تحلیل طیفی نیروی امواج برخوردی به سازه‌های دریایی

ابراهیم ملایجردی[۱]، وحیدرضا جهانمرد[۲]، محمدرضا تابش‌پور[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی دریا، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی کشور، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ malayjerdi_ebrahim@mech.sharif.edu

[۲] فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد مهندسی دریا، قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک‌های دریایی کشور، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ v_jahanmard@mech.sharif.edu

[۳] استادیاردانشکده مهندسی مکانیک, قطب علمی هیدرودینامیک و دینامیک متحرک های دریایی ،دانشگاه صنعتی شریف؛ tabeshpour@sharif.edu

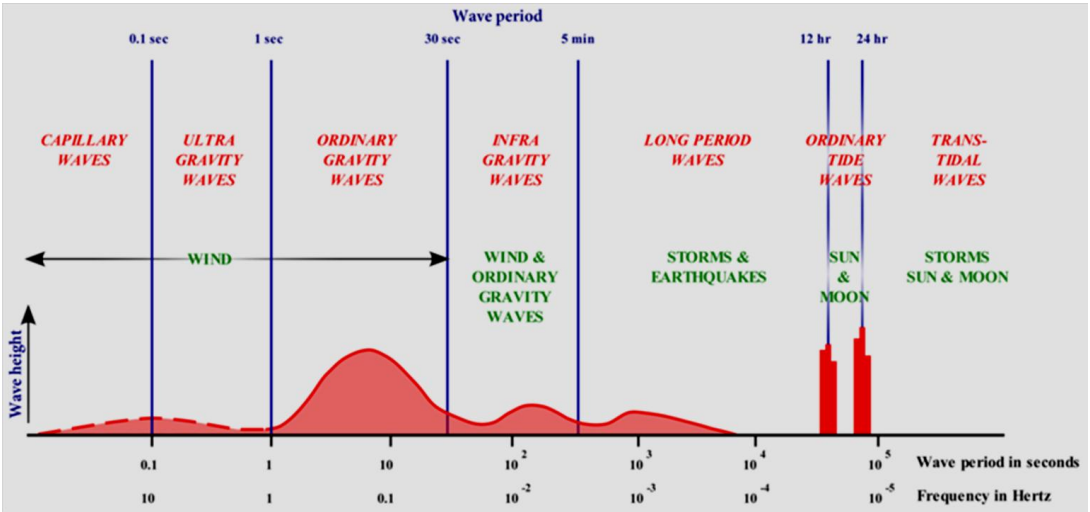
چکیده

با افزایش نیاز به نفت و گاز، تعداد بی‌شماری سازه دریایی در سراسر جهان در حال ساخت است. سازه‌های فراساحلی برای مقابله با نیروی تصادفی حاصل از امواج و بادها طراحی شده است. نیروی حاصل از امواج برخوردی به سازه‌های دریایی از اهمیت بسزایی برخوردار است. پیش‌بینی نیروی امواج در فرکانس‌های مختلف مهم است زیرا در فرکانس‌های بالا موجب خستگی در المان‌های سکو می‌شود و در فرکانس‌های پایین بعلت اینکه نیرو مقدار قابل توجهی دارد. بنابراین در این مقاله تحلیل طیفی (حوزه فرکانس) نیروی امواج برخوردی به سازه‌های دریایی بررسی شده است. در این مقاله از معادله موریسون برای تعیین نیروی موج استفاده شده است و بعلت خطی بودن روابط در تحلیل طیفی، معادله موریسون خطی شده است، با در نظر گرفتن یک طیف موج استاندارد، طیف سرعت و شتاب موج بدست آمده است، سپس با استفاده از معادله موریسون طیف نیروی اینرسی و پسای محاسبه شده است. در نهایت طیف نیرو برای دو شمع با قطرهای مختلف بررسی شده است و پارامترهای آماری طیف نیروها تعیین شده است.

کلمات کلیدی: تحلیل طیفی، نیروی امواج، خطی‌سازی موریسون، عمق نفوذ امواج

مقدمه

بارهای محیطی که به سازه‌های دریایی اعمال می‌شود شامل بار جریان‌های دریایی، زمین‌لرزه‌ای، باد، امواج دریا می‌باشد. در طبیعت انواع گوناگونی از امواج مانند امواج صوتی، امواج الکترومغناطیسی و امواج سطحی درسیالات وجود دارند. درتمامی این امواج نقاط مشترکی وجود دارند که عبارتند از: الف) همه آنها از منبعی نشأت می‌گیرند. ب) تمامی آنها درمحیط خود پخش می‌شوند و به اجسام درمسیر خود انرژی منتقل می‌کنند. ج) درهمه امواجی که الگوی حرکتی خاص تکرار می‌شود. یعنی منحنی‌های حرکت آنها متناوب هستند. همانطور که از شکل(1) مشاهده می‌شود کمترین پریود مربوط به امواج کشش سطحی می‌باشد که پریود آنها کمتر ۰/۱ ثانیه و حداکثر ارتفاع آنها ۲ میلی‌متر می‌باشد. امواج گرانشی پریود بیشتری نسبت به امواج کشش سطحی دارند و پریود آنها از ۰/۱ تا ۵ دقیقه می‌باشد. امواج بلند که شامل نوسانات آزاد حوضچه بنادر، سونامی، برکشند ناشی از توفان و کشند نجومی می‌باشند دارای پریودهای بزرگتر از ۵ دقیقه هستند. همچنین بیشترین انرژی مربوط به امواج ناشی از باد می‌باشد که معمولا پریودهای کمتر از ۱۵ ثانیه دارند. البته لازم به ذکر است که امواج دورا (امواج ناشی از باد که تا خارج از ناحیه وزش باد حرکت کرده‌اند) پریودهای بیشتری نسبت به امواج محلی ناشی از باد دارند [1].



شکل ۱: طبقه‌بندی امواج دریا بر اساس پریود[۱].

