

# ہندبوک آنالیز ارتعاشات

## The Vibration Analysis Handbook

James Taylor

گردآوری و ترجمہ:

حمید کریمی

خلیل اللہ سیاوشی

ویرایش:

جواد قاسمی نژاد، خلیل اللہ سیاوشی

حمزہ دشتی، حمید کریمی

حروفچینی:

محسن مردانہ، محمدرضا سبزی نژاد

بہار ۱۳۹۰

|                     |   |                                                                                                     |
|---------------------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه             | : | تیلور، جیمز اس. Taylor, James I.                                                                    |
| عنوان و نام پدیدآور | : | هندبوک آنالیز ارتعاشات/جیمز تیلور؛ ترجمه حمید کریمی، خلیل الله سیاوشی.                              |
| مشخصات نشر          | : | اصفهان: کنکاش، ۱۳۹۰.                                                                                |
| مشخصات ظاهری        | : | ۳۰۸ ص.                                                                                              |
| شابک                | : | 978-600-136-081-7                                                                                   |
| وضعیت فهرست نویسی   | : | فبا                                                                                                 |
| بازداشت             | : | The vibration analysis handbook : a practical guide for solving: rotating machinery problems, 1994. |
| موضوع               | : | ماشین آلات -- ارتعاش -- دستنامه ها                                                                  |
| موضوع               | : | تئریو ماشین ها -- ارتعاش -- دستنامه ها                                                              |
| شناسه افزوده        | : | کریمی، حمید. ۱۳۵۵ - مترجم                                                                           |
| شناسه افزوده        | : | سیاوشی، خلیل الله، ۱۳۶۰ - مترجم                                                                     |
| رده بندی کنگره      | : | ۱۳۹۰ ۹۹۷(۱۷۷)ن                                                                                      |
| رده بندی دیویی      | : | ۶۲۱/۸۱۱                                                                                             |
| شماره کتابشناسی ملی | : | ۲۵۰۰-۸۱۷                                                                                            |

## هندبوک آنالیز ارتعاشات

|            |                              |
|------------|------------------------------|
| مترجمین:   | حمید کریمی - خلیل الله سیاوش |
| ناشر:      | انتشارات کنکاش               |
| نوبت چاپ:  | اولی                         |
| تاریخ نشر: | ۱۳۹۰                         |
| تیراژ:     | ۱۰۰۰ جلد                     |
| ناظر فنی:  | محمد حسین جزینی              |
| چاپ:       | کنکاش                        |
| صحافی:     | سید                          |
| قیمت:      | ۷۰۰۰ تومان                   |
| شابک:      | 978-600-136-081-7            |

اصفهان، سه راه حکیم نظامی، ابتدای خیابان ارشد، چاپ و نشر کنکاش  
تلفن: ۶۲۵۸۰۴۹ (۰۳۱۱)

# فهرست مطالب

| عنوان                                         | صفحه |
|-----------------------------------------------|------|
| فهرست مطالب                                   | ۱    |
| فهرست شکل ها                                  | خ    |
| فهرست جدول ها                                 | ض    |
| پیشگفتار مترجمین                              | ط    |
| فصل اول                                       |      |
| مقدمه ای بر ارتعاشات ماشین ها                 | ۱    |
| ۱.۱ تئوری ارتعاشات                            | ۱    |
| ۱.۱.۱ حرکت هارمونیک                           | ۲    |
| ۲.۱.۱ حرکت پریودیک                            | ۲    |
| ۳.۱.۱ حرکت تصادفی                             | ۳    |
| ۲.۱ ارتباط بین زمان و فرکانس                  | ۴    |
| ۱.۲.۱ زمان                                    | ۴    |
| ۲.۲.۱ فرکانس                                  | ۶    |
| ۳.۱ اندازه گیری دامنه                         | ۶    |
| ۴.۱ منابع فرکانسی                             | ۹    |
| ۱.۴.۱ فرکانس های تولیدی                       | ۹    |
| ۲.۴.۱ فرکانس های تحریک                        | ۱۰   |
| ۳.۴.۱ فرکانس های ناشی از پدیده های الکترونیکی | ۱۸   |

|         |                                           |
|---------|-------------------------------------------|
| ۲۲..... | ۵.۱ تابع نیرو.....                        |
| ۲۳..... | ۶.۱ ترکیب مشکلات ماشین.....               |
| ۲۵..... | ۷.۱ ترکیب فرکانس‌ها.....                  |
| ۲۶..... | ۸.۱ ارتباطات الکتریکی و مکانیکی.....      |
| ۲۷..... | ۹.۱ حوزه زمان و فرکانس.....               |
| ۲۹..... | ۱۰.۱ ارتباط بین جابجایی، سرعت و شتاب..... |
| ۳۱..... | ۱۱.۱ روابط بین جابجایی، سرعت و شتاب.....  |
| ۳۱..... | ۱۲.۱ راه‌های اندازه‌گیری ارتعاشات.....    |
| ۳۳..... | ۱۳.۱ نتیجه‌گیری و بهره‌گیری.....          |

## فصل دوم

## تکنیک‌های تحلیل اسپکتروم فرکانسی و سیگنال زمانی..... ۳۴

|         |                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------|
| ۳۴..... | ۱.۲ مقدمه.....                                        |
| ۳۵..... | ۲.۲ فیزیک پایه.....                                   |
| ۳۶..... | ۳.۲ فرکانس واحد (متفرد).....                          |
| ۴۲..... | ۴.۲ فرکانس واحد با هارمونیک‌ها.....                   |
| ۵۶..... | ۵.۲ چیدن.....                                         |
| ۵۷..... | ۱.۵.۲ موج مربعی.....                                  |
| ۵۹..... | ۶.۲ فرکانس‌های طبیعی.....                             |
| ۶۰..... | ۷.۲ فرکانس‌های چندگانه - سیستم‌های خطی.....           |
| ۶۰..... | ۱.۷.۲ سواری موج فرکانس بالا روی موج فرکانس پایین..... |
| ۶۲..... | ۸.۲ فرکانس‌های چندگانه (مضرب) - سیستم غیرخطی.....     |
| ۶۲..... | ۱.۸.۲ مدولاسیون دامنه.....                            |
| ۶۷..... | ۹.۲ فرکانس‌های جمع و تفاضل.....                       |
| ۷۳..... | ۱۰.۲ پالس‌ها.....                                     |
| ۷۵..... | ۱۱.۲ مدولاسیون فرکانسی.....                           |
| ۷۷..... | ۱۲.۲ نتیجه‌گیری.....                                  |

