



دانشگاه صنعتی شریف  
دانشکده مکانیک

## موضوع سمینار: پایش وضعیت آنلاین سازه کشتی و روش های عیب یابی

نگارش  
حمید باب

استاد راهنما  
دکتر محمد سعید سیف

1402 دی

## چکیده:

حمل و نقل دریایی دارای اهمیت بسیار بالایی می باشد که بدین منظور باید مطالعات ویژه ای برای آن انجام شود، بدین منظور در این سمینار به روش های پایش وضعیت آنلاین یک سازه می پردازیم.

در ابتدا به اهمیت حمل و نقل دریایی و انواع کشتی ها آشنا می شویم، و در فصل بعدی استحکام شناور و پارامتر های موثر بر آن را بررسی می کنیم. استحکام کشتی به ویژگی ها و قابلیت هایی اطلاق می شود که از نظر مهندسی و ساختاری، کشتی را توانمند به مقاومت در برابر نیروهای خارجی می کند.

در فصل سوم از این سمینار به پایش وضعیت آنلاین یک سازه و روش های آن می پردازیم، در ابتدا با مفاهیم پایش وضعیت آنلاین آشنا می شویم تا بتوانیم تحلیل بهتری داشته باشیم. پایش وضعیت یک فرآیند یا سیستم به معنای نظارت و اندازه گیری مداوم عملکرد آن است. این فرآیند از طریق جمع آوری داده ها و تجزیه و تحلیل آنها صورت می پذیرد تا هر گونه نقص یا ناهمانگی به سرعت شناسایی شود. پایش وضعیت از اهمیت بالایی در مدیریت پروژه ها، سلامت سازمان ها برخوردار است تا اطمینان حاصل شود که همه چیز به طور صحیح و بهینه اداره می شود؛ در این فصل با روش های آکوستیک، کرنش سنج ها و آنالیز ارتعاشی آشنا می شویم.

در فصل انتهایی با مدلسازی یک تیر با حالت های با ترک و کندگی در حالت های به ترتیب دو سر مفصل آزاد و گیردار آن را بررسی می کنیم تا بر موارد گفته شده تصدیق کنیم، در این فصل مدهای ارتعاشی، انرژی کرنشی، کرنش سازه و ... مورد بررسی قرار میگیرد تا مطالب ارتعاشی اشاره شده در فصل سوم را پوشش دهد.

کلید واژه ها: کشتی، پایش، آنلاین، استحکام

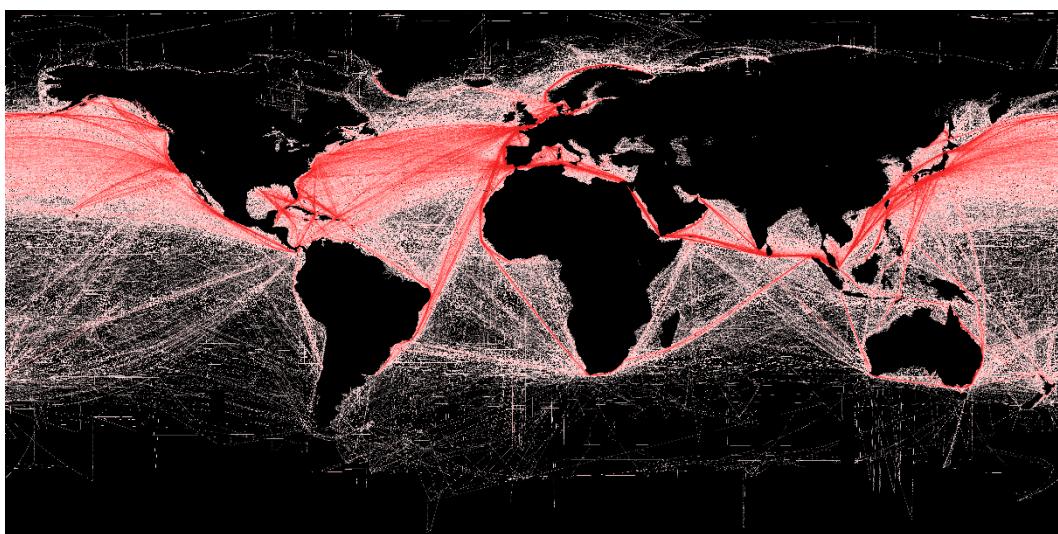
## فهرست مطالب

2	چکیده.....
4	فصل 1: کشتی.....
4	1- صنعت حمل و نقل دریایی .....
6	2- انواع کشتی ها .....
7	2-1- تجهیزات مختلف کشتی .....
9	فصل 2: استحکام سازه .....
9	1- اهمیت استحکام سازه .....
11	2- آشنایی با ساختمان سازه .....
14	3- نقش انجمن های دریایی .....
15	فصل 3: روش های پایش آنلاین وضعیت و آشنایی با روش های آن .....
15	1-3) مفهوم پایش وضعیت آنلاین .....
16	2-3) آکوستیک .....
19	1-3-4) استفاده نمونه آکوستیک در کشتی های کانتینربر .....
20	3-3) سنسور های کرنش سنج .....
23	4-3) آنالیز ارتعاشی .....
31	فصل 4: مدلسازی و پایش آنلاین وضعیت به روش آنالیز ارتعاشی .....
31	1-4) تغییرات فرکانس های طبیعی در ترک .....
40	2-4) تغییرات فرکانس های طبیعی در کندگی .....
46	منابع.....

## فصل 1 : کشتی

### 1-1) صنعت حمل و نقل دریایی :

حمل و نقل دریایی<sup>1</sup> به جابجایی افراد، کالاها و ... بهوسیله انواع شناور ها از روی دریاهای، اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، کانال‌ها و رودخانه‌ها کالاهايی که از طریق دریا حمل می‌شوند گفته می‌شود، معمولاً این بارها دارای حجم و وزن زیادی می‌باشند. حمل و نقل در دریا امروزه از اهمیت بالایی برخوردار است، دریا گذرگاه مناسبی برای اهداف مختلف و متنوعی است که با کشتی‌ها انجام می‌شود. 90 درصد تجارت جهانی از طریق این نوع حمل و نقل صورت می‌گیرد بنابراین حمل و نقل دریایی قلب اصلی اقتصاد و تجارت جهانی است.



تصویر 1-1 : ترافیک دریایی در جهان

از این رو که استفاده از شناورهای دریایی روز به روز افزایش می‌یابد، توسعه و شناخت نسبت به این موضوع بسیار حیاتی است.

حمل و نقل دریایی نسبت به بقیه روش‌ها ارزانتر بوده و به همین دلیل صاحبان کالا و شرکت‌های تجاری ترجیح می‌دهند کالای خود را از طریق مسیرهای آبی حمل کنند. از طریق کشتی‌ها حمل کالا با حجم بالا ممکن است. از طریق آب‌های آزاد محموله‌های نسبتاً سنگین تا حدود 500 تا 200 هزار تن را به سهولت می‌توان با یک کشتی از بندری به بندر دیگر جابه‌جا کرد که قابل مقایسه با هیچ ابزار حمل و نقلی دیگری نیست.

---

<sup>1</sup> Maritime Transportation

در این بخش مزیت های بسیار حمل و نقل دریایی توسط کشتی ها نسبت به حمل و نقل های دیگر اشاره می شود :

1) قیمت پایینتر نسبت به سایر وسایل حمل و نقل

2) ظرفیت بالای بارگیری

3) تقریباً عدم نیاز به سرمایه گذاری در زمینه زیر ساخت در دریا

4) ایمن تر بودن حمل و نقل دریایی

5) نیروی کار کمتر

با ادامه رشد جمعیت جهان ، به ویژه در کشورهای در حال توسعه ، حمل و نقل دریایی با هزینه کمتر ، کارآمد و آسان تر نقشی اساسی در رشد و توسعه پایدار جوامع دارد. علاوه بر آنکه حمل و نقل از طریق آب همانطور که گفتیم ، آسان تر و ارزان تر است چالش های متنوعی همچون چالش های صنعتی مربوط به کشتیرانی و چالش های اقتصادی مربوط به بنگاه های اقتصادی را در پی دارد.



تصویر 1-2) خروج گاز های آلاینده از اگزوز یک کشتی

یکی از چالش های اساسی آلودگی محیط زیست ناشی از سوخت کشتی ها دانست که بر محیط دریا تاثیر بسزایی می گذارد؛ در نتیجه فرآیند های احتراق در موتور کشتی ، آلاینده های مختلف را در جو منشر می کنند که اصلی ترین آنها اکسیدهای گوگرد ( $\text{SOx}$ )، اکسیدهای نیتروژن ( $\text{NOx}$ )، ذرات معلق ( $\text{PM}$ ) و مونوکسید کربن ( $\text{CO}$ ) هستند.

در حال حاضر کشتی ها مسئول بیش از 3٪ از انتشار گازهای گلخانه ای جهانی هستند، اگر این آلاینده ها به عنوان یک کشور گزارش می شد ، حمل و نقل دریایی هشتاد و نه تولید کننده بزرگ آلاینده اروپا است.

## 2-1) انواع کشتی ها



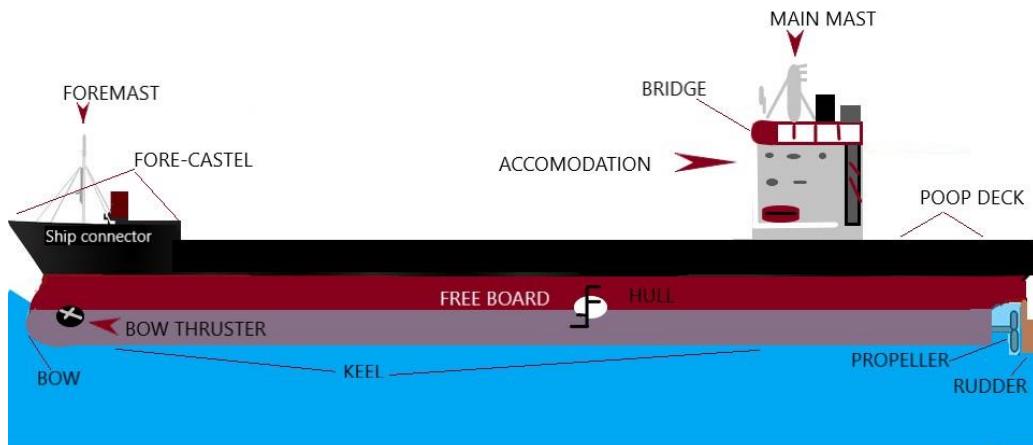
تصویر 3 : انواع کشتی های دنیا

کشتی ها کاربرد های گسترده ای در اکتشاف ، تجارت ، جنگ ، مهاجرت ، استعمار ، حمل سکوهای (حفاری یا استخراج نفتی) و ... دارند که بسته به کاربرد آنها انواع مختلفی در جهان ساخته شده است که میتوان به انواع و کاربرد و ظرفیت هر یک از آنها در جدول 1-1 اشاره کرد :

نام کشتی	کاربرد	حداکثر ظرفیت
Container	حمل کانتینر ها – بزرگترین شناور تجاری	24000TEU
Bulk carriers	حمل فله های بسته بندی نشده مانند غلات ، زغال سنگ و ...	400000 DWT
Tanker	ذخیره یا حمل ، مایعات و گازها	DWT 120,000
General Cargo	حمل کالا های بسته بندی شده مانند مواد غذایی ، ماشین آلات ، پوشک و ...	22,000 .TEU
O.B.O	حمل ترکیبی بار های مایع و خشک مانند نفت ، زغال سنگ ، روغن و ...	100,000DWT
RO-RO	حمل وسایل چرخدار مانند اتومبیل ، کامیون ، تریلر و قطار و ..	Vehicles 8000
Cruise ship	جبهه گردشگری و جابجایی مسافران در هتل های لوکس و ...	passenger 5400

## 1-2-1) تجهیزات مختلف کشتی

برای شناخت بیشتر برای تحلیل بهتر استحکام یک سازه، کشتی ها مانند یک شهر شناور دارای بخش های مختلف و متفاوتی هستند؛ در تمامی کشتی های مختلف، قسمت های اصلی وجود دارند که علت وجود هر یک از آنها را باید بدانیم، در شکل 1-4 این قسمت ها بصورت شماتیک اشاره شده اند و در ادامه به معرفی مختصر از چند قسمت مهم شناور می پردازیم.



تصویر 1-4 : انواع قسمت های مختلف شناور ها

1- بدن<sup>1</sup>ه<sup>1</sup> : کشتی دارای یک بخش آب بندی شده است که بدن نام دارد، انواع مختلفی از شکل ظاهری بدن ها وجود دارد که هر یک کاربرد های بخصوصی را دارند، این شکل از بدن باشد از نظر هزینه، ملاحظات هیدرولاستاتیکی (پایداری، تحمل وزن و...)، ملاحظات هیدرودینامیکی (قدرت موتور و پروانه، سرعت ، مقاومت و...) مورد ارزیابی قرار بگیرد و براساس کاربردی که مدنظر سازنده است انتخاب شود، یکی از محل هایی که دچار تغییر شکل می شود همین ناحیه می باشد.

2- بدن فوکانی<sup>2</sup> : خدمه و ناوبراون کشتی که مسئولیت اصلی هدایت موقعیت کشتی در هر زمانی را دارند در محیطی به نام بدن فوکانی زندگی میکنند، این محیط دارای اتاق ناوبراون، خواب و استراحت، غذا و.. است.

<sup>1</sup> Hull

<sup>2</sup> Super Structure

**3- موتور:** در شناور ها، نیروی محرکه اجزایی مثل پروانه یا برق کشتی را موتور کشتی تامین می کند.



تصویر 1-5 : موتور کشتی

موتور نیروی لازم برای پیش روی در دریا، مانور پذیری کشتی را فراهم می کند و از آنجایی که شرایط محیطی سخت و خشن است باید دارای ایمنی لازم برای کار کرد باشد، به همین موتور های کشتی توسعه شرکت های فوق تخصصی که در طراحی و ساخت موتور های دریایی تخصصی دارند تولید می شوند مانند شرکت رولز رویس که در تصویر 1-5 نمونه موتور تولیدی در این شرکت نمایش داده شده است.

موتور های کشتی ها انواع مختلفی هستند که از نوع بخار، دیزل، توربین گاز و الکتریکی می توان اشاره کرد که هر یک براساس اندازه و کاربرد مورد نظر کشتی انتخاب می شوند، برای کشتی های بزرگ سرعت شفت باید 100 تا 200 دور بر دقیقه و توان موتور 12 تا 50 مگاوات باشد که مقادیری قابل توجه است که شناور را دچار ارتعاش می کند.

**4- سکان<sup>1</sup>:** ابزاری که در کشتی برای هدایت و مانور کشتی ها استفاده می شود، سکان که در پشت بخش پروانه قرار می گیرد روی یک محور عمودی می چرخد تا با انحراف جریان، نیروی عرضی را ایجاد کنند؛ می توان با افزایش ناحیه سکان، نوع سکان بهتر و ... اثر بخشی سکان را بهبود داد. سکان های مربوط به کشتی های VLCC یا کانتینر بر بیشتر مرحله عملیاتی آنها مربوط به حفظ مسیر می باشد در نتیجه زوایای آن تا 35 درجه محدود می شود ولی در بعضی شناور ها این مانور پذیری اهمیت بیشتری دارد.