یکی از کاربردهای مهم امواج آب تعیین نیروهای ایجاد شده توسط امواج بر روی سازه‌های ثابت و یا اجسام شناور در حال حرکت می‌باشند. همه این اجسام در معرض نیروی موج قرار دارند و بنابراین برای طراحی این سازه‌ها، نیروهای امواج از اهمیت قابل توجهی برخوردارند. بررسی نیروی امواج سابقه‌ی طولانی دارد و مطالعات متعدی برای تخمین نیروهای موج وارد بر شمع‌های قائم انجام شده است، اما تا به امروز حتی برای این مورد بسیار ساده یک روش محاسبه‌ای برای تعیین نیروی موج ارائه نشده است که در مورد آن توافق کامل وجود داشته باشد [2].

بورگمن در سال ۱۹۶۵ ، به روش آماری نیروهای هیدرودینامیکی حاصل از برخورد امواج مورد بررسی قرار داد سپس در سال ۱۹۶۷ با استفاده از تئوری مربوط به طیف‌ها به بررسی نیروی حاصل از امواج را که در آن مولفه‌ی نیروی پسا را صرفنظر نکرده است پرداخت[3,4,5]. دین و همکاران در سال ۱۹۷۰ به آنالیز داده‌های نیروی امواج و روش‌های محاسبات آن در مهندسی را مورد مطالعه قرار داد[6]. گارسین و همکاران، نیروی امواج برخوردی به سازه‌های مغروق در سال ۱۹۷۲ بررسی کرد[7].

در این مقاله به تحلیل طیفی نیروی امواج دریا وارد بر سازه‌های دریایی پرداخته شده است. در این مقاله به معرفی نیروی امواج وارد بر المان‌های استوانه (معادله موریسون)، خطی سازی نیروی درگ، تعیین طیف انرژی موج و طیف سرعت و شتاب موج حاصل از آن، تغییرات طیف سرعت، شتاب و تابع چگالی طیفی نیروی درگ و اینرسی در ارتفاع‌های مختلف از سطح دریا ، تعیین تابع چگالی طیفی نیروی اینرسی و درگ و کل برای دو مطالعه موردی بررسی شده است.

نیروی امواج

در بارگذاری امواج بر المان‌های سازه‌های دریایی مانند المان‌های جاکت، لوله‌های قرار گرفته در کف دریا، شمع‌های دریایی که $D/\lambda < 0.2$ می‌باشد و اثر تفرق امواج برخوردی قابل صرفظر کردن می‌باشد، برای تعیین نیروی امواج می‌توان از معادله موریسون استفاده کرد. در سال ۱۹۵۰ موریسون و همکارانش، طبق نتایج حاصل از کارهای آزمایشگاهی، یک فرمول تجربی برای نیروهای وارد بر استوانه‌ها در حضور سطح امواج معرفی کردند. طبق فرمول موریسون نیروی امواج وارد بر المان‌های استوانه از دو مولفه تشکیل شده است [8].

مولفه‌ی اول، نیروی درگ یا پسا می‌باشد که با مربع سرعت ذرات آب متانسب است و مولفه‌ی دوم، نیروی اینرسی است که با شتاب ذرات آب متناسب می‌باشد. نیروی موج طبق معادله موریسون بصورت زیر می‌باشد.

$$F(z,t) = F_I + F_D = C_I \dot{v}_x + C_D v_x |v_x| \quad (۱)$$

F_I نیروی اینرسی، F_D نیروی پسا، v_x و $\dot{v}_x$ بترتیب سرعت و شتاب ذرات آب، C_I ضریب اینرسی و C_D ضریب پسا می‌باشد.

$$C_I = C_M + C_A = c_m \rho A + \rho A = (c_m + 1)\rho A = c_i \frac{\rho \pi D^2}{4} \quad (2)$$

که c_i ضریب اینرسی برای مقطع، c_m ضریب جرم‌افزوده و A سطح مقطع می‌باشد. نیروی اینرسی بر واحد طول برابر است با:

$$\begin{aligned} F_I(z,t) &= C_I \dot{v}_x = C_M \dot{v}_x + C_A \dot{v}_x \\ &= c_m \frac{\rho \pi D^2}{4} \dot{v}_x + \frac{\rho \pi D^2}{4} \dot{v}_x \end{aligned} \quad (۳)$$

همچنین ارتباط بین C_D و c_d بصورت رابطه (۴) می‌باشد.

$$C_D = \frac{1}{2} \rho c_d D \quad (۴)$$

خطی‌سازی نیروی موج (معادله مورسیون)

ترم پسا در معادله موریسون غیرخطی است و برای مسائل خطی، خطی‌سازی ضروری می‌باشد. اگر ما فرض کنیم بک ضریب پسا خطی‌سازی شده $\bar{C}_D$ فرض کنیم داریم [8]:

$$\begin{aligned} F &= C_M \dot{v}_x + \bar{C}_D v_x + C_A \dot{v}_x + C_D v_x |v_x| - \bar{C}_D v_x \\ &= C_M \dot{v}_x + \bar{C}_D v_x + C_A \dot{v}_x + K \end{aligned} \quad (۵)$$

K می‌تواند تابع خطا باشد که سعی می‌شود صفر شود. برای مینیمم کردن K از روش حداقل مربع استفاده می‌شود.

$$\left\langle \frac{\partial K^2}{\partial \bar{C}_D} \right\rangle = -2\left\langle (C_D v_x^2 |v_x| - \bar{C}_D v_x^2 \right\rangle = 0 \quad (۶)$$

$\langle \ \rangle$ میانگین زمانی را نشان می‌دهد. از معادله (۶) داریم:

$$\bar{C}_D = C_D \left\langle \frac{v_x^2 |v_x|}{v_x^2} \right\rangle \quad (۷)$$

برای یک فرآیند گوسی با میانگین صفر داریم:

$$\left\langle v_x^2 \right\rangle = \sigma_{v_x}^2 \quad (۸)$$

$$\left\langle |v_x| \right\rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{v_x} \quad (۹)$$

$$\left\langle v_x^2 |v_x| \right\rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{v_x}^3 \quad (۱۰)$$

$$\bar{C}_D = C_D \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{v_x} \quad (۱۱)$$