## فصل سوم

## ارزیابی دقیق شرایط ماشین..... ۷۸

|     |                                                |
|-----|------------------------------------------------|
| ۷۸  | ۱.۳ مقدمه                                      |
| ۷۹  | ۲.۳ تئوری                                      |
| ۸۴  | ۳.۳ تنظیم استاندارد ارتعاشات                   |
| ۸۶  | ۴.۳ فرکانس‌های تولید شده                       |
| ۸۸  | ۵.۳ جمع‌آوری داده‌ها                           |
| ۸۹  | ۶.۳ انتخاب سنسور                               |
| ۹۰  | ۷.۳ پایش پیوسته                                |
| ۹۱  | ۸.۳ عیوب متداول                                |
| ۹۱  | ۹.۳ نابالانسی                                  |
| ۹۳  | ۱۰.۳ خمیدگی شافت                               |
| ۹۵  | ۱۱.۳ ضعف پایه‌ها                               |
| ۹۵  | ۱۲.۳ ناهم‌محوری                                |
| ۹۹  | ۱۳.۳ لقی                                       |
| ۹۹  | ۱.۱۳.۳ لقی بیرینگ روی شافت                     |
| ۱۰۰ | ۲.۱۳.۳ لقی بیرینگ در هوزینگ                    |
| ۱۰۲ | ۳.۱۳.۳ شکل‌های متداول لقی                      |
| ۱۰۳ | ۴.۱۳.۳ نويز                                    |
| ۱۰۵ | ۵.۱۳.۳ تشخیص لقی                               |
| ۱۰۵ | ۱۴.۳ تشدید                                     |
| ۱۰۷ | ۱۵.۳ سایش                                      |
| ۱۱۲ | ۱۶.۳ چرخش روغن                                 |
| ۱۱۴ | ۱۷.۳ تجزیه و تحلیل مشکلات در موتورهای الکتریکی |
| ۱۱۵ | ۱.۱۷.۳ موتور با مشکل خروج از مرکز مغناطیسی     |
| ۱۱۷ | ۲.۱۷.۳ میله‌های شکسته                          |
| ۱۲۳ | ۳.۱۷.۳ اتصال کوتاه در سیم‌پیچ‌ها               |
| ۱۲۵ | ۴.۱۷.۳ مشکلات ارتعاشی در موتورهای سنکرون       |
| ۱۲۶ | ۵.۱۷.۳ سوت زدن                                 |
| ۱۲۷ | ۶.۱۷.۳ اطلاعات موتورهای غیر درگیر              |
| ۱۲۹ | ۱۸.۳ توربین‌های بخار                           |

|          |                                            |
|----------|--------------------------------------------|
| ۱۳۱..... | ۱۹.۳ پمپ‌ها.....                           |
| ۱۳۱..... | ۱.۱۹.۳ برخورد پروانه.....                  |
| ۱۳۳..... | ۲.۱۹.۳ نارسایی در پمپ.....                 |
| ۱۳۴..... | ۳.۱۹.۳ کاویتاسیون.....                     |
| ۱۳۶..... | ۲۰.۳ کمپرسورها.....                        |
| ۱۳۷..... | ۲۱.۳ فن‌ها.....                            |
| ۱۳۸..... | ۲۲.۳ آزمون‌های ویژه.....                   |
| ۱۳۸..... | ۱.۲۲.۳ داده‌های Start up و Coast down..... |
| ۱۴۴..... | ۲.۲۲.۳ آزمون ضربه.....                     |
| ۱۴۵..... | ۳.۲۲.۳ ضبط صدا.....                        |
| ۱۴۶..... | ۴.۲۲.۳ مانگین‌گیری زمانی سنکرون.....       |
| ۱۵۰..... | ۵.۲۲.۳ اندازه‌گیری حرکت نسبی.....          |

## فصل چهارم

|          |                                              |
|----------|----------------------------------------------|
| ۱۵۴..... | عیب‌یابی دقیق بیرینگ‌های غلظتی.....          |
| ۱۵۴..... | ۱.۴ مقدمه.....                               |
| ۱۵۵..... | ۲.۴ داده‌برداری.....                         |
| ۱۵۵..... | ۳.۴ انتخاب سنسور ارتعاشی.....                |
| ۱۵۶..... | ۴.۴ فرکانس‌های تولید شده.....                |
| ۱۵۷..... | ۱.۴.۴ فرکانس قفسه.....                       |
| ۱۵۸..... | ۲.۴.۴ فرکانس گذر ساچمه‌ها از حلقه خارجی..... |
| ۱۵۹..... | ۳.۴.۴ فرکانس گذر ساچمه‌ها از حلقه داخلی..... |
| ۱۵۹..... | ۴.۴.۴ فرکانس چرخش ساچمه‌ها.....              |
| ۱۶۶..... | ۵.۴.۴ تحلیل حلقه خارجی.....                  |
| ۱۶۶..... | ۶.۴.۴ تحلیل فرکانس پایه ماشین.....           |
| ۱۶۷..... | ۷.۴.۴ برنامه محاسبه VCI بیرینگ.....          |
| ۱۶۷..... | ۵.۴ عیوب بیرینگ‌ها.....                      |
| ۱۶۸..... | ۱.۵.۴ حلقه خارجی.....                        |
| ۱۷۱..... | ۲.۵.۴ حلقه داخلی.....                        |
| ۱۷۶..... | ۳.۵.۴ دامنه حلقه داخلی و حلقه خارجی.....     |

