

# اندازه‌گیری پیچش استاتیکی و دینامیکی محورها - کاربرد ویژه در پایش ارتعاشات پیچشی

محمد سماواتیان<sup>۱</sup>، مجید رجبی<sup>۲</sup>، سید مهدی دربندی<sup>۳</sup>، مهدی بهزاد<sup>۴\*</sup>، مهدی الوندی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، سازه کشتی، دانشگاه صنعتی شریف؛ m.samavatian87@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ majid Rajabi\_iust@yahoo.com

<sup>۳</sup> دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ s.m.darbandi@gmail.com

<sup>۴</sup> استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ m\_bezhad@sharif.edu

<sup>۵</sup> دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف؛ alvandi1365@yahoo.com

## چکیده

یکی از روش‌های مرسوم اندازه‌گیری پیچش در محورها، استفاده از کرنش‌سنج‌های متصل بر روی محور مورد نظر با جهت گیری معین می‌باشد. مهمترین معضل استفاده از این روش به منظور پایش برشط و دائمی ارتعاشات پیچشی و یا اندازه‌گیری لحظه‌ای تغییرات گستاور در مجموعه‌ی دورا، فرایند انتقال سیگنال‌های (تغییرات ولتاژ) به وجود آمده در اثر پیچش می‌باشد. در این مقاله، یک روش ساده، عملی و قابل اجرا، مبتنی بر استفاده از سیالی با قابلیت هادی جریان الکتریکی، محصور شده مابین یک روتور متصل به محور دورا و یک استاتور خارجی، به منظور اصلاح فرایند انتقال سیگنال‌های (تغییرات ولتاژ) ایجادی در کرنش‌سنج، ارائه می‌گردد. در این روش، نیازی به اتصال منبع تقدیمی بر روی محور دورا به منظور تأمین جریان مورد نیاز تجهیزات اندازه‌گیری نبوده و ولتاژ تغذیه و سیگنال اندازه‌گیری شده از طریق سیال هادی منتقل می‌گردد. سادگی در طراحی، عدم نیاز به اتصال منبع تقدیمی بر روی محور، عدم حساسیت به ارتعاشات خمشی و بالا بودن نسبت سیگنال به نویز، این روش اصلاحی را برای اندازه‌گیری ارتعاشات پیچشی کاندید می‌نماید. کارایی روش پیشنهاد شده در دو حالت ایستا (بارگذاری استاتیکی) و دینامیک (ارتعاشات آزاد) بر روی یک چیدمان آزمایشگاهی مورد ارزیابی واقع شده است. همچنین، عملکرد تجهیز در شرایط دور نیز بررسی گردیده است.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱

کلمات کلیدی:

اندازه‌گیری ارتعاشات پیچشی

نسبت سیگنال به نویز

انتقال سیگنال

الکتروولیز

## Introducing a Novel Method for Measurement of Stationary and Dynamic Torsion in Shafts – With Application to Monitoring of Torsional Vibration

Mohammad Samavatian<sup>1</sup>, Majid Rajabi<sup>2</sup>, Seied Mehdi Darbandi<sup>3</sup>, Mehdi Behzad<sup>4\*</sup>, Mehdi Alvandi

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, m.samavatian87@gmail.com

<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, majid\_rajabi\_iust@yahoo.com

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, s.m.darbandi@gmail.com

<sup>4</sup> Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, m\_bezhad@sharif.edu

<sup>5</sup> Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, alvandi1365@yahoo.com

## ARTICLE INFO

### Article History:

Received: 9 Jul. 2015

Accepted: 21 Aug. 2016

### Keywords:

Measurement torsional vibration

Signal to noise ratio

Signal transmission

Electrolysis

## ABSTRACT

Strain gage mounted on the surface of the shafts with specified directions are one of the common methods for measurement of the torsion in shafts. The most critical problem in utilization of this method, particularly in the online monitoring of torsional vibration and instantaneous torque in rotary systems, is due to its signal transfer process. In this paper, a simple, practical and feasible method is introduced based on the usage of an unionized fluid medium with adequate electrical conductivity, encapsulated in a cylindrical connector aligned along the shaft, with a rotating chamber (rotor part) and a stationary one (stator part). In this method, there is no need for installation of the power supply on the shaft and both of the supply voltage and the generated electrical signals are transferred via the unionized fluid. Simplicity in design and high signal to noise ratio, may candidate this method for torsional vibration measurement. The efficiency of the measurement system is examined on a test setup, for static and dynamic (transient) torsions. Moreover, the applicability of the device is observed on a rotating shaft.

## ۱- مقدمه

در روش نیمه تماسی، از کانکتورهایی حاوی سیالی رسانا از جنس فلزات مایع همچون جیوه و برم مابین محور و استاتور تعییه شده به موازات محور دور استفاده می‌گردد<sup>[۵]</sup>. فلز مایع و رسانا، به سادگی و با نسبت بسیار بالای سیگنال به نویز، سیگنال‌های الکتریکی را از کرنش‌سنجد به پردازنده‌ی بیرونی انتقال می‌دهد. مهمترین محدودیت ناشی از سمی بودن، چگالی بالا، و دمای جوش پایین آنها می‌باشد. در بین فلزات رسانا، تنها جیوه و برم در دمای اتاق در فاز مایع هستند. جیوه با توجه به محدودیت‌های زیادی که دارد از جمله هزینه بسیار بالای آن و همچنین سمی بودن، عملاً امکان استفاده از آن وجود ندارد. همچنین برم نیز به دلیل سمی بودن و پایین بودن دمای جوش آن (۵۸ درجه سانتیگراد)، برای کاربردهای صنعتی مناسب نمی‌باشد.

در روش‌های غیر تماسی، زایلر و همکاران<sup>[۶]</sup>، سیستم اندازه‌گیری گشتاور پیچشی را برای ستون فرمان اتومبیل طراحی و ساختند. در این سیستم، برای اندازه‌گیری گشتاور پیچشی از کرنش‌سنجد استفاده شده است. همچنین برای انتقال سیگنال از روتور به استاتور و انتقال توان الکتریکی از استاتور به روتور، از روش القای ولتاژ در دو سیم‌پیچ جفت شده استفاده کردند. دافمن و موروسلاو<sup>[۷]</sup>، به اندازه‌گیری ارتعاشات پیچشی روتور توربین با وجود ترک در ریشه‌ی پره‌های توربین پرداختند. در این مقاله، جهت پایش ارتعاشات پیچشی توربین از مبدل‌های مغناطیسی مرتبط با نوک دنده چرخ‌دنده‌ها استفاده شده است. لینگ و همکاران<sup>[۸]</sup>، ارتعاشات پیچشی توربو-زنراتور که به دلیل ضربات الکتریکی شبکه توزیع برق ایجاد می‌شود را توسط ارتعاش‌سنجد پیچشی لیزری اندازه‌گیری کردند. همچنین نشان داده شده است که این روش، در عین آسانی اجرا، قابلیت کالیبره شدن در همان محل اندازه‌گیری را نیز دارد. از دیگر تکنیک‌های مورد استفاده در این حوزه، روش ترانسفورمر دور<sup>[۹]</sup>، سیستم اندازه‌گیری از راه دور<sup>[۱۰]</sup>، پیچش‌سنجد<sup>[۱۱]</sup>، سنسورهای مجاورتی<sup>[۱۲]</sup>، ارتعاش‌سنجد لیزری<sup>[۱۳]</sup>، اندازه‌گیری ارتعاشات پیچشی القایی<sup>[۱۴]</sup> و اندازه‌گیری جریان و ولتاژ موتورهای دور<sup>[۱۵]</sup> را می‌توان نام برد. در این بین، استفاده از روش ترانسفورمرهای دور، تا محدوده‌ی سرعت‌های بالاتری در قیاس با رینگ‌های لغزشی، امكان پذیر است و در عین حال، بسیار دقیق‌تر نیز می‌باشد. مشکل اساسی این سیستم‌ها، ظرفیت تحمل بسیار پایین آنها در مقابله با بارگذاری‌های خمثی و محوری می‌باشد. به علاوه، این سیستم‌ها نیازمند تمامین جریان متناوب می‌باشند<sup>[۳]</sup>.

