

## کاهش ارتعاشات سازه فن با گرداننده دور متغیر

علیرضا ابراهیمی<sup>۱</sup>، احمد الندی حلاج<sup>۲</sup>، مسلم همتی<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شریف

a.ebrahimi@ mech.sharif.edu

### چکیده

فن‌ها از جمله وسایلی هستند که در صنعت کاربرد فراوانی دارند و ارتعاشات ناشی از آنها نه تنها بر روی خود فن، بلکه برای سازه آن نیز اثرات نامطلوبی خواهد داشت. در این مقاله در یک بررسی موردی به مطالعه عامل ارتعاشات در فن‌های با گرداننده دور متغیر مربوط به فاز اول مجتمع گاز پارس جنوبی پرداخته شده است. پس از بررسی‌های مختلف علت اصلی ارتعاشات، تشدید تشخیص داده شد. جهت حل این مشکل تغییرات سازه‌ای پیشنهاد گردید و در این رابطه یک مدل المان محدود از سازه فن ایجاد شد و تغییرات لازم به منظور بهبود رفتار ارتعاشی آن ارائه شد. اصلاحات ارائه شده، حاکی از تاثیر مثبت چنین تغییراتی جهت کاهش ارتعاشات سازه فن بود.

واژه‌های کلیدی: تشدید - تغییرات سازه‌ای - دور بحرانی - المان محدود

### مقدمه

سطح غیرمجاز ارتعاشات در فن‌هایی که بر روی سازه‌ای بزرگ نصب می‌شوند، برای خود فن و سازه آن مشکلاتی را ایجاد می‌نماید. این مشکل در دراز مدت می‌تواند به شکل خرابی‌هایی در موتور فن و خستگی در سازه آن پدیدار گردد. این مساله در فن‌های بزرگ اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

مشکلات ارتعاشی سیستم‌های فن می‌تواند ناشی از مسائل گوناگون مکانیکی و آئرودینامیکی باشد [۱]. یکی از شایع‌ترین مشکلات موجود در فن‌های موجود در صنایع نابالانسی است. از آنجائیکه وجود این عیب موقعیت کارکرد خطرناک و توقف‌های ناگهانی را در پی خواهد داشت، باید بر وضعیت بالانس سیستم فن نظارت کافی داشت [۲]. نامیزانی فن می‌تواند ناشی از تجمع گرد و غبار بر روی پره‌های فن به خصوص در صنایع مربوط به سیمان و کاغذ باشد [۳]. وینزنز (Winzenz, A. J.) مشکلات ارتعاشی را در فن‌های بزرگ گریز از مرکز که موجب نیاز به تعمیرات بی‌موقع می‌شود، مورد بحث قرار داد. در این بررسی

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناس ارشد

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد CM

سیستم کنترلی بالانس فعال (Active Balancing System) برای بازگرداندن سطح ارتعاشات آن به محدوده مجاز پیشنهاد شد [۴]. جهت پایش وضعیت فن‌های موجود در صنایع، می‌توان از اندازه‌گیری سیگنال‌های ارتعاشی استفاده کرد و عیوب سیستم را از این طریق شناسایی نمود [۵]. همچنین با استفاده از تحلیل در حوزه فرکانس و فاز، می‌توان عامل ارتعاشات سیستم فن را تشخیص داد. حفیظ (Hafeez, T.) و همکارانش چنین کاری را در مورد فن‌های موجود در تاسیسات تولید سیمان انجام دادند [۶]. یکی از راه‌های کاهش سطح ارتعاشات فن، افزایش سفتی در یاتاقان‌ها است که منجر به افزایش فرکانس طبیعی بحرانی می‌شود [۷]. اما این راهکار همیشه میسر و راهگشا نمی‌باشد. استفاده از جاذب‌های ارتعاشی (shock absorber) نیز راهکاری دیگر برای کاهش ارتعاشات سازه فن می‌باشد که در برخی موارد نتایج رضایت بخشی در پی دارد [۸]. فرمر (Fermer, K. E.) و لک (Lack, C. W.) در بررسی خود، فن و بستر آن را به صورت یک سیستم دو جرمی با دو فنر به عنوان تکیه‌گاه، در نظر گرفتند. آنها بدین وسیله تخمینی از سطح ارتعاشات سازه فن را بدست آورده و با استفاده از چنین مدلی توانستند تأثیر بکارگیری پایه‌های ضد ارتعاش (anti-vibration mount) را بررسی نمایند [۹]. ژو (Zhou, S. P.) و همکارانش تحلیل ارتعاشی فن و سازه آن را با استفاده از تحلیل اجزاء محدود انجام داده و برای برطرف کردن ارتعاشات، به طراحی مجدد سازه فن اقدام نمودند [۱۰].

جهت کاهش ارتعاشات سازه فن ابتدا بایستی به دنبال منبع آن بود. با بررسی جوانب امر و علائم موجود در سازه فن مورد مطالعه، تشدید به عنوان عامل اصلی ارتعاشات شناخته شد. یکی از راه‌های رفع مشکل تشدید، تغییر فرکانس طبیعی سازه فن است و تغییرات سازه‌ای را می‌توان برای این منظور به کار گرفت. اما قبل از اعمال این اصلاحات، بایستی تأثیر آنها را در رفتار ارتعاشی فن مشاهده نمود. چنین کاری با در نظر گرفتن مدل المان محدود سازه فن ممکن می‌گردد. در بررسی اجزاء محدود، با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS مدلسازی فن و سازه آن انجام شد و پس از حصول انطباق مناسب بین مدل و سازه واقعی، به اعمال تغییرات سازه‌ای جهت کاهش ارتعاشات سازه فن در محدوده کارکرد فن اقدام گردید.

## مشکلات رایج در فن‌های با گرداننده دور متغیر و راهکارهای ممکن

### - نامیزانی

نامیزانی مشکلی رایج در فن‌ها محسوب می‌شود که می‌تواند ناشی از عدم تقارن مکانیکی در توزیع جرم، تجمع مواد و ذرات آلاینده بر روی پره‌های فن و ... باشد. برای رفع این مشکل بایستی در یک دوره زمانی توقیفی در کار فن صورت بپذیرد و اقدامات لازم اعم از زدودن ذرات و مواد آلاینده و یا بالانس مکانیکی انجام شود. برای بالانس کردن مکانیکی دو روش وجود دارد: بالانس دستی و بالانس فعال (اتوماتیک).

