



بررسی دینامیکی صفحه جاذب انرژی امواج قرار گرفته در بستر کانال

آرمان عصائیان¹، رمضانعلی جعفری تلوکلایی^{2*}، مریم عابدی³، مصطفی عطار⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مازندران، بابلسر

4- دکتر، مهندسی مکانیک، دانشگاه وسترن استرالیا، پرت، استرالیا

* صندوق پستی 47148-71167، ra.jafari@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 شهریور 1396

پذیرش: 02 دی 1396

ارائه در سایت: 22 دی 1396

کلید واژگان:

انرژی تجدیدپذیر

امواج سطحی آب

صفحات مستطیلی

کانال آبی

اندرکنش سیال و سازه

چکیده

امروزه تأمین انرژی مورد نیاز بشر به معضلی حیاتی برای بشر تبدیل شده است. با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و پیشرفت صنعت در سراسر جهان بشر به زودی با خطر آلودگی محیط زیست و اتمام منابع انرژی تجدیدپذیر مواجه خواهد شد. راه حل مشکلات مربوطه این است که سهم منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر در مصرف انرژی بشر را افزایش داده تا به این وسیله سهم منابع انرژی فسیلی در مصرف انرژی بشر کاهش یابد. یکی از پاک ترین انواع انرژی های تجدیدپذیر، انرژی نامحدود و گسترده در جریان سیال در محیط هایی از قبیل اقیانوس ها، دریاها، رودخانه ها و کانال ها است. در کار حاضر مطالعاتی بر جذب انرژی حاصل از جریان سیال به صورت موج به وسیله یک صفحه انعطاف پذیر در یک کانال انجام شده است. یک صفحه طویل با عرض و ضخامت محدود قرار گرفته در کف یک کانال جهت جذب انرژی امواج گرانشی سیال مورد بررسی قرار گرفته است. صفحه یادشده بر بستر ویسکوالاستیک قرار دارد که رفتاری خطی از خود نشان می دهند. معادلات وابسته سیال و صفحه مورد تحلیل قرار گرفته و مشخصات ارتعاشی سطح سیال و صفحه محاسبه شده است. همچنین در انتها تجزیه و تحلیل مناسبی برای جذب انرژی امواج توسط صفحه انجام شده است.

Dynamic investigation of wave energy absorber plate located on the bottom of a channel

Arman Asaiean¹, Ramazan-Ali Jafari-Talookolaei^{1*}, Maryam Abedi², Mostafa Attar³

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran

3- Department of Civil, Environmental and Mining Engineering, University of Western Australia, Perth, Australia

*P.O.B. 47148-71167, Babol, Iran, ra.jafari@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 11 September 2017

Accepted 23 December 2017

Available Online 12 January 2018

Keywords:

Renewable Energy

Surface Gravity Wave

Rectangular Plates

Water Channel

Fluid Structure Interaction

ABSTRACT

How to provide sustainable and clean sources of energy is probably the most vital question of our world today. The population growth and technology development are leading to an increase in the world energy demand and fast depletion of fuel resources. Our environment is facing critical challenges and there are serious uncertainties with the future availability of fossil fuel. The only possible remedy is to increase the share of clean and renewable energies in total energy use and to make our technology more energy efficient. Marine and offshore renewable energies are from the cleanest types that are available from the boundless energy of fluid flow in the oceans, seas, rivers and channels. In the present study, the wave energy absorption in a channel has been studied. A plate with infinite length and finite width and thickness that is placed at the bottom of a channel has been investigated to absorb the energy of gravity waves. The plate is on a viscoelastic foundation which displays linear behavior. The coupled equations of fluid and plate have been investigated to calculate the vibration characteristics of fluid surface and plate. Subsequently, a proper analysis has been done for the plate's ability to absorb wave energy.

1- مقدمه

افزایش جمعیت جهان نیاز به انرژی را نیز افزایش می دهد. امروزه تلاش زیادی در زمینه تولید و تبدیل انرژی در زمینه های مختلف انجام می شود. این تولید انرژی با استفاده از روش های متداول آثار مخربی مانند آلودگی هوا، افزایش گازهای گلخانه ای و گرم تر شدن زمین را به همراه دارد که برای

جلوگیری از این آثار باید به روش های نوین تولید و تبدیل انرژی با استفاده از منابع پاک و تجدیدپذیر انرژی مانند انرژی امواج روی آوریم. منابع انرژی به طور کلی به دو نوع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم می شوند. بسیاری از دانشمندان بر این باورند که اگر محققان مدت 40 سال در زمینه انرژی های تجدیدپذیر فعالیت جدی داشته باشند، 70% از منابع انرژی جهان از این نوع

Please cite this article using:

A. Asaiean, R. A. Jafari-Talookolaei, M. Abedi, M. Attar, Dynamic investigation of wave energy absorber plate located on the bottom of a channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 361-369, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

منابع تأمین خواهد شد [1].

از حدود دو قرن پیش و با توجه به پتانسیل امواج اقیانوس‌ها، تست و راه‌اندازی دستگاه‌های مختلف جهت استخراج انرژی آن آغاز شده است. البته به علت اهمیت بالای نفت در زمان‌هایی از قبیل دوران جنگ جهانی اول، تمایل به انرژی امواج کم‌رنگ‌تر شد. در اواخر دهه 1940 مبدل‌های ژاپنی انرژی امواج به پیشتازی یوشیو ماسودا [2] شروع به پیشرفت کردند. طراحی‌های ماسودا جرقه‌ای برای شروع طراحی و ساخت مبدل‌های انرژی امواج در سراسر جهان بود، همچنین دو مخترع اروپایی به نام استفان سالتر [3] و بودال [4] به ترتیب پیشگام تحقیقات مبدل‌های انرژی امواج در اسکاتلند و نروژ در سال 1974 بودند. در آمریکا نیز مک‌کورمیک [5] از پیشگامان مطالعات آکادمیک در زمینه انرژی امواج محسوب می‌شود.

در ایران نیز در سال‌های اخیر مطالعاتی بر امواج دریا و منابع انرژی دریایی انجام گرفته است. بررسی‌هایی در سال 2011 انجام شد که در آن تمام نواحی خلیج فارس و دریای خزر مورد مطالعه قرار گرفتند [6]. براساس این مطالعات دریای خزر به واسطه وجود امواج بلند پتانسیل مناسبی برای استفاده از مبدل‌های انرژی دارد، اما در خلیج فارس مناطق عمیق به دلیل فاصله زیاد از ساحل شرایط مناسبی برای انتقال الکتریسیته به ساحل را ندارد. این مطالعات بر نوعی جاذب انرژی نقطه‌ای به نام ژنراتور مغناطیس دائم خطی صورت گرفته است. نتیجه قابل توجه این مطالعات آماری افزایش علاقه‌مندی دانشمندان کشور به استخراج انرژی گسترده موجود در سواحل ایران و در نهایت افزایش مطالعات در زمینه انرژی‌های پاک است.

