

**Studio della circolazione marina
indotta da schemi di apertura-chiusura
del sistema MOSE
in un modello semplificato
della Laguna di Venezia**

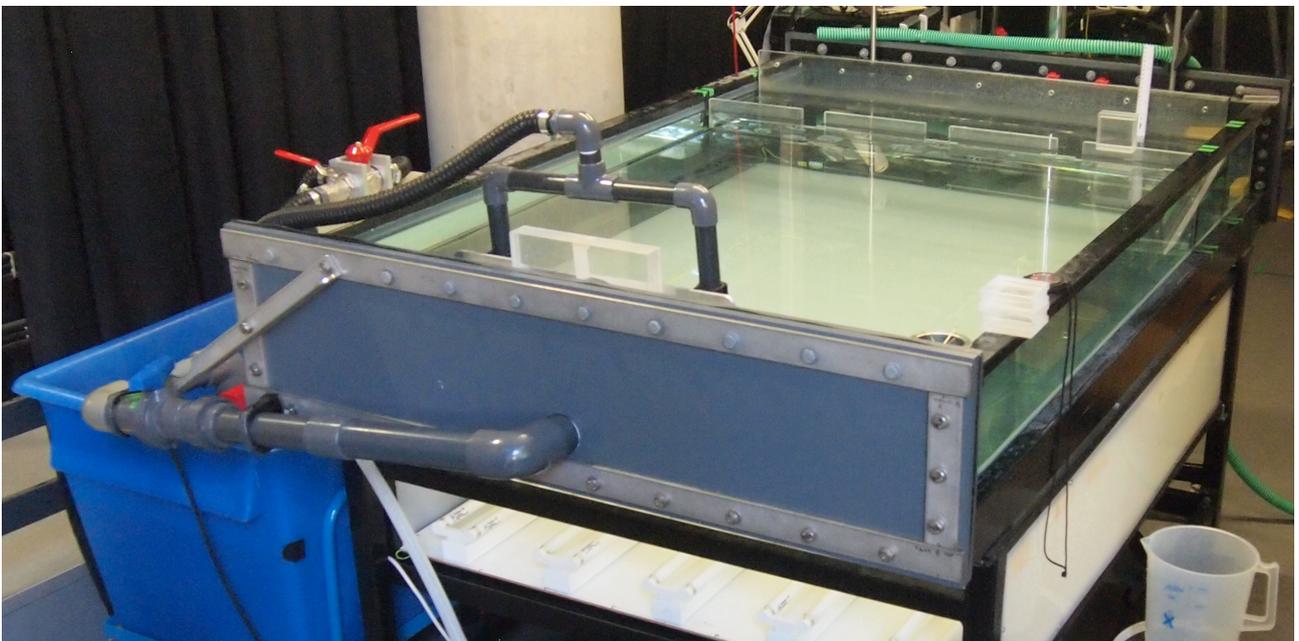
SINTESI IN ITALIANO

Breve introduzione

Il progetto in questione mira a fornire una comprensione di base del possibile utilizzo del MOSE come strumento di gestione ecologica della laguna di Venezia, in uno scenario prossimo in cui la prolungata chiusura della laguna richieda un'opportuna ricircolazione delle acque: la comunicazione laguna-mare è fondamentale per l'apporto di ossigeno e nutrienti del mare, da un lato, e per lo smaltimento delle sostanze inquinanti dovute all'attività antropica, dall'altro.

In particolare, è studiata la possibilità di creare *combinazioni di circolazione*, aprendo e chiudendo selettivamente le bocche al variare della marea. Allo scopo di studiarne le caratteristiche principali, il modello idraulico è estremamente semplificato in un parallelepipedo rettangolo di 1,20 x 0,24 x 0,05 m³; pertanto ne consegue un limite di applicabilità ma, nel contempo, una maggiore valenza teorica. Anche in ragione di ciò, sono sviluppate le basi teoriche dello scambio fra due bacini sottoposti a forzante di marea, che rappresentano lavoro originale di tesi.

Il bacino della laguna è ricreato fisicamente da una struttura in acrilico posta in una vasca; un sistema di tubazioni collega la vasca a una cisterna, e, attraverso una pompa sommergibile ad accensione e spegnimento periodici, è simulata la marea. Del colorante alimentare, uniformemente distribuito all'inizio degli esperimenti, è utilizzato per studiare il decadimento della concentrazione nel bacino.



Modello idraulico presso il G.K. Batchelor Laboratory dell'Università di Cambridge

Modelli Concettuali

Sono stati elaborati tre modelli con ipotesi semplificative al fine di caratterizzare le curve di decadimento della concentrazione in alcuni comportamenti fondamentali. Lo scambio avviene tra un corpo idrico con volume vol_{lag} (la "laguna") e un corpo idrico a volume $R vol_{lag}$ (il "mare"); periodicamente (ogni $T/2$, periodo T di marea) una quantità $r vol_{lag}$ (con r detto *rapporto di scambio*) viene scambiata dal "mare" alla "laguna" (flusso in ingresso, marea crescente) o dalla "laguna" al "mare" (flusso in uscita, marea calante). Lo scambio comincia a metà di una fase di marea crescente (pari livello).

MESCOLAMENTO PERFETTO: la concentrazione è istantaneamente uniforme; in fase di marea crescente il valore è pari al valor medio ponderato fra concentrazione presente in laguna e concentrazione nel volume di scambio, dunque è costante in fase di marea calante.