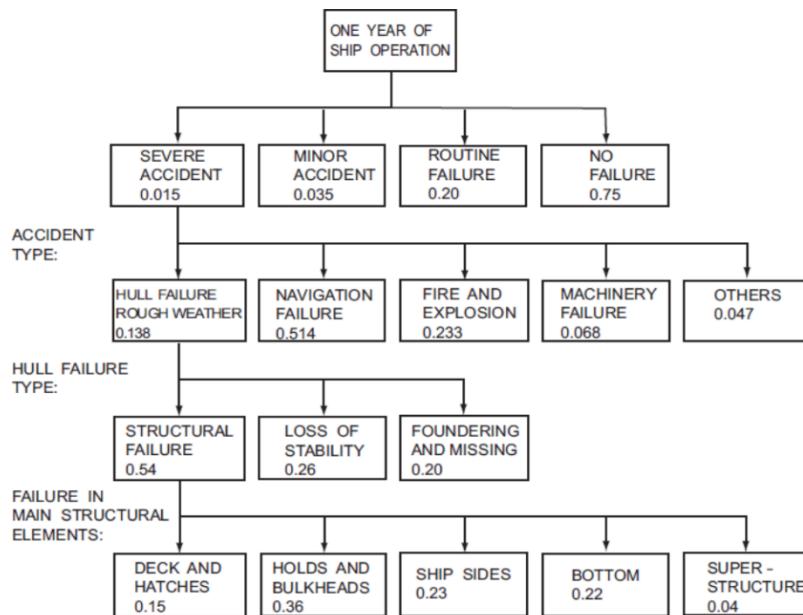
---

<sup>1</sup> Rudder

## فصل 2: استحکام سازه

### 1-2) اهمیت استحکام سازه

استحکام سازه کشتی یک مفهوم مهم در مهندسی کشتی است و به توانایی یک کشتی در مقابل نیروهای خارجی و داخلی نظیر بارهای خارجی، لرزه‌ها، تنش‌ها، وزن و... به صورت مقاوم و پایدار باقی ماندن اشاره دارد.



تصویر 2-1) احتمال عوامل تصادفات یک کشتی

در یک کشتی، از نظر سازه‌ای و ساختمن کشتی درصد قابل توجهی احتمال خرابی و تصادف وجود دارد، به دلیل نکات گفته شده در فصل اول لازم می‌باشد که اهمیت استحکام سازه را با اهمیت بدانیم و برای کاهش درصد این احتمالات تلاش کنیم تا تصادفات شناور‌ها کاهش بیابد.

درصد تصادفاتی که به دلیل ضعف در استحکام سازه کشتی رخ می‌دهد، متغیر است و بستگی به عوامل مختلفی از جمله تکنولوژی ساخت، نگهداری و تعمیرات، شرایط دریا، و سایر عوامل دارد.

اهمیت استحکام سازه ای در کشتی ها به دلیل موارد زیر می باشد:

1- حفاظت از افراد و محیط:

استحکام سازه ای کشتی از اهمیت زیادی برخوردار است چرا که یک کشتی باید توانایی مقابله با شرایط دریا را داشته باشد تا افراد درون آن و محیط اطراف محافظت شوند.

2- کاهش حوادث:

استحکام سازه کشتی به کاهش حوادث ناشی از فشارها و تنשی های مختلف که به سازه اعمال می شوند، کمک می کند. حوادث مرتبط با ضعف در استحکام سازه ممکن است منجر به غرق شدن، تصادف، یا خسارت های جدی دیگر گردد.

3- عملکرد:

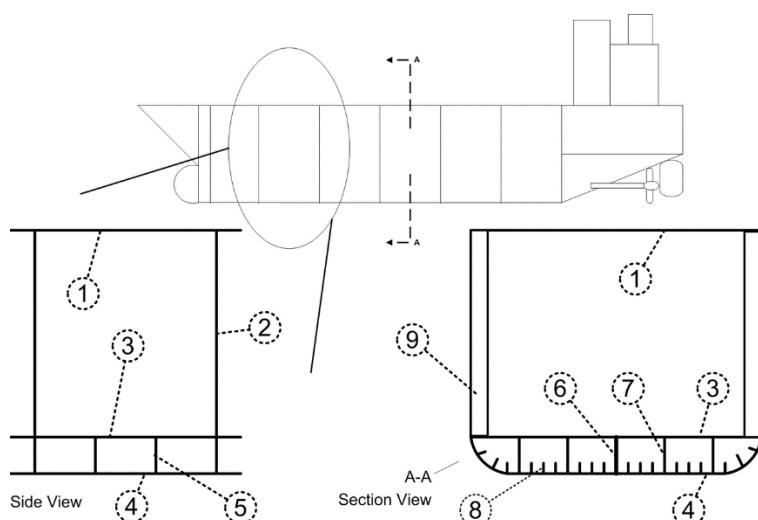
استحکام سازه ای موجب عملکرد بهتر در شرایط دریایی مختلف می شود و از نظر اقتصادی نیز به بهره وری و ایمنی افزوده می شود.

یک سازه یکپارچه باید به معنای این باشد که اجزاء مختلف آن به نحوی متناسب و هماهنگ با یکدیگر طراحی شده اند. این اهمیت از جهت افزایش کارایی، کاهش خطرات، و افزایش استحکام سازه به ویژه در مواجهه با شرایط بحرانی دریا می شود. سازه یکپارچه، هماهنگی بین اجزاء را افزایش می دهد و موجب مقاومت بهتر در برابر تنش ها و فشارهای مختلف می شود، ما در بخش استحکام سازه به دنبال این موضوع هستیم.

## 2-2) آشنایی با ساختمان سازه

ساختمان یک کشتی، که به عنوان بدن آن نیز شناخته می‌شود، جزء مهمی است که استحکام، پایداری و عملکرد کلی کشتی را در شرایط مختلف دریایی تعیین می‌کند. ساختمان کشتی به گونه‌ای طراحی شده است که در برابر نیروهای تحمیل شده توسط دریا، امواج، باد و سایر عوامل محیطی مقاومت کند. در این بخش با این موارد آشنا می‌شویم.

سازه کشتی دارای المان‌های بسیار زیادی می‌باشد و برای آنکه آن را برای ساخت تحلیل کرد نیاز به شناخت کافی نسبت به این المان‌ها می‌باشد، در تصویر 2-2 قسمت‌های مختلف سازه کشتی مشخص شده است که به ترتیب در ادامه به معرفی آنها می‌پردازیم.



تصویر 2-2) احتمال عوامل تصادفات یک کشتی

۱- ورقه عرضه<sup>۱</sup>

۲- بالکد های عرضی<sup>۲</sup>

۳- ورقه های داخلی<sup>۳</sup>

- 
1. Deck plating (a.k.a. Main Deck, Weatherdeck or Strength Deck)
  - 2 . Transverse bulkhead
  3. Inner bottom shell plating

۴- ورقه بدنه بیرونی <sup>۱</sup>

۵- تیر های عرضی <sup>۲</sup>

۶- تیر های کف <sup>۳</sup>

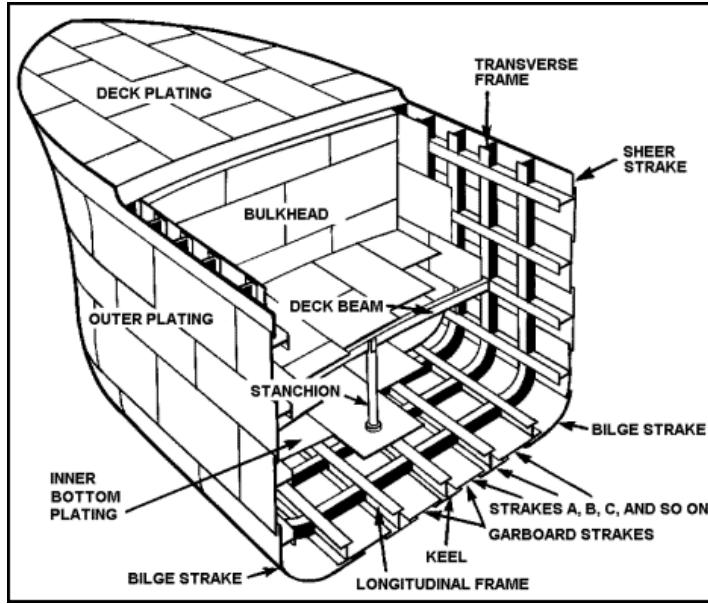
۷- گیردر های طولی <sup>۴</sup>

۸- استیفنر های طولی <sup>۵</sup>

۹- ورق های کناری بدنه <sup>۶</sup>

سازه کشتی یک ستون فقرات اصلی دارد که در امتداد خط مرکزی از سینه به سمت پاشنه حرکت می کند. این عناصر به استحکام کشتی کمک می کنند و به حفظ شکل آن کمک می کنند؛ همچنین بدنه شناور از صفحات فلزی، معمولاً فولادی یا آلومینیومی تشکیل شده است. آبکاری در برابر نفوذ آب محافظت می کند و به یکپارچگی ساختاری کشتی کمک می کند.

- 
1. Hull bottom shell plating
  2. Transverse frame (1 of 2)
  3. .Keel frame
  - 4.Keelson (longitudinal girder) (1 of 4)
  5. Longitudinal stiffener (1 of 18)
  - 6 .Hull side beam



تصویر 2-3) انواع عرشه در سازه شناور

همانطور که در تصویر 2-3 مشخص شده است، کشتی ها دارای عرشه های متعددی هستند که اهداف مختلفی را انجام می دهند. عرشه اصلی معمولاً بالاترین عرشه پیوسته است، در حالی که سایر عرشه ها ممکن است به عنوان عرشه های بالا، پایین و... تعیین شوند. عرشه ها به استحکام کشتی کمک می کنند و فضاهای کار و زندگی را برای خدمه فراهم می کنند.

طراحی و ساخت سازه کشتی شامل ترکیبی از معماری دریایی، مهندسی دریایی و علم مواد است تا کشتی را بسازد که برای هدف مورد نظرش در دریا کارآمد باشد.

## 2-3) نقش انجمان های دریایی

انجمان های طبقه بندی کشتی ها مانند DNV<sup>1</sup> ، Lloyd's و ... فرم های محاسبه استانداردی را برای بار بدن، الزامات مقاومت، ضخامت آبکاری بدن و سفت کننده های تقویت کننده، تیرها و سایر سازه ها ایجاد کرده اند. با توجه به این انجمان ها استاندارد هایی را ایجاد کرده که براساس موسسات رده بندی تشکیل می شوند.



تصویر 2-4) لویدز یکی از مهمترین انجمان های دریایی در این حوزه می باشد.

این روش ها اغلب راهی سریع برای تخمین قدرت مورد نیاز برای هر کشتی ارائه می دهند. تقریباً همیشه آن روش ها مقادیر مقاومتی محافظه کارانه یا قوی تر از آنچه دقیقاً مورد نیاز است می دهند. با این حال، آنها نقطه شروع مفصلی برای تجزیه و تحلیل ساختار یک کشتی مشخص و اینکه آیا استانداردهای رایج صنعت را برآورده می کند یا خیر، ارائه می دهند.

براساس آن بسیاری از سازمان های بیمه و..., بیمه کردن کشتی و بار آن را منوط به داشتن مدارک لازم می کنند که یکی از مدارک لازم آن، مدارک مربوط به ساختمان و سازه کشتی است که براساس یکی از انجمان های دریایی ساخته و استاندارد باشد، بدین منظور این انجمان ها نقش بسیار مهمی را ایفا میکنند، حال در فصل بعدی به تغییرات شکل یک سازه می پردازیم که باید آن را با روش هایی تشخیص دهند.

<sup>1</sup>

## فصل 3: روش های پایش آنلاین وضعیت و آشنایی با روش های آن

### 1-3) مفهوم پایش آنلاین وضعیت<sup>۱</sup>

در نگهداری و تعمیرات، پایش وضعیت یا مراقبت وضعیت به مجموعه اعمالی می‌گویند که با پایش وضعیت ماشین و بررسی تغییرات آن در طول زمان براساس پارامترهایی مانند ارتعاشات، صدا، عملکرد، روانکاری، دما وضعیت ماشین را تعیین می‌کند. پایش وضعیت یکی از اجزای اصلی نگهداری پیش‌بینانه می‌باشد تا بتوانیم در زمان‌هایی قبل از خرابی‌های بزرگ تعمیرات را داشته باشیم، با توجه به اهمیت سازه‌ای کشتی در مواردی که در فصول گذشته گفته شد پایش آنلاین وضعیت و روش‌های مربوط به آن در کشتی را در این فصل بررسی خواهیم کرد.

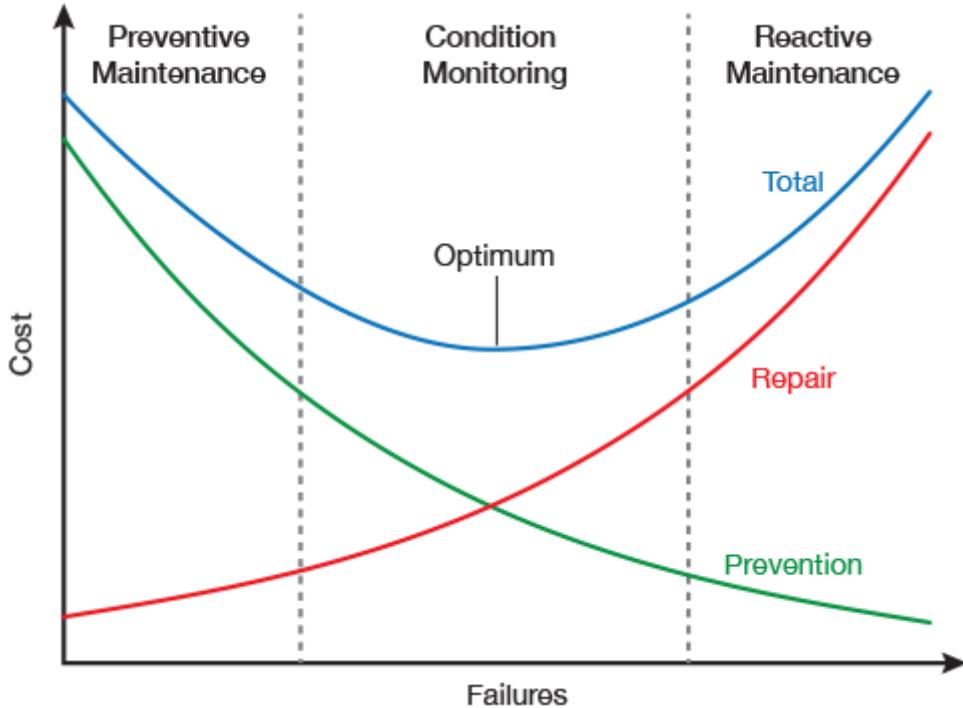


تصویر 3-1) پایش وضعیت آنلاین در سازه‌هایی با المان‌های زیاد بسیار پراهیمت است.

نگهداری پیش‌بینانه که در چند دهه اخیر بیشترین کاربرد را در روش‌های تعمیراتی در کشورهای پیشرفته داشته است. در این روش وضعیت ماشین آلات را بررسی می‌کنند و آن‌ها را در فواصل زمانی مشخصی بازدید می‌کنند که البته این فواصل زمانی به اهمیت تجهیز بستگی دارد. وضعیت دستگاه در بازدیدهای دوره‌ای ثبت و پایش می‌شود و در صورت مشاهده هر نوع خرابی سرعت رشد آن را تحت نظر قرار می‌دهند.