### تشدید

تشدید در سازه‌های بزرگ فن - بخصوص در فن‌های دور متغیر- یک مشکل شایع محسوب می‌شود. این مشکل ممکن است از دو جهت ناشی شود. علت اول سرعت‌های بحرانی خود فن است و دیگر علت می‌تواند فرکانس طبیعی سازه‌ای باشد که فن بر روی آن نصب می‌گردد. اکثر فن‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که پایین‌تر از سرعت بحرانی اول کار کنند. اما عامل دوم تشدید که به خود سازه برمی‌گردد، بوسیله تحریک یک منبع ارتعاشی ایجاد می‌شود. در صورتی که دور کارکرد فن به فرکانس‌های طبیعی سازه فن نزدیک باشد، می‌تواند موجب تحریک سازه شده و ارتعاشاتی را باعث شود. بسته به اینکه تحریک ایجاد شده از جانب فن در چه جهتی ارتعاش ایجاد می‌کند، برخی از مودهای ارتعاشی سازه تحریک شده و نیاز به بررسی خواهند داشت.

برای رفع مشکل تشدید در سازه سه راهکار می‌توان ارائه داد. یکی از آنها تغییر محدوده کاری فن است که این کار موجب اختلال در انجام عملکرد فن می‌شود. البته می‌توان با ایجاد یک سیستم کنترلی، اجازه کارکرد در محدوده بحرانی را به فن نداد. زمانی هم که نیاز است که فن در محدوده دور بحرانی کار کند، سیستم کنترلی دور فن را کمی افزایش داده و آن را به

بالاترین مقدار مجاز می‌رساند. روش دیگر ایجاد تغییر در سازه به منظور تغییر فرکانس طبیعی آن است، که چنین اصلاحاتی نیازمند هزینه و وقت است. البته با اعمال تغییرات موردنظر بر روی مدل و پیاده‌سازی آن در سازه اصلی می‌توان بر این مشکل فائق آمد. آخرین راهکار هم استفاده از جاذب‌های ارتعاشی است. کاربرد جاذب برای سازه‌های بزرگ کمی دشوار بوده و نیاز به طراحی دقیق و در نظر گرفتن جزئیات زیادی از سازه دارد.

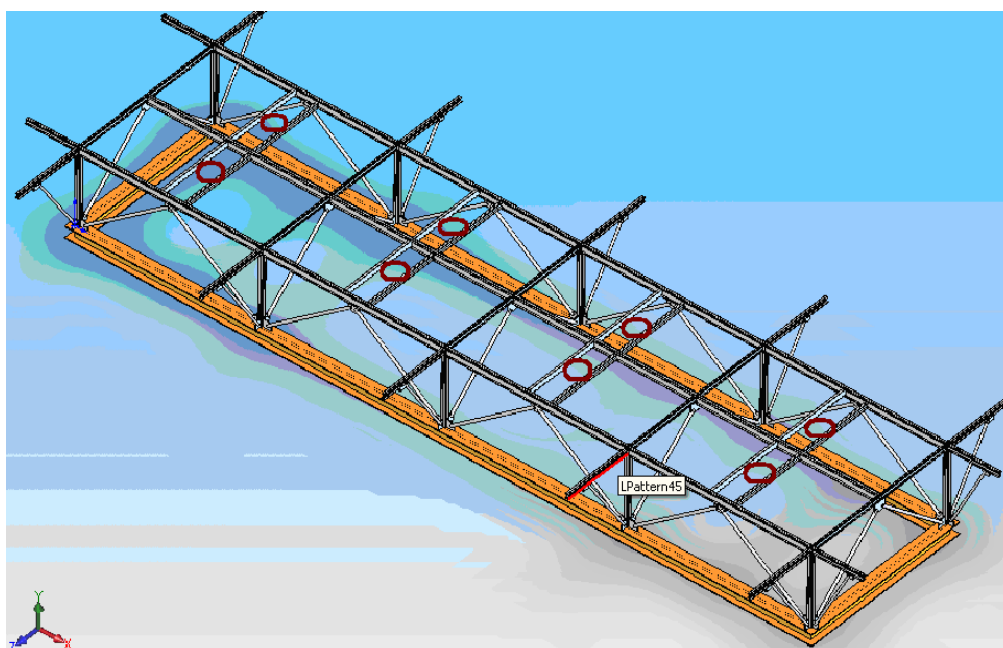
عدم هم‌محوری

این شرایط همیشه به صورت مجازی در ماشین‌ها وجود دارد. در حالت کلی فرض می‌شود که عدم هم‌محوری بین محورهایی که به کوپلینگ‌ها، تسمه‌ها یا دیگر منتقل‌کننده‌های نیرو وجود دارد. در سیستم‌های فن نیز جهت تقلیل دور از تسمه استفاده می‌گردد که عدم هم‌محوری بین پولی‌های مربوطه می‌تواند عامل ارتعاش شود.

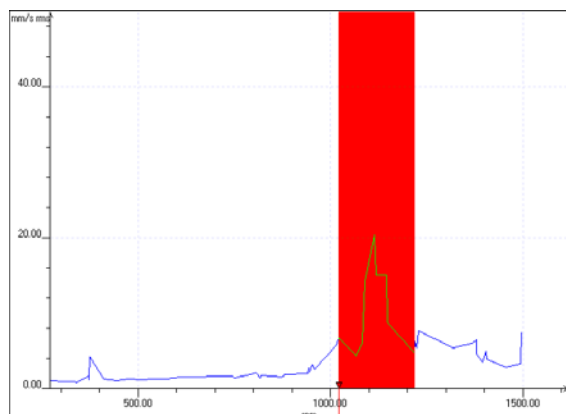
با توجه به مطالب مذکور و از آنجا که تعداد زیادی از فن‌های مورد بررسی دچار مشکل بودند، این نتیجه بدست آمد که عامل اصلی نمی‌تواند مربوط به مشکلاتی از قبیل نامیزانی و عدم هم‌محوری باشد. با تکیه بر این نکته و استفاده از تست‌های ارتعاشی انجام‌شده، علت اصلی ارتعاشات تشدید تشخیص داده شد. برای این تشخیص از اندازه‌گیری سیگنال‌های ارتعاشی سازه فن نیز استفاده گردید که در ادامه آمده است.

