

# اندازه‌گیری و ارزیابی ارتعاشات در شناورهای تندرو

محمد رضا رستگار<sup>۱</sup>

شرکت مهندسان مشاور و خدمات صنعتی پذیرش نوین  
rastegar@engineer.com

## چکیده

ارتعاشات اضافی در شناور می‌تواند باعث بروز یا افزایش خرابی تجهیزات و سازه یا وارد آمدن آسیب به خدمه و افراد روی شناور شود. ارتعاشات می‌تواند معیاری برای ارزیابی وضعیت کلی شناور، وضعیت ماشین آلات و نصب آنها باشد. همچنین می‌تواند ابزاری برای پیاده سازی نظام نگهداری بر مبنای وضعیت باشد. در این مقاله سعی شده است دستورالعملها و روشهای استاندارد برای اندازه گیری ارتعاشات و ارزیابی نتایج آنها در شناورهای تندرو بیان و راهنمایی‌هایی برای بهره گیری بهتر از این معیارها و ارزیابی دقیقتر نتایج ارائه شود. این دستورالعملها می‌تواند برای ارزیابی و تحویل شناور و برای پیاده سازی نظام مراقبت از وضعیت باشد.

**واژه‌های کلیدی:** اندازه‌گیری ارتعاشات- ارزیابی ارتعاشات- نگهداری بر مبنای وضعیت- شناورهای تندرو

## ۱- مقدمه

اندازه‌گیری و ارزیابی ارتعاشات در شناورها به سه منظور عمده انجام می‌شود:

خرید و تحویل شناور

عیب یابی

انجام برنامه نگهداری پیشگیرانه یا نگهداری بر مبنای وضعیت

وجود نیروهای متغیر و نوسانی وارد بر پروانه، نوسان نیروهای وارد به یاتاقانهای پروانه و نیروهای انتقالی از شافتها در اثر نامنظمی جریانهای گردابه‌ای، تغییر میدان فشار دینامیکی اطراف بدنه، وجود قطعات نامتوازن دوار، هم محور نبودن، فرسایش و موارد مشابه در ماشین‌آلات موجود در شناور مانند موتورهای اصلی و ماشین‌آلات فرعی، عکس‌العمل موتورها در برابر تغییر بار وارده به آن و نیز نوسانات نیروهای خارجی وارده از دریا بویژه نیروهای ناشی از برخورد سطح آب دریا با کف یا بغل شناور در اثر سرعت شناور یا موج یا ترکیبی از هر دو منشا ایجاد ارتعاشات در تمام جهات در بدنه، محورهای گردان و ماشین‌آلات شناور می‌باشند. این ارتعاشات می‌تواند در کل بدنه شناور، یا به صورت موضعی در بخشهای خاصی و ماشین‌آلات اتفاق بیفتد. بدنه شناور ترکیبی از تیرها و ورقها است که هر یک از آنها فرکانسهای طبیعی متعددی دارند در نتیجه بدنه شناور می‌تواند در مدهای عمودی، افقی، پیچشی و طولی مستقل از هم یا به صورت ترکیب با یکدیگر در فرکانسهای متعددی ارتعاش کند. شافتها نیز می‌توانند در مدهای پیچشی و طولی و یا ترکیبی از هر دو ارتعاش کنند. همچنین ماشین‌آلات نیز می‌توانند منشا 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 شود. در نتیجه بررسی و محدود کردن ارتعاشات از عوامل مهم و اصلی در شناور می‌باشد چرا که علاوه بر شکستهای ناشی از نیروهای ارتعاشی و خرابی ماشین‌آلات، وجود ارتعاشات

---

۱- کارشناس نت

(بیش از حد مجاز) موجب وارد شدن صدمات بسیاری به خدمه و افراد حاضر در شناور و سایر تجهیزات می‌گردد به گونه‌ای که ممکن است کاملاً کارایی خود را از دست بدهند [۱]. بنابراین در ارزیابی ارتعاشات سه عامل زیر مورد توجه قرار می‌گیرد:

- سلامت افراد
- سلامت بدنه
- سلامت ماشین آلات

برخلاف آزمون ارتعاش (Vibration Testing) که منحصرراً برای عیب‌یابی یا در هنگام خرید و تحویل ماشین صورت می‌گیرد، مراقبت وضعیت (Condition Monitoring) شامل جمع‌آوری داده در طول یک سیکل زمانی می‌باشد و تاکید آن بیشتر بر تغییر رفتار ارتعاشی دستگاه می‌باشد نه میزان ارتعاشات دستگاه [۲].

هدف از اجرای مراقبت وضعیت ارتعاشات (Vibration Condition Monitoring) ماشین آلات به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز در مورد شرایط کاری ماشین به منظور محافظت، نگهداری و انجام تعمیرات پیشگیرانه (Predictive Maintenance) می‌باشد [۲].

قسمت عمده این فرآیند، ارزیابی شرایط ارتعاشی ماشین در طول دوره کاری آن می‌باشد. به منظور امکان ارزیابی صحیح اندازه‌گیری‌ها باید تکرار پذیر باشند تا مقایسه و تحلیل آنها معنادار باشد. بنابراین اندازه‌گیری‌ها باید همواره تحت شرایط استاندارد انجام شود. همچنین سایر اندازه‌گیری‌ها نیز که برای پذیرش شناور و یا عیب‌یابی آن انجام می‌شود باید در شرایط استاندارد انجام شود. در صورتی که آزمایشات پذیرش در دریا در شرایط استاندارد انجام شود نتایج این آزمایشات می‌تواند به عنوان خط مبنا در برنامه نگهداری استفاده شود.

