

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.11.5

درصد همانندی: ۶٪

بررسی عددی عملکرد یک مبدل چرخشی انرژی در اثر برخورد موج بر روی سطح شیب‌دار با روش هیدرودینامیک ذرات هموار

غلامرضا شویبری^{۱*}، محمدرضا خارائی^۲، زهره حیدری^۳، هانی محبوبی^۴

^{۱*} نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. g_shobeyri@sbu.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. kh.mreza8@gmail.com

^۳ دکترای مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. z_heydari@sbu.ac.ir

^۴ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. h_mahbuby@sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱

چکیده

در طی سالیان اخیر جذب انرژی از امواج دریا به عنوان منبع تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) برای بررسی رفتار نوسانی یک مبدل چرخشی انرژی موج استفاده می‌شود. این مبدل در انتهای یک سطح شیب‌دار متصل به یک مخزن که تحت تأثیر یک موج تنها می‌باشد قرار داده شده است. سطح شیب‌دار می‌تواند بیانگر ساحل دریا باشد که امواج در نزدیکی آن تغییر شکل داده و جذب انرژی آن‌ها ملاحظات خاص خود را دارد. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای مختلف در میزان جذب انرژی مبدل مانند ارتفاع موج، سختی فنر پیچشی متصل به مبدل در کف، ممان اینرسی مبدل، زاویه شیب سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد با کاهش ممان اینرسی مبدل میزان جذب انرژی کاهش می‌یابد ولی مقدار این پارامتر باید از یک مقدار بحرانی بیشتر باشد تا مبدل توانایی تحمل ضربه موج را داشته باشد. همچنین مشخص شد میزان سختی فنر در یک حد میانه منجر به عملکرد مطلوب مبدل می‌شود. زمان تناوب نیز به عنوان یک عامل مهم در حرکت نوسانی مبدل به میزان قابل توجهی به سختی فنر وابسته می‌باشد. همچنین عملکرد بهینه مبدل انرژی صرف نظر از ارتفاع موج، سختی فنر و ممان اینرسی در یک شیب مشخص اتفاق می‌افتد که به فرآیند تغییر شکل موج بر روی سطح شیب‌دار ارتباط دارد.

واژه‌های کلیدی: روش هیدرودینامیک ذرات هموار، روش‌های بدون شبکه، جذب انرژی امواج، مبدل چرخشی انرژی، سطح شیب‌دار.

۱. مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت کره زمین و همچنین ارتقاء سطح رفاه بشر، منابع انرژی جدید باید شناخته و مورد استفاده قرار بگیرد. امواج دریاها و اقیانوس‌ها به عنوان منبع انرژی سازگار با محیط زیست در طی سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. تحلیل حرکت امواج سطح آب با توجه به ماهیت پیچیده جریان آن و نحوه استحصال بهینه از انرژی آن اهمیت بسیار زیادی دارد و تا کنون تحقیقات زیادی از این نظر انجام نشده است. پیچیدگی معادلات دیفرانسیلی حاکم بر حرکت امواج آب باعث می‌شود در حالت کلی نتوان از روش‌های تحلیلی ریاضی برای بررسی رفتار این جریان‌ها استفاده کرد. با گسترش رایانه‌های پر سرعت و فناوری‌های به‌روز مرتبط با آن، روش‌های عددی به عنوان گزینه قابل توجه در بررسی مسائل مختلف مهندسی از جمله رفتار انواع جریان سیال به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. طی سالیان اخیر روش‌های جدید عددی تحت عنوان روش‌های بدون شبکه پیشنهاد و توسعه یافته‌اند که قابلیت بسیار بالایی را در تحلیل انواع مسائل پیچیده در حوزه‌های مختلف علوم از خود نشان داده‌اند. در این روش‌ها بدون نیاز به فرآیند پر هزینه شبکه‌بندی دامنه محاسباتی می‌توان تقریب تابع و مشتقات آن را تنها با یک سری گره‌های محاسباتی پراکنده انجام داد. این ویژگی باعث خواهد شد تا بتوان فرایند حل معادلات دیفرانسیل را برای هر نوع هندسه نامنظم با سادگی بیشتری انجام داد.

روش بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) یک روش عددی پر کاربرد و توانمند است که اولین بار برای مطالعه مسائل اخترفیزیکی پیشنهاد شده است [۱]. SPH به دلیل قابلیت‌های قابل توجهی که دارد، به‌طور گسترده در تحلیل بسیاری از مسائل پیچیده و کاربردی مهندسی مانند جریان سیالات غیرنیوتونی [۲]، امواج سونامی [۳]، مسائل مهندسی سواحل [۴]، اندرکنش موج و موج شکن سوراخ دار [۵]، نوسانات پرش هیدرولیکی در یک افت ناگهانی [۶]، انتشار روغن در آب [۷]، مسائل مختلف مهندسی خاک [۸]،

اندرکنش سیال و سازه [۹] و انتقال حرارت [۱۰] استفاده شده است.

پژوهشگران زیادی به جذب انرژی امواج در طی سالیان گذشته توجه ویژه‌ای داشته‌اند. برای جذب حداکثر انرژی امواج، طراحی ابزارهای مناسب در مسیر جریان ضروری می‌باشد. برای این منظور، بررسی اندرکنش جریان و سازه به ویژه جاذب‌های انرژی طراحی شده از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. تحقیقات نسبتاً زیادی برای تحلیل جنبه‌های مختلف این موضوع با استفاده از روش SPH انجام شده است که در بخش بعد به طور خلاصه به برخی از آنها پرداخته می‌شود.

یک روش شبیه‌سازی مبتنی بر گردابه‌های بزرگ برای تحلیل مکانیک موج منفرد نزدیک ساحل با استفاده از روش SPH انجام شد [۱۱]. اندرکنش موج و یک دیواره قائم که می‌تواند در تحلیل رفتار یک سازه جاذب انرژی یاری‌رسان باشد با این روش مورد بررسی قرار گرفت [۱۲]. این روش برای تحلیل رفتار نوسانی یک جاذب چرخشی انرژی متصل به کف نیز به کار برده شد [۱۳]. همچنین این روش برای تخمین نیروی ضربه امواج اقیانوس بر سازه‌های ساحلی به کار گرفته شده است [۱۴]. عملکرد یک میراگر انرژی شناور در برابر امواج نیز مورد مطالعه عددی قرار گرفت [۱۵]. تخمین ضربه شدید امواج بر روی یک مبدل چرخشی انرژی انجام شد [۱۶]. ابعاد مختلف حرکت نوسانی یک جاذب چرخشی انرژی مفصل شده به کف با این روش عددی تحلیل و بررسی شد [۱۷]. اثرات هندسه بر عملکرد مبدل انرژی موج از نوع ستون آب نوسانی نیز تحلیل شد [۱۸]. اخیراً جنبه‌های دیگر جذب انرژی امواج توسط روش SPH نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۹-۲۰].