در دهه‌های گذشته مبدل‌های متفاوتی طراحی شدند که بسیاری از آن‌ها به تولید انبوه رسیده و اکنون در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند [7]. مطالعات و تحقیقات انجام شده بر نقشه‌های ماهواره‌ای نشان می‌دهد که سطح گل‌آلود کف دریا توانایی فوق‌العاده‌ای برای جذب انرژی امواج دارد. نمونه‌ای بارز از این پدیده طبیعی را می‌توان در سواحل جنوبی هند مشاهده کرد. قابل ذکر است که جذب انرژی توسط سطح گل‌آلود کف دریا باعث شده تا سواحل جنوبی هند با عمق 2 تا 5 متر به مکانی امن برای ماهیگیران در مقابل امواج بلند و قدرتمند حاصل از بادهای موسمی تبدیل شود [8]. اعلم با الهام گرفتن از این پدیده ایده استفاده از قالیچه جاذب انرژی در بستر دریا را ارائه داد [9-11]. در این مبدل با قراردادن قالیچه انعطاف‌پذیر بر بستر ویسکوالاستیک، انرژی امواج سطحی جذب می‌شود. در واقع بستر ویسکوالاستیک بیانگر جذب انرژی در سیستم است. از مهم‌ترین مزیت‌های قالیچه جاذب انرژی نسبت به مبدل‌های دیگر توانایی بالای آن در جذب انرژی امواج دریاست که باعث بالا رفتن بازده این نوع مبدل نسبت به دیگر مبدل‌های انرژی امواج شده است، همچنین به دلیل قرارگرفتن در بستر دریا، این نوع مبدل نه تنها مزاحمتی برای کشتی‌های ماهی‌گیری و محیط زندگی آبزیان ایجاد نمی‌کند، بلکه محیطی امن برای ماهی‌گیران و ساکنان خط ساحلی در مقابل امواج طوفانی ایجاد خواهد کرد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تاکنون برای صفحه جاذب قرار گرفته در بستر دریاها و اقیانوس‌ها مطالعاتی صورت گرفته که در آن‌ها تحلیل‌ها در دو بعد انجام شده است. سازه‌های بررسی شده در مطالعات یادشده دارای صلبیت خمشی و جرم صفر است. به عبارت دیگر صلبیت خمشی سازه و جرم آن در معادلات وارد نشده است، در حالی که واضح است جهت بررسی و مطالعه دقیق‌تر باید صلبیت خمشی و جرم سازه نیز در تحلیل‌ها در نظر گرفته شود. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که جذب انرژی در کانال‌های حاوی جریان سیال نیز مانند جریان در دریاها و اقیانوس‌ها می‌تواند مورد توجه قرار گیرد

که در این مقاله برای اولین بار به آن اشاره شده است. یک صفحه با طول بی‌نهایت و عرض و ضخامت محدود قرار گرفته بر بستر ویسکوالاستیک در کف کانال (که مشابه مقالات پیشین معرف جذب انرژی امواج است) در نظر گرفته شده است.

2- فرمول‌بندی مسأله

2-1- معادلات حاکم بر سیستم

در شکل 1 نمای شماتیک از صفحه جاذب انرژی قرار گرفته در بستر یک کانال حاوی جریان سیال به عمق h نشان داده شده است. صفحه جاذب به طول بی‌نهایت، عرض b و ضخامت d در نظر گرفته شده که موج سطحی در راستای طول صفحه x منتشر می‌شود. صفحه مذکور موازی با صفحه $x-y$ بر بستر ویسکوالاستیک شامل فنرها و دمپرهایی با رفتار خطی قرار گرفته است. با توجه به قراردادن صفحه جاذب در بستر (کف) کانال سیال در زیر صفحه جاذب قرار نداشته و تنها صفحه در سطح فوقانی خود با سیال در تماس است. از این سیستم می‌توان برای جذب امواج گرانشی درون کانال‌های دریایی استفاده کرد و علاوه بر جذب انرژی امواج می‌توان مانع عبور امواج طوفانی و پر قدرت در دریاها و اقیانوس‌ها شد.

معادله حاکم بر تغییر شکل صفحه نشان داده شده در شکل 1 مطابق رابطه (1) است [12].

$$D \nabla_{xy}^4 \eta_p + \rho_p d \eta_{p,tt} + k^* \eta_p + c^* \eta_{p,t} + P_p = 0 \quad (1)$$

در آن η_p تابع جابه‌جایی قائم صفحه، ρ_p چگالی صفحه، d ضخامت صفحه، k^* ضریب سفتی فنر در واحد سطح، c^* ضریب میرایی دمپر در واحد سطح و P_p فشار سیال در محل قرارگیری صفحه است. در رابطه فوق و روابط بعدی ویرگول نشان‌دهنده مشتق‌گیری نسبت به متغیری است که بعد از آن ظاهر می‌شود. همچنین D نشان‌دهنده صلبیت خمشی صفحه بوده که از رابطه (2) محاسبه می‌شود [12].

$$D = \frac{E d^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2)$$

در آن E مدول یانگ و ν ضریب پواسون صفحه است. علاوه بر این نماد ∇_{xy}^4 به صورت $\nabla_{xy}^4 = \nabla_{xy}^2 (\nabla_{xy}^2)$ تعریف شده که در آن ∇_{xy}^2 نماد لاپلاسین در مختصات دو بعدی (x, y) بوده و مطابق رابطه (3) است.

$$\nabla_{xy}^4 = \nabla_{xy}^2 (\nabla_{xy}^2) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

شرایط مرزی صفحه در دو انتهای عرض صفحه (در مرزهای $y = 0, b$) به صورت لغزشی در نظر گرفته شده و به صورت رابطه (4) بیان می‌شوند.

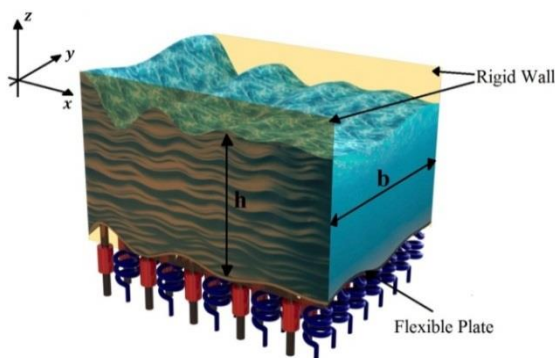


Fig. 1 Schematic view of the wave energy absorber plate located on the bottom of a channel

شکل 1 نمای شماتیک از صفحه جاذب انرژی امواج، قرار گرفته در بستر کانال

معادله (13) محاسبه خواهد شد. در نهایت تابع پتانسیل سرعت به صورت رابطه (16) نوشته می‌شود.

$$\phi(x, y, z, t) = a(e^{Az} + qe^{-Az})e^{i(kx - \omega t)}\cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \quad (16)$$

که در آن a ثابت مجهول (دامنه) بوده و پارامترهای q و A به صورت روابط (17) تعریف شده‌اند.

$$q = \frac{Ag - \omega^2}{Ag + \omega^2}, \quad A = \sqrt{k^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2} \quad (17)$$

روشن است تابع پتانسیل سرعت داده شده در رابطه (16) با فرض صلب بودن دیواره‌ها در $(y = 0, b)$ نیز سازگار است. به عبارت دیگر شرایط مرزی (18) نیز با رابطه (16) برقرار است.

$$v|_{y=0,b} = \phi_{,y}|_{y=0,b} = 0 \quad (18)$$

مشابه با تابع پتانسیل سرعت (رابطه (16)) و با ارجاع به روابط (11-10, 19, 20)، توابع جابه‌جایی سطح و صفحه به ترتیب به صورت روابط (20, 19) خواهند بود.

$$\eta_s = \eta_s(x, y, t) = a_s e^{i(kx - \omega t)} \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \quad (19)$$

$$\eta_p = \eta_p(x, y, t) = a_p e^{i(kx - \omega t)} \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \quad (20)$$

که در آن‌ها a_s و a_p به ترتیب دامنه سطح آزاد سیال و صفحه است. در ادامه با جای‌گذاری رابطه (16) در معادله (13)، رابطه پراکندگی¹ به صورت معادله (21) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} &\omega^4 \rho \tanh(Ah) + \omega^4 \rho_p dA + i\omega^3 c^* A - \omega^2 DA^5 - \omega^2 k^* A \\ &- \omega^2 \rho_p dA^2 g \tanh(Ah) - i\omega c^* A^2 g \tanh(Ah) \\ &- \rho g^2 A^2 \tanh(Ah) + k^* A^2 g \tanh(Ah) \\ &+ DA^6 g \tanh(Ah) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

جهت بررسی اثر پارامترهای مختلف بهتر است رابطه پراکندگی را با تعریف پارامترهای معرفی شده در رابطه (22) بی‌بعد کنیم.

$$\begin{aligned} \Omega &= \omega \sqrt{\frac{h}{g}}, \quad \zeta = \frac{c^*}{\rho \sqrt{gh}}, \quad \gamma = \frac{\rho g}{k^*}, \quad \mu = Ah, \\ R &= \frac{\rho_p d}{\rho h}, \quad \varepsilon = \frac{D}{\rho gh^4} \end{aligned} \quad (22)$$

