



تشخیص و ارزیابی عددی شل‌شدگی اتصالات پیچی برج توربین بادی به کمک روش مدولاسیون ویبروآکوستیک

سید مجید یادآور نیک‌روش*، مسعود گودرزی

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۰۷
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۱/۲۹
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۴/۰۴

کلمات کلیدی:

تشخیص خرابی
اتصالات پیچی
تست‌های غیرمخرب
پایش وضعیت
روش مدولاسیون ویبروآکوستیک

خلاصه: از علل رایج خرابی سازه‌های صنعتی دارای اتصالات پیچی فلنجی، شل‌شدگی پیچ‌ها می‌باشد که تشخیص به موقع آن می‌تواند سبب پیشگیری از تحمیل هزینه‌های سنگین مالی و بعضاً جانی گردد. روش‌های مرسوم تشخیص این عیب، معایب مختلفی دارند، به عنوان مثال روش‌های کنترل گشتاور اغلب دارای خطای بالا بوده، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس هزینه‌هایی بالا به همراه داشته و روش‌های ارتعاشی یا اولتراسونیک نیز به واسطه استفاده از پدیده‌هایی خطی در تشخیص خرابی، از دقت بالایی برخوردار نمی‌باشند. روش مدولاسیون ویبروآکوستیک یکی از روش‌های غیرخطی می‌باشد که به کمک اندازه‌گیری شدت مدولاسیون سیگنال‌های ارتعاشی و اولتراسونیک اعمال شده به سازه، می‌تواند با دقت بسیار بالایی به تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی بپردازد. در این مقاله با تعریف شاخصی برای شدت مدولاسیون و شل‌شدگی اتصال، کارایی روش در تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی فلنجی برج توربین بادی شبیه‌سازی شده، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس در ادامه، تأثیر پارامترهایی همچون فرکانس تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی، دامنه تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی، محل قرارگیری حسگرها و عملگرها و همچنین نیروی پیش‌بار، روی عملکرد روش مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتها به منظور کاهش زمان اجرای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی شبکه عصبی به کمک نرم‌افزار متلب صورت گرفته و نتایج به دست آمده از آن با نتایج حل عددی مقایسه گردیده است.

۱- مقدمه

مدولاسیون ویبروآکوستیک می‌باشد. در این روش سیگنال‌های اولتراسونیک (فرکانس بالا) و ارتعاشی (فرکانس پایین) همزمان اتصال را تحریک کرده و در صورت وجود شل‌شدگی در اتصال، یک مدولاسیون در پاسخ سازه به وضوح قابل مشاهده خواهد بود که با اندازه‌گیری آن می‌توان میزان شل‌شدگی را در اتصال، حتی به صورت آنلاین تخمین زد [۲-۴].

بیشترین کاربرد روش آکوستیک غیرخطی، در تشخیص ترک در قطعات می‌باشد. کارایی این روش در مواد مختلف از جمله شیشه [۵]، سنگ [۶] و فولاد [۷] نشان داده شده است. همچنین کارآمد بودن این روش برای ساختارهای پیچیده ثابت شده است؛ دانسکی و سوتین [۸] روش غیرخطی آکوستیک را بر روی لوله‌های فولادی اعمال کرده و ترک‌های آن را تشخیص دادند. مئو و همکاران [۹] نیز از روش مدولاسیون ویبروآکوستیک برای شناسایی لایه‌لایه شدن در یک صفحه کامپوزیتی استفاده کرده و کارآمد بودن این روش را برای مواد پیچیده نیز اثبات نمودند. زایتسف و ساس [۱۰] با بهینه‌سازی پارامترهای آزمون ویبروآکوستیک برای یک صفحه

سقوط برج توربین بادی سایت سیاهپوش نیروگاه منجیل (شکل ۱) در سال ۱۳۹۳ نشان داد که عدم توجه به شل‌شدگی اتصالات پیچی چه هزینه‌هایی را در پی خواهد داشت. روش‌های مرسوم پیشگیری از چنین اتفاقاتی، همچون روش کنترل گشتاور، روش‌هایی با بیش از پنجاه درصد هستند که البته خود همراه با خطاهایی انسانی همراه خواهند بود. علاوه بر روش‌های مذکور، راهکارهای دیگری نیز برای تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی وجود دارد که از جمله مهمترین آن‌ها روش‌های مبتنی بر ارتعاشات، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس و همچنین روش‌های اولتراسونیک می‌باشند که هرکدام دارای معایب و مزایایی متفاوت می‌باشند که مقایسه تمامی این روش‌ها در مقاله پیشین نویسندگان این مقاله، ارائه گردیده است [۱]. از جمله روش‌هایی که در سال‌های اخیر به عنوان یک روش غیرمخرب غیرخطی توجه محققان را به خود جلب کرده است، روش

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_yadavarnik@sbu.ac.ir

محل قرارگیری حسگرها و عملگرها و همچنین نیروی پیش‌بار، روی عملکرد روش مورد مطالعه قرار گرفته است و در انتها به منظور کاهش زمان اجرای شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی شبکه عصبی به کمک نرم‌افزار متلب صورت گرفته و نتایج به دست آمده از آن با نتایج حل عددی مقایسه گردیده است.

۲- روش مدولاسیون ویبروآکوستیک

همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، مکانیزم عملکرد این روش بدین صورت است که یک سیگنال ارتعاشی با فرکانس پایین و یک سیگنال اولتراسونیک با فرکانس بالا به طور همزمان سیستم را تحریک می‌کنند. از آنجایی که عبور موج اولتراسونیک از سطوح تماسی همزمان با ارتعاش اتصال است، دامنه موج اولتراسونیک به واسطه تغییرات ایجاد شده در ویژگی‌های دینامیکی سازه دچار نوسان دامنه خواهد شد. به همین دلیل سیگنال‌های پاسخ در صورت وجود عیوبی تماسی همچون شل‌شدگی اتصالات، یکدیگر را مدوله خواهند کرد. در این حالت، مؤلفه‌هایی با فاصله مضرب صحیحی از فرکانس ارتعاشی در اطراف فرکانس اولتراسونیک مشاهده خواهد شد. در حالت تئوری دامنه این مؤلفه‌ها با یکدیگر برابر است اما نتایج آزمایشگاهی به دست آمده چنین چیزی را تأیید نمی‌کند. پس از دریافت سیگنال مدوله شده، پردازش سیگنال صورت پذیرفته و با تعریف شاخصی برای بررسی شدت مدولاسیون، مقدار شاخص برای مقادیر مختلف گشتاور اعمالی اندازه‌گیری گردیده و رابطه‌ای میان میزان شل‌شدگی اتصال و مقدار شاخص مشخص خواهد شد [۱۱ و ۱۴].

مزیت اصلی روش‌های مبتنی بر ظهور هارمونیک‌ها، همانند روش مدولاسیون ویبروآکوستیک و یا مدولاسیون ضربه، دقت بالای آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌های اولتراسونیک می‌باشد. همانگونه که پیش از این بیان گردید روش‌های اولتراسونیک اغلب بر مبنای پدیده‌هایی خطی همچون انعکاس، پراکندگی و غیره هستند که در مقایسه با روش‌هایی همچون مؤلفه‌های جانبی که پایش پدیده‌هایی غیرخطی همچون مدولاسیون را مورد بررسی قرار می‌دهند، از دقت پایین‌تری برخوردار هستند. علاوه بر این در صورتی که در روش مؤلفه‌های جانبی از ارتعاشات عملکردی خود سازه به عنوان سیگنال ارتعاشی استفاده گردد، امکان پایش وضعیت آنالین نیز برای این روش وجود خواهد داشت. نکته قابل تأمل در مورد این روش این است که اگرچه از دقت بالایی برخوردار است و کارایی آن نه تنها در تشخیص شل‌شدگی اتصالات که در تشخیص و ارزیابی سایر عیوب سازه‌ها به اثبات

