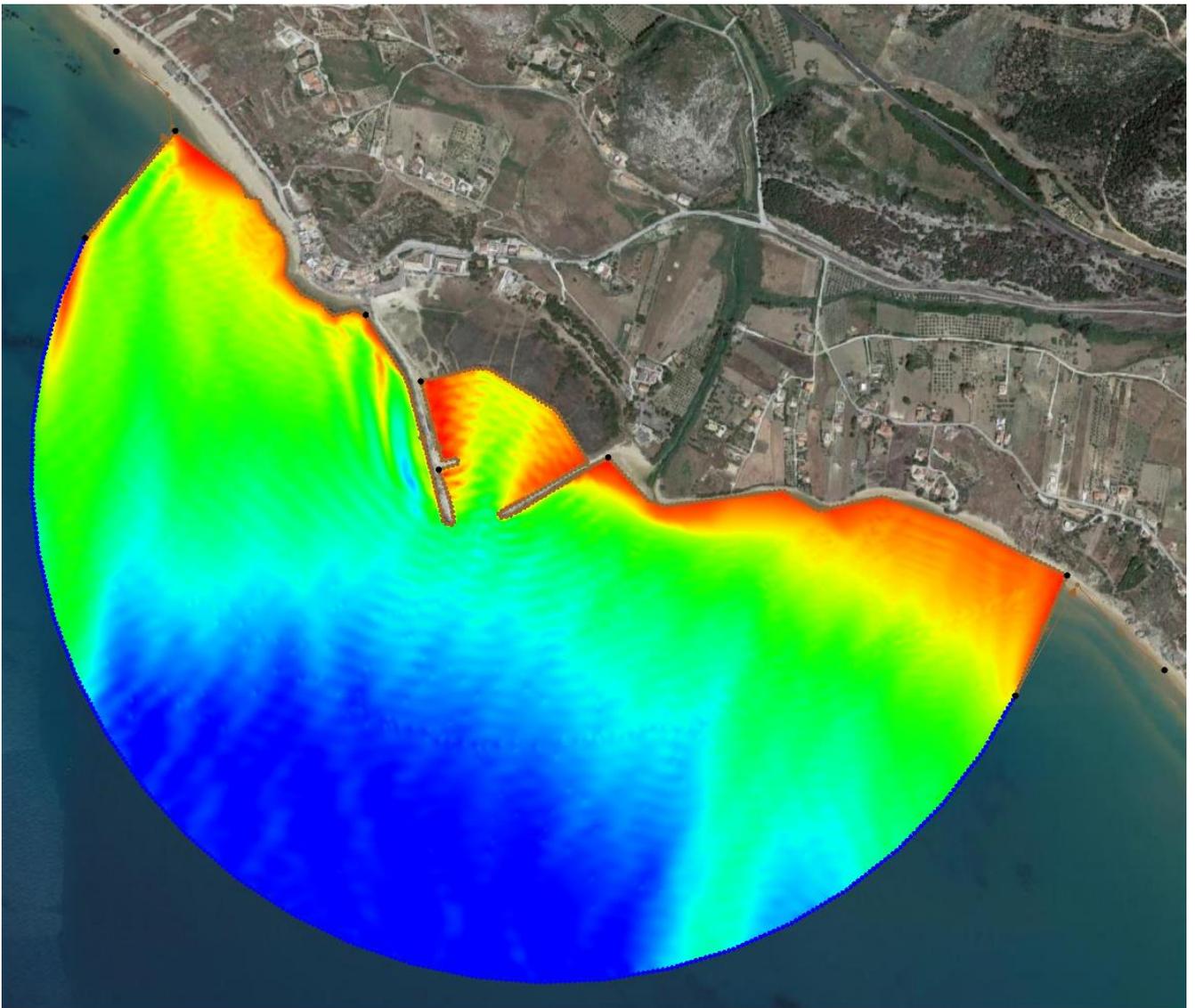
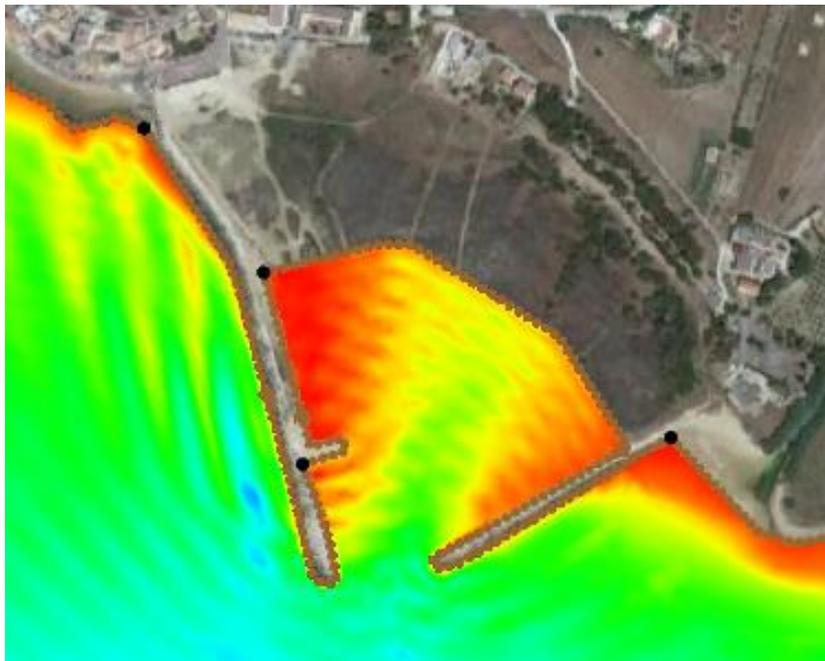
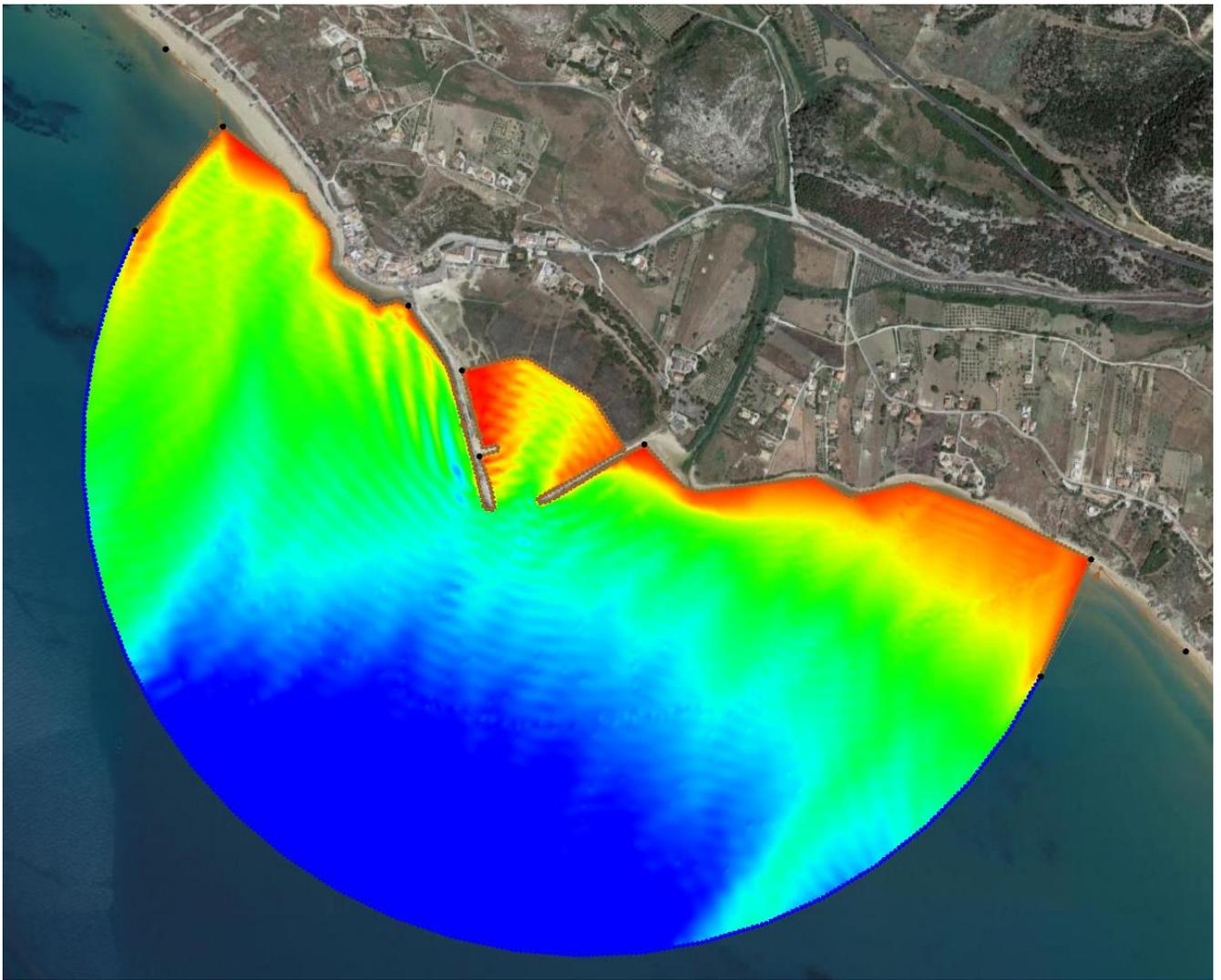


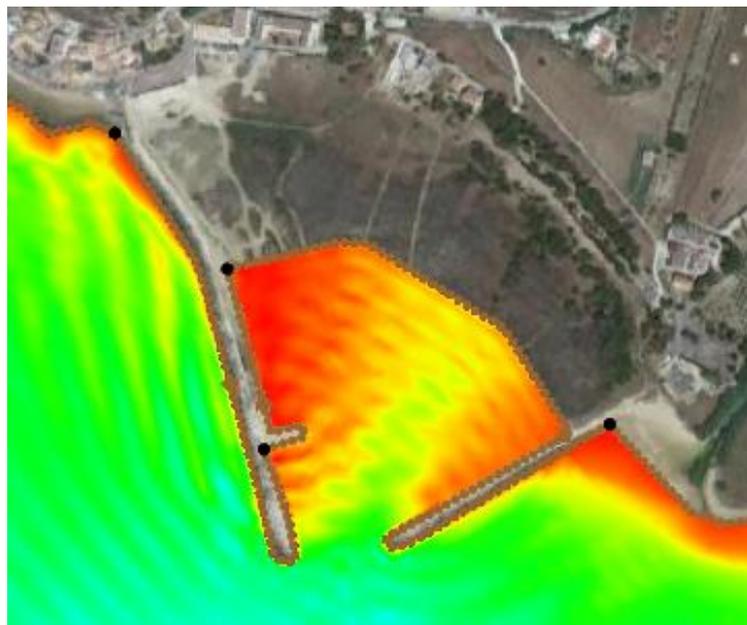
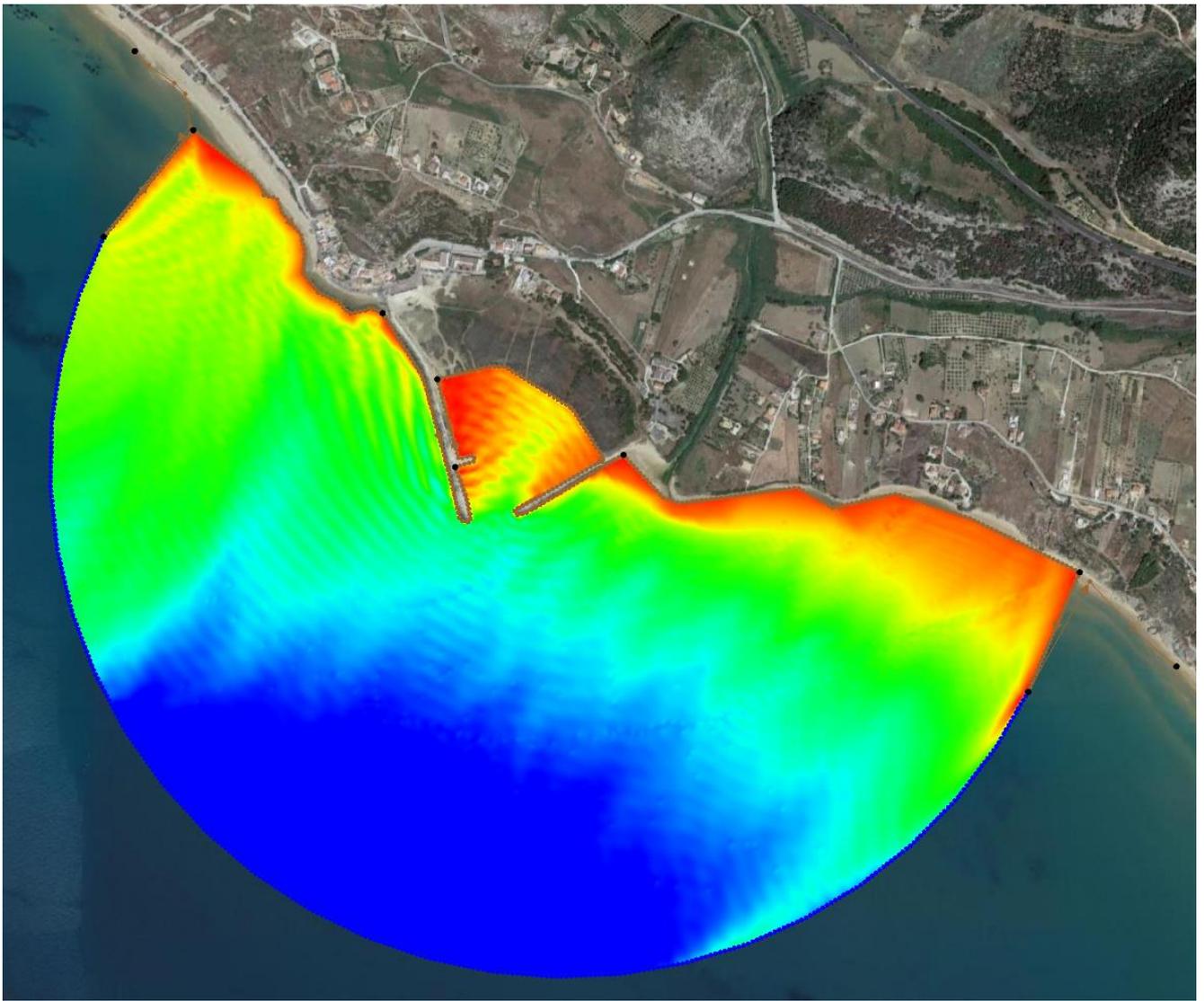