بسیار روش‌های غیر تماسی دیگر همچون استفاده از لیزر یا سیستم‌های تلمتری، از ضروریت استفاده از تجهیزات جانبی زیاد و نسبتاً گران قیمت رنج می‌برند. همچنین، حساسیت و تاثیرپذیری از

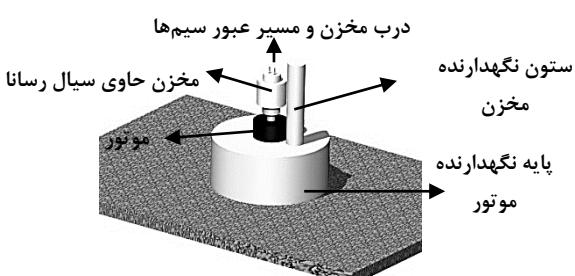
وقوع پیچش علی الخصوص به صورت ارتعاشات در محورهای دور، به عنوان یکی از عوامل واماندگی در روتور، جعبه دنده و غیره شاخته می‌شود. ارتعاشات پیچشی در اثر تغییر در سرعت دوران و یا تغییر در بار (گشتاور) مورد تحمل توسط محور به دلایل گوناگونی همچون نوسانات فشار گاز احتراق یافته‌ی درون سیلندر، نوسانات فشار گاز بر روی پره‌های کمپرسور، عدم یکنواختی ورودی هوای کمپرسور، خرابی جعبه دنده‌ها، وجود درایورهای فرکانس متغیر و غیره ایجاد می‌گردد<sup>[۱]</sup>. اندازه‌گیری ارتعاشات پیچشی برخلاف سایر مولفه‌های ارتعاشی همچون خمثی و محوری، نیازمند ملاحظات، تمهدیات و تجهیزات پیچیده تری می‌باشد. در این بین، استفاده از کرنش‌سنجد متصل بر روی محور، برای اندازه‌گیری کرنش برشی و همچنین، ارتباط آن با گشتاور وارد، به عنوان روشی ارزان، قابل اتکا و اطمینان مطرح می‌باشد. اما، آنچه استفاده از این روش را با محدودیت مواجه می‌سازد، نحوه انتقال سیگنال‌های الکتریکی به وجود آمده در کرنش‌سنجد به خصوص در تجهیزات دور می‌باشد. مطالعات مختلف انجام شده در زمینه‌ی اندازه‌گیری پیچش در محورها (خواه از نوع دینامیکی و خواه از نوع استاتیکی) با استفاده از کرنش‌سنجد، نشانگر استفاده از سه طرح کلی تماسی، نیمه تماسی و غیر تماسی به منظور انتقال سیگنال‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

عمده فعالیت‌های مرتبط با روش‌های تماسی، مبتنی بر استفاده از زغال یا جاروبک می‌باشد. به عنوان مثال، موفتاه و هریس<sup>[۲]</sup>، توان ورودی یک سیستم دور را با اندازه‌گیری گشتاور پیچشی توسط کرنش‌سنجد و اندازه‌گیری دور توسط تاکومتر استخراج نمودند به طوری که برای انتقال سیگنال ارتعاشات پیچشی از محور به استاتور، از رینگ لغزشی<sup>[۱]</sup> که مبتنی بر انتقال جریان الکتریسیته از طریق زغال است، استفاده نمودند. این روش، یک روش کاملاً اقتصادی برای کاربردهای صنعتی و در سرعت‌های متوسط (حداکثر ۶۰۰۰ دور بر دقیقه<sup>[۳]</sup>) محسوب می‌گردد. اما در سرعت‌های بالاتر، به شدت نسبت سیگنال به نویز کاهش می‌یابد که در نتیجه‌ی خوردگی زغال و تغییرات مقاومت آن‌ها در حین انتقال اطلاعات، می‌باشد<sup>[۴]</sup>. سایش رینگ‌ها و غبارهای تولیدی توسط زغال‌ها می‌توانند به سرعت جلوی انتقال سیگنال را بگیرند و این مستلزم این است که به صورت منظم و همیشگی، رینگ‌ها و زغال‌ها را تمیز نمود<sup>[۳]</sup>. همچنین گرمایی به وجود آمده در محل سایش و اتصال رینگ لغزشی و زغال‌ها، تاثیر قابل توجهی در مقادیر اندازه‌گیری شده دارند.

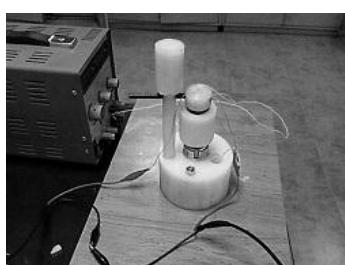
پایداری حرارتی تا دمای  $260^{\circ}\text{C}$  و دمای ذوب  $340^{\circ}\text{C}$  می‌باشد و همراه با محور دوار می‌چرخد. رویه بیرونی از جنس تفلون<sup>۸</sup> انتخاب گردیده است. انتخاب تفلون، به سبب عدم واکنش با سیال الکترولیت صورت گرفته شده است. رویه بیرونی، ثابت گردیده و نقش یک استاتور را ایفا می‌نماید. هر دو رویه و در حقیقت کانکتور<sup>۹</sup>، به صورت هم‌مرکز<sup>۱۰</sup> با محور دوار طراحی می‌گردند. محور دوار به یک موتور الکتریکی ۲۰ وات متصل می‌باشد. محفظه فوق‌الذکر، دارای دو شیار آب‌بند شده به منظور عبور سیم‌های عبور جریان الکتریکی ورودی و خروجی می‌باشد. شیارها به گونه‌ای تعییه شده اند تا سیم‌های انتقال دهنده‌ی سیگنال الکتریکی و دریافت کننده‌ی آن، به صورت معلق و روپوشی هم در سیال قرار گیرند. به منظور جلوگیری از واکنش شیمیایی سیم‌ها با محلول الکترولیت، از یک روکش گرافیتی استفاده می‌شود. شکل ۱، تصویری شماتیک را از چیدمان نمایش می‌دهد. مجموعه آزمایشی نهایی، در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد.