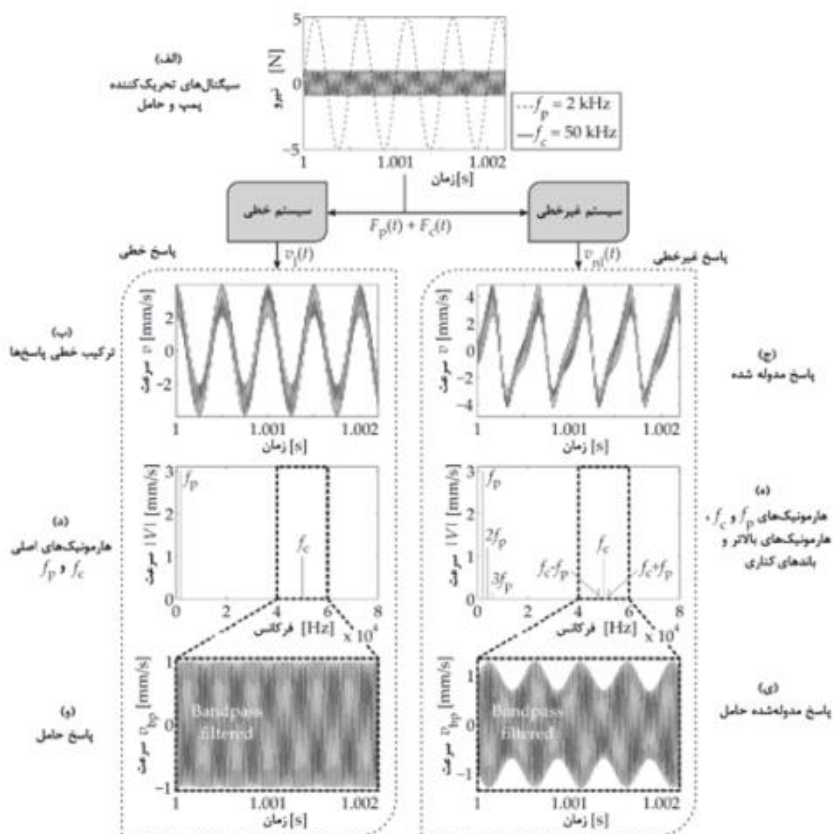


شکل ۱: سقوط برج توربین بادی نیروگاه منجیل به واسطه شل‌شدگی پیچ‌ها

Fig. 1. Crash of wind turbine tower in Manjil because of loosening of bolts

آلومینیومی ترک‌دار، دامنه سایدباند‌ها را از دامنه پاسخ در فرکانس سیگنال کاوشگر بیشتر کردند. در نهایت آمرینی و مؤ [۱۱] روش ویبروآکوستیک را برای بررسی اتصال پیچی در یک مدل ساده متشکل از دو صفحه و یک پیچ استفاده کردند. در ادامه مطالعات انجام شده در زمینه اعمال روش آکوستیک غیرخطی برای تشخیص شل‌شدگی اتصالات، جیکوب و آدامز [۱۲] در سال ۲۰۱۱ برای اولین بار روش مدولاسیون ضربه را برای تشخیص شل‌شدگی پیچ‌ها در ماهواره‌ها به کار بردند. در واقع همانگونه که بیان گردید، روش مدولاسیون ویبروآکوستیک اغلب در تشخیص و ارزیابی ترک در سازه‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفته و به جز معدود مقالاتی که کارایی روش را در تشخیص شل‌شدگی اتصالات پیچی استاتیکی ساده به اثبات رسانیدند [۱۱، ۱۳، ۱۴]، تاکنون تحقیق دیگری در این زمینه منتشر نگردیده است. در این مقالات اغلب چنین بیان گردیده است که افزایش نیروی پیش‌بار اتصالات، سبب کاهش شدت مدولاسیون در روش مدولاسیون ویبروآکوستیک خواهد شد؛ حال آن‌که نتایج به دست آمده در این مقاله نشان‌دهنده آن است که رابطه مقدار گشتاور اعمالی و متعاقباً نیروی پیش‌بار اتصال، با شدت مدولاسیون سیگنال‌ها رابطه‌ای خطی نخواهد داشت.

در این مقاله ضمن مدل‌سازی اتصال فلنجی یک برج توربین بادی با دوازده عدد پیچ و مهره، کارایی روش مدولاسیون ویبروآکوستیک در تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی فلنجی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، تأثیر پارامترهایی همچون: فرکانس تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی، دامنه تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی،



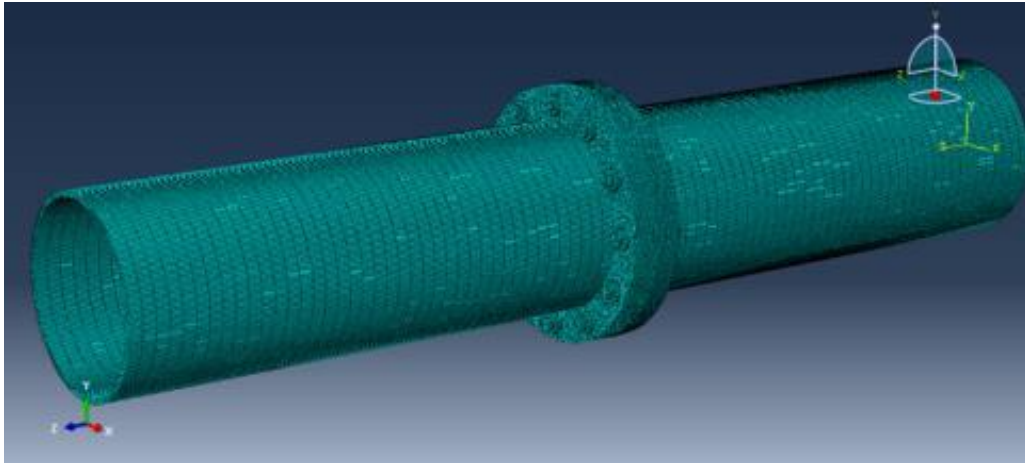
شکل ۲: تفاوت میان پاسخ‌های سازه سالم و سازه معیوب [۱۵]

[Fig. 2. Comparison of received signals from healthy and faulty structures [15]

Table 1. Simulation parameters of valuation

جدول ۱: پارامترهای فیزیکی نمونه شبیه‌سازی شده

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱۵۰ کیلوهرتز	فرکانس اولتراسونیک	۲ متر	قطر لوله‌های برج
۳ هرتز	فرکانس ارتعاشی ناشی از عملکرد توربین	فولاد	جنس لوله‌ها
۵۰ نیوتن	دامنه تحریک اولتراسونیک	۵ سانتی‌متر	ضخامت فلنج
۱۰۰ نیوتن	دامنه تحریک ارتعاشی	۱۲	تعداد پیچ‌ها و مهره‌ها
۵۰۰ نیوتن	نیروی محوری اعمال شده به پیچ شل شده	فولاد	جنس پیچ‌ها و مهره‌ها
۱۰۰۰ نیوتن	نیروی محوری اعمال شده به سایر پیچ‌ها	۵ سانتی‌متر	قطر داخلی پیچ و مهره
		پی‌زدتی	جنس المان‌های پیژوالکتریک



شکل ۳: پایه برج توربین شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

Fig. 3. Simulated wind turbine tower in ABAQUS

ساده‌سازی، نیروی محوری آن به صورت نیروی فشاری یکنواخت اعمال شده است. برای تعیین مقدار نیروی فشاری به ازای هر گشتاور، از رابطه (۱) می‌توان استفاده نمود [۱۸]:

$$T = KPD \quad (1)$$

که در این رابطه T گشتاور اعمالی بر حسب نیوتن‌متر، D قطر اسمی پیچ بر حسب متر، P نیروی فشاری بر حسب نیوتن و K ضریب گشتاور (بی‌بعد) می‌باشد. مقدار ضریب گشتاور به پارامترهای مختلفی بستگی دارد که مهم‌ترین آن‌ها اصطکاک بین سطوح است. مقدار ضریب گشتاور بین $0/1$ تا $0/3$ برای اتصال کثیف و زنگ‌زده متغیر می‌باشد. زمانی که شرایط اتصال پیچ به درستی بیان نشده باشد، مقدار $0/2$ عموماً پذیرفته شده است که در این مقاله نیز این مقدار در نظر گرفته شده است.

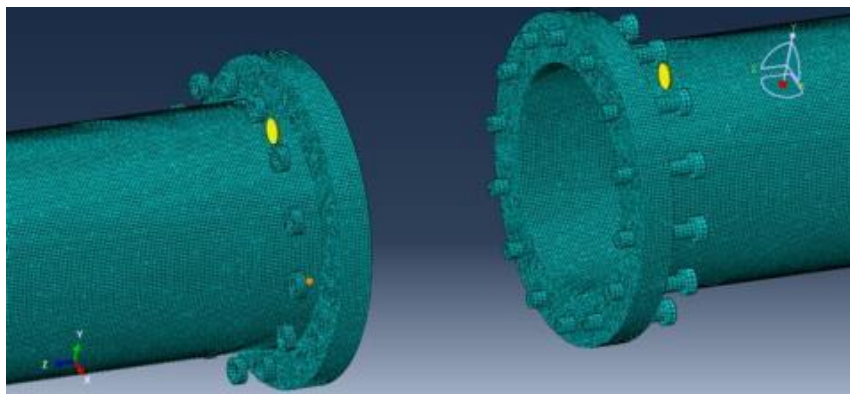
همانگونه که در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است، از المان‌های پیزوالکتریک به عنوان حسگر و عملگر در طرفین اتصال، درست بین هر پیچ و مهره استفاده گردیده است که مطابق استانداردهای موجود برای گشتاور مجاز این نوع اتصالات [۱۸]، و همچنین رابطه (۱)، نیروی 1000 نیوتن برای پیچ‌های سفت و نیروی 500 نیوتن برای پیچ شل در نظر گرفته شده است. در واقع همانگونه که در شکل ۵ نیز نشان داده شده است، فرض شده که پیچ شل بین حسگرهای شماره ۶ و ۷ قرار داشته و سایر پیچ‌ها کاملاً سفت می‌باشند. در چنین حالتی، در هر بار اجرای برنامه، سیگنال ارتعاشی حاصل

رسیده است، هنوز علت کامل و جامعی برای بروز مدولاسیون ارائه نگردیده است [۱۶ و ۱۷]. لازم به ذکر است که نویسندگان این مقاله، پیش از این در مقاله‌ای دیگر مقایسه‌ای کامل و جامع میان روش‌های مختلف پایش وضعیت اتصالات پیچی انجام داده‌اند که در آن معایب و مزایای هر کدام به تفصیل بیان گردیده است [۱].

۳- شبیه‌سازی عددی

همانگونه که در جدول ۱ قابل مشاهده است، برای مدل‌سازی اتصال پیچی فلنجی برج توربین بادی، از یک اتصال پیچی دوازده پیچ و مهره‌ای استفاده گردیده است که دو قسمت برج توربین به قطر ۲ متر را به یکدیگر متصل نموده است. جنس بدنه برج و همچنین پیچ و مهره‌ها همگی از فولاد در نظر گرفته شده است و هیچگونه ماده و یا قطعه واسطی میان دو فلنج در نظر گرفته نشده است. مطابق آنچه که در تشریح تئوری روش مدولاسیون و پیزوآکوستیک بیان گردید، سیگنال ارتعاشی و اولتراسونیک به صورت همزمان سازه را تحریک کرده و پاسخ مدوله شده به کمک حسگرهای نصب شده روی سیستم دریافت و تحلیل می‌گردد. سیگنال اولتراسونیک به کمک عملگرهایی پیزوالکتریکی از جنس پی‌زدتی^۱ مدل شده و سیستم را به کمک امواج هارمونیک با فرکانسی در حدود 150 کیلوهرتز تحریک نموده و سیگنال ارتعاشی اعمال شده به سازه نیز فرض شده است که همان ارتعاش حاصل از عملکرد توربین بادی با فرکانسی در حدود 3 هرتز می‌باشد. برای شبیه‌سازی گشتاور اعمال شده به هر پیچ، به جای اعمال گشتاور، به جهت