در این تحقیق روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار برای تحلیل رفتار نوسانی یک جاذب انرژی موج مفصلی در انتهای یک شیب با لحاظ کردن پارامترهای تاثیرگذار مانند سختی فنر، ممان اینرسی جاذب انرژی و میزان شیب به کار گرفته می‌شود. نتایج این تحقیق برای طراحی جاذب‌های

با وجود آنکه روش هیدرودینامیک ذرات هموار روش ساده و دارای قابلیت بالا در شبیه‌سازی مسائل پیچیده‌می باشد نتایج تحقیقات گوناگون نشان داده است که همچنان این روش دقت چندان زیادی ندارد. اخیراً مدل‌های گوناگونی برای رفع این کاستی در قالب این روش ارائه شده است [۲۱]. در این تحقیق از یک مدل ارتقاء یافته طبق معادله زیر استفاده می‌شود.

$$\nabla f_a = \left(\frac{1}{\lambda} \sum_b \frac{1}{n_b} W(|r_b - r_a|) (r_b - r_a) \right) \otimes \left(\frac{(r_b - r_a)^T}{|r_b - r_a|} \right)^{-1} \left(\frac{1}{\lambda} \sum_b \frac{1}{n_b} W(|r_b - r_a|) (f_b - f_a) \frac{(r_b - r_a)}{|r_b - r_a|} \right) \quad (6)$$

در این معادله λ و n_b پارامترهای محاسباتی مربوط یک روش عددی بدون شبکه دیگر به نام MPS می‌باشد که جزئیات این مدل را می‌توان در این تحقیق یافت [۲۱]. لازم به ذکر است \otimes در این معادله بیانگر ضرب خارجی می‌باشد.

با به کارگیری روش استاندارد SPH می‌توان به راحتی از معادله (۵) مدل عملگر لاپلاسیان را به دست آورد که تجربیات عددی نشان داده است این مدل از دقت چندان بر خوردار نمی‌باشد. در مقابل مدل لاپلاسیان ارائه شده در معادله بعد که از ترکیب تقریب مشتق اول تابع با روش‌های تفاضل محدود و SPH به دست آمده است از دقت نسبتاً خوبی حتی برای توزیع گرهی پراکنده برخوردار می‌باشد [۲].

$$\nabla^2 f_a = \sum_b \frac{2\Delta V_b r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{|r_{ab}|^2} (f_a - f_b) \quad (7)$$

$$r_{ab} = r_a - r_b \text{ و } f_{ab} = f_a - f_b \text{ که}$$

۳. معادلات حاکم بر جریان

شکل لاگرانژی معادلات پیوستگی و مومنتوم برای جریان سیالات تراکم ناپذیر غیر لزج به ترتیب طبق معادلات زیر است.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (8)$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g \quad (9)$$

انرژی ساحلی در شرایط عملکرد بهینه می‌تواند به شکل موثری استفاده شود.

۲. فرمول‌بندی روش SPH

تقریب یک تابع دلخواه f در روش SPH با استفاده از تئوری درون‌یابی انتگرالی به شکل زیر انجام می‌شود.

$$f(r_a) = \int_{\Omega} f(r) W(|r - r_a|, R_s) \cdot d_r \quad (1)$$

که a ذره مرجع، r بردار مکان ذرات، W تابع درونیابی یا وزن و R_s شعاع تاثیر این تابع است که مشخص کننده گره‌های اطراف یک گره مرجع می‌باشد [۲].

یکی از توابع درون‌یابی شناخته شده این روش طبق معادله زیر است.

$$W(|r - r_a|, R_s) = \frac{8}{\pi R_s^2} \left(\frac{3}{4} \left(\frac{|r - r_a|}{R_s} \right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{|r - r_a|}{R_s} \right) + \frac{3}{4} \right) \quad (2)$$

معادله (۱) که در فرم پیوسته است می‌تواند به صورت گسسته زیر نوشته شود:

$$f(r_a) \cong \sum_b f(r_b) W_{ab} \Delta V_b \quad (3)$$

که b نشان دهنده گره‌های همسایه گره مرجع a است، ΔV_b حجم گره b را نشان می‌دهد و W_{ab} برای سادگی به جای $W(|r - r_a|, R_s)$ استفاده می‌شود (معادله شماره (۲)). علاوه بر این پارامتر $\frac{1}{\Delta V_a}$ (معکوس حجم گره) با استفاده از معادله شماره (۳) به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\frac{1}{\Delta V_a} = \sum_b \frac{1}{\Delta V_b} W_{ab} \Delta V_b = \sum_b W_{ab} \rightarrow \Delta V_a = \frac{1}{\sum_b W_{ab}} \quad (4)$$

با اعمال عملگر گرادیان برای دو طرف معادله (۳) می‌توان تقریب این عملگر را با روش SPH طبق معادله زیر انجام داد.

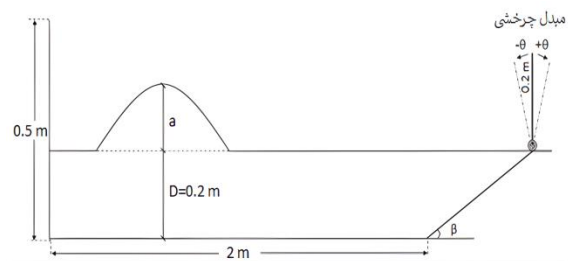
$$\nabla f(r_a) = \sum_b f(r_b) \Delta V_b \nabla_a W_{ab} \quad (5)$$

که $\nabla_a W_{ab}$ گرادیان تابع درون‌یابی است.

$$r^{n+1} = r^n + \frac{(u^{n+1} + u^n)}{2} \Delta t \quad (13)$$

۴. مدل سازی برهمکنش جریان و مبدل

شکل (۱) طرح شماتیک یک جاذب انرژی موج چرخشی که در انتهای یک شیب، به کف مفصل شده است را نشان می‌دهد. یک موج تنها با عمق D و ارتفاع a مد نظر قرار می‌گیرد که شکل سطح آزاد و سرعت اولیه آن را می‌توان از تئوری بوسینسک به دست آورد [۱۱]. موج ایجاد شده بعد از طی مسافتی مشخص بر روی قسمت افقی کانال در نهایت به یک سطح شیب دار با زاویه (β) خواهد رسید و در نهایت موج در اثر این شیب تغییر شکل داده و به جاذب انرژی رسیده و باعث حرکت نوسانی آن شده و بخشی از انرژی موج جذب می‌شود.



شکل ۱. شرایط اولیه مساله.

برای طراحی بهینه عملکرد این جاذب یا مبدل انرژی چندین پارامتر موثر را باید با هم دیگر در نظر گرفت که در ادامه با شبیه سازی عددی این مساله می‌توان به نکات مهمی در این خصوص دست یافت. عواملی مانند گشتاورهای ناشی از فشار جریان سیال، جرم مبدل و گشتاور فنر چرخشی متصل به مبدل در کف تعیین کننده حرکت نوسانی مبدل می‌باشند.

نیروی فشار ناشی از جریان در مجاورت مبدل انرژی با مشخص شدن میدان فشار و در نظر گرفتن معادله مومنتوم (معادله (۹)) قابل محاسبه می‌باشد. البته جرم ذرات نیز در این محاسبات اهمیت دارد که با توجه به چگالی ثابت آب و فاصله اولیه ذرات در شرایط آغازین با استفاده از معادله اصلی تقریب تابع روش SPH (معادله (۳)) به دست می‌آید [۲ و ۳].