### اندازه‌گیری ارتعاشات

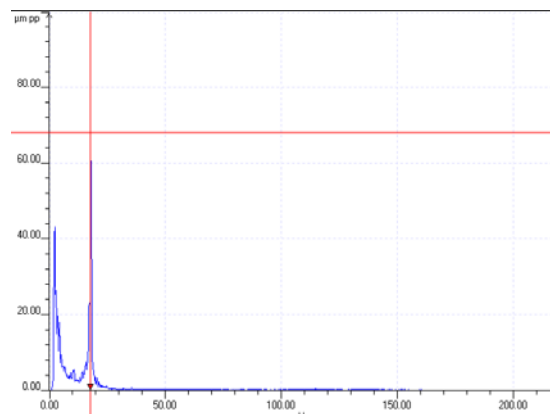
در شکل ۱ نقشه سازه فن و محل نصب الکتروموتور فن‌ها نشان داده شده است. بر روی این سازه تعداد ۸ فن دور متغیر نصب می‌باشد. بیشترین دامنه ارتعاشات در محدوده خاصی از دور فن در راستای ارتعاشات افقی مشاهده شد. در این راستا تست‌های مختلف از جمله تست چکش، آنالیز ارتعاشی در دوره‌های کاری مختلف و تست‌های Run up و Run down انجام شد. نتایج تست‌های چکش (سیگنال جابجایی peak-to-peak بر حسب میکرومتر) و Run up (مقدار موثر سیگنال سرعت بر حسب میلیمتر بر ثانیه) به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. در سیگنال مربوط به تست ضربه شاهد دو پیک در فرکانس‌های حدود ۵ و ۱۸ هرتز هستیم که نشان‌دهنده فرکانس‌های طبیعی سیستم - مربوط به مودهای با جابجایی در صفحه افقی - هستند.



شکل ۱ - سازه فن - محل قرارگیری فن‌ها مشخص شده است.



شکل ۳- نتیجه مربوط به تست Run up فن



شکل ۲- سیگنال ارتعاشی مربوط به تست چکش

## تحلیل ارتعاشی و تعیین علت لرزش

با توجه به استانداردهای موجود برای ارتعاش فن و مقایسه ارتعاشات فن مورد بحث با این استانداردها، می‌توان از طریق مقدار انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر موجود در استانداردها، به میزان بحرانی بودن ارتعاشات سازه فن پی برد. با توجه به استاندارد ISO2372 ماشین‌های با توان بین ۱۵ تا ۷۵ کیلووات که بدون فونداسیون خاص هستند، جزء ماشین‌های متوسط و کلاس II محسوب می‌شوند. موتور فن مورد بحث دارای توان ۳۷ کیلووات بوده که فونداسیون انعطاف پذیر دارد. با توجه به این موارد می‌توان مقادیر مربوط به حالات مختلف کارکرد برای این دسته از ماشین‌ها را در جدولی دسته بندی کرد (جدول ۱).

جدول ۱ - وضعیت‌های مختلف کاری برای ماشین‌های کلاس II مربوط به استاندارد ISO2372

|                      | Velocity RMS<br>(mm/s) | Velocity Peak<br>(mm/s) | Velocity Peak<br>(in/s) |
|----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| وضعیت A (خوب)        | ۰٫۲۸-۱٫۱۲              | ۰٫۴-۱٫۵۸                | ۰٫۰۱۶-۰٫۰۶۲             |
| وضعیت B (مجاز)       | ۱٫۸-۲٫۸                | ۲٫۵۴-۳٫۹۶               | ۰٫۱-۰٫۱۶                |
| وضعیت C<br>(غیرمجاز) | ۴٫۵-۷٫۱۰               | ۶٫۳۷-۱۰                 | ۰٫۲۵-۰٫۳۹               |
| وضعیت D<br>(غیرمجاز) | ۱۱٫۲-۷۱٫۰              | ۱۵٫۸-۱۰۰                | ۰٫۶۲-۳٫۹۴               |

از طرفی طبق جدول ۲ این ماشین با توان ۳۷ کیلووات در گروه فن‌های مربوط به فرآیندهای پتروشیمی و در دسته BV-3 قرار می‌گیرد. از آنجائی که سازه فن دارای انعطاف‌پذیری است، با توجه به جدول ۳، آخرین مقدار مجاز ارتعاشات برای پیک سرعت، ۰٫۲ اینچ بر ثانیه می‌باشد. با توجه به جدول ۴ که محدوده مجاز ارتعاشی یک سیستم را در شرایط کاری نشان می‌دهد، می‌توان گفت که برای ماشین مذکور در حالت start up مقدار مجاز پیک سرعت و مقدار موثر آن به ترتیب ۸٫۸ و ۶٫۳ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین مقادیر متناظر در حالت shut down به ترتیب برابر با ۱۷٫۸ و ۱۲٫۵ میلی‌متر بر ثانیه است.

با توجه به نمودار Run up و جدول ۱، فن تا قبل از سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه در وضعیت B (مجاز) بوده و پس از آن در یک محدوده، ارتعاشات آن شدت یافته و وضعیت به حالت D (غیرمجاز) تغییر می‌کند که پس از دور ۱۲۰۰ دور در دقیقه وضعیت بهبود یافته و در نهایت حالت C (قابل تحمل) وجود خواهد داشت که نیاز به بهبود بیشتر دارد.

با توجه به مطالب ذکر شده علت اصلی ارتعاشات بالا در این مجموعه بروز تشدید در مجموعه فن و سازه است. دلیل اصلی این مسأله وجود پیک‌های بلند ارتعاشی در تست Run up در فرکانس‌های طبیعی مجموعه که از طریق تست مودال محاسبه گردیده است، می‌باشد. به نظر می‌رسد با توجه به اینکه دامنه ارتعاشات در قبل و بعد از ناحیه رزونانس نزدیک به حد مجاز است، بالانس سیستم در وضعیت مطلوبی است.

جدول ۲ - دسته بندی‌های BV براساس توان و نوع کاربرد فن طبق استاندارد ISO 14694:2003(E)

| Fan Application Categories                   |                                                                                               |                                   |                                    |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Application                                  | Examples                                                                                      | Driver Power<br>kW (HP)<br>Limits | Fan<br>Application<br>Category, BV |
| Residential                                  | Ceiling fans, attic fans, window AC                                                           | $\leq 0.15$ (0.2)                 | BV-1                               |
|                                              |                                                                                               | $> 0.15$ (0.2)                    | BV-2                               |
| HVAC & Agricultural                          | Building ventilation and air conditioning; commercial systems                                 | $\leq 3.7$ (5.0)                  | BV-2                               |
|                                              |                                                                                               | $> 3.7$ (5.0)                     | BV-3                               |
| Industrial Process and Power Generation, etc | Baghouse, scrubber, mine, conveying, boilers, combustion air, pollution control, wind tunnels | $\leq 298$ (400)                  | BV-3                               |
|                                              |                                                                                               | $> 298$ (400)                     | BV-4                               |
| Transportation and Marine                    | Locomotives, trucks, automobiles                                                              | $\leq 15$ (20)                    | BV-3                               |
|                                              |                                                                                               | $> 15$ (20)                       | BV-4                               |
| Transit/Tunnel                               | Subway emergency ventilation, tunnel fans, garage ventilation, Tunnel Jet Fans                | $\leq 75$ (100)                   | BV-3                               |
|                                              |                                                                                               | $> 75$ (100)                      | BV-4                               |
|                                              |                                                                                               | ANY                               | BV-4                               |
| Petrochemical Process                        | Hazardous gases, process fans                                                                 | $\leq 37$ (50)                    | BV-3                               |
|                                              |                                                                                               | $> 37$ (50)                       | BV-4                               |
| Computer Chip Mfg                            | Clean room                                                                                    | ANY                               | BV-5                               |