Figura 22 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $Tr = 50$  anni - direzione di provenienza  $157.5^\circ N$



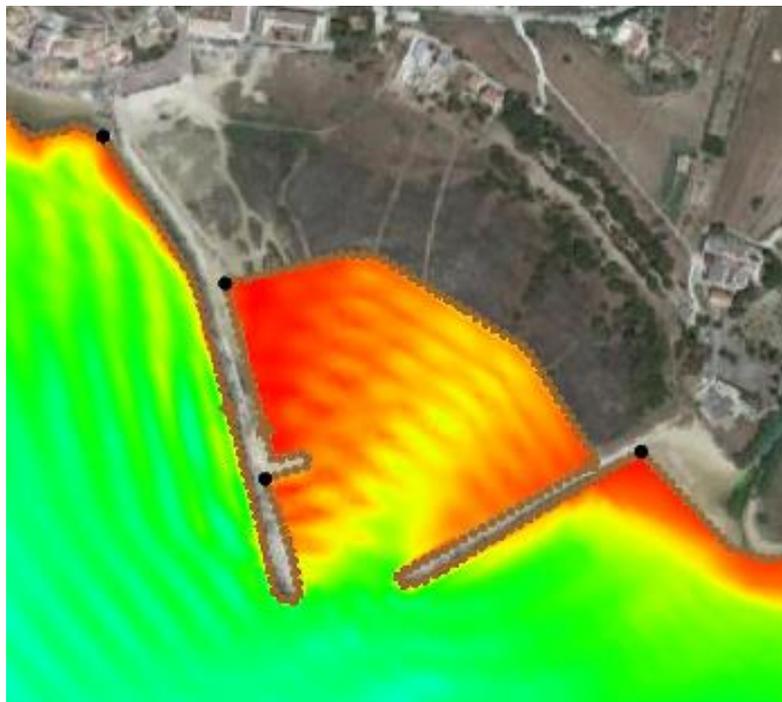