جدول ۱ - واکنش الکترولیز اسید سولفوریک

| فرمول شیمیایی  | مشخصات واکنش          |
|--|-----------------------|
| $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq})$   | الکترولیت             |
| $\text{H}_2$   | محصول کاتد منفی       |
| $2\text{H}^{+}(\text{aq}) + 2\text{e}^{-} \Rightarrow \text{H}_2(\text{g})$                                  | واکنش در الکترود منفی |
| $\text{O}_2(\text{g})$   | محصول آند مثبت        |
| $4\text{OH}^{-(\text{aq})} \Rightarrow 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g}) + 4\text{e}^{-}$ | واکنش در الکترود مثبت |



شکل ۱ - طرح شماتیک بررسی قابلیت عبور سیگنال الکتریکی از سیال در حالت دوار



شکل ۲ - مجموعه‌ی کانکتور حاوی سیال و سیم‌های انتقال جریان

سایر مولفه‌های ارتعاشی (ارتعاشات خمسی و محوری) نیز بعضی از روش‌های فوق الذکر را همچون اندازه‌گیری جریان و ولتاژ موتور یا روش ارتعاشات پیچشی القایی، با محدودیت روبرو می‌سازد.

لذا در این پژوهش، یک روش ابتکاری مبتنی بر استفاده از یک سیال واسط یونیزه شده (الکترولیت) برای انتقال سیگنال‌های الکتریکی به وجود آمده بر روی کرنش‌سنجد متصل بر روی محور دوار، به منظور استخراج رفتار ارتعاشی پیچشی محور دوار معرفی می‌گردد تا علاوه بر عدم نیاز به وجود منبع تعذیبی بر روی سیستم دوار، از ایجاد نویز ناشی از مصرف ماده‌ی واسط انتقال سیگنال، جلوگیری شود. برای بررسی کارایی روش طراحی شده، یک سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است و با انجام مجموعه‌ای از تست‌های استاتیکی و دینامیکی، عملکرد سیستم طراحی شده مورد سنجش واقع شده است. سیستم پیشنهادی علاوه بر بررسی نحوه تغییرات کرنش برشی، می‌تواند به عنوان سیستم اندازه‌گیری و پایش گشتاور وارد بر محور استفاده گردد.

## ۲- بررسی قابلیت انتقال سیگنال الکتریکی توسط سیال یونیزه شده‌ی دوار

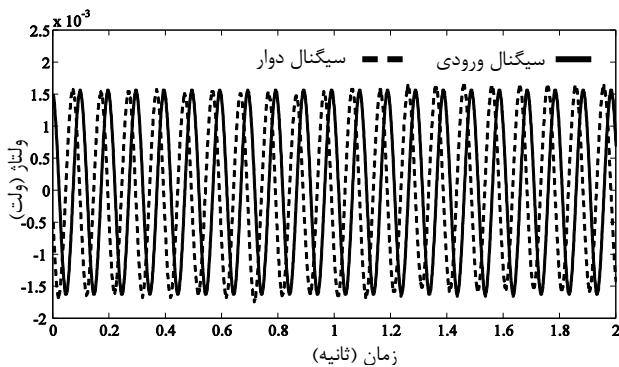
### ۲-۱- یونیزاسیون سیال واسط

همانطوری که بیان گردید، ایده اصلی انتقال سیگنال‌های الکتریکی ایجاد شده بر روی مدار کرنش‌سنجد، استفاده از یک سیال واسط یونیزه شده می‌باشد که درون یک محفظه‌ی استوانه‌ای قرار می‌گیرد. سیال یونیزه شده، به دلیل وجود فراوان یون‌های الکتریکی آزاد، قابلیت انتقال سیگنال الکتریکی را خواهد داشت. ماهیت سیال گونه‌ی ماده‌ی واسط، موجبات عدم بروز تنش برشی و در نتیجه، عدم بروز سایش می‌گردد. همچنین، قیمت بسیار پایین سیالات الکترولیت، رسانایی قابل توجه و بی‌خطری بسیاری از آنها برای سلامتی کاربران و تجهیزات، بر مزیت‌های آنها می‌افزاید.

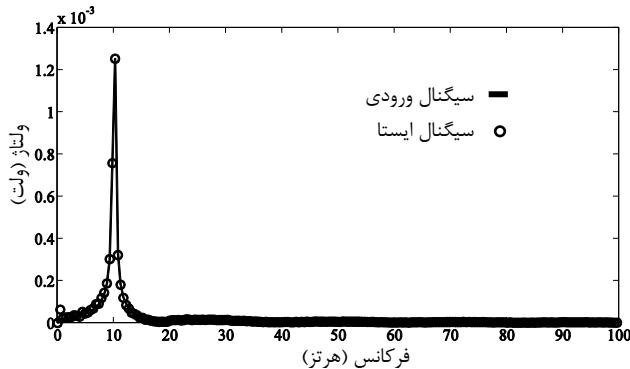
در پژوهش حاضر، از اسید سولفوریک به دلیل قابلیت هدایت الکتریکی بسیار بالا [۱۵] و از طرفی، امکان رقیق سازی آن برای افزایش اینمی مصرف، استفاده می‌گردد. واکنش الکترولیز صورت گرفته شده در آند و کاتد و محصولات یونی ایجادی در مواجه با آب، مطابق جدول ۱ می‌باشد.

### ۲-۲ - امکان سنجی انتقال سیگنال‌های الکتریکی در حالت دوار

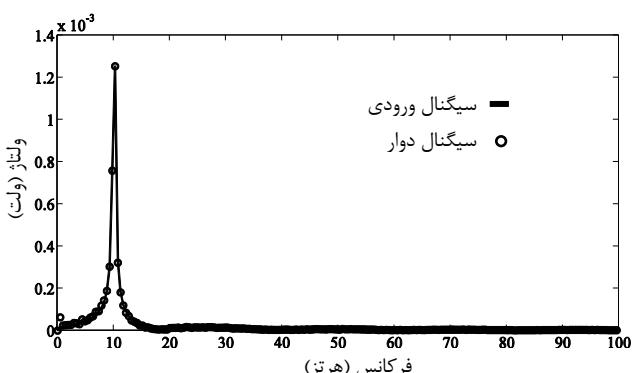
ابتدا سیستمی جهت بررسی نحوه و کیفیت انتقال سیگنال‌های الکتریکی از محیط سیال یونیزه شده در حالت دوار، طراحی و ساخته شده است. در این تجهیز آزمایشگاهی، سیال درون یک محفظه استوانه‌ای قرار می‌گیرد. محفظه<sup>۷</sup> مذکور، دارای دو رویه درونی و بیرونی می‌باشد که رویه‌ی درونی از جنس PTFE با



شکل ۴ - تابعیت زمانی سیگنال ورودی و خروجی حالت دور



شکل ۵ - طیف فرکانسی سیگنال خروجی از سیال و سیگنال اصلی تولید شده از دستگاه مولد سیگنال - حالت ایستا



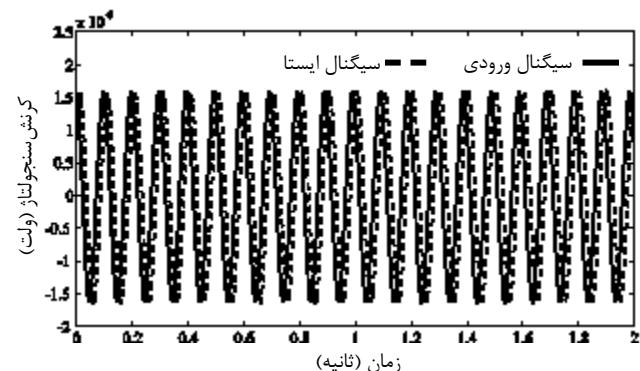
شکل ۶ - طیف فرکانسی سیگنال خروجی از سیال و سیگنال اصلی تولید شده از دستگاه مولد سیگنال - حالت دور