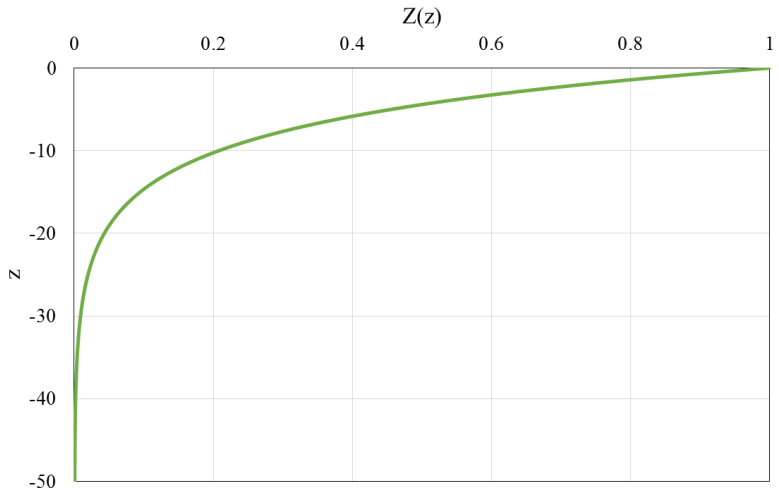
بنابراین معادله موریسون خطی سازی شده بصورت رابطه (۱۲) می‌باشد.

$$F(z,t) = C_I \dot{v}_x + C_D \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{v_x} v_x \quad (۱۲)$$

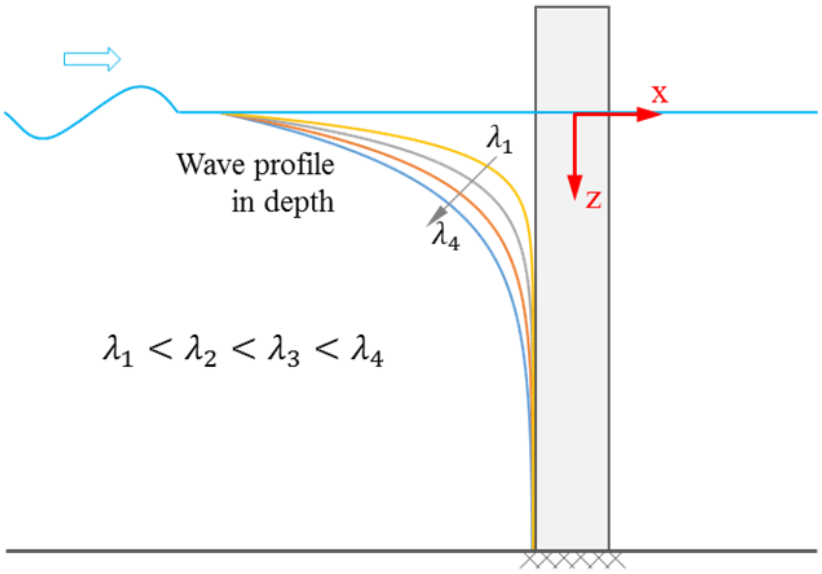
عمق نفوذ موج

امواج دریا تا عمق خاصی نفوذ می‌کند، برای تعیین نیروی امواج وارد بر سازه‌های دریایی تعیین عمق نفوذ امواج مهم می‌باشد. برای سکوی جاکت المان‌ها در ارتفاع‌های مختلف از سطح آب قرار گرفته‌اند. بنابراین تعیین اینکه موج به چه المان‌هایی برخورد می‌کند مهم می‌باشد. پروفیل نفوذ موج در عمق برابر است:

$$Z(z) = \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh(kd)} \quad (۱۳)$$



شکل۲: پروفیل نفوذ موج در عمق



شکل۳: عمق نفوذ موج

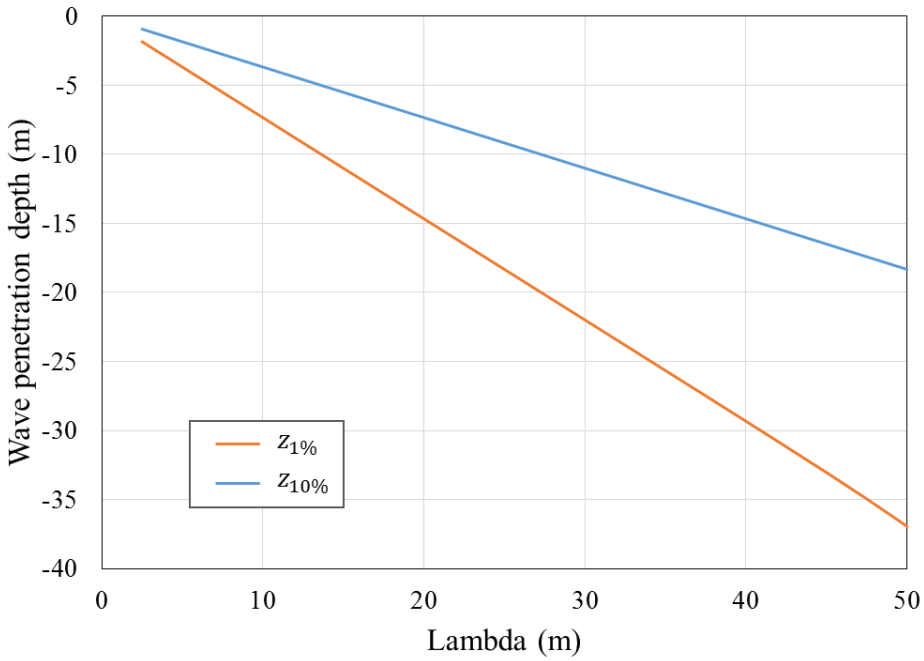
پروفیل موج در عمق وابسته به دو پارامتر عمق دریا و طول موج می‌باشد. مقدار بیشینه عبارت رابطه (۱۳) برابر با $Z(z=0)=1$ است. با فرض $Z(z)=a$، عمق از سطح دریا بصورت رابطه (۱۴) تعیین می‌گردد:

$$z=\frac{\cosh^{-1}(a\sinh(kd))}{k}-d \qquad (۱۴)$$

روابط (۱۵) و (۱۶)، عمق بر حسب طول موج را برای مقادیر $a=1\%Z(z=0)$ و $a=10\%Z(z=0)$ را ارائه می‌دهد. شکل ۴ بیانگر این روابط بر حسب طول موج می‌باشد.

$$z_{1\%}(\lambda)=-0.74\lambda \qquad (۱۵)$$

$$z_{10\%}(\lambda)=-0.37\lambda \qquad (۱۶)$$



شکل۴: نمودار عمق نفوذ موج بر حسب طول موج

با استفاده از معادلات (۱۵) و (۱۶) می‌توان با در اختیار داشتن طول موج ، موج موردنظر، فاصله از سطح آب که از آن ارتفاع به بعد کم‌تر از 10% و 1% نیروی موج را شامل می‌شود را تعیین کرد. از طرفی بعلت محاسبات پیچیده و طولانی بدست آوردن نیروی موج و برای طراحی اولیه سازه‌های دریایی و تخمین اولیه نیروی امواج می‌توان با استفاده از این روش عمق نفوذ موج را محاسبه کرد.