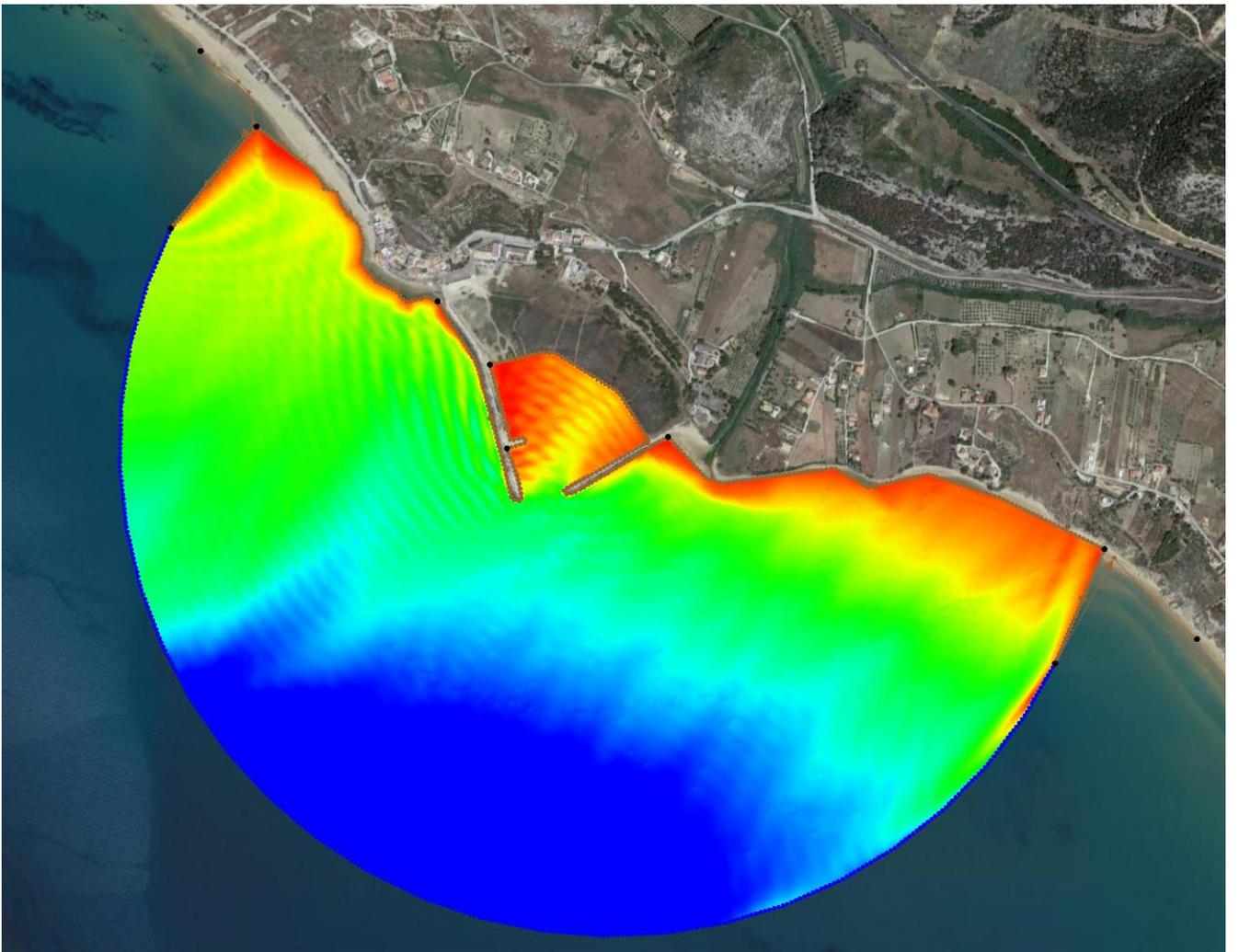
*Figura 23 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 50$  anni - direzione di provenienza  $180^\circ$  N*



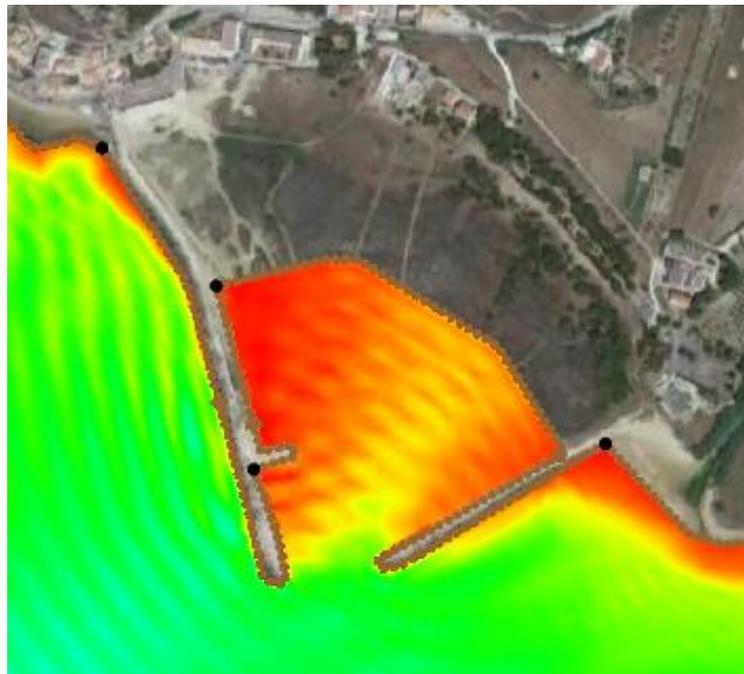