جدول ۲ - مقادیر rms و فرکانس سیگنال‌های ورودی به سیال و خروجی از سیال در دو حالت ساکن و دور

| جذر میانگین مریع‌ها | سیگنال اصلی | سیگنال حالت ایستا | سیگنال حالت دور                  |
|---------------------|-------------|-------------------|----------------------------------|
| ۰/۰۰۱۱۱۵۶           | ۰/۰۰۱۱۱۵۴   | ۰/۰۰۱۱۱۰۴         | جذر میانگین مریع‌ها              |
| ۰/۱۰۷               | ۰/۴۴۵       | ---               | درصد خطأ جذر میانگین مریع‌ها (%) |

برای تولید سیگنال مرجع (ورودی) با ولتاژ پایین و کیفیت بالا (بدون نویز)، از دستگاه مولد سیگنال<sup>۱۱</sup> ساخت شرکت الکترونیک افزار آزمایش استفاده شده است. یک دستگاه منبع تغذیه، برای تأمین توان مورد نیاز موتور و برای نمایش سیگنال عوری از سیال، از دستگاه اسیلوسکوپ<sup>۱۲</sup> استفاده شده است. برای ذخیره و نمایش سیگنال عوری، از دستگاه پرتابل داده‌برداری<sup>۱۳</sup> ساخت شرکت ادونتک<sup>۱۴</sup> استفاده شده است. پردازش سیگنال و استخراج پاسخ فرکانسی<sup>۱۵</sup> نیز در نرم افزار متلب انجام گرفته شده است. سیال مورد استفاده، اسید سولفوریک رقیق شده می‌باشد. اندازه‌گیری‌ها در دو حالت ایستا و دور انجام شده است. سیگنال ورودی، موجی سینوسی با فرکانس ۱۰.۲۵ هرتز و ولتاژ حدود ۱.۵ میلی ولت می‌باشد.

پاسخ زمانی سیگنال ورودی و سیگنال مورد اندازه‌گیری، در دو حالت سیال ساکن و دور، به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود. اختلاف فاز مشاهده شده در این سیگنال‌ها، به دلیل اختلاف در شروع زمان اندازه‌گیری سیگنال آنالوگ ولتاژ است. همچنین، پاسخ‌های فرکانسی مورد نظر نیز به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌شود، تابعیت قابل قبولی مابین سیگنال‌های الکتریکی ورودی و خروجی وجود دارد. به علاوه، با توجه به امکان اختلاف انرژی سیگنال، مقادیر جذر میانگین مریع‌های<sup>۱۶</sup> سیگنال‌های مذکور که نشان‌دهنده انرژی سیگنال می‌باشد، محاسبه گردیده و در جدول ۲ آورده شده‌اند. اتفاق بسیار ناچیز در فرایند عبور سیگنال‌ها نیز جالب توجه بوده و نوید بخش قابلیت اجرایی سازی ایده موردنظر در این پژوهش می‌باشد. همچنین مقدار SNR (نسبت سیگنال به نویز) برای نمودار شکل ۴ برابر ۳۹.۱۸۱۲ dB بدست آمد که نشان‌دهنده نویز پایین ترانسفورمر دور با دامنه ۱.۵ mV با سیال الکترولیت می‌باشد (قدرت حدود ۱۰۰ RMS سیگنال نسبت به RMS نویز سیگنال در دامنه ولتاژ ۱.۵ mV).



شکل ۳ - تابعیت زمانی سیگنال ورودی و خروجی - حالت ایستا

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = \frac{k}{4} S_s \epsilon, \quad (3)$$

در رابطه (۳)، نسبت تناسب  $S_s = \alpha_R(1 - 2\nu) + (1 + 2\nu)$  با  $\nu$  به عنوان ثابت ماده و  $\nu$  به عنوان ثابت پواسون استخراج می‌گردد. لذا، با ترکیب روابط (۲) و (۳) نسبت تغییرات ولتاژ کرنش سنج به کرنش ایجادی در آن به صورت رابطه ۴ خلاصه می‌گردد.

$$\frac{\delta V_0}{V_{ref}} = \left(\frac{k}{4} S_s\right) \epsilon, \quad (4)$$

از طرفی، برای گشتاور و کرنش برشی بیشینه اعمالی بر سطح محور، روابط (۵) و (۶) استخراج می‌گردد.

$$T = \frac{8G(1+\nu)J}{kS_s r} \frac{\delta v_0}{v_{ref}}, \quad (5)$$

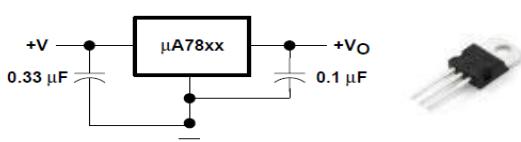
$$\gamma_{max} = \frac{16G(1+\nu)^2}{EkS_s} \frac{\delta v_0}{v_{ref}}. \quad (6)$$

### ۳-۳- مدار الکترونیکی کرنش سنج : ولتاژ تغذیه‌ی مرتع، یکنواخت کننده<sup>۲۲</sup> و تقویت کننده<sup>۲۳</sup>

به منظور تامین تحریک پل وتسون معمولاً از یک ولتاژ ثابت استفاده می‌شود. استانداردی برای سطح ولتاژی مورد استفاده در کاربردهای مختلف وجود ندارد، ولی ولتاژ تحریک معمولاً بین ۳ تا ۱۰ ولت رایج است [۱۸]. ولتاژ زیاد هم باعث ایجاد گرمای زیاد در مدار می‌شود و مناسب نیست. در پژوهش حاضر، ولتاژ مرجع به میزان ۵ ولت انتخاب گردیده است.

با توجه به وجود نویزهای محیطی، استفاده از یک یکنواخت کننده برای تنظیم ولتاژ تغذیه و پایداری آن ضروری می‌باشد. لذا از یک یکنواخت کننده ولتاژ<sup>۲۴</sup> مطابق شکل ۸ استفاده شده است [۱۹]

خروجی ولتاژ کرنش سنج‌ها خیلی کم و گاه‌ها کمتر از ۱۰ mV/V (۱۰ میلی ولت) به ازای ۱ ولت تحریک پل) می‌باشد. بنابراین استفاده از یک آمپلی‌فایر برای تقویت نمودن سیگنال‌های خروجی در مدار کرنش سنج ضروری می‌باشد [۱۸]. بدین منظور، از یک تقویت کننده کم نویز<sup>۲۵</sup> استفاده گردید. این قطعه دارای دقت بالا و بهره‌ی قابل تنظیم است. این IC دارای ۸ پایه است و توان مصرفی آن نیز پایین است. مشخصات پایه‌های IC در شکل ۹ نشان داده شده است [۲۰].



