

SIMULAZIONE NUMERICA DELLE PRESTAZIONI DI UN OSCILLATING WATER COLUMN SOTTO ONDE FRANGENTI

Giovanni Cannata¹, Francesco Biondi¹ & Marco Simone¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184, Roma

ASPETTI CHIAVE

- Modello idrodinamico basato sull'integrazione numerica delle equazioni di Navier-Stokes su di una griglia di calcolo mobile, che segue le oscillazioni della superficie libera
- Schema numerico di tipo shock-capturing per la simulazione numerica delle onde frangenti
- Modello pneumatico, per la simulazione delle variazioni di pressione dell'aria all'interno della camera del OWC, in cui si tiene conto della comprimibilità dell'aria

1 INTRODUZIONE

Tra i più semplici ed efficaci dispositivi per la conversione di energia delle onde in energia elettrica vi sono gli Oscillating Water Columns (OWCs). In tali dispositivi, una camera semisommersa, fissata al fondale, ha tre lati chiusi e un lato aperto rivolto verso la direzione di provenienza delle onde. La parte inferiore della camera è occupata da acqua in collegamento diretto col mare, mentre la parte superiore della camera è occupata da aria che è collegata all'ambiente esterno tramite una condotta forzata che la costringe a passare attraverso una turbina. A causa del moto ondoso, l'acqua che occupa la parte bassa della camera si comporta come una colonna oscillante che, alternativamente, spinge fuori l'aria o la richiama all'interno della camera. L'utilizzo di una turbina autorettificante consente di produrre energia elettrica durante tutte e due le fasi del moto ondoso. Un noto esempio di OWC progettato e installato in Italia, che è tutt'ora oggetto di numerosi studi scientifici, è quello del porto di Civitavecchia (Arena *et al.* 2018). In generale, la valutazione della potenziale capacità di un sito costiero di produrre energia elettrica dal moto ondoso richiede la simulazione della complessa interazione tra moto ondoso e lo OWC al variare delle caratteristiche geometriche della camera e delle condizioni di moto ondoso. Tale simulazione viene eseguita mediante prove di laboratorio o mediante modelli numerici (un'ampia raccolta di studi scientifici sull'argomento è presente in Jacob *et al.* 2022 e in Yang *et al.* 2022). I modelli numerici per lo studio delle prestazioni degli OWC sono generalmente costituiti da due sotto-modelli principali: un modello idrodinamico, per la simulazione dei campi di velocità dell'acqua e di elevazione della superficie libera dovuti al moto ondoso; un modello pneumatico, per la simulazione delle variazioni di pressione dell'aria all'interno della camera dovute al transito dell'aria attraverso la turbina. In molti studi numerici presenti in letteratura sull'efficienza degli OWC, il modello idrodinamico è basato sulla teoria dei flussi potenziali (Kim *et al.* 2022). Tali modelli idraulici sono adatti principalmente alla simulazione di onde non frangenti che si propagano in acque profonde e forniscono buona corrispondenza con le prove sperimentali di OWC posizionati fuori dalla zona dei frangenti. Nel caso di studi numerici su OWC posizionati nella zona dei frangenti o in acque poco profonde, sono necessari modelli idrodinamici più complessi, come quelli basati sulla integrazione delle equazioni di Navier-Stokes mediante schemi numerici di tipo shock-capturing (Cannata *et al.* 2019). La maggior parte degli studi numerici sulle prestazioni degli OWC adottano un modello pneumatico semplificato, basato sull'ipotesi di incomprimibilità dell'aria all'interno della camera del OWC (Wan *et al.* 2023). Tale ipotesi risulta pienamente giustificata solo nel caso di basse velocità dell'aria, ossia basse velocità di variazione del volume dell'aria all'interno della camera. Recentemente, in letteratura sono stati proposti modelli pneumatici più sofisticati per tenere in conto dell'effetto prodotto dalla comprimibilità dell'aria sulle prestazioni idrodinamiche degli OWC (Wiener *et al.* 2022).