جدول ۳ - مقادیر مجاز ارتعاشات فن با BV‌های مختلف برای تست در کارخانه برحسب نوع پایه

| Vibration Limits for Tests Conducts in Factory                                  |                       |                        |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Values shown are peak velocity, inches/s, Filter-In, at the factory test speed. |                       |                        |
| Fan Application Category                                                        | Rigidly Mounted in./s | Flexibly Mounted in./s |
| BV-1                                                                            | 0.50                  | 0.60                   |
| BV-2                                                                            | 0.20                  | 0.30                   |
| BV-3                                                                            | 0.15                  | 0.20                   |
| BV-4                                                                            | 0.10                  | 0.15                   |
| BV-5                                                                            | 0.08                  | 0.10                   |

## مدلسازی

با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS مدلسازی سازه فن انجام شد و پس از حصول انطباق مناسب بین مدل و سازه واقعی، به اعمال تغییرات جهت بهبود رفتار ارتعاشی سازه در محدوده کارکرد فن اقدام گردید. بدین وسیله می‌توان از آزمون‌های سعی و خطا که جهت اصلاح رفتار ارتعاشی سازه انجام می‌گیرد، تا حد امکان جلوگیری کرد و تغییری بر روی سازه انجام گیرد که قبلاً تاثیر مناسب آن روی ارتعاشات سازه تأیید شده باشد که در این صورت در هزینه و زمان صرفه جویی به عمل خواهد آمد.

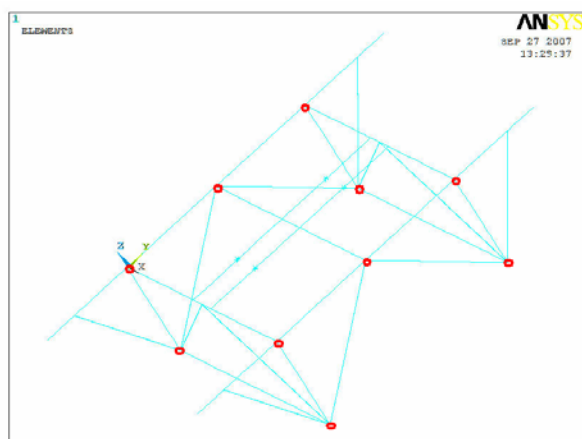
جدول ۴ - محدوده مجاز برای ارتعاش یک سیستم در شرایط کاری بر اساس استاندارد ISO 14694:2003(E)

| Condition                                                                                                                 | Fan application category | Rigidly mounted (mm/s) |        | Flexibly mounted (mm/s) |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------|-------------------------|--------|
|                                                                                                                           |                          | Peak                   | r.m.s  | Peak                    | r.m.s  |
| Start-up                                                                                                                  | BV-1                     | 14                     | 10     | 15.2                    | 11.2   |
|                                                                                                                           | BV-2                     | 7.6                    | 5.6    | 12.7                    | 9.0    |
|                                                                                                                           | BV-3                     | 6.4                    | 4.5    | 8.8                     | 6.3    |
|                                                                                                                           | BV-4                     | 4.1                    | 2.8    | 6.4                     | 4.5    |
|                                                                                                                           | BV-5                     | 2.5                    | 1.8    | 4.1                     | 2.8    |
| Alarm                                                                                                                     | BV-1                     | 15.2                   | 10.6   | 19.1                    | 14.0   |
|                                                                                                                           | BV-2                     | 12.7                   | 9.0    | 19.1                    | 14.0   |
|                                                                                                                           | BV-3                     | 10.2                   | 7.1    | 16.5                    | 11.8   |
|                                                                                                                           | BV-4                     | 6.4                    | 4.5    | 10.2                    | 7.1    |
|                                                                                                                           | BV-5                     | 5.7                    | 4.0    | 7.6                     | 5.6    |
| Shut down                                                                                                                 | BV-1                     | Note 1                 | Note 1 | Note 1                  | Note 1 |
|                                                                                                                           | BV-2                     | Note 1                 | Note 1 | Note 1                  | Note 1 |
|                                                                                                                           | BV-3                     | 12.7                   | 9.0    | 17.8                    | 12.5   |
|                                                                                                                           | BV-4                     | 10.2                   | 7.1    | 15.2                    | 11.2   |
|                                                                                                                           | BV-5                     | 7.6                    | 5.6    | 10.2                    | 7.1    |
| <b>Note 1:</b> Shutdown levels for fans in fan application grades BV-1 and BV-2 should be established on historical data. |                          |                        |        |                         |        |

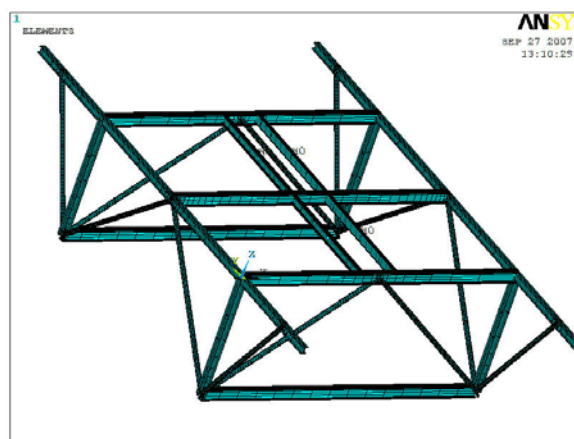
مدل کردن کل سازه (شکل ۱) امری غیرضروری است، چون با در نظر گرفتن تمام سازه تعداد المان‌ها بسیار زیاد شده و حجم محاسبات به شدت افزایش می‌یابد و زمان بسیار بیشتری نیز صرف مدلسازی خواهد شد. در برخی نقاط سازه، می‌توان با

تقریب بسیار خوبی سازه را صلب در نظر گرفت و قید جابجایی خطی و چرخشی صفر را به آنها نسبت داد. شکل ۴ قسمتی از سازه فن را که می‌توان آن را بقیه سازه جدا کرد، نشان می‌دهد. در شکل ۵ نیز محل اعمال قیود جابجایی خطی و چرخشی را ملاحظه می‌کنید.

از آنجا که سازه فن، وزن موتور و خود فن را تحمل می‌کند و جرم آن تاثیر بخصوصی در نتایج آنالیز مودال و تعیین فرکانس‌های طبیعی سازه دارد، بایستی جرم فن به صورت جرم متمرکز در نقاط اتصال فن به سازه قرار گیرد. مقدار جرم‌های متمرکز که بایستی در محل اتصال فن به سازه قرار گیرند، از روی وزن فن تعیین می‌گردد. با فرض تقارن در بارگذاری، نصف وزن هر فن یعنی حدود ۷۰ کیلوگرم به هر کدام از تیرهای حامل فن اعمال می‌شود.