در آن فرکانس بی‌بعد، Ω ضریب میرایی بی‌بعد، γ ضریب نیروی بازگرداننده بی‌بعد [10]، μ ضریب عمق بی‌بعد، R نسبت جرم صفحه به جرم سیال در واحد سطح و ε ضریب صلبیت خمشی بی‌بعد صفحه است. با جای‌گذاری پارامترهای بی‌بعد بالا در رابطه (21)، رابطه پراکندگی بی‌بعد شده به صورت معادله (23) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} &\Omega^4 \gamma \tanh(\mu) + \Omega^4 \gamma R \mu + i\Omega^3 \zeta \mu \gamma - \Omega^2 \varepsilon \gamma \mu^5 - \Omega^2 \mu \\ &- \Omega^2 \gamma R \mu^2 \tanh(\mu) - i\Omega \gamma \zeta \mu^2 \tanh(\mu) \\ &+ \varepsilon \mu^6 \gamma \tanh(\mu) \\ &+ (1 - \gamma) \mu^2 \tanh(\mu) = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

با حل این معادله می‌توان فرکانس‌های صفحه و سطح را محاسبه کرد. نکته قابل ذکر آن است که با حذف اثر صلبیت خمشی و جرم صفحه در رابطه بالا به معادله پراکندگی محاسبه شده در مرجع [10] خواهیم رسید که دلیلی بر صحت روابط محاسبه شده است.

با ترکیب روابط (16, 11-b, d) می‌توان نسبت دامنه صفحه به دامنه سطح را مطابق رابطه (24) محاسبه کرد.

$$\Lambda = \frac{a_p}{a_s} = \cosh(\mu) \left(1 - \frac{\mu}{\Omega^2} \tanh(\mu)\right) \quad (24)$$

برای آب‌های عمیق ($\mu \gg 1$)، می‌توان مقدار $\tanh(\mu) \approx 1$ را در نظر گرفت و در نتیجه رابطه پراکندگی (23) به صورت رابطه (25) ساده می‌شود.

$$\eta_{p,y} = 0, \quad \eta_{p,yyy} = 0 \quad (4)$$

سیال مورد بررسی همگن، تراکم‌ناپذیر، غیرلزج و غیرچرخشی در نظر گرفته شده که در نتیجه رابطه پیوستگی انرژی به صورت معادله لاپلاس مطابق رابطه (5) خواهد شد [13].

$$\nabla_{xyz}^2 \phi = \phi_{,xx} + \phi_{,yy} + \phi_{,zz} = 0 \quad (5)$$

در آن ϕ تابع پتانسیل سرعت سیال بوده که با مؤلفه‌های سرعت سیال (w, v, u) به ترتیب در راستاهای (z, y, x) به صورت رابطه (6) ارتباط دارد.

$$u = \phi_{,x}, \quad v = \phi_{,y}, \quad w = \phi_{,z} \quad (6)$$

دقت شود که ∇_{xyz}^2 تعریف شده در رابطه (5)، نماد لاپلاسیان در مختصات سه بعدی (x, y, z) است.

با استفاده از قانون برنولی شرایط مرزی دینامیک در محل قرارگیری سطح آزاد سیال و نیز محل قرارگیری صفحه به ترتیب مطابق روابط (8, 7) خواهند بود [13].

$$z = 0: \quad \phi_{,t} + \frac{1}{2}(\phi_{,x}^2 + \phi_{,y}^2 + \phi_{,z}^2) + g\eta_s = 0 \quad (7)$$

$$z = -h: \quad \phi_{,t} + \frac{1}{2}(\phi_{,x}^2 + \phi_{,y}^2 + \phi_{,z}^2) + \frac{P_p}{\rho} + g\eta_p = 0 \quad (8)$$

در آن η_s تابع جابه‌جایی عمودی سطح آزاد سیال، ρ چگالی سیال و g نیز شتاب گرانش زمین است. با توجه به فرض غیرلزج بودن سیال از تنش‌های برشی سیال در رابطه برنولی صرف‌نظر شده و روابط (8, 7) استخراج شده‌اند [13].

همچنین شرایط مرزی سینماتیک در محل قرارگیری سطح آزاد سیال و صفحه به ترتیب مطابق روابط (10, 9) داده می‌شوند [14].

$$z = 0: \quad \phi_{,z} = \eta_{s,t} + \phi_{,x}\eta_{s,x} + \phi_{,y}\eta_{s,y} \quad (9)$$

$$z = -h: \quad \phi_{,z} = \eta_{p,t} + \phi_{,x}\eta_{p,x} + \phi_{,y}\eta_{p,y} \quad (10)$$

با صرف‌نظر از عبارت‌های غیرخطی، روابط (10-7) به صورت روابط (11) بازنویسی خواهند شد:

$$z = 0: \quad \phi_{,t} + g\eta_s = 0 \quad (11-a)$$

$$z = 0: \quad \phi_{,z} = \eta_{s,t} \quad (11-b)$$

$$z = -h: \quad \phi_{,t} + \frac{P_p}{\rho} + g\eta_p = 0 \quad (11-c)$$

$$z = -h: \quad \phi_{,z} = \eta_{p,t} \quad (11-d)$$

با ترکیب روابط (11-a, b) به معادله (12-a) و به طور مشابه با ترکیب روابط (11-c, d) به معادله (12-b) خواهیم رسید.

$$z = 0: \quad \phi_{,tt} + g\phi_{,z} = 0 \quad (12-a)$$

$$z = -h: \quad \phi_{,tt} + \frac{P_{p,t}}{\rho} + g\phi_{,z} = 0 \quad (12-b)$$

با جای‌گذاری معادلات (11-d) و (12-b) در معادله (1) و ساده‌سازی، معادله دیفرانسیل (13) برحسب تابع پتانسیل سرعت به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} z = -h: \quad &D\nabla_{xy}^4 \phi_{,z} + \rho_p d \phi_{,ztt} + k^* \phi_{,z} + c^* \phi_{,zt} \\ &- \rho \phi_{,tt} - \rho g \phi_{,z} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

جهت حل معادله (13)، پاسخ را به صورت رابطه (14) که شرایط مرزی مسأله (رابطه (4)) را ارضا می‌کند در نظر گرفته شده است.

$$\phi = \phi(x, y, z, t) = F(z)e^{i(kx - \omega t)}\cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \quad (14)$$

در آن k عدد موج زاویه‌ای، ω فرکانس اصلی و $i = \sqrt{-1}$ نیز متغیر مختلط است. رابطه عدد موج و طول موج (λ) مانند رابطه (15) است.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (15)$$

همچنین $F(z)$ تابعی مجهول بوده که با جای‌گذاری رابطه (14) در

¹ Dispersion Relation

$$\begin{aligned}
w &= \text{Real} \left\{ -iAa_s \left(\frac{Ag + \omega^2}{2A\omega} \right) \left(\frac{2Ag}{Ag + \omega^2} \sinh(Az) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{2\omega^2}{Ag + \omega^2} \cosh(Az) \right) e^{i(kx)} \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \right\} e^{-i\omega t} \\
&= \sin(kx - \omega_r t) a_s \sqrt{k^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2} \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \left(\frac{Ag + \omega_r^2}{2A\omega_r} \right) \\
&\quad \left(\frac{2Ag}{Ag + \omega_r^2} \sinh(Az) + \frac{2\omega_r^2}{Ag + \omega_r^2} \cosh(Az) \right) e^{\omega_i t} \quad (32)
\end{aligned}$$

در آن ω_r و ω_i به ترتیب بخش‌های حقیقی و موهومی فرکانس است. با قراردادن روابط (32-30) در رابطه (29) معادله انرژی جنبشی سیال به صورت رابطه (33) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned}
E_{kf} &= \frac{1}{4} \rho a_s^2 \left(\frac{Ag + \omega_r^2}{2A\omega_r} \right)^2 \left[bA^2 \left(\left(\frac{2Ag}{Ag + \omega_r^2} \right)^2 \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \left(\frac{2\omega_r^2}{Ag + \omega_r^2} \right)^2 \right) \frac{\sinh(2Ah)}{4A} \right. \\
&\quad \left. - \frac{4g\omega_r^2}{(Ag + \omega_r^2)^2} \sinh^2(Ah) \right] e^{2\omega_i t} \quad (33)
\end{aligned}$$