Si dimostra nell'elaborato che il decadimento ha limite per $r/T \rightarrow 0$:

$$c(t)/c_0 = e^{-\frac{r}{T} t}$$

MECCANISMO PERFETTO: il volume di scambio in ingresso nella laguna, a concentrazione minore, viene trattenuto, mentre il volume d'uscita è selezionato in modo da avere la massima concentrazione presente nella laguna.

Si dimostra nell'elaborato che il decadimento ha limite per $r/T \rightarrow 0$:

$$\bar{c}(t)/c_0 = 1 - \frac{r}{T} t$$

MECCANISMO INVERSO: il volume di scambio in ingresso nella laguna, a concentrazione minore, viene selezionato in modo da essere anche il volume d'uscita.

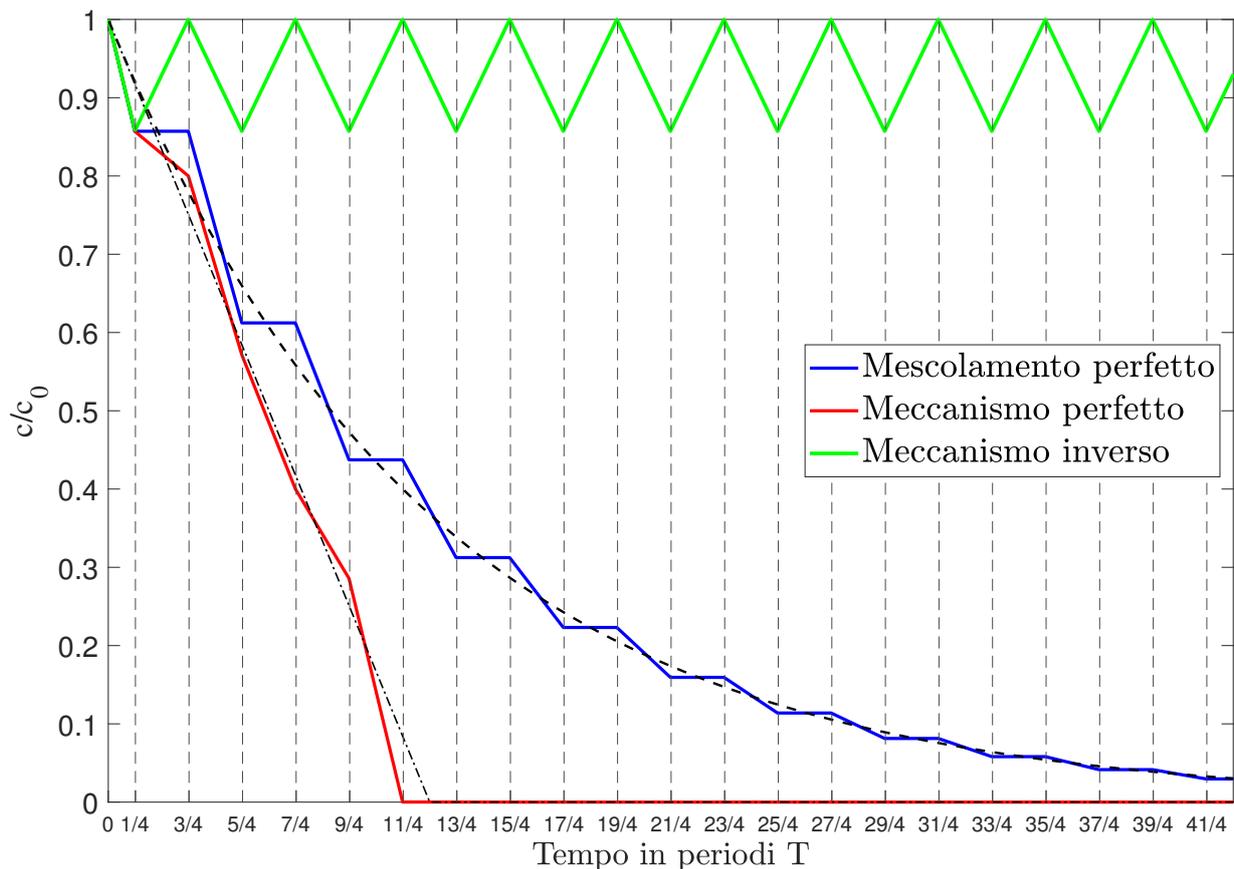
Si dimostra nell'elaborato che il decadimento ha limite per $r/T \rightarrow 0$:

$$\bar{c}(t)/c_0 = 1$$

Sussistono inoltre delle proprietà importanti per l'interpretazione delle curve di decadimento:

INDIPENDENZA DELLA PENDENZA IN FASE DI MAREA CRESCENTE: per definizione di concentrazione e di media, il decadimento di concentrazione media in fase di flusso entrante è indipendente da come è introdotto il volume di scambio, e dunque dagli schemi di apertura-chiusura.

PENDENZA NELLA FASE DI MAREA CALANTE ED EFFICIENZA: una pendenza positiva indica che il volume sottratto alla laguna ha concentrazione minore del valor medio nella laguna, come nel



meccanismo inverso; viceversa, una pendenza negativa denota la presenza concentrazioni maggiori della media in uscita e quindi meccanismo di circolazione favorevole (come nel meccanismo perfetto). Una pendenza nulla è coincidente con quella del modello a mescolamento perfetto.

EQUIVALENZA RISPETTO AI TASSI DI SCAMBIO r/T : si dimostra che per i modelli ideali sussiste un'equivalenza fra rapporti di scambio e periodi diversi a egual tasso di scambio r/T .