In questo articolo viene proposto un modello numerico costituito da: a) un modello idrodinamico in grado di simulare efficacemente anche le onde frangenti, che è basato sulla integrazione delle equazioni di Navier-Stokes mediante uno schema numerico di tipo shock-capturing recentemente proposto in letteratura (Cannata *et al.* 2022); b) un modello pneumatico che tiene conto dell'effetto della comprimibilità dell'aria sulle variazioni di pressione all'interno della camera, che è basato sull'integrazione delle equazioni proposte in Josset & Clement (2007). Il nuovo modello numerico viene validato con prove di laboratorio di funzionamento di un OWC a scala ridotta e viene applicato alla simulazione numerica del funzionamento di un OWC a scala

reale posizionato sul lato esterno di un pennello a T posto a protezione della costa di Paola, in acque poco profonde (profondità di circa 3 m) all'interno della zona di surf, dove è sottoposto a onde frangenti. Le simulazioni numeriche sono eseguite sia utilizzando il modello pneumatico proposto, sia utilizzando il modello pneumatico semplificato solitamente usato in letteratura, che è basato sulla ipotesi di incomprimibilità dell'aria. Il confronto tra i risultati numerici ottenuti consente di evidenziare i limiti di applicabilità del modello pneumatico semplificato.

2 MODELLO IDRODINAMICO

Nel modello idrodinamico proposto, i campi di velocità dell'acqua e di elevazione della superficie libera sono ottenuti integrando numericamente le equazioni di Navier-Stokes espresse in una formulazione integrale e controvariante su un sistema di coordinate curvilinee mobili che seguono le oscillazioni della superficie libera (Cannata et al. 2019). In uno spazio bidimensionale verticale, in cui x^1 rappresenta la coordinate cartesiana orizzontale e x^2 quella verticale, si definisce la seguente trasformazione di coordinate dipendente dal tempo,

$$\xi^1 = x^1; \quad \xi^2 = \frac{x^2 + h(x^1)}{D(x^1, t)}; \quad (1)$$

in cui la profondità totale dell'acqua, $D(x^1, t) = h(x^1) + \eta(x^1, t)$, è data dalla somma della profondità indisturbata, h , e della elevazione della superficie libera rispetto al livello indisturbato, η . Indicando con $\vec{c}_{(l)} = \partial \vec{x} / \partial \xi^l$ ($l = 1, 2$) i vettori di base covarianti, con $\vec{c}^{(l)} = \partial \xi^l / \partial \vec{x}$ i vettori di base controvariante e con $\vec{c}^{(l)}$ il vettore di base controvariante definito al centro di una generica cella di calcolo di area $\Delta A_0 = \Delta \xi^1 \Delta \xi^2$, il sistema delle equazioni del moto si scrive

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = -\frac{1}{\Delta \xi^1} \left[\int_0^1 u^1 D d\xi^2 \right]_{\xi^{1+}} - \left[\int_0^1 u^1 D d\xi^2 \right]_{\xi^{1-}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{Du^l}}{\partial t} = & -\frac{1}{\Delta A_0} \sum_{\alpha=1}^2 \left\{ \int_{\Delta L_0^{\alpha+}} [\vec{c}^{(l)} \cdot \vec{c}_{(k)} Du^k (u^\alpha - v^\alpha) + \vec{c}^{(l)} \cdot \vec{c}_{(k)} G \eta D] d\xi^\beta - \int_{\Delta L_0^{\alpha-}} [\vec{c}^{(l)} \cdot \vec{c}_{(k)} Du^k (u^\alpha - v^\alpha) + \right. \\ & \left. \vec{c}^{(l)} \cdot \vec{c}_{(k)} G \eta D] d\xi^\beta \right\} + \frac{1}{\Delta A_0} \sum_{\alpha=1}^2 \left\{ \int_{\Delta L_0^{\alpha+}} \vec{c}^{(l)} \cdot \vec{c}_{(k)} 2\nu_T S^{k\alpha} D d\xi^\beta - \int_{\Delta L_0^{\alpha-}} \vec{c}^{(l)} \cdot \vec{c}_{(k)} 2\nu_T S^{k\alpha} D d\xi^\beta \right\} - \\ & \frac{1}{\Delta A_0} \frac{1}{\rho} \int_{\Delta A_0} \vec{c}^{(l)} \cdot \vec{c}_{(k)} \frac{\partial p^{DYN}}{\partial \xi^m} D d\xi^1 d\xi^2 \end{aligned} \quad (3)$$