طیف انرژی موج

برای مناطق محدود به ساحل (موجگاه‌های محدود)، که امواج آن‌ها توسط باد تولید می‌شوند (امواج محلی)، مدل طیف موج جانسواپ پیشنهاد شده است[9, 10]. در این محدوده امواج تنها توسط باد و در همان منطقه تولید می‌گردند و امواج موجگاه‌های دوردست (امواج دورآ) در این محدوده مشاهده نمی‌شود. با توجه به موقعیت جغرافیایی دریای خلیج فارس و محدود بودن آن به سواحل اطراف، می‌توان از این طیف برای امواج منطقه استفاده نمود.

طیف جانسواپ بر اساس مطالعات و اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در دریای شمال توسط هاسلمن و همکاران (۱۹۷۳) ارائه گردیده است. رابطه ریاضی طیف مذکور به صورت زیر بیان می‌گردد[9, 11]:

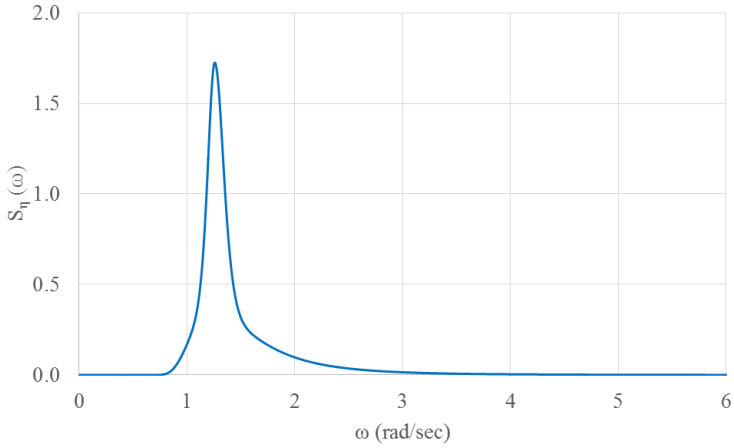
$$S_{\zeta}(\omega)=\frac{320.H_{1/3}^{2}}{T_{p}^{4}}.\omega^{-5}.\exp\left\{\frac{-1950}{T_{p}^{4}}.\omega^{-4}\right\}.\gamma^{A} \qquad (۱۷)$$

که:

$$\gamma=3.3 \qquad (۱۸)$$

$$A=\exp\left\{-\left(\frac{\frac{\omega}{\omega_{p}}-1}{\sigma\sqrt{2}}\right)^{2}\right\} \qquad (۱۹)$$

$$\omega_{p}=\frac{2\pi}{T} \qquad (۲۰)$$



شکل۵: طیف انرژی موج جانسواپ با $H_{1/3}=3m$ **و** $T_{P}=5s$

طیف سرعت و شتاب موج

ابتدا روابط اولیه مربوط تئوری موج خطی بیان می‌شود[12].

$$\eta(x,t)=\alpha\cos(\omega_{n}t-k_{n}x+\phi_{n}) \qquad (۲۱)$$

$$v(x,t)=\alpha\omega Z(z)\cos(\omega_{n}t-k_{n}x+\phi_{n}) \qquad (۲۲)$$

$$a(x,t)=\alpha\omega^2 Z(z)\cos(\omega_n t-k_n x+\phi_n) \quad (۲۳)$$

که η ، ν ، a ، α ، k ، ω ، θ ، z و d بترتیب سطح موج، سرعت ذرات آب، شتاب، دامنه، عدد موج، فرکانس، فاز، فاصله از سطح آب و عمق آب می‌باشد.

از آنجایی که میانگین مربع دامنه‌ها با سطح زیر طیف برابر می‌باشد و بصورت رابطه (۲۴) بیان می‌شود می‌توان ارتباط بین طیف شتاب و سرعت موج با طیف انرژی موج را بدست آورد.

$$E[\eta^2(x,t)]=\sum_{n=1}^{N}2S_\eta(\omega)\Delta\omega \quad (۲۴)$$

$$E[\nu^2(x,z,t)]=\sum_{n=1}^{N}2S_\eta(\omega,z)\Delta\omega \quad (۲۵)$$

$$E[a^2(x,z,t)]=\sum_{n=1}^{N}2S_a(\omega,z)\Delta\omega \quad (۲۶)$$

طبق روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) داریم:

$$E[\eta^2(x,t)]=\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{2}\alpha_n^2 \quad (۲۷)$$

$$E[\nu^2(x,z,t)]=\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{2}\alpha_n^2\omega_n^2 Z_n^2 \quad (۲۸)$$

$$E[a^2(x,z,t)]=\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{2}\alpha_n^2\omega_n^4 Z_n^2 \quad (۲۹)$$