|     |                                                          |
|-----|----------------------------------------------------------|
| ۱۷۸ | ۴.۵.۴ مدولاسیون BPF                                      |
| ۱۷۸ | ۵.۵.۴ اجزای چرخشی، ساچمه‌ها و رولرها                     |
| ۱۸۲ | ۶.۵.۴ قفسه                                               |
| ۱۸۳ | ۷.۵.۴ عیوب چندگانه                                       |
| ۱۸۶ | ۸.۵.۴ پیشروی خرابی در بیرینگ                             |
| ۱۸۹ | ۶.۴ شدت خرابی                                            |
| ۱۸۹ | ۱۶.۴ رفتار بیرینگ                                        |
| ۱۹۲ | ۲۶.۴ محاسبه طول خرابی در حلقه داخلی                      |
| ۱۹۷ | ۳۶.۴ محاسبه طول خرابی                                    |
| ۱۹۹ | ۴۶.۴ پوسته‌ای شدن عمیق ناشی از خستگی و پوسته‌ای شدن سطحی |
| ۲۰۴ | ۷.۴ منشا مشکلات                                          |
| ۲۰۴ | ۱.۷.۴ حکاکی شیمیایی (اسیدی)                              |
| ۲۰۷ | ۲.۷.۴ آرایش شیار یا Fluting                              |
| ۲۱۳ | ۳.۷.۴ لقی                                                |
| ۲۱۴ | ۴.۷.۴ بیرینگ‌های با لقی داخلی بالا                       |
| ۲۱۷ | ۵.۷.۴ بیرینگ‌هایی که روی شافت می‌چرخند                   |
| ۲۱۷ | ۶.۷.۴ لقی بیرینگ در هوزینگ                               |
| ۲۲۰ | ۷.۷.۴ آزمون فرکانس‌های بیرینگ                            |
| ۲۲۲ | ۸.۴ نتیجه‌گیری                                           |

## فصل پنجم

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| ۲۲۳ | ارزیابی درست وضعیت چرخنده‌ها |
| ۲۲۳ | ۱.۵ مقدمه                    |
| ۲۲۴ | ۲.۵ جمع‌آوری اطلاعات         |
| ۲۲۴ | ۱.۲.۵ چگونگی گرفتن اطلاعات   |
| ۲۲۶ | ۲.۲.۵ انتخاب سنسورها         |
| ۲۲۷ | ۳.۵ تئوری ارتعاشات چرخنده‌ها |
| ۲۲۷ | ۱.۳.۵ ارزیابی نسبت چرخنده‌ها |
| ۲۲۸ | ۲.۳.۵ فاکتورینگ              |

|          |                                                                                    |       |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ۲۲۹..... | فرکانس درگیری دندانها.....                                                         | ۳.۳.۵ |
| ۲۳۰..... | فرکانسهای کسری GM.....                                                             | ۴.۳.۵ |
| ۲۳۱..... | Hunting tooth فرکانس.....                                                          | ۵.۳.۵ |
| ۲۲۳..... | عمر متوسط چرخنده.....                                                              | ۶.۳.۵ |
| ۲۳۴..... | مدولاسیون دامنه.....                                                               | ۷.۳.۵ |
| ۲۳۶..... | نرم افزار محاسباتی چرخنده ها.....                                                  | ۸.۳.۵ |
| ۲۳۸..... | مشکلات چرخنده ها و عوامل ایجاد آنها.....                                           | ۴.۵   |
| ۲۳۹..... | چرخنده های خارج از مرکز.....                                                       | ۱.۴.۵ |
|          | چرخنده های بدون فاکتور مشترک که یک یا هر دو آنها دارای مشکل خروج از مرکزی است..... | ۲.۴.۵ |
| ۲۵۳..... | مرکزی است.....                                                                     |       |
| ۲۵۹..... | چرخنده های دارای لنگی و نقاط برجسته.....                                           | ۳.۴.۵ |
| ۲۶۳..... | چرخنده های نصب شده روی شافت خمیده.....                                             | ۴.۴.۵ |
| ۲۶۶..... | لقی و سایکس چرخنده.....                                                            | ۵.۴.۵ |
| ۲۶۸..... | چرخنده های ناهم محور.....                                                          | ۶.۴.۵ |
| ۲۷۰..... | مشکلات Backlash و چرخنده های ناهم محور.....                                        | ۷.۴.۵ |
| ۲۷۵..... | دندانه های شکسته، ترک خوردن یا خراشیده شده (Chipped).....                          | ۸.۴.۵ |
| ۲۸۸..... | نتیجه گیری.....                                                                    | ۵.۵   |

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: حرکت هارمونیک ..... ۲
- شکل ۲-۱: حرکت پریودیک ..... ۳
- شکل ۳-۱: حرکت تصادفی ..... ۴
- شکل ۴-۱: زمان و فرکانس ..... ۵
- شکل ۵-۱: ارتباط میان زمان و فرکانس ..... ۵
- شکل ۶-۱: پیک تا پیک ..... ۷
- شکل ۷-۱: صفر تا پیک ..... ۷
- شکل ۸-۱:  $rms$  و میانگین ..... ۸
- شکل ۹-۱: نسبت میرایی فرکانس ..... ۱۱
- شکل ۱۰-۱: میرایی نسبتاً خوب فرکانس ..... ۱۲
- شکل ۱۱-۱: تحریک شدن فرکانس طبیعی ..... ۱۴
- شکل ۱۲-۱: اسپکترام از بین رفتن فیلم روغن ..... ۱۴
- شکل ۱۳-۱: اولین شکل مود ..... ۱۶
- شکل ۱۴-۱: دومین شکل مود ..... ۱۶
- شکل ۱۵-۱: سومین شکل مود ..... ۱۷
- شکل ۱۶-۱: مدل لوله فولادی ..... ۱۷
- شکل ۱۷-۱: اولین شکل مود ..... ۱۸
- شکل ۱۸-۱: موج سینوسی بریده شده ..... ۱۹
- شکل ۱۹-۱: موج مربعی یا موج چهارگوش ..... ۱۹
- شکل ۲۰-۱: شکل موج تحریف شده ..... ۲۰
- شکل ۲۱-۱: محتوای هارمونیک واقعی ..... ۲۱