dove \bar{D} e $\overline{Du^l}$ rappresentano i valori medi, sulle rispettive celle di calcolo, delle variabili conservate; u^l, v^l sono, rispettivamente, le componenti controvarianti della velocità dell'acqua e della griglia di calcolo; S^{lm} sono le componenti controvarianti del tensore delle velocità di deformazione; p^{DYN} è la componente dinamica della pressione; G è la accelerazione dei gravità; ν_T è il coefficiente di viscosità turbolenta (che è calcolato con il modello di Smagorinsky); ξ^{1+}, ξ^{1-} indicano i due estremi laterali della cella di calcolo (in cui ξ^1 è costante) su cui si esegue l'integrazione lungo la verticale; $\Delta L_0^{\alpha+}, \Delta L_0^{\alpha-}$ indicano le linee di contorno della cella di calcolo bidimensionale (su cui ξ^α è costante) situate in corrispondenza dei valori maggiori e minori di ξ^α . Le equazioni (2) e (3) sono integrate numericamente mediante uno schema ai volumi finiti di tipo shock-capturing adatto a simulare le onde frangenti (Cannata et al. 2022).

3 MODELLO PNEUMATICO

Seguendo la linea proposta da Josset & Clement (2007), in questo lavoro, la colonna d'aria all'interno della camera dell'OWC viene rappresentata come un sistema termodinamico aperto costituito da gas perfetto che scambia massa ed energia con l'esterno. Utilizzando il primo principio della termodinamica, le relazioni termodinamiche dei gas perfetti e la tipica relazione lineare tra la portata di aria attraverso la turbina Wells e differenza di pressione tra monte e valle, $Q_t(t) = (p(t) - p_{atm})/K_t$ (in cui K_t è la costante caratteristica della turbina), si ottiene la seguente equazione

$$\frac{\dot{p}(t)}{p(t)} = \gamma \left[-\frac{p(t) - p_{atm}}{K_t V(t)} \left(1 - \sigma \frac{\rho(t) - \rho_{atm}}{\rho(t)} \right) - \frac{\dot{V}(t)}{V(t)} \right] \quad (4)$$

in cui $\dot{p}(t)$ è il tasso di variazione della pressione dell'aria all'interno della camera; γ il coefficiente di dilatazione adiabatica dei gas perfetti (pari a 1.4 per i gas biatomici); $\dot{V}(t)$ è il tasso di variazione del volume dell'aria nella camera; $\rho(t)$ e $p(t)$ sono i valori la densità e pressione dell'aria nella camera, mentre ρ_{atm} e p_{atm} quelli atmosferici all'esterno; σ è un coefficiente, il cui valore è pari a 0 se $Q_t(t) \geq 0$ ed è pari a 1 se $Q_t(t) < 0$. La chiusura del modello pneumatico richiede una relazione tra la densità dell'aria e la pressione. A tal fine si utilizza la nota relazione valida per le trasformazioni isoentropiche, $\dot{\rho}(t)/\rho(t) = \dot{p}(t)/\gamma p(t)$.

Le equazioni per l'aggiornamento nel tempo della pressione e della densità dell'aria vengono risolte, insieme alle equazioni del modello idrodinamico, mediante uno schema di avanzamento nel tempo di tipo esplicito. Una volta aggiornate le pressioni, la potenza istantanea assorbita dalla turbina, $P_t(t)$, si calcola mediante l'espressione

$$P_t(t) = Q_t(t)(p(t) - p_{atm}(t)) = \frac{(p(t) - p_{atm}(t))^2}{K_t} \quad (5)$$

In questo lavoro, il modello idrodinamico e quello pneumatico sono numericamente accoppiati mediante l'equazione per il calcolo della pressione dell'aria, che agisce sulla superficie libera all'interno della camera: ad ogni istante della simulazione, l'aggiornamento della pressione dell'aria all'interno della camera, il volume dell'aria all'interno della camera e il suo tasso di variazione nel tempo sono calcolate utilizzando i risultati del modello idrodinamico al passo precedente; a sua volta, il modello idrodinamico utilizza i valori di pressione dell'aria ottenuti con la Eq. (4) come condizione al contorno sulla superficie libera all'interno della camera.