## ۲- اندازه‌گیری ارتعاشات

اگرچه دستورالعملها، راهنماها و استانداردهای زیادی برای اندازه‌گیری ارتعاشات ارایه شده است اما شرایط اندازه‌گیری و روشهای ارایه شده در آنها بسیار شبیه به یکدیگر می‌باشد. آنچه در ادامه می‌آید با اکثر استانداردهای معتبر تطابق دارد و قابل استفاده برای کلیه شناورهای تندرو نظامی و غیر نظامی می‌باشد [۱ تا ۷]. در برنامه‌های روتین اندازه‌گیری ممکن است نیازی به انجام کلیه اندازه‌گیری‌ها نباشد ولی در هنگام آزمایشات اولیه توصیه می‌شود کلیه موارد ذکر شده اندازه‌گیری شود [۸، ۹، ۱۰، ۲]. در اندازه‌گیری‌های فرکانسی تبدیل فوریه باید با استفاده از حداقل چهارصد خط انجام شود [۴].

## ۳- شرایط عمومی در زمان اندازه‌گیری

- الف) - عمق آب باید بیش از ۵ برابر آب‌خور باشد.
- ب) - شرایط دریا باید کمتر از فورس ۳ باشد.
- ج) - زوایه سکان تا حد امکان ثابت باشد و تغییرات آن کمتر از  $\pm 2^\circ$  درجه باشد.
- د) - موتورها با بیش از ۸۵ درصد بیشترین توان خود کار کنند.
- ه) - تمام تجهیزات و دستگاهها در شرایط عادی و یکنواخت کار کنند.

## ۴- اندازه‌گیری ارتعاشات بدنه

### ۴-۱- ارتعاشات کلی

#### حالت اول:

- الف) - فرکانس اندازه‌گیری در محدوده ۱ Hz تا ۱۰۰ Hz

(ب)- کمیت اندازه‌گیری: دامنه سرعت و شتاب  
(ج)- محل اندازه‌گیری: اماکن زیست و کاری و محل نصب تجهیزات حساس

#### حالت دوم:

(الف)- فرکانس اندازه‌گیری در محدوده  $5\text{ Hz}$  تا  $300\text{ Hz}$

(ب)- کمیت اندازه‌گیری: دامنه جابجایی، سرعت و شتاب

(ج)- محل اندازه‌گیری: بدنه شناور بجز موارد حالت اول

#### ۲-۴- اندازه‌گیری فرکانسی

(الف)- فرکانس اندازه‌گیری در محدوده  $1\text{ Hz}$  تا  $300\text{ Hz}$

(ب)- کمیت اندازه‌گیری: دامنه سرعت

(ج)- محل اندازه‌گیری: اماکن زیست و کاری، عرشه ها و موتورخانه

#### ۵- اندازه‌گیری ارتعاشات موتورهای اصلی

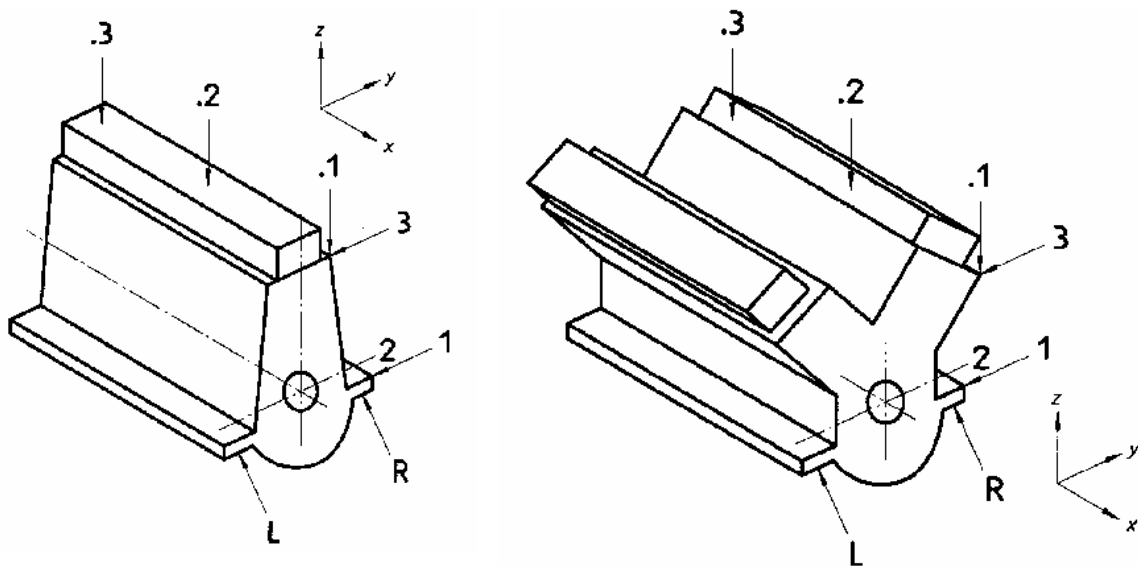
##### ۱-۵- ارتعاشات کلی

##### حالت اول: اندازه‌گیری روی موتور

(الف)- فرکانس اندازه‌گیری در محدوده  $1\text{ Hz}$  تا  $1000\text{ Hz}$

(ب)- کمیت اندازه‌گیری: مقدار موثر هر سه پارامتر جابجایی، سرعت و شتاب

(ج)- محل اندازه‌گیری: نقاط نشان داده در شکل زیر باید اندازه‌گیری شوند ولی هر نقطه دیگری که احتمال می رود شدت ارتعاشات آن بیش از نقاط نشان داده شده باشد باید اندازه‌گیری شود.