همچنین انرژی جنبشی میانگین صفحه در یک طول موج مطابق رابطه (34) است.

$$\begin{aligned}
E_{kp} &= \frac{1}{2} \rho_p d \int_0^b \overline{\eta_{p,t}^2} dy \\
&= \frac{1}{2} \rho_p d e^{2\omega_i t} \int_0^b \int_0^\lambda \frac{1}{\lambda} \left(\omega_r a_p \sin(kx) \right. \\
&\quad \left. - \omega_r t \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \right)^2 dx dy \\
&= \frac{1}{4} \rho_p d e^{2\omega_i t} \int_0^b \left(\omega_r a_p \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \right)^2 dy \\
&= \frac{1}{8} \rho_p d \omega_r^2 a_p^2 b e^{2\omega_i t} \quad (34)
\end{aligned}$$

انرژی پتانسیل میانگین کل سیستم نیز از مجموع انرژی‌های پتانسیل میانگین سیال (E_{pf}) [15]، فنر (E_{ps}) و صفحه (E_{pp}) [12] محاسبه می‌شود. انرژی‌های پتانسیل مذکور مطابق روابط (35-37) به دست می‌آیند.

$$E_{pf} = \frac{1}{2} \rho g e^{2\omega_i t} \int_0^b (\overline{\eta_s^2} - \overline{\eta_p^2}) dy = \frac{b\rho g(a_s^2 - a_p^2)}{8} e^{2\omega_i t} \quad (35)$$

$$E_{ps} = \frac{1}{2} \int_0^b k^* \overline{\eta_p^2} dy = \frac{bk^* a_p^2}{8} e^{2\omega_i t} \quad (36)$$

$$\begin{aligned}
E_{pp} &= \frac{D}{2} \int_0^b \int_0^\lambda \left\{ (\nabla^2 \eta_p)^2 \right. \\
&\quad \left. + 2(1-\nu) \left[\left(\frac{\partial^2 \eta_p}{\partial x \partial y} \right)^2 \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \left(\frac{\partial^2 \eta_p}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \eta_p}{\partial y^2} \right) \right] \right\} dx dy \\
&= \frac{Dba_p^2}{8} \left[A^4 - 4(2-\nu)k^2 \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \right] e^{2\omega_i t} \quad (37)
\end{aligned}$$

انرژی میانگین کل نیز از مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل فوق حاصل می‌شود. جهت سادگی می‌توان انرژی میانگین کل را به صورت رابطه (38) بیان کرد.

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2} \rho b g a_s^2 \psi e^{2\omega_i t} \quad (38)$$

$$(\Omega^2 - \mu)[\Omega^2(\gamma + \gamma R\mu) + i\Omega\zeta\gamma\mu - \mu(1-\gamma) - \mu^5\epsilon\gamma] = 0 \quad (25)$$

معادله فوق دارای دو دسته پاسخ مطابق روابط (27,26) است که با توجه به بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از یک بودن مقدار نسبت دامنه (A) ، می‌توان این پاسخ‌ها را به ترتیب مربوط به صفحه یا سطح آزاد سیال دانست

$$\Omega_s = \sqrt{\mu} \quad (26)$$

$$\Omega_p = \frac{-i\zeta\mu\gamma \pm \sqrt{-\zeta^2\mu^2\gamma^2 + 4[(\gamma + \gamma R\mu)(\mu(1-\gamma) + \mu^5\epsilon\gamma)]}}{2(\gamma + \gamma R\mu)} \quad (27)$$

که Ω_s فرکانس مد سطح آزاد سیال و Ω_p فرکانس مد صفحه جاذب انرژی برای آب‌های عمیق است. از رابطه (26) می‌توان دریافت که رفتار فرکانس سطح در آب‌های عمیق مستقل از خواص مکانیکی و هندسی صفحه بوده و تنها تابعی از ضریب عمق سیال است.

2-2- معادلات انرژی

واضح است صفحه مورد نظر در مسأله حاضر به واسطه بستر ویسکوالاستیک قادر به جذب انرژی امواج است. به این صورت که فنرهای تعبیه شده در بستر باعث نوسان صفحه حول نقطه تعادل شده و دمپ‌های تعبیه شده در بستر به جذب انرژی حاصل از حرکت صفحه می‌پردازند. انرژی کل سیستم نامیرا از مجموع انرژی‌های جنبشی و پتانسیل صفحه، سیال و فنرهای بستر محاسبه می‌شود.

انرژی جنبشی کل سیستم از مجموع انرژی جنبشی سیال و صفحه به صورت رابطه (28) محاسبه می‌شود.

$$E_k = E_{kf} + E_{kp} \quad (28)$$

که در رابطه (28) E_k انرژی جنبشی میانگین کل سیستم، E_{kf} و E_{kp} نیز به ترتیب انرژی جنبشی میانگین سیال و صفحه است. انرژی جنبشی میانگین سیال در یک طول موج از رابطه (29) محاسبه می‌شود [15].

$$E_{kf} = \frac{1}{2} \rho \int_0^\lambda \frac{1}{\lambda} \int_0^b \int_{-h}^0 (u^2 + v^2 + w^2) dz dy dx \quad (29)$$

که در آن u ، v و w بخش حقیقی [15] سرعت سیال به ترتیب در راستای x ، y و z بوده و با استفاده از روابط (16,6) به صورت روابط (30-32)، محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned}
u &= \text{Real} \left\{ a_s k \left(\frac{\omega^2 + Ag}{2A\omega} \right) \left(\frac{2Ag}{Ag + \omega^2} \cosh(Az) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{2\omega^2}{Ag + \omega^2} \sinh(Az) \right) e^{i(kx)} \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \right\} e^{-i\omega t} \\
&= \cos(kx - \omega_r t) a_s k \cos\left(\frac{\pi}{b}y\right) \left(\frac{\omega_r^2 + Ag}{2A\omega_r} \right) \\
&\quad \left(\frac{2Ag}{Ag + \omega_r^2} \cosh(Az) + \frac{2\omega_r^2}{Ag + \omega_r^2} \sinh(Az) \right) e^{\omega_i t} \quad (30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v &= \text{Real} \left\{ ia_s \left(\frac{\pi}{b} \right) \left(\frac{Ag + \omega^2}{2A\omega} \right) \left(\frac{2Ag}{Ag + \omega^2} \cosh(Az) \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{2\omega^2}{Ag + \omega^2} \sinh(Az) \right) e^{i(kx)} \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \right\} e^{-i\omega t} \\
&= -\sin(kx - \omega_r t) a_s \left(\frac{\pi}{b} \right) \sin\left(\frac{\pi}{b}y\right) \left(\frac{Ag + \omega_r^2}{2A\omega_r} \right) \\
&\quad \left(\frac{2Ag}{Ag + \omega_r^2} \cosh(Az) + \frac{2\omega_r^2}{Ag + \omega_r^2} \sinh(Az) \right) e^{\omega_i t} \quad (31)
\end{aligned}$$

که در آن Ψ از رابطه (39) قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} \Psi = \frac{1}{2g} \left(\frac{Ag + \omega_r^2}{2A\omega_r} \right)^2 & \left[A^2 \left(\left(\frac{2Ag}{Ag + \omega_r^2} \right)^2 \right. \right. \\ & + \left. \left(\frac{2\omega_r^2}{Ag + \omega_r^2} \right)^2 \right) \frac{\sinh(2Ah)}{4A} \\ & - \left. \frac{4g\omega_r^2}{(Ag + \omega_r^2)^2} \sinh^2(Ah) \right] + \frac{1}{4} \frac{\rho_p d}{\rho g} \omega_r^2 \frac{a_p^2}{a_s^2} \\ & + \frac{(a_s^2 - a_p^2)}{4a_s^2} + \frac{k^* a_p^2}{4\rho g a_s^2} \\ & + \frac{Da_p^2}{4\rho g a_s^2} \left[A^4 - 4(2 - \nu)k^2 \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (39)$$

با تعریف پارامترهای بی بعد رابطه (40) می توان رابطه انرژی کل سیستم را به صورت بی بعد بیان کرد.