4 RISULTATI

La validazione del modello numerico proposto è eseguita riproducendo numericamente una serie di esperimenti di laboratorio proposti da *Morris-Thomas et al. (2007)* e comunemente usati in letteratura. Il modello è quindi utilizzato per valutare numericamente la produzione potenziale annuale di energia elettrica ricavabile dal moto ondoso in un tratto di costa davanti a Paola (CS), dove è presente una serie di pennelli a T. Nelle simulazioni numeriche, lo OWC è collocato sul lato esterno della testa dei pennelli a T, nella regione di surf, ad una profondità di circa 3 m, dove è soggetto ad onde frangenti.

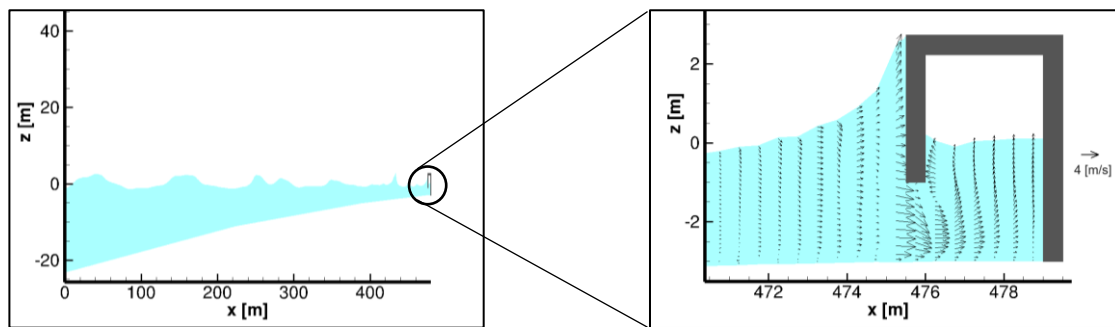


Fig.1. Interazione onda - OWC sul pennello davanti alla costa di Paola (CS). a) Campo d'onda istantaneo ottenuto con il modello proposto. b) Dettaglio dei campi di velocità e di elevazione della superficie libera fuori e dentro la camera del OWC.

La caratterizzazione del regime meteomarinario a largo di Paola è realizzato utilizzando le serie di dati ondometrici ricostruiti dal Centro Meteorologico Europeo (ECMWF). Le onde con frequenza di accadimento annuale superiore all'1 per cento sono suddivise in 8 classi caratterizzate da diverse altezze significative e periodo, con cui sono costruite le onde irregolari di input del modello idrodinamico. Per ognuna delle suddette classi, con il modello proposto, viene simulata l'interazione con lo OWC e viene calcolata la quantità media annuale di energia estraibile dal moto ondoso. La valutazione della produzione media annuale di energia che può essere ricavata a Paola con OWC posizionati nelle teste degli 11 pennelli a T esistenti (per una lunghezza complessiva degli impianti pari a 1540 m) è pari a circa 5.33 GWh. Tale quantità di energia è di poco superiore a quella prodotta da un parco eolico costituito da 3 aerogeneratori da 0.8MW. Al fine di valutare l'effetto della

comprimibilità dell'aria sui risultati numerici, tutte le simulazioni utilizzate per la suddetta valutazione sono ripetute utilizzando il modello pneumatico semplificato, usualmente adottato in letteratura, in cui l'aria è considerata incomprimibile.

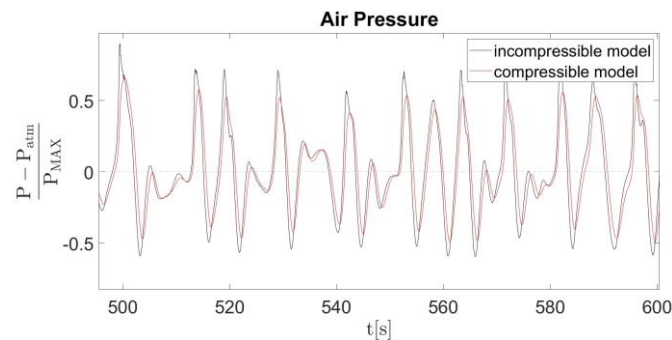


Fig. 2. Andamento nel tempo della pressione dell'aria all'interno della camera del OWC. Risultati numerici ottenuti con il modello pneumatico in cui l'aria è considerata comprimibile (linea rossa) e con quello in cui è considerata incomprimibile (linea nera).