---

<sup>1</sup> Online Condition Monitoring



تصویر 3-2) پایش وضعیت آنلاین هزینه ها را به حداقل برای جلوگیری از خرابی و تعمیر می رساند.

در زمانی قبل از تخریب دستگاه آن را از سرویس خارج و به تعمیر همان قسمت معیوب که از قبل تعیین شده بود می پردازند. باید توجه داشته باشید که با توجه به اینکه از قبل اشکال دستگاه مشخص و مورد پایش قرار گرفته از پیش آمادگی خراب شدن یک قسمت خاص تجهیز را داریم و در نتیجه می توانیم پیش از، از کار افتادن ماشین به دنبال تهیه لوازم جانبی مورد نیاز جهت تعمیر ماشین باشیم. با توجه به اینکه قبل از توقف ناخواسته دستگاه خودمان دستگاه را از سرویس خارج می کنیم در نتیجه خسارات و هزینه های ناشی از توقف ناخواسته دستگاه از بین می رود و ضمناً با اینکار از خراب شدن دیگر قسمت های تجهیز جلوگیری می شود.

در ادامه به روش های معمول در کشتی ها برای پایش وضعیت آنلاین سازه می پردازیم.

## 2-3) آکوستیک

روش آکوستیک، روشی است که نقاط و ناحیه هایی که دارای نقص هستند را پیدا می کند، این روش به نام استاندارد AET<sup>1</sup> به عنوان :

(1) طرح تست

(2) نصب و بررسی

(3) جمع آوری و تجزیه و تحلیل داده ها

(4) گزارش مستندات

(5) بازرسی و پیگیری را شامل می شود.

AET امواجی با انرژی الاستیک هستند که به طور خود به خودی توسط یک ماده که دچار جابجای و تغییرشکل شده است آزاد می شود، سیگنال انتشار صوتی منعکس کننده توزیع مجدد تنش داخلی و خارجی می باشد که به سازه در حال وارد شدن می باشد. این تنش ها می توانند هیدررواستاتیک، هیدرودینامیکی، حرارتی یا خمی باشند.

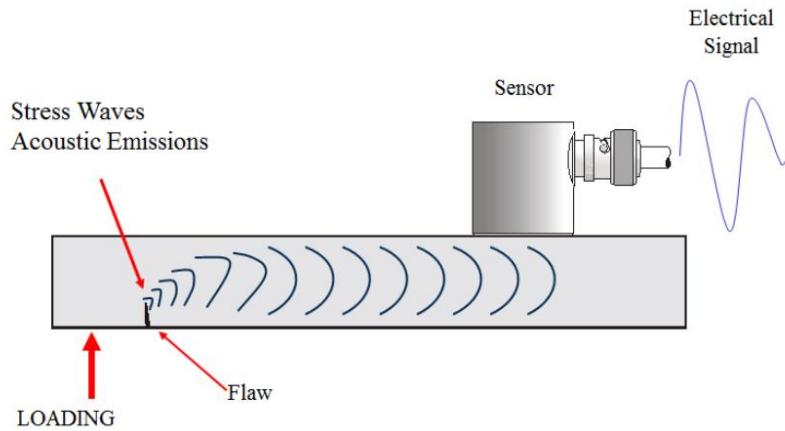
AET یک روش آزمایش غیر فعال<sup>2</sup> است که از اوایل دهه 1980 توسط صنعت پتروشیمی مورد استفاده قرار گرفته است و رفته رفته در صنعت جای خود را به خوبی پیدا کرده است.

روش آکوستیک در شناسایی ترک ها بسیار موثر است و رشد و تکثیر ترک در طی آزمایشات خستگی، به عنوان آن مشاهده شده است که سیگنال انتشار صوتی متفاوت است خواص، مانند تعداد تجمعی یا انرژی، افزایش می یابد نرخ رشد ترک افزایش می یابد.

---

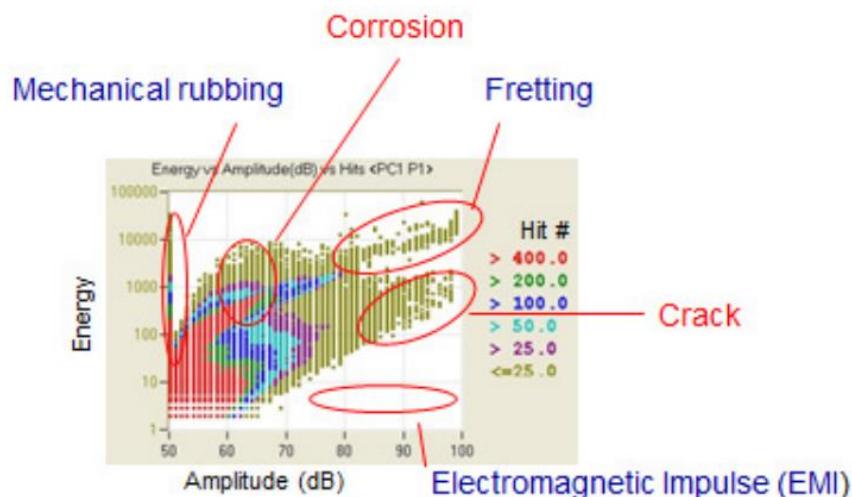
<sup>1</sup> Acoustic emissions Technology

<sup>2</sup> Passive



تصویر ۳-۳) روش آکوستیک، یکی از روش های مرسوم برای پایش وضعیت آنلاین است.

در تصویر ۳-۳ مشخص شده است که مبدل فیزوالکتریکی به سازه متصل شده است، این مبدل انرژی های مکانیکی را به پالس های الکتریکی تبدیل می کند و آن را از طریق سنسور ها میتوانند تشخیص دهند.

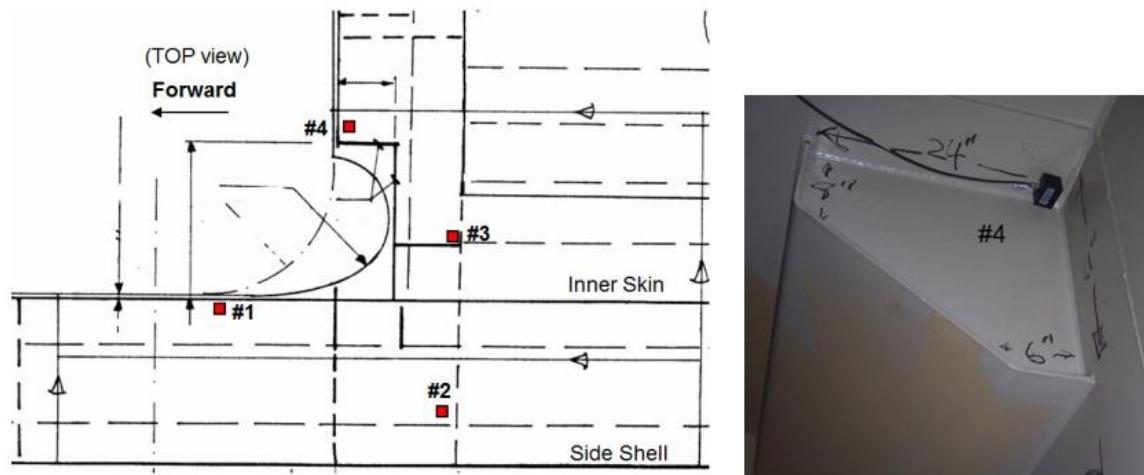


تصویر ۴-۴) الگوهای تشخیص خرابی های سازه براساس نمودار انرژی برحسب دامنه موج

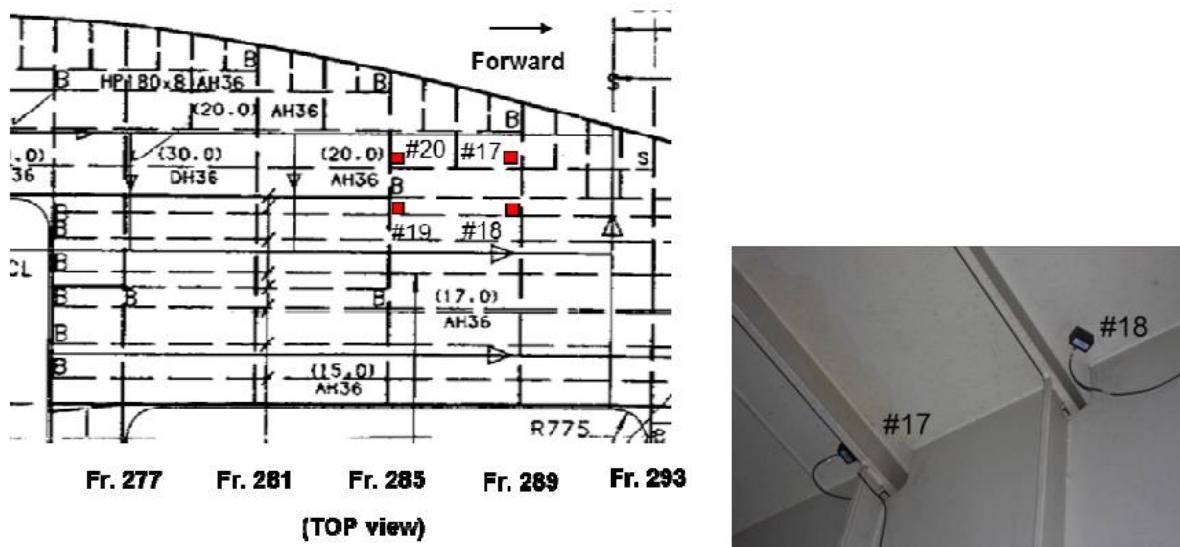
مهمترین نکته آن است که بتوانیم ناحیه بیشتری را با حداقل تعداد سنسور و بدون از دادن حساسیت داشته باشیم، حال دیتا هایی که از سنسور گرفته می شود را باید آنالیز بکنیم؛ بدین منظور با توجه به تصویر ۴-۴ از نمودار های انرژی در مقابل دامنه (موج) استفاده می کنیم که این نمودار ها نواحی مختلف آن معرف یک خرابی هستند.

### 3-1) استفاده نمونه در کشتی های کانتینربر

یک پروژه موضوعی مشترک بین یک موسسه رده بندی و یکی از شرکت های خدمات دهنده سیستم AET ارائه این سیستم در یک کشتی کانتینربر 4800TEU می باشد، در این پروژه 11 سیستم AET روی بدن نصب شده بوده است تا خرابی های محتمل در طول سفر را به عنوان نمونه ارزیابی و بیابد؛ در تصاویر 3-6 استفاده از این سنسور ها را در بخش های مختلف کشتی مشاهده می کنید.



تصویر 3-5) سنسور های موقعیتی در کشتی کانتینربر، بخش Hatch



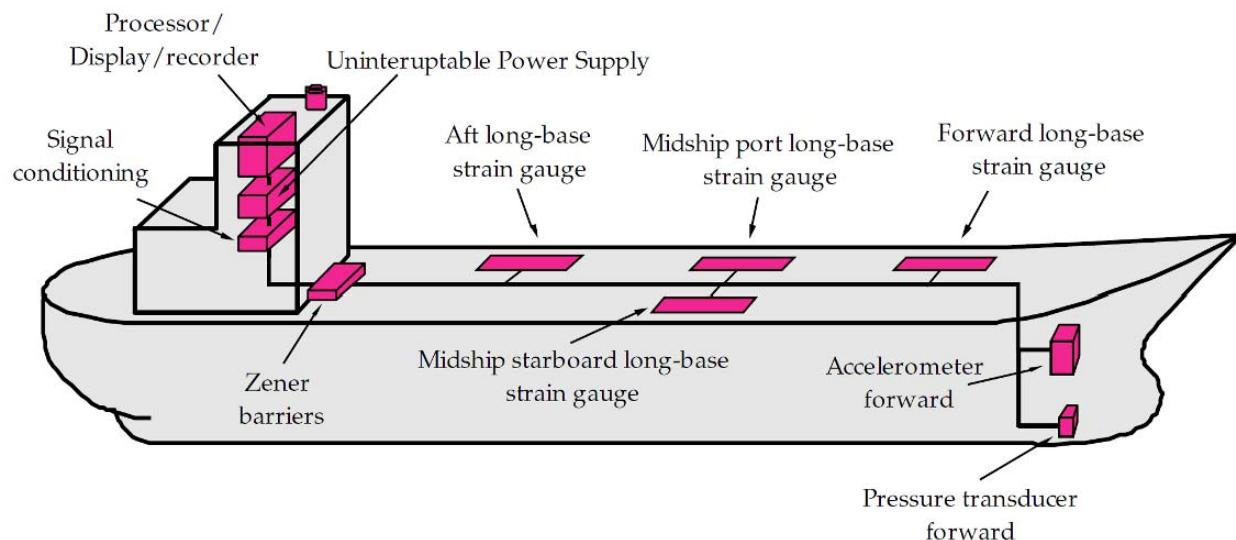
تصویر 3-5) سنسور های موقعیتی در کشتی کانتینربر، بخش انبار underdeck tunnel

### 3-3 سنسور های کرنش سنج<sup>1</sup>

استفاده از کرنش سنج برای پایش وضعیت استحکام بدن کشتی ها یک روش متداول در علم پایش و کنترل سازه ها است. کرنش سنج ها به نوعی حسگرهای هستند که قابلیت اندازه گیری تغییرات کوچک در سازه را دارند. در مورد کشتی ها، این تغییرات ممکن است ناشی از فشار، لرزش، تغییرات دما، بار های هیدرودینامیکی و... باشد. در زیر توضیحاتی در مورد استفاده از کرنش سنج برای پایش وضعیت استحکام بدن کشتی ها آورده شده است:

#### 1. نصب کرنش سنج:

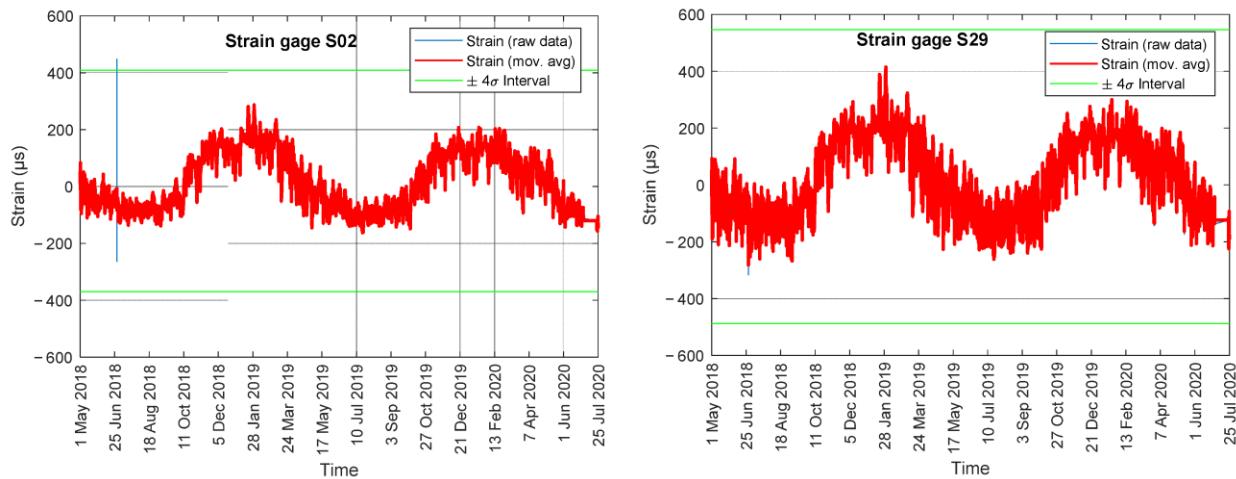
کرنش سنج ها به سطح بدن کشتی نصب می شوند. این نصب می تواند به صورت مستقیم بر روی سطح یا در بخش های مختلف دیگر باشد، مکان های نصب کرنش سنج بر اساس نیاز و تحلیل های هندسی سازه مشخص می شوند؛ در تصویر 3-6 کرنش سنج های نصب شده مشخص هستند.