MAGGIORE EFFICIENZA PER RAPPORTI DI SCAMBIO RIDOTTI: fissato r/T , in un modello ibrido fra mescolamento e meccanismo, si ha maggior decadimento per rapporti di scambio minori

Esperimenti

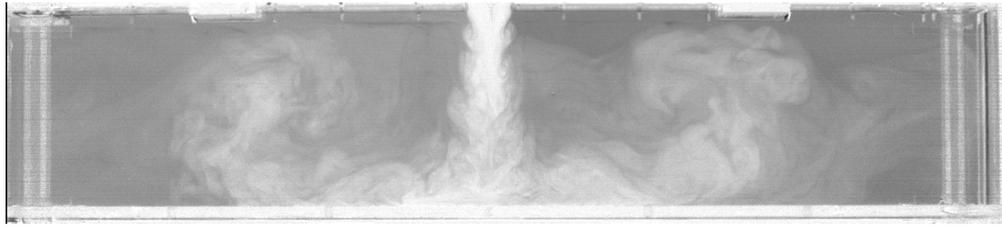
Gli esperimenti sono divisi in tre serie, corrispondenti a tre diversi rapporti di scambio r : $1/6$, $1/3$ (vicino a quello reale della laguna) e $1/2$. La quantità r/T è fissata in modo che il volume totale scambiato sia il medesimo; un valore di r più ridotto, inoltre, implica valori minori di ampiezza della marea e simula uno scenario di innalzamento del livello del mare.

I dati sperimentali sono costituiti da *frame* fotografici in gradazioni di grigio; tramite opportuna calibrazione è stata definita una relazione fra luminosità dei *pixel* e concentrazione. I *frame* sono dunque convertiti in distribuzioni di concentrazione secondo per secondo e manipolati con *Matlab*.

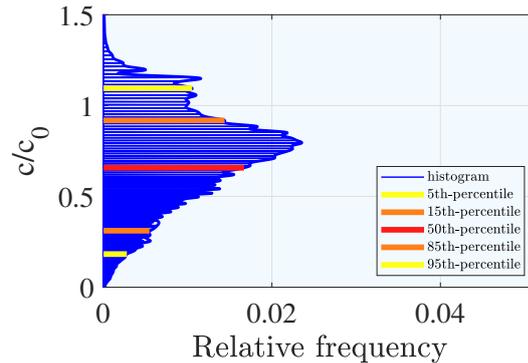
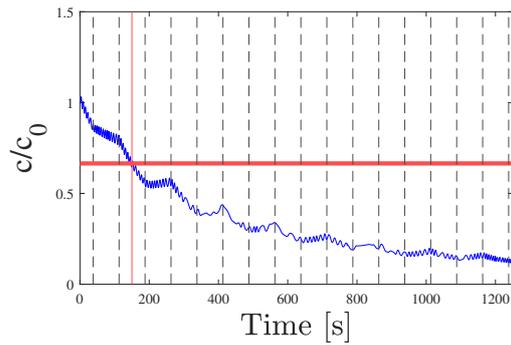
In tabella le combinazioni studiate: \updownarrow per ingresso aperto sia in fase di entrata che di uscita, $-$ per ingresso chiuso; \downarrow apertura in entrata, \uparrow in uscita:

Allopen	\updownarrow	\updownarrow	\updownarrow	
Oneopen	$-$	\updownarrow	$-$	
Twoopen	\updownarrow	$-$	\updownarrow	
Twoopen lateral	\updownarrow	\updownarrow	$-$	
Twoclose	\updownarrow	$-$	$-$	
Combo	\downarrow	$-$	$-$	in
	$-$	$-$	\uparrow	out
Badcombo	\downarrow	$-$	$-$	in
	$-$	\uparrow	$-$	out
Goodcombo	\downarrow	$-$	\downarrow	in
	$-$	\uparrow	\uparrow	out
Easycombo	\downarrow	\downarrow	$-$	in
	$-$	\uparrow	\uparrow	out
Bigcombo	$-$	\downarrow	$-$	in
	\uparrow	$-$	\uparrow	out
Bigcombo inverted	\downarrow	$-$	\downarrow	in
	$-$	\uparrow	$-$	out
Supercombo	\downarrow	$-$	$-$	in
	$-$	\uparrow	$-$	out
	$-$	$-$	\downarrow	in
	$-$	\uparrow	$-$	out
Supercombo inverted	$-$	\downarrow	$-$	in
	\uparrow	$-$	$-$	out
	$-$	\downarrow	$-$	in
	$-$	$-$	\uparrow	out

Sono anche sperimentate due combinazioni con apertura-chiusura in controfase rispetto alla marea, *strangecombo* e *strangebigcombo*.