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| شکل ۱-۲۲: نابالانسی خالص.....                                                 | ۲۱ |
| شکل ۱-۲۳: ماهیت فیزیکی ارتعاش.....                                            | ۲۳ |
| شکل ۱-۲۴: ساده‌ترین شکل نابالانسی.....                                        | ۲۴ |
| شکل ۱-۲۵: نابالانسی.....                                                      | ۲۴ |
| شکل ۱-۲۶: رابطه بین زمان و فرکانس.....                                        | ۲۹ |
| شکل ۱-۲۷: منحنی پاسخ فرکانسی شتاب، سرعت و جابجایی.....                        | ۳۰ |
| شکل ۲-۱: فرکانس واحد.....                                                     | ۳۷ |
| شکل ۲-۲: یک فرکانس واحد با ۹۰ درجه اختلاف فاز.....                            | ۳۸ |
| شکل ۲-۳: یک فرکانس واحد با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز.....                           | ۴۰ |
| شکل ۲-۴: دو سیگنال با ۱۸۰ درجه ناهم‌فازی.....                                 | ۴۱ |
| شکل ۲-۵: دو سیگنال هم‌فاز و با دامنه یکسان.....                               | ۴۱ |
| شکل ۲-۶: نابالانسی در پمپ تغذیه بویلر (BFW).....                              | ۴۲ |
| شکل ۲-۷: فرکانس واحد و هارمونیک هم‌فاز.....                                   | ۴۴ |
| شکل ۲-۸: فرکانس واحد با ۱۸۰ درجه تغییر فاز نسبت به شکل قبل و هارمونیک آن..... | ۴۵ |
| شکل ۲-۹: یک فرکانس واحد و هارمونیک آن با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز.....             | ۴۶ |
| شکل ۲-۱۰: یک فرکانس واحد با ۹۰ درجه تغییر فاز هارمونیک.....                   | ۴۸ |
| شکل ۲-۱۱: یک فرکانس واحد با ۹۰- درجه اختلاف فاز با هارمونیک.....              | ۴۸ |
| شکل ۲-۱۲: یک فرکانس واحد با هارمونیک دارای دامنه کوتاه.....                   | ۴۹ |
| شکل ۲-۱۳: یک فرکانس واحد با دو هارمونیک.....                                  | ۵۰ |
| شکل ۲-۱۴: یک فرکانس واحد با هارمونیک سوم.....                                 | ۵۱ |
| شکل ۲-۱۵: یک فرکانس واحد با دو هارمونیک.....                                  | ۵۲ |
| شکل ۲-۱۶: یک فرکانس واحد با دو هارمونیک و تغییر فاز بین آنها.....             | ۵۲ |
| شکل ۲-۱۷: یک فرکانس واحد با دو هارمونیک و تغییر فاز بین آنها.....             | ۵۳ |
| شکل ۲-۱۸: یک فرکانس واحد با دو هارمونیک و تغییر فاز بین آنها.....             | ۵۳ |
| شکل ۲-۱۹: یک فرکانس واحد با دو هارمونیک و تغییر فاز بین آنها.....             | ۵۴ |
| شکل ۲-۲۰: یک فرکانس واحد با دو هارمونیک و تغییر فاز بین آنها.....             | ۵۴ |

- شکل ۲-۲۱: داده‌هایی از توربین یک ژنراتور ..... ۵۵
- شکل ۲-۲۲: سیگنال چیده شده ..... ۵۶
- شکل ۲-۲۳: اسپکتروم موتور 1800 rpm که با تسمه به یک فن کوپل شده است ..... ۵۷
- شکل ۲-۲۴: یک فرکانس واحد با هارمونیک‌های فرد ..... ۵۸
- شکل ۲-۲۵: یک فرکانس واحد با هارمونیک‌های فرد ..... ۵۹
- شکل ۲-۲۶: سوار شدن فرکانس بالا روی فرکانس پایین ..... ۶۱
- شکل ۲-۲۷: مدولاسیون دامنه دو فرکانس ..... ۶۳
- شکل ۲-۲۸: دو فرکانس مشابه با هارمونیک دوم ..... ۶۶
- شکل ۲-۲۹: دو فرکانس مشابه با هارمونیک دوم ..... ۶۶
- شکل ۲-۳۰: تداخل (Beat) حاصل از دو فرکانس مشابه ..... ۶۷
- شکل ۲-۳۱: فرکانس حامل ۱۰۰ هرتز ..... ۶۸
- شکل ۲-۳۲: فرکانس ۱۰۰ هرتز و ۱۰۴ هرتز مجموع ..... ۶۹
- شکل ۲-۳۳: حرکت انتقالی یکی از چرخنده‌ها با چهار نقطه خارج از مرکز ..... ۷۰
- شکل ۲-۳۴: تفاضل فرکانسی ۱۰۰ و ۹۶ هرتز ..... ۷۱
- شکل ۲-۳۵: فرکانس مجموع و تفاضل بدون اختلاف فاز ..... ۷۲
- شکل ۲-۳۶: فرکانس مجموع و تفاضل با اختلاف فاز ..... ۷۲
- شکل ۲-۳۷: یک پالس خالی ..... ۷۴
- شکل ۲-۳۸: پالس تولید شد یا تحریک شده ..... ۷۴
- شکل ۲-۳۹: پالس محرک فرکانس طبیعی ..... ۷۵
- شکل ۲-۴۰: مدولاسیون فرکانسی ..... ۷۶
- شکل ۳-۱: نمودار تفرانس بالانس برای یک روتور صلب ..... ۸۲
- شکل ۳-۲: نمودار ارزیابی شدت نابالانسی خالص ..... ۸۳
- شکل ۳-۳: سیگنال زمانی و اسپکتروم فرکانسی مربوط به نابالانسی ..... ۹۲
- شکل ۳-۴: فرکانس دور به همراه فرکانس‌های نامطلوب ..... ۹۳
- شکل ۳-۵: خمیدگی شافت ..... ۹۴
- شکل ۳-۶: اسپکتروم فرکانسی و سیگنال زمانی مربوط به ناهم‌محوری ..... ۹۸