$$\Omega_r = \omega_r \sqrt{\frac{h}{g}}, \quad \alpha = kh, \quad \beta = \frac{\pi h}{b} \quad (40)$$

که در آن Ω_r بخش حقیقی فرکانس بی بعد و α و β نیز به ترتیب ضریب عمقی در راستای x و y است. واضح است که عبارت $\mu = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$ برای ضرایب عمقی تعریف شده برقرار است که μ همان ضریب عمق بی بعد تعریف شده در رابطه (22) است. با جای گذاری پارامترهای بی بعد فوق می توان عبارت Ψ را مطابق رابطه (41) برحسب پارامترهای بی بعد نوشت.

$$\begin{aligned} \Psi = \frac{1}{2} \left(\frac{\Omega_r^2 + \mu^2}{2\mu\Omega_r} \right)^2 & \left[\mu^2 \left(\frac{\mu^2 + \Omega_r^4}{(\mu + \Omega_r^2)^2} \frac{\sinh(2\mu)}{\mu} \right. \right. \\ & - \left. \frac{4\Omega_r^2}{(\mu + \Omega_r^2)^2} \sinh^2(\mu) \right) \left. \right] + \frac{R\Omega^2 A^2}{4} \\ & + \frac{1 - \Lambda^2}{4} + \frac{\Lambda^2}{4\gamma} \\ & + \frac{\varepsilon \Lambda^2}{4} [\mu^4 - 4(2 - \nu)\alpha^2 \beta^2] \end{aligned} \quad (41)$$

با تعریف پارامتر بی بعد $\tau = t\sqrt{g/h}$ ، در نهایت انرژی کل بی بعد به صورت رابطه (42) به دست می آید.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \Psi e^{2\Omega_i \tau} \quad (42)$$

که در آن E_0 به صورت رابطه (43) تعریف شده است.

$$E_0 = \frac{1}{2} \rho b g a_s^2 \quad (43)$$

که Ω_i بخش موهومی فرکانس بی بعد بوده و مشابه با بخش حقیقی به صورت $\Omega_i = \omega_i \sqrt{h/g}$ تعریف شده است. نرخ تغییر اولیه انرژی صفحه جاذب انرژی به صورت رابطه (44) محاسبه می شود.

$$\dot{\varepsilon}_0 = \frac{d\varepsilon}{dt} = 2\Psi\Omega_i \quad (44)$$

3- تحلیل نتایج

در این قسمت اثر پارامترهای مختلف از قبیل ضلبيت خمشی (ε)، نسبت جرم (R) و ضریب عمق (μ) بر نتایج فرکانسی، نسبت دامنه صفحه به سطح و نیز بر نرخ تغییر اولیه انرژی به طور مفصل بررسی شده است. مقادیر پارامترهای بی بعد به صورت رابطه (45) در نظر گرفته شده است.

$$R = 0.01, \quad \zeta = 0.6, \quad \gamma = 0.9, \quad \varepsilon = 0.01 \quad (45)$$

در هر بررسی تمامی پارامترهای بی بعد به جز پارامتری که هدف مطالعه اثر آن است ثابت و برابر با مقادیر داده شده در رابطه (44) در نظر گرفته شده و با تغییر پارامتر یادشده اثر آن بررسی شده است. همچنین جهت پرهیز از ارائه نتایج تکراری، اثر برخی پارامترها از قبیل ضریب نیروی بازگرداننده و

نسبت میرایی بر نتایج فرکانسی که در مقالات دیگر بررسی شده اند ارائه نشده است. با توجه به رابطه (23) می توان دریافت که معادله مشخصه دارای چهار ریشه برای فرکانس است که دو ریشه برای سطح سیال و دو ریشه دیگر برای صفحه است. ریشه های مربوط به سطح سیال به فرم $(a_1 - ib_1)$ و $(-a_1 - ib_1)$ و ریشه های صفحه نیز به فرم $(a_2 - ib_2)$ و $(-a_2 - ib_2)$ محاسبه شده اند که a_1, a_2, b_1, b_2 اعداد طبیعی است، همچنین در حالتی که بخش حقیقی فرکانس مد صفحه صفر می شود ریشه های صفحه به فرم $(-ib_3)$ و $(-ic_3)$ خواهند بود که b_3 و c_3 اعداد طبیعی می باشند. قابل ذکر است جهت ارائه بهتر نتایج قسمت قرینه نتایج ارائه نشده اند.

جهت بررسی صحت روابط و برنامه های کامپیوتری نوشته شده، پاسخ های فرکانسی رابطه پراکندگی و نسبت دامنه صفحه به دامنه سطح آزاد سیال برای حالت $R = 0$ و $\varepsilon = 0$ محاسبه شده و در شکل 2 نشان داده شده است. با مقایسه نمودارهای شکل 2 با نتایج ارائه شده در شکل 3 مرجع [10] می توان دریافت که نتایج بر یکدیگر منطبق بوده و در نتیجه صحت روابط و برنامه های نوشته شده مورد تأیید است.

در شکل 3 اثر ضلبيت خمشی بر قسمت حقیقی فرکانس ($\Re$)، قسمت موهومی فرکانس ($\Im$) و نیز نسبت دامنه (a_p/a_s) در نسبت عمق های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. قابل توجه است که در این شکل و نیز در شکل های بعدی خط ممتمد مربوط به مد صفحه و خط چین برای مد سطح است. این نمودارها از بالا به پایین به ترتیب به ازای $\varepsilon = 0, \varepsilon = 0.001, \varepsilon = 0.01$ و $\varepsilon = 0.1$ محاسبه شده اند. محور افقی نمودارهای یادشده برحسب ضریب عمق بی بعد است که با دقت در روابط مربوطه متوجه خواهیم شد که افزایش ضریب مذکور متناظر با افزایش عدد موج و یا کاهش طول موج خواهد بود.

همان طور که مشاهده می شود زمانی که از ضلبيت خمشی صفحه صرف نظر شده است ($\varepsilon = 0$)، بخش حقیقی مد صفحه تغییرات کمی را تجربه می کند و با افزایش عمق به سمت صفر میل می کند، ولی بخش موهومی مد صفحه که عددی منفی است از صفر شروع شده و به شدت کاهش می یابد. در ضریب عمق بحرانی $\mu_{cr} = 1.381$ بخش حقیقی فرکانس مد صفحه صفر شده و بخش موهومی فرکانس مد صفحه دو شاخه می شود. برای $\mu > \mu_{cr}$ (صفر شدن بخش حقیقی فرکانس) مد صفحه، فوق میرا شده و موج منتشر نمی شود. به عبارت دیگر سیستم برای عمق های بیشتر از عمق بحرانی موج نخواهد داشت. نتایج مشابهی برای دو شاخه شدن فرکانس در مرجع [10] نیز گزارش شده که در آن از جرم صفحه نیز صرف نظر شده است. با بررسی نمودارهای دیگر ($\varepsilon = 0.001, \varepsilon = 0.01$ و $\varepsilon = 0.1$) مشاهده می شود که با اضافه شدن ضلبيت خمشی در معادله

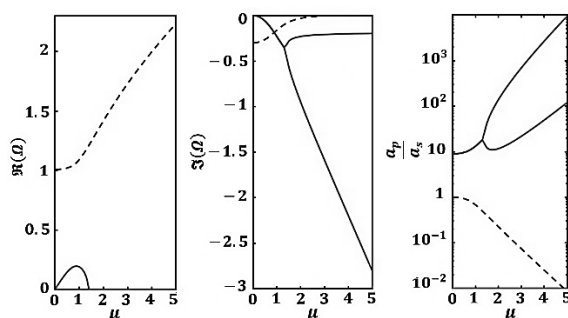


Fig. 2 Frequency and amplitude ratio diagrams in the absence of flexural rigidity and mass of plate

شکل 2 نمودار فرکانس و نسبت دامنه در غیاب سفتی خمشی و جرم صفحه

یک است و با افزایش عمق به شدت افزایش می‌یابد. به دلیل وابستگی این نسبت به فرکانس سیستم، نسبت دامنه مد صفحه در عدم حضور صلبیت خمشی به مانند بخش موهومی فرکانس مد صفحه دچار دوشاخگی می‌شود و با افزایش صلبیت خمشی دو شاخگی مد صفحه به تدریج از بین می‌رود.