تصویر 3-6) موقعیت کرنش سنج های مختلف در شناور

<sup>1</sup> Strain Gauge

## 2. اندازه‌گیری کرنش:



تصویر ۳-۷) دیتاهای خروجی کرنش بر حسب زمان در یکی از کرنش سنج های نمونه کشتی

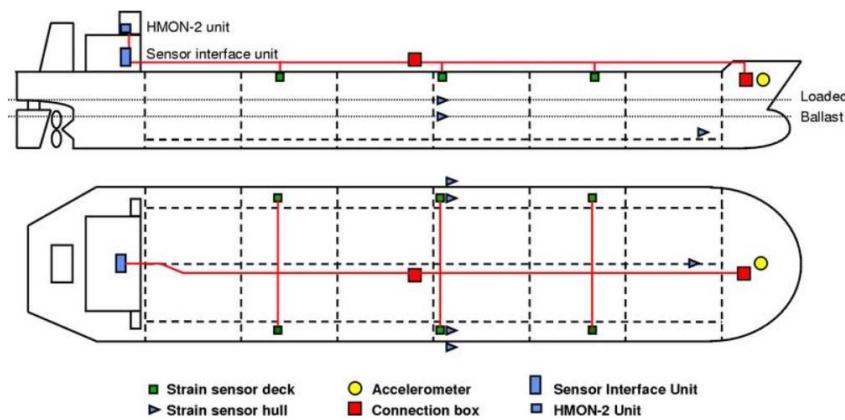
کرنش سنج ها اندازه گیری تغییرات طول یا ابعاد محل نصب شده را انجام می دهند. هر تغییری که در سازه رخدید، موجب تغییر در مقدار کرنش می شود که این تغییرات به صورت الکتریکی در خروجی کرنش سنج قابل اندازه گیری است؛ بدین منظور از حسگرهای کرنش سنج استفاده می شود.

حسگرهای کرنش سنج، به شکل یک الکترود نازک که به ماده مورد نظر چسبانده شده است، عمل می کنند. هنگامی که ماده تغییر ابعاد می دهد، الکترود نیز تغییرات خطی در اندازه خود را تجربه می کند که توسط حسگرهای کرنش قابل اندازه گیری است.

### 3. تحلیل داده:

سیگنال خروجی از کرنش سنج به واحد کنترل یا سیستم پایش می‌رسد که معمولاً در سوپراستراکچر کشته واقع شده است، موقعیت آن بصورت نمونه در تصویر 3-6 مشخص شده است. اطلاعات از کرنش سنج‌ها تحلیل شده و اگر تغییراتی در طول یا ابعاد سازه احساس شود که ممکن است نشان‌دهنده آسیب یا ضعف در بدنه کشته باشد، اعلام می‌شود.

برای پایش گسترده‌تر وضعیت بدنه کشته، از یک شبکه از کرنش سنج‌ها استفاده می‌شود؛ این شبکه اطلاعات دقیق‌تری ارائه می‌دهد و به نظراتی در مورد توزیع کرنش در سازه اطلاعات می‌افزاید.

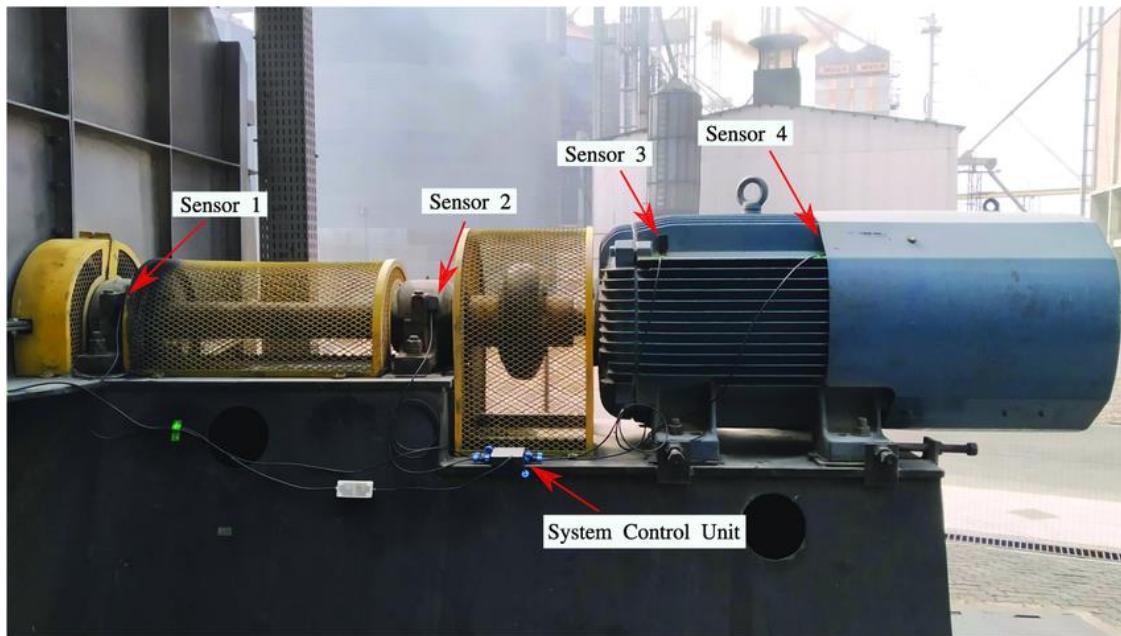


تصویر 3-8) موقعیت کرنش سنج‌های مختلف در شناور

در شناور‌ها علاوه بر کرنش سنج، از سرعت سنج و شتاب سنج‌های استفاده می‌شود، به این علت است که بعضی زمان‌ها تغییر شکل و دیتاهای خروجی باید با یکدیگر همزمان بررسی شوند تا تفسیر اشتباهی رخ ندهد؛ بطور مثال زمانی که سرعت بالا می‌رود طبیعتاً کرنش و تنش هم افزایش خواهند یافت و این یک رخداد طبیعی ناشی از افزایش سرعت و شتاب می‌تواند تلقی شود.

### 4-3) آنالیز ارتعاشی

رفتار ارتعاشی سازه هایی که در معرض خرابی هستند توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است. پایش ارتعاش و آنالیز ارتعاش، روشی بسیار قدیمی و از رایج ترین شیوه های ارزیابی وضعیت تجهیزات است. این روش به ما در تشخیص خرابی و درک علل ریشه ای بروز خرابی کمک می کند. شتاب سنج ها برای پایش و مانیتور کردن تغییرات دامنه در یک محدوده فرکانسی گسترده استفاده می شوند. پایش ارتعاش به شما اجازه می دهد تا پدیده هایی مانند عدم تعادل، شلی و لقی تجهیز یا قطعه، مشکلات چرخدنده ها یا سایش و ترک را قبل از خرابی قطعه یا تجهیز متوجه شوید و اقدام به اعمال برنامه های اصلاحی کنید. تغییر دامنه ارتعاشات در فرکانس های متفاوت نشانه خرابی در بخش های مختلف سازه است و در بسیاری موارد نشانه خرابی در آن تجهیزات است.



تصویر 3-9) پایش وضعیت آنلاین یک روتور به وسیله آنالیز ارتعاشی

علاوه بر نابالانسی، شل شدن<sup>1</sup> ساختاری، لقی زیاد، مشکلات تسمه، ناهم میزانی، ترک روی روتورها و یاتاقان های معیوب، از عوامل ارتعاشات بالا در اجسام دور هستند. تعدادی از مشکلات و خرابی های خاص در ماشین آلات، فرکانس غالب در آنها و جهت ارتعاشات در جدول ارائه شده است. همانطور که بیان شده است، زمانی که ارتعاشات

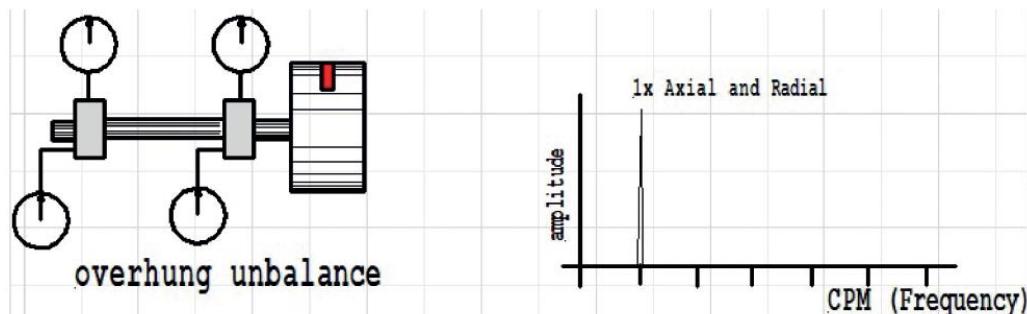
<sup>1</sup> Looseness

شعاعی و محوری همزمان در شفت وجود دارد، می‌تواند در سیستم نابالانسی، عدم هم راستایی، مشکلات یاتاقان، مشکلات الکتریکی، فرکانس مش چرخدنده و ... وجود داشته باشد.

جدول 3-1 تعدادی از مشکلات و خرابی‌های خاص در ماشین‌آلات

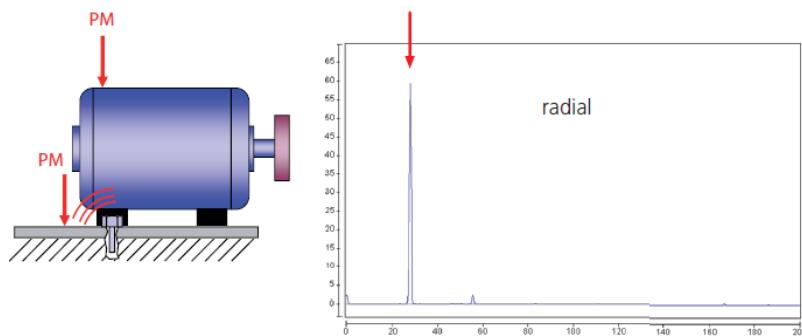
Possible cause	Dominant frequency	Direction	Comment
Imbalance	1x rotational frequency	Radial for dynamic imbalance; possible axial	Vibration amplitude proportional to imbalance & rpm – causes severe vibration to occur
Misalignment	2x rotational frequency	Radial & axial	Severe axial vibration 2nd harmonic, best realigned using a laser alignment system.
Bearing defect	High frequency vibration	Radial & axial loaded	Use bearing enveloping diagnosis or shock pulse to determine damage severity
Machine foundations	Typically at one or more natural frequency (transient vibration)	Radial	Natural resonant frequency of foundation or machine base plate
Belt vibrations	Rotational frequency and multiples thereof	Radial	Additionally recommend strobe to combine machine rpm and belt speed to check for belt slippage
Blade pass vibration	Number of vanes or blades x the fundamental frequency	Radial	Vibration frequency represented by the number of blades x the shaft rpm
Electrical	Line frequency, 50 Hz (UK) 60 Hz (USA) and multiples thereof	Radial & axial	Side bands may also occur at multiples of the rotational frequency. Vibration stops when power is turned off
Gear mesh defect	Gear frequency equal to the number of teeth x the rpm of the gear	Radial & axial	Sidebands occur from modulation of the gear teeth meshing vibration at the rpm e.g. the output shaft speeds of the gearbox
Resonance	Natural component frequency	Radial & axial	A components natural frequency coincides with an excitable frequency

نابالانسی در سیستم اورهنج (روتوری که دو یاتاقان آن در یک سمت دیسک است) و فرکانس‌های ارتعاشی آن در تصویر 3-1 نشان داده شده است. در این حالت ارتعاشات شعاعی و محوری در فرکانس برابر با فرکانس دورانی (1X) رخ می‌دهد و ارتعاشات شعاعی ناشی از خمش شفت و نیروی نابالانسی است. ارتعاشات محوری ممکن است در زمان اندازه‌گیری متغیر باشد.



تصویر 3-10. نابالانسی در سیستم اورهنج و فرکانس‌های ارتعاشی آن

شل شدن تجهیزات، یکپارچگی سازه‌ای ضعیف، پیچ‌های اتصالات شکسته یا ترک خورده و فنداسیون مشکل دار می‌تواند باعث مشکلاتی در تجهیزات شود که با استفاده از آنالیز FFT قابل مشاهده است. تشخیص آن معمولاً از روی فرکانس‌ها سخت است و دلیل آن این است که محتوای فرکانسی آن شبیه به نابالانسی و عدم توازن است. به همین دلیل مشاهده چشمی خیلی به تحلیل و تشخیص مشکلات از روی FFT کمک می‌کند.

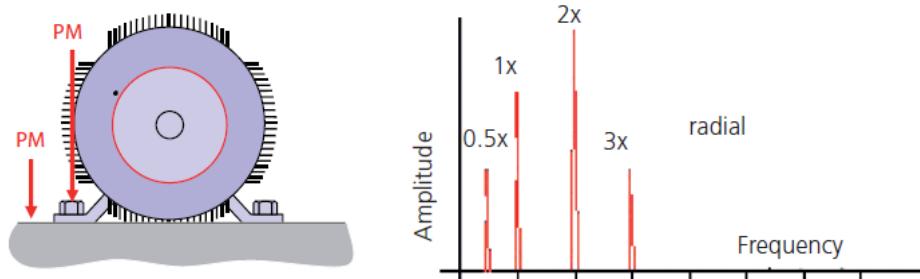


تصویر 3-11). شل شدگی سازه‌ای و سیگنال معادل آن

شل شدگی سازه‌ای، بر اثر ضعیف شدن اجزای ماشین ایجاد می‌شود و عامل آن ناشی از پایه‌های<sup>۱</sup> ضعیف، انجنا در صفحات نگهداری<sup>۲</sup> یا فنداسیون یا طراحی ضعیف صفحات نگهداری که منجر به انعطاف‌پذیری بالای آن می‌شود. این موضوع باعث ایجاد فرکانس  $x_1$  در راستایشعاعی می‌شود و معمولاً به اشتباه به عنوان نابالانسی استاتیکی تشخیص داده می‌شود.