|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۷-۳: شیب 6 dB/Octav                                                                                 | ۹۸  |
| شکل ۸-۳: شیب 12 dB/Octav                                                                                | ۹۹  |
| شکل ۹-۳: $\Delta F$ برابر است با سرعت چرخشی حلقه داخلی بیرینگ نسبت به شافت                              | ۱۰۰ |
| شکل ۱۰-۳: اطلاعات مربوط به زمان راهاندازی موتور                                                         | ۱۰۱ |
| شکل ۱۱-۳: افزایش دامنه فرکانس دور در اثر لقی                                                            | ۱۰۳ |
| شکل ۱۲-۳: دامنه بعضی سیکل‌ها از برخی دیگر بلندتر است                                                    | ۱۰۳ |
| شکل ۱۳-۳: تولید همه فرکانس‌ها در یک باندپهن توسط ماشین                                                  | ۱۰۴ |
| شکل ۱۴-۳: فرکانس مرکزی مساوی با فرکانس طبیعی                                                            | ۱۰۵ |
| شکل ۱۵-۳: وجود دو پالس در هر دوره تناوب                                                                 | ۱۰۹ |
| شکل ۱۶-۳: هارمونیک‌های دوم، سوم، چهارم و پنجم با دامنه‌های بالاتر                                       | ۱۱۰ |
| شکل ۱۷-۳: سیگنال زمانی و اسپکتروگرام فرکانسی با میرایی مناسب                                            | ۱۱۰ |
| شکل ۱۸-۳: سیگنال زمانی و اسپکتروگرام فرکانسی بدون میرایی                                                | ۱۱۱ |
| شکل ۱۹-۳: سیگنال زمانی و اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به مشکل چرخش روغن                                    | ۱۱۳ |
| شکل ۲۰-۳: اطلاعات مربوط به یک موتور 3600 rpm                                                            | ۱۱۵ |
| شکل ۲۱-۳: یک پنجره ۲۰ هرتزی در اطراف فرکانس ۶۰ هرتز مربوط به یک موتور دارای مشکل خروج از مرکزی مغناطیسی | ۱۱۶ |
| شکل ۲۲-۳: یک پنجره ۲۰ هرتزی در اطراف فرکانس ۱۲۰ هرتز مربوط به یک موتور خروج از مرکزی مغناطیسی           | ۱۱۷ |
| شکل ۲۳-۳: اطلاعات مربوط به یک موتور با میله‌های شکسته                                                   | ۱۱۸ |
| شکل ۲۴-۳: یک پنجره ۴۰ هرتزی در اطراف فرکانس ۶۰ هرتز مربوط به یک موتور با میله‌های شکسته                 | ۱۱۹ |
| شکل ۲۵-۳: یک پنجره ۲۰ هرتزی در اطراف فرکانس ۱۲۰ هرتز مربوط به یک موتور با میله‌های شکسته                | ۱۱۹ |
| شکل ۲۶-۳: اطلاعات مربوط به یک موتور ۱۲۰۰ rpm با میله‌های شکسته                                          | ۱۲۰ |
| شکل ۲۷-۳: یک پنجره ۲۰ هرتزی در اطراف فرکانس ۲۰ هرتز مربوط به یک موتور با میله‌های شکسته                 | ۱۲۱ |

- شکل ۳-۲۸: یک پنجره ۴۰ هرتزی در اطراف هارمونیک دوم دور موتور با میله‌های شکسته ..... ۱۲۱
- شکل ۳-۲۹: سیگنال زمانی مربوط به یک موتور 1200 rpm با میله‌های شکسته ..... ۱۲۲
- شکل ۳-۳۰: تصویر یک روتور با میله‌های شکسته ..... ۱۲۳
- شکل ۳-۳۱: اطلاعات مربوط به یک موتور 1800 rpm با مشکل اتصال کوتاه در سیم‌پیچ‌های استاتور ..... ۱۲۳
- شکل ۳-۳۲: سیگنال زمانی مربوط به یک موتور 1800 rpm با مشکل اتصال کوتاه در سیم‌پیچ‌های استاتور ..... ۱۲۴
- شکل ۳-۳۳: اطلاعات مربوط به یک موتور سنکرون با عیب برقی ..... ۱۲۵
- شکل ۳-۳۴: یک موتور 1800 rpm با ۲۸ میله و تولید فرکانس حاصل از اثر Siren ..... ۱۲۶
- شکل ۳-۳۵: نمودار Coast down سرعت در حالت نابالانسی خالص ..... ۱۲۸
- شکل ۳-۳۶: نمودار Coast down جابجایی در حالت نابالانسی خالص ..... ۱۲۸
- شکل ۳-۳۷: نمودار Coast down شتاب در حالت نابالانسی خالص ..... ۱۲۹
- شکل ۳-۳۸: اطلاعات به دست آمده در راستای محوری از هوزینگ توربین ..... ۱۳۱
- شکل ۳-۳۹: اسپکتروگرام فرکانسی و سیگنال زمانی شامل نابالانسی و فرکانس گذر تیغه (vane) ..... ۱۳۲
- شکل ۳-۴۰: اطلاعات مربوط به یک پمپ با پنج تیغه ..... ۱۳۲
- شکل ۳-۴۱: نارسایی در پمپ زمانی که دامنه سرعت واحد پمپ بالا باشد ..... ۱۳۴
- شکل ۳-۴۲: اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به کاویتاسیون در پمپ ..... ۱۳۵
- شکل ۳-۴۳: تولید VPF توسط آب در یک پمپ خلاء ..... ۱۳۵
- شکل ۳-۴۴: هارمونیک فرکانس‌های تولید شده در یک کمپرسور ..... ۱۳۶
- شکل ۳-۴۵: سیگنال زمانی و اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به میدل فشار یک کمپرسور Screw ..... ۱۳۷
- شکل ۳-۴۶: اطلاعات Coast down/start up یک ماشین با دور بالای اولین سرعت بحرانی ..... ۱۴۱
- شکل ۳-۴۷: اطلاعات Coast down/start up مربوط به یک ماشین ناهم‌محور ..... ۱۴۱
- شکل ۳-۴۸: اطلاعات Coast down/start up یک ماشین با دور بالای اولین سرعت بحرانی و دارای مشکل خمش شافت ..... ۱۴۳
- شکل ۳-۴۹: ناهم‌محوری به همراه خمش شافت ..... ۱۴۳
- شکل ۳-۵۰: رکوردگیری صدا از سازه یک کمپرسور ..... ۱۴۶