شکل ۵ - محل اعمال قیدهای جابجایی خطی و چرخشی



شکل ۴ - سازه فن مش بندی شده

شکل مود و فرکانسی که طبق بررسی‌های انجام شده به عنوان عامل اصلی ارتعاشات تشخیص داده شد، مربوط به مود سوم است که در نتایج تحلیل اجزاء محدود در فرکانس ۱۸،۰۰۱ هرتز اتفاق افتاد، چون طبق اندازه‌گیری‌ها بعمل آمده، ارتعاشات اضافی در راستای افقی مشاهده شده است. در واقع بایستی تمام تلاش در جهت جلوگیری از ارتعاش سازه در این فرکانس و در این راستای خاص باشد. لازم به ذکر است که به علت پیوسته بودن سیستم سازه، از آنالیز مودال فرکانس‌ها و شکل مودهای زیادی بدست می‌آید. از آنجائیکه بسیاری از این فرکانس‌ها و شکل مودها به صورت محلی و وابسته به قسمت کوچکی از سازه هستند، مورد توجه قرار نمی‌گیرند. علاوه بر این بسیاری از فرکانس‌ها هم در خارج از بازه موردنظر واقع شدند که نیازی به بررسی آنها وجود ندارد. البته فرکانسی که از تست چکش به دست آمد، ۱۷،۷۵ هرتز بود که اختلاف نتیجه تحلیل المان محدود و تست تجربی کمتر از ۱،۵ درصد بدست آمد. نتایج حاصل از تحلیل المان محدود (شکل ۴) مود اول سازه در شکل‌های ۶ تا ۹ آورده شده است. از آنجا که ارتعاشات غالب در صفحه افقی اندازه‌گیری شده است، مود چهارم (شکل ۹) که باعث ارتعاشات عمودی می‌گردد، اهمیت نمی‌یابد. از طرفی در تست آنالیز مودال در سیگنال ارتعاشی یک پیک هم در حوالی ۵ هرتز مشاهده شد که مدل ساخته شده این فرکانس را در حدود ۶،۷ هرتز نشان داد (شکل ۷). بنابراین این مدل برای اعمال تغییرات سازه‌ای، به منظور کاهش ارتعاشات، صلاحیت لازم را دارد.



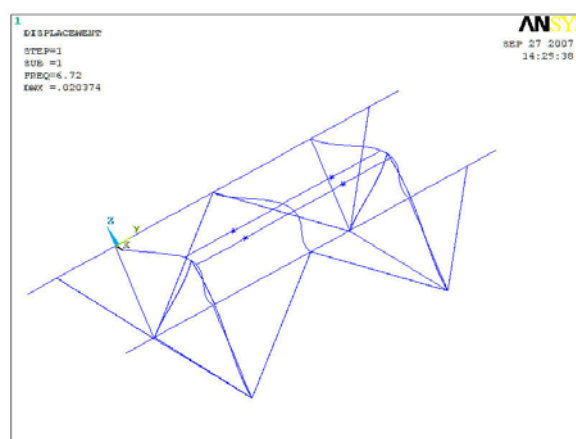
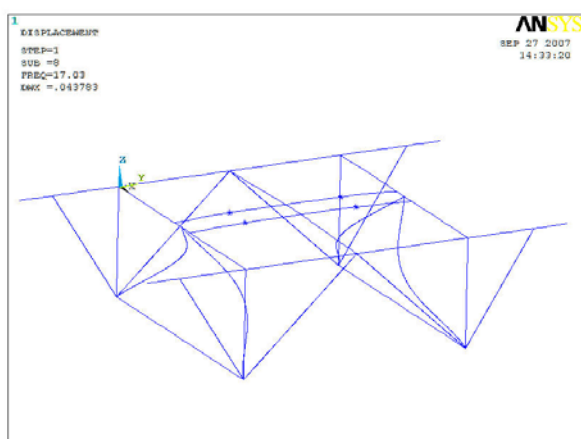
## اصلاحات سازه‌ای

بعد از تأیید صحت مدل المان محدود بایستی با ایجاد تغییرات در سازه تا حد ممکن فرکانس طبیعی سازه در مود سوم را از محدوده فعلی کارکرد فن دور کرد. باید در اینگونه اصلاحات فاکتور امکان‌پذیر بودن اجرای تغییرات را لحاظ نمود. اصلاحات سازه‌ای باید تا آنجا انجام شود که فرکانس طبیعی سازه از محدوده فرکانسی کارکرد فن دور متغیر، دور باشد. قابل ذکر است اصلاحاتی در اولویت قرار گرفتند که کمترین تغییرات را در سازه موجب شده و بیشترین تأثیر را در جابجاکردن فرکانس طبیعی در مود موردنظر داشته باشند. راه‌حل‌های سازه‌ای به دو دسته تقسیم شد:

۱. راه‌حلهایی که فرکانس طبیعی سازه را از محدوده فرکانس تحریک ایجاد شده دور می‌کنند

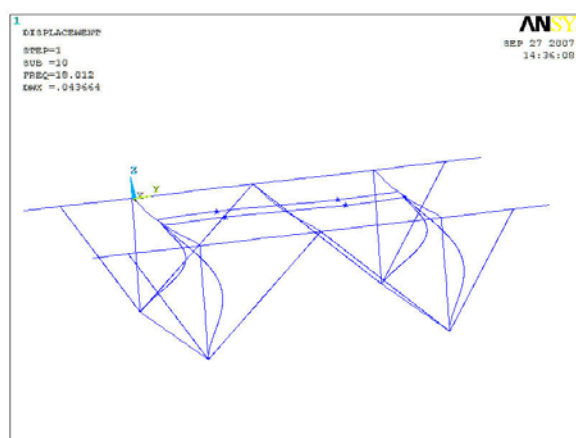
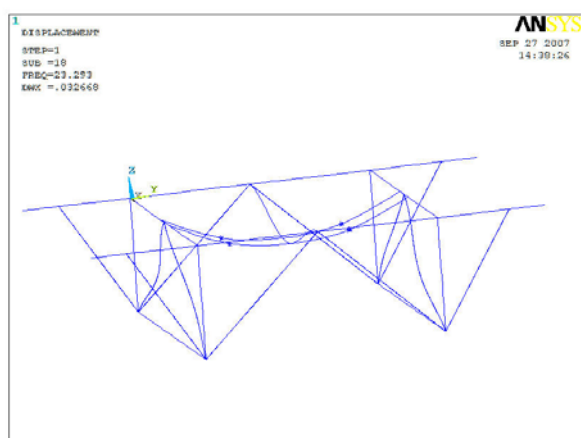
۲. راه‌حلهایی که فرکانس تحریک ایجاد شده را کنترل و از فرکانس طبیعی سازه دور می‌کنند

برای اعمال تغییرات در سازه و افزایش فرکانس طبیعی در مود سوم، باید به این نکته توجه داشت تغییر اعمال‌شده سفتی سازه را در راستای ارتعاشات موردنظر (صفحه افقی) افزایش دهد. به همین دلیل در گام اول افزودن تیرهایی به شکل ضربدری به سازه در صفحه افقی پیشنهاد شد. شکل ۱۰ چگونگی اعمال این تغییر را نشان می‌دهد. این تیرها دارای طول جان و بال ۱۵ سانتیمتر و ضخامت ۱ سانتیمتر بود.