که در این معادلات u بردار سرعت، ρ چگالی، P فشار، g شتاب گرانش و D/Dt عملگر مشتق مادی است.

به طور معمول دو نوع شرایط مرزی برای شبیه سازی جریان در دیدگاه لاگرانژی وجود دارد. شرط اول که از نوع دیریشله می‌باشد مربوط به اعمال فشار اتمسفر برای ذرات سطح آزاد می‌باشد. شرط دوم که از نوع مشتقی و نیومنی باشد مربوط به شرایط جریان بر روی مرزهای جامد است. جزییات اعمال این دو نوع شرط مرزی برای روش عددی حاضر را می‌توان در مراجع [۲۲] و [۲۳] یافت.

۳-۱. گسسته سازی زمانی

یکی از مرسوم ترین روش های گسسته سازی زمانی معادلات جریان، روش پیش بینی و اصلاح می‌باشد. در مرحله پیش بینی، جمله گرادیان فشار در معادله مومنتوم (معادله (۹)) در نظر گرفته نمی‌شود و یک میدان سرعت میانی را می‌توان به شکل زیر به دست آورد.

$$u^* = u^n + g \Delta t \quad (10)$$

در این معادله Δt اندازه گام زمانی محاسباتی، u^* و u^n به ترتیب میدان های سرعت در گام های زمانی جاری و میانی را نشان می‌دهند.

سرعت در گام زمانی بعدی (u^{n+1}) را می‌توان با اعمال عبارت گرادیان فشار در نظر گرفته نشده ($-\frac{1}{\rho} \nabla P^{n+1}$) به شکل معادله زیر به دست آورد.

$$u^{n+1} = u^* - \frac{1}{\rho} \nabla P^{n+1} \Delta t \quad (11)$$

میدان فشار را با ترکیب معادله (۸) با دیورژانس معادله (۱۱) برای اعمال قید تراکم ناپذیری می‌توان به شکل زیر محاسبه کرد.

$$\nabla^2 P^{n+1} = \frac{\rho \nabla \cdot u^*}{\Delta t} \quad (12)$$

در نهایت با مشخص شدن سرعت در گام زمانی بعد با ترکیب معادلات (۱۱) و (۱۲) می‌توان موقعیت صحیح ذرات (r^{n+1}) را با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد.

با توجه به مفاهیم پایه‌ای فیزیک می‌توان میزان توان لحظه‌ای مبدل را طبق معادله زیر به دست آورد.

$$|P| = \omega M_T \quad (21)$$

میانگین توان جذب شده توسط مبدل در واحد عرض در یک دوره تناوب کامل حرکت رفت و برگشتی طبق معادله زیر به دست می‌آید.

$$|P_T| = \frac{1}{T} \int_0^T M_T(t) \omega(t) dt \quad (22)$$

در این معادله، T دوره تناوب مبدل است [۱۶]. لازم به ذکر است که توان جذب شده مرتبط با میزان انرژی جذب شده می‌باشد.

۵. نتایج و بحث

تحقیق حاضر به بررسی تأثیر ضربه یک موج تنها بر روی مبدل چرخشی انرژی که در انتهای یک سطح شیب‌دار می‌باشد می‌پردازد. لازم به ذکر است اثرات لزجت آب و اصطکاک فنر نادیده گرفته شده است. به طور کلی، پارامترهای فیزیکی مختلفی بر جذب انرژی تأثیر می‌گذارند که در این تحقیق، پارامترهای سختی فنر پیچشی (K)، ممان اینرسی مبدل انرژی (I)، ارتفاع موج (a) و شیب سطح مورب (β) بررسی شده‌اند. ارتفاع مبدل، طول مخزن، طول دیواره چپ و عمق آب به ترتیب 0.2 ، 0.5 ، 2 ، 0.2 متر است. همچنین برای روش SPH، گام زمانی (Δt) برابر با 0.004 ثانیه، فاصله اولیه بین ذرات (I_0) حدوداً برابر با 0.167 متر و شعاع تأثیر (R_S) برابر با $2/4 I_0$ در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است مقادیر محاسباتی بر مبنای تجربیات قبلی این روش انتخاب شده است.

در شکل (۲) نتایج پیکربندی ذرات سیال هنگام حرکت موج به سمت مبدل انرژی در زمان‌های مختلف به نمایش در آمده است. برای این مساله $\beta=18^\circ$ ، $a/D=0.8$ ، $K=350 \text{ N.m}$ و $I=500 \text{ Kg.m}^2$ فرض شده است. میدان فشار محاسباتی نیز در این شکل ارائه شده است که بیانگر توزیع فشار هیدرواستاتیکی دور از مبدل می‌باشد که منطبق بر واقعیت است. در واقع دور از مبدل انرژی در برخی نقاط جریان

گشتاور چرخشی ناشی از نیروی فشار، نسبت به کف مبدل انرژی، به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$M_p = \sum_j F_{wj} \times r_j \quad (14)$$

در این معادله M_p گشتاور ناشی از نیروی فشاری، F_j نیروی فشار هر ذره مبدل انرژی (j) و r_j فاصله بین هر ذره تا کف مبدل می‌باشد.

معادله زیر بیانگر گشتاور ناشی از جرم مبدل می‌باشد.

$$M_b = \sum_j m_j g \times r_j \quad (15)$$

که در این رابطه m_j جرم هر ذره مبدل می‌باشد.

گشتاور بازگرداننده چرخشی توسط فنر متصل به کف مبدل به صورت زیر اعمال می‌شود.

$$M_{sp} = -k\theta \quad (16)$$

که M_{sp} گشتاور فنر، k سختی فنر و θ زاویه چرخش فلاپر است (شکل (۱)).

در نهایت، مقدار گشتاور کل طبق معادله بعد می‌باشد.

$$M_T = M_p + M_b + M_{sp} \quad (17)$$

با مشخص شدن گشتاور اعمال شده به مبدل می‌توان شتاب زاویه‌ای ($d\omega/dt$) آن را به شکل زیر به دست آورد.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_T}{I_f} \quad (18)$$

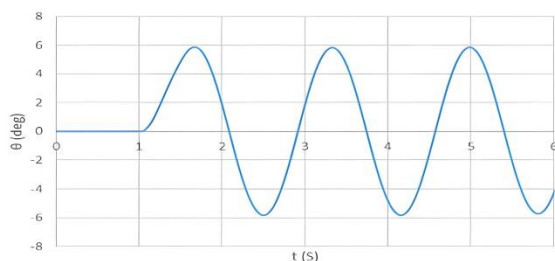
که I_f ممان اینرسی مبدل و طبق معادله زیر است.

$$I_f = \sum_j m_j r_j^2 \quad (19)$$

زاویه چرخش مبدل در گام زمانی بعدی (θ^{n+1}) را می‌توان با استفاده از سرعت زاویه‌ای، به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\theta^{n+1} = \theta^n + \omega^n \Delta t \quad (20)$$

با توجه به عدم تغییر شکل مبدل، مکان ذرات آن را می‌توان به راحتی در گام زمانی $n+1$ ام با استفاده از معادله بالا پیدا کرد.