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۱-۳: اسپکتروم فرکانسی و سیگنال زمانی مربوط به سه موج با سه فرکانس مختلف.....                     | ۱۴۸ |
| شکل ۲-۳: سیگنال‌ها بعد از چهار بار میانگین‌گیری.....                                                 | ۱۴۹ |
| شکل ۳-۳: سیگنال‌ها بعد از صد بار میانگین‌گیری.....                                                   | ۱۴۹ |
| شکل ۳-۴: حرکت نسبی اندازه‌گیری شده میان توربین و کوپلینگ.....                                        | ۱۵۲ |
| شکل ۳-۵: حرکت نسبی اندازه‌گیری شده میان هوزینگ موتور و شافت.....                                     | ۱۵۳ |
| شکل ۴-۱: (الف) نمای روبروی بیرینگ (ب) برش مقطعی بیرینگ.....                                          | ۱۵۷ |
| شکل ۴-۲: بیرینگ علامت‌گذاری شده پیش از یک دور چرخش حلقه داخلی.....                                   | ۱۶۵ |
| شکل ۴-۳: بیرینگ علامت‌گذاری شده پس از یک دور چرخش حلقه داخلی.....                                    | ۱۶۵ |
| شکل ۴-۴: خرابی حلقه خارجی در یک موتور الکتریکی 200 HP.....                                           | ۱۶۹ |
| شکل ۴-۵: تصویر مربوط به خرابی حلقه خارجی در یک موتور الکتریکی 200 HP.....                            | ۱۷۰ |
| شکل ۴-۶: اسپکتروم مربوط به خرابی حلقه داخلی در یک موتور الکتریکی 300 HP.....                         | ۱۷۲ |
| شکل ۴-۷: خرابی حلقه داخلی در بیرینگ یک موتور الکتریکی 300 HP.....                                    | ۱۷۲ |
| شکل ۴-۸: اسپکتروم فرکانسی و سیگنال زمانی مربوط به وجود ترک در حلقه داخلی.....                        | ۱۷۳ |
| شکل ۴-۹: اسپکتروم فرکانسی و سیگنال زمانی نشان دهنده فرکانس BPFI به واسطه وجود ترک در حلقه داخلی..... | ۱۷۵ |
| شکل ۴-۱۰: اسپکتروم فرکانسی مربوط به وجود خرابی در ساجمه‌های بیرینگ یک الکتروموتور.....               | ۱۷۹ |
| شکل ۴-۱۱: اسپکتروم فرکانسی و سیگنال زمانی مربوط به خرابی رولرها.....                                 | ۱۸۱ |
| شکل ۴-۱۲: فرکانس‌های مجموع و تفاضل مربوط به یک الکتروموتور با بیرینگ نوع ۶۳۱۳.....                   | ۱۸۴ |
| شکل ۴-۱۳: محاسبه زاویه نیروی محوری بر حسب BPFI.....                                                  | ۱۸۶ |
| شکل ۴-۱۴: تحلیل اسپکتروم خرابی بیرینگ مربوط به تاریخ (۱۹۷۹/۱۰/۲۶ تا ۱۹۷۹/۱۰/۱۷).....                 | ۱۸۷ |
| شکل ۴-۱۵: تحلیل اسپکتروم خرابی بیرینگ مربوط به تاریخ (۱۹۷۹/۱۰/۲۸ تا ۱۹۷۹/۱۰/۳۰).....                 | ۱۸۹ |
| شکل ۴-۱۶: وجود خرابی در حلقه داخلی بیرینگ.....                                                       | ۱۹۳ |
| شکل ۴-۱۷: سیگنال زمانی به وجود آمده ناشی از وجود خرابی.....                                          | ۱۹۳ |
| شکل ۴-۱۸: لقی بین حلقه داخلی و رولرها.....                                                           | ۱۹۵ |
| شکل ۴-۱۹: اسپکتروم فرکانسی مربوط به خرابی در حلقه داخلی.....                                         | ۱۹۷ |
| شکل ۴-۲۰: سیگنال زمانی شامل یک دور کامل.....                                                         | ۱۹۸ |