$$S_\eta(\omega,z)=\frac{1}{4\Delta\omega}\alpha_n^2 \quad (۳۰)$$

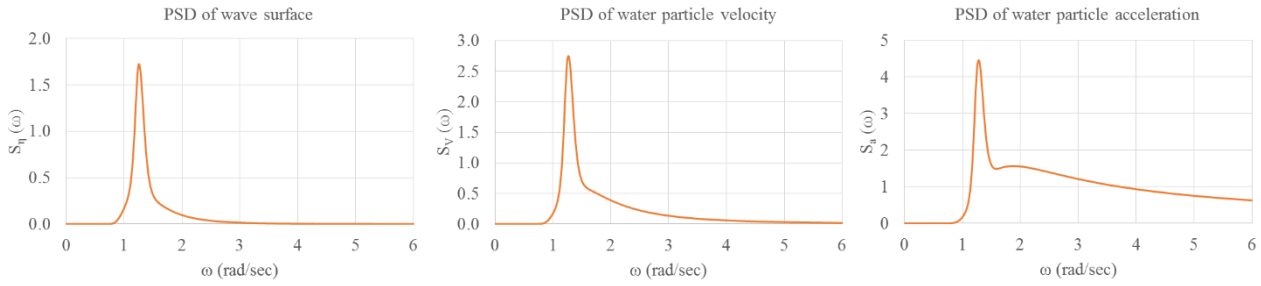
$$S_\nu(\omega,z)=\frac{1}{4\Delta\omega}\alpha_n^2\omega_n^2 Z_n^2 \quad (۳۱)$$

$$S_\nu(\omega,z)=\frac{1}{4\Delta\omega}\alpha_n^2\omega_n^4 Z_n^2 \quad (۳۲)$$

بنابرای طیف چگالی انرژی سرعت و شتاب اموج به شکل معادلات (۳۴) و (۳۵) بیان می‌شوند.

$$S_\nu(\omega,z)=\omega^2 Z^2(\omega,z)S_\eta(\omega) \quad (۳۳)$$

$$S_a(\omega,z)=\omega^4 Z^2(\omega,z)S_\eta(\omega) \quad (۳۴)$$



شکل۶: طیف سرعت و شتاب موج حاصل از طیف انرژی موج

روش طیفی برای تعیین نیروی موج

برای تعیین نیروی موج با استفاده از معادله موریسون به روش طیفی بعلت خطی بودن ارتباط بین طیف نیروی امواج با طیف شتاب و سرعت و طیف چگالی انرژی موج باید معادله موریسون خطی شود. بنابرای مطابق معادله (۱۲)، طیف نیروی پسا، اینرسی بشکل معادلات (۳۵) و (۳۶) بیان می‌شود[12].

$$S_{F_D}(\omega,z)=\frac{8}{\pi}(\frac{1}{2}c_d\ \rho D\ \sigma_v)^2 S_v(\omega,z) \quad (۳۵)$$

$$S_{F_I}(\omega,z)=(c_m\ \rho\frac{\pi D^2}{4})^2 S_a(\omega,z) \quad (۳۶)$$

که:

$$\sigma_v^2=\int_{-\infty}^{\infty} s_v(\omega,z)\,d\omega \quad (۳۷)$$

در نهایت طیف نیروی کل بر یک شمع بصورت رابطه (۳۹) می‌باشد.

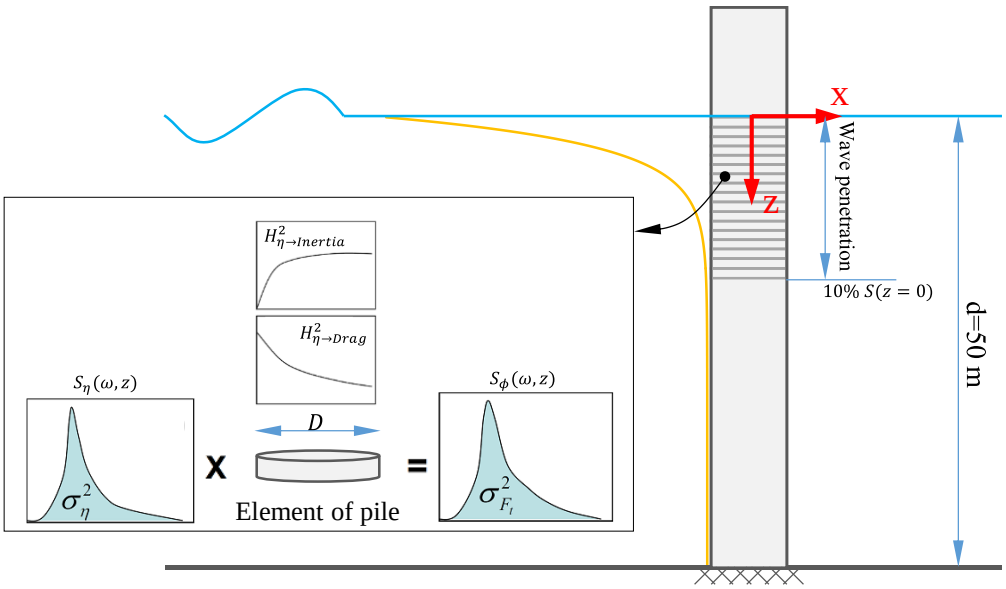
$$S_F(\omega,z)=(\sqrt{\frac{8}{\pi}}.\frac{1}{2}c_d\ \rho D\ \sigma_v)^2 S_v(\omega,z)+(c_m\ \rho\frac{\pi D^2}{4})^2 S_a(\omega,z) \quad (۳۸)$$

$$S_F(\omega,z)=(\sqrt{\frac{8}{\pi}}.\frac{1}{2}c_d\ \rho D\ \sigma_v\omega Z(\omega,z))^2 S_\eta(\omega)+(c_m\ \rho\frac{\pi D^2}{4}\omega^2 Z(\omega,z))^2 S_\eta(\omega) \quad (۳۹)$$