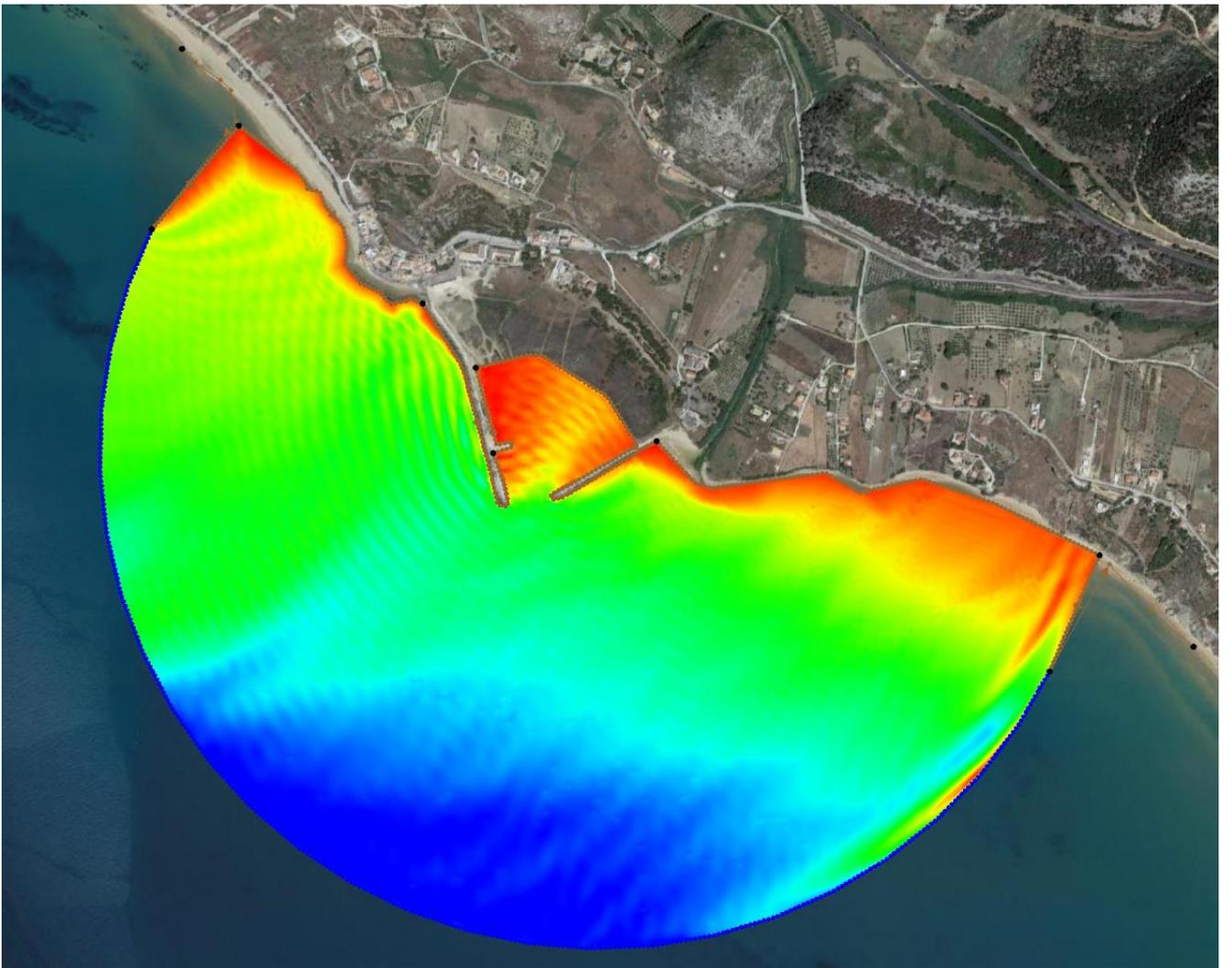
*Figura 24 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 50$  anni - direzione di provenienza  $202.5^\circ$  N*



*Figura 25 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 50$  anni - direzione di provenienza  $225^\circ$  N*



*Figura 26 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 50$  anni - direzione di provenienza  $247.5^\circ$  N*



*Figura 27 - Simulazione penetrazione moto ondoso - Tempo di ritorno  $T_r = 50$  anni - direzione di provenienza  $270^\circ$  N*