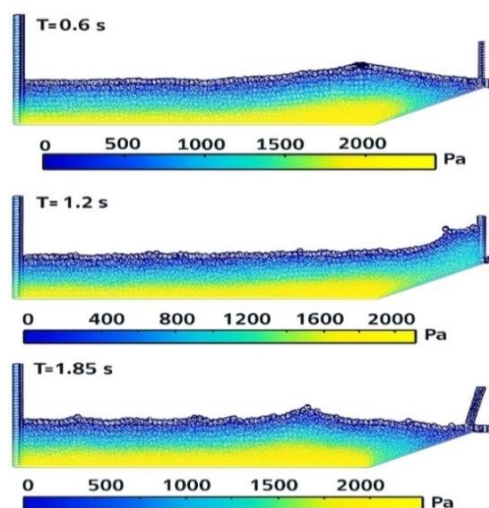


شکل ۳. نتایج عددی زاویه چرخش مبدل انرژی برای $K=350 \text{ N.m}$ ،
 $I=500 \text{ Kg.m}^2$ و $\beta=18^\circ$ ، $a/D=0.8$

با توجه به تعدد پارامترهای موثر در این مساله حالت‌های مختلف و تاثیر آن بر نحوه رفتار نوسانی مبدل و میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا شیب سطح ۱۸ درجه و ممان اینرسی مبدل ۵۰۰ کیلوگرم در متر مربع در نظر گرفته می‌شود. مبدل انرژی در یک دوره تناوب چرخش خود سرعت زاویه متغیری را تجربه می‌کند. مقدار حداکثر این پارامتر به ازای مقادیر متفاوت ارتفاع موج و سختی فنر در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش ارتفاع موج، سرعت مبدل افزایش می‌یابد ولی با افزایش سختی پیچشی فنر سرعت مبدل کاهش می‌یابد. در شکل (۵) نیز حداکثر گشتاور وارد بر مبدل در یک دوره تناوب نیز ارائه شده است که هم با افزایش ارتفاع موج و هم سختی فنر، این پارامتر روند افزایشی دارد. لازم به ذکر است که افزایش سختی فنر تا محدوده مشخصی تاثیر زیادی در حداکثر گشتاور مبدل دارد و با افزایش سختی، گشتاور تغییر زیادی نمی‌کند که توجه به این موضوع در جذب حداکثری انرژی توسط مبدل اهمیت زیادی دارد. در شکل (۶) نیز تنها برای یک ارتفاع موج ($a/D=0.7$) زمان دوره تناوب مبدل به ازای مقادیر مختلف سختی فنر ترسیم شده است. با افزایش سختی فنر دوره تناوب مبدل کاهش چشمگیری می‌یابد و در انتها منحنی تقریباً حالت افقی به خود گرفته که بیانگر کاهش تاثیر سختی فنر در اندازه دوره تناوب است. اندازه دوره تناوب نیز تاثیر قابل توجهی در میزان جذب انرژی مبدل دارد.

تقریباً ساکن بوده و در برخی نقاط دیگر خطوط جریان موازی بوده که منجر به توزیع هیدرواستاتیکی فشار می‌شود و به درستی توسط روش حاضر شبیه‌سازی شده است و این امر بیانگر قابلیت روش عددی بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار می‌باشد.

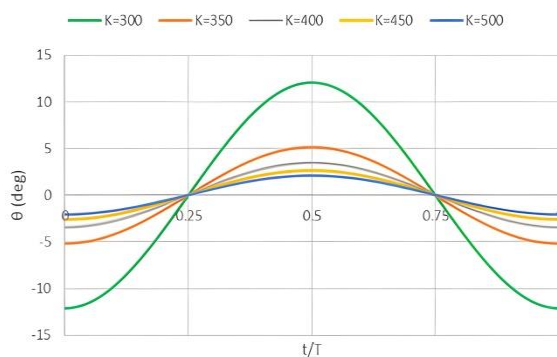
همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، موج از سمت چپ کانال حرکت می‌کند و در نهایت به مبدل انرژی در انتهای سطح شیب‌دار برخورد می‌کند. در نتیجه این برخورد، مبدل شروع به نوسان در جهت عقربه‌های ساعت (+θ) و خلاف جهت عقربه‌های ساعت (-θ) می‌کند.



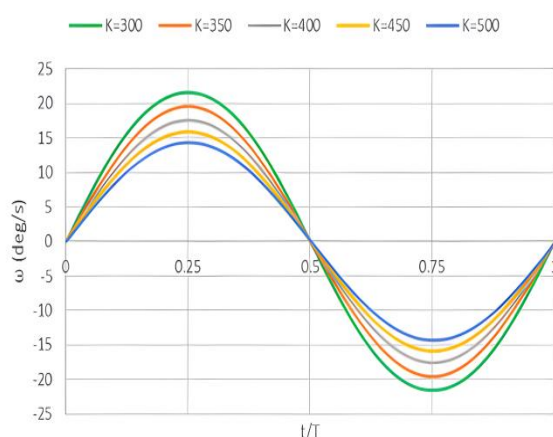
شکل ۴. میدان فشار محاسبه شده برای مساله برخورد موج به مبدل انرژی.

در شکل (۳) تغییر زاویه مبدل نسبت به حالت قائم در طول زمان نشان داده شده است. بعد از گذشت حدود ۱ ثانیه موج به مبدل رسیده و چرخش آن شروع می‌شود. میزان چرخش در محدوده $+6^\circ$ و -6° درجه می‌باشد و به علت عدم در نظر گرفتن اصطکاک جریان و همچنین اصطکاک فنر این محدوده چرخش بدون تغییر باقی می‌ماند و یک حرکت متناوب ایجاد می‌شود که به خوبی توسط روش عددی تحقیق حاضر مدل‌سازی شده است. در صورتی که اصطکاک فنر و لزجت جریان در نظر گرفته شود بخشی از انرژی جریان مستهلک شده و حرکت نوسانی فنر در نهایت میرا خواهد شد. در نهایت لازم به ذکر است که با تغییر پارامترهای موثر، رفتار نوسانی مبدل نیز تغییر می‌کند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

می‌رسد و در نیمه دوره تناوب به حداکثر زاویه در سمت راست می‌رسد و پس از آن با یک حرکت برگشتی در انتهای دوره تناوب به حالت اولیه خود بر می‌گردد. همچنین مقدار سرعت زاویه‌ای متناظر نیز در شکل (۸) به نمایش در آمده است که برای سختی بیشتر فنر، سرعت زاویه‌ای کمتری مشاهده می‌شود که قابل انتظار می‌باشد. سرعت زاویه‌ای در ابتدا، میانه و انتهای دوره تناوب دارای مقدار صفر می‌باشد که در این زمان‌ها زاویه مبدل در حداکثر مقدار خود می‌باشد. در یک چهارم ابتدایی و انتهایی دوره تناوب سرعت زاویه‌ای به حداکثر مقدار خود می‌رسد که در این زمان‌ها نیز مبدل در حالت عمودی است. در واقع نتایج عددی زاویه و سرعت زاویه‌ای مبدل در این دو شکل با یکدیگر منطبق می‌باشد.