شکل شماره ۱- محل اندازه‌گیری ارتعاشات موتورهای دیزل [۶]

### حالت دوم: اندازه گیری روی فونداسیون

(الف) - فرکانس اندازه گیری در محدوده  $2\text{ Hz}$  تا  $300\text{ Hz}$

(ب) - کمیت اندازه گیری: دامنه هر سه پارامتر جابجایی، سرعت و شتاب

(ج) - محل اندازه گیری: فونداسیون موتور در سه جهت اصلی مشابه جهت نشان داده شده در حالت قبل

### ۵-۲- اندازه گیری فرکانسی

#### حالت اول: اندازه گیری روی موتور

(الف) - فرکانس اندازه گیری در محدوده  $1\text{ Hz}$  تا  $100\text{ Hz}$

(ب) - کمیت اندازه گیری: دامنه جابجایی و سرعت

(ج) - محل اندازه گیری: بالای موتور در جهت عرضی در طول آن

#### حالت دوم: اندازه گیری روی فونداسیون

(الف) - فرکانس اندازه گیری در محدوده  $2\text{ Hz}$  تا  $300\text{ Hz}$

(ب) - کمیت اندازه گیری: دامنه سرعت

(ج) - محل اندازه گیری: فونداسیون موتور در سه جهت اصلی مشابه جهت نشان داده شده در حالت قبل

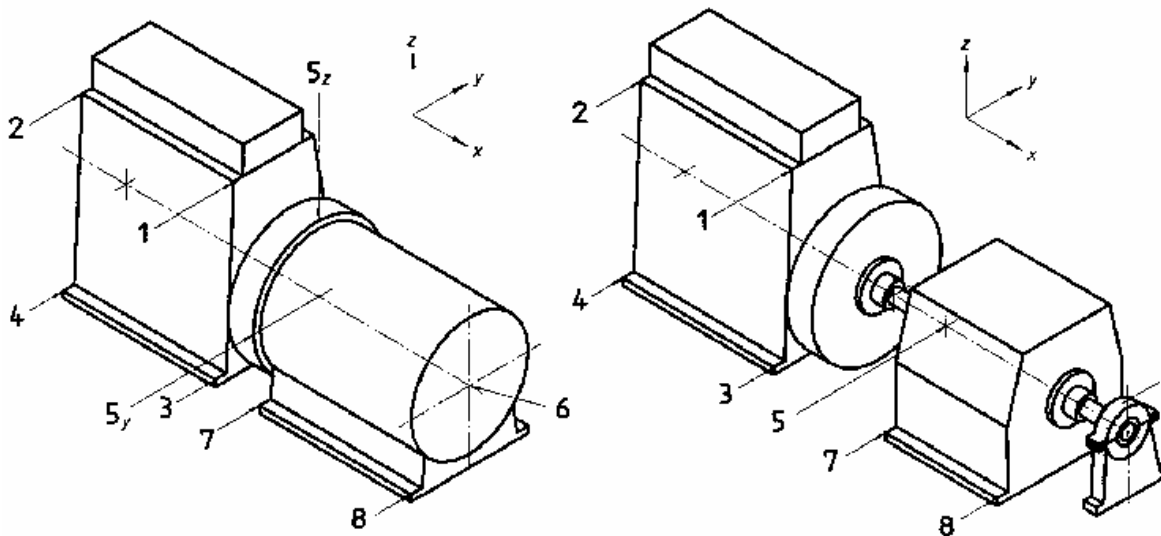
### ۶- اندازه گیری ارتعاشات دیزل ژنراتورها

#### ۶-۱- ارتعاشات کلی

(الف) - فرکانس اندازه گیری در محدوده  $1\text{ Hz}$  تا  $1000\text{ Hz}$

(ب) - کمیت اندازه گیری: مقدار موثر هر سه پارامتر جابجایی، سرعت و شتاب

(ج) - محل اندازه گیری: نقاط نشان داده در شکل زیر باید اندازه گیری شوند ولی هر نقطه دیگری که احتمال می رود شدت ارتعاشات آن بیش از نقاط نشان داده شده باشد باید اندازه گیری شود.



شکل شماره ۲- محل اندازه گیری ارتعاشات دیزل ژنراتورها [۷]