<sup>1</sup> Foot

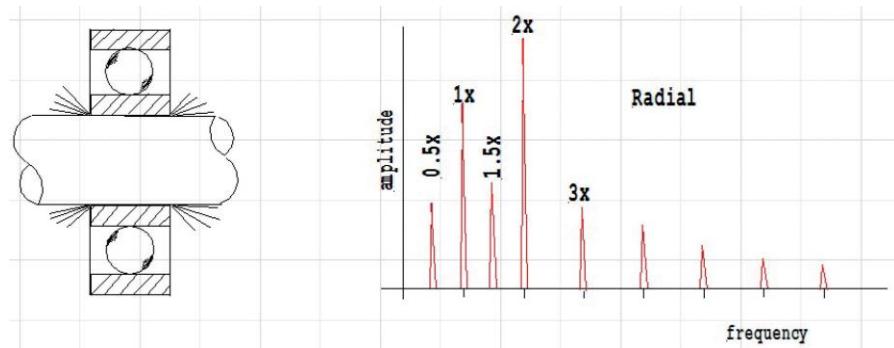
<sup>2</sup> Baseplate



تصویر 12) شل شدگی مکانیکی بخارت شل شدن پیچ های نگهدارنده

و سیگنال معادل آن

این نوع از شل شدگی معمولاً بر احتی قابل تشخیص است و در واقع پیچ های شل یا پایه های ترک دار یا شکسته با استفاده از فرکانس های  $0.5x$ ,  $1x$ ,  $2x$  و  $3x$  در راستای شعاعی قابل تشخیص است.

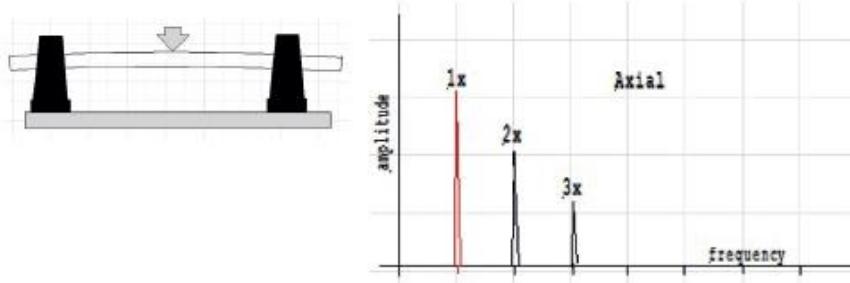


تصویر 13) شل شدگی در اثر عدم فیت<sup>۱</sup> بودن اتصالات

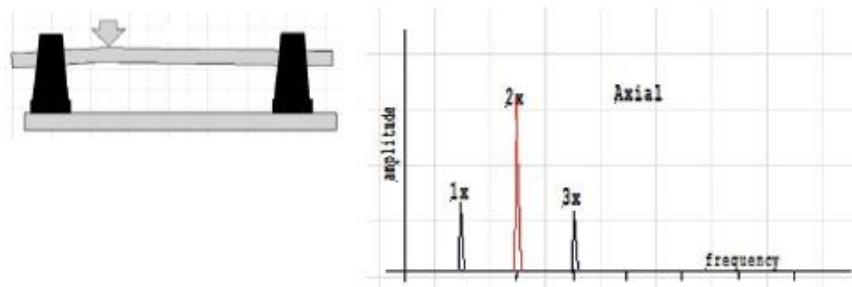
شل شدگی در اثر عدم فیت بودن اتصالات می تواند ناشی از اتصالات نامناسب یا تاقان ها یا لقی بالای پره فن ها بر روی شفت باشد. در این حالت فاز در تست های مختلف ممکن است عوض شود.

خم شدن شفت، بارهای محوری و شعاعی بزرگ ایجاد می کند. ارتعاشات محوری دارای مولفه های  $1x$ ,  $2x$  و  $3x$  هستند.  $1x$  زمانی که خمش در وسط شفت است، سیگنال اصلی است و در راستای محوری  $180$  درجه اختلاف فاز وجود دارد. اندازه گیری فاز برای تشخیص در این حالت ضروری است. اما اگر خمش شفت در نزدیکی کناره ها باشد، فرکانس غالب  $2x$  است که تصاویر آن بصورت ۱۴-۳ و ۱۵-۳ مشخص شده است.

<sup>1</sup> Fit



تصویر 14-Error! No text of specified style in document. خمش شفت در وسط و سیگنال معادل



تصویر 15-Error! No text of specified style in document. خمش شفت در کناره‌ها و سیگنال معادل

همچنین اگر یاتاقان‌های غلتی دارای خرابی<sup>۱</sup> در اجزای خود شامل بخش ساچمه (یا رولر) و بدنه باشد، ارتعاشات فرکانس بالا (در مقایسه با دور) وجود خواهد داشت. در این زمان چهار فرکانس در یاتاقان غلتی وجود دارد که شامل موارد زیر است:

- فرکانس عبور ساچمه (رولر) از بدنه خارجی<sup>۲</sup> (BPFO) (خرابی بدنه خارجی)
- فرکانس عبور ساچمه (رولر) از بدنه داخلی<sup>۳</sup> (BPFI) (خرابی بدنه داخلی)
- فرکانس چرخش ساچمه (رولر)<sup>۴</sup> (BSF) (خرابی المان چرخشی)
- فرکانس پایه مجموعه<sup>۵</sup> (FTF) (خرابی قفسه<sup>۶</sup>)

---

<sup>1</sup> Defect

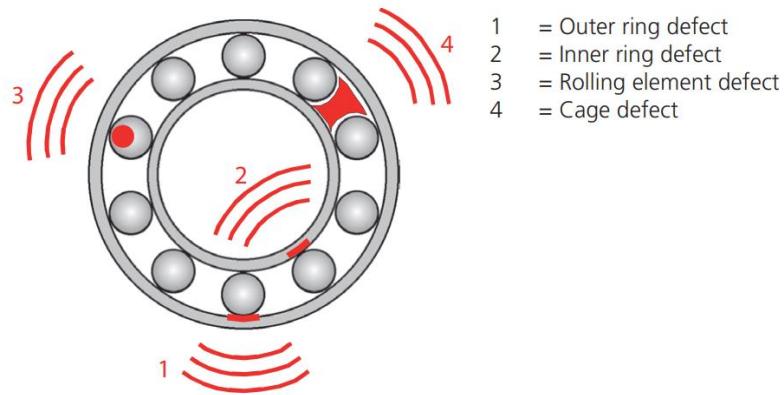
<sup>2</sup> Ball pass frequency outer race (BPFO)

<sup>3</sup> Ball pass frequency inner race (BPFI)

<sup>4</sup> Ball spin frequency (BSF)

<sup>5</sup> Fundamental Train Frequency (FTF)

<sup>6</sup> Cage



تصویر 16-Error! No text of specified style in document. خرابی‌های یاتاقان غلتشی بصورت شماتیک

این خرابی‌ها دارای فرکанс‌هایی بصورت روابط زیر است:

Error! No )

- $BPFO = Z * n / (60 * 2) * (1 - (D_w / D_{pw}) * \cos(a))$ .
- $BPFI = Z * n / (60 * 2) * (1 + (D_w / D_{pw}) * \cos(a))$ .
- $BSF = (D_{pw} * n) / (D_w * 60 * 2) * (1 - [D_w / D_{pw}] * \cos(a))^2$
- $FTF = n / (60 * 2) * (1 - (D_w / D_{pw}) * \cos(a))$ .

text of  
specified  
style in  
(1-document.

در این روابط  $Z$  و  $n$  تعداد ساچمه و سرعت دورانی بر حسب دور بر دقيقه،  $D_{pw}$  قطر متوسط (پیچ<sup>۱</sup>) یاتاقان غلتشی،  $D_w$  قطر ساچمه یا رولر یاتاقان غلتشی و  $a$  زاویه تماس ساچمه‌های یاتاقان غلتشی است.

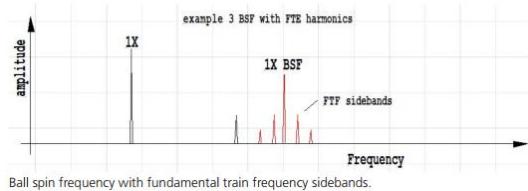
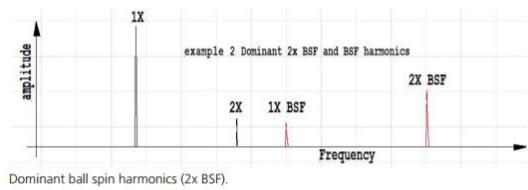
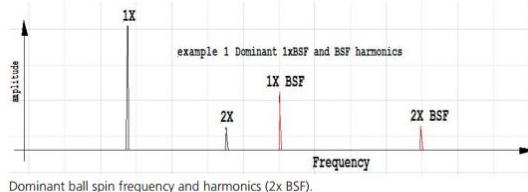
فرکанс‌های موجود در یاتاقان‌های غلتشی مانند اکثر تجهیزات به عوامل متعددی ربط دارد و پیچیدگی خاص خود را دارند.

عنوان نمونه محتوای فرکانسی ارتعاشات مربوط به یاتاقان غلتشی در صورت خرابی در المان‌های چرخشی (ساچمه یا رولر)

تصویر Error! Reference source not found. می‌تواند باشد.

---

<sup>1</sup> Pitch



تصویر 17-Error! No text of specified style in document. محتوا فرکانسی ارتعاشات مربوط به یاتاقان غلتشی در

#### صورت خرابی در المان‌های چرخشی

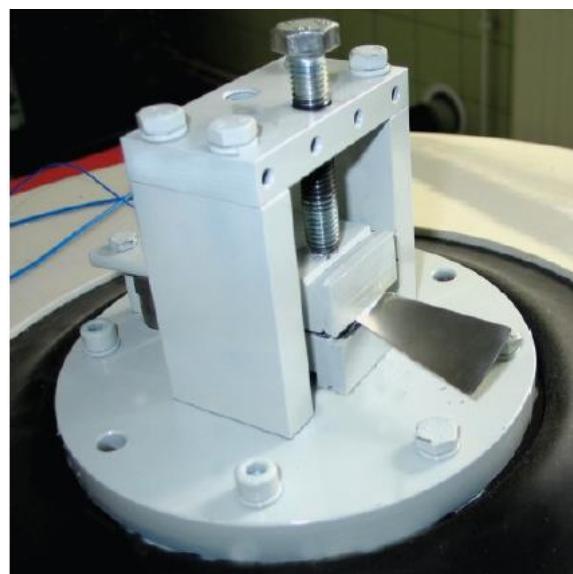
برای تحلیل افزایش دامنه ارتعاشات، معمولاً از الگوریتم‌های پردازش سیگنال، مدل‌سازی ریاضی و سیستم‌های هوش مصنوعی استفاده می‌شود. این ابزارها به مشخص کردن نقاط زمانی و فرکانس‌های ارتعاشات کمک کرده و مشکلات را به صورت سریعتر و دقیق‌تر تشخیص می‌دهند. اقدامات تصحیحی ممکن است شامل تغییرات در سیستم تعليق، تعمیرات مکانیکی یا بهروزرسانی سیستم‌های کنترلی باشد.



تصویر 18-) ترک در سازه کشتی

ترک<sup>۱</sup> در سازه‌ها بسیار محتمل است که رخ دهد، زمانی که رخ می‌دهد در آنالیز‌های ارتعاشی تغییراتی نسبت به گذشته مشاهده می‌شود و فرکانس‌های طبیعی دچار تغییر خواهند شد و در نتیجه دامنه ارتعاشات تغییر خواهد کرد و با دنبال کردن دامنه ارتعاشات یا فرکانس طبیعی و تغییرات تدریجی یا ناگهانی آنها، احتمال رخدادن ترک یا هر نوع خرابی دیگر باید دنبال شود.

اثر ترک روی دینامیک و دامنه سیستم کاربردهای دیگر صنعتی دارد. عنوان نمونه ویتک (3) به بررسی تست خستگی چرخه بالا پره کمپرسور هلیکوپتر پرداخته است (**Error! Unknown switch argument.**) و تغییر طول ترک در ریشه پره را در طول تست بررسی کرده است. این تست در فرکانس اول پره (774 هرتز) انجام شده است. پس از حدود  $10^5 \times 4$  سیکل که معادل با 556 ثانیه است، دامنه ارتعاشات انتهای پره که برابر با 2.5 میلیمتر است به 2.25 میلیمتر کاهش پیدا می‌کند. تغییر دامنه با وجود ثابت بودن تحریک، به معنای تغییر فرکانس و نشانه ایجاد ترک در پره است.



شکل 18-Error! No text of specified style in document. شکل 18: تست پره کمپرسور هلیکوپتر بر روی شیکر

3. EXPERIMENTAL CRACK PROPAGATION ANALYSIS OF THE COMPRESSOR BLADES WORKING IN HIGH CYCLE FATIGUE CONDITION. Witek, Lucjan. 195-204, s.l. : Fatigue of Aircraft Structures, 2009, Vol. 1

---

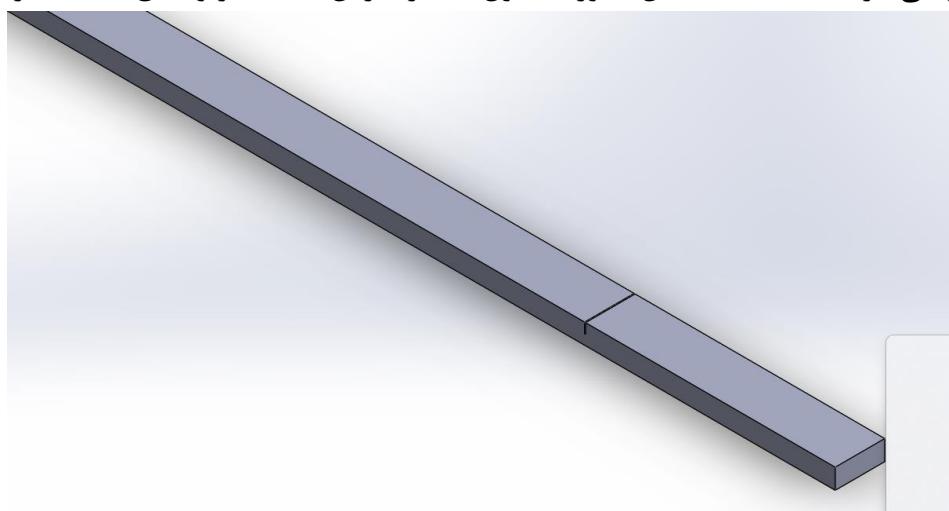
<sup>1</sup> Crack

## فصل 4 : مدلسازی و پایش وضعیت آنلاین به روش آنالیز ارتعاشی برای ترک و کندگی قطعات

در این فصل، با توجه به مطالب گفته شده یک تیر را طراحی کرده و با تعییه ترک در طول های مختلف، رفتار ارتعاشی سازه برای فرکانس های طبیعی سازه را بررسی می کنیم.

### 1-4) تغییرات فرکانس های طبیعی در ترک

ابتدا تیر را طراحی کرده که مشخصات آن بصورت، طول 1 متر، عرض 0.05 متر و عمق 0.02 متر می باشد.