1 Lead Zirconate Titanate (PZT)



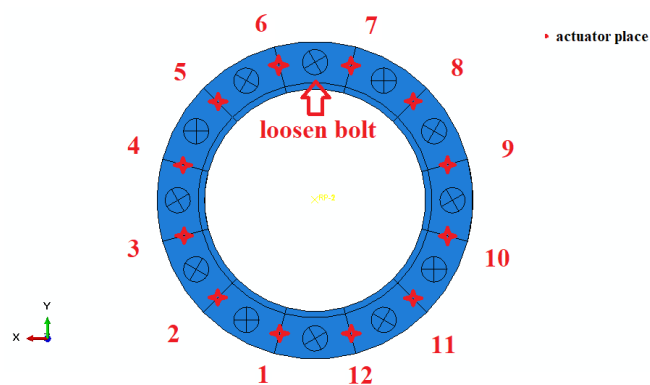
شکل ۴: اتصال فلنجی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

Fig. 4. Simulated flanged joint in ABAQUS

(۲) تعریف گردیده است که در این رابطه LI شاخص مدولاسیون، A^+ دامنه اولین مؤلفه جانبی سمت راست فرکانس اولتراسونیک و A^- دامنه اولین مؤلفه جانبی سمت چپ فرکانس اولتراسونیک و A نیز دامنه فرکانس اولتراسونیک می‌باشد [۱۹]. مطابق این رابطه، هر چه شل‌شدگی اتصال کمتر باشد، مقدار شاخص نیز - که می‌بایست مقداری بین صفر و یک داشته باشد - بیشتر به سمت صفر میل خواهد کرد.

$$LI = \frac{A^+ + A^-}{2A} \quad (2)$$

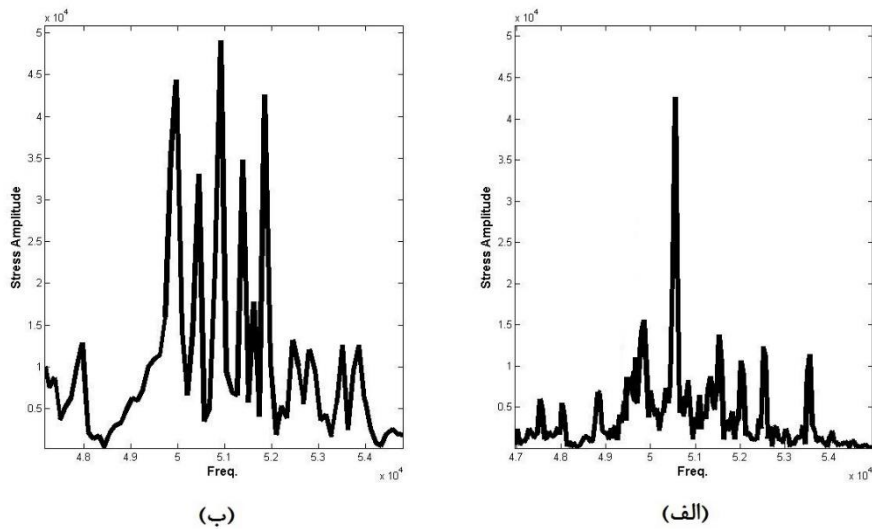
مطابق این رابطه و توضیحاتی که ارائه گردید، در کل ۱۴۴ شاخص برای ۱۲ تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی و ۱۲ سیگنال دریافت شده توسط هر حسگر به ازای هربار اجرای برنامه محاسبه گردیده است که بررسی آن‌ها همانگونه که در بخش نتایج قابل مشاهده خواهد بود، موید آن است که تشخیص وجود شل‌شدگی به راحتی به کمک روش مدولاسیون و ویبروآکوستیک امکان‌پذیر می‌باشد. علاوه بر این، از آنجایی که انتخاب پارامترهای اولیه می‌تواند روی نتایج به دست آمده مؤثر باشند، تحلیل حساسیتی روی پارامترهای فرکانس تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی، دامنه تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی، محل قرارگیری حسگرها و عملگرها و لرزاننده، تعداد پیچ‌ها، ضریب اصطکاک سطوح تماس فلنج‌ها و همچنین مقدار نیروی پیش‌بار، صورت پذیرفته است که اساس همگی آن‌ها ثابت نگه داشتن تمامی پارامترها و تغییر پارامتر تحت بررسی می‌باشد.



شکل ۵: نحوه چیدمان حسگرها و عملگرها بین پیچ‌ها و مهره‌های اتصال فلنجی برج توربین بادی

Fig. 5. Location of sensors and actuators in simulated flanged joint

از عملکرد توربین به صورت یک نیروی عرضی به مرکز لوله فوقانی برج، با فرکانس ۳ هرتز اعمال گردیده و به صورت همزمان سیگنال هارمونیک اولتراسونیک نیز به عنوان مثال به کمک عملگر شماره ۱ با فرکانس ۱۵۰ کیلوهرتز سیستم را تحریک نموده و پاسخ به کمک ۱۲ حسگر قرار گرفته در طرف دیگر فلنج دریافت می‌گردد. این فرآیند برای تک تک عملگرها تکرار گردیده و در واقع ۱۴۴ پاسخ برای هر حسگر به ازای هر تحریک اولتراسونیک اعمال شده توسط هر عملگر وجود خواهد داشت. سیگنال‌های مدوله شده در صورتی که در فضای فوریه مورد بررسی قرار گیرند، از خود مولفه‌هایی جانبی را اطراف فرکانس اولتراسونیک بروز خواهند داد. برای سنجش میزان مدولاسیون رخ داده، شاخصی تحت عنوان شاخص شل‌شدگی مطابق رابطه



شکل ۶: شکل ۶ سیگنال دریافت شده توسط حسگر، (الف) در صورت سفت بودن اتصال؛ (ب) در صورت شل بودن اتصال

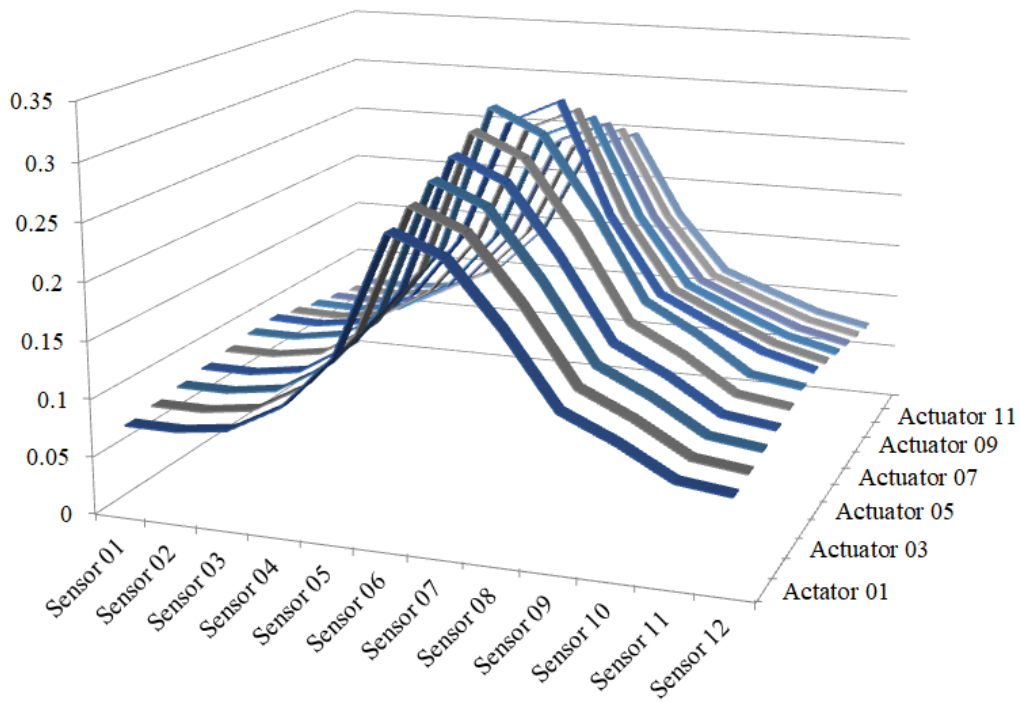
Fig. 6. Detected signal by sensors (a): Without looseness; (b): With looseness

شل شده و این نوسانات متعاقباً نوسانات امپدانس آکوستیکی سطوح را به همراه خواهد داشت که سبب بروز رفتار غیرخطی موج هنگام عبور گردیده و این رفتار غیرخطی، خود را به صورت مدولاسیون سیگنال‌های پاسخ نشان خواهد داد. تأثیر چنین رفتاری همانگونه که در شکل ۸ قابل مشاهده است، در نمودار انرژی سیگنال دریافتی توسط هر حسگر به وضوح خود را نشان می‌دهد. در واقع در این نمودار نیز حسگرهای شماره ۶ و ۷ بیشترین تلفات انرژی را دارند و تغییر موقعیت عملگر تحریک‌کننده نیز همانند نمودار قبل، بدون ایجاد تغییر در رفتار کلی نمودارها، سبب تغییر مقادیر به نسبت مساوی خواهد شد؛ بدین ترتیب که هرچه عملگر تحریک‌کننده به پیچ شل نزدیک‌تر باشد، نوسانات آکوستیکی و تلفات انرژی سیگنال دریافتی توسط حسگرها، بیشتر خواهد بود.

همانگونه که بیان گردید، روش مدولاسیون ویبروآکوستیک علاوه بر توانایی تشخیص شل‌شدگی در اتصالات پیچی، امکان تشخیص موقعیت پیچ شل در سازه را نیز فراهم خواهد کرد. اما نکته مهم اینجاست که تغییر پارامترهای اولیه در نظر گرفته شده برای این تحلیل، می‌تواند در عملکرد روش تأثیری مثبت یا منفی داشته باشند. به همین منظور لازم است روی پارامترهایی اعم از مقدار گشتاور اعمال شده به پیچ شل، فرکانس‌های تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی، دامنه‌های تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی و همچنین محل قرارگیری حسگرها و عملگرها، تحلیل حساسیت صورت پذیرد که نتایج آن‌ها به ترتیب ارائه خواهد شد.