## ۶-۲- اندازه‌گیری فرکانسی

الف)- فرکانس اندازه‌گیری در محدوده ۱ Hz تا ۱۰۰ Hz

ب)- کمیت اندازه‌گیری: دامنه جابجایی و سرعت

ج)- محل اندازه‌گیری: یاتاقانهای ابتدا و انتها در تمام جهات

## ۷- اندازه‌گیری ارتعاشات پمپها، الکتروموتورها و فنها

### ۷-۱- ارتعاشات کلی

الف)- فرکانس اندازه‌گیری در محدوده ۱ Hz تا ۱۰۰۰ Hz

ب)- کمیت اندازه‌گیری: مقدار موثر سرعت و دامنه سرعت و جابجایی

ج)- محل اندازه‌گیری: کلیه یاتاقانها در تمام جهات

### ۷-۲- اندازه‌گیری فرکانسی

الف)- فرکانس اندازه‌گیری در محدوده ۱ Hz تا ۱۰۰۰ Hz

ب)- کمیت اندازه‌گیری: دامنه جابجایی و سرعت

ج)- محل اندازه‌گیری: کلیه یاتاقانها در تمام جهات

## ۸- ارزیابی ارتعاشات در شناورها

همانطور که گفته شد برای بهره‌گیری کارآمد از ارتعاشات، اندازه‌گیری، ثبت و تحلیل ارتعاشات باید از همان لحظه نصب و راه‌اندازی ماشین آغاز شود. اندازه‌گیری اولیه مشخصه‌های ارتعاشی ماشین به دو منظور عمده انجام می‌شود. اولین هدف از اندازه‌گیری ارتعاشات ماشین‌آلات پس از نصب اولیه و یا انجام تعمیرات بررسی کیفیت ماشین و نصب صحیح یا تعمیر صحیح آن می‌باشد و هدف بعدی داشتن مقیاس و مبنای مناسبی برای رفتار ارتعاشی ماشین در زمانهای آینده می‌باشد. همچنین پس از آب بندی دستگاه نیز باید مشخصه‌های ارتعاشی دستگاه به منظور دنبال کردن روند تغییرات آن اندازه‌گیری و ثبت شود. دو پارامتر اصلی بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها، مقدار مطلق نتایج بدست آمده و آهنگ یا نرخ تغییرات آنها می‌باشد که در ارزیابی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها هر دو باید مدنظر قرار بگیرند. بدیهی است در صورتیکه مقادیر اندازه‌گیری شده خارج از محدوده‌های تعیین شده باشد نشاندهنده وضعیت نامطلوب بوده که با توجه به مقادیر بدست آمده یا باید دستگاه را تعمیر کرد و یا برای تعمیر آن برنامه‌ریزی کرد. اما در صورتیکه مقادیر بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها در محدوده مجاز باشد ولی نرخ تغییرات آن نسبت به ساعت کارکرد دستگاه زیاد باشد می‌تواند نشانه وجود عیب در دستگاه یا عدم استفاده صحیح از آن باشد. به عبارت دیگر رشد سریع مشخصه‌های ارتعاشی دستگاه در اثر فرسایش طبیعی نبوده و بیانگر وجود مشکل در مجموعه می‌باشد. در ادامه این موارد جداگانه بررسی می‌شود.

### ۸-۱- اندازه‌گیری خط مبنا و روندگرایی (Baseline Measurement and Trending Analysis)

داده‌های ارتعاشی مبنا داده‌هایی هستند که هنگام عملکرد قابل قبول و پایدار تجهیزات، اندازه‌گیری و یا مشاهده می‌شوند. تمام اندازه‌گیریهایی بعدی با این داده‌ها مقایسه می‌شوند تا تغییرات در ارتعاشات تشخیص داده شوند. داده مبنا، به طور دقیق وضعیت ارتعاشی پایدار اولیه ماشین را در حالت عملکرد نرمال آن تعریف می‌کند. برای ماشین‌آلات با چندین

وضعیت عملکرد، لازم است چندین داده مبنا فراهم شود. هر چه این داده‌ها واضح تر و کامل‌تر باشند، تشخیص و ردیابی انحرافات در رفتار ماشین راحت تر است. محلهای اندازه‌گیری و جمع‌آوری داده لازم نیست و نباید محدود به محلهایی شود که به طور روتین اندازه‌گیری خواهند شد. توصیه می‌شود که مبنا یک آنالیز ارتعاشی کامل باشد و معمولاً نقاط، جهات، دامنه فرکانس و دقت اندازه‌گیری بیشتری را نسبت به آنچه که معمولاً در یک برنامه روتین لازم است در بر می‌گیرد. بنابراین توصیه می‌شود که اندازه‌گیری برای کلیه حالات گفته شده در بخشهای قبل انجام شود.

برای تجهیزات و دستگاه‌های نو و یا آنهایی که تعمیر اساسی شده‌اند، یک دوره آب بندی (wear-in) وجود دارد. لذا ممکن است تغییراتی در رفتار ارتعاشی ماشین در روزهای اول شروع به کار ماشین ایجاد شود.

برای تجهیزاتی که مدت زمانی کار کرده‌اند و برای اولین بار بازرسی (monitor) می‌شوند، می‌توان یک مبنا به عنوان نقطه مرجع برای روندگرایی (trending) تعریف کرد.

پس از اندازه‌گیری مبنا بازرسی‌ها و اندازه‌گیری‌های دوره‌ای باید انجام شود. هدف از این اندازه‌گیری‌ها دنبال کردن وضعیت ارتعاشی دستگاه و روند تغییرات آن می‌باشد. در این آزمون‌ها سه عامل زیر مورد توجه قرار می‌گیرد:

- بزرگی ارتعاشات

- هر گونه تغییر مهم در ارتعاشات

- میزان تغییر ارتعاشات

هنگام تحویل‌گیری یک ماشین، ارزیابی بر مبنای بزرگی ارتعاشات نسبت به یک مقدار از قبل تعیین شده و مورد توافق صورت می‌گیرد. لیکن، هنگامی که یک ماشین تحویل گرفته می‌شود و بزرگی‌های عادی مشخص می‌شوند، ارزیابی‌های بعدی نباید فقط بر مبنای بزرگی باشند و باید هرگونه تغییر مهم را هم در نظر گرفت.