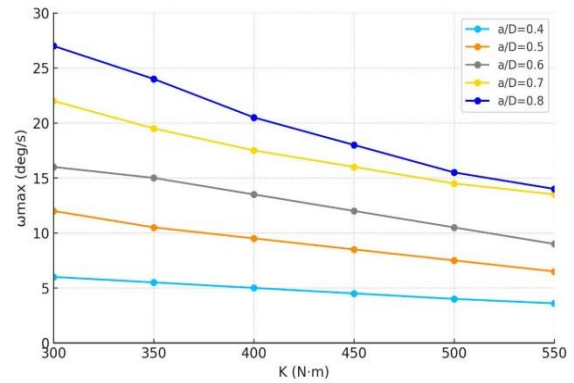


شکل ۶. زاویه چرخش مبدل انرژی برای $I=500$ ، $a/D=0.7$ ، $\beta=18^\circ$ و مقادیر مختلف سختی فنر.

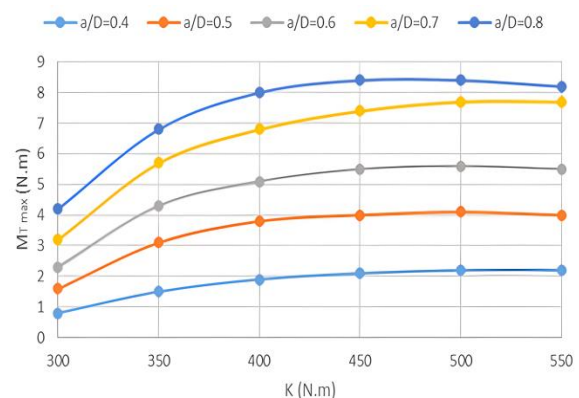


شکل ۷. سرعت زاویه‌ای مبدل انرژی برای $I=500$ ، $a/D=0.7$ ، $\beta=18^\circ$ و مقادیر مختلف سختی فنر.

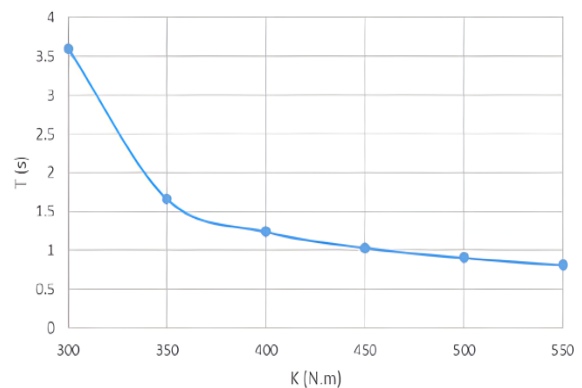
در شکل (۹) نیز مقدار گشتاور چرخشی وارد بر مبدل در یک دوره تناوب به تصویر در آمده است که بر خلاف زاویه



شکل ۸. حداکثر سرعت زاویه‌ای مبدل انرژی در یک دوره تناوب فنر برای $I=500$ Kg.m^2 ، $\beta=18^\circ$ و مقادیر مختلف ارتفاع موج و سختی.



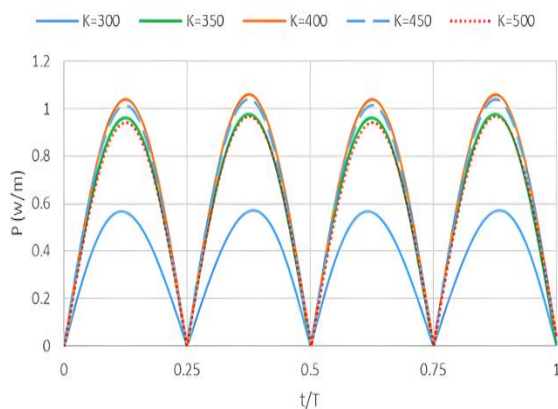
شکل ۹. حداکثر گشتاور وارد بر مبدل انرژی در یک دوره تناوب برای $I=500$ Kg.m^2 ، $\beta=18^\circ$ و مقادیر مختلف ارتفاع موج و سختی.



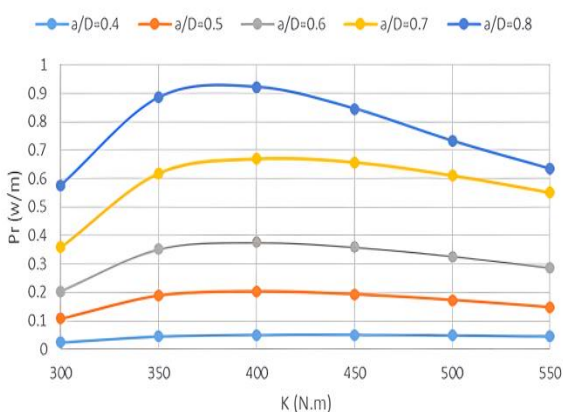
شکل ۱۰. زمان تناوب مبدل انرژی برای $I=500$ Kg.m^2 و $\beta=18^\circ$ ، $a/D=0.7$.

در شکل (۷) میزان زاویه چرخش مبدل به ازای شرایط مشخص فیزیکی محاسباتی ($I=500$ و $a/D=0.7$ ، $\beta=18^\circ$) و مقادیر مختلف سختی پیچشی فنر ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد هر چه سختی فنر بیشتر شود میزان چرخش آن کمتر می‌باشد. در ابتدای دوره تناوب، مبدل انرژی در بیشترین زاویه و در سمت چپ قرار دارد و بعد از گذشت یک چهارم از دوره تناوب مبدل به حالت عمودی

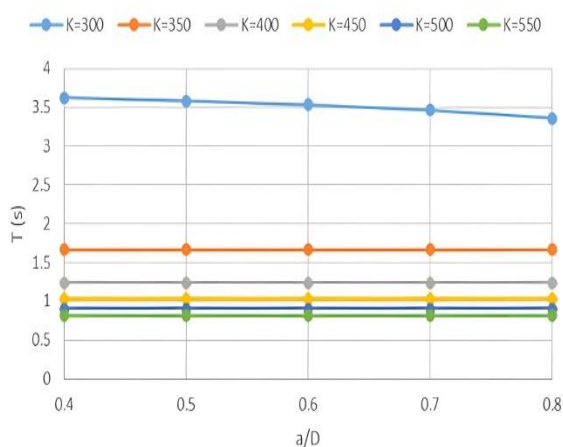
تناوب مبدل به ازای مقادیر مختلف ارتفاع موج و سختی فنر به نمایش در آمده است و مشخص است که اندازه دوره تناوب تنها به سختی فنر ارتباط دارد و ارتفاع موج تاثیر ناچیزی دارد که توجه این موضوع در طراحی بهینه مبدل انرژی بسیار مهم می باشد.



شکل ۱۰. توان لحظه ای مبدل انرژی برای $\beta=18^\circ$, $a/D=0.7$, $I=500$ و مقادیر مختلف سختی فنر.