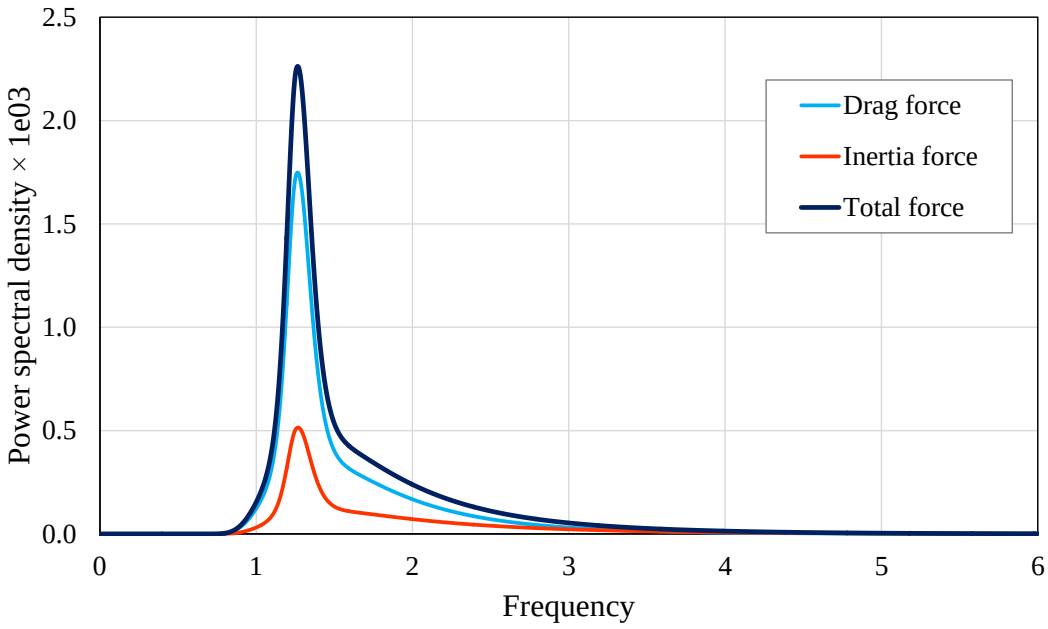
$$S_F(\omega,z)=H^2_{\eta\to Drag}\ ^2 S_\eta(\omega)+H^2_{\eta\to Inertia} S_\eta(\omega) \quad (۴۰)$$

مطالعه موردی

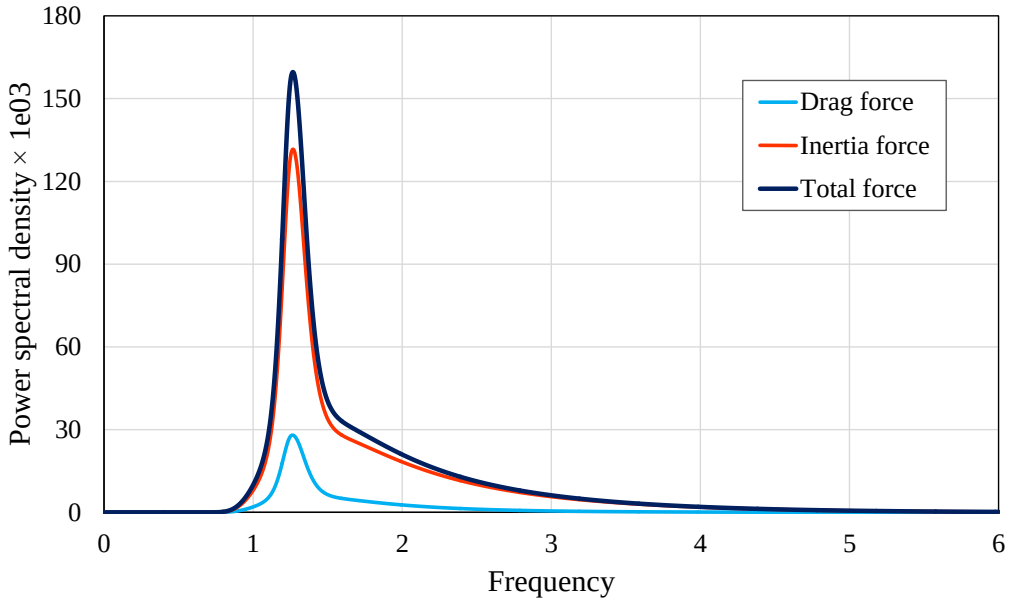
در ادامه تحلیل طیفی نیروی موج برخوردی به دو شمع به ارتفاع $60m$ و قطرهای $0.5m$ و $3m$ در آبی به عمق $50m$ بررسی شده است. طیف‌های نیروی نمایش داده شده حاصل از مجموع طیف‌های المان‌های با طول واحد در ارتفاع از سطحهای مختلف می‌باشد.