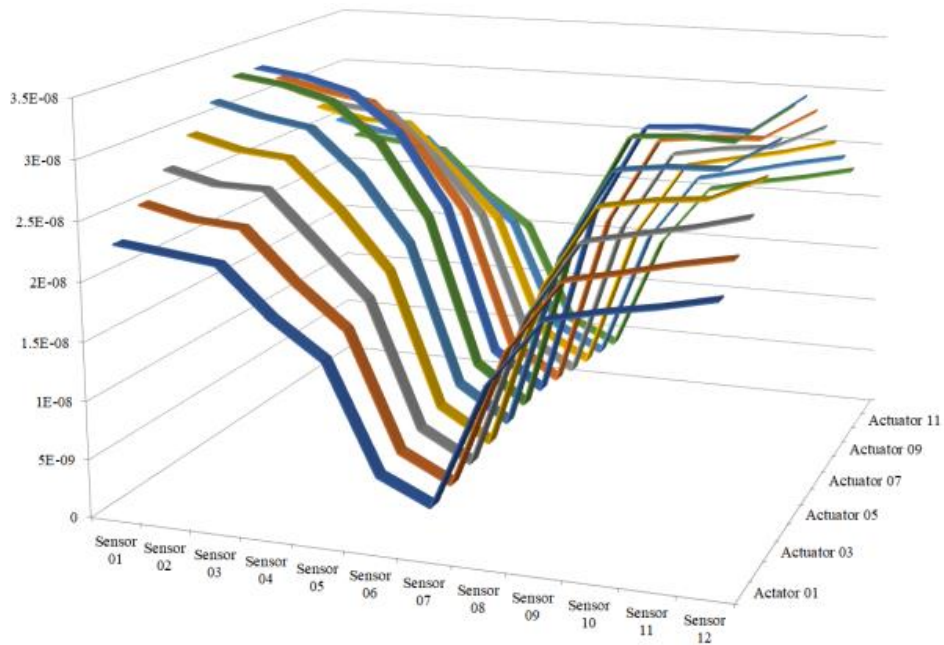
۴- نتایج

همانگونه که پیش از این نیز بیان گردید، تشخیص وجود شل‌شدگی در اتصال پیچی برج توربین بادی به کمک تحلیل پاسخ‌های مدوله شده دریافت شده توسط حسگرها، در فضای فوریه به راحتی امکان‌پذیر است. در واقع همانگونه که در شکل ۶ نیز قابل مشاهده است، در صورتی که سیگنال زمانی مدوله شده در فضای فوریه ترسیم گردد، مولفه‌های جانبی خود را در اطراف فرکانس اولتراسونیک نشان خواهند داد که با کمک رابطه (۱) می‌توان مقدار شاخص مدولاسیون را تعیین نمود. حال چنانچه به ازای هر بار تحریک توسط هر دوازده عملگر، دوازده شاخص مدولاسیون از دوازده سیگنال پاسخ دریافت شده توسط هر حسگر محاسبه گردیده و در نموداری سه‌بعدی ترسیم گردد (شکل ۷)، قابل مشاهده خواهد بود که مقدار شاخص برای حسگرهای شماره ۶ و ۷ که در دو طرف پیچ شل واقع شده‌اند، ماکزیمم خواهد بود. علاوه بر این، تغییرات موقعیت عملگر نیز اگرچه روی رفتار کلی نمودارها تأثیری نخواهد داشت، اما سبب تغییری جزئی در مقدار این شاخص‌ها به نسبت مساوی خواهد داشت؛ بدین صورت که در صورتی که عملگر تحریک‌کننده در فاصله کمتری از پیچ شل قرار داشته باشد، شدت مدولاسیون بیشتر خواهد بود که دلیل این مساله هم این است که نزدیک‌تر بودن نقطه تحریک اولتراسونیک، به طور نسبی سبب اعمال نوسانات بیشتری به سطوح فلنج در اطراف پیچ



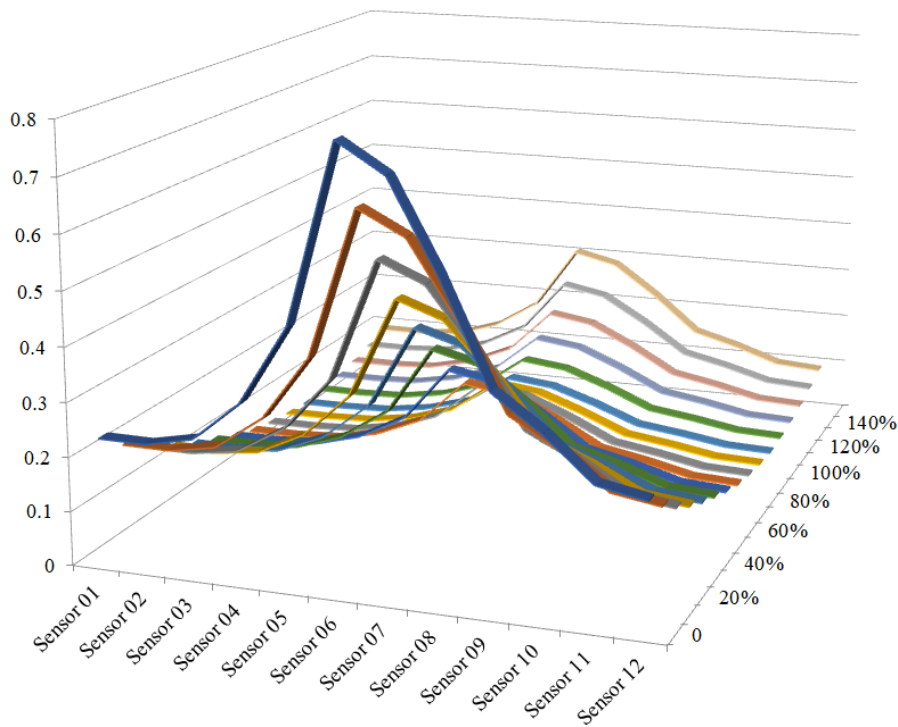
شکل ۷: مقایسه شاخص‌های مدولاسیون سیگنال‌های دریافت شده به ازای تحریک‌های مختلف توسط عملگرهای مختلف

Fig. 7. Comparison of modulation indexes received from different actuators



شکل ۸: مقایسه انرژی سیگنال‌های دریافت شده به ازای تحریک‌های مختلف توسط عملگرهای مختلف

Fig. 8. Comparison of Energy of received signals from different actuators



شکل ۹: بررسی تأثیر مقدار گشتاور اعمال شده به پیچ شل روی شاخص مدولاسیون

Fig. 9. Effect of bolt torque on modulation index

بررسی شکل ۹ موید آن است که در صورت وجود شل شدگی در اتصال فلنجی، شاخص مدولاسیون برای برخی حسگرها که به پیچ شل شده نزدیکتر هستند، در مقایسه با میانگین مقادیر شاخص مدولاسیون گزارش شده توسط سایر حسگرها، به طور چشمگیری بیشتر خواهد بود. بنابراین در صورتی که شاخص شل شدگی^۲ به صورت نسبت ماکزیمم مقدار شاخص مدولاسیون محاسبه شده به مقدار میانگین شاخص مدولاسیون سیگنال‌های محاسبه شده توسط تمامی حسگرهای فعال، تعریف گردد؛ می‌توان شاخص شل شدگی را معیاری برای وجود شل شدگی در اتصال در نظر گرفت. در واقع همانگونه که در شکل ۱۰ نیز قابل مشاهده است، هرچه مقدار نسبت گشتاور به سمت ۱ میل نماید، اتصال بی‌نقص تر شده و شاخص مدولاسیون مطابق انتظار کاهش به سمت صفر میل خواهد نمود. هرچند توجه به دو نکته در این نمودار ضروری به نظر می‌رسد. نکته اول این که حتی در یک اتصال کاملاً سفت، مقدار شاخص شل شدگی صفر نخواهد بود و مقداری جزئی مدولاسیون ایجاد خواهد شد که این مساله می‌تواند به دلیل اعمال نوساناتی جزئی امیدانس آکوستیکی اتصال نزدیک به عملگر باشد. نکته دیگر اما این است که سفت شدن بیش از حد نه تنها سبب کوچکتر کردن مقدار شاخص

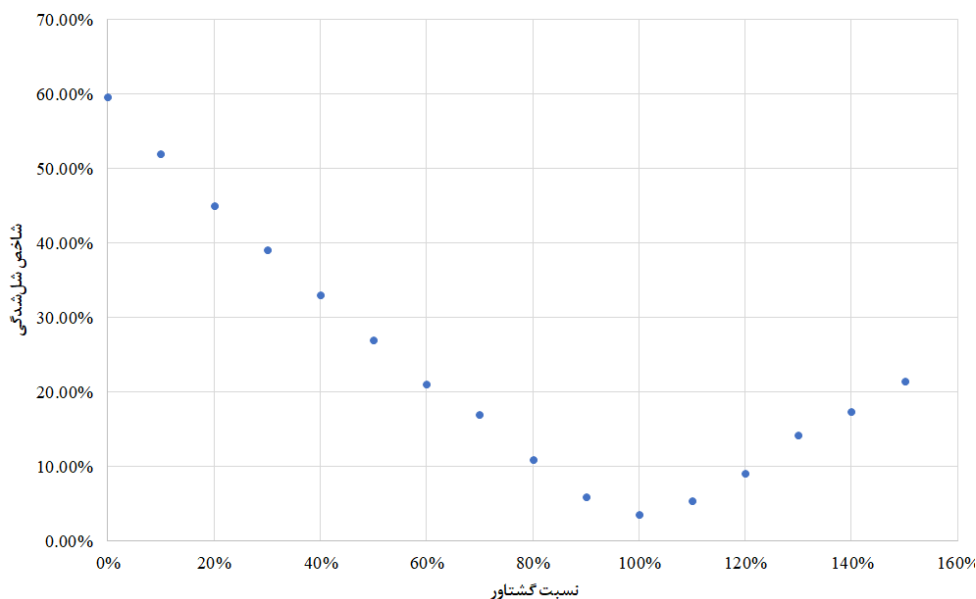
۴-۱- مقدار گشتاور اعمال شده به پیچ شل

در صورتی که عملگر شماره ۶ به عنوان عملگر تحریک کننده سازه در نظر گرفته شده و نسبت گشتاور اعمالی (به پیچ شل) به گشتاور استاندارد، با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، تغییر داده شده و شاخص مدولاسیون سیگنال دریافت شده توسط هر یک از ۱۲ حسگر محاسبه و ترسیم گردد، نمودار آن همانند شکل ۹ خواهد شد:

همانگونه که مشخص است، در صورتی که نسبت گشتاور صفر باشد، یعنی پیچ شل در حالت کاملاً آزاد و رها^۱ باشد، شاخص مدولاسیون به ماکزیمم مقدار خود رسیده و مقادیری که حسگرهای ششم و هفتم نشان می‌دهند، به ترتیب برابر با ۷۹/۱۰ و ۷۳۹/۰ خواهند بود. واضح است که هرچه مقدار گشتاور اعمالی افزایش می‌یابد، نه تنها شاخص مدولاسیون سیگنال‌های دریافت شده کاهش می‌یابد، بلکه مقدار شاخص مدولاسیون سیگنال‌های دریافت شده توسط هر حسگر نیز به مقداری مشخص میل خواهد کرد. برای بررسی بهتر تأثیر گشتاور روی عملکرد روش مدولاسیون و ویراکوستیک شاخصی جدید تحت عنوان شاخص شل شدگی تعریف می‌گردد.