برنامه روندگرایی ارزیابی و پیش‌بینی وضعیت حال و آینده دستگاه بر مبنای تحلیل تغییرات رفتار ارتعاشی آن می‌باشد. هنگامی که یک برنامه روندگرایی اتخاذ می‌شود، تعیین فاصله زمانی اندازه‌گیری مهم می‌باشد. در مورد ماشین آلات نو و یا آنهایی که به تازگی تعمیر اساسی شده‌اند و تحت شرایط یکنواخت کار می‌کنند، فاصله زمانی مورد نظر توسط بحرانی بودن ماشین، تاریخچه قابلیت اعتماد بودن آن و ظرفیت ذخیره داده سیستم اندازه‌گیری مشخص می‌شود.

در اندازه‌گیری‌های متناوب، هنگامی که ارتعاشات شروع به افزایش می‌کند، توصیه می‌شود فاصله زمانی اندازه‌گیری کاهش یابد و مراقبت‌ها افزایش یابد. همچنین در صورتیکه در بازرسی‌های دوره‌ای فقط ارتعاشات کلی اندازه‌گیری می‌شود توصیه می‌گردد پس از هر چند اندازه‌گیری و یا حداقل سالی یکبار اندازه‌گیری فرکانسی انجام شود. زیرا تغییرات در یک فرکانس خاص ممکن است تاثیر ناچیزی در بزرگی ارتعاشات کلی داشته باشد و در نتیجه رشد یا پیدایش برخی عیوب پنهان بماند.

همانطور که گفته شد یکی از معیارهای ارزیابی ماشین شدت یا بزرگی ارتعاشات می‌باشد. در بخشهای بعد این معیارها توضیح داده شده‌اند.

## ۹- معیارهای ارزیابی دامنه یا شدت ارتعاشات بدنه

### ۹-۱- اماکن زیست، اماکن کاری و محل نصب تجهیزات

#### الف \_ ارتعاشات کلی

دامنه سرعت و شتاب کلی بیش از حد مجاز است اگر از یکی از موارد زیر بیشتر باشد:

- دامنه سرعت در محدوده فرکانس ۱ تا ۱۰۰ هرتز: ۱۵ میلی‌متر بر ثانیه

- دامنه شتاب در محدوده فرکانس ۱ تا ۱۰۰ هرتز: ۰/۳ متر بر مجذور ثانیه

در حالت عادی باید دامنه ارتعاشات در محدوده زیر باشد:

- سرعت در محدوده فرکانس ۱ تا ۱۰۰ هرتز: ۶ میلی‌متر بر ثانیه
- شتاب در محدوده فرکانس ۱ تا ۱۰۰ هرتز: ۰/۳ متر بر مجذور ثانیه

#### ب- تحلیل فرکانسی

- دامنه سرعت در کلیه فرکانسها در محدوده ۵ تا ۱۰۰ هرتز بیش از حد مجاز است اگر از موارد زیر بیشتر باشد:
- پاشنه شناور (یک پنجم انتهایی طول شناور): ۷ میلی‌متر بر ثانیه
- سایر محلها به جز دکل: در شناورهای بزرگتر از ۳۰ متر ۵ میلی‌متر بر ثانیه و کوچکتر ۶ میلی‌متر بر ثانیه
- دامنه شتاب ارتعاشات در فرکانسهای ۱ تا ۵ هرتز نباید بیش از دامنه شتاب متناظر با سرعت ذکر شده در مقادیر بالا در فرکانس ۵ هرتز باشد.

### ۹-۲- سایر اماکن (مانند مخازن و محفظه‌های خالی) و محل نصب تجهیزات غیر حساس

#### الف \_ ارتعاشات کلی

- دامنه جابجایی، سرعت و ارتعاشات کلی در محدوده ۵ تا ۳۰۰ هرتز برای شناورهای فولادی باید کمتر از مقادیر زیر باشد:
- جابجایی: ۰/۲۵ میلی‌متر
- سرعت: ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه
- شتاب: ۲۰ متر بر مجذور ثانیه

#### ب \_ تحلیل فرکانسی

- دامنه سرعت در کلیه فرکانسها در محدوده ۵ تا ۱۰۰ هرتز نباید بیش از مقادیر زیر باشد:
- شناورهای آلومینیومی: ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه
- شناورهای فولادی: ۳۰ میلی‌متر بر ثانیه
- دامنه جابجایی ارتعاشات در فرکانسهای ۱ تا ۵ هرتز نباید بیش از جابجایی متناظر با سرعت ذکر شده در مقادیر بالا در فرکانس ۵ هرتز باشد.

### ۱۰- معیارهای ارزیابی دامنه یا شدت ارتعاشات ماشین‌آلات

#### ۱- شافت

- دامنه سرعت در کلیه فرکانسها در محدوده ۲ تا ۱۰۰ هرتز نباید بیش از ۵ میلی‌متر بر ثانیه باشد.
- دامنه جابجایی در فرکانس ۱ تا ۲ هرتز نباید بیش از ۰/۴ میلی‌متر باشد.