در شکل 4 اثر نسبت جرم صفحه به جرم سیال بر نتایج مدنظر نشان داده شده است. نتایج برای چهار نسبت جرم $R = 0.001$, $R = 0$, $R = 0.01$ و $R = 0.1$ محاسبه شده‌اند. با دقت در نمودارهای پاسخ فرکانسی مربوطه می‌توان دریافت که اثر تغییر جرم بر نتایج فرکانسی صفحه در آب‌های عمیق نسبت به آب‌های کم‌عمق بیشتر است. با افزایش جرم صفحه، اندازه هر دو بخش حقیقی و موهومی فرکانس مد صفحه کاهش می‌یابند. به عبارت دیگر صفحه با افزایش جرم دیرتر میرا می‌شود. همچنین اثر نسبت جرم بر مقادیر فرکانسی مد سطح آزاد سیال ناچیز است، همچنین مشاهده می‌شود جرم صفحه تأثیر اندکی بر تغییرات نسبت دامنه صفحه به دامنه سطح دارد.

در ادامه با جای‌گذاری پاسخ فرکانسی مدهای صفحه و سطح آزاد و همچنین نسبت دامنه در رابطه (43)، نرخ کاهش انرژی اولیه برای مدهای

پراکندگی، دو شاخگی در بخش موهومی فرکانس مد صفحه با افزایش ضریب عمق بی‌بعد از بین می‌رود و بخش حقیقی فرکانس مد صفحه افزایش می‌یابد. با از بین رفتن دو شاخگی، بخش حقیقی فرکانس مد صفحه به ازای هیچ عمقی صفر نمی‌شود و در هر عمقی موج قادر به انتشار خواهد بود.

با دقت در نتایج مربوط به مد سطح نیز می‌توان دریافت که بخش حقیقی فرکانس مربوط به مد سطح با افزایش ضریب عمق بی‌بعد تغییرات چندانی نداشته و بخش موهومی آن نیز در حضور و عدم حضور صلبیت خمشی صفحه از یک مقدار منفی شروع شده و با افزایش ضریب عمق بی‌بعد به سمت صفر میل می‌کند. واضح است هرچقدر اندازه بخش موهومی فرکانس افزایش یابد میرا شدن سریع‌تر موج را خواهیم داشت. با مقایسه نمودارهای مربوط به فرکانس‌های مد سطح و صفحه می‌توان دریافت که امواج سطح دریا در عمق کمتر زودتر میرا می‌شوند درحالی که در مد صفحه برعکس این موضوع اتفاق می‌افتد و امواج در عمق بیشتر زودتر میرا می‌شوند.

از مشاهده نسبت دامنه صفحه به دامنه سطح نیز می‌توان دریافت که این نسبت برای مد سطح مقداری کمتر از یک است که با افزایش عمق به شدت کاهش می‌یابد. در حالی که در مد صفحه این نسبت عددی بزرگ‌تر از

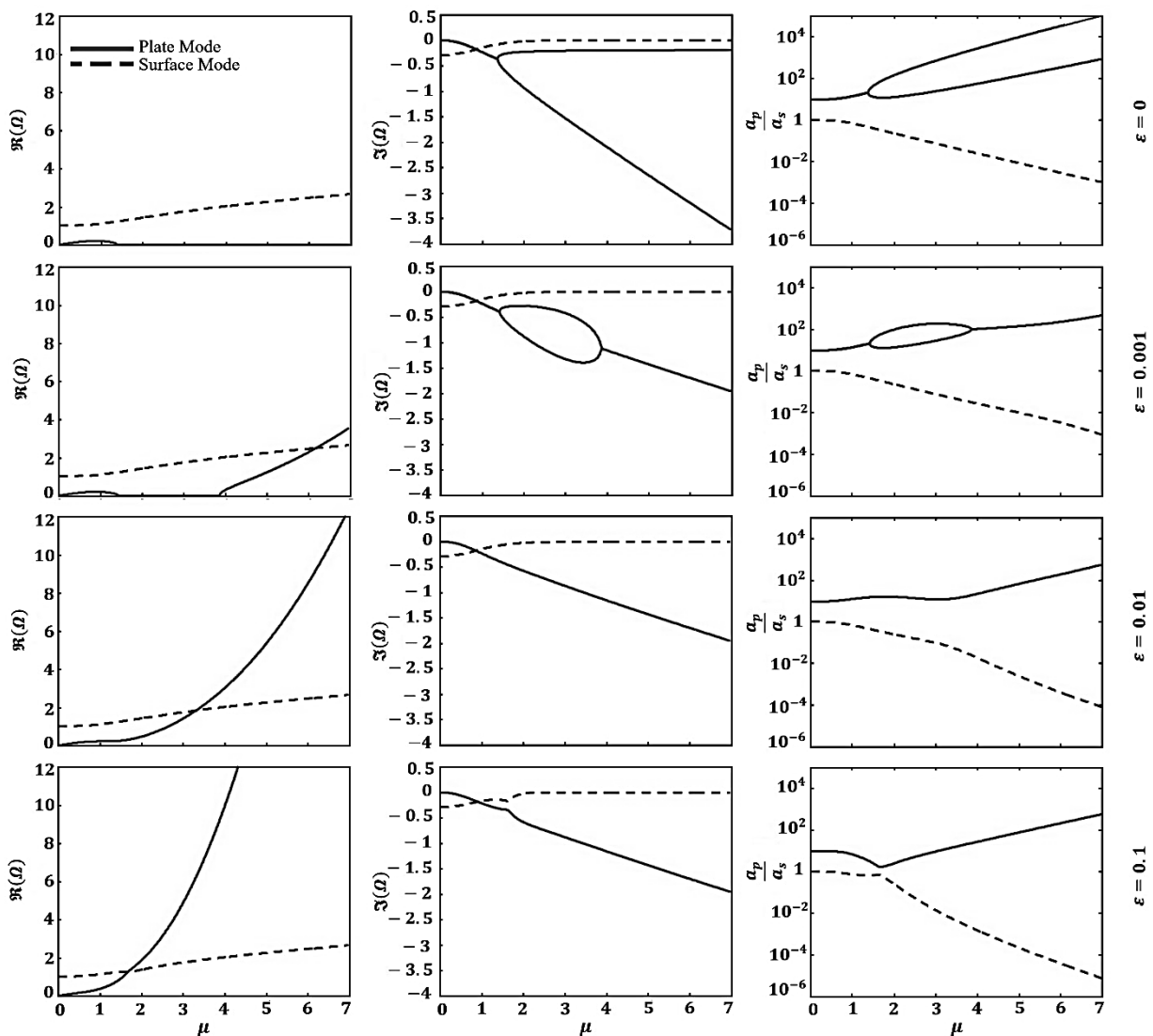


Fig. 3 Frequency and amplitude ratio diagrams as a function of the Shallowness for different flexural rigidity of the plate

شکل 3 نمودارهای فرکانس و نسبت دامنه به صورت تابعی از ضریب عمق بدون بعد به ازای صلبیت‌های خمشی مختلف صفحه