2 Looseness Index (LI)

1 Relax



شکل ۱۰: تأثیر نسبت گشتاور روی شاخص شل‌شدگی

Fig. 10. Effect of bolt torque on looseness index

افزایش مقدار فرکانس تأثیر چندانی روی عملکرد روش نداشته و تنها سبب افزایش جزئی مقادیر شاخص‌های شل‌شدگی خواهد شد.

چنانچه محدوده تغییرات فرکانس اولتراسونیک از ۵۰ کیلوهرتز تا ۳۰۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شود، همانگونه که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز قابل ملاحظه است، نتیجه قابل انتظار بوده و زمانی که فرکانس تحریک به فرکانس‌های طبیعی سازه نزدیک می‌شود، شدت مدولاسیون افزایش یافته و آشکارسازی وجود خرابی در اتصال بهتر نمایان خواهد شد. نکته دیگر که در این آنالیز حساسیت قابل تأمل است این است که به جز زمان‌هایی که فرکانس به فرکانس‌های طبیعی نزدیک می‌شود، افزایش فرکانس سبب کاهش شدت مدولاسیون خواهد شد. در واقع به نظر می‌رسد که افزایش فرکانس تحریک، فرکانس نوسانات امپدانس آکوستیکی را افزایش داده و این فرصت را به سطوح فلنج نخواهد داد که در اثر ارتعاش به خوبی از یکدیگر فاصله گیرند و عملاً اینطور به نظر می‌رسد که دامنه ارتعاش حاصل از تحریک اولتراسونیک با افزایش فرکانس تحریک، کاهش خواهد یافت.

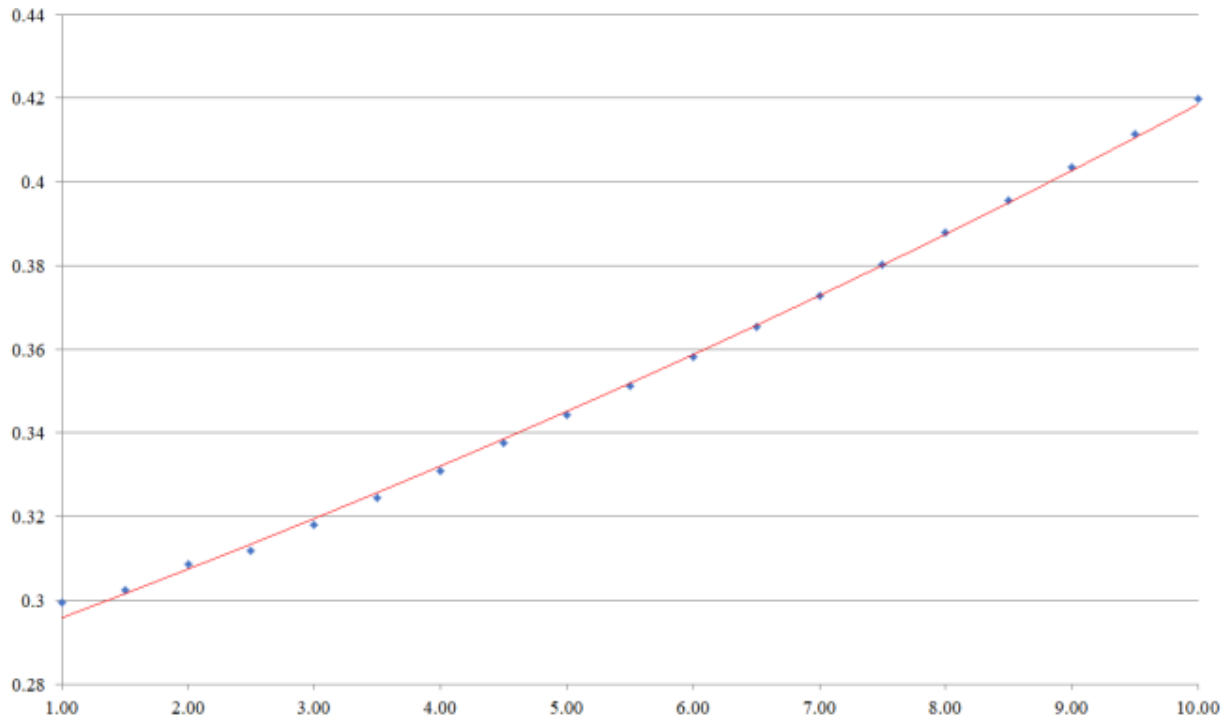
۳-۴- دامنه امواج ارتعاشی و اولتراسونیک

از دیگر عواملی که می‌تواند روی عملکرد روش مدولاسیون ویبرواکوستیک تأثیرگذار باشد، دامنه امواج ارتعاشی و اولتراسونیکی است که به طور همزمان سازه را تحریک می‌کنند. دامنه ارتعاشی و اولتراسونیک

شل‌شدگی نخواهد شد، بلکه مقدار آن را افزایش خواهد داد؛ که این مساله به واسطه ایجاد میدان تنش اضافی در اطراف پیچ بیش از حد سفت شده است که سبب بروز اثر آکوستوالاستیک و ایجاد تغییر در خواص موج در حال عبور از این میدان تنش می‌باشد که خود را به صورت مدولاسیون سیگنال‌ها نشان می‌دهد.

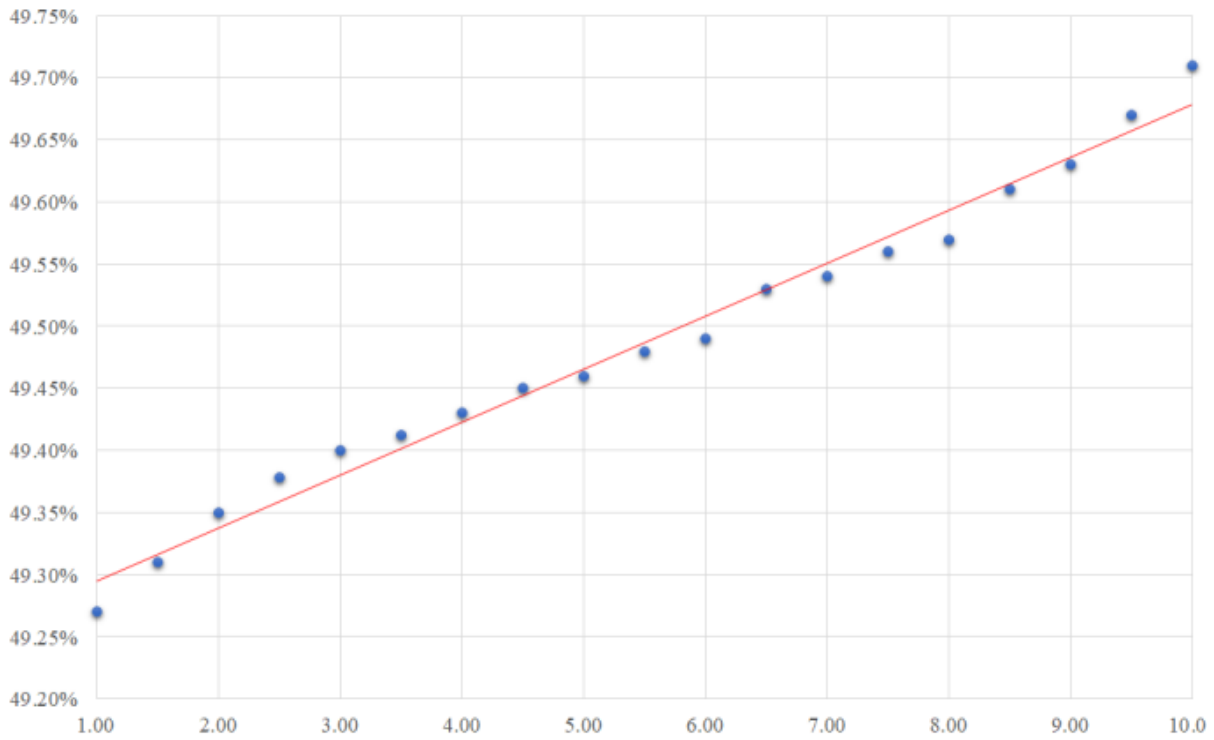
۴-۲- فرکانس‌های ارتعاشی و اولتراسونیک

نتایج ارائه شده در مقالات سال‌های اخیر موید آن است که انتخاب مناسب فرکانس‌های تحریک ارتعاشی و اولتراسونیک تأثیر به سزایی روی عملکرد روش مدولاسیون ویبرواکوستیک خواهد داشت و هرچه فرکانس‌ها به فرکانس‌های طبیعی سازه نزدیک‌تر باشند، به دلیل ایجاد رزونانس و افزایش دامنه ارتعاش و متعاقباً افزایش نوسانات امپدانس آکوستیکی، شدت مدولاسیون افزایش یافته و شل‌شدگی پیچ یا پیچ‌ها بهتر آشکار خواهد شد [۱۱ و ۱۴]. از آنجایی که مطابق جدول ۱ فرکانس‌های ارتعاشی و اولتراسونیک به ترتیب ۳ هرتز و ۱۵۰ کیلوهرتز انتخاب شده‌اند، عملاً آنالیز حساسیت فرکانس ارتعاشی حوالی فرکانس طبیعی اول، موضوعیتی نخواهد داشت. هرچند مطابق آنچه که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص است، چنانچه فرکانس تحریک ارتعاشی از ۱ تا ۱۰ هرتز تغییر داده شود و عملگر تحریک‌کننده اولتراسونیک، عملگر شماره ۶ در نظر گرفته شود؛