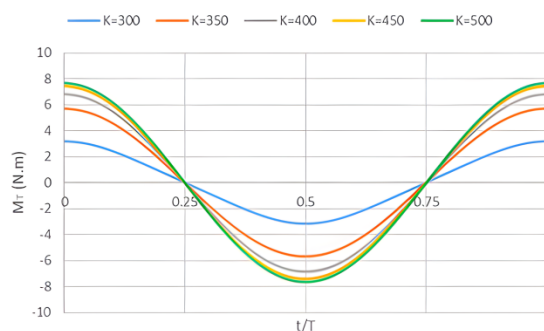


شکل ۱۱. میانگین توان مبدل انرژی برای $\beta=18^\circ$, $I=500$ Kg.m^2 و مقادیر مختلف سختی فنر.



شکل ۱۲. دوره تناوب مبدل انرژی برای $\beta=18^\circ$, $a/D=0.7$, $I=500$ Kg.m^2 و مقادیر مختلف سختی فنر.

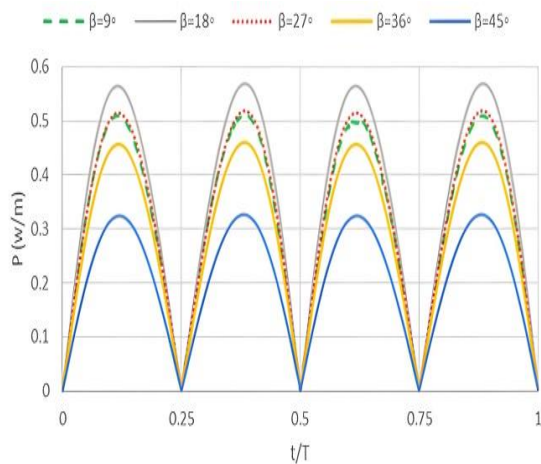
چرخش و سرعت زاویه ای، با افزایش سختی فنر مقدار گشتاور افزایش می یابد. مقدار گشتاور هنگامی که مبدل در حداکثر زاویه خود است به بیشترین مقدار خود می رسد در حالیکه مقدار گشتاور زمانی که مبدل عمودی می باشد به صفر می رسد. به عبارت دیگر می توان گفت نتایج زاویه، سرعت زاویه ای و گشتاور مبدل با یکدیگر منطبق بوده و بیانگر دقت روش عددی حاضر می باشد.



شکل ۹. گشتاور وارد بر مبدل انرژی برای $\beta=18^\circ$, $a/D=0.7$, $I=500$ و مقادیر مختلف سختی فنر.

با توجه به معادله (۲۱) توان لحظه ای مبدل که حاصل ضرب سرعت زاویه ای در گشتاور می باشد در یک دوره تناوب در شکل (۱۰) به نمایش در آمده است. همان طور که ملاحظه می شود توان مبدل برای سختی کم فنر حداقل مقدار را دارد و با افزایش سختی میزان توان جذب شده افزایش می یابد و در حالت $K=400$ N.m به حداکثر خود می رسد و پس از آن با افزایش سختی توان مبدل کاهش می یابد. دلیل این امر روند معکوس سرعت زاویه ای و گشتاور وارد بر مبدل در برابر تغییر سختی فنر می باشد. در شکل (۱۱) نیز متوسط توان جذب شده (معادله (۲۲)) در یک دوره تناوب چرخش مبدل (با توجه به نتایج شکل (۱۰)) برای مقادیر متفاوت ارتفاع موج به دست آمده است. همان طور که مشخص است مقدار سختی فنر برای جذب حداکثری توان برای تمامی ارتفاع های موج بررسی شده، یکسان می باشد. به عبارت دیگر با مشخص کردن سختی فنر بهینه می توان بدون توجه به ارتفاع امواج که به مبدل می رسد در وضعیت بهینه قرار گرفت. لازم به ذکر است میزان توان جذب شده توسط مبدل رابطه مستقیمی با میزان انرژی مبدل دارد و با روابط ساده و هندسه آن می توان این میزان را به دست آورد. در شکل (۱۲) نیز میزان دوره

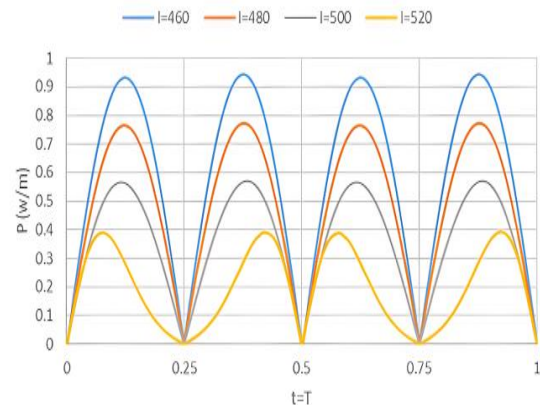
عامل بسیار مهم دیگر که میزان انرژی جذب شده مبدل را کاملاً تحت تاثیر قرار می‌دهد، میزان شیب سطح می‌باشد که می‌تواند نشان دهنده شیب ساحل باشد. در شکل (۱۵) می‌توان میزان توان لحظه‌ای مبدل برای $K=300 \text{ N.m}$ را مشاهده کرد. در سطح با شیب ۱۸ درجه، مبدل بیشترین میزان توان یا انرژی موج را جذب می‌کند که این موضوع را می‌توان با فرآیند تغییر شکل موج بر روی سطح شیب‌دار توضیح داد. در شیب‌های کم، ارتفاع موج افزایش زیادی داشته و شکست موج اتفاق می‌افتد که بخش قابل توجهی از انرژی به کف منتقل می‌شود. در صورتی که شیب زیاد باشد نیز نیروی ثقل مانع از بالاروی قابل توجه موج بر روی سطح شده و انرژی زیادی به مبدل نمی‌رسد. بنابراین در یک شیب با اندازه متوسط به حداکثر جذب انرژی می‌توان رسید. با توجه به این نکته باید در طول خط ساحلی مکان‌هایی با شیب مناسب را برای نصب مبدل‌ها پیدا کرد.



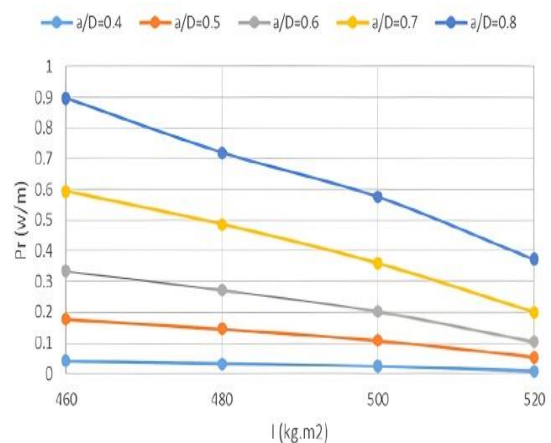
شکل ۱۵. توان لحظه‌ای مبدل انرژی برای یک دوره تناوب و $K=300$ و $I=500 \text{ Kg.m}^2$ ، $a/D=0.7$ و مقادیر متفاوت شیب سطح.