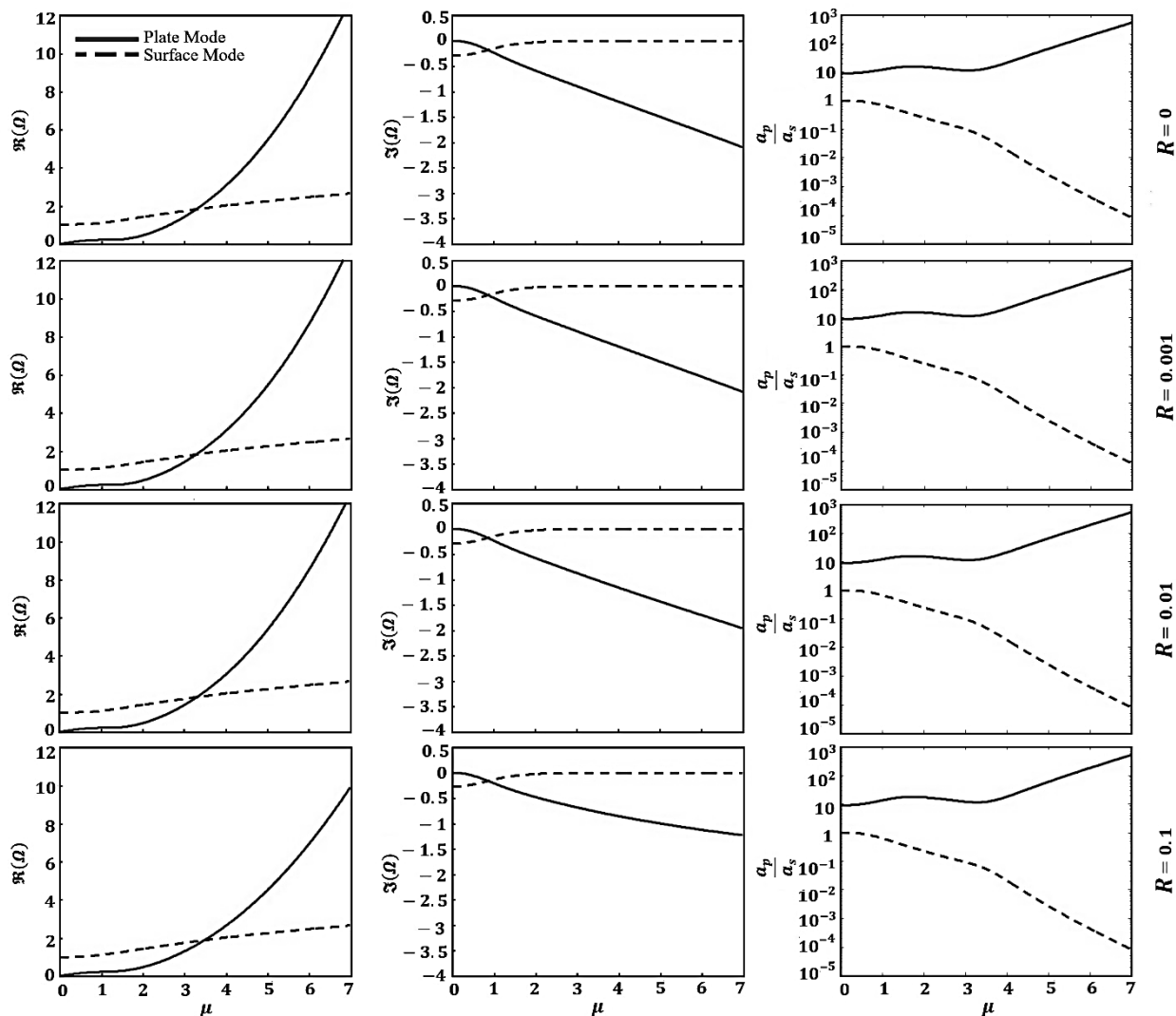


Fig. 4 Frequency and amplitude ratio diagrams for different mass ratios

شکل 4 نمودارهای فرکانس و نسبت دامنه به ازای نسبت جرم‌های مختلف

افزایش بیشتر عمق، نرخ کاهش برای مد صفحه کاهش می‌یابد. در حالی که نرخ کاهش انرژی اولیه برای مد سطح با افزایش عمق همواره نزولی است. همچنین مشاهده می‌شود که به طور کلی نرخ کاهش انرژی اولیه برای مد صفحه بسیار بیشتر از مد سطح است که نشان‌دهنده این است که بیشترین جذب انرژی توسط مد صفحه صورت می‌گیرد که از اهمیت بالایی برخوردار است.

صفحه و سطح محاسبه شده است. نتایج ارائه شده در شکل‌های بعدی برای مقادیر $\alpha = 0.6\mu$ و $\beta = 0.8\mu$ محاسبه شده‌اند. اثر ضریب میرایی، صلبیت خمشی و نسبت جرمی بر نرخ کاهش انرژی اولیه برای دو مد صفحه و سطح به ترتیب در شکل‌های 5، 6 و 7 بررسی شده است. تقریباً در تمامی این نمودارها در ابتدا نرخ کاهش انرژی اولیه برای مد صفحه با افزایش عمق، افزایش می‌یابد تا به یک نقطه ماکزیمم می‌رسد. در ادامه و با

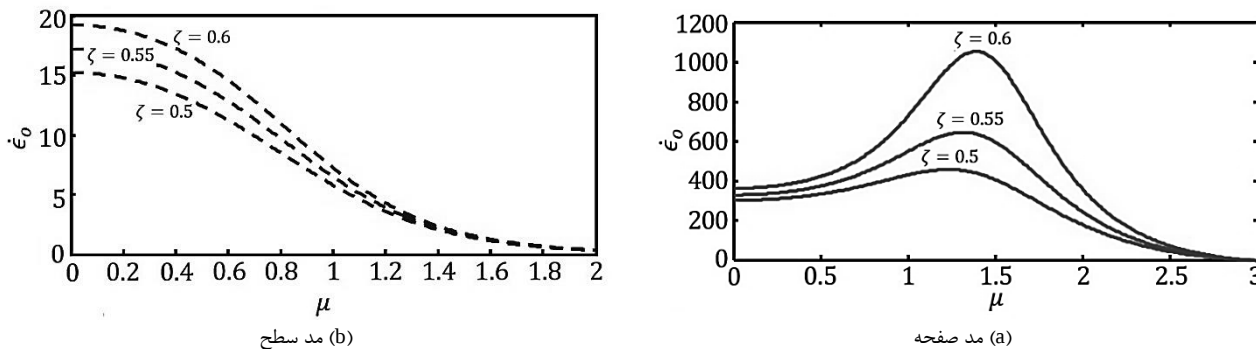


Fig. 5 The initial decay rate of total energy as a function of the shallowness for different damping coefficients

شکل 5 نمودار نرخ کاهش انرژی کل اولیه برحسب ضریب عمق بدون بعد برای ضرایب میرایی مختلف

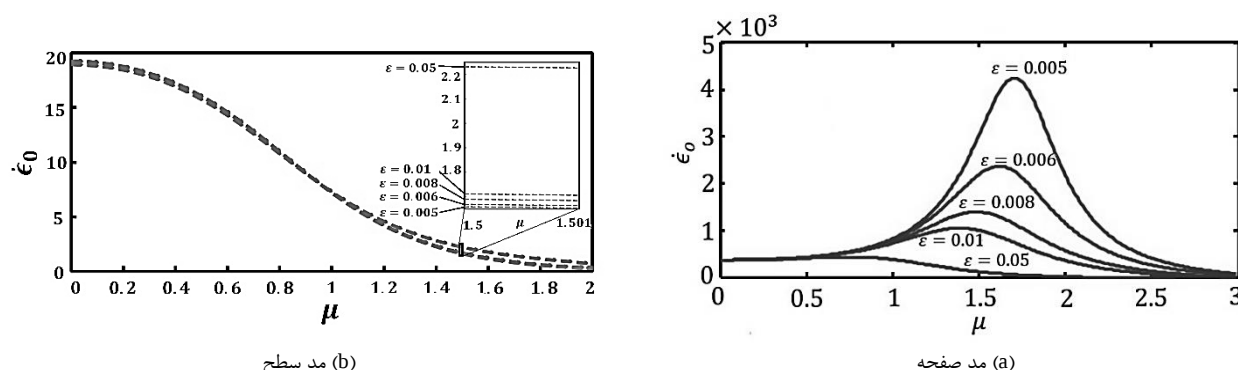


Fig. 6 The initial rate of total energy decay as a function of the shallowness for different Flexural Rigidity coefficients

شکل 6 نمودار نرخ کاهش انرژی کل اولیه برحسب ضریب عمق بدون بعد برای ضرایب صلبیت خمشی مختلف