INFLOW $t=150$ (1.00 T)

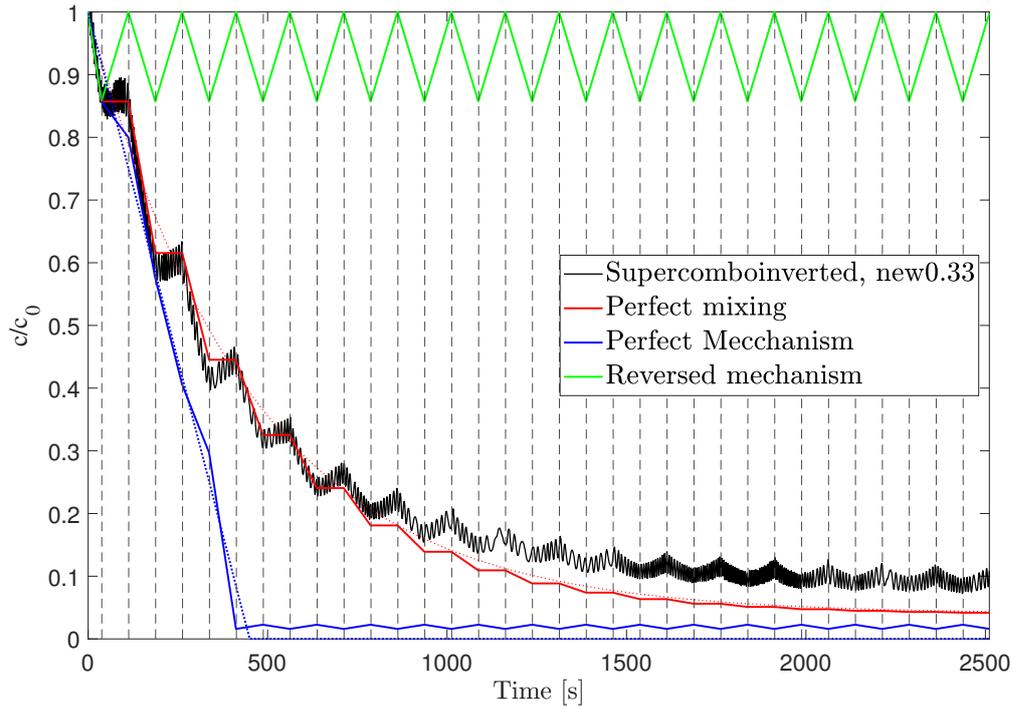


Esempio di *frame* con grafico di concentrazione media e distribuzione in frequenza, combinazione *oneopen*

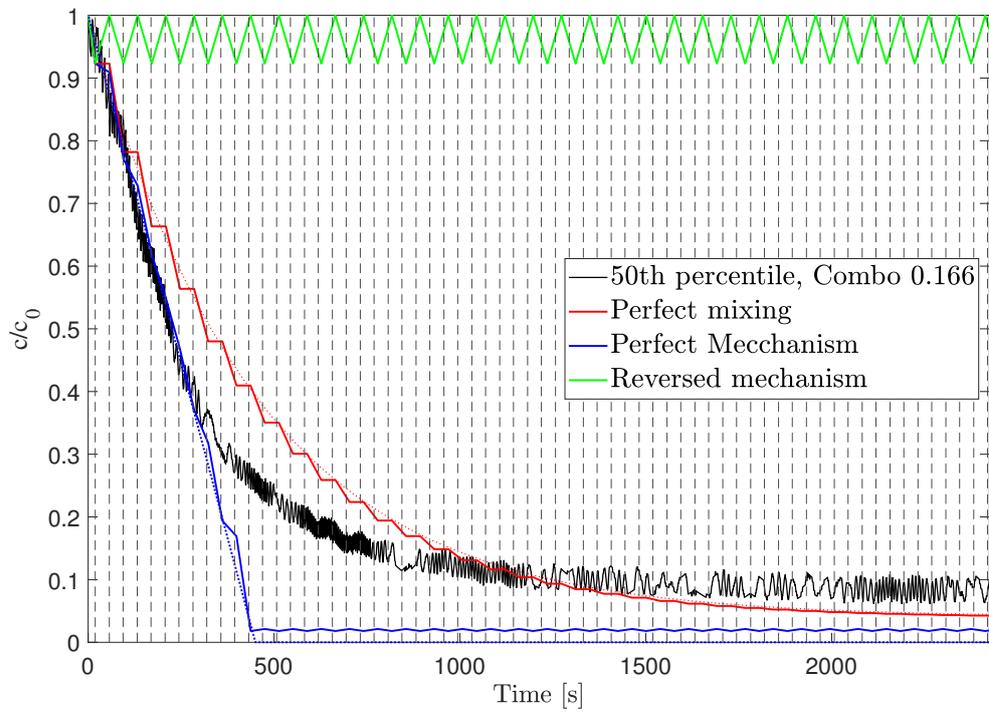
In generale le combinazioni si possono dividere in

- *esternamente forzate* quando la configurazione di chiusura varia nelle due fasi di marea
- *naturali* quando la configurazione è fissa