Con tale modello semplificato la valutazione della produzione media annuale di energia dalle onde risulta pari a 6.99 GWh, corrispondente al 31,08% in più di quella ottenuta con il modello proposto. Una spiegazione di tale sovrastima è dovuta al fatto che, a parità di onda in arrivo al OWC, in questo caso, le oscillazioni di pressione calcolate utilizzando il modello pneumatico incomprimibile sono sistematicamente maggiori di quelle calcolate con quello comprimibile, con massime differenze in valore assoluto superiori al 30 per cento (Figura 2). In tali condizioni, ad ogni variazione (per unità di tempo) del volume della camera nella camera dovuta al moto ondoso corrisponde una equivalente portata di aria attraverso la turbina e conseguente produzione di energia elettrica. Nella realtà, le rapide variazioni di livello idrico nella camera prodotte dalle onde frangenti producono compressioni e dilatazioni dell'aria nella camera che ne ostacolano lo spostamento e il flusso attraverso la turbina e limitano la produzione di energia elettrica. Il confronto tra le simulazioni numeriche realizzate con il modello pneumatico semplificato e con quello proposto mostra che, nel caso di OWC sottoposti a onde frangenti, trascurare l'effetto dovuto alla comprimibilità dell'aria può produrre valutazioni eccessivamente ottimistiche sull'efficienza idrodinamica degli OWC e una significativa sovrastima della produzione energetica media annuale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Arena F., Romolo A., Malara G., Fiamma, V. & Laface V. Response of the U-OWC prototype installed in the Civitavecchia harbour. In International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2018, Vol. 51319.
- Cannata G., Petrelli C., Barsi L. & Gallerano F. Numerical integration of the contravariant integral form of the Navier-Stokes equations in time-dependent curvilinear coordinate system for three-dimensional free surface flows. Continuum Mechanics and Thermodynamics 2019, Vol. 31.
- Cannata G., Palleschi F., Iele B. & Gallerano F. A Wave-Targeted Essentially Non-Oscillatory 3D Shock-Capturing Scheme for Breaking Wave Simulation. Journal of Marine Science and Engineering 2022, Vol. 10.
- Josset C. & Clement A.H. A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants. Renewable Energy 2007, Vol. 32.
- Kim J.S., Nam B.W., Park S., Kim K.H., Shin S.H. & Hong K. Numerical investigation on hydrodynamic energy conversion performance of breakwater-integrated oscillating water column-wave energy converters. Ocean Engineering. 2022, Vol 253.
- Morris-Thomas M.T., Irvin R.J. & Thiagarajan K.P. An Investigation Into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2007, Vol. 129.
- Yacob D.H., Sarip S., Kaidi H.M., Ardila-Rey J.A. & Muhammad-Sukki F. Oscillating Water Column Geometrical Factors and System Performance: A Review. IEEE Access 2022, Vol 10.
- Yang, H., Jung, H. C. & Koo, W. Oscillating Water Column (OWC) Wave Energy Converter Part 1: Fixed OWC. Journal of Ocean Engineering and Technology 2022, Vol 36(4).
- Wan C., Yang C., Bai X., Bi C., Chen H., Li M., Jin Y. & Zhao L. Numerical investigation on the hydrodynamics of a hybrid OWC wave energy converter combining a floating buoy. Ocean Engineering 2023, Vol 281.
- Wiener G.F., Teixeira P.R.F. & Didier E. Numerical Evaluation of Optimal Sizes of Wells Turbine and Chamber of a Cluster of Oscillating Water Columns Integrated into a Breakwater on the Southern Brazilian Coast. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 2022, Volume 148, Issue 4.