شکل (۱۶) نیز برای همین شرایط بیانگر میانگین توان جذب شده مبدل در یک دوره تناوب حرکت و به ازای مقادیر مختلف ارتفاع موج می‌باشد. همانطور که از نتایج مشخص است در یک شیب مشخص (۱۸ درجه) صرف نظر از اندازه موج، بهترین عملکرد جذب انرژی اتفاق می‌افتد. همین موضوع در مورد سختی فنر نیز مشاهده شد. همچنین لازم به ذکر است نتایج نشان داد که شیب سطح تاثیر در زمان تناوب مبدل انرژی نداشته و این پارامتر به سختی فنر وابسته است و با افزایش سختی زمان تناوب کاهش می‌یابد.

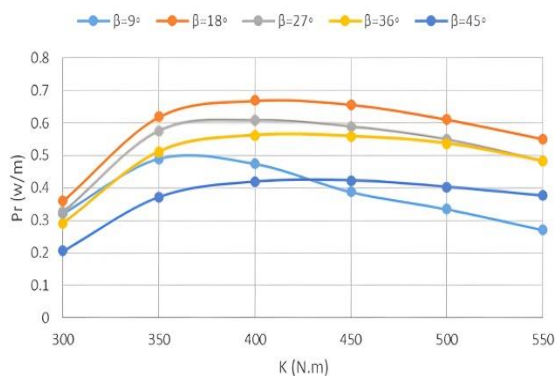
در این بخش تاثیر عوامل دیگر در رفتار نوسانی مبدل انرژی مدنظر قرار می‌گیرد. در شکل (۱۳) توان لحظه‌ای مبدل برای $a/D=0.7$ ، $K=300 \text{ N.m}$ و $\beta=18^\circ$ به ازای مقادیر مختلف ممان اینرسی مبدل ترسیم شده است و همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش مقدار این پارامتر توان جذب شده افزایش می‌یابد زیرا جرم مبدل در این شرایط کاهش داشته و چرخش بیشتر منجر به جذب انرژی بیشتر می‌شود. البته لازم به ذکر است اگر ممان اینرسی مبدل از یک میزانی کمتر گردد، دیگر تحمل ضربه موج را نداشته و جریان از روی آن عبور کرده و عملاً دیگر در این زمینه کارکردی نخواهد داشت. تحت این شرایط می‌توان مقدار مختلف برای این پارامتر در نظر گرفت تا به حالت بهینه رسید. مقدار حداکثر توان لحظه‌ای مبدل برای $\beta=18^\circ$ ، $K=300 \text{ N.m}$ و مقادیر مختلف ارتفاع موج در شکل (۱۴) به تصویر در آمده است که بیانگر وضعیت بهتر عملکرد مبدل به ازای ممان اینرسی کمتر می‌باشد ولی همانطور که پیشتر ارائه شد مقدار ممان اینرسی نباید از یک حدی کمتر باشد.



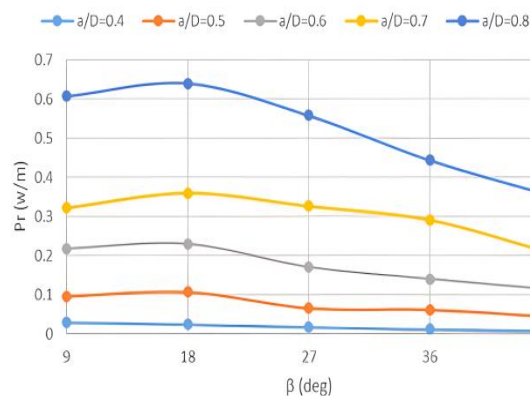
شکل ۱۳. توان لحظه‌ای مبدل انرژی در یک دوره تناوب برای $K=300$ و $a/D=0.7$ ، $\beta=18^\circ$ و مقادیر مختلف ممان اینرسی مبدل.



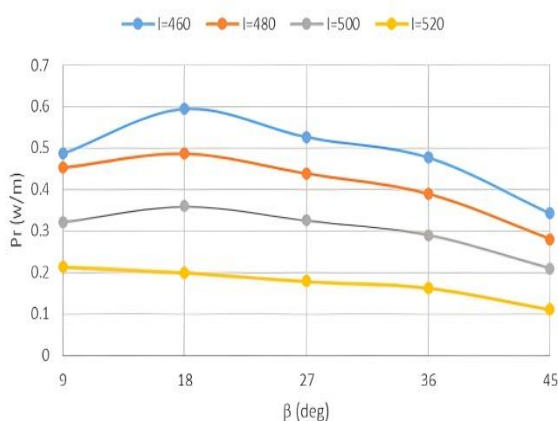
شکل ۱۴. حداکثر توان لحظه‌ای جذب شده توسط مبدل انرژی در یک دوره تناوب برای $\beta=18^\circ$ ، $K=300 \text{ N.m}$ و مقادیر متفاوت ارتفاع موج و سختی فنر.



شکل ۱۸. میانگین توان جذب شده توسط مبدل انرژی در یک دوره تناوب برای $a/D=0.7$ ، $I=500 \text{ Kg.m}^2$ و مقادیر متفاوت شیب سطح و سختی فنر.



شکل ۱۶. میانگین توان جذب شده توسط مبدل انرژی برای یک دوره تناوب و $a/D=0.7$ ، $K=300 \text{ N.m}$ ، $I=500 \text{ Kg.m}^2$ و مقادیر متفاوت شیب سطح.



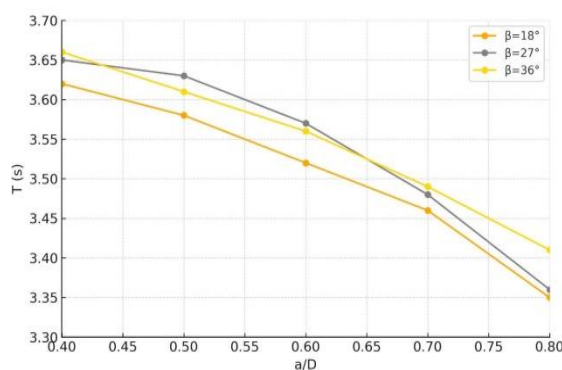
شکل ۱۹. میانگین توان جذب شده توسط مبدل انرژی برای $a/D=0.7$ ، $K=300 \text{ N.m}$ و مقادیر متفاوت شیب سطح و ممان اینرسی مبدل انرژی.

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق عملکرد نوسانی یک مبدل چرخشی انرژی بر روی یک سطح شیب دار در برابر ضربه یک موج تنها با استفاده از روش عددی بدون شبکه هیدرودینامیک ذرات هموار مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای فیزیکی مانند میزان شیب سطح، سختی فنر متصل به مبدل در کف کانال، ممان اینرسی مبدل و ارتفاع موج مد نظر قرار گرفت که به طور خلاصه نتایج زیر به دست آمد:

- دوره تناوب مبدل که تعیین کننده رفتار نوسانی آن و میزان جذب انرژی است، تنها به سختی فنر مرتبط می باشد.
- در یک سختی فنر مشخص برای هر ارتفاع موجی، حداکثر جذب انرژی توسط مبدل اتفاق می افتد.