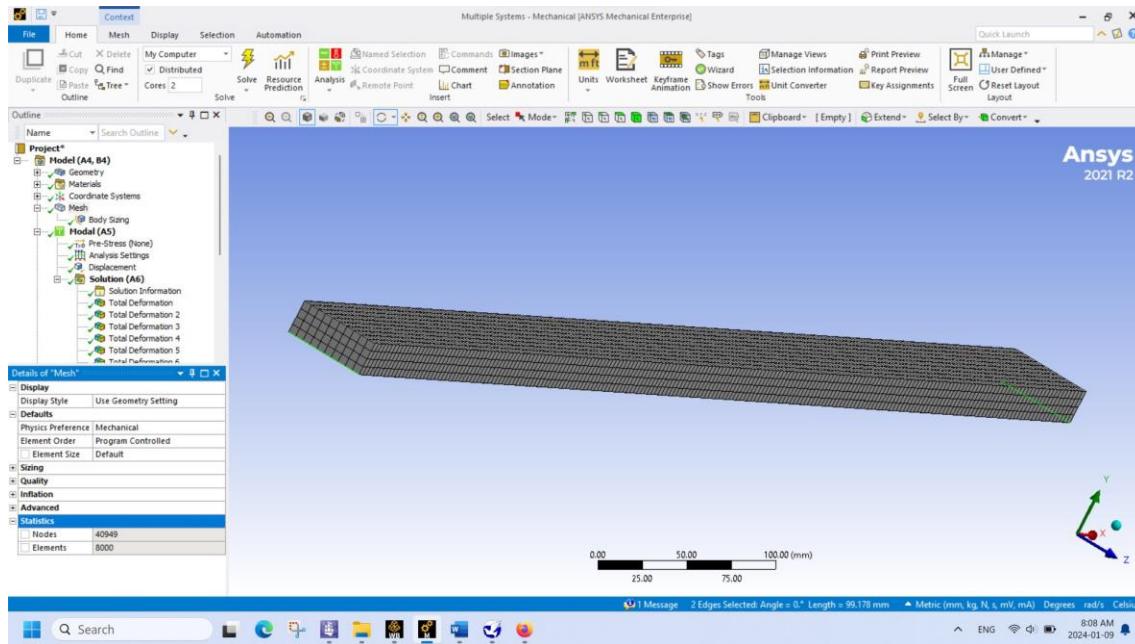
تصویر 1-4) مدلسازی تیر با ترک

پس از طراحی تیر، یک ترک به عمق 0.01 متر روی سازه ایجاد می کنیم که در طول تیر می باشد و در طول های 0.125 و 0.25 و 0.375 و 0.5 متر قرار می دهیم، دقت شود که تکیه گاه این تیر را دوسر مفصل آزاد<sup>۱</sup> در نظر می گیریم و به همین دلیل نقاط ترک در طول آن به دلیل تقارن در یک سمت قرار گرفته شده است عمق ترک یکسان در نظر گرفته شده است و بصورت مفهومی و هم براساس مراجع بدیهی بوده است که با افزایش عمق ترک فرکانس های طبیعی کاهش پیدا می کنند.

این تیر را در هر یک از این حالت ها وارد نرم افزار انسیس می کنیم و مش بندی را انجام می دهیم.

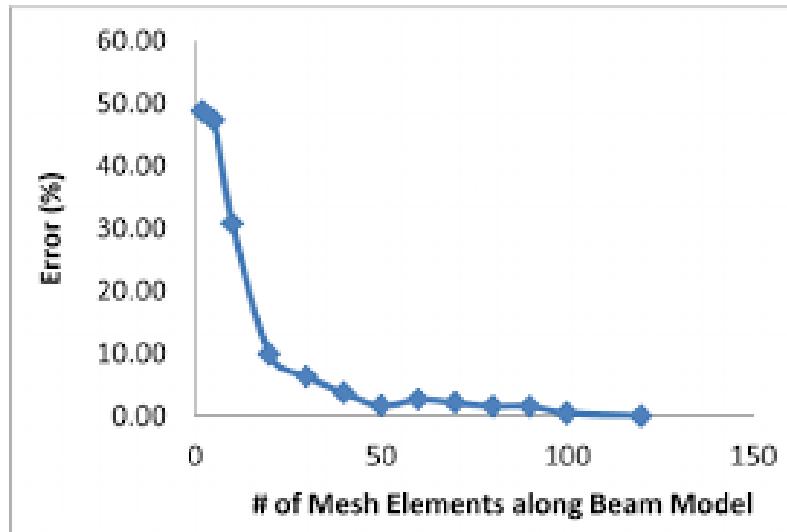
---

<sup>1</sup> Simply Supported



تصویر 4-2) مش بندی تیر بدون ترک در نرم افزار انسیس

یکی از نکات بسیار مهم آن است که تعداد مشی را در نظر بگیریم که درصد خطای آن کم باشد، در تصویر 4-3 مشخص شده است که در یک پروژه دلخواه درصد خطای تعداد مش بعدی از یک مقدار تعداد مش ثابت می‌ماند و برای آنکه زمان پردازش مینیمم باشد، همان حد را در نظر می‌گیریم. در واقع در تعداد مش کم به دلیل درشتی آنها سیستم بطور مجازی سفت شده و فرکانس‌ها بیش از حد بدست می‌آیند، اما زمان پردازش کوتاه است. با ریز کردن مش‌ها و افزایش تعدادشان، فرکانس‌ها کاهش پیدا کرده و به مقدار واقعی می‌رسند، اما زمان پردازش افزایش پیدا می‌کند. معمولاً یک مقدار متناسب تعداد مش که هم نتایج دقیق داشته باشد و هم زمان پردازش مناسب باشد، انتخاب می‌شود.



تصویر 4-3) درصد خطا بر حسب تعداد مش در یک سازه

شماره آنالیز	1	2	3	Difference 2, 3 %
اندازه به میلیمتر	10	5	4	
تعداد المان	1000	8000	16250	
تعداد نود	6345	40949	79232	
فرکانس‌ها (هرتز)	73.297	72.665	72.469	0.269731
	186.4	186.38	186.37	0.005365
	200.64	192.84	190.68	1.1201
	458.49	457.48	457.18	0.065577
	579.89	566.38	562.72	0.646209
	729.57	728.97	728.79	0.024692
	1000.2	992.66	990.59	0.208531
	1170.5	1152.3	1147.4	0.425236

جدول 4-1) درصد خطای مشبندی

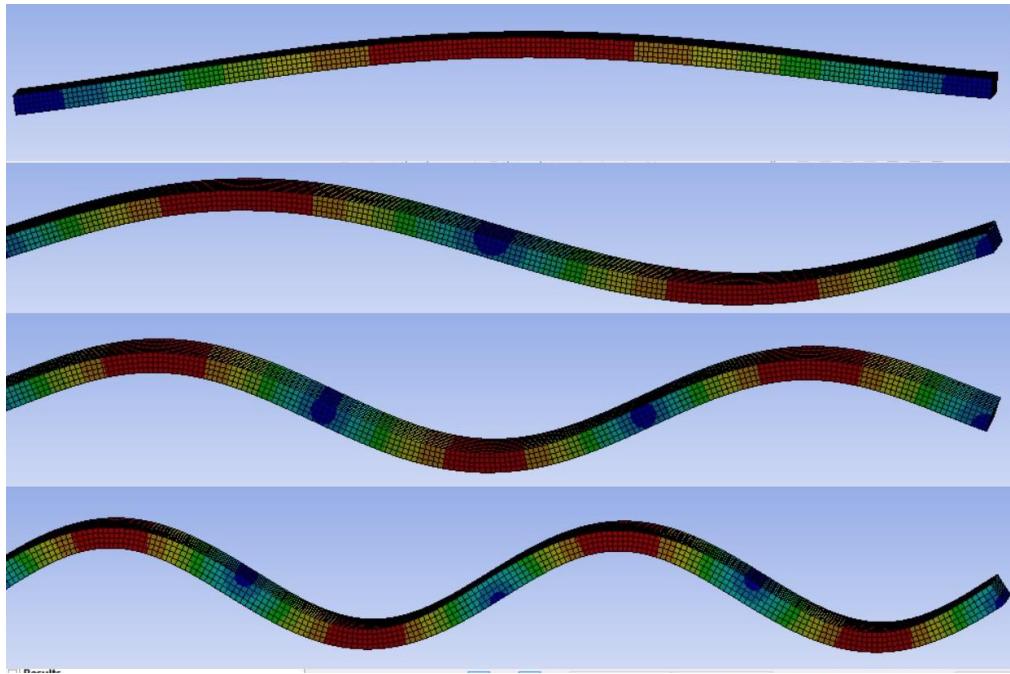
اندازه مش 5 و 4 میلیمتر با وجود دو برابر شدن تعداد مش، حداقل تفاوت فرکانس حدود یک است و بنابراین با توجه به درصد خطای مناسبی که در شماره آنالیز دوم بر حسب جدول 4-1، داریم، تعداد 8000 المان و به اندازه 5 میلی‌متر مش بندی برای تحلیل‌ها استفاده شده است.

شماره (بدون بعد عمق- بدون بعد محل)	سالم (0-0)	0.125-0.5	0.25-0.5	0.375-0.5	0.5-0.5
فرکانس (هرتز)	72.665	72.342	69.976	67.365	66.324
	186.38	180.42	175.93	181.42	186.37
	192.84	192.59	192.37	190.84	190.03
	457.48	430.08	435.79	457.14	443.29
	566.38	564.68	557.13	560.34	566.23
	728.97	695.8	728.78	692.32	728.89
	992.66	980.99	984.95	990.53	991.41
	1152.3	1129.	1140.8	1150.1	1114.7

جدول 4-2) فرکانس های طبیعی در مد های مختلف برحسب عمق- محل ترک

همانطور که مشخص است، در مدهای اول، دوم، چهارم و ششم تغییرات فرکانس طبیعی بسیار مشهود است ولی در بقیه مدها حساسیت وجود ندارد. این مدهای خمی داخل صفحه هستند و به ترک حساس هستند، اما بقیه مدها، خمی بیرون صفحه یا پیچشی هستند که به ترک بصورت شکل 4-1 حساس نیستند. برای تحلیل آن می توانیم تیر را یک سیستم جرم و فنر و دمپری در نظر بگیریم که فرکانس های طبیعی آن متناسب با جرم و فنر می باشد، رابطه 4-1:

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{(k/m)}$$



تصویر 4-5) شکل مدهای ۱، ۲، ۴ و ۶ تیر دو سر مفصل که تغییرات زیادی براثر ترک می‌گیرند

در بسیاری از تحلیل‌ها محققین به شکل مده توجه می‌کنند و در واقع توزیع انرژی جنبشی را ارائه می‌دهد که رابطه آن برای تیر اویلری بصورت زیر است:

$$T(t) = \frac{1}{2} \int_0^L \left[ \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right]^2 m(x) dx$$

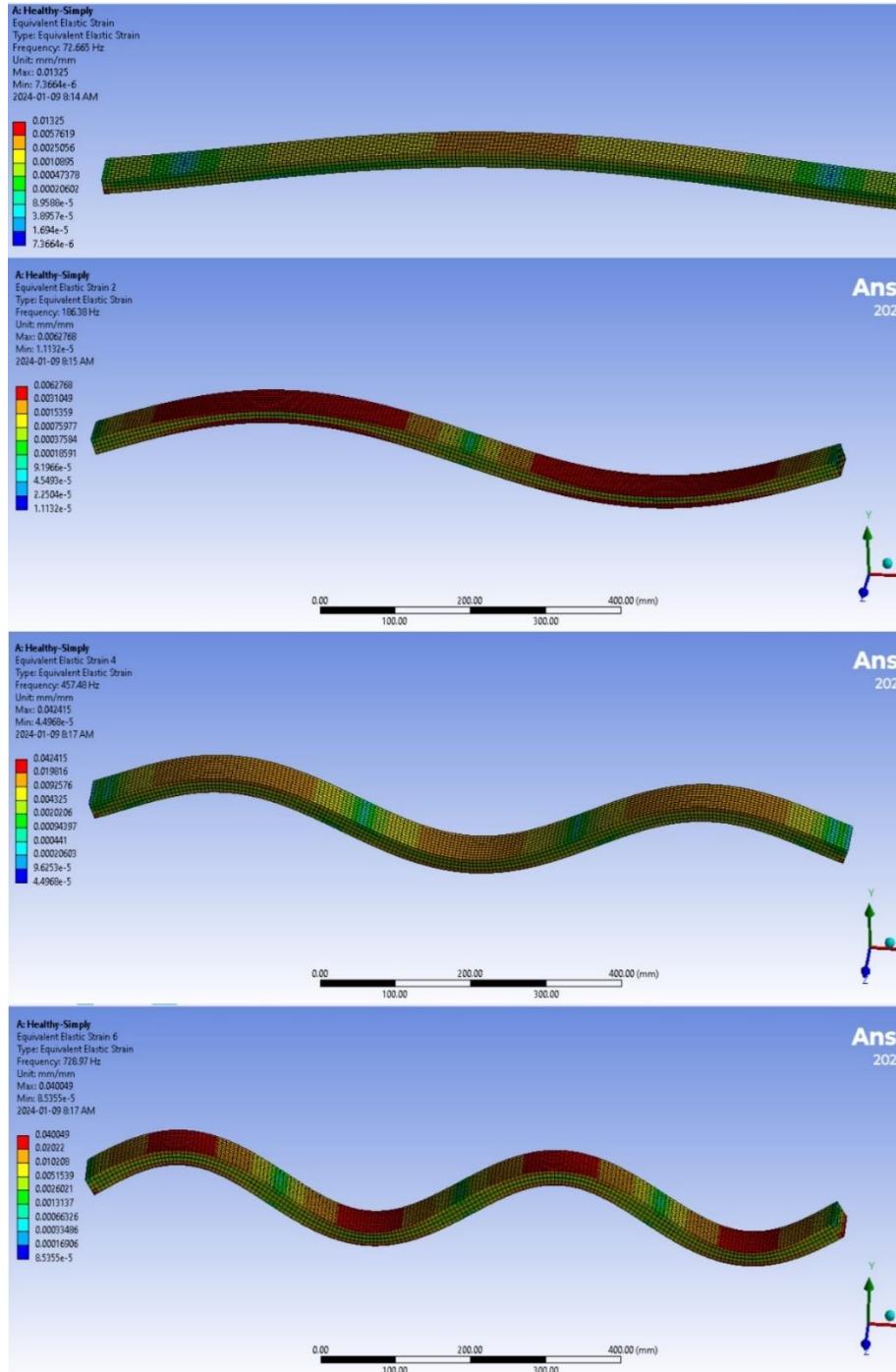
با جدا کردن ترم زمانی و مکانی، مشخص است که انرژی جنبشی متناسب با دامنه است و در واقع مدها، توزیع انرژی جنبشی و در نتیجه توزیع جرم‌ها را در مدها می‌دهد.

انرژی پتانسیل در تیر اویلری بصورت زیر است:

$$V(t) = \frac{1}{2} \int_0^L EI(x) \left[ \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \right]^2 dx$$

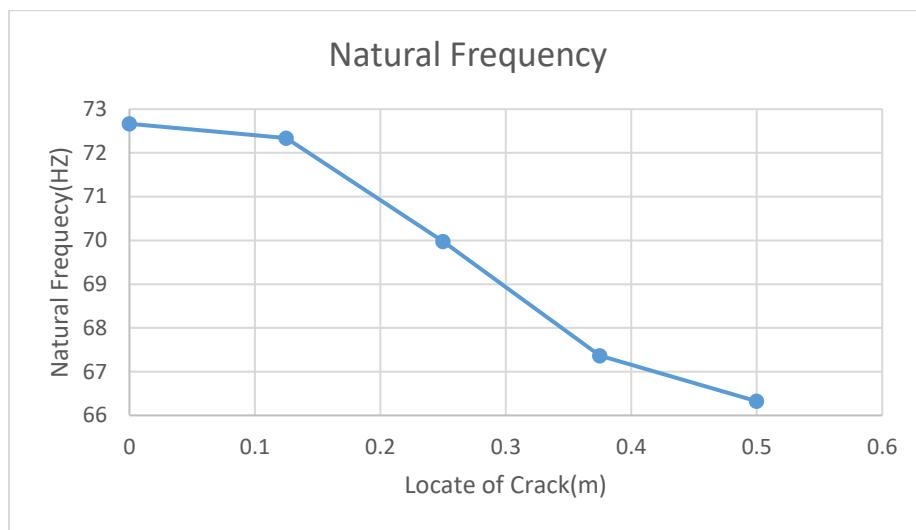
این رابطه نشان می‌دهد که انرژی پتانسیل در تیر اویلری، متناسب با مشتق دوم جابجایی یا انحنا است و این موضوعی است که بسیار مهم است و به آن در ادبیات فن هنوز توجه کمی می‌شود. ترک تغییر بسیار کمی بر جرم دارد و تاثیر روی فنریت دارد و بنابراین برای بررسی اثر آن، هر جایی که تغییرات کرنش بیشتر باشد، ترک بیشتر اثرگذار می‌باشد و این نکته بسیار پراهمیت می‌باشد، در واقع علاوه بر شکل مدها انرژی کرنشی هم اهمیت دارد.