#### ۱۰-۲- موتورهای دیزل اصلی

#### الف \_ ارتعاشات کلی

- جابجایی، سرعت و شتاب موثر در محدوده فرکانس ۱ تا ۱۰۰۰ هرتز باید بر اساس کلاس ۵ یا ۶ جدول صفحه بعد (شکل شماره ۳) ارزیابی شود. برای توضیحات بیشتر به منبع [۶] مراجعه شود.
- دامنه جابجایی، سرعت و شتاب فونداسیون در محدوده فرکانس ۲ تا ۳۰۰ هرتز باید کمتر از مقادیر زیر باشند:
- جابجایی: ۰/۴ میلی‌متر

• سرعت: ۱۵ میلی متر بر ثانیه

• شتاب: ۴۰ متر بر مجذور ثانیه

| Vibration severity grade | Maximum values of overall vibration measured on the machine structure |                           |                                           | Machine vibration classification number |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                          | Displacement<br>μm (r.m.s.)                                           | Velocity<br>mm/s (r.m.s.) | Acceleration<br>m/s <sup>2</sup> (r.m.s.) | 1                                       | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   |
|                          |                                                                       |                           |                                           | Evaluation zones                        |     |     |     |     |     |     |
| 1,1                      | 17,8                                                                  | 1,12                      | 1,76                                      | A/B                                     | A/B | A/B | A/B | A/B | A/B | A/B |
| 1,8                      | 28,3                                                                  | 1,78                      | 2,79                                      |                                         |     |     |     |     |     |     |
| 2,8                      | 44,8                                                                  | 2,82                      | 4,42                                      |                                         |     |     |     |     |     |     |
| 4,5                      | 71,0                                                                  | 4,46                      | 7,01                                      |                                         |     |     |     |     |     |     |
| 7,1                      | 113                                                                   | 7,07                      | 11,1                                      | C                                       | C   | C   | C   | C   | C   | C   |
| 11                       | 178                                                                   | 11,2                      | 17,6                                      |                                         |     |     |     |     |     |     |
| 18                       | 283                                                                   | 17,8                      | 27,9                                      |                                         |     |     |     |     |     |     |
| 28                       | 448                                                                   | 28,2                      | 44,2                                      |                                         |     |     |     |     |     |     |
| 45                       | 710                                                                   | 44,6                      | 70,1                                      | D                                       | D   | D   | D   | D   | D   | D   |
| 71                       | 1125                                                                  | 70,7                      | 111                                       |                                         |     |     |     |     |     |     |
| 112                      | 1784                                                                  | 112                       | 176                                       |                                         |     |     |     |     |     |     |
| 180                      |                                                                       |                           |                                           |                                         |     |     |     |     |     |     |

Key to zones

A: The vibration of newly commissioned machines would normally fall within this zone.

B: Machines with vibration within this zone are normally considered acceptable for long-term operation.

C: Machines with vibration within this zone are normally considered unsatisfactory for long-term continuous operation. Generally, the machine may be operated for a limited period in this condition until a suitable opportunity arises for remedial action.

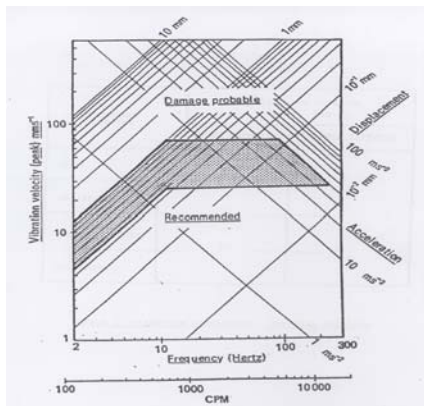
D: Vibration values within this zone are normally considered to be of sufficient severity to cause damage to the machine.

NOTE — Vibration values for reciprocating machines may tend to be more constant over the life of the machine than for rotating machines. Therefore zones A and B are combined in this table. In future, when more experience is accumulated, guide values to differentiate between zones A and B may be provided.

شکل شماره ۳- ارزیابی وضعیت موتور بر اساس شدت ارتعاشات [۶]

### ب \_ تحلیل فرکانسی

- دامنه سرعت در محدوده فرکانس ۴/۸ تا ۱۰۰ هرتز در بالای موتور در جهت عرضی نباید بیش از ۱۵ میلی متر بر ثانیه باشد.
- دامنه جابجایی در محدوده فرکانس ۱ تا ۴/۸ هرتز در بالای موتور در جهت عرضی نباید بیش از ۰/۵ میلی متر باشد.
- دامنه سرعت فونداسیون در سه جهت اصلی در محدوده ۲ تا ۳۰۰ هرتز باید مطابق نمودار زیر ( شکل شماره ۴) بررسی شود.



شکل شماره ۴- دامنه ارتعاشات فونداسیون [۱۰]

### ۱۰-۳- دیزل ژنراتور

#### الف \_ ارتعاشات کلی

مقدار موثر جابجایی، سرعت و شتاب مطابق جدول شکل شماره ۵ می‌تواند ارزیابی شود. مقدار Value 1 می‌تواند به عنوان حد عادی و مقدار Value 2 می‌تواند به عنوان سطح هشدار در نظر گرفته شود.