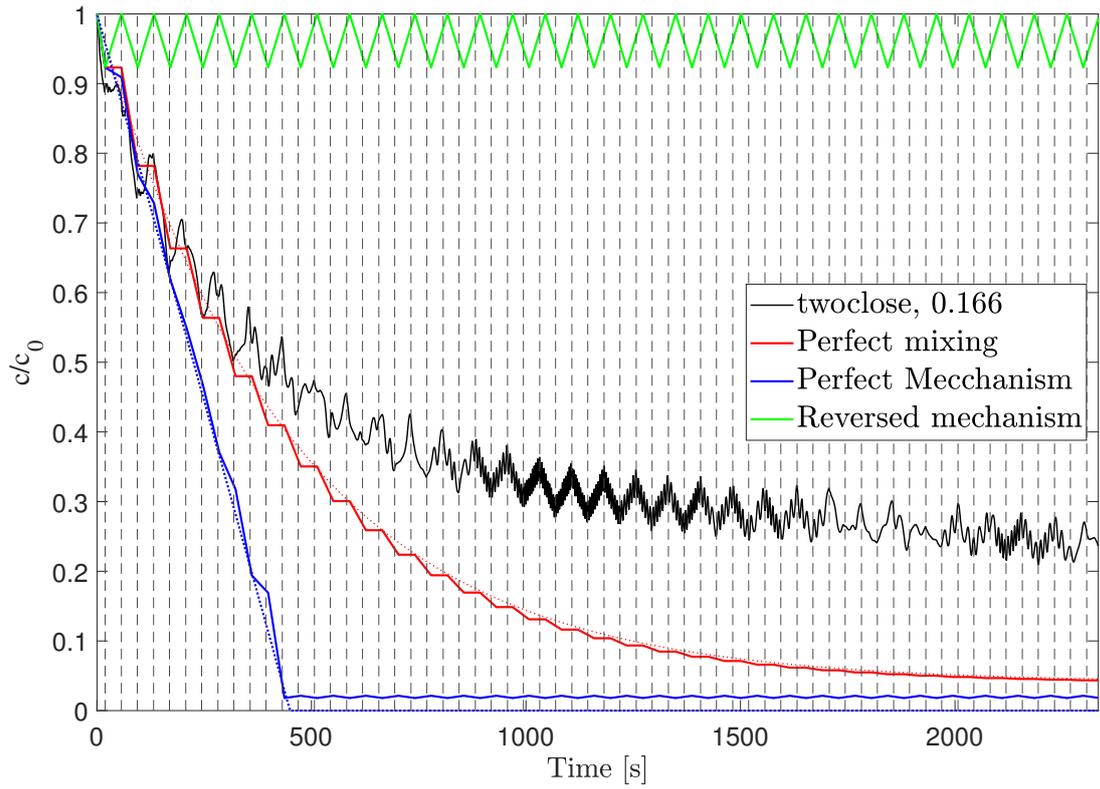
Dall'andamento delle curve di decadimento si nota che alcune combinazioni si predispongono meglio di altre a rappresentare i modelli ideali definiti in precedenza. In generale, la presenza di un meccanismo si nota nella pendenza negativa delle curve di decadimento in fase di fuoriuscita, una pendenza nulla indica buon mescolamento e una pendenza positiva indica presenza di meccanismo inverso. Quest'ultimo caso si verifica sempre nelle fasi inoltrate del decadimento, quando alcune parti stagnanti nel bacino mantengono una concentrazione più elevata.



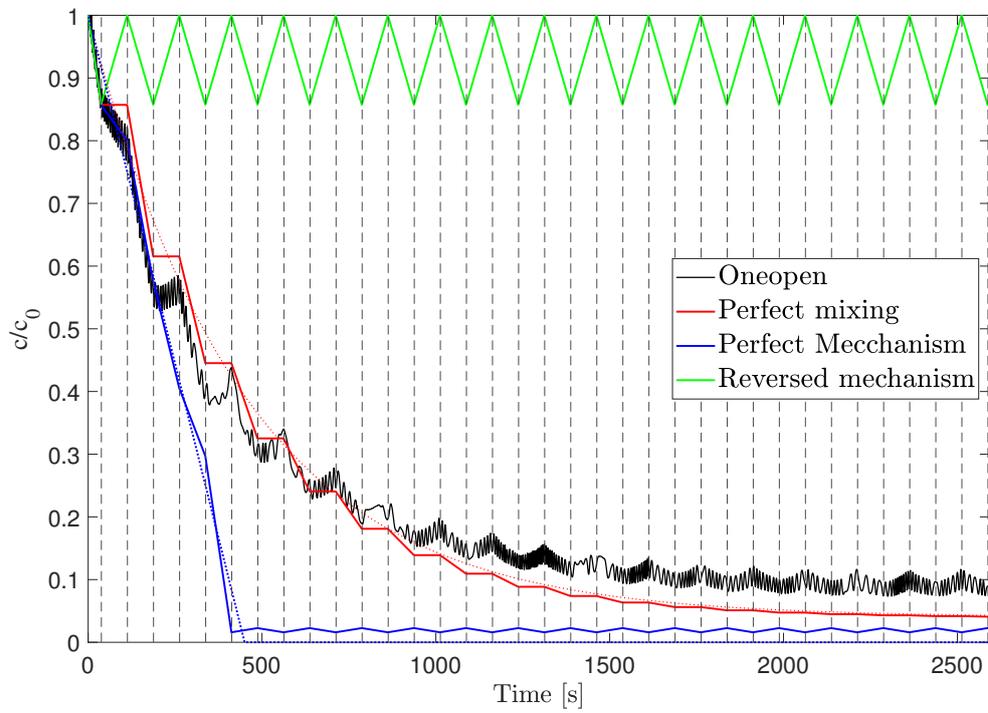
Supercomboinverted $r = 1/2$. La concentrazione media segue il modello di *Mescolamento Perfetto* durante le prime fasi



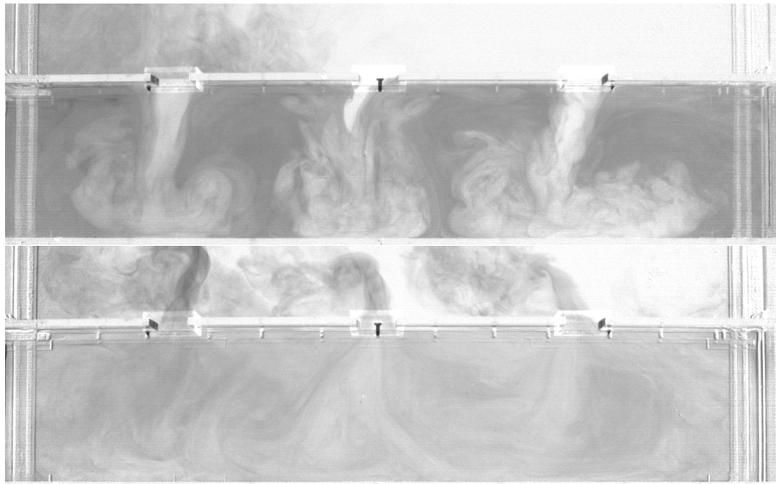
Combo (\downarrow $--$ in, $--$ \uparrow out) $r = 1/6$. La concentrazione mediana segue l'andamento lineare del *Meccanismo Perfetto* per diversi cicli