شکل ۸ - یکنواخت کننده ولتاژ LM7805 [۱۸]

### ۳- پیکربندی مجموعه کرنش سنج، کانکتور انتقال دهنده سیگنال و سیستم داده برداری<sup>۱۷</sup>

۳-۱- انتخاب نوع کرنش سنج و نحوه‌ی آرایش بر روی محور کرنش سنج انتخابی، نیازمند حساسیت بالا، پایداری مدار الکترونیکی، رفتار خطی و پسماند کم می‌باشد. همچنین، حساسیت پایین به دما، اندازه فیزیکی و جرم کوچک از جمله ضروریات می‌باشد. بدین منظور، کرنش سنج مورد استفاده از نوع متال فویل<sup>۱۸</sup> و ماده‌ی تشکیل دهنده‌ی آن نیز از نوع پلیمید<sup>۱۹</sup> (به دلیل بیشترین مقدار حساسیت ممکن به کرنش اعمالی) انتخاب گردید. نحوه‌ی استقرار کرنش سنج بر روی محور نیز به منظور اندازه‌گیری کرنش‌های اصلی و ارتباط آنها با کرنش پیچشی، به صورت ۱ جفت دوتایی به صورت پشت و رو و با زوایای ۴۵ درجه نسبت به امتداد محور و بر اساس مدار پل وتسون<sup>۲۰</sup> طراحی گردیده است. این چیدمان به پل کامل<sup>۲۱</sup> شهرت دارد. شکل ۷ شماتیکی از نحوه چیدمان را نمایش می‌دهد. این نوع چیدمان، موجب حذف اثر تغییر شکل‌های خمشی و محوری و نیز تاثیر تغییرات دمای محیط بر روی ولتاژ خروجی کرنش سنج می‌گردد. نحوه‌ی اتصال کرنش سنج بر روی محور نیز با استفاده از چسب استاندارد مخصوص اتصال کرنش سنج بر روی فلز صورت می‌پذیرد. برای کاربردهای صنعتی، اتصالات دائمی ضرورت می‌یابد.

### ۲- گشتاور اعمالی، کرنش برشی و ولتاژ ایجادی

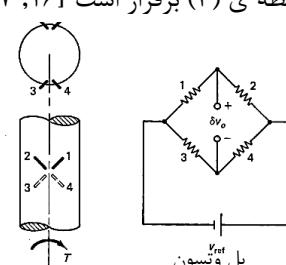
برای یک پل وتسون کامل، نسبت تغییرات ولتاژ دو سر مدار به ولتاژ مرجع (مطابق شکل ۷)، بر اساس رابطه (۱) توصیف می‌گردد [۱۶]

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = \frac{(R_2 \delta R_1 - R_1 \delta R_2)}{(R_1 + R_2)^2} - \frac{(R_4 \delta R_3 - R_3 \delta R_4)}{(R_3 + R_4)^2}. \quad (1)$$

برای حالت مورد استفاده در این پژوهش که تمامی مقاومت‌ها یکسان می‌باشد، این رابطه به صورت رابطه (۲) ساده می‌گردد

$$\frac{\delta v_0}{v_{ref}} = k \frac{\delta R}{4R}, \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $k$  مبین ثابت پل می‌باشد که برای پل وتسون مورد استفاده، برابر با ۴ می‌باشد. از طرفی، مابین تغییرات مقاومت الکتریکی بوجود آمده با کرنش اصلی اعمالی به هر المان کرنش سنج، رابطه (۳) برقرار است [۱۷، ۱۶]



شکل ۷ - تصویر شماتیک چیدمان کرنش سنج بر روی محور به صورت پل کامل



شکل ۱۲ - تصویر شماتیک نحوه‌ی قرار گیری آب بندها مابین محفظه‌های تفکیک شده‌ی بر روی محور دور



شکل ۱۳ - نحوه‌ی قرار گیری آب بندها بر روی محور دور

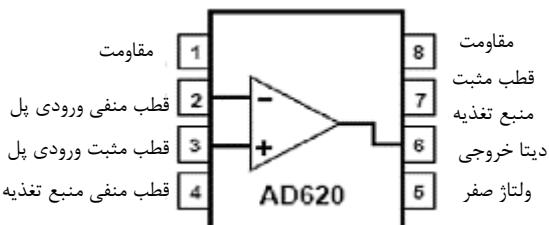
### ۶-۳- سیستم داده برداری

شکل ۱۴، تصویر شماتیک مجموعه‌ی کرنش‌سنج، کانکتور و سیستم داده برداری را نمایش می‌دهد. ابتدا تحریک ولتاژ از طریق محفظه‌ه انتقال سیگنال به روی شافت و پس از یکواخت شدن توسط رگولاتر به دو سر پل انتقال می‌یابد. اختلاف ولتاژ دو سر پل که در نتیجه‌ی بروز پیچش در محور ایجاد می‌گردد، از تقویت کننده عبور داده شده و توسط محفظه‌ه انتقال سیگنال به کارت داده برداری و مبدل سیگنال آنالوگ به دیجیتال آزمایش قبلی با نرخ داده برداری ۲۰ کیلو هرتز انتقال می‌یابد. سپس، سیگنال دیجیتال ایجادی، در نرم‌افزار لب ویو مورد پردازش قرار می‌گیرد. نمایی از برنامه‌ی پردازشی نوشته شده به منظور آنالیز فرکانسی با نرم‌افزار لب ویو، در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

### ۴- بررسی عملکرد مجموعه‌ی اندازه‌گیری

#### ۴-۱- عملکرد استاتیکی و کالیبراسیون

به منظور کالیبراسیون استاتیکی مجموعه‌ی اندازه‌گیری پیچشی، از یک سیستم مکانیکی شامل دو دیسک و یک عدد میله واسط استفاده می‌گردد که توسط یک موتور الکتریکی قادر به چرخش می‌باشد. شکل ۱۶ نحوه چیدمان مجموعه را نشان می‌دهد. همانطوری که دیده می‌شود، مجموعه کانکتور توسط دو عدد فنر از دو طرف بر روی قاب ثابت گردیده است.



شکل ۹ - نمای شماتیک پایه‌های AD620

### ۴-۳- کانکتور انتقال سیگنال الکتریکی

کانکتور انتقال سیگنال، شامل یک رویه خارجی از جنس تفلون و یک رویه داخلی از جنس PTFE می‌باشد. مجموعه این محفظه، دارای ۴ بخش مجزا می‌باشد که توسط آب بندها و واشرهای مناسب، از یکدیگر جدا می‌گردد. این محفظه‌ها، برای انتقال سیگنال‌های ولتاژ مرجع، ولتاژ خروجی کرنش‌سنج، ولتاژ مثبت و منفی IC استفاده می‌گردند. هر یک از این محفظه‌ها، از محلول الکترولیت شامل اسید سولفوریک رقیق شده اشباع شده است. رویه داخلی، به منظور جلوگیری از تماس مستقیم سیال الکترولیت با محور دور می‌باشد تا از بروز نویز اضافی ممانعت گردد. ارتباط سیم‌ها با محلول الکترولیت، به واسطه‌ی ورقه‌های مسی تعییه شده بر روی رویه‌های داخلی و خارجی انجام می‌گیرد. شکل ۱۰ رویه داخلی قرار گرفته شده بر روی محور دور مورد تست را به همراه ورقه‌های مسی اتصال دهنده نشان می‌دهد. به همین ترتیب، شکل ۱۱ نیز رویه خارجی را نمایش می‌دهد.