شکل۷: طیف سرعت و شتاب موج حاصل از طیف انرژی موج



شکل۷: طیف نیروی اینرسی، پسا وکل موج برخوردی به شمع به قطر $0.5m$

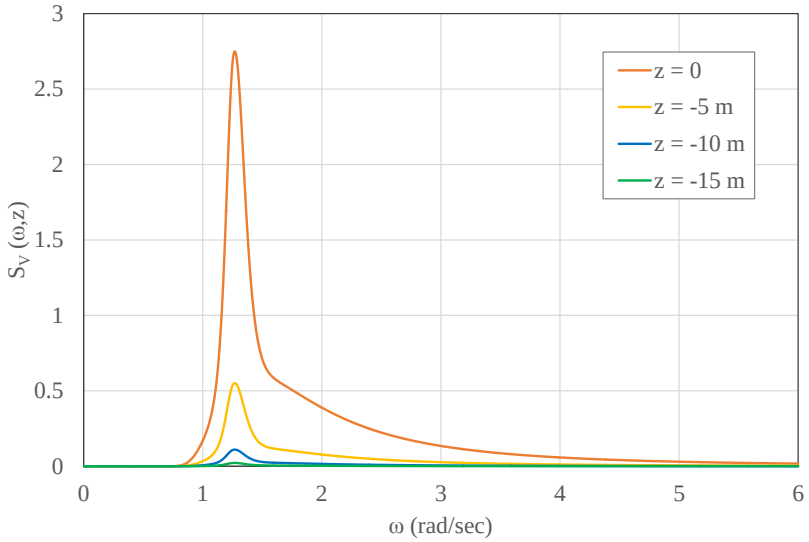


شکل۸: طیف نیروی اینرسی، پسا وکل موج برخوردی به شمع به قطر $2m$

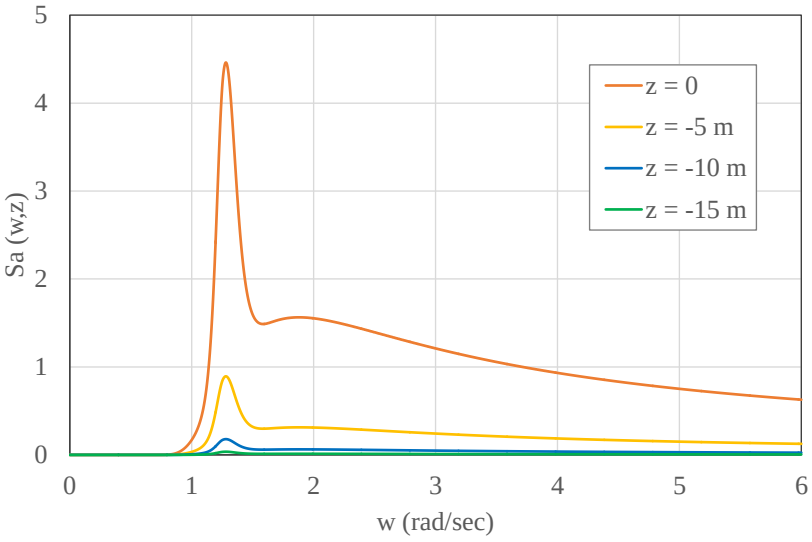
همانطور که از شکل (۷) مشخص است که طیف نیروی برخوردی به شمع به قطر $0.5m$ را نمایش می‌دهد، طیف نیروی پسا به طیف نیروی کل نزدیک می‌شود، بنابراین در این حالت نیروی پسا حاکم می‌باشد و در شکل (۸) که طیف نیروی برخوردی به شمع به قطر $2m$ بررسی می‌شود، نیروی اینرسی حاکم می‌باشد. بنابراین با افزایش قطر نیروی اینرسی غالب است در نتیجه برای المان‌های سکوی جاکت نیروی پسا حاکم و برای ستون‌های سکوی پایه کششی و نیمه‌شناور و یا ستون سکوی اسپار بعلت اینکه قطر المان‌ها بزرگ می‌باشد نیروی اینرسی حاکم می‌باشد.

تغییرات طیف سرعت، شتاب، نیروی اینرسی و درگ در ارتفاع‌های مختلف از سطح آب

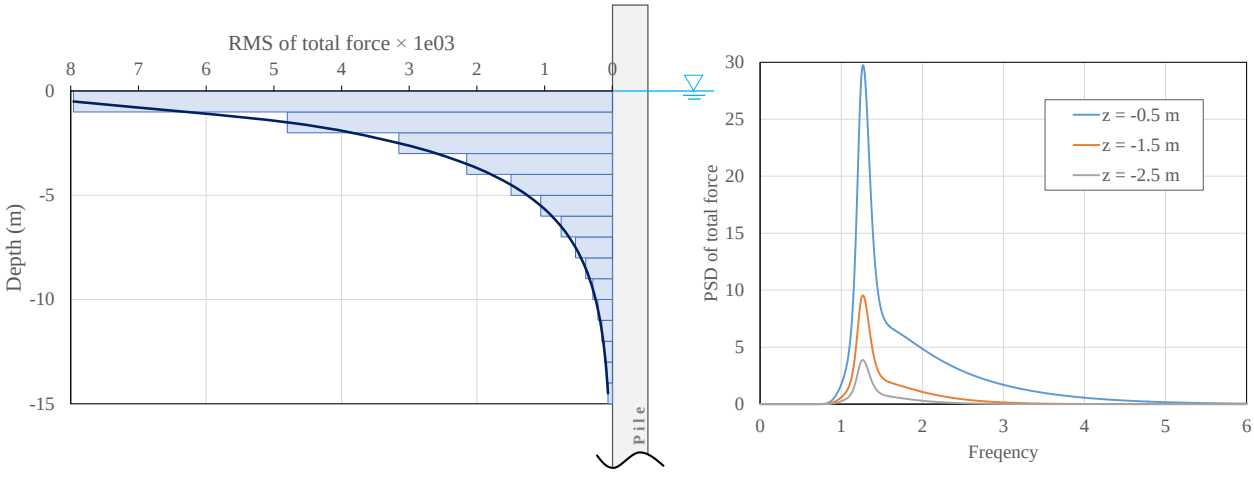
شکل (۹) و (۱۰) بترتیب تغییرات طیف سرعت و شتاب موج در ارتفاع‌های مختلف از سطح آب را نمایش می‌دهد. شکل (۱۱) نشان‌دهنده طیف نیروی موج برخوردی در ارتفاع‌های مختلف از سطح است.



شکل۹: طیف سرعت موج در ارتفاع‌های مختلف از سطح آب



شکل۱۰: طیف شتاب موج در ارتفاع‌های مختلف از سطح آب



شکل۱۱: طیف نیروی موج بر واحد طول، برای شمع با قطر ۲ متر در ارتفاع‌های مختلف از سطح آب

طیف سرعت موج و RMS آن، طبق معادله موریسون برای محاسبه طیفی نیروی درگ و نیروی درگ مورد استفاده قرار می‌گیرد همچنین طیف شتاب موج و RMS آن، طبق معادله موریسون برای محاسبه طیفی نیروی اینرسی و نیروی اینرسی کاربرد دارد. مطابق شکل (۹) و (۱۰) از ارتفاع ۱۵ متری از سطح آب طیف‌های سرعت و شتاب موج ناچیز می‌باشد به تبع آن طیف نیروی درگ و اینرسی در این ارتفاع از سطح آب قابل صرفنظر کردن می‌باشد. شکل (۱۱) طیف نیروی کل موج برخوردی را نمایش می‌دهد. با افزایش فاصله از سطح آب طیف نیروی موج برخوردی کاهش می‌یابد.

تعیین پارامترهای آماری

ممان‌های طیف پاسخ با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌گردد[9].

$$m_{nz} = \int_0^{\infty} S_Z(\omega).\omega^n.d\omega \qquad (۴۱)$$

with: n=0,1,2,...