#### ب \_ تحلیل فرکانسی

- دامنه سرعت در کلیه فرکانسها در محدوده ۳/۲ تا ۱۰۰ هرتز نباید بیش از ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه باشد.
- دامنه جابجایی در محدوده ۱ تا ۳/۲ هرتز نباید بیش از ۰/۵ میلی‌متر باشد.

| Declared engine speed<br>min <sup>-1</sup> | Rated power output of the generating set<br>(cos φ = 0.8) |                             | Vibration displacement <sup>1), 2)</sup> $s_{rms}$ |                               | Vibration velocity <sup>3)</sup> $v_{rms}$ |                  | Vibration acceleration <sup>1), 4)</sup> $a_{rms}$ |                                             |                                             |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                            | kV.A                                                      | kW                          | RIC engine 2) 3)                                   | Generator 2)<br>value 1<br>mm | Generator 2)<br>value 2<br>mm/s            | RIC engine 2) 3) | RIC engine 2) 3)                                   | Generator 2)<br>value 1<br>m/s <sup>2</sup> | Generator 2)<br>value 2<br>m/s <sup>2</sup> |
| ≥ 2 000 but<br>≤ 3 600                     | ≤ 15<br>(1-cylinder engine)                               | ≤ 12<br>(1-cylinder engine) | —                                                  | 1,11                          | 1,27                                       | —                | —                                                  | 44                                          | 50                                          |
|                                            | ≤ 50                                                      | ≤ 40                        | —                                                  | 0,8                           | 0,95                                       | —                | —                                                  | 31                                          | 38                                          |
|                                            | > 50                                                      | > 40                        | —                                                  | 0,64 4)                       | 0,8 4)                                     | —                | —                                                  | 25 4)                                       | 31 4)                                       |
|                                            | ≤ 10                                                      | ≤ 8                         | —                                                  | —                             | —                                          | —                | —                                                  | —                                           | —                                           |
| ≥ 1 300 but<br>< 2 000                     | > 10 but<br>≤ 50                                          | > 8 but ≤ 40                | —                                                  | 0,64                          | —                                          | —                | —                                                  | 25                                          | —                                           |
|                                            | > 50 but<br>≤ 125                                         | > 40 but<br>≤ 100           | —                                                  | 0,4                           | 0,48                                       | —                | —                                                  | 16                                          | 19                                          |
|                                            | > 125 but<br>≤ 250                                        | > 100 but<br>≤ 200          | 0,72                                               | 0,4                           | 0,48                                       | 45               | 28                                                 | 16                                          | 19                                          |
|                                            | > 250                                                     | > 200                       | 0,72                                               | 0,32                          | 0,45                                       | 45               | 28                                                 | 13                                          | 18                                          |
| > 720 but<br>≤ 1 300                       | ≥ 250 but<br>≤ 1 250                                      | ≥ 200 but<br>≤ 1 000        | 0,72                                               | 0,32                          | 0,38                                       | 45               | 28                                                 | 13                                          | 15                                          |
|                                            | > 1 250                                                   | > 1 000                     | 0,72                                               | 0,29                          | 0,35                                       | 45               | 28                                                 | 11                                          | 14                                          |
|                                            | > 1 250                                                   | > 1 000                     | 0,72                                               | 0,24<br>(0,16) 5)             | 0,32<br>(0,24) 5)                          | 45               | 28                                                 | 9,5<br>(6,5) 5)                             | 13<br>(9,5) 5)                              |
|                                            | > 1 250                                                   | > 1 000                     | 0,72                                               | 0,24<br>(0,16) 5)             | 0,32<br>(0,24) 5)                          | 45               | 28                                                 | 9,5<br>(6,5) 5)                             | 13<br>(9,5) 5)                              |

NOTE — The relationship between vibration velocity and vibration frequency is shown in figure C.1.

1) The values of  $s_{rms}$  and  $a_{rms}$  are determined from the following equations by using the values given in the table for  $v_{rms}$ .

$$s_{rms} = 0,0159 \times v_{rms}$$

$$a_{rms} = 0,628 \times v_{rms}$$

2) In the case of flange housing coupled generating sets the values measured at point 5 [see figure 1 a)] shall meet the values for generators.

3) The stated values for RIC engines are applicable for engines with power outputs of more than 100 kW. For smaller engines with power outputs below 100 kW, no typical values exist.

4) These values are subject to agreement between the manufacturer and customer.

5) The values given in parentheses are applied to generators mounted on solid concrete foundations. In these cases the axial measurement for points 7 and 8 in figure 1 a) and b) shall be 50 % of the values given in parentheses.

شکل شماره ۵ - ارزیابی وضعیت دیزل ژنراتور بر اساس شدت ارتعاشات کلی [۷]

#### ۱۰-۴- فن‌ها، الکتروموتور و پمپ‌های دوار

##### الف \_ ارتعاشات کلی

- مقدار موثر جابجایی، سرعت و شتاب کلی ارتعاشات می‌تواند مطابق جدول زیر (شکل شماره ۶) ارزیابی شود. برای توضیحات بیشتر به منبع [۱۰] مراجعه شود.

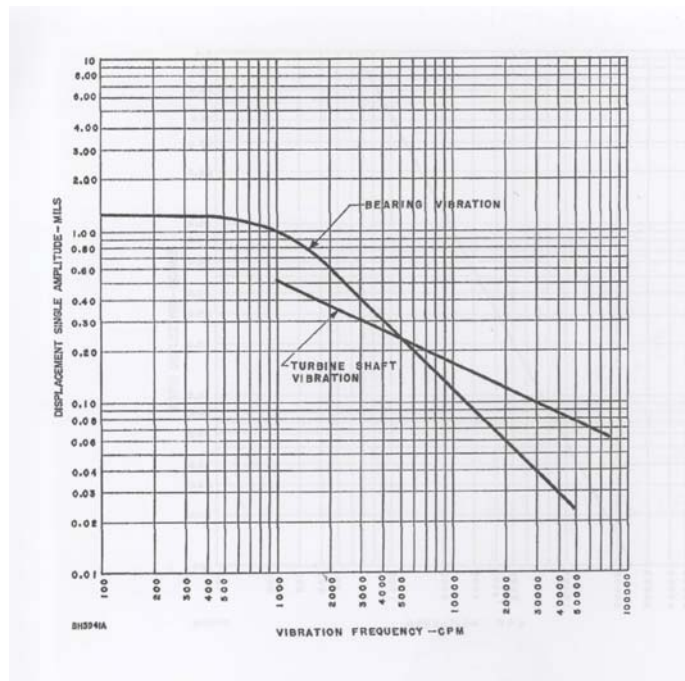
|                | Small Machines<br>< 15 kW | Medium Machines<br>15 – 75 kW | Large Machines<br>> 75 kW               |                                            |
|----------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
|                | Limit (mm/sec rms)        | Limit (mm/sec rms)            | Rigid foundations<br>Limit (mm/sec rms) | Flexible foundations<br>Limit (mm/sec rms) |
| Good           | 0.7                       | 1.1                           | 1.8                                     | 2.8                                        |
| Satisfactory   | 1.8                       | 2.8                           | 4.5                                     | 7.1                                        |
| Unsatisfactory | 4.5                       | 7.1                           | 11.2                                    | 18.0                                       |
| Excessive      | > 4.5                     | > 7.1                         | > 11.2                                  | > 18.0                                     |

شکل شماره ۶- ارزیابی وضعیت ماشین‌های دوار بر اساس شدت ارتعاشات کلی [۱۰]

- سطح هشدار برای دامنه سرعت  $\frac{3}{8}$  میلی‌متر بر ثانیه و برای دامنه جابجایی ۳۲ میکرون می‌باشد.

##### ب \_ تحلیل فرکانسی

- سطح هشدار در فرکانسهای مختلف برای دامنه جابجایی نمودار زیر (شکل شماره ۷) می‌باشد.
- دامنه جابجایی و سرعت در محدوده ۱ تا ۱۰۰ هرتز نباید بیش از مقادیر زیر باشد:
- جابجایی در محدوده فرکانس ۱ تا ۲ هرتز:  $\frac{1}{4}$  میلی‌متر
- سرعت در محدوده فرکانس ۲ تا ۱۰۰ هرتز: ۵ میلی‌متر بر ثانیه



شکل شماره ۷- سطح هشدار برای دامنه جابجایی ارتعاشات ماشینهای دوار [۱۱]

#### ۱۰-۵- ارزیابی بر مبنای مقادیر مبنا

برای اینکه بتوان ارزیابی دقیقتری از وضعیت دستگاه‌ها داشت مقدار مجاز شدت ارتعاشات می‌تواند بر اساس مقادیر مبنا نیز تعیین شود. این حدود با توجه به بزرگی مقادیر مبنا در جدول زیر آورده شده‌اند. البته باید توجه داشت که این حدود بیش از مقادیر گفته شده در بندهای قبل نباشد. به عبارت دیگر هر یک از این حدود کمتر باشد باید به عنوان حد مجاز تعیین شود [۸].

| Table 1.3.4-1<br>TREND ANALYSIS<br>VIBRATION LEVEL INCREASES                                                                                                                                          |                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $V_0$                                                                                                                                                                                                 | = Baseline velocity amplitude (in/sec)                                     |
| $V_{max}$                                                                                                                                                                                             | = Maximum acceptable vibration amplitude (assuming no change in operation) |
| Baseline amplitude in excess of 0.4 in/sec should be evaluated in terms of the specific machine; i.e., reciprocating engines, compressors, etc.                                                       |                                                                            |
| a. $V_0$ between .001 and .04                                                                                                                                                                         | $V_{max} = 6 V_0$                                                          |
| b. $V_0$ between .04 and .09                                                                                                                                                                          | $V_{max} = 3 V_0$                                                          |
| c. $V_0$ between .09 and .19                                                                                                                                                                          | $V_{max} = 2.5 V_0$                                                        |
| d. $V_0$ between .19 and .40                                                                                                                                                                          | $V_{max} = 1.5 V_0$                                                        |
| Example: An original level of $V_0 = 0.10$ in/sec would fall under formula c. " $V_0$ " is between .09 and .19 $V_{max} = 2.5 V_0$<br>A 0.25 in/sec amplitude would signal an unacceptable condition. |                                                                            |

شکل شماره ۸- مقدار مجاز افزایش شدت ارتعاشات در مقایسه با مقادیر مبنا [۸]

#### مراجع

- [1] Frank DeBord, Jr., William Hennessy, and Joseph McDonald, measurement and Analysis of shipboard vibration, Marine Technology, Vol. 35, No. 1, Jan. 1998
- [2] ISO 13371-1, Condition monitoring and diagnostics of machines-Vibration condition monitoring-Part1: General procedures
- [3] ISO 4868, Code for the measurement and reporting of local vibration data of ship structure and equipment
- [4] DNV, Rules for building and classification of high speed, light craft and surface naval craft, July 2000
- [5] Lloyd's Register, Guidance notes on acceptable vibration levels and their measurement
- [6] ISO 10816-6, Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts-part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100 kW

- [7] ISO 8528-9, Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets – Par 9: Measurement and evaluation of mechanical vibrations.
- [8] SNAME, T&RB 3-42, Guidelines for the use of vibration monitoring for preventing maintenance, May 1987
- [9] DNV, Guidance for condition monitoring, Jan. 2003
- [10] Lloyd's Register, Machinery planned maintenance and condition monitoring, May 2004
- [11] MIL-STD-167, Mechanical vibrations of shipboard equipment