### ۵- آب بندی کانکتور

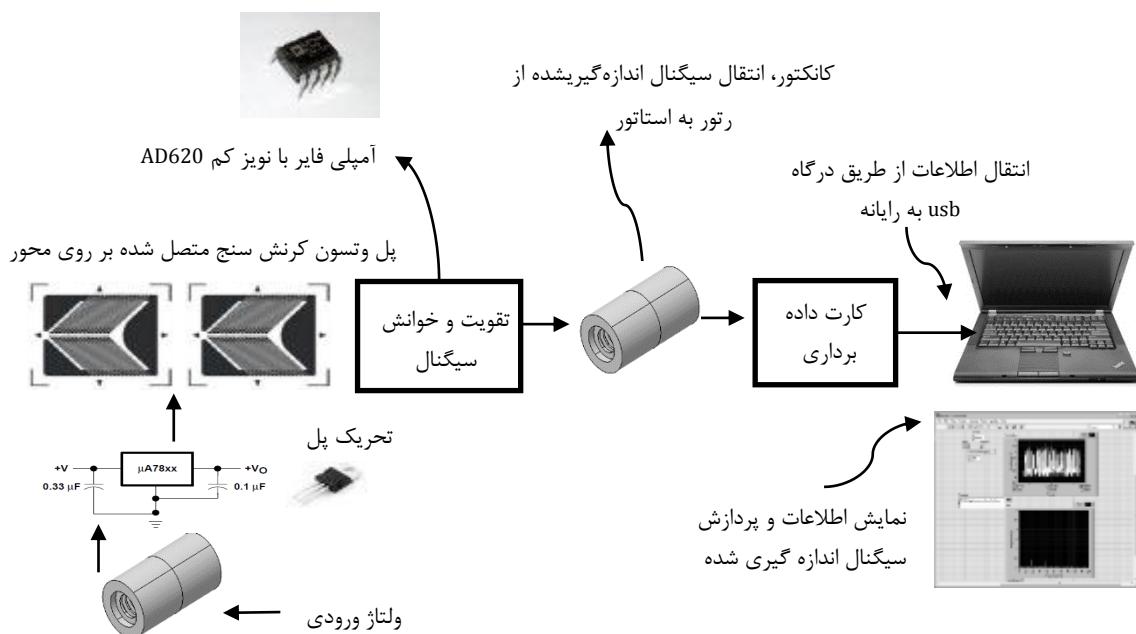
برای آب بندی مکانیکی مجموعه کانکتور، از کاسه‌نمد نوع کلیپر استفاده شده است [۲۱]. جنس این نوع آب بندها، موجبات بروز اصطکاک پایین و تحمل حرارتی بالا را فراهم می‌کند. نحوه‌ی قرار گیری این نوع آب بند بر روی محور به صورت شماتیک در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مجموعه واقعی رویه خارجی کانکتور در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۰ - رویه‌ی داخلی مجهز به ورقه‌های مسی

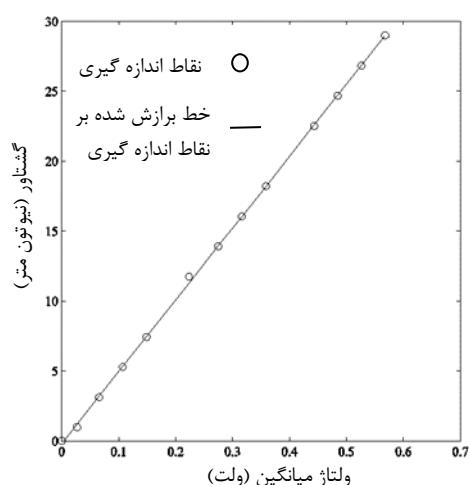


شکل ۱۱ - رویه‌ی خارجی مجهز شده به ورقه‌های مسی



شکل ۱۴ - مجموعه‌ی کرنش‌سنجد، یکنواخت‌کننده، تقویت‌کننده، کانکتور، تبدیل آنالوگ به دیجیتال و پردازش

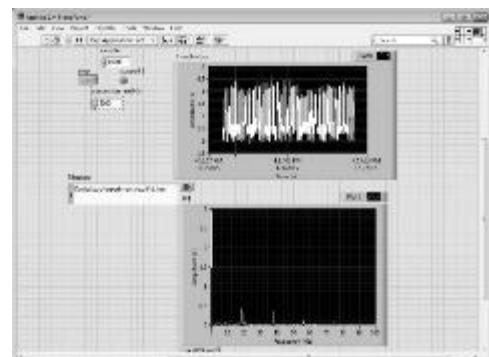
به منظور کالیبراسیون استاتیکی، یکی از دو دیسک را ثابت کرده و مقادیر مختلفی از گشتاور پیچشی را با قرار دادن وزنه‌هایی بر روی بازوی گشتاور تعییه شده بر روی دیسک غیر ثابت، مطابق شکل ۱۷ بر مجموعه اعمال می‌گردد. شکل ۱۸ نمودار تغییرات ولتاژ کرنش‌سنجد و گشتاور اعمالی را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، رفتار کرنش‌سنجد و فرایند انتقال سیگنال الکتریکی، یک رفتار خطی با ثابت کالیبراسیون  $51/3107$  می‌باشد که نشان دهنده عملکرد قابل قبول مجموعه‌ی اندازه‌گیری پیچش در حالت استاتیکی می‌باشد.



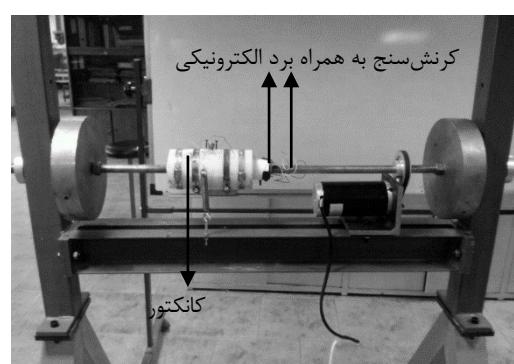
شکل ۱۸ - نمودار ولتاژ ایجادی - گشتاور اعمالی

#### ۲-۴- عملکرد دینامیکی و گذرا

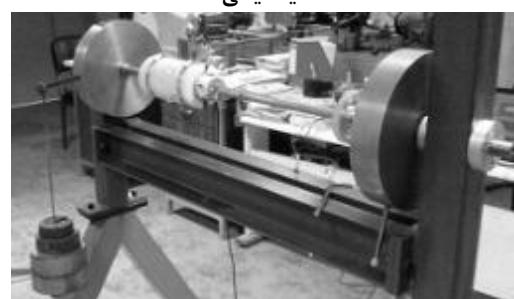
به منظور بررسی قابلیت‌های مجموعه اندازه‌گیری در حالت دینامیک (غیر ایستاده)، ارتعاشات گذراخی مجموعه دیسک و محور