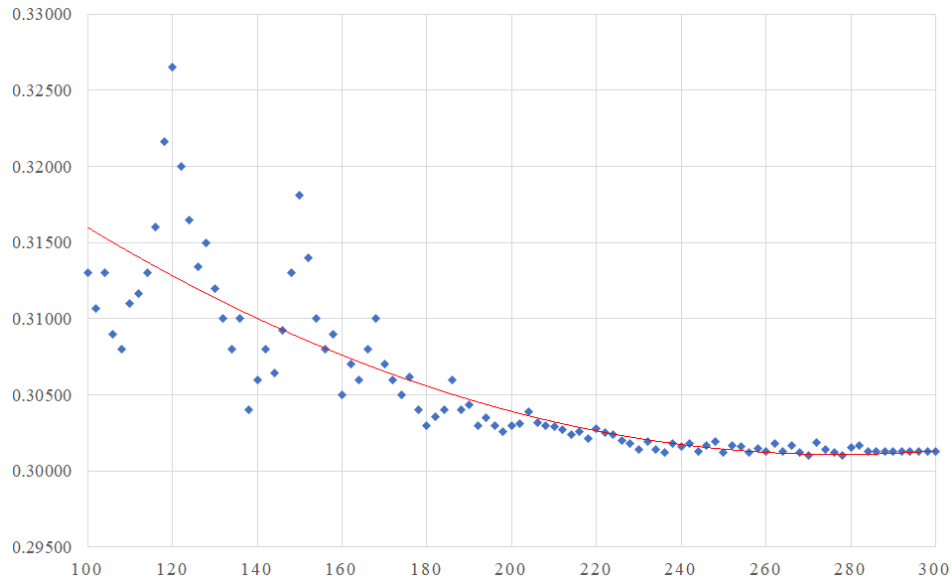
شکل ۱۱: تأثیر فرکانس تحریک ارتعاشی روی شاخص مدولاسیون

Fig. 11. Effect of vibration frequency on modulation index



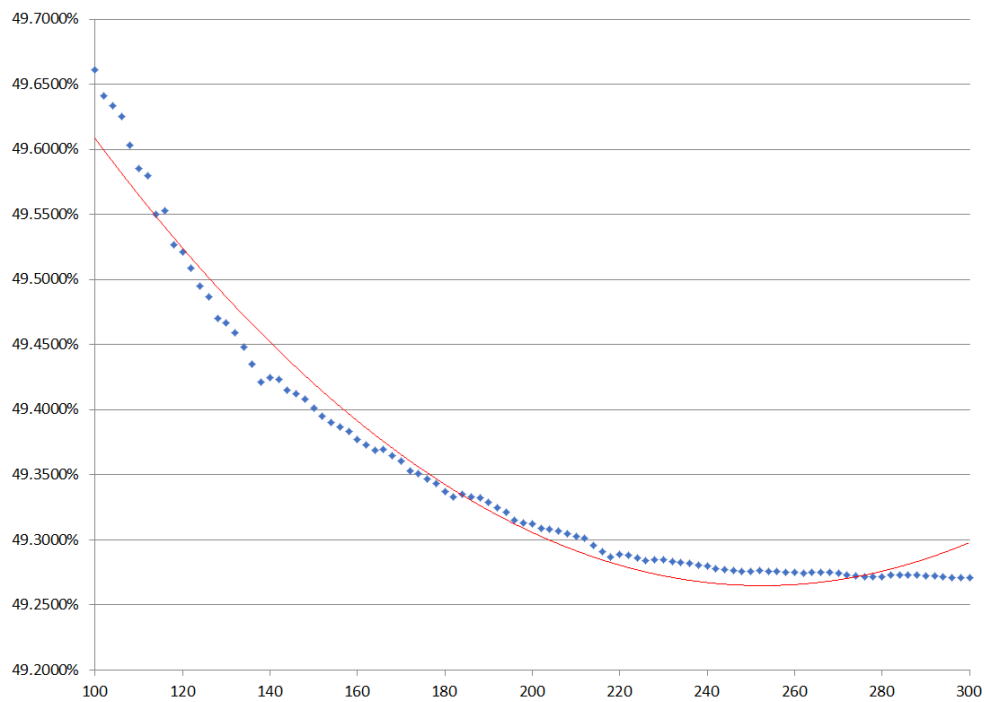
شکل ۱۲: تأثیر فرکانس تحریک ارتعاشی روی شاخص شل‌شدگی

Fig. 12. Effect of vibration frequency on looseness index



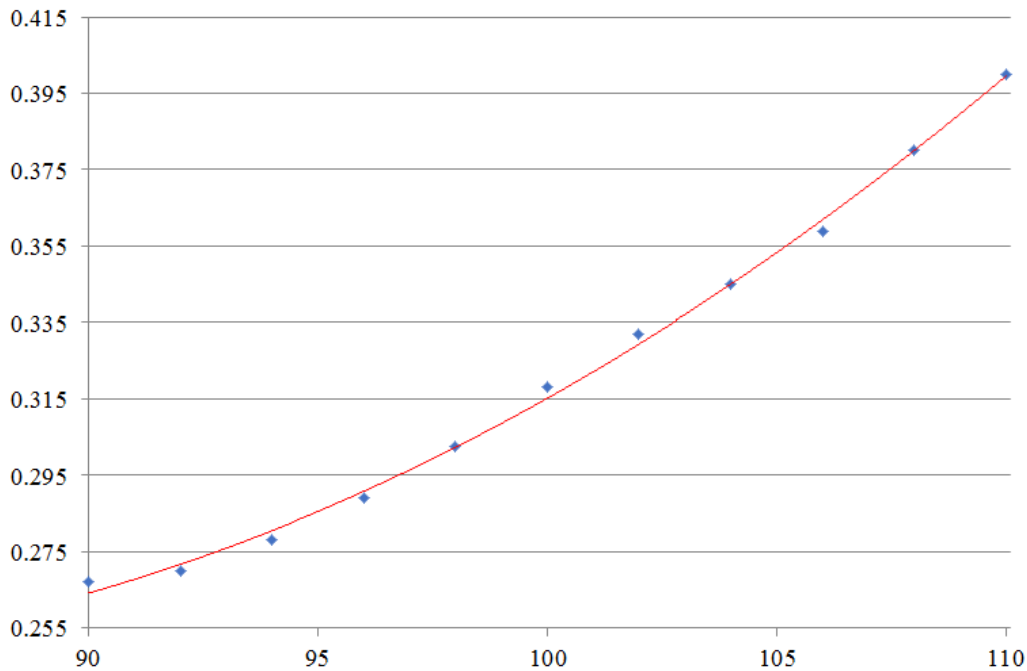
شکل ۱۳: تأثیر فرکانس تحریک اولتراسونیک روی شاخص مدولاسیون

Fig. 13. Effect of ultrasonic frequency on modulation index



شکل ۱۴: تأثیر فرکانس تحریک اولتراسونیک روی شاخص شل شدگی

Fig. 14. Effect of ultrasonic frequency on looseness index



شکل ۱۵: تأثیر دامنه تحریک ارتعاشی روی شاخص مدولاسیون

Fig. 15. Effect of vibration amplitude on modulation index

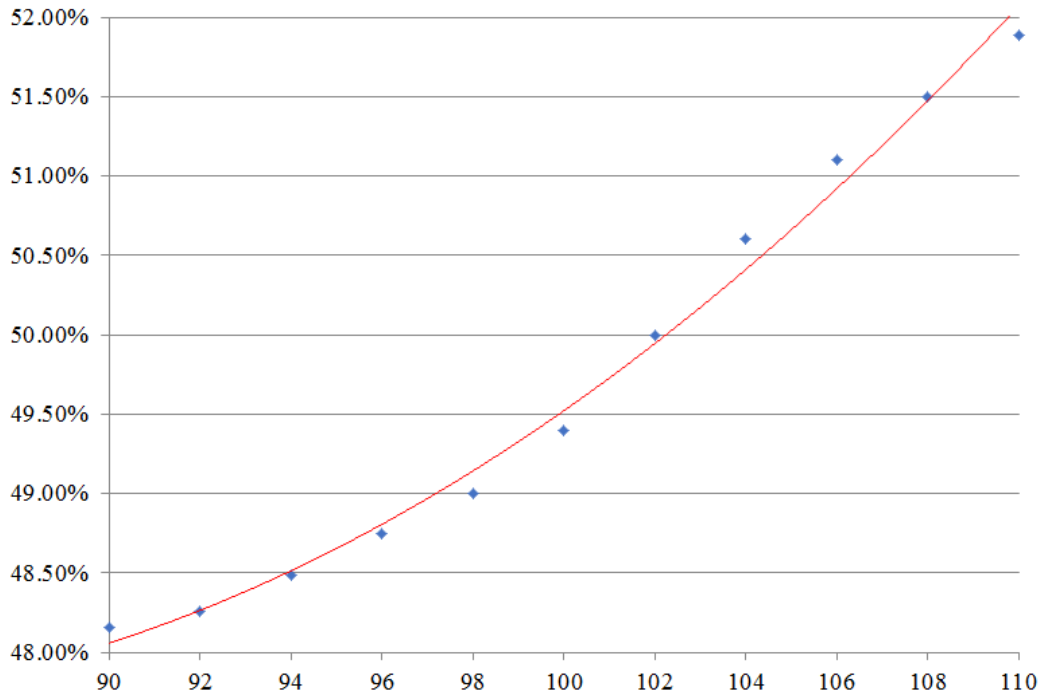
۲۰ نیز قابل مشاهده است، هرچه عملگر تحریک کننده به موقعیت پیچ شل نزدیک تر باشد، موجی عبوری تلفات بیشتری داشته و طبیعتاً انرژی سیگنال کاهش بیشتری خواهد داشت؛ و به طور مشابه نیز نزدیک بودن عملگر تحریک کننده به پیچ شل، سبب افزایش نوسانات سطوح فلنجی گردیده و شدت مدولاسیون ثبت شده توسط حسگر، افزایش خواهد یافت.