Twoclose (\updownarrow $---$) $r = 1/6$. Comportamento a *Meccanismo Inverso*



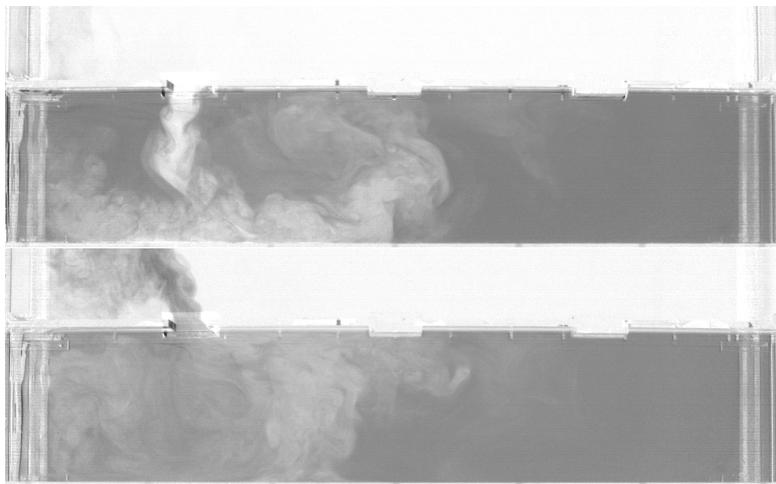
Oneopen ($- \updownarrow -$), $r = 1/3$



Schema di circolazione per fase di ingresso e uscita, *allopen*



Combo

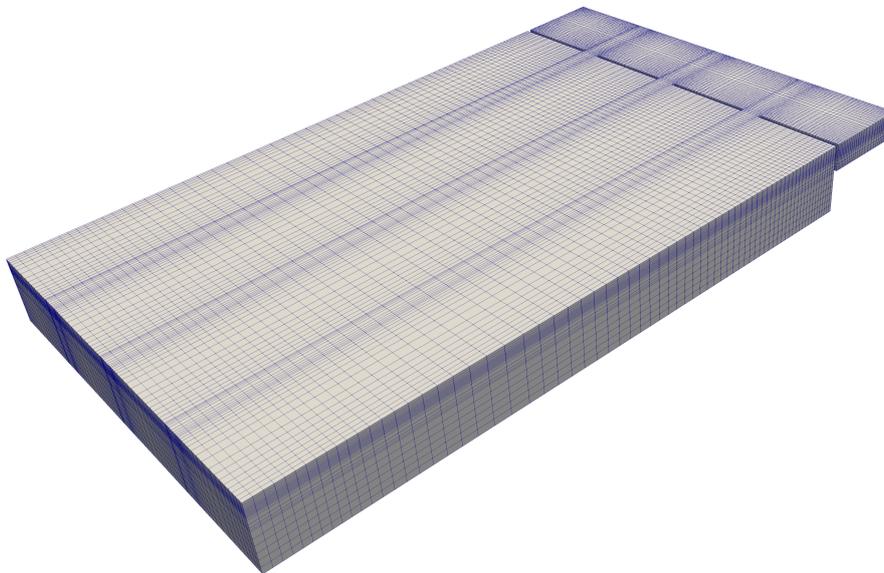


Twoclose

Simulazioni

Sussistendo incertezza riguardo combinazioni a curve di decadimento vicine fra loro, sono state realizzate delle simulazioni in *OpenFOAM*, una *suite* C++ per la fluidodinamica computazionale (CFD) molto usata in ambito accademico per la sua versatilità e le sue capacità di parallelizzazione. Infatti, essendo *OpenFOAM* un insieme di librerie *open source*, è modificabile e diverse funzionalità fondamentali come le condizioni al contorno per gli schemi di apertura-chiusura o la correzione della diffusione numerica sono state implementate ad hoc per il computo. Inoltre, data la mole di computo richiesta (67448 *core hours* in retrospettiva), si è usufruito di CINECA, il più potente centro di calcolo in Italia per la ricerca.

Il modello numerico è calibrato sul modello sperimentale ed è del tutto comparabile con esso. In generale le simulazioni hanno avuto esito positivo e fanno luce sui risultati degli esperimenti.