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۴-۲۱: پوسته پوسته شدن بیرینگ ناشی از خستگی زیاد.....                                                    | ۱۹۹ |
| شکل ۴-۲۲: پوسته‌ای شدن سطحی.....                                                                            | ۲۰۰ |
| شکل ۴-۲۳: فرکانس‌های تولید شده در اثر وجود دو خرابی.....                                                    | ۲۰۱ |
| شکل ۴-۲۴: برآیند سیگنال زمانی و تحلیل فوریه.....                                                            | ۲۰۱ |
| شکل ۴-۲۵: سیگنال زمانی و اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به پوسته‌ای شدن عمیق بیرینگ.....                         | ۲۰۳ |
| شکل ۴-۲۶: سیگنال زمانی و اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به پوسته‌ای شدن سطحی بیرینگ.....                         | ۲۰۳ |
| شکل ۴-۲۷: اسپکتروگرام مربوط به یک بیرینگ با خوردگی در حلقه داخلی و خارجی و یکی از ساچمه‌ها (۲۰۰۰ هرتز)..... | ۲۰۶ |
| شکل ۴-۲۸: اسپکتروگرام مربوط به یک بیرینگ با خوردگی در حلقه داخلی و خارجی و یکی از ساچمه‌ها (۱۰۰۰ هرتز)..... | ۲۰۶ |
| شکل ۴-۲۹: پدیده Fluting در بیرینگ انتهایی مربوط به یک موتور ۲۰۰۰ هرتز.....                                  | ۲۰۹ |
| شکل ۴-۳۰: پدیده Fluting، روانکاری ناقص بیرینگ سمت NDE.....                                                  | ۲۰۹ |
| شکل ۴-۳۱: اسپکتروگرام ارتعاشی بیرینگ بیش از روانکاری.....                                                   | ۲۱۱ |
| شکل ۴-۳۲: اسپکتروگرام ارتعاشی بیرینگ پس از روانکاری.....                                                    | ۲۱۳ |
| شکل ۴-۳۳: لقی داخلی شدید.....                                                                               | ۲۱۴ |
| شکل ۴-۳۴: اسپکتروگرام مربوط به یک بیرینگ با مشکل ساییدگی قفسه.....                                          | ۲۱۵ |
| شکل ۴-۳۵: اسپکتروگرام مربوط به یک بیرینگ با مشکل ساییدگی قفسه.....                                          | ۲۱۶ |
| شکل ۴-۳۶: $\Delta F$ معادل با سرعت چرخش بیرینگ نسبت به شافت.....                                            | ۲۱۸ |
| شکل ۴-۳۷: اطلاعات مربوط به یک موتور در حال راه‌اندازی.....                                                  | ۲۱۸ |
| شکل ۴-۳۸: اسپکتروگرام مربوط به لقی بیرینگ در هوزینگ در یک الکتروموتور.....                                  | ۲۱۹ |
| شکل ۴-۳۹: اسپکتروگرام مربوط به لقی بیرینگ در هوزینگ در یک الکتروموتور.....                                  | ۲۲۰ |
| شکل ۵-۱: نمودار پاسخ فرکانسی.....                                                                           | ۲۲۷ |
| شکل ۵-۲: برنامه خروجی یک چرخنده با تعداد دندان‌های پینیون ۲۵ و چرخنده‌ها ۱۱۵.....                           | ۲۳۷ |
| شکل ۵-۳: جعبه دنده کاهنده تک مرحله‌ای.....                                                                  | ۲۴۰ |
| شکل ۵-۴: اسپکتروگرام فرکانسی با 1/5 GMF.....                                                                | ۲۴۲ |
| شکل ۵-۵: اسپکتروگرام فرکانسی 1/5 GMF.....                                                                   | ۲۴۳ |

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۵-۶: سیگنال زمانی فرکانس 1/5 GM                                         | ۲۴۴ |
| شکل ۵-۷: سیگنال زمانی با وضوح بالا                                          | ۲۴۵ |
| شکل ۵-۸: پیکربندی چرخنده‌های یک ماشین تولید کاغذ                            | ۲۴۶ |
| شکل ۵-۹: فرکانس‌های تولید شده توسط یک چرخنده ۹۶ و ۵۲ دندانه                 | ۲۴۸ |
| شکل ۵-۱۰: اسپکتروگرام فرکانسی با 1/4 GMF و 1/2 GMF                          | ۲۴۹ |
| شکل ۵-۱۱: اسپکتروگرام فرکانسی پس از اعمال یک پنجره ۲۰ هرتزی                 | ۲۵۰ |
| شکل ۵-۱۲: سیگنال زمانی مربوط به یک چهارم و یک دوم GMF                       | ۲۵۱ |
| شکل ۵-۱۳: خروجی نرم‌افزار چرخنده‌ها برای چرخنده dryer و هرزگرد              | ۲۵۴ |
| شکل ۵-۱۴: اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به چرخنده هرزگرد                        | ۲۵۵ |
| شکل ۵-۱۵: اسپکتروگرام فرکانسی پس از اعمال یک پنجره ۴۰ هرتزی اطراف فرکانس GM | ۲۵۶ |
| شکل ۵-۱۶: سیگنال زمانی مربوط به چرخنده هرزگرد                               | ۲۵۷ |
| شکل ۵-۱۷: سیگنال زمانی گسترش یافته مربوط به چرخنده هرزگرد                   | ۲۵۸ |
| شکل ۵-۱۸: چرخنده پره‌دار Spoke                                              | ۲۵۹ |
| شکل ۵-۱۹: اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به چرخنده Dryer                         | ۲۶۱ |
| شکل ۵-۲۰: سیگنال زمانی مربوط به چرخنده Dryer                                | ۲۶۲ |
| شکل ۵-۲۱: سیگنال زمانی باز شده                                              | ۲۶۲ |
| شکل ۵-۲۲: خروجی نرم‌افزار چرخنده‌ها برای چرخنده Dryer و هرزگرد              | ۲۶۳ |
| شکل ۵-۲۳: اسپکتروگرام فرکانسی Dryer                                         | ۲۶۴ |
| شکل ۵-۲۴: اسپکتروگرام فرکانسی هرزگرد                                        | ۲۶۵ |
| شکل ۵-۲۵: اسپکتروگرام فرکانسی چرخنده Dryer                                  | ۲۶۵ |
| شکل ۵-۲۶: اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به سایش شدید چرخنده                     | ۲۶۷ |
| شکل ۵-۲۷: الگوی سایش در چرخنده ناهم‌محور                                    | ۲۶۹ |
| شکل ۵-۲۸: اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به چرخنده ناهم‌محور                     | ۲۶۹ |
| شکل ۵-۲۹: خروجی نرم‌افزار چرخنده‌ها برای چرخنده هرزگرد و Dryer              | ۲۷۰ |
| شکل ۵-۳۰: اسپکتروگرام فرکانسی مربوط به چرخنده هرزگرد                        | ۲۷۱ |
| شکل ۵-۳۱: پنجره ۴۰ هرتزی اطراف فرکانس GM                                    | ۲۷۲ |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۵-۳۲: پنجره ۴۰ هرتزی اطراف فرکانس دو برابر GM               | ۲۷۳ |
| شکل ۵-۳۳: سیگنال زمانی مربوط به فرکانس یک و دو برابر GM         | ۲۷۴ |
| شکل ۵-۳۴: شکل پالس‌های معمول در سیگنال زمانی و اسپکترام فرکانسی | ۲۷۷ |
| شکل ۵-۳۵: پالس‌های متعدد و اسپکترام فرکانسی                     | ۲۷۸ |
| شکل ۵-۳۶: پینیون جک شافت و آرایش چرخنده Girth                   | ۲۸۰ |
| شکل ۵-۳۷: اسپکترام فرکانسی مربوط به بیرینگ جک شافت              | ۲۸۱ |
| شکل ۵-۳۸: سیگنال زمانی مربوط به بیرینگ جک شافت                  | ۲۸۲ |
| شکل ۵-۳۹: جعبه دنده کاهنده تک مرحله‌ای                          | ۲۸۳ |
| شکل ۵-۴۰: خروجی برنامه چرخنده‌ها برای یک گیربکس                 | ۲۸۳ |
| شکل ۵-۴۱: اسپکترام فرکانسی مربوط به یک شافت با سرعت کم          | ۲۸۴ |
| شکل ۵-۴۲: اسپکترام فرکانسی مربوط به یک شافت با سرعت بالا        | ۲۸۵ |
| شکل ۵-۴۳: دندانه شکسته یک پینیون                                | ۲۸۶ |
| شکل ۵-۴۴: دندانه شکسته یک چرخنده                                | ۲۸۶ |
| شکل ۵-۴۵: برجستگی روی چرخنده                                    | ۲۸۷ |