شکل ۱۵ - نرمافزار پردازش سیگنال دیجیتال داده‌برداری



شکل ۱۶ - چیدمان کانکتور بر روی سیستم کالیبراسیون استاتیکی - دینامیکی



شکل ۱۷ - بارگذاری استاتیکی به منظور کالیبراسیون استاتیکی

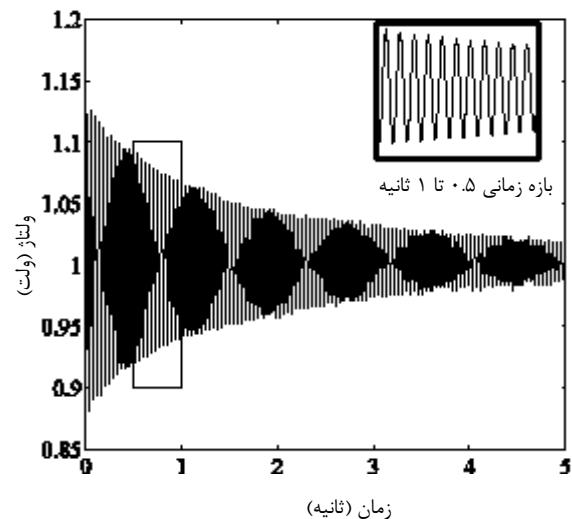
### ۳-۴- عملکرد دینامیکی و پایا

سیستم اندازه گیری طراحی شده بر مجموعه دیسک و محور، طبیعتاً در حالت دور با دور ثابت، به خوبی فرکانس دوران موتور را رصد می‌نماید که نمودارهای استخراجی در اینجا نمایش داده نشده است. اما با توجه به لزوم تست عملکرد مجموعه در دورهای مختلف، استفاده از یک موتور دور متغیر ضروری به نظر می‌رسد. برای این هدف، مجموعه سیستم اندازه گیری، بر روی یک سیستم واقدی شامل محور تعییه شده بر روی یک دستگاه ماشین تراش صنعتی، مطابق شکل ۲۱ نصب گردیده است. فرایند اندازه گیری در دورهای rpm ۱۱۲۰، ۵۰۰، ۳۵۵، ۲۵۰، ۱۱۲۰، انجام می‌پذیرد. شکل‌های ۲۲ و ۲۳، به ترتیب طیف‌های زمانی و فرکانسی اندازه گیری شده در دور انتخابی rpm ۱۱۲۰ را نشان می‌دهد. همانطوری که ملاحظه می‌گردد، هارمونیک‌های سرعت دورانی مجموعه به خوبی قابل شناسایی می‌باشند. فرکانس‌های 1x، 2x، 3x به خوبی در سیگنال قابل مشاهده است و در دورهای پایین تر (شکل ۲۴) نیز این فرکانس‌ها به عنوان غالب ترین فرکانس‌ها مطرح بودند. با توجه به منبع [۲۳، ۲۲] ظاهر شدن هر سه این فرکانس‌ها نشان دهنده عیب انحراف در اتصال چرخ دنده‌ها می‌باشد که این عیب‌ها به وضوح در سیگنال ارتعاشات پیچشی نشان داده شده است. لذا، عملکرد سیستم اندازه گیری طراحی شده، در حالت دور نیز مورد تایید واقع می‌گیرد.

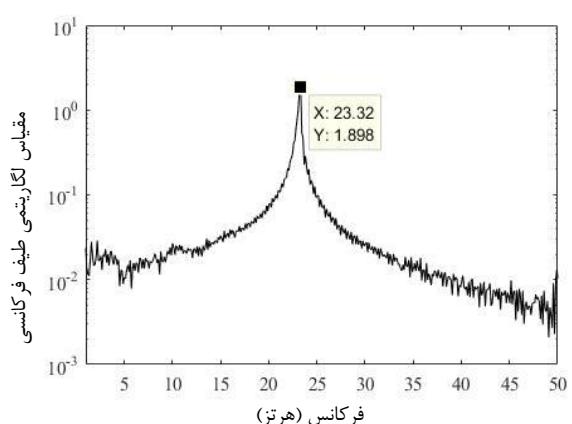


شکل ۲۱ - نصب سیستم اندازه گیری بر محور تعییه شده بر روی دستگاه ماشین تراش TN40

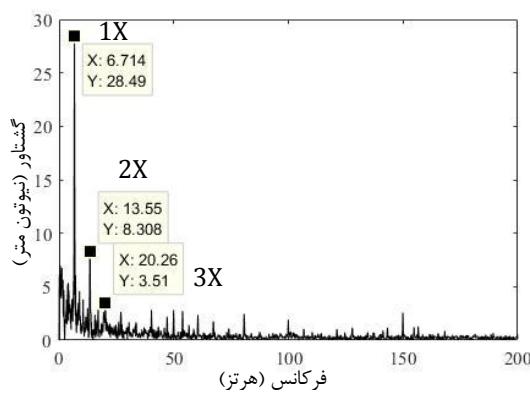
اندازه گیری می‌شود. تحریک ارتعاشات گذرا، توسط ضربه چکش به صورت مماسی بر دیسک اعمال می‌گردد. با توجه به ماهیت پیچشی مجموعه، انتظار ظهور فرکانس طبیعی پیچشی مجموعه در طیف فرکانسی اندازه گیری شده توسط سیستم اندازه گیری طراحی شده وجود دارد. شکل ۱۹، پاسخ زمانی سیگنال الکتریکی گذرا و شکل ۲۰، طیف فرکانسی استخراجی را نمایش می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، پاسخ زمانی گذرا ثبت شده، دارای یک مولفه فرکانسی غالب در فرکانس  $23/32$  هرتز می‌باشد. برای مجموعه دیسک از جنس فولاد سخت<sup>۲۶</sup>، قطر ۲۵۰ میلیمتر و طول ۵۰ میلیمتر و محور از جنس فولاد ساختمانی، قطر ۲۰ میلیمتر و طول ۸۳۸ میلیمتر، می‌توان نشان داد که فرکانس طبیعی پیچشی اول، برابر با  $23/10$  هرتز استخراج می‌گردد. لذا، مولفه فرکانسی غالب اندازه گیری شده، در تطابق قابل قبولی با فرکانس اول نوسانات پیچشی بوده و در نتیجه، سیستم اندازه گیری در حالت دینامیکی نیز عملکرد قابل قبول را ارائه می‌نماید.



شکل ۱۹ - تغییرات زمانی گشتاور پیچشی وارد بر محور در حالت ارتعاشات گذرا مجموعه

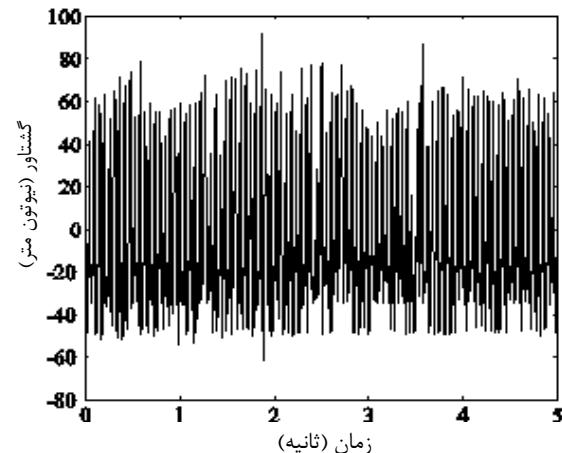


شکل ۲۰ - طیف فرکانسی گشتاور پیچشی وارد بر محور در حالت ارتعاشات گذرا مجموعه



شکل ۲۴ - طیف فرکانسی گشاوور پیچشی اندازه گیری شده در سرعت .355 RPM  
کلید واژگان

- 1- Slip Ring
- 2- Rotating Transformer
- 3- Telemetry
- 4- Torsion Graph
- 5- Rotary Shaft Encoder
- 6- Inductive Torque Measurement
- 7- Chamber
- 8- Teflon
- 9- Connector
- 10- Concentric
- 11- Signal generator type JFG-3MD
- 12- Oscilloscope type GDS-840c
- 13- Data acquisition card type USB 4711-A
- 14- Advantech
- 15- Frequency Spectrum
- 16- RMS-(Root Mean Square)
- 17- Data Acquisition System
- 18- Metal Foil
- 19- Polyimide
- 20- Wheatstone Bridge
21. Full Bridge
- 22- Regulator
23. Amplifier
24. Voltage regulator LM7805
25. Low noise amplifier AD 620
- 26- CK45