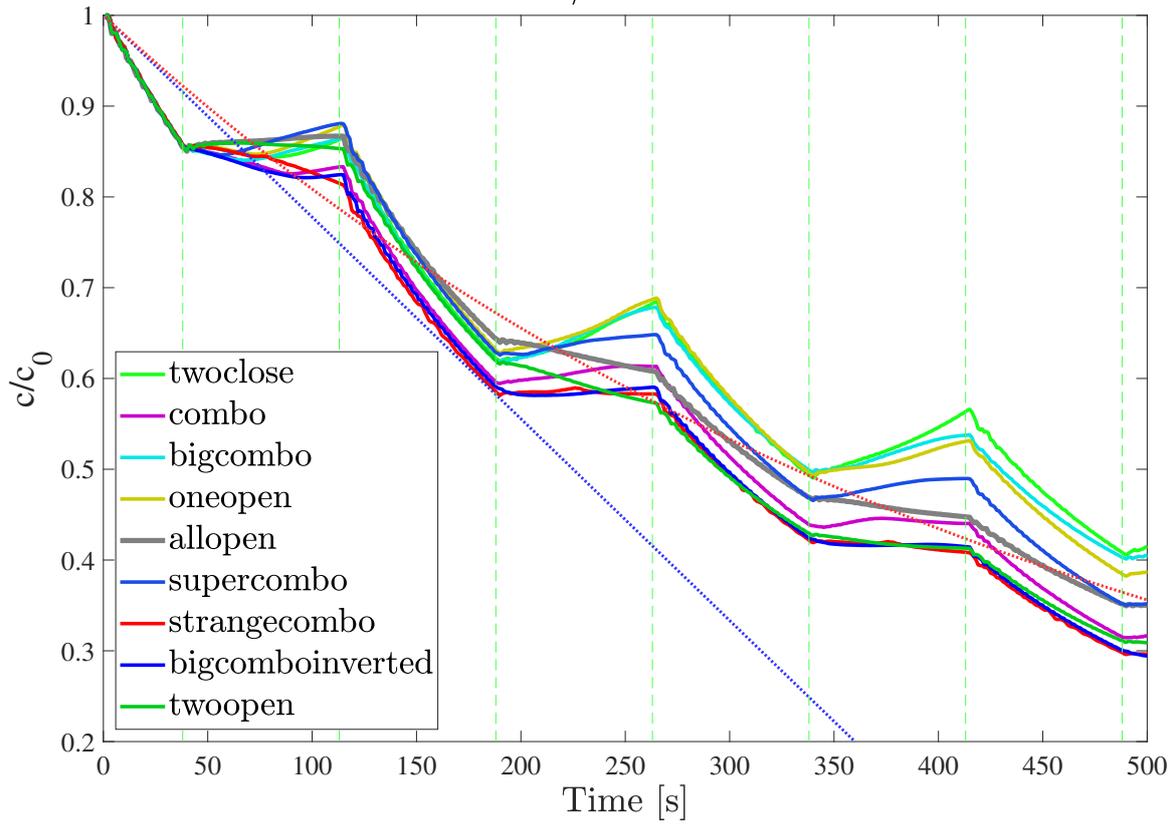


Caratteristiche geometriche e di risoluzione spaziale del modello numerico

Si riportano, quindi, i dati salienti per la serie 1/3, con dati quantitativamente significativi per le varie combinazioni. I coefficienti sono mediati rispetto ai 500 s di simulazioni.

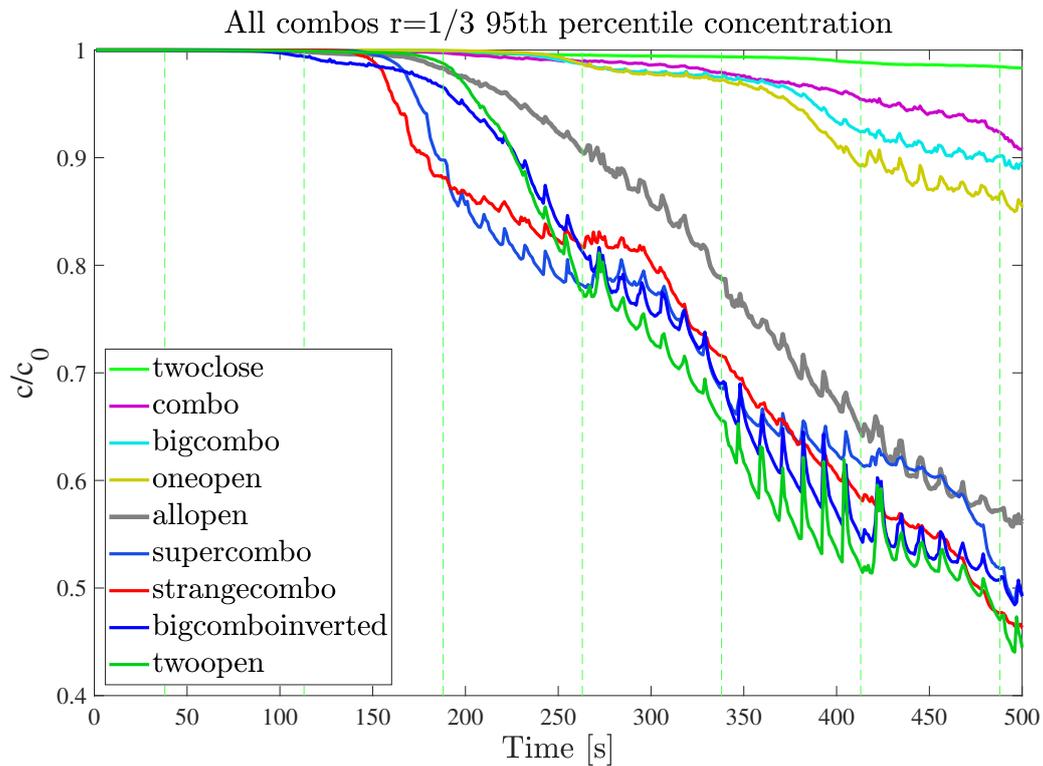
Inoltre a [questo link](#) un video di confronto esperimenti-simulazioni (*Combo*, $r = 1/6$, velocità 5x)