شکل (۱۷) نیز زمان تناوب مبدل را برای ارتفاع های مختلف موج ارائه می دهد که نشان می دهد در شیب بهینه (۱۸ درجه) برای هر موجی حداقل اندازه دوره تناوب اتفاق می افتد. اندازه کمتر دوره تناوب باعث جذب انرژی بیشتر می شود. در واقع زمان کمتر دوره تناوب به معنای سرعت بیشتر مبدل در اثر جذب انرژی بیشتر می باشد. میانگین توان جذب شده در یک دوره تناوب حرکت مبدل در شکل (۱۸) به نمایش در آمده است. ملاحظه می شود برای تمامی شیب ها حداکثر توان جذب شده در یک محدوده مشخص از سختی فنر (۳۵۰ تا ۴۰۰ نیوتن در متر) اتفاق می افتد و همچنان بهترین عملکرد در شیب بهینه (۱۸ درجه) اتفاق می افتد. این موضوع در طراحی بهینه ویژگی های فنر چرخشی اهمیت دارد. در شکل (۱۹) نیز میانگین توان جذب شده برای مقادیر مختلف ممان اینرسی مبدل و شیب سطح نشان داده است که عملکرد مطلوب با تقریب مناسب در شیب ۱۸ درجه حادث می شود.



شکل ۱۷. زمان تناوب مبدل انرژی برای $I=500 \text{ Kg.m}^2$ ، $K=300 \text{ N.m}$ و مقادیر متفاوت شیب سطح و ارتفاع موج.

- [5]. Meringolo DD, Aristodemo F, Veltri P. SPH numerical modeling of wave-perforated breakwater interaction. *Coastal Engineering*. 2015; 101: 48-68.
- [6]. Padova DD, Mossa M, Sibilla S. SPH Modelling of Hydraulic Jump Oscillations at an Abrupt Drop. *Water*. 2017; 9: 790.
- [7]. Li D, Zhen Z, Zhang H, Li Y, Tang X. Numerical model of oil film diffusion in water based on SPH method. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019; (1): 8250539.
- [8]. Islam MR, Rahman MA, Hayano K. Application of smoothed particle hydrodynamics (SPH) for simulating various geotechnical problems. *SN Applied Sciences*. 2020; 2(4): 687.
- [9]. Guo C, Zhang H, Qian Z, Liu M. Smoothed-interface SPH model for multiphase fluid-structure interaction. *Journal of Computational Physics*. 2024; 518, 113336.
- [10]. He F, Chen Y, Zhang Y, Jiang H, Huang C. A multi-physics SPH method for simulating heat transfer, mass transfer and phase transition of hydrate. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025; 165, 109012.
- [11]. Edmond YM, Songdong S. Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method. *Applied Ocean Research*. 2002; 24(5): 275-86.
- [12]. Didier E, Neves DRCB, Martins R, Neves MG. Wave interaction with a vertical wall: SPH numerical and experimental modeling. *Ocean engineering*. 2014; (88): 330-41.
- [13]. Chen D, Tzang Sh, Hsieh Ch, Chow Y, Chen J, Lin C, et al. Numerical modeling of wave-induced rotations of a bottom-hinged flapper with aSPH model. *Journal of Marine Science and Technology*. 2014; 3(22): 372-80.
- [14]. Altomare C, Crespo AJC, Dominguez JM, Gomez-Gesteira M, Suzuki T, Verwaest T. Applicability of smoothed particle hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. *Coastal Engineering*. 2015; (96): 1-12.
- [15]. Chen D, Nagata S, Tzang S, Imai Y, Hsieh C, Chen J. A time-domain numerical tool for a wave energy attenuator with the SPH method. *Journal of Marine Science and Technology*. 2017; 6(25): 752-60.
- [16]. Marrone S, Colagrossi A, Baudry V, Touzé DL. Extreme wave impacts on a wave energy converter: load prediction through a SPH model. *Coast Engineering journal*. 2019; 61(1):63-77.
- [17]. Heydari Z, Shobeyri G, Ghoreishi Najafabadi H. Numerical investigation of solitary Wave interaction with a flapper wave energy

۳. ممان اینرسی مبدل در محدوده بررسی شده هر چه کمتر باشد جذب انرژی بیشتری صورت می‌گیرد ولی برای عدم اختلال در عملکرد مبدل مقدار ممان اینرسی نباید از یک حدی کمتر باشد.

۴. میزان جذب انرژی تحت هر شرایط متغیر دیگری تنها در یک شیب ثابت (۱۸ درجه) اتفاق می‌افتد که به علت فرآیند تغییر شکل موج بر روی سطح شیب‌دار می‌باشد.

۵. حداقل میزان دوره تناوب چرخش مبدل که منجر به جذب انرژی بیشتر می‌شود در شیب بهینه (۱۸) درجه اتفاق می‌افتد.

با توجه به نتایج اشاره شده و انجام تحقیقات بیشتر و در نظر گرفتن عوامل موثر دیگر در شرایط واقعی، می‌توان مبدل‌های انرژی با عملکرد مطلوب جهت جذب حداکثری انرژی موج به عنوان یک منبع پاک و تجدیدپذیر را طراحی و استفاده کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از داوران و ویراستاران محترم نشریه هیدروفیزیک که در بهبود کیفیت مقاله یاری رسان بوده‌اند کمال تشکر را دارند.

مراجع

- [1]. Gingold RA, Monaghan JJ. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non spherical stars. *Mon. Not. R. Astron. Soc*. 1977;181: 375-85.
- [2]. Shao SD, Lo EYM. Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface. *Advances in Water Resources*. 2003; 26 (7): 787-800.
- [3]. Ataie-Ashtiani B, Shobeyri G. Numerical simulation of landslide impulsive waves by incompressible smoothed particle hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2008; 56 (2): 209-32.
- [4]. Barreiro A, Crespo AJC, Domínguez JM, Gómez-Gesteira M. Smoothed Particle Hydrodynamics for coastal engineering problems. *Computers & Structures*. 2013; 120: 96-106.

- converter using incompressible SPH method. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering. 2021; (43): 1-18.
- [18]. Ramezanzadeh S, Ozbulut M, Yildiz M. A numerical investigation of the energy efficiency enhancement of oscillating water column wave energy converter systems. Energies. 2022; 15(21), 8276.
- [19]. Chen X, Cui J, Li MY. Numerical simulation and energy extraction power fitting of OWSCs under regular waves using SPH method. Ocean Engineering. 2023; 283, 115077.
- [20]. Capasso S, Tagliaferro B, Martínez-Estévez I, Altomare C, Gómez-Gesteira M, Götteman M, et al. Development of an SPH-based numerical wave-current tank and application to wave energy converters. Applied Energy. 2025; 377, 124508.
- [21]. Shobeyri G. Using a modified MPS gradient model to improve accuracy of SPH method for Poisson equations. Computational Particle Mechanics. 2023; 10(5): 1113-1126.
- [22]. Shobeyri G, Rasti Ardakani R. Modified incompressible SPH method for simulating free surface problems using highly irregular multi resolution particle configurations. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019; (41): 421.
- [23]. Koshizuka S, Nobe A, Oka Y. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method. International journal for numerical methods in fluids. 1998 Apr 15;26(7):751-69.

پی‌نوشت‌ها

1. Smoothed Particle Hydrodynamics
2. Meshless methods
3. Wave energy absorption
4. Flapper