شکل ۷ - شکل مود دوم سازه فن (در فرکانس ۱۷،۰۳ هرتز)

شکل ۶ - شکل مود اول سازه فن (در فرکانس ۴،۷ هرتز)

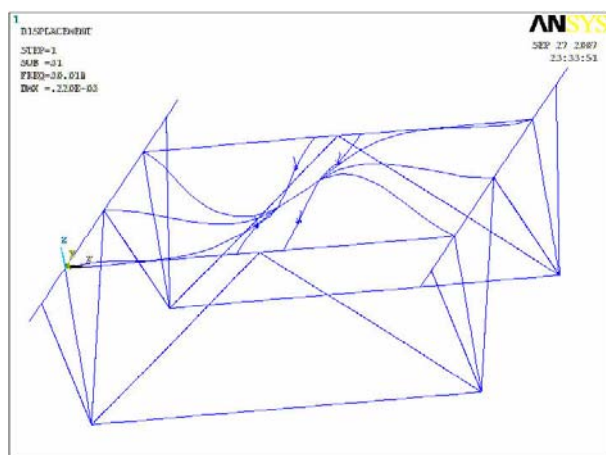


شکل ۹ - شکل مود چهارم سازه فن (در فرکانس ۲۳،۲۹ هرتز)

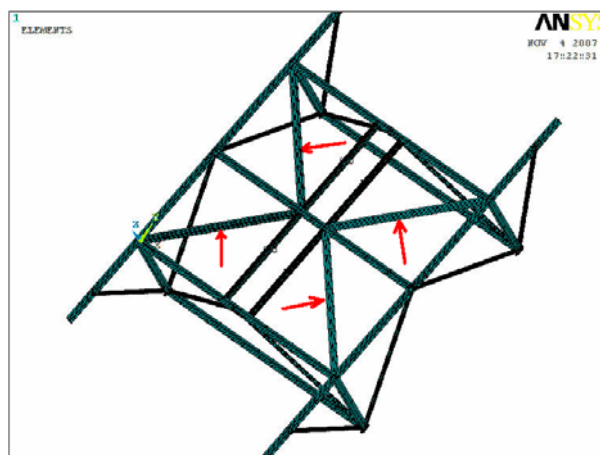
شکل ۸ - شکل مود سوم سازه فن (در فرکانس ۱۸،۰۱ هرتز)



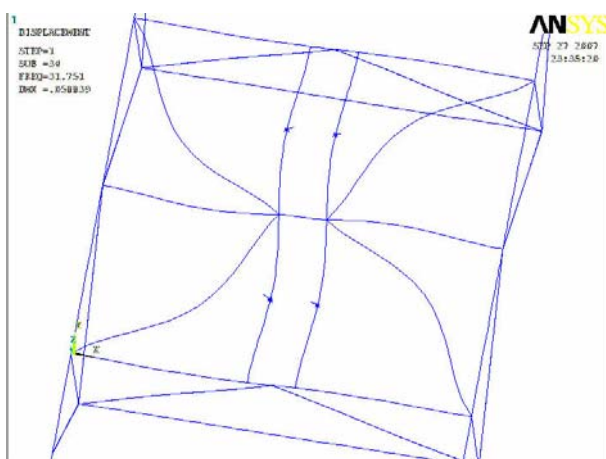
بعد از حل مدل، همانطور که پیش‌بینی می‌شد سفتی سازه در صفحه افقی افزایش چشمگیری داشت، بطوریکه بسیاری از مدهایی که در فرکانس‌های حدود ۱۸ هرتز اتفاق می‌افتاد، در باند فرکانسی صفر تا ۳۵ هرتز مشاهده نشد. با این تغییر می‌توان امیدوار بود که مدهایی که باعث ارتعاشات سازه فن می‌شوند، پس از این تغییر دیگر تحریک نشده و از محدوده کاری فن به اندازه کافی دور شوند. نکته امیدوارکننده این بود که در این باند فرکانسی مودی که موجب ارتعاشات در صفحه افقی می‌شد، مشاهده نگردید و مدهایی با جابجایی‌های مشابه هم در این بازه وجود نداشت و این نتیجه محصول افزایش سفتی سازه در صفحه افقی است. اما در حوالی فرکانس ۳۰ هرتز و بالاتر از آن یک سری مدهای جدید دیده شد که می‌توانند کمابیش ارتعاشاتی را در صفحه افقی موجب شوند. با توجه به اینکه فرکانس دوران فن در بیشترین دور هم به این مقدار نزدیک نمی‌شود، می‌توان گفت که مدهای مذکور تحریک نشده و شاهد ارتعاشات افقی مربوطه نخواهیم بود. در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ شکل مدهای سازه فن، بعد از اضافه کردن تیرهای ضربدری نشان داده شده است.



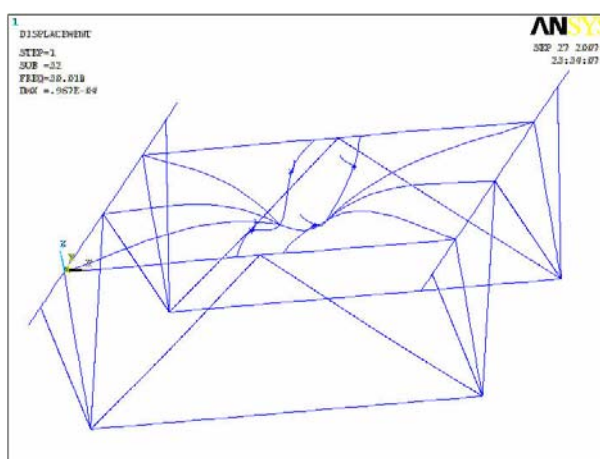
شکل ۱۱- شکل مود اول (در فرکانس ۳۰ هرتز)



شکل ۱۰- افزودن تیرهای ضربدری به سازه در صفحه افقی



شکل ۱۳- شکل مود سوم (در فرکانس ۳۱.۷ هرتز)



شکل ۱۲- شکل مود دوم (در فرکانس ۳۰ هرتز)