All combos r=1/3 mean concentration



Concentrazione media nella serie 1/3

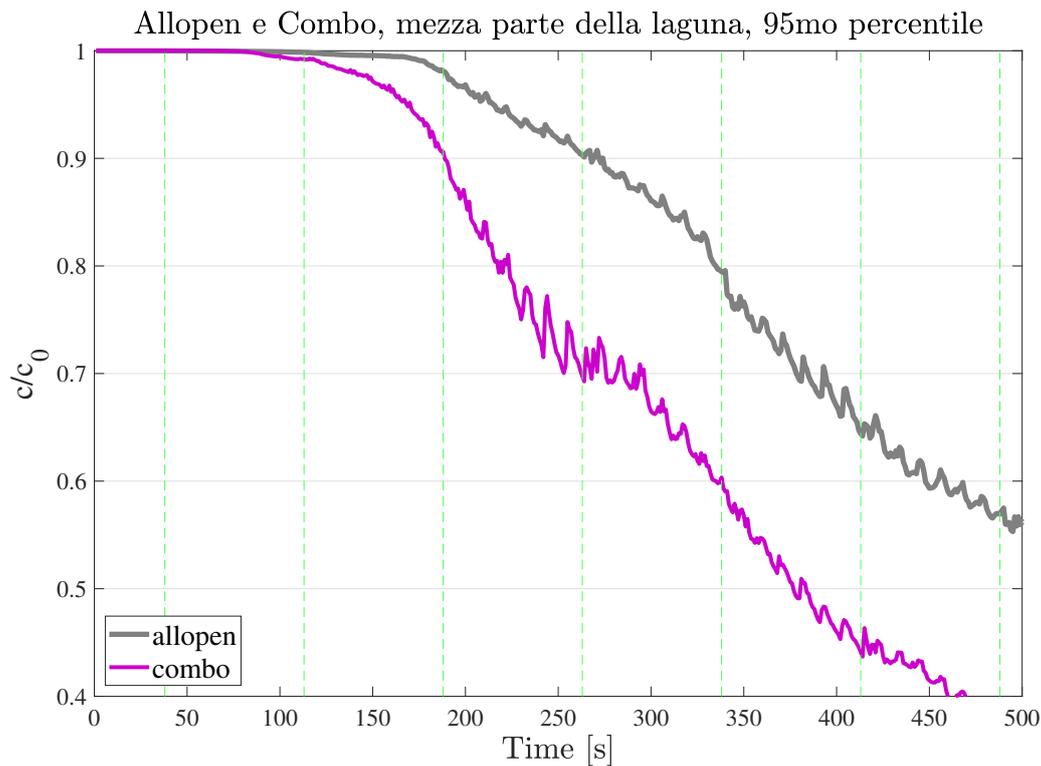
Concentrazione Media	
strangecombo	0,583
bigcomboinverted	0,584
twoopen	0,594
combo	0,598
allopen	0,621
supercombo	0,630
bigcombo	0,646
oneopen	0,648
twoclose	0,651



95 ^{mo} percentile	
twoopen	0,794
strangecombo	0,804
bigcomboinverted	0,806
supercombo	0,808
allopen	0,857
oneopen	0,966
bigcombo	0,973
combo	0,981

In generale sono confermati i risultati degli esperimenti:

- Dato un criterio di efficienza di circolazione (media, mediana o massima) esiste sempre una combinazione più efficiente della combinazione naturale *allopen*. L'incremento del 6,1% in termini medi (*strangecombo*), 7,4% in termini di 95^{mo} percentile (*twoopen*). Questi valori salgono al 20 e 14% considerando solo la metà vicina alla bocca d'entrata in *combo* (vedi figura).
- Al decrescere del rapporto di scambio (da 1/2 a 1/3 e 1/6) si ha un miglioramento delle combinazioni *esternamente forzate*, per localizzazione degli scambi interni; le combinazioni *naturali*



hanno un decadimento simile (i.e. *twoopen*) o meno efficienti (i.e. *allopen*). Ciò è importante considerando il diminuire del rapporto di scambio a causa dell'innalzamento del medio mare.

- L'apertura delle bocche laterali nella fase di flusso entrante (*twoopen*, *bigcomboinverted*, *supercombo*), con la contemporanea chiusura della bocca centrale, è associata al meccanismo più efficiente, sia in termini medi che massimi. La configurazione in deflusso è meno importante e *twoopen*, grazie alla sua semplicità, rappresenta un'alternativa sicuramente migliore di *allopen*.
- Le combinazioni *strange*, a schema sfasato sono ottime in termini di concentrazione massima a breve termine.

Conclusioni

Anche nelle sue drastiche semplificazioni, il lavoro di tesi ha mostrato una varietà di proprietà e soluzioni che non solo rappresentano un importante risultato teorico, ma possono essere applicate a casi studio reali. Allo stesso modo in cui i modelli concettuali hanno guidato l'interpretazione dei risultati sperimentali, l'intero insieme di combinazioni getta le basi per un nuovo livello di comprensione teorica, un grado intermedio di astrazione rispetto alle applicazioni ingegneristiche. In ultima istanza, un continuo affinamento nella calibrazione delle combinazioni in termini di tempistica e penetrazione dei getti di entrata, posizione delle sorgenti inquinanti e condizioni meteorologiche può dare vita allo strumento principe nella gestione ecologica della Laguna di Venezia.