توزيع انرژی کرنشی، مدهای یک، دو، چهار و شش در شکل زیر ارائه شده است و با مقایسه با شکل مدها، مشخص است که هر جایی که انحنا (مشتق دوم) بیشتر است، انرژی کرنشی بیشتر است (در این مورد محل انرژی کرنشی یا فنریت و انرژی جنبشی یا جرم در یک ناحیه است، اما موضوعی کلی نیست).



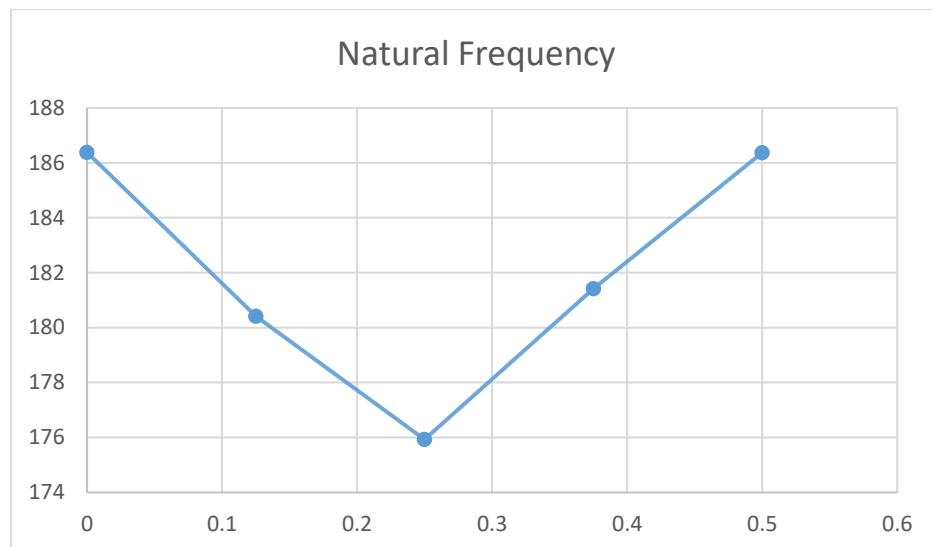
تصویر ۶-۴) توزیع کرنش مدهای ۱، ۲، ۴ و ۶ تیر دو سر مفصل که تغییرات زیادی بر اثر ترک می‌گیرند

براساس رابطه ۱-۴، در مدل سازی، با وجود ترک، جرم تغییرات بسیار زیادی نمیکند اما فنریت سازه در حال تغییر است؛ در مد اول هر چقدر به وسط نزدیک می‌شویم (طبق شکل ۶-۴ الف)، انرژی کرنشی بزرگتر و فنریت بالاتر است و در واقع فنریت سیستم در آن اثر بیشتری دارد. بنابراین وقتی ترک در قسمت وسط باشد، اثر بیشتری روی فنریت و نهایتاً کاهش فرکانس بیشتر است.

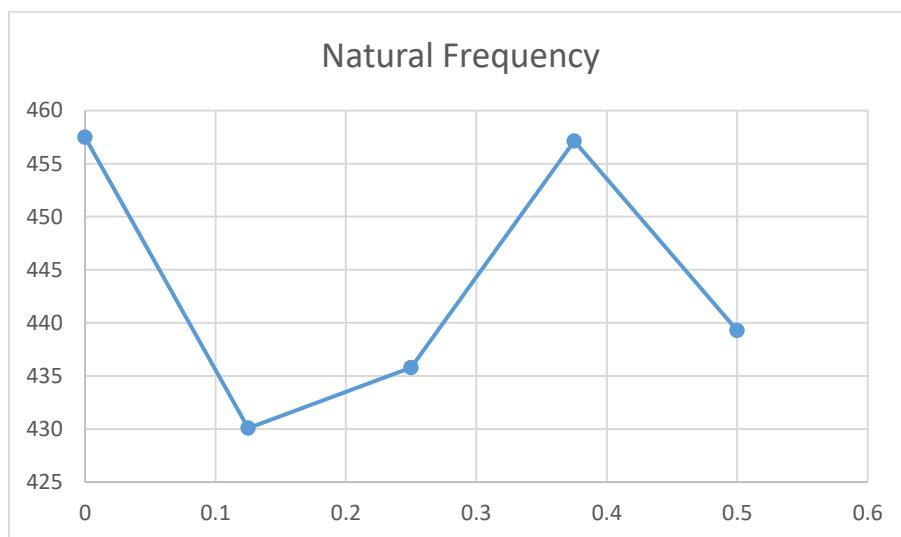


نمودار ۱-۴) تغییرات فرکانس طبیعی مد اول براساس محل ترک در تیر دو سر مفصل

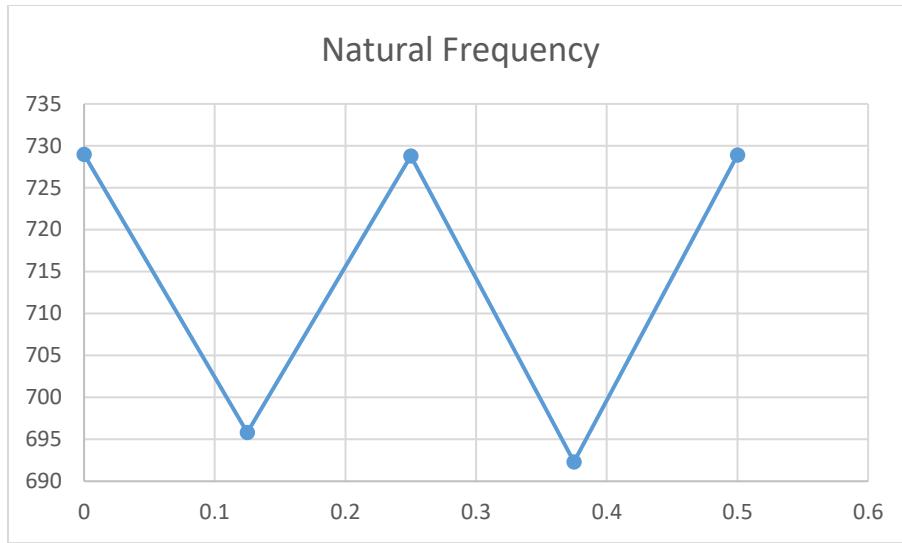
در نمودارهای ۴-۲، ۴-۳ و ۴-۴ فرکانس های طبیعی مد های دیگر سازه را نمایش داده ایم، این رفتار متناظر با رفتاری است که در انرژی های کرنشی رخ می دهد. در واقع اگر ترک در محلی از آن مد قرار گیرد که انرژی پتانسیل بزرگ است، تغییرات بزرگ و بالعکس است.



نمودار 4-2) تغییرات فرکانس طبیعی مد دوم براساس محل ترک در تیر دو سر مفصل



نمودار 4-3) تغییرات فرکانس طبیعی مد چهارم براساس محل ترک در تیر دو سر مفصل

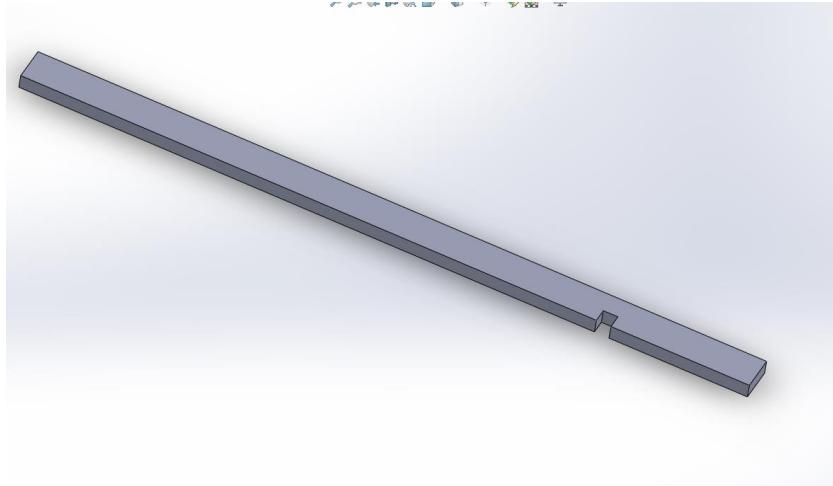


نمودار 4-4) تغییرات فرکانس طبیعی مد ششم براساس محل ترک در تیر دو سر مفصل

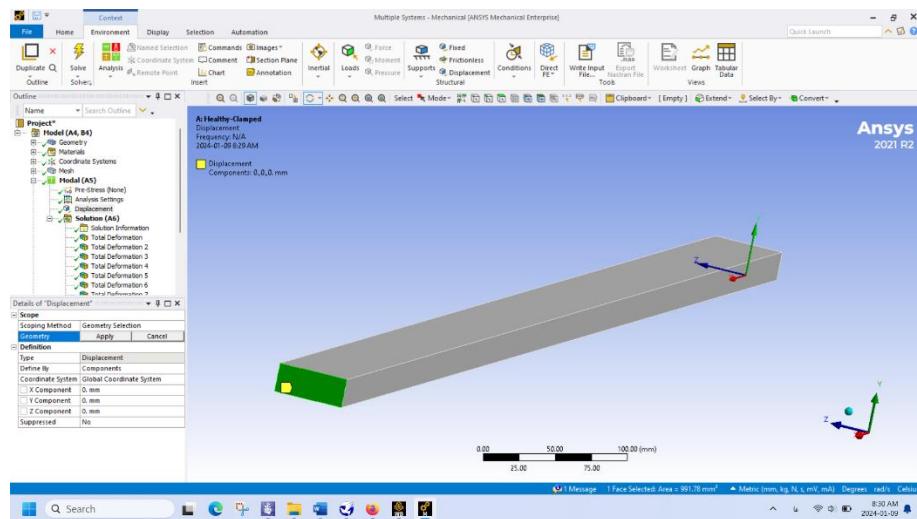
با توجه به تغییراتی که در فرکانس های طبیعی در هر مد از دیتاهای خروجی مشخص است می توانیم تشخیص ترک های موجود در سازه را دهیم و آن ها را عیب یابی کنیم.

## 4-2) تغییرات فرکانس های طبیعی در کندگی

پس از طراحی تیر، یک کندگی به میزان 0.02 طول و عرض 0.02 و عمق کل تیر متر سازه ایجاد می‌کنیم که در طول تیر می‌باشد و در طول های 0.2 و 0.4 و 0.6 و 0.8 و 1 متر قرار می‌دهیم، دقیق شود که تکیه گاه این تیر را از یک سمت گیردار در نظر می‌گیریم و در واقع تیر یک سر گیردار است.



تصویر 4-7) مدل‌سازی تیر با کندگی



تصویر 4-8) لحاظ کردن شرایط تکیه گاه یک سر گیردار در نرم افزار انسیس

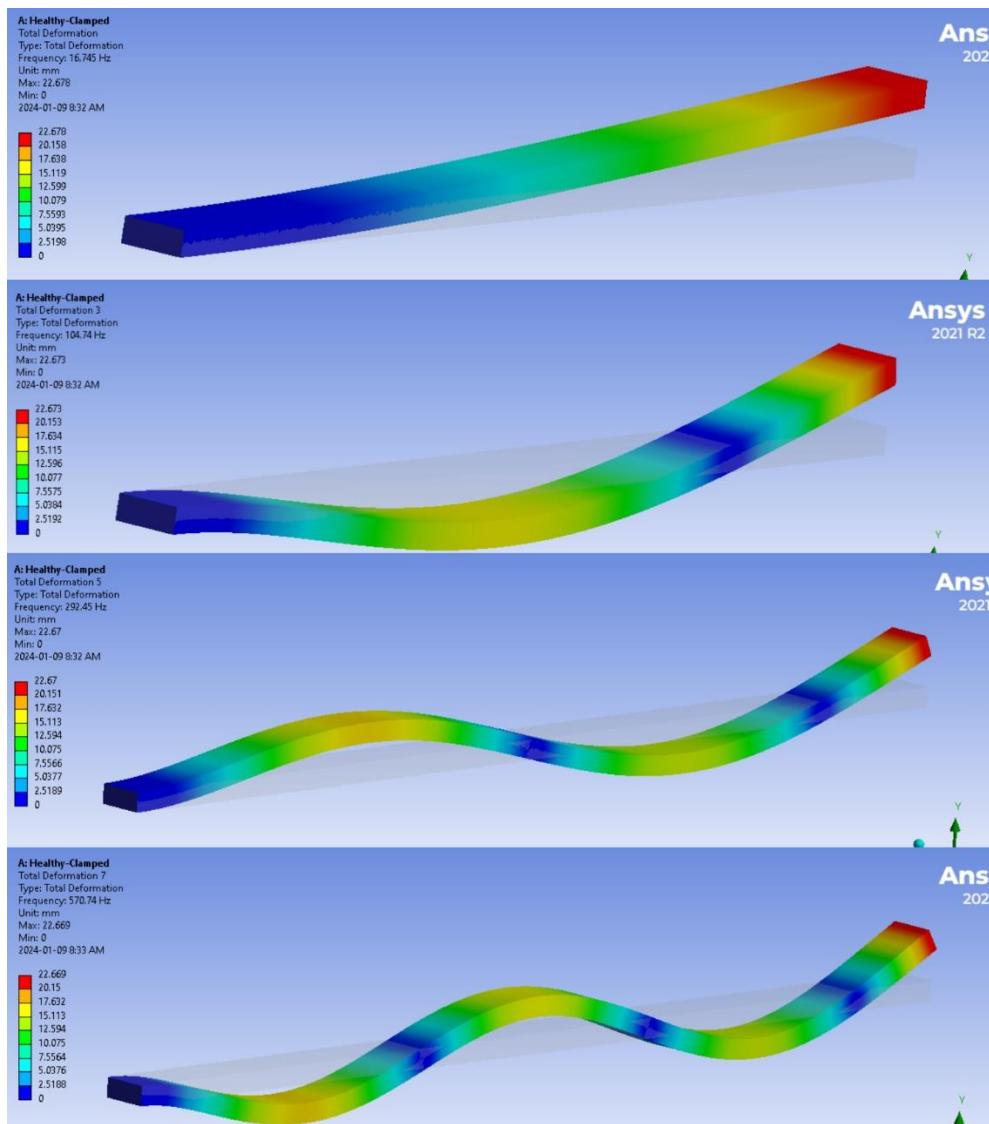
با توجه به درصد خطایی که در مشبندی برای بخش 4-1 گرفته شده است، تعداد 8000 المان و به اندازه 5 میلی‌متر مش بنده را انجام می‌دهیم.

شماره (بدون بعد محل)	سال (0)	0.2	0.4	0.6	0.8	1
فرکانس (هر تز)	16.745	16.208	16.534	16.744	16.884	17.014
	41.409	35.732	38.817	40.836	41.706	42.073
	104.74	104.79	103.38	102.39	104.12	106.35
	256.59	256.39	236.4	227.	249.01	260.49
	292.45	291.46	289.89	288.77	286.64	296.72
	521.83	501.75	508.3	516.6	523.85	526.73
	570.74	563.36	567.53	568.03	557.13	579.49
	705.99	682.74	674.62	664.7	635.69	716.17

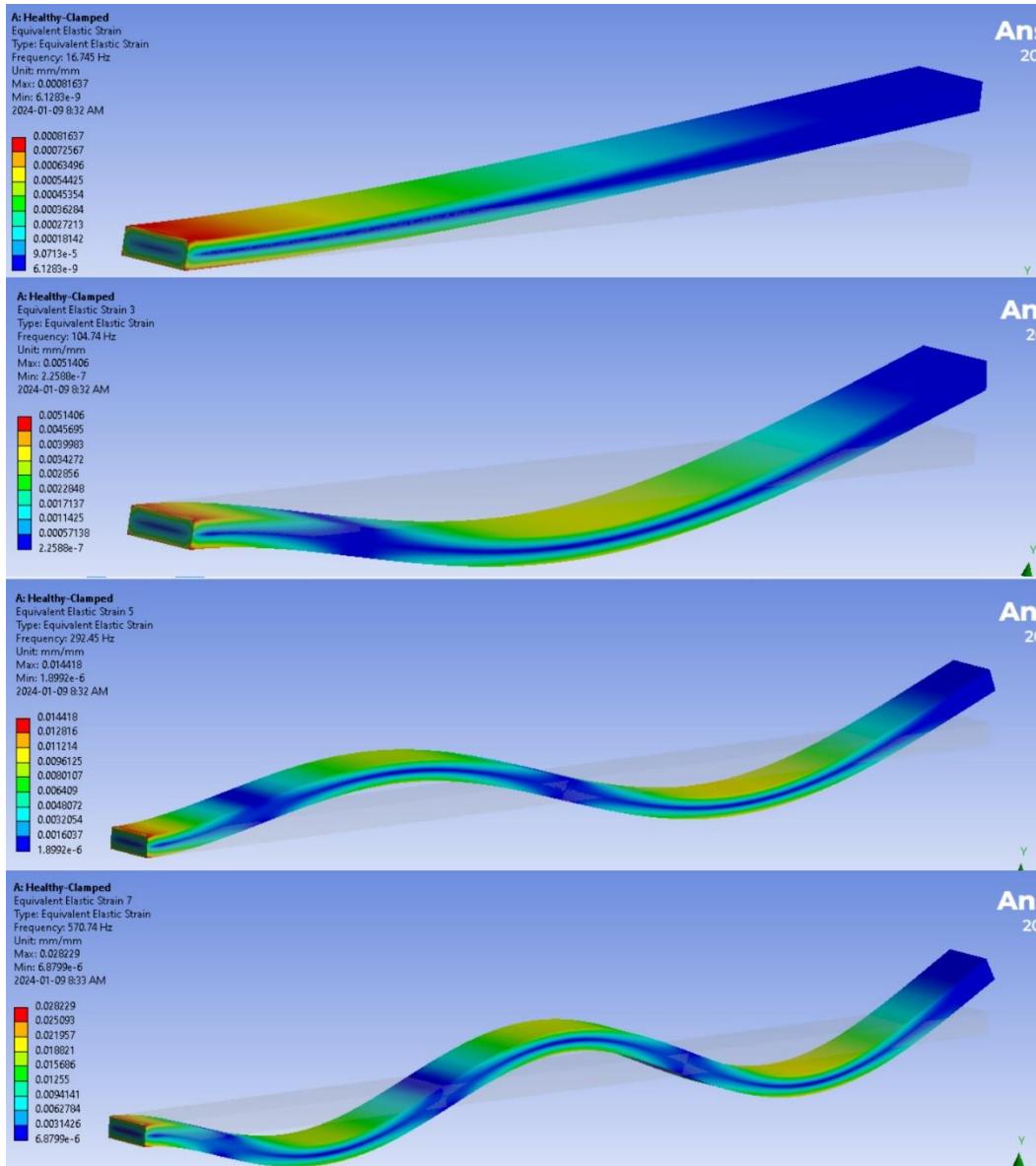
جدول 4-3) در مد های مختلف فرکانس طبیعی را بر حسب محل کندگی

همانطور که مشخص است در مد های اول، سوم، پنجم و هفتم تغییرات فرکانس طبیعی بسیار مشهود است، برای تحلیل آن می توانیم تیر را یک سیستم جرم و فنر و دمپری در نظر بگیریم که فرکانس های طبیعی آن متناسب با جرم و فنر می باشد که در رابطه ۱-۴ آورده شده است، بدین منظور در تفاوت با ترک، در یک تیر با کندگی، جرم کاهش می یابد و هرچقدر این جرم کنده شده به انتهای تیر نزدیکتر باشد تاثیر بیشتری را خواهد گذاشت و البته روی فنریت نیز اثر دارد. برای بررسی اثر روی فنریت و جرم در هر مد باز هم نیاز به بررسی شکل مدها و توزیع انرژی کرنشی است. در واقع کنده شدن روی فنریت و جرم اثر دارد.

شكل مد های و انرژی کرنشی فرکانس های طبیعی برای تیر یکسرگیردار رفتار متفاوتی دارد، در نتیجه تغییرات رفتار در برابر تغییر موقعیت ترک در مدهای فرکانسی مختلف متفاوت می باشد که در ادامه به آن می پردازیم. بعنوان نمونه در شکل های پایین مشخص است که برای مد اول در انتهای دامنه و انرژی جنبشی بزرگتر است و در سمت گیر دار احنا (مشتق دوم) بزرگتر و در نتیجه انرژی پتانسیل و فنریت بزرگتر است.



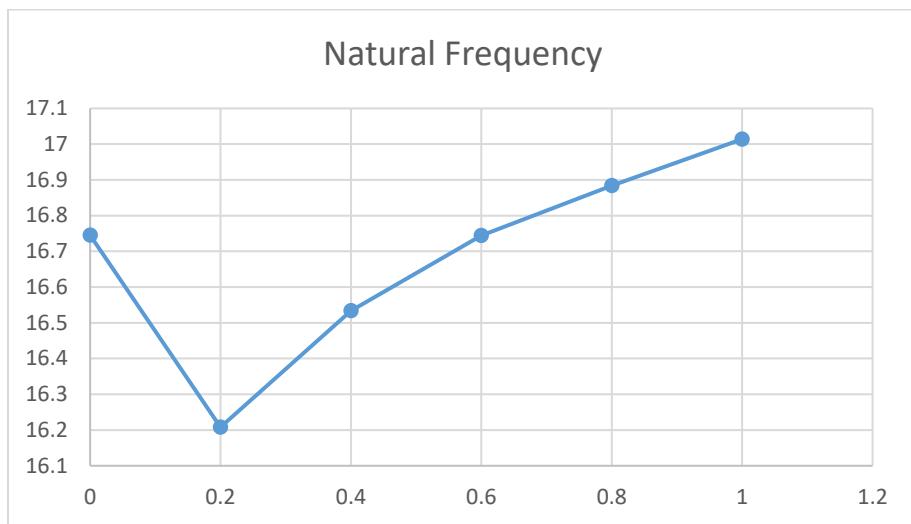
تصویر ۹-۴) شکل مدهای مختلف تیر یکسر گیردار



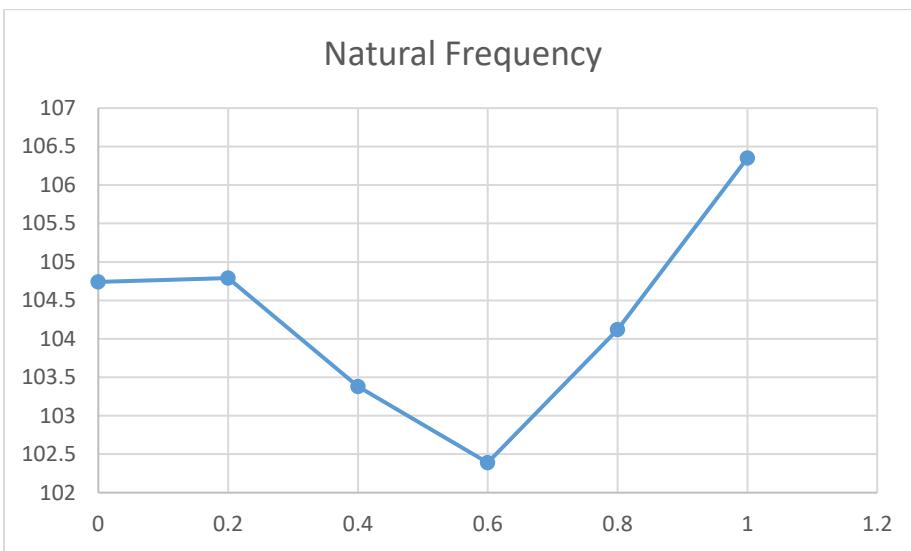
تصویر 4-9) انرژی کرنش‌های مدهای متفاوت تیر یکسر گیردار

براساس رابطه 4-1، در مدل سازی، جرم تغییرات بسیار زیادی می‌کند و فنریت سازه در حال تغییر است، در مد اول همانطور که بیان شد برای مد اول در انتهای دامنه و انرژی جنبشی بزرگتر است و در سمت گیر دار احنا (مشتق دوم) بزرگتر و در نتیجه انرژی پتانسیل و فنریت بزرگتر است و بنابراین طبق

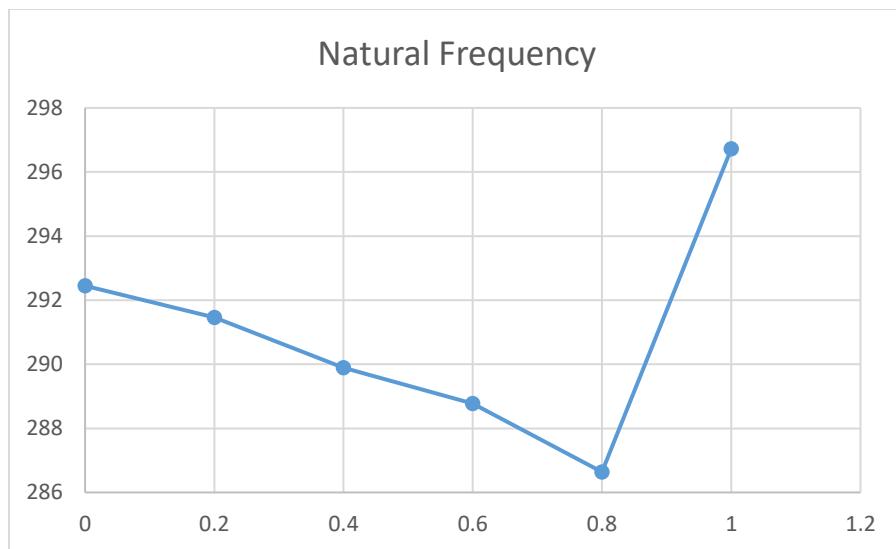
نمودار 4-5، در انتهای بیشتر جرم کم می‌شود تا فنریت و فرکانس نسبت به حالت سالم بیشتر می‌شود، ولی زمانی کندگی در سمت گیر دار باشد، هم فنریت کم می‌شود و هم جرم اما بیشتر فنریت و بنابراین فرکانس کم می‌شود. در نمودارهای 4-6، 4-7 و 4-8، فرکانس‌های طبیعی مدهای دیگر سازه را نمایش داده ایم، این رفتار متناظر با رفتاری است که در شکل مدها و توزیع انرژی کرنشی کلی رخ می‌دهد.



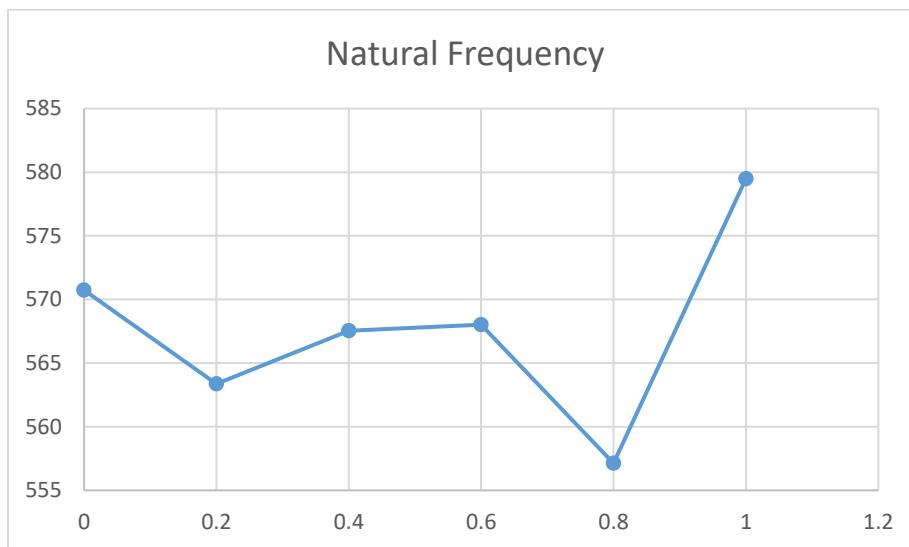
نمودار 4-5) فرکانس طبیعی مد اول



نمودار 4-6) فرکانس طبیعی مد سوم



نمودار ۷-۴) فرکانس طبیعی مد پنجم



نمودار ۷-۵) فرکانس طبیعی مد هفتم

با توجه به تغییراتی که در فرکانس های طبیعی در هر مد از دیتاهای خروجی مشخص است می توانیم تشخیص خرابی هایی نظیر کندگی را دهیم و آن ها را عیب یابی کنیم.

**مراجع :**

1. PRUFTECHNIK, An Engineer 's Guide to shaft alignment, vibration analysis, dynamic balancing, and wear debris analysis, 2017.
2. P M. Jagdale et al Int. Journal of Engineering Research and Applications
3. S.Christides, A.D.S. Barr. "One- dimensional theory of cracked Bernoulli-Euler beam
4. P M. Jagdale et al Int. Journal of Engineering Research and Applications
5. Structural Health Monitoring of ships and of composite ship domes with structural-acoustic purposes
6. Structural Health Monitoring on Ships Using Acoustic Emission Testing
7. Development and Applications of Full-Scale Ship Hull Health Monitoring, Hans Erling Torkildsen
8. Structural Health Monitoring of I-10 Twin Span Bridge
9. API STANDARD 616 FIFTH EDITION, Gas Turbines for the Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services, JANUARY 2011.
- 10.<https://kordizade.com/frequency-spectrum-analysis/>
- 11.<https://power-mi.com/content/diagnosis-unbalance-fans>