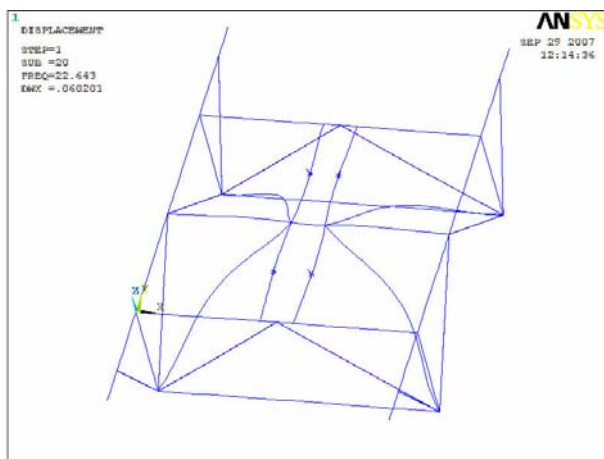
به عنوان تغییر سازه‌ای دیگر، افزودن ۴ تیر به صورت قطری ضربدری به سازه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۴ را مشاهده کنید). این تغییر از آن جهت مورد توجه واقع شد که نصب این تیرها در وضعیت مذکور راحت‌تر و سهل‌الوصول‌تر از حالت

قبل است، اگرچه ممکن است این آرایش مشکلاتی را برای رفت و آمد پرسنل ایجاد نماید. همچنین احتمال دارد این اصلاح مستلزم ایجاد تغییراتی در تجهیزات نصب شده بر روی سازه باشد. این تغییر، سفتی سازه را تا حدود زیادی در هر سه جهت افزایش می‌دهد. حل این مدل تاثیر این تیرها بر رفتار ارتعاشی سازه فن را بیشتر مشخص کرد. تیر بکار رفته در این اصلاح سازه‌ای دارای همان خصوصیات تیر بکاررفته در اصلاح قبلی است.

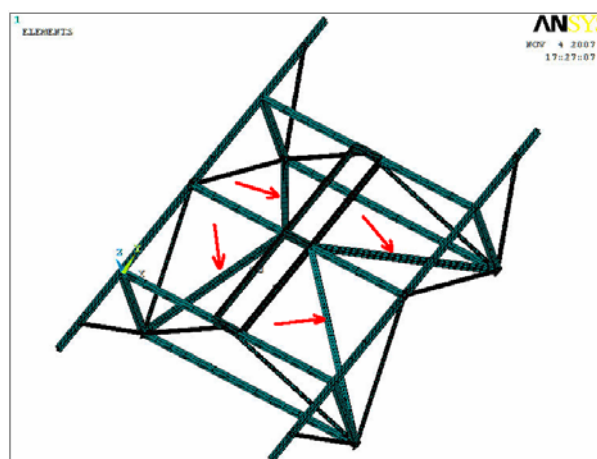
با حل مساله و مقایسه نتایج با اصلاح قبلی این نتیجه قابل حصول است که مقدار سفتی سازه در صفحه افقی با این تغییر نسبت به حالت قبل کاهش پیدا کرده است. این مطلب از آنجا بیان می‌شود که مقادیر فرکانس طبیعی نسبت به حالت قبل کاهش چشمگیری نشان می‌دهد. دلیل این نزول آن است که مقداری از سفتی تیر مایل برای افزایش سفتی در راستای عمودی بکار رفته و بنابراین اثرات سفتی افقی آن کمتر شده است.

در شکل ۱۵ شکل مود اول این سازه را در فرکانس ۲۲٫۶ هرتز مشاهده می‌کنید. این مود موجب ارتعاشاتی در صفحه افقی می‌شود، هر چند که این ارتعاشات جزئی و قابل اغماض هستند. شکل ۱۶ شکل مود دوم را نشان می‌دهد که در فرکانس ۲۳ هرتز اتفاق افتاده است. در این مود هم ارتعاشات در صفحه افقی روی داده و کمی از ارتعاشات مود قبلی بارزتر می‌باشد. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ شکل مودهای سوم و چهارم نشان داده شده است که به ترتیب در فرکانس‌های ۳۵٫۶ و ۳۷ هرتز اتفاق می‌افتند. جابجایی‌های ناشی از این مودها قابل ملاحظه بوده و در صفحه افقی رخ داده‌اند. با توجه به اینکه فرکانس این مودها بالاتر از بازه فرکانسی کارکرد فن است، لذا از این مودها تحریک نشده و چنین ارتعاشاتی بوجود نمی‌آید.

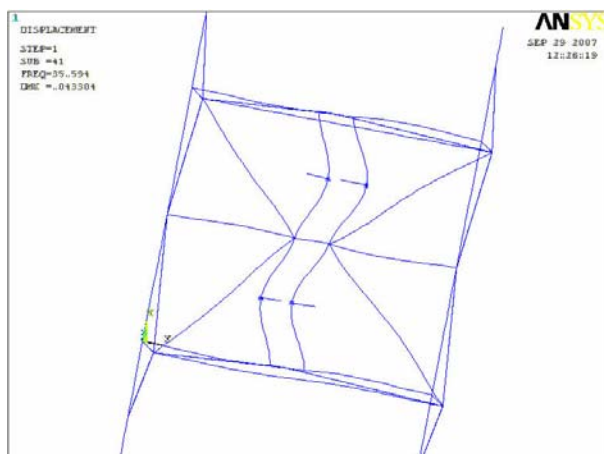
نکته قابل ذکر در اینجا این است که شکل مود موردنظر که برای رفع آن بحث می‌شد در باند فرکانسی صفر تا ۴۰ هرتز مشاهده نگردید. از طرفی مودهای اول و دوم سازه اخیر، دارای ارتعاشات جزئی در صفحه افقی هستند، بنابراین از این اصلاح هم می‌توان در صورت صلاحدید و عدم ایجاد اختلال در تجهیزات جانبی سازه، استفاده نمود.