که $n=0$ سطح زیر نمودار طیف انرژی محاسبه می‌شود و جذرگیری از مساحت،[۱] RMS پاسخ بدست می‌آید. $n=1$ ممان اول و $n=2$ ممان اینرسی منحنی طیف انرژی را می‌دهد. دامنه پاسخ شاخص از تابع چگالی طیفی محاسبه می‌گردد، و بعنوان میانگین $\frac{1}{3}$ از بزرگترین دامنه‌ها معرفی می‌شود. و همچنین میانگین دامنه پاسخ بصورت زیر بیان می‌گردند.

$$RMS = \sqrt{m_{oz}} \qquad (۴۲)$$

$$F_{1/3} = 2.RMS = 2\sqrt{m_{oz}} \qquad (۴۳)$$

$$\bar{F} = 1.25RMS = 1.25\sqrt{m_{oz}} \qquad (۴۴)$$

جدول۱: پارامترهای آماری طیف نیروی امواج

Statistical Parameter	S_{F_I} Case study (1)	S_{F_D} Case study (1)	S_{F_t} Case study (1)	S_{F_I} Case study (2)	S_{F_D} Case study (2)	S_{F_t} Case study (2)
RMS Response	**0.4835**	**0.8079**	**0.9415**	**7.7367**	**3.2315**	**8.3844**
Significant Response	**0.9670**	**1.6158**	**1.8830**	**15.4734**	**6.4630**	**16.7688**
Mean Response	**0.6044**	**1.0099**	**1.1769**	**9.6709**	**4.0394**	**10.4805**

نتیجه‌گیری

۱) برای تحلیل طیفی نیروی امواج برخوردی طبق معادله موریسون، معادله موریسون باید خطی‌سازی شود.

۲) پروفیل موج به دو پارامتر طول موج و عمق آب بستگی دارد. با افزایش طول موج عمق نفوذ افزایش می‌یابد.

۳) با توجه به شکل (۲)، پروفیل نفوذ امواج یکنواخت نمی‌باشد. و بصورت هایپربولیکی در عمق تغییر می‌کند. بنابراین در هر فاصله از سطح آب سهم متغیری در نیروی موج برخوردی دارد.

۴) به علت محاسبات پیچیده و طولانی تعیین نیروی امواج، همچنین طراحی اولیه سازه‌های دریایی و تخمین اولیه از نیروی امواج، می‌توان با استفاده از معادلات (۱۵) و (۱۶)، ارتفاعی از سطح آب که کم‌تر از 10% و 1% نیروی امواج را در برمی‌گیرد را محاسبه کرد.

۵) طیف چگالی انرژی موج تابعی از فرکانس موج می‌باشد، طیف سرعت و شتاب موج تابعی از فرکانس موج و فاصله از سطح دریا است.

۶) توان دوم سطح زیر نمودار طیف سرعت موج و طیف انرژی موج بترتیب متناسب با انرژی جنشی موج و انرژی کل موج است.

۷) طیف نیروی پسا به طیف سرعت موج و طیف نیروی اینرسی به طیف شتاب موج وابسته است.

---

[۱] Root Mean Square

۸) طبق دو مطالعه موردی نیروی امواج برخوردی، برای المان‌های لاغر (المان‌های سکوی جاکت) نیروی درگ حاکم و برای المان‌های قطور (ستون‌های سکوی پایه‌کششی) نیروی اینرسی حاکم است.

۹) طیف سرعت و شتاب با افزایش فاصله از سطح آب کاهش می‌یابد و از یه عمقی به بعد طیف سرعت و شتاب ناچیز می‌باشد و متناسب با آن طیف نیروی پسا و اینرسی کاهش می‌یابد و اثر آن از یه فاصله از سطح آب قابل صرفنظر کردن می‌باشد.

۱۰) مطابق پارامترهای آماری بدست آمده در جدول (۱)، در مطالعه موردی اول تقریبا تمامی پارامترهای آماری طیف نیروی پسا دو برابر طیف نیروی اینرسی می‌باشد و پارامترهای آماری طیف نیروی کل تقریبا نزدیک طیف نیروی پسا می‌باشد، بنابراین برای این نوع شمع محاسبه نیروی پسا کافی می‌باشد.

۱۱) همانطور که از پارامترهای آماری محاسبه شده در جدول (۱)، در مطالعه موردی دوم، همه‌ی پارامترهای آماری طیف نیروی اینرسی از دو برابر طیف نیروی پسا بیشتر می‌باشد. از مقایسه پارامترهای آماری طیف نیروی کل و اینرسی پر واضح می‌باشد که مقادیر آنها به یکدیگر نزدیک می‌باشد.

مراجع

[1] Moses, F., Reliability based design of offshore structures, Presented at the Annual Meeting Papers, Divison of Production, San Francisco, CA, 1981.

[2] Dalrymple, Robert A.; Dean, Robert George. Water wave mechanics for engineers and scientists. Prentice-Hall, 1991.

[3] Borgman, L. E., "A Statistical Theory for Hydrodynamic Forces on Objects," Hydraulic Engineering Laboratory Rep. HEL 9-6, University of California at Berkeley, Oct. 1965a.

[4] Borgman, L. E., "Spectral Analysis of Ocean Wave Forces on Piling," J. Waterways Harbors Div., ASCE, Vol. 93, No. WW2, May 1967.

[5] Borgman, L. E., "The Spectral Density for Ocean Wave Forces," Hydraulic Engineering Laboratory Rep. HEL 9-8, University of California at Berkeley, Dec. 1965b.

[6] Dean, R. G., Dalrymple, R. A"Wave Forces, Data Analysis and Engineering Calculation Method," J. Petrol. Technol., Mar. 1970.

[7] GARRISON, C. J., and Fy. CHOW, "Wave Forces on Submerged Bodies," J. Waterways, Harbors Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 98, No. WW3, Aug. 1972.

[8] C.A.Brebbia, S.Walker "Dynamic Analysis Of Offshore Structures," Newnes-Butterworths London boston Sydney Wellington Durban Toronto. 1979.

[9] Journee, J., Massie, W., Offshore hydromechanics, Delft University of Technology, 2001.

[10] ITTC, The Specialist Committee on Waves, in: Proceedings of the 23rd International Towing Tank Conference, 2002, 505-706.

[11] DNV-RP-C205. Environmental conditions and environmental loads. Det Norske Veritas 2010.

[۱۲] C. Y. Yang, "Random Vibration of Structures" ISBN-13: 978-0471802624

[۱۴] م. تابش پور، ۱۳۹۳، مقدمه‌ای بر ارتعاشات تصادفی بر اساس کتاب نیولند، انتشارات فدک ایساتیس.

[۱۵] م. تابش پور، جزوه درس طراحی و تحلیل سکوهای شناور، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف.