مقاله

ارزیابی، شناسایی و کنترل ارتعاشات در شناورهای تندروی دریایی

علی مهرکیش*
دانشجوی دکتری گروه مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
ali.mehrkish@Yahoo.com

علی‌اکبر اکبری
دانشیار گروه مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
akbari@um.ac.ir

محمدرضا غلامی
دانشجوی دکتری گروه مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری
mrgholami14@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۱

چکیده

مسائل مرتبط با ارتعاشات و بهبود عملکرد در شناورهای تندرو در سه سطح ارزیابی ارتعاشات، شناسایی منابع و کنترل ارتعاشات تقسیم‌بندی می‌گردند. هر سه سطح اشاره شده، موضوع پژوهش بسیاری از محققان در سال‌های اخیر بوده‌اند. با این وجود نیاز به ارائه پژوهشی منسجم در این باب ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مقاله ارتعاشات در شناورهای تندرو در سه قالب اشاره شده بررسی می‌گردد. بر این اساس سلامت افراد، ادوات و کیفیت عملکرد سه ملاک اصلی ارزیابی ارتعاشات خواهند بود. همچنین منابع ارتعاشات در دو سطح منابع داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌گردند. در نهایت نیز چهار روش جهت کنترل ارتعاشات پیشنهاد می‌شوند. این پژوهش به‌ویژه برای محققانی که به تازگی به این حوزه ورود می‌کنند، می‌تواند پایه‌ای مناسب برای مطالعات آتی ایشان باشد.

واژگان کلیدی: ارتعاشات، شناور تندرو، ارزیابی ارتعاشات، شناسایی منابع، کنترل ارتعاشات.

۱. مقدمه

وجود نیروهای متغیر و نوسانی وارد بر پروانه، نیروهای انتقالی از محور[1]ها در اثر نامنظمی جریان‌های گردابه‌ای، تغییر میدان فشار دینامیکی اطراف بدنه، وجود قطعات نامتوازن دوار، هم‌محور نبودن، فرسایش و موارد مشابه در ماشین‌آلات (از جمله در شناورهای دریایی) به عنوان منابع اصلی ارتعاشات محسوب می‌شوند [۱]. علاوه‌بر موتورهای اصلی و ماشین‌آلات فرعی، عکس‌العمل موتورها در برابر تغییر بار وارده به آن‌ها و نیز نوسانات نیروهای خارجی وارده از دریا (به‌ویژه نیروهای ناشی از برخورد سطح آب دریا با کف یا بغل شناور در اثر سرعت شناور یا موج یا ترکیبی از هر دو) منشأ ایجاد ارتعاشات در تمام جهات در بدنه هستند. این ارتعاشات می‌تواند در کل بدنه شناور، یا به صورت موضعی در بخش‌های خاصی رخ بدهند. بدنه شناور ترکیبی از تیرها و ورق‌ها است که هر یک از آن‌ها فرکانس‌های طبیعی متعددی دارند. در نتیجه بدنه شناور می‌تواند در مُدهای عمودی، افقی، پیچشی و طولی مستقل از هم یا به‌صورت ترکیب با یکدیگر در فرکانس‌های متعددی ارتعاش کند. همچنین ماشین‌آلات نیز می‌توانند منشأ نیروهای ارتعاشی وسیعی باشند. بنابراین محدوده فرکانسی بزرگی وجود دارد که می‌تواند منجر به بروز تشدید یا ارتعاشات شدید در بدنه یا قسمت‌های خاصی از شناور و ماشین‌آلات آن شود. درنتیجه بررسی و محدود کردن ارتعاشات از عوامل مهم و اصلی در شناور می‌باشد. چراکه علاوه‌بر شکست‌های

ناشی از نیروهای ارتعاشی و خرابی ماشین‌آلات، وجود ارتعاشات (بیش ازحد مجاز) موجب وارد شدن صدمات بسیاری به خدمه و افراد حاضر در شناور و سایر تجهیزات می‌گردد، به‌گونه‌ای که ممکن است کاملاً کارآیی خود را از دست بدهند [۱].

شکل ۱. گام‌های تحلیل مسائل ارتعاشی در شناور

بر اساس شکل ۱، مطالعه و تحلیل ارتعاشات در شناورها شامل سه مرحله می‌شود: ارزیابی، شناسایی و کنترل ارتعاشات. در اولین گام نیاز است تا به ارزیابی ارتعاشات پرداخته شود. به عبارتی معیارهایی که بر اساس آن منابع ارتعاشات باید کنترل شوند، مشخص شوند. در ارزیابی ارتعاشات مهم‌ترین ملاک‌های ارزیابی عبارتند از سلامت افراد، سلامت بدنه و ماشین‌آلات و ارتقاء عملکرد نظامی. پس از ارزیابی ارتعاشات، نوبت به شناسایی منابع ارتعاشات خواهد رسید. چراکه هر منبع ویژگی‌های عملکردی خود را خواهد داشت و به طبع کنترل آن متفاوت از دیگر منابع صورت خواهد پذیرفت. سومین گام نیز کنترل ارتعاشات است که راهکارهای متنوعی خواهد داشت.

۲. ارزیابی ارتعاشات

در مطالعه و تحلیل مسائل مرتبط با ارتعاشات شناورها، ارزیابی ارتعاشات، پیش از مطالعه‌ی منابع ارتعاشات، شناسایی و کنترل آن‌ها، مطرح می‌شود. در این ارزیابی سه عامل زیر مورد توجه قرار می‌گیرند:

۱- سلامت افراد
۲- سلامت ادوات و بدنه
۳- کیفیت عملکرد

۲-۱. سلامت افراد

صدا و ارتعاش در موتورهای بنزینی که در اثر فرآیندهایی نظیر آنچه اشاره شد، به‌وجود می‌آیند، اثرات مخربی بر کاربران شناور دریایی خواهند داشت. عمده این اثرات در دراز مدت سبب به‌وجود آمدن نقایص جدی برای کاربران شناور خواهند شد. از جمله این موارد می‌توان به مشکلات شنوایی، دردهای استخوانی و عضلانی، و حتی مشکلات در سیستم عصبی اشاره نمود. این امر به‌ویژه در موتورهای دارای نسبت تراکم بالا و موتورهایی که فشار احتراق در آن افزایش می‌یابد، بیشتر خواهد بود [۲].

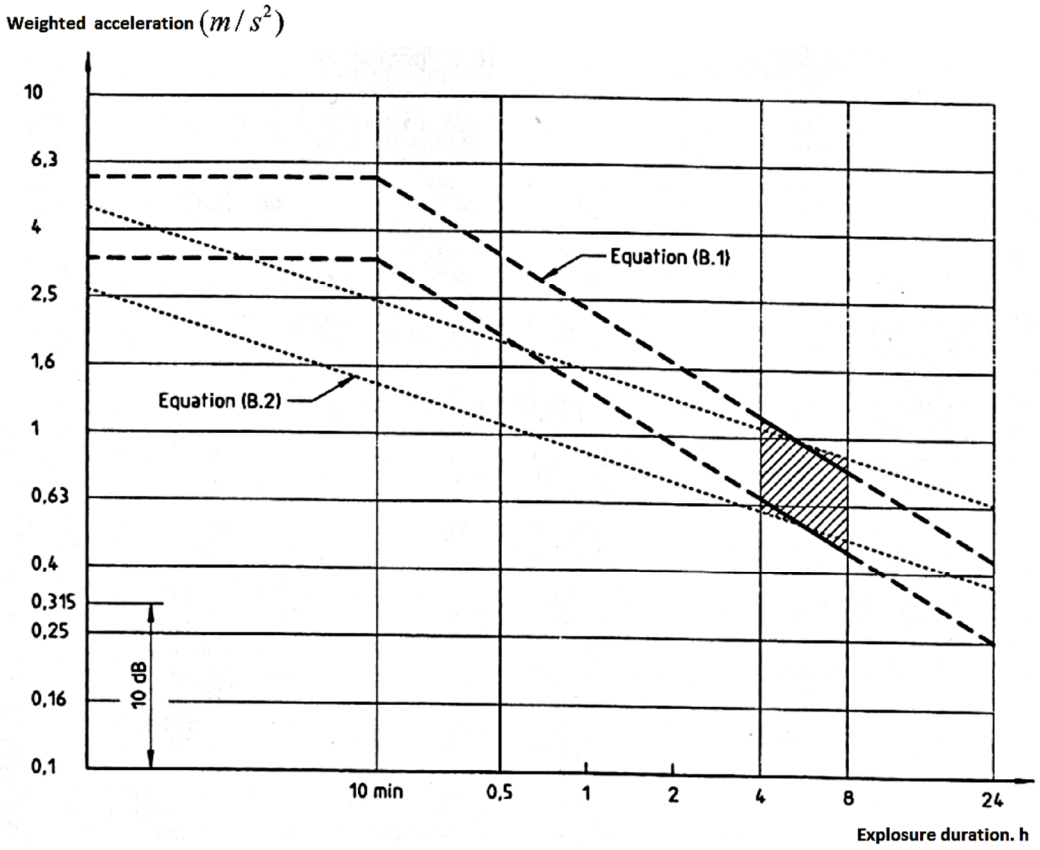
در شناورهای تندرو، ارتعاشات مکانیکی وارد بر بدن خدمه از برهم‌کنش حرکات جسم و سیال[۲] و ارتعاشات دوره‌ای سازه نظیر موتورها و سیستم رانش ناشی می‌گردد. خستگی، تنش روانی و کاهش کیفیت عملکرد خدمه می‌تواند در نتیجه‌ی نوسانات تکراری نظیر ضربات مکرر امواج به بدنه شناور رخ دهند [۳].

به‌علاوه در ارتعاشات با فرکانس بالا باید اثر ایجاد نوفه و کاهش شنوایی نیز در نظر گرفته شود. عموماً در ارتعاشات بالاتر از ۱ هرتز کاهش عملکرد ناشی از شتاب‌زدگی، بی‌نظمی، خستگی و نیز دردهای پشت کمر و گردن بروز می‌کند. اما در فرکانس‌های پایین (زیر ۰/۵ هرتز)، معمولاً این موارد رخ نمی‌دهند و به‌جای آن‌ها دریازدگی و ایجاد مشکلات عصبی محتمل است [۳].

میزان قرار گرفتن کاربر در معرض ارتعاش به عوامل مختلفی بستگی دارد از جمله: نوع و طراحی شناور تندرو، سرعت دریانوردی شناور، شرایط محیطی و وضعیت بدن بستگی دارد. طیف وسیعی از فرکانس‌ها در حدود ۰/۵ تا ۱۰۰ هرتز به بدن وارد می‌شوند [۴]. خدمه شناور تندرو به طورکلی در معرض انواع شتاب‌های خطی و دورانی در حین حرکت قرار می‌گیرند.

۲-۱-۱. پاسخ انسان به ارتعاشات وارده

در طول حمل و نقل دریایی، مقادیر ارتعاشات یک شناور تندرو بسیار بالاتر از سایر انواع شناور است. پتانسیل افزایش سرعت در این شناورها، به علت بهبود سیستم رانش، احتمال قرارگیری خدمه در معرض ضربات مکرر را افزایش می‌دهد که سبب آسیب‌های مختلفی برای سرنشینان می‌گردد [۳]. شکل ۲ نشان‌دهنده راهنمای محدوده‌های سلامت با توجه به شتاب وزنی و مدت قرارگیری در معرض ارتعاش بر اساس استاندارد ISO 2631-1 است [۵].



شکل ۲. راهنمای محدوده‌های احتیاط سلامت پیشنهاد شده [۵] توسط استاندارد ISO 2631-1

شناخت چگونگی پاسخ انسان به ارتعاشات، می‌تواند منجر به درک کلی از تأثیر حرکات شناور تندرو بر روی سرنشینان گردد. پاسخ انسان به ارتعاشات در محدوده ۰/۵ تا ۸۰ هرتز در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پاسخ انسان به فرکانس‌های متفاوت [۳]

علائم	فرکانس (هرتز)
بیماری حرکت، اوج بروز در ۰/۱۷ هرتز رخ می دهد	۰/۱۷ الی ۲
تشدید خمشی جانبی و محوری به سمت جلو و عقب ستون فقرات در حالت پشتیبانی نشده	۱ الی ۳
تشدید قوی عمودی در مهره گردن و قسمت تحتانی کمر	۲/۵ الی ۵
تشدید در تنه	۴ الی ۶
تشدید میان سر و شانه‌ها	۲۰ الی ۳۰
تشدید موضعی بافت‌ها و استخوان‌های کوچک‌تر	تا ۸۰

همان‌طورکه مشخص است تأثیر ارتعاشات بر بدن انسان در دست و پا و بدن قابل دریافت است. ارتعاشات برانگیخته سبب اثرات روانی و فیزیکی بر روی کاربران و متعاقبا کاهش عملکرد ایشان می‌گردد. بدن انسان ارگان‌های متنوعی دارد که هر یک بازه فرکانسی مخصوص خود را دارند. فرکانس مجاز برای هر یک عبارتند از [۶]:

۱) بخش‌هایی از بدن که بیش از سایر بخش‌ها به ارتعاشات حساس هستند و در فرکانس‌های ۴ الی ۸ هرتز رزونانس می‌کنند.

۲) سایر بخش‌ها مانند سر و حدقه چشم که در فرکانس ۲۰ الی ۳۰ هرتز و ۲۰ الی ۹۰ هرتز رزونانس می‌کنند.

در مجموع می‌توان عنوان نمود که اثرات ناشی از ارتعاشات در شناور تندرو (در بازه‌های مختلف فرکانسی) می‌تواند، سبب خستگی، کاهش بینایی و شنوایی موقت، کمر درد و در نتیجه کاهش عملکرد خدمه گردد.

۲-۲. سلامت ادوات و بدنه

ارتعاشات از جمله عوامل مخرب بر عملکرد شناورها خواهد بود. به‌ویژه در طول زمان‌های بلندمدت‌تر، می‌تواند زمینه نقایص فنی به‌ویژه در بدنه شناور را مهیا سازد.

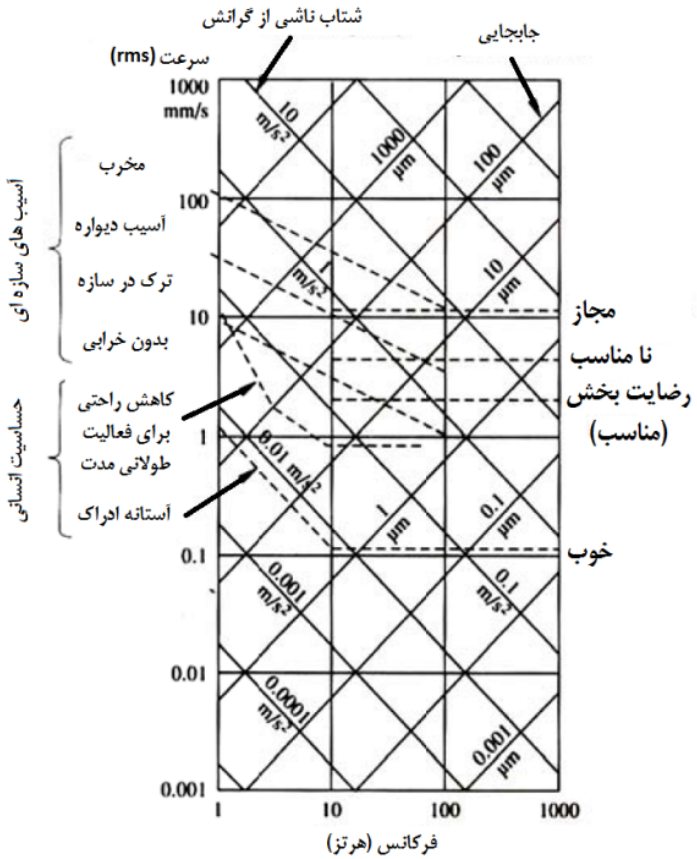
همچنین ارتعاشات محیطی و یا داخلی می‌توانند زمینه‌ساز ایجاد حجم عمده‌ای از مشکلات برای ماشین‌آلات گردند. برخی ادوات نصب شده بر روی شناور (مثلا ابزار ارتباطی) ممکن است به واسطه دریافت بازه خاصی از ارتعاشات آسیب ببینند و یا عملکرد خوبی از خود نشان ندهند.

۲-۳. کیفیت عملکرد

مجموعه ارتعاشات وارده بر شناور می‌توانند سرعت استهلاک ادوات مورد استفاده در کاربری‌ها به‌ویژه در موارد نظامی را افزایش دهند. به‌علاوه دقت کاربر ادوات نظامی را نیز کاهش خواهند داد.

از دیگر سو با توجه به عمده کاربری هدف شناورهای تندرو در عملیات نظامی، کاهش ارتعاشات و پیرو آن سر و صدای حاصله از آن در فعالیت‌های گشت‌زنی به‌ویژه در شرایط رودخانه و یا نی‌زار، می‌تواند در دستیابی به اختفای بهتر عملیاتی، کمک‌کننده باشد.

رسیدن به برخی موارد فوق به کمک توجه به استانداردهای مناسب محقق خواهد شد [۷]. پارامترهای مورد استفاده به عنوان مرزهای محدودکننده و مجاز عبارت‌اند از: دامنه مجاز، ترسیمه محدوده مجاز آسیب‌های سازه‌ای[۳]، ارتعاشات ماشین و حساسیت انسانی[۴] که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل۳. محدوده مجاز برای خرابی سازه، ارتعاشات ماشین و ادراک انسانی [۷]

بر اساس شکل فوق، محدوده‌ی مناسب برای خرابی سازه‌ای و ادراک انسانی تابع سرعت، فرکانس، شتاب جاذبه، جابه‌جایی است. محدوده مناسب برای عملکرد انسان و سازه متناسب با این چهار عامل تعیین می‌گردد.

بر اساس موارد ذکرشده، توجه به ارتعاشات به‌وجود آمده در شناور و تلاش برای کنترل آن ضروری به نظر می‌رسد. این موضوع نیازمند شناسایی دلایل مختلف ارتعاشات و تحریک خواهد بود. همان‌گونه که در ادامه اشاره می‌گردد، این منابع را در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان به دوشاخه منابع محیطی و داخلی تقسیم‌بندی نمود.

۳. منابع تحریک

بر اساس پژوهش‌های تجربی انجام شده [۸] دو نوع کلی ارتعاشات نامطلوب وارد بر شناور شناسایی شده‌اند. اولین منبع، ناشی از موتور است و شامل فرکانس‌های بالا با دامنه تحریک کم می‌باشد. موتور احتراق داخلی یک جرم متمرکز است که اگر درست طراحی نگردد، سبب ارتعاشات نامناسبی می‌گردد.

فاکتورهای اساسی بیان‌شده در عملکرد شناور تحت تأثیر مستقیم ارتعاشات موتور هستند. همچنین به دلایل محیطی از جمله بهبود عملکرد خدمه، لازم است تا ارتعاشات القایی وارده، کاهش یابد. موتور از اجزای دورانی و رفت و برگشتی تشکیل‌شده است که سبب تولید نیروی نابالانسی در طی فرایند و تولید ارتعاشات می‌گردد. ارتعاشات نیروهای داخلی نیز ناشی از احتراق و اختلاف فشار رخ داده، در سیلندر پیستون در طی فرایند است. جهت پیش‌بینی ارتعاشات خروجی از موتور مدل‌سازی دقیقی مورد نیاز است [۹]. دومین منبع تحریک از ورودی‌های ناشی از امواج و عوامل محیطی

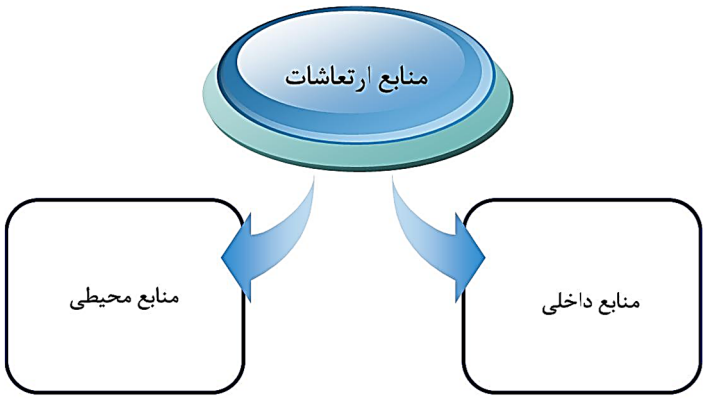
نتیجه می‌شود و شامل فرکانس‌های عمدتاً کم با دامنه تحریک بالا است.

شکل ۴ دو منبع عمده ارتعاشات را نمایش می‌دهد.

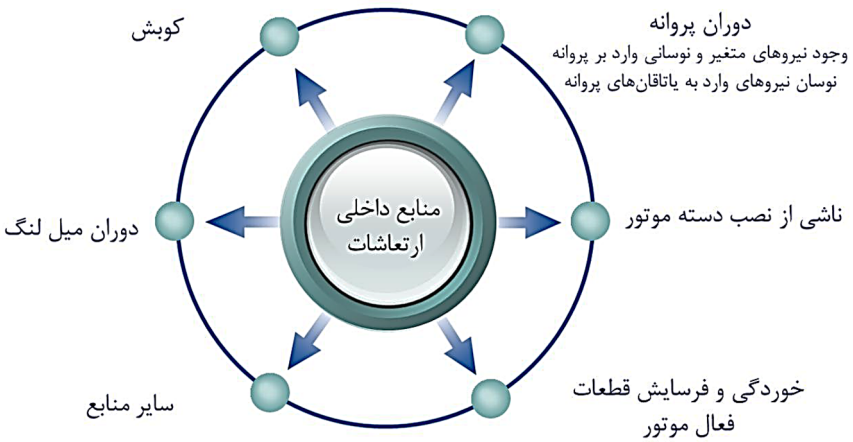
۳-۱. منابع داخلی تحریک در قایق‌های تندرو

این منابع مرتبط با سیستم رانش شناور خواهند بود. یک سیستم رانش دریایی از سه بخش، تولید قدرت، سیستم انتقال قدرت شامل شافت و کاهنده، و سیستم پروانه تشکیل می‌گردد.

در بررسی عوامل تحریک و ارتعاش می‌توان به هر یک از این سه بخش به صورت جداگانه پرداخت. این ارتعاشات عموما دارای دامنه کم و فرکانس بالا هستند و از طریق دسته موتور به بدنه و سرنشین منتقل می‌گردند. شکل ۵ مهم‌ترین منابع ارتعاشات داخلی را نشان می‌دهد.



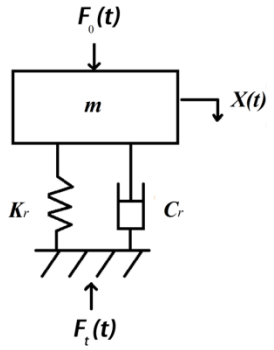
شکل۴. منابع اصلی ارتعاشات در شناورها



شکل۵. برخی از مهم‌ترین منابع داخلی ارتعاشات در شناور تندرو

ارتعاشات ناشی از موتور به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: ارتعاشات پیچشی و ارتعاشات طولی. موتور همواره به دلیل ذات رفت و برگشتی خود درجاتی از چرخش را در طول فرایند احتراق دارا می‌باشد. زمانی‌که پیستون به نقطه مرگ بالا می‌رسد، دوران میل‌لنگ سبب افزایش فشار درون سیلندر، می‌گردد. اشتعال و احتراق بلافاصله پس از نقطه مرگ بالا[۵]، فشار را افزایش می‌دهند و فشار با آغاز حرکت پیستون به‌سوی نقطه مرگ پایین[۶] افت می‌کند. فشار روی پیستون‌ها سبب تولید نیروی مماسی می‌گردد و سرعت دورانی میل‌لنگ را در طی مرحله احتراق افزایش می‌دهد. این درحالی است

که در مرحله تراکم، سرعت زاویه‌ای موتور کاهش می‌یابد. تغییرات سرعت دورانی موجب نوسانات سرعت و ارتعاشات پیچشی میل‌لنگ می‌شود. به طور خلاصه می‌توان گفت به کمک دسته موتورهای مناسب و کنترل نابالانسی موتور می‌توان ارتعاشات موتور را کاهش داد [۹]. تحریک با دامنه کم و فرکانس زیاد می‌تواند با نیروهای وارده بر جرم به صورت یک سیستم یک درجه آزادی مانند شکل ۶ مدل شود.



شکل۶. مدل مکانیکی سیستم یک درجه آزادی برای بررسی ارتعاشات ناشی از موتور

به این ترتیب معادلات سیستم عبارتند از:

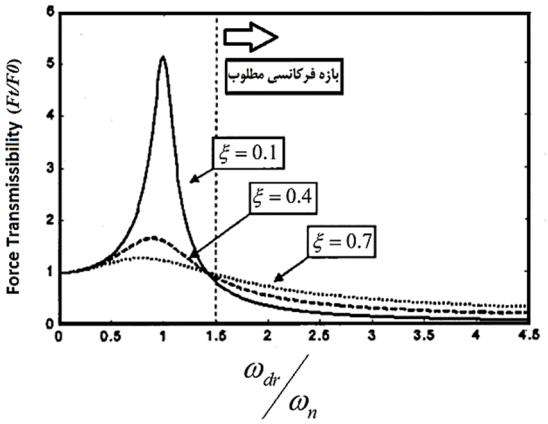
$$F_t = c_r\,\dot{x} + k_r x \qquad (۱)$$

$$F_0 = m\,\ddot{x} + c_r\,\dot{x} + k_r x \qquad (۲)$$

که F_0 بیانگر نیروی وارده و F_t نیروی انتقالی به تکیه‌گاه است. رابطه زیر نیز نسبت بین نیروی انتقالی به نیروی ورودی، یعنی ضریب انتقال را معرفی می‌کند.

$$TR_f = \frac{F_t}{F_0} = \left| \frac{\omega_{dr} c_r + k_r}{-\omega_{dr}^2 m + \omega_{dr} c_r + k_r} \right| \qquad (۳)$$

در این رابطه ω_{dr} فرکانس تحریک سیستم است. حال به کمک ضرایب بی‌بعد فرکانس و میرایی به رسم نمودار شکل ۷ پرداخته می‌شود. در این حالت ارتعاشات موتور باید در ناحیه‌ای قرار گیرد که بیش از فرکانس موتور و دسته‌موتور باشد. برای این منظور باید سختی دسته موتور پایین باشد. همچنین میرایی کمتر سبب کاهش نسبت نیروی انتقالی می‌شود.

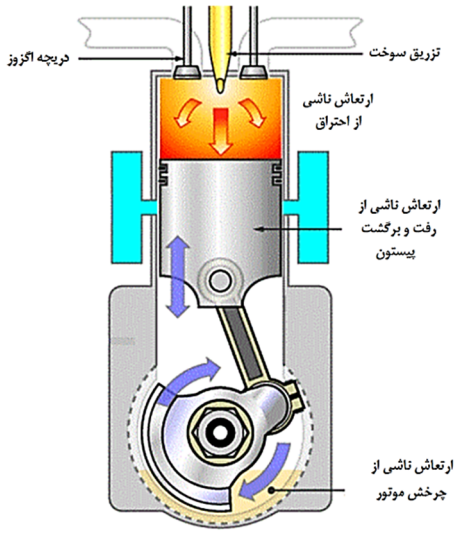


شکل۷. نسبت نیروی انتقالی به نسبت فرکانس‌ها برای ارتعاشات ناشی از نابالانسی [۱۰]

به‌طورکلی منشأ نیروهای ناشی از موتور بر سازه‌ی شناور دریایی شامل موارد زیر می‌باشند [۱۱]:

۱- موتور اصلی و ماشین‌های فرعی، با فرکانسی به مقدار نیم و یا یک برابر فرکانس دوران.
۲- شفت، با فرکانس برابر فرکانس دوران.
۳- گیربکس، با فرکانس برابر فرکانس دوران.
۴- پروانه، با فرکانسی برابر حاصل‌ضرب فرکانس هر پره در تعداد پره‌ها.

هرکدام از این موارد در اثر عملکرد خود و به صورت جداگانه تولید ارتعاش می‌کند شکل ۸ و با القاء آن به سازه‌ی شناور می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر استحکام شناور و نیز سرنشینان آن داشته باشد.



شکل۸. برخی منابع ارتعاشات موتور [۲۳]

ارتعاشات منابع داخلی را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۳-۱-۱. ارتعاشات میل‌لنگ

میل‌لنگ در موتورهای احتراق داخلی، تحت تأثیر نیروهای ضربه‌ای وارده از دسته سنبه در گستره سرعت‌های زاویه‌ای وسیعی دوران می‌کند. به دلیل وجود چنین نیروهایی، میل‌لنگ بسیار مستعد ارتعاش است که می‌تواند نامطلوب باشد. بنابراین بررسی رفتار حرکتی آن امری ضروری است. در هر موتوری رفتار NVH[۷] کل سامانه‌ی موتور به طور عمده متأثر از طراحی میل‌لنگ است. ارتعاشات پیچشی میل‌لنگ، یکی از منابع عمده تولید صدا در موتور است. از میان تمام شکل‌های ارتعاشی که میل‌لنگ در معرض آن‌ها قرار می‌گیرد، شکل پیچشی مخرب‌ترین است زیرا بدون نیروی نوسانی خارجی باعث تخریب سازه می‌گردد [۱۳].

۳-۱-۲. ارتعاشات پروانه

پروانه یکی از اصلی‌ترین سرچشمه‌های ارتعاشات در یک شناور می‌باشد. دو منبع اصلی ارتعاش در پروانه حفره‌زایی[۸] و بار متغیر هیدرودینامیکی بر محور یا پروانه می‌باشد. به‌هرحال اگر حفره‌زایی به خوبی تحت کنترل باشد، منبع اصلی ارتعاش در پروانه فقط تغییرات پیرامونی جریان ویک[۹] در پاشنه کشتی می‌باشد که اجزاء ممان و نیروهای کشتی را تولید می‌کند. به‌علاوه تغییرات شعاعی دوره‌ای[۱۰] پیرامونی ویک نیز مهم است [۱۴].

۳-۱-۳. ارتعاشات ناشی از نصب دسته موتور و مکان نصب

دسته موتورها باید لرزش ایجاد شده توسط موتور را کنترل کنند و صلبیت قابل توجهی برای انتقال نیروی رانشی محور پروانه به قایق فراهم کنند. از آنجا که قایق‌های کوچک در سرعت‌های پایین استفاده می‌شوند، زوج نیرو لرزشی گشتاور میل‌لنگ منبع لرزش اولیه است و باید عایق‌بندی شود.

پیشرفت کنترل ارتعاشات وسایل نقلیه موتوری، باعث شده است، انتظار مصرف‌کننده بالا رفته و توقع کمترین لرزش را در هر محیطی داشته باشد. موتورهای دریایی کوچک به دلیل اینکه راننده اغلب از سکان که به موتور وصل است برای هدایت استفاده می‌کند، نیاز فزاینده‌ای به کاهش لرزش دارند. روش سنتی نصب موتورها، به بار وارده بر دسته موتور اجازه می‌دهد تا گشتاور دوره‌ای در اطراف محور سکان ایجاد کند و در نتیجه نیروهای ضربه‌ای قابل توجهی در آن به‌وجود آورد. دارل و همکارانش [۱۵] روش نصب جدیدی را ارائه نمودند که زوج نیرو[۱۱] ضربه‌ای را در اطراف محور کاهش می‌دهد و از سکان در برابر لرزش موتور حفاظت می‌کند. ایشان با استفاده از نرم‌افزار دینامیکی اقدام به شبیه‌سازی جهت پیش‌بینی ارتعاشات کرده و سپس به کمک آزمایش نتایج شبیه‌سازی را تائید نمودند و کاهش قابل توجه لرزش انتقال یافته به محور تیلر و صندلی قایق در مقایسه با روش نصب سنتی را نشان دادند. این روش نصب، هر چند تاکنون در قایق‌های تندرو استفاده نشده است، اما می‌تواند به عنوان روشی مورد نظر واقع گردد.

۳-۱-٤. کوبش

استفاده از سوخت‌های فسیلی مانند بنزین و گازوئیل به عنوان اصلی‌ترین و مناسب‌ترین سوخت در صدر تقاضای مصرف‌کنندگان قرار دارد. از این‌رو تلاش برای برطرف کردن عیوب استفاده از این سوخت‌ها و افزایش بهره‌وری آن‌ها در دستور کار شرکت‌های مرتبط قرار دارد. شایع‌ترین عیب، ارتعاشات اضافی موتور است که به دلیل احتراق غیر عادی رخ می‌دهند و کوبش نامیده می‌شود.

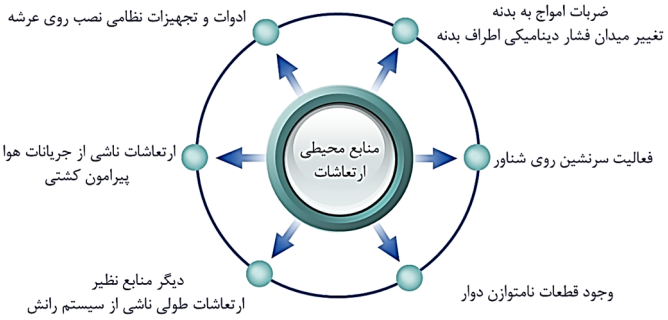
۳-۱-۵. منابع ناشی از آسیب‌های وارده به دسته موتور

خوردگی، سایش و خرابی‌های حرارتی به‌ویژه در دسته موتورهای فعال مهم‌ترین منابع آسیب منجر به ارتعاشات در شناورها هستند. دسته موتورها به عنوان ابزاری جهت کنترل ارتعاشات استفاده می‌گردند که برخی خرابی‌ها می‌توانند به مرور زمان منجر به آن شوند که عملکرد خوبی بروز ندهند. با توجه به آنکه در تمام انواع دسته موتور بخش‌های لاستیکی وجود دارند، آسیب‌های ضربه‌ای یا حرارتی به این بخش‌ها سبب افت عملکرد آن‌ها می‌گردد. در دسته موتورهای فعال مشکلات حرارتی می‌توانند موجب بروز نشتی، کاهش کیفیت سیال درون دسته موتور و موارد مشابه دیگری گردد.

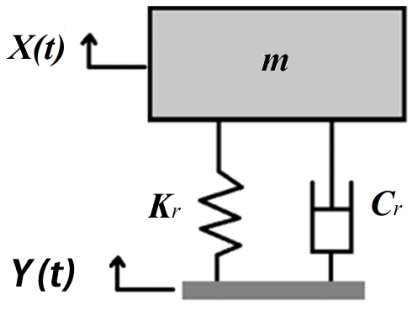
۳-۲. منابع محیطی تحریک در قایق‌های تندرو

این دسته از عوامل تحریک برخلاف عوامل داخلی که عمدتاً از سیستم رانش ناشی می‌شوند و به بدنه منتقل می‌گردند که در شکل ۹ آمده است، و از محیط به بدنه و سپس سرنشین و ادوات نصب بر شناور منتقل شده و پس از آن با ترکیب با عوامل محیطی داخل شناور نظیر پرسنل و یا سلاح‌های در حال فعالیت به سیستم رانش منتقل می‌شوند. انتقال به سیستم رانش از طریق دسته موتورها انجام خواهد شد.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، تحریکات با دامنه زیاد و فرکانس کم که به بدنه منتقل می‌گردد را می‌توان با مدل ارتعاشی تحریک تکیه‌گاه بیان نمود. در این حالت نیز سیستم به صورت یک درجه آزادی مدل می‌شود.



شکل۹. برخی از مهم‌ترین عوامل بیرونی ارتعاشات در شناورها

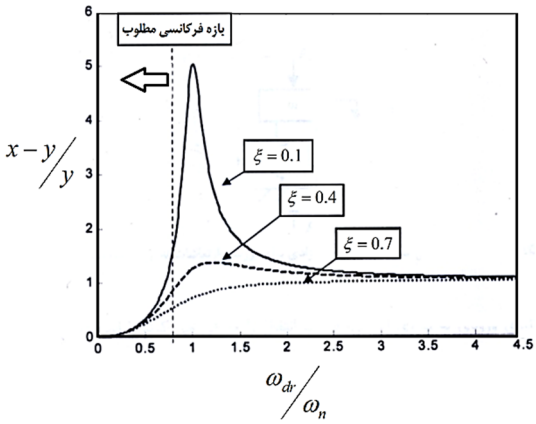


شکل ۱۰. مدل یک درجه آزادی با تحریک تکیه‌گاه

$$\frac{x-y}{y} = \left| \frac{\omega_{dr} c_r + k_r}{-\omega_{dr}^2 m + \omega_{dr} c_r + k_r} \right| \qquad (۴)$$

$$K_r(y-x) + c_r(\dot{y}-\dot{x}) = m\ddot{x} \qquad (۵)$$

در این معادلات y مبین تغییر مکان بدنه خواهد بود.
معادله فرکانسی بر اساس نسبت جابه‌جایی بین بدنه و موتور بازنویسی می‌گردد و نمودار نسبت جابه‌جایی به نسبت فرکانسی به صورت شکل ۱۱ به دست خواهد آمد.
شکل ۱۱ دامنه مطلوب برای داشتن حداقل جابه‌جایی نسبی را نشان می‌دهد. افزایش سختی دسته موتور منجر به افزایش فرکانس طبیعی و حضور در ناحیه مد نظر خواهد شد. همچنین افزایش میرایی باعث کاهش دامنه و عملکرد بهتر دسته موتور می‌گردد.



شکل ۱۱. نمودار فرکانسی سیستم یک درجه آزادی [۱۰]

در نتیجه شناور به‌منظور رفع آسیب‌های ناشی از دو نوع ارتعاش فوق نیاز به دو نوع دسته موتور، با عملکرد متفاوت دارد: یکی با سختی و میرایی زیاد برای ارتعاش نوع اول که به نام جاذب ارتعاشی[۱۲] شناخته می‌شود و دیگری با سختی و میرایی کم برای ارتعاش نوع دوم که به نام جداساز ارتعاشی[۱۳] نامیده می‌شود. پس مشخصه‌های یک دسته موتور ایده‌آل بستگی به شرایط دامنه و فرکانس تحریک دارد. یک دسته موتور الاستومری (معمولی) با مشخصه‌های خطی نمی‌تواند دو هدف فوق را ارضا کند. می‌توان چنین عنوان نمود که دسته موتوری ایده‌آل است که دارای میرایی و سختی غیرخطی وابسته به شرایط دامنه و فرکانس تحریک باشد [۱۶].

۳-۲-۱. امواج و ضربات محیطی به بدنه

هنگامی‌که یک شناور در سرعت‌های مختلف و در شرایط گوناگون وضعیت دریا حرکت می‌کند سازه کشتی در اثر ضربات پی‌درپی وارده از این امواج دچار کوبش می‌شود (ارتعاشات تصادفی وارده به سازه شناور) [۱۷]. به ارتعاشاتی که در اثر پدیده کوبش در سازه کشتی ایجاد می‌شود اصطلاحاً وایپینگ[۱۴] گفته می‌شود که از نوع ارتعاشات گذرا است. این پدیده در شناورهای غول‌پیکر عامل تعیین‌کننده نیست اما در شناورهای کوچک‌تر تندرو که سرعت و قابلیت مانور بالایی دارند، در فرکانس‌های بالا بروز می‌کند و در شرایطی از دریا که امواج به‌طور مستقیم به نواحی سینه و پاشنه شناور برخورد می‌کند به یک مسئله حیاتی در مورد ایمنی شناورها تبدیل می‌شود. پدیده کوبش و ارتعاشات ناشی از آن اثرات مخرب متعددی بر سازه و سرنشینان کشتی برجای می‌گذارد که عبارت‌اند از [۱۸و۱۹] :

- آسیب‌های محلی و کلی در طول سازه شناور
- ترک‌های ناشی از پدیده خستگی در نواحی مختلف سازه شناور
- آسیب‌های نخاعی در ناحیه کمر و گردن سرنشینان به دلیل ضربات ناشی از شتاب‌های بالا
- خستگی، عدم تمرکز و کاهش قابلیت ناوبری شناور
- آسیب به بار و محموله داخل شناور

۳-۲-۲. ارتعاشات طولی ناشی از سیستم رانش

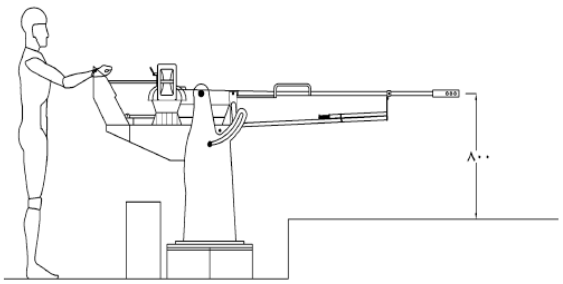
در شناورها بخش عمده‌ای از ارتعاشات بدنه با فرکانس پایین، ناشی از انتقال لرزش‌ها در طول سیستم شافت-پروانه است. عدم تقارن در بدنه یا سطح کنترل و یا عدم تقارن استرات

یاتاقان شافت باعث می‌شود جریان ویک نزدیک به پروانه غیریکنواخت باشد. وقتی جریان غیریکنواخت به پره‌های درحال چرخش می‌رسد، به خاطر تحریک محوری پروانه در فرکانس انتقالی پره، نوساناتی در رانش به خاطر ارتعاشات کوچک پروانه رخ می‌دهد. ارتعاشات پروانه به شافت و از طریق شافت به بدنه منتقل می‌شود [۲۰].

تلاش‌های بسیاری برای کاهش انتقال این ارتعاشات شده است. یکی از راه‌کارها، دستگاهی به نام میشل تراست متر است که به صورت متوالی بین یاتاقان‌های تراست و پایه‌های تقویتی قرار می‌گیرد. طرح جدید این دستگاه برای کاهش لرزه‌های انتقالی در طول سیستم شافت–پروانه است [۲۰].

۳-۲-۳. سرنشین و ادوات نصب شده بر روی شناور

همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد، عرشه شناورهای تندرو رزمی مکانی مناسب برای نصب تسلیحات مورد نیاز در مقاصد نظامی است. همگام با توسعه فناوری، انواع تجهیزات با قابلیت‌های بالای نواخت تیر نیز ساخته شده‌اند. پس از انجام شلیک، گلوله در داخل لوله‌ی سلاح به وسیله‌ی یک جبهه هوای پر فشار گرم به سمت جلو رانده می‌شود. در آستانه خروج گلوله از دهانه‌ی سلاح، هوای پرفشار در معرض هوای آزاد قرار گرفته و در الگویی تقریباً کروی و متقارن، در فضا منتشر می‌شود. این‌گونه امواج کروی که به اصطلاح امواج انفجاری ناشی از شلیک سلاح نامیده می‌شوند، ماهیت ضربه‌ای دارند. این اثر در سلاح‌های با قابلیت شلیک متمادی به صورت ضربات دوره‌ای می‌توانند مدل‌سازی شوند. این دسته از ضربات، در گروه نیروها متغیر و سریع مؤثر بر سازه شناور قرار می‌گیرند. موج انفجاری نیز آثار مخربی بر خدمه و سازه شناور دارد [۲۱].



شکل ۱۲. نمایی از نصب ادوات جنگی به عنوان عامل محیطی ارتعاشات بر روی شناور [۹]

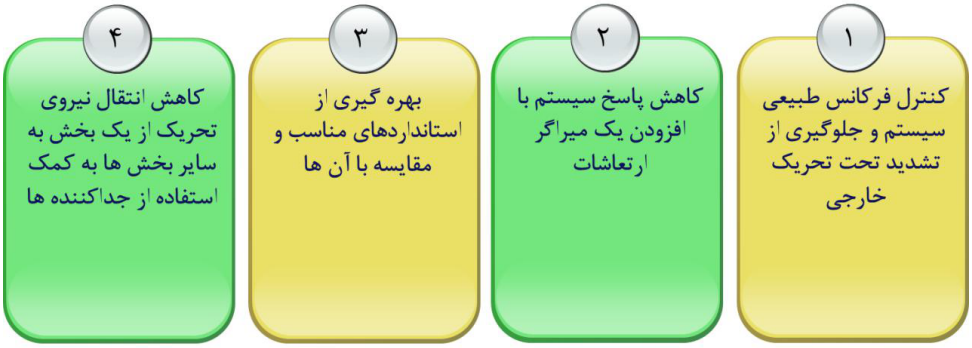
صادقی و همکارانش [۲۱] چگونگی مدل‌سازی بارهای انفجاری منتج از شلیک تسلیحات عرشه‌ی شناورها را مورد مطالعه قرار دادند. دانشمندان دیگری نیز برای کاهش انتقال ارتعاشات طولی و یا کاهش نوسان پیشران در بدنه تکنیک‌هایی را ارائه داده‌اند که عموما برگرفته از روش پیشنهادی گودوین هستند. تکنیک‌های کنترلی فعال و شبه فعالی نیز توسط محققانی نظیر برنانت، لویس و باز پیشنهاد شده‌اند [۲۰].

۳-۲-٤. ارتعاشات ناشی از جریانات هوایی

جریانات هوایی به‌ویژه در محیط مسطح دریا می‌تواند موجب بخشی از ارتعاشات در شناور گردد. این منابع به‌ویژه در شرایط طوفان و ترکیب با جریانات دریایی نمود بالایی خواهند داشت.

٤. کنترل ارتعاشات

آخرین گام در سیر بررسی ارتعاشات شناورهای تندرو پس از ارزیابی ارتعاشات و شناسایی منابع آن، کنترل ارتعاشات است. کنترل هر یک از منابع ارتعاشات تکنیک‌ها و راه‌حل‌های متنوعی را در بر می‌گیرد. برخی از این روش‌ها در شکل ۱۳ به صورت عمومی قابل طبقه‌بندی هستند.



شکل۱۳. روش عمومی کنترل ارتعاشات در شناورها

روش‌هایی که جهت کنترل ارتعاشات استفاده می‌شوند عبارت‌اند از [۲۲]:

الف) کنترل فرکانس طبیعی سیستم و جلوگیری از تشدید تحت تحریک خارجی.

جهت کنترل بهتر استفاده از تکنیک‌هایی که جرم و یا سختی را دست‌خوش تغییرات مناسب کنند، مدنظر خواهد بود.

ب) کاهش پاسخ سیستم با افزودن یک میراگر ارتعاشات.

سیستم‌های جاذب یا مستهلک کننده انرژی بر پایه افزایش میرایی سازه بنا شده‌اند. مهم‌ترین تأثیر میرایی، کاهش دامنه نوسان و پاسخ سازه دریایی نسبت به نیروهای وارده است و بدین‌وسیله قسمت عمده‌ای از انرژی ارتعاشی را قبل از رسیدن پاسخ سازه به حد نهایی به هدر می‌دهند. اتلاف کننده‌های انرژی در بخش‌های مختلف سازه می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

ج) کاهش انتقال نیروی تحریک از یک بخش به سایر بخش‌ها به کمک استفاده از جداکننده‌ها.

جداکننده‌ها، همان‌گونه که اشاره شد عامل انتقال ارتعاشات بین بخش‌های مختلف هستند و با طراحی مناسب می‌توانند به کنترل ارتعاشات کمک شایانی نمایند. دسته موتور از جمله این ابزارها شناخته می‌شود و در مسیر انتقال ارتعاشات بدنه و موتور قرار دارند.

د) بهره‌گیری از استانداردهای مناسب و مقایسه با آن‌ها.

سطح ارتعاشات در یک ماشین بر عملکرد خود سیستم آن ماشین و نیز موتور اثرگذار خواهد بود. جهت اطمینان از این امر محدودیت‌هایی در قالب استاندارد تعریف شده‌اند که سطح مجاز ارتعاشات در ماشین را معین می‌کند [۲۴].

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش صورت گرفته پس از بیان ضرورت مطالعه بر روی ارتعاشات در شناورهای دریایی سه گام مهم در این حوزه به صورت ارزیابی ارتعاشات، شناخت منابع ارتعاشات و کنترل ارتعاشات معرفی شدند.

در ابتدا معیارهای ارزیابی ارتعاشات در شناورهای تندرو مورد واکاوی قرار گرفت. سلامت افراد، ادوات و بدنه در کنار عملکرد مناسب معیارهای این ارزیابی معرفی شدند. در ادامه به شناسایی و معرفی منابع داخلی و خارجی ارتعاشات در شناورهای تندرو و ویژگی‌های هر گروه پرداخته شد.

در انتها نیز مهم‌ترین روش‌های کنترل ارتعاشات شامل: کنترل فرکانس طبیعی سیستم، کاهش پاسخ سیستم با افزودن یک میراگر ارتعاشات، کاهش انتقال نیروی تحریک به کمک جداکننده‌ها و در نهایت بهره‌گیری از استانداردهای مناسب تشریح شده‌اند.

٦. مآخذ

[1] DeBord, F., et al., "Measurement and analysis of shipboard vibrations." *Marine Technology and SNAME News,* Vol.35, No.1, 1998, pp.1-9.

[2] Mohtasebi, S., et al., "Simulation of vibration for a diesel engine with biodiesel and diesel fuel blends using artificial neural networks", *International Journal of Agriculture and Crop Sciences,* Vol.5, No.18, 2013, pp.2084-2090.

[۳] مسلم نجفی، میلاد نورآبادی، "بررسی تاثیر ارتعاشات ناشی از حرکات شناورهای تندرو بر عملکرد و سلامتی انسان"، *نشریه علمی ترویجی صوت و ارتعاش*، سال اول، شماره دوم، ۱۳۹۱.

[4] Griffin, M.J., "*Handbook of human vibration*", 2nd ed. London: Academic Press, 1996.

[5] International Organization for Standardization, ISO Standard 2631-1, "*Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements"*, 1997.

[6] Lekatompessy, D. R., et al., "Rubber as an effective vibration absorber of outboard engine at small traditional fishing boats from the human health and safety point of view." *Journal of Engineering, Computers & Applied Sciences (JEAS)*, Vol.2, No.2, 2013, pp.7-12.

[7] International Standards Organization, ISO Standard 2954, "*Requirements for instruments for measuring machinery vibration*." 1974.

[۸] مهدی بهزاد، مسعود آسایش، سید ابوالفضل هاشمی، "اندازه‌گیری ارتعاشات و تجزیه و تحلیل آن در یک شناور"، *یازدهمین همایش ملی صنایع دریایی ایران*، جزیره کیش، انجمن مهندسی دریایی ایران، ۱۳۸۸.

[9] Ramachandran, T., and Padmanaban, K., "Review on internal combustion engine vibration and mountings." *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*, Vol.3, 2012, pp.63-73.

[۱۰] علی مهرکیش، "تحلیل و مدل‌سازی حرارتی–ارتعاشی دسته‌موتور فعال چندمحفظه‌ای با قابلیت خنک‌کاری" ، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مکانیک، ۱۳۹۲.

[11] Germanischer Lloyd, "*GL- Technology Ship Vibration*", Hamburg, Germany, 2001.

[12] Okamura, H., et al., "Experimental modal analysis for cylinder block-crankshaft substructure systems of six-cylinder in-line diesel engines", *SAE Technical Paper (International Congress),* 2001.

[13] Prakash, V., et al., "Parametric study of crankshaft natural frequencies", *SAE Technical Paper (International Congress),* 1994.

[14] Racca, R., Sr, "How to select power-train isolators for good performance and long service life". *SAE Technical Paper (International Congress),* 1982.

[15] Dicker, J.J., Pennock, G.R., and Shigley, J.E., "*Theory of machines and mechanisms* ", 3rd ed., 2003.

[۱۶] محمد صادق غلامی، "مدل‌سازی و بهینه‌سازی دسته‌موتورهای هیدرولیکی"، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی مکانیک، ۱۳۸۹.

[17] Kim, S., et al., "Slamming impact design loads on large high speed naval craft", in *International conference on innovative approaches to further increase speed of fast marine vehicles*, Saint-Petersburg, Russia, 2008.

[18] Thomas, G., et al., "The vibratory damping of high speed catamarans", *Marine Structures,* 2008, Vol.21, No.1, pp.1-21.

[19] Allen, D.P., et al., "A study of shock impacts and vibration dose values onboard highspeed marine craft". *International Journal of Maritime Engineering*, Vol.150, 2008, pp.1-10.

[۲۰] زهره ادیبی‌پور، نسیم آل علی، مصطفی جعفرزاده خطیبانی، "بررسی ارتعاشات طولی ناشی از سیستم رانش"، *اولین همایش ملی توسعه پایدار دریا محور*، ۱۳۹۳.

[۲۱] محمد حسین صادقی، محمد رضا خدمتی، امین نجفی،"مدل‌سازی بارهای ضربه‌ای انفجاری موثر بر عرشه‌ی شناورها و تحلیل پاسخ محلی سازه‌ای در مقابل آن‌ها"، *مهندسی مکانیک شریف*، دوره ۳–۲۸، شماره ۱، صفحه ۴۷ – ۵۶، ۱۳۸۹.

[22] Srinivasulu P., "*Handbook of machine foundations*", 4th ed., New Delhi: Tata McGraw- Hill Company Ltd, 1980.

[23] Pulkrabek, W.W., "*Engineering fundamentals of the internal combustion engine*", 2nd ed., 2003.

[24] International Standards Organization, ISO Standard 2954, "*Mechanical vibrations of machines with operating speeds from 10 to 200 Rev/Sec - basis for specifying evaluation standards*." 1974.

پی‌نوشت:

1. Shaft
2. Slamming
3. Structural Damage
4. Human Sensitivity
5. TDC (Top Dead Center)
6. BDC (Bottom Dead Center)
7. Noise Vibration Harshness
8. Cavitation
9. Wake
10. Harmonic
11. Couple
12. Shock Absorber
13. Isolator
14. Whipping