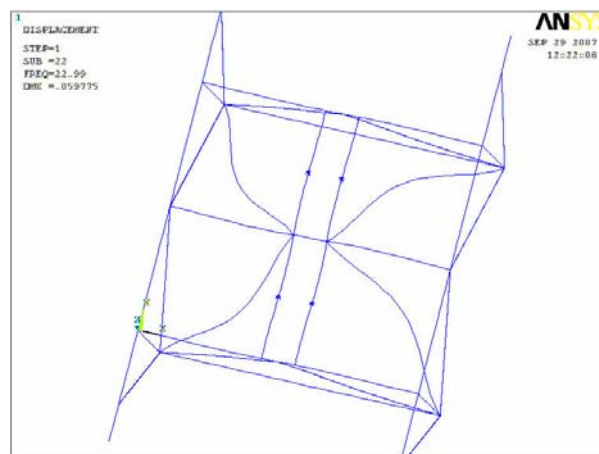
شکل ۱۵ - شکل مود اول (در فرکانس ۲۲٫۶ هرتز)



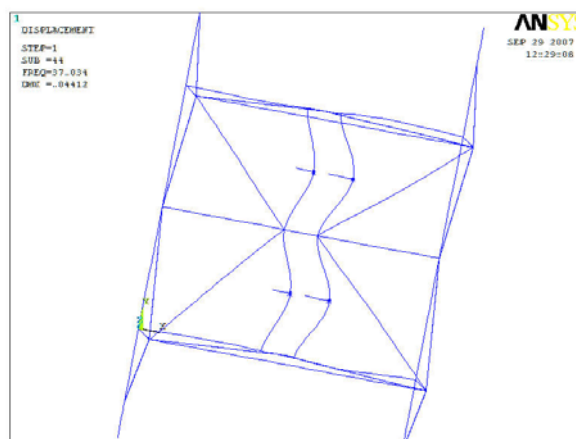
شکل ۱۴ - افزودن تیرهای قطری ضربدری به سازه در صفحه افقی



شکل ۱۷ - شکل مود سوم (در فرکانس ۳۵٫۶ هرتز)



شکل ۱۶ - شکل مود دوم (در فرکانس ۲۳ هرتز)



شکل ۱۸ - شکل مود چهارم (در فرکانس ۳۷ هرتز)

## نتیجه‌گیری

در این بررسی راهکارهای غیرسازه‌ای و اصلاحات سازه‌ای برای کاهش ارتعاشات فن‌های با گرداننده دور متغیر پیشنهاد گردید. با در نظر گرفتن شرایط کاری و اندازه‌گیری‌های انجام شده، تشدید به عنوان علت ارتعاشات اضافی در سازه فن تشخیص داده شد. برای برطرف کردن مشکل تشدید در سازه راهکارهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای ارائه گردید. راهکار غیرسازه‌ای مبتنی بر حذف منبع ارتعاش بوده و در این مورد، عدم کارکرد فن در حدود دور بحرانی می‌باشد. با این کار فرکانس تحریک دیگر وجود نخواهد داشت و ارتعاشات مورد نظر ظاهر نمی‌شود. در این بررسی برای کاهش ارتعاشات سازه فن بیشتر بر روی تغییرات سازه‌ای تکیه شد. برای این کار از مدل ایجاد شده در نرم‌افزار المان محدود ANSYS استفاده شد و میزان تاثیر این اصلاحات بر ارتعاشات سازه مورد بررسی قرار گرفت. بعد از تحلیل حالات مختلف، افزودن تیرهای ضربدری در صفحه افقی و تیرهای قطری ضربدری پیشنهاد شد. این تغییرات سفتی سازه را در راستای ارتعاشات ناخواسته، افزایش داده و باعث افزایش فرکانس طبیعی سازه می‌شوند و بدین طریق نیروی تحریک که از فن ناشی می‌شود، در محدوده کارکرد آن توانایی ایجاد چنان ارتعاشاتی را نخواهد داشت. با توجه به این نتایج می‌توان با اطمینان از تاثیر مناسب چنین اصلاحاتی، به اعمال آنها بر روی سازه اقدام نمود.

جدول ۵ - طبقه بندی روش‌های مختلف کاهش ارتعاشات سازه فن

| تغییر                                               | مزایا                                                                                                                  | معایب                                                                      |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| افزودن تیرهای ضربدری در صفحه افقی                   | افزایش سفتی در دو جهت در صفحه افقی - وجود فضای مناسب برای این اصلاح - تغییر قابل توجه در فرکانس طبیعی                  | در صورتی که فضای مناسب در اختیار باشد، عیب خاصی وجود ندارد.                |
| افزودن تیرهای ضربدری قطری                           | تاثیر خوب در تغییر فرکانس طبیعی سازه - افزایش نسبی سفتی سازه در سه جهت                                                 | نیاز به فضای زیاد و احتمال ایجاد اختلال در تجهیزات جانبی                   |
| افزایش سفتی سازه بوسیله اتصال صلب به سازه بالایی    | افزایش سفتی سازه به میزان دو برابر در راستای ارتعاشات - هزینه کم - موضعی بودن تغییر و نیاز به فضای بسیار کم برای تغییر | اتصال صلب دو تیر به حالت واقعی چندان نزدیک نیست و ایجاد آن نسبتاً مشکل است |
| افزایش سفتی سازه بوسیله اتصال غیرصلب به سازه بالایی | سهولت اجرا - نیاز به فضای بسیار کم                                                                                     | تغییرات بسیار کم در فرکانس طبیعی                                           |

## تقدیر و تشکر

از شرکت گاز پارس جنوبی که این پژوهش با حمایت‌های مالی و علمی این شرکت صورت پذیرفته است، تشکر و قدردانی می‌گردد.

## مراجع

- [1]. De La Harpe, J.H., Fan and fan system vibration, Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa 35 (3), pp. 17-23, 1982.
- [2]. Gutzwiller, L., Kuli, T. J., Understanding vibration and imbalance in industrial fans, Pulp and Paper Canada, 106 (7-8), pp. 23-25, 2005.
- [3]. Devanathaa, R., Muthukumaraswamy, K. M., Preventing BOF-ID fan vibration is all a matter of balance, Iron and Steel Technology Conference Proceedings 2, pp. 579-581, 2004.
- [4]. Winzenz, A. J., Controlling fan vibration with active balancing to solve serious reliability and maintenance problems, IMechE Event Publications 4, pp. 61-69, 2004.
- [5]. Sudmersen, U., Reimche, W., Stegemann, D., Liu, Y., Condition Monitoring of Industrial Fans by Advanced Vibration Analysis, VDI Berichte (1425), pp. 347-358, 1998.
- [6]. Hafeez, T., Ahmed, A., Chohan, G.Y., Amir, M., Vibration monitoring and fault diagnosis of an I.D.fan at a cement plant, Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research 46 (4), pp. 225-229, 2003.
- [7]. Duffner, D.H., Hopkins, S.W., Tests tell story of fan's vibrations, AFE Facilities Engineering Journal 30 (4), pp. 21-22, 2003.



- [8]. Landgraf, Michael W., Vibration testing of fan structures, International Exhibition & Conference for the Power Generation Industries - Power-Gen, pp. 184, 1998.
- [9]. Fermer, K. E., Lack, C.W., Vibration isolation of fans considering the elastic properties of the the floor, IMech E Conference Publications (Institution of Mechanical Engineers), pp. 81-92, 1984.
- [10]. Zhou, S. P., Su, Y. S., Zou, H. F., Gao, H. S., Vibration analysis of E-GB110 fan unit support structure, Journal of East China University of Science and Technology 32 (8), pp. 1012-1015, 2006.