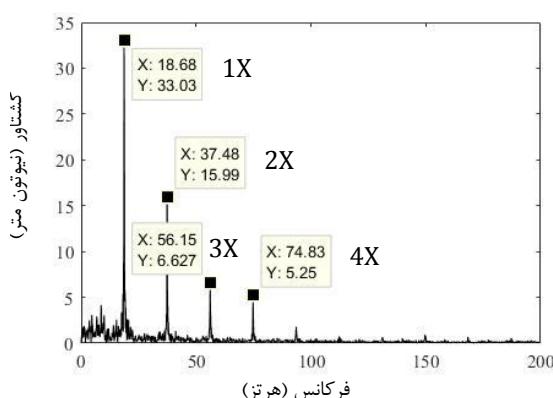
شکل ۲۲ - تغییرات زمانی گشاوور پیچشی اندازه گیری شده در سرعت 1120 RPM

#### ۵- جمع بندی

در پژوهش ارائه شده، روشی ساده، عملی و قابل اطمینان به منظور انتقال سیگنال‌های اندازه گیری شده و همچنین، تحریک مدار پل وتسون کرنش‌سنجد تعبیه شده بر روی محوری دوار، مبتنی بر استفاده از سیال یونیزه شده معرفی گردید. برای اثبات کارایی روش ارائه شده، مجموعه‌ای از سیستم اندازه گیری پیچش شامل کرنش‌سنجد، مدار الکترونیکی تغذیه، مدار الکترونیکی انتقال سیگنال، کانکتور شامل رویه‌های ایستا و دوار و محفظه تعبیه شده برای قرار گیری سیال حامل سیگنال الکتریکی، سیستم تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال و پردازشگرهای سیگنال طراحی و ساخته شد. عملکرد مجموعه، با انجام تست‌های استاتیکی، دینامیکی گذرا و دینامیکی پایا بر روی محوری دوار صورت پذیرفت. نتایج حاصله، نشان دهنده عملکرد موفق مجموعه کانکتور ابداعی به منظور انتقال سیگنال دارد. سادگی در طراحی، عدم نیاز به اتصال منبع تغذیه بر روی محور، عدم حساسیت به ارتعاشات خمسی و بالا بودن نسبت سیگنال به نویز، این روش اصلاحی را برای اندازه گیری ارتعاشات پیچشی کاندید می‌نماید.

#### فهرست علائم

|            |                     |     |                       |
|------------|---------------------|-----|-----------------------|
| $v$        | ولتاژ (v)           | $E$ | مدول الاستیسیته (pa)  |
| $\nu$      | ثابت پواسون         | $G$ | مدول برشی (pa)        |
| $\gamma$   | کرنش برشی           | $J$ | ممان اینرسی ( $m^4$ ) |
| $\alpha_R$ | ثابت ماده           | $k$ | ثابت پل وتسون         |
| $R$        | مقاومت ( $\Omega$ ) | $r$ | شعاع محور (m)         |
|            |                     | $T$ | گشاوور (N.m)          |



شکل ۲۳ - طیف فرکانسی گشاوور پیچشی اندازه گیری شده در سرعت .1120 RPM

## ۶- مراجع

- Noise-measurement Prediction and Control; Preprints of Papers, p. 122.
- 11- X. Ling. L. Shudongand C. Wei, (2012), *Measurement and analysis of torsional vibration signal for rotating shaft system*, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 9th International Conference ,p. 1851-1854.
- 12- T. Feese and D. Smith, (2009), *Critical Equipment Measured in the Field*, journal of Polytec InFocus.
- 13- Fraunhofer Institute, (2007), A Contactless Torque Sensor for Online Monitoring of Torsional Oscillations.
- 14- The Dow Chemical Company, (2011), *FILMTEC Membranes Addendum: Conductivity of Solution*, report number: 609-02127-804
- 15- C. W. De Silva, (2005), *Vibration and shock handbook*, CRC Press.
- 16- P. W. Bridgman, (1931), *Dimensional analysis*, Yale University Press.
- 17- Natinal instrument company, (2014), *Measuring Strain with Strain Gages*, Available: <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/>
- 18- Fairchild Semiconductor company, *LM7805 Data Sheet*, (2008)
- 19- Analog company, (2014), *Product Details AD620*, Available: <http://www.analog.com/en/specialty-amplifiers/instrumentation-amplifiers/ad620/products/product.html>
- 20- Parker company, *Rotary Seals catalogue*, (2006).
- 21- C. M. Harris and A. G. Piersol, (2002), *Harris' Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill.
- 22- N. F. Rieger, (2014), *Rotordynamics 2: Problems in Turbomachinery*, Springer Vienna.

- 1- T. Feese and R. Maxfield), *Torsional Vibration Problem With Motor/id Fan System Due To PWM Variable Frequency Driver*, in *37th Turbomachinery Symposium*, Texas A&M Universitypp. 45-56.
- 2- M. H. Muftah and S. M. Haris, (2011), *A strain gauge based system for measuring dynamic loading on a rotating shaft*, International Journal of Mechanics, vol. 5, pp. 19-26.
- 3- J. G. Webster, (1999), *The Measurement, Instrumentation, and Sensors*, Handbook, CRC Press.
- 4- E. Hong. D. Aand A. Krishnamurthy, (2007), *Opto-electronics based wireless slip ring system*, Journal of Engineering computing and architecture, vol. 2,
- 5- Mercotac, (2014), *Brushless sliring*, Available: [www.mercotac.com](http://www.mercotac.com).
- 6- E. Zabler. A. Dukart. F. Heintzand R. Krott, (1994), *A non-contact strain-gage torque sensor for automotive servo-driven steering systems*, Journal of Sensors and Actuators , vol. 41, pp. 39-46, 4/1.
- 7- L. S. Dorfman and M. Trubelja, (1999), *Torsional monitoring of turbine-generators for incipient failure detection*, 6th EPRI Steam Turbine/Generator, t. Louis, Mo, USAApp. 1-6.
- 8- T. Feese and C. Hill, (2009), *Prevention of Torsional Vibration Problems in Reciprocating Machinery*, *Thirty-Eight Turbomachinery Symposium*pp, p. 213-238.
- 9- W. F. Eckert and B. C. Howes, (2001), *A Case Study Of A Flow-Induced Torsional Resonance*, *19th Proceedings on Machinery Vibration*, Edmonton AB.
- 10- R. Randall and D. Luo, (1990), *Hilbert transform techniques for torsional vibration analysis*, Australian Vibration and Noise Conference : Vibration and