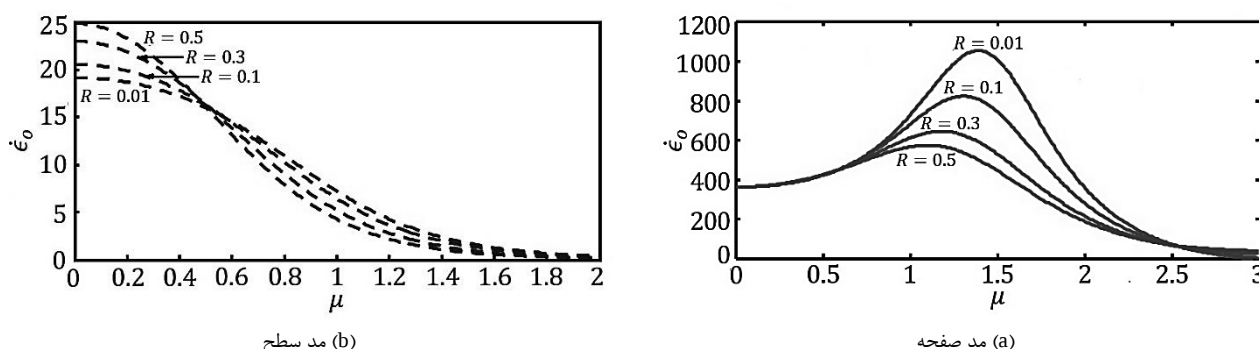


Fig. 7 The initial rate of total energy decay as a function of the shallowness for different mass ratios

شکل 7 نمودار نرخ کاهش انرژی کل اولیه برحسب ضریب عمق بدون بعد برای نسبت جرمی های مختلف

جرم موجب افزایش نرخ کاهش انرژی اولیه شده در حالیکه در عمق های کمتر، افزایش نسبت جرم موجب کاهش نرخ کاهش انرژی اولیه می شود.

4- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به تحلیل دینامیکی یک صفحه جاذب انرژی قرار گرفته در بستر کانال پرداخته شده است. با فرآیندی مناسب و با تحلیل معادلات کوپل شده صفحه و سیال، رابطه پراکندگی برای سیستم مذکور به دست آمده است. رابطه پراکندگی به دست آمده دارای دو مد فرکانسی است؛ مد صفحه جاذب انرژی و مد سطح آزاد سیال. اثر پارامترهای مختلف بر پاسخ فرکانسی و نرخ کاهش انرژی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شد که امواج مد سطحی با کاهش عمق سیال زودتر میرا می شوند در حالی که امواج برای مد صفحه با عمق بیشتر، بسیار سریع میرا می شوند. همچنین مشاهده شده است که افزایش میرایی، کاهش صلبیت خمشی و کاهش جرم صفحه موجب افزایش نرخ کاهش انرژی کل ماکزیمم خواهد شد.

در این مقاله نشان داده شد که حضور صلبیت خمشی در معادلات تأثیر چشم گیری بر فرکانس نوسان مد صفحه دارد و با اضافه شدن سفتی خمشی و جرم صفحه، محدوده عمق مجاز که می توان در آن از امواج، انرژی دریافت کرد افزایش می یابد و این به معنای انعطاف پذیر بودن عملکرد صفحه جاذب انرژی در شرایط محیطی مختلف است. با محاسبه انرژی اولیه میانگین و با توجه به اطلاعات آماری امواج در محل نصب مبدل می توان خواص بستر را به می یابد انتخاب کرد تا بیشترین انرژی را در طول سال از امواج دریا دریافت کرد. نتایج به دست آمده از تحلیل ارائه شده در مقاله حاضر می تواند در مراحل طراحی و اجرای نیروگاه های انرژی امواج مورد استفاده قرار گیرد.

در شکل 5 اثر ضریب میرایی بستر بر نرخ کاهش انرژی اولیه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش ضریب میرایی، نرخ کاهش انرژی اولیه در یک عمق ثابت برای هردو مد صفحه و سطح افزایش می یابد. همچنین طبق تعریف، ضریب عمق بی بعدی که مد صفحه به ازای آن دارای بیشترین نرخ کاهش انرژی است را ضریب عمق بهینه می نامیم. از نتایج ارائه شده در شکل 5 می توان دریافت که با افزایش ضریب میرایی، ضریب عمق بهینه کاهش می یابد.

در شکل 6 تأثیر صلبیت خمشی صفحه بر نرخ کاهش انرژی اولیه در ضریب عمق های مختلف بررسی شده است. واضح است این تأثیر در مد سطح بسیار کم است به صورتی که تنها در ضریب های صلبیت خمشی بسیار زیاد این اختلاف قابل مشاهده است. در مد صفحه نیز با افزایش صلبیت خمشی صفحه، نرخ کاهش انرژی اولیه کاهش یافته و مقدار کاهش در ضریب عمق های نزدیک ضریب عمق بهینه بسیار بیشتر است. با افزایش ضریب صلبیت خمشی صفحه، ماکزیمم نرخ کاهش انرژی اولیه صفحه در ضریب عمق های کمتر اتفاق می افتد.

در شکل 7 نرخ کاهش انرژی اولیه مدهای صفحه و سطح برحسب ضریب عمق و برای نسبت جرمی های مختلف رسم شده است. از شکل 7-a مشاهده می شود که در اعماق کم و با افزایش نسبت جرمی، نرخ کاهش انرژی اولیه برای مد صفحه کاهش می یابد. در حالی که برای آب های عمیق که نرخ کاهش انرژی بسیار کمتری دارند با افزایش نسبت جرمی، نرخ کاهش انرژی اولیه مد صفحه افزایش می یابد. همچنین ضریب عمق بهینه نیز با افزایش نسبت جرمی، افزایش می یابد. در شکل 7-b نرخ کاهش انرژی در مد سطح نشان داده شده است. مشاهده می شود که در آب های کم عمق افزایش نسبت

5- مراجع

- Geophysical Research Letters*, Vol. 35, No. 7, pp. 1-5, 2008.
- [9] M. R. Alam, A flexible seafloor carpet for high-performance wave energy extraction, *Proceedings of The 31th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 839-846, 2012.
- [10] M. R. Alam, Nonlinear analysis of an actuated seafloor-mounted carpet for a high-performance wave energy extraction, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, Vol. 468, No. 2146, pp. 3153-3171, 2012.
- [11] M. Lehmann, R. Elandt, H. Pham, R. Ghorbani, M. Shakeri, M.-R. Alam, An artificial seabed carpet for multidirectional and broadband wave energy extraction: Theory and Experiment, *Proceedings of 10th European Wave and Tidal Energy Conference*, Aalborg, Denmark, 2013.
- [12] A. C. Ugural, *Stresses in Beams, Plates, and Shells*, pp. 87-229, Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [13] B. Munson, D. Young, T. Okiishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, pp. 205-300, New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [14] H. E. Krogstad, O. A. Arntsen, Linear wave theory part a, *Norwegian University of Science and Technology*, pp. 5-9, 2000.
- [15] A. H. Techet, 2.016 Hydrodynamics, *Lecture Notes*, 2005.
- [1] W. NikWB, O. Sulaiman, R. Rosliza, Y. Prawoto, A. Muzathik, Wave energy resource assessment and review of the technologies, *Energy & Environment*, Vol. 2, No. 6, pp. 1101-1112, 2011.
- [2] Y. Masuda, *An Experience of Wave Power Generator Through Tests and Improvement*, D. Evans, A. F. Falcão (Eds.), *Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization*, pp. 445-452, Berlin: Springer, 1986.
- [3] S. H. Salter, Wave power, *Nature*, Vol. 249, No. 5459, pp. 720-724, 1974.
- [4] K. Budal, J. Falnes, Power generation from ocean waves using a resonant oscillating system, *Marine Science Communication*, Vol. 1, pp. 269-288, 1975.
- [5] M. E. McCormick, Analysis of a wave energy conversion buoy, *Journal of Hydronautics*, Vol. 8, No. 3, pp. 77-82, 1974.
- [6] J. Faiz, M. Ebrahimi-salari, Wave power resource in iran for electrical power generation, *Proceedings of World Renewable Energy Congress*, pp. 3412-3419, Sweden: Linköping University Electronic Press, 2011.
- [7] D. Ross, *Power from the Waves*, pp. 49-84, Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [8] S. Elgar, B. Raubenheimer, Wave dissipation by muddy seafloors,