## فهرست جدول‌ها

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول ۱-۱: مقادیر وضعیت در شرایط استاتیک                                  | ۱۸  |
| جدول ۲-۱: مقایسه پارامترهای الکتریکی و مکانیکی                           | ۲۶  |
| جدول ۳-۱: مقایسه روابط الکتریکی و مکانیکی                                | ۲۶  |
| جدول ۱-۲: مقادیر دامنه هر هارمونیک                                       | ۵۸  |
| جدول ۱-۳: استاندارد تنظیم شده بر اساس محدوده ارتعاشات مرتبط با دور ماشین | ۸۵  |
| جدول ۱-۵: درصد مورد انتظار عمر چرخنده‌ها                                 | ۲۲۳ |
| جدول ۲-۵: عدد کیفیت پیشنهادی AGMA متناسب با سرعت گام چرخنده              | ۲۳۸ |
| جدول ۳-۵: ارزیابی نسبت چرخنده‌ها                                         | ۲۴۰ |
| جدول ۴-۵: تعیین نسبت چرخنده‌های یک ماشین تولید کاغذ                      | ۲۴۷ |
| جدول ۵-۵: اطلاعات مربوط به نرم‌افزار چرخنده‌ها                           | ۲۴۸ |
| جدول ۶-۵: بازه‌های زمانی مربوط به فرکانس‌های کسری GMF                    | ۲۵۲ |

## پیشگفتار مترجمین

در سال‌های اخیر مباحث مربوط به مراقبت وضعیت ماشین‌های دوار بیش از پیش مورد توجه مدیران و متخصصین کارخانجات و حتی دانشگاه‌ها قرار گرفته است. در این زمینه تکنیک‌های متعدد و متنوعی وجود دارد که به کمک هر کدام می‌توان عیب و یا مجموعه‌ای از عیوب را در ماشین‌آلات تشخیص داد. تکنیک ارزشمند و توانمند تحلیل ارتعاشات به عنوان یکی از این راهکارها و ابزارها به شمار می‌رود. اگرچه ورود این مقوله به کشور با تأخیر انجام گرفت و در آغاز راه تنها در صنایع نفت بکار گرفته شد ولی پیشرفت و نفوذ آن در صنایع مختلف از جمله فولاد، نیروگاهی و سیمان در چند سال گذشته چشمگیر بوده است. این موضوع بیانگر درک اهمیت مقوله پایش وضعیت توسط کاربران و تأثیر مستقیم این علم بر کاهش هزینه‌هاست. با این وجود هنوز مطالب و کتب فارسی موجود در این زمینه و نیز در زمینه تکنیک‌های دیگر مراقبت وضعیت محدود بوده همی مضاعف را می‌طلبد تا بتوان فاصله موجود تا اهداف نهایی این دانش را کاهش داد و با پیشرفت‌های جهانی همگام شد.

کتاب حاضر ترجمه کتاب ارزشمند هندبوک آنالیز ارتعاشات نوشته جیمز تیلور است که سالیان پیش توسط ایشان به تحریر در آمده است. اگر چه این کتاب مربوط به سالیان پیش است ولی مطالب یاد شده در آن بسیار ارزشمند و کاربردی می‌باشد. از این رو به متخصصین و مهندسین درگیر با مقوله تحلیل ارتعاشات توصیه اکید می‌شود که مطالب این کتاب را به دقت مطالعه نموده کاربرد آنرا در عمل مشاهده نمایند. امید است با نظرات و پیشنهادات سازنده خوانندگان محترم بتوانیم مشکلات موجود در این کتاب را مرتفع نموده و نسبت به تکمیل مطالب آن گام‌های بعدی را موثرتر برداریم.

حمید کریمی

خلیل‌الله سیاوشی