اگرچه آنالیز حساسیت موقعیت حسگرها عملاً در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است و در آن ها به وضوح مشخص است که نزدیکی حسگر به موقعیت پیچ یا پیچ های شل سبب افزایش کارایی روش مدولاسیون و ویرواکوستیک خواهد شد؛ اما نکته بسیار مهم نهفته در این دو نمودار این است که رفتار پارامتر شدت مدولاسیون و همچنین رفتار پارامتر انرژی سیگنال دریافتی تقریباً مستقل از موقعیت عملگر تحریک کننده می باشد. در واقع اگرچه همانگونه که پیش از این گفته شد، نزدیکی عملگر تحریک کننده به موقعیت پیچ شل سبب افزایش بیشتر شاخص مدولاسیون و یا کاهش بیشتر انرژی سیگنال دریافتی خواهد شد؛ اما عملگر تحریک کننده هرچایی که قرار داشته باشد، به هر حال پارامترهای محاسبه شده توسط حسگر، به خوبی وجود خرابی و موقعیت پیچ شل را نمایان خواهند نمود و این مساله موید آن است که این روش با استفاده از تنها یک یا دو عملگر نیز به خوبی

در نظر گرفته شده در این تحلیل به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ نیوتن می باشند؛ که جهت آنالیز حساسیت به ترتیب بازه های ۹۰-۱۱۰ نیوتن برای موج ارتعاشی و ۱۰۰-۱۰ نیوتن برای موج اولتراسونیک مد نظر قرار داده شده است. مطابق شکل های ۱۵ تا ۱۸، همانگونه که انتظار می رود، با افزایش دامنه موج ارتعاشی و اولتراسونیک، نوسانات اعمال شده به سطوح فلنج افزایش یافته و به واسطه افزایش امپدانس اکوستیکی، شدت مدولاسیون افزایش یابد. هرچند همانگونه که در شکل های ۱۶ و ۱۸ نیز قابل ملاحظه است، تأثیر این افزایش روی شاخص شل شدگی چندان قابل توجه نبوده و از بین دامنه موج اولتراسونیک و دامنه موج ارتعاشی، این موج ارتعاشی است که نوسانات مقدار دامنه آن، تأثیر بیشتری روی شاخص مدولاسیون و شاخص شل شدگی خواهد گذاشت.

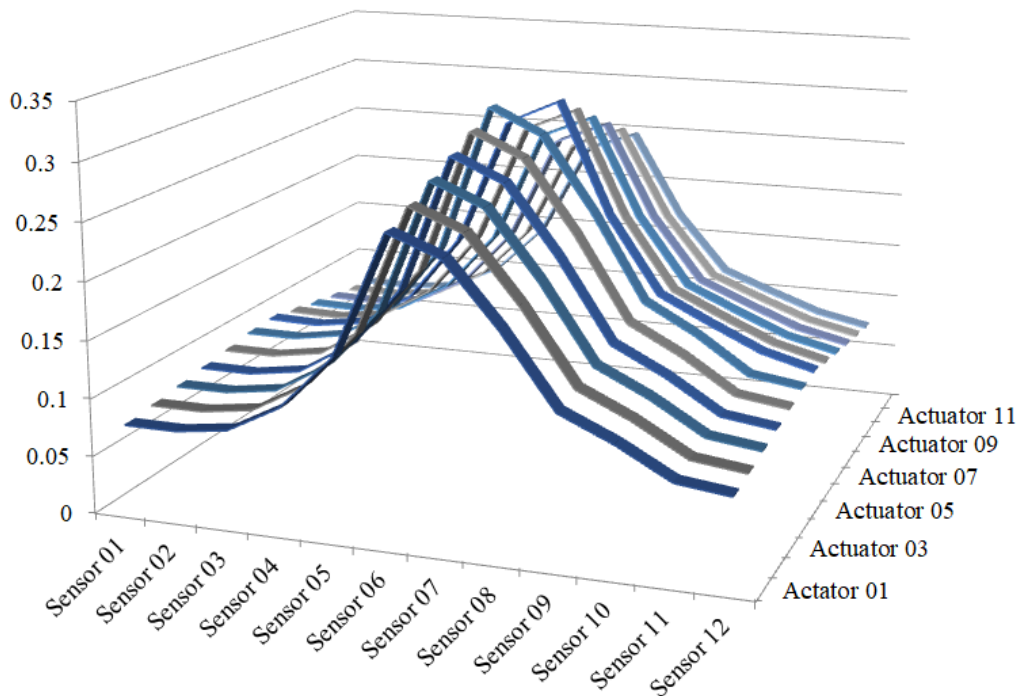
۴-۴- محل قرارگیری حسگرها و عملگرها

برای آنالیز حساسیت موقعیت عملگر، حسگر شماره ۶ به عنوان تنها دریافت کننده سیگنال مدوله شده در نظر گرفته شده است و برای بررسی تأثیر موقعیت حسگر نیز عملگر شماره ۶ به عنوان تنها عملگر ارسال کننده موج اولتراسونیک انتخاب گردیده است. همانگونه که در شکل های ۱۹ و



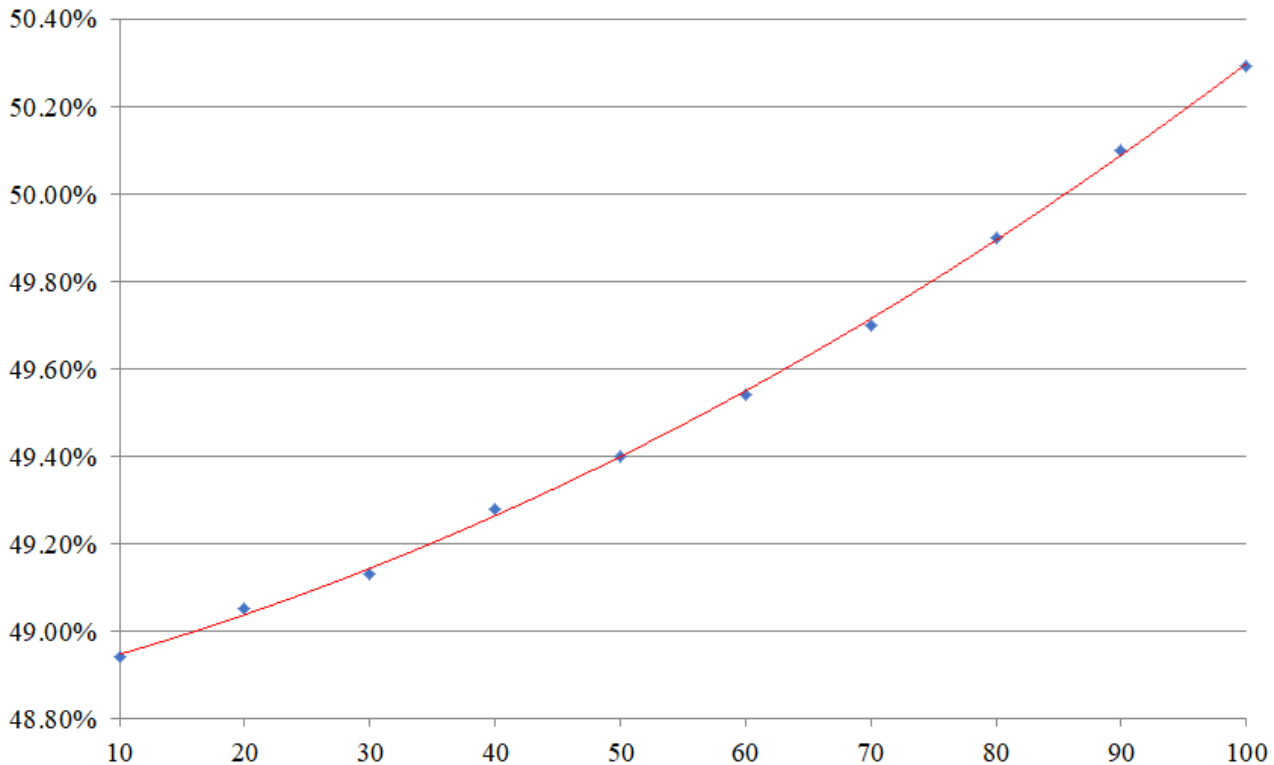
شکل ۱۶: تأثیر دامنه تحریک ارتعاشی روی شاخص شل شدگی

Fig. 16. Effect of vibration amplitude on looseness index



شکل ۱۷: تأثیر دامنه تحریک اولتراسونیک روی شاخص مدولاسیون

Fig. 17. Effect of ultrasonic amplitude on modulation index



شکل ۱۸: تأثیر دامنه تحریک اولتراسونیک روی شاخص شل‌شدگی

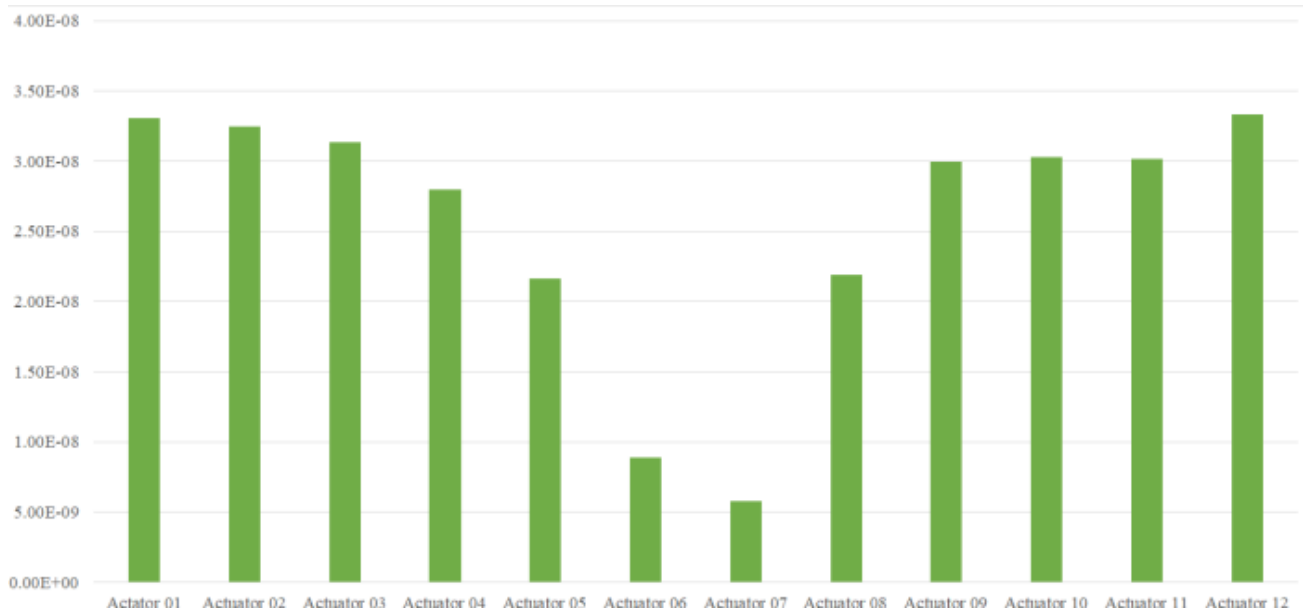
Fig. 18. Effect of ultrasonic amplitude on looseness index

برای آموزش شبکه به یک سری داده آموزشی نیاز است. هرچه فضای مسئله بزرگتر باشد، داده‌های بیشتری برای آموزش شبکه نیاز است. در مطالعه حاضر تعداد ۵۰ مجموعه داده در بازه ذکر شده برای ایجاد شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شود. از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه، ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی و از ۱۰ درصد مابقی برای تست شبکه آموزش داده شده، استفاده می‌شود. داده‌های موجود به عنوان ورودی به برنامه متلب داده می‌شود تا یک شبکه عصبی شکل بگیرد. متاسفانه یک قاعده کلی برای تعیین کردن بهترین ساختار شبکه‌های عصبی وجود ندارد و این کار به صورت سعی و خطا انجام می‌شود. برنامه‌ای در نرم‌افزار متلب نوشته می‌شود که برای شبکه با یک تا سه لایه میانی، تعداد ۲ تا ۲۰ نرون را برای الگوریتم‌های مختلف پس‌انتشار (lm, bfg, scg) امتحان کرده و بهترین حالت ممکن را مشخص کند. بدیهی است که تعداد نرون‌های لایه ورودی و خروجی به ترتیب به تعداد پارامترهای ورودی و تعداد توابع هدف بستگی دارد. بنابراین، بر اساس آنچه که ذکر شد، در لایه‌های ورودی و خروجی به ترتیب تعداد ۴ و یک نرون در نظر گرفته می‌شود.

قابل پیاده‌سازی خواهد بود.

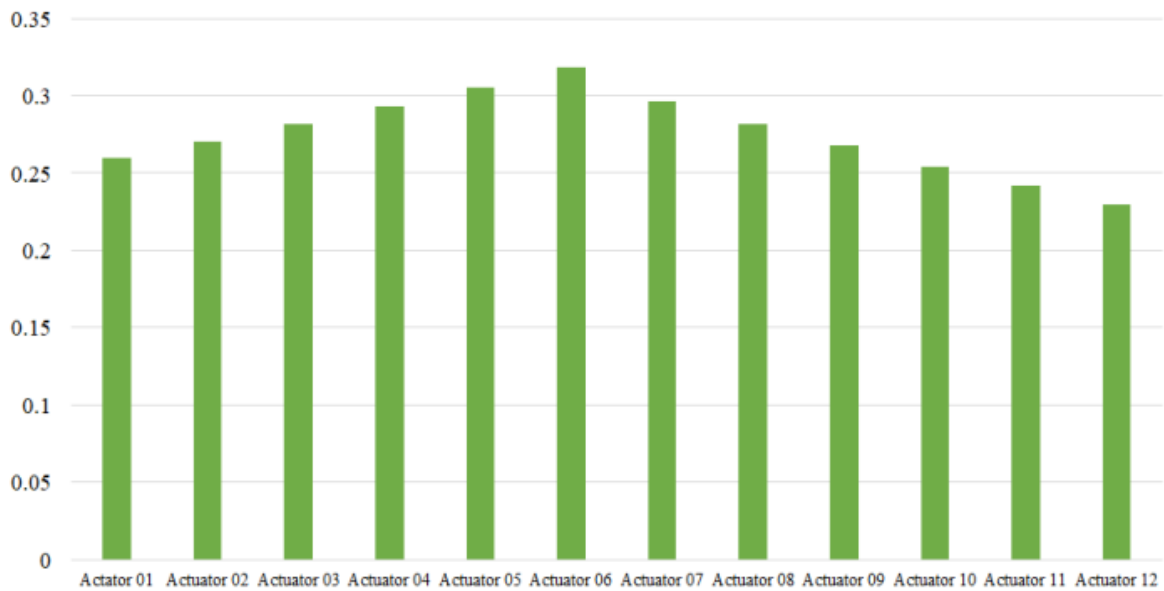
۵- مدل‌سازی به کمک شبکه عصبی

از آنجا که محاسبه میزان شل‌شدگی پیچ بر اساس یک رابطه صریح بیان نمی‌شود و محاسبه آن از طریق نرم‌افزار المان محدود و با صرف زمان زیاد صورت می‌گیرد، لذا پیشنهاد می‌گردد که از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت پیش‌بینی شاخص شل‌شدگی پیچ استفاده شود. شبکه عصبی مصنوعی می‌تواند رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله را بدون یادگیری فرآیند حل مسئله پیدا کند. بنابراین یک شبکه عصبی که به خوبی آموزش دیده باشد می‌تواند شاخص مورد نظر را با دقت بسیار خوب و با سرعت بسیار زیاد تخمین بزند. ورودی‌های شبکه همان پارامترهای تاثیرگذار بر شاخص شل‌شدگی می‌باشند که عبارتند از فرکانس اولتراسونیک، فرکانس ارتعاشی، دامنه ارتعاشی و دامنه التراسونیک. کران پایین این پارامترها به ترتیب ۵۰۰۰، ۱، ۹۰ و ۱۰ و کران بالای آن‌ها به ترتیب ۱۵۰۰۰۰، ۵، ۱۱۰ و ۱۰۰ می‌باشد.



شکل ۱۹: تأثیر موقعیت عملگر روی انرژی سیگنال دریافتی

Fig. 19. Effect of actuator location on energy of received signal



شکل ۲۰: تأثیر موقعیت عملگر روی شدت مدولاسیون

Fig. 20. Effect of actuator location on modulation of received signals

Table 2. Comparison of looseness index which calculated by ABAQUS and ANN

جدول ۲: مقایسه بین مقادیر شاخص شل‌شدگی بدست آمده از مدل‌سازی در آباکوس و شبکه عصبی

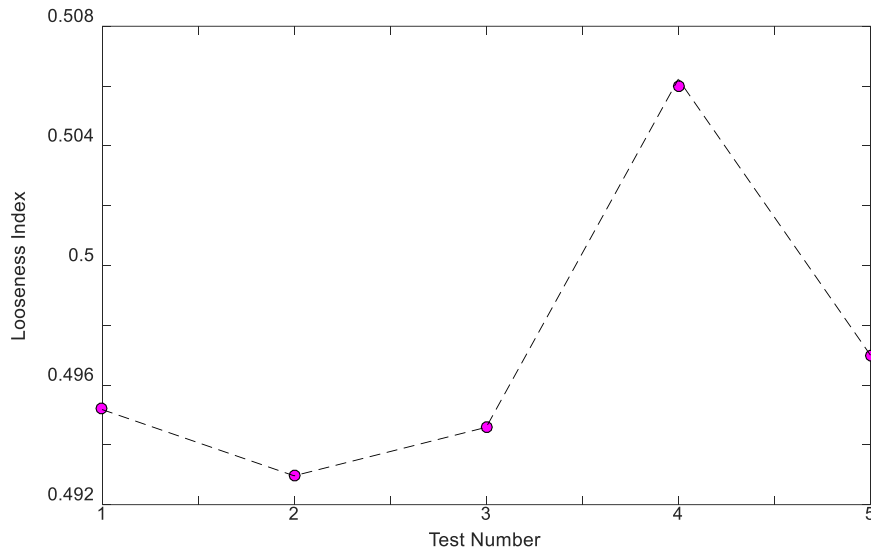
شماره نمونه	مقادیر ورودی (<i>UF, VF, VA, UA</i>)	مقدار هدف	مقدار خروجی	درصد خطا
۱	[۱۲۰ ۳ ۱۰۰ ۵۰]	۰/۴۹۵۲	۰/۴۹۵۲	۰/۰۱۵
۲	[۲۱۴ ۳ ۱۰۰ ۵۰]	۰/۴۹۳۰	۰/۴۹۳۰	۰/۰۲۵
۳	[۱۵۰ ۵ ۱۰۰ ۵۰]	۰/۴۹۴۶	۰/۴۹۴۶	۰/۰۱۱
۴	[۱۵۰ ۳ ۱۰۴ ۵۰]	۰/۵۰۶۲	۰/۵۰۶۰	۰/۰۱۸
۵	[۱۵۰ ۳ ۱۰۰ ۷۰]	۰/۴۹۷۰	۰/۴۹۷۰	۰/۰۲۱

سادگی عملکرد و تجهیزات ارزان قیمت مورد نیاز، هزینه‌های نسبتاً پایینی را به بازرسین تحمیل خواهد نمود. علاوه بر این مشاهده گردید که زمانی که اتصال دچار شل‌شدگی می‌گردد، ارتعاشات رخ داده در محل اتصال، حین عبور موج اولتراسونیک، سبب بروز مدولاسیون خواهد شد که روش مدولاسیون و ویبرواکوستیک به خوبی قادر است که این شل‌شدگی را تشخیص دهد. در این میان پارامترهای مهمی هستند که می‌توانند روی کارایی روش تاثیرگذار باشند که مهمترین آن‌ها عبارتند از: فرکانس اولتراسونیک و ارتعاشی، دامنه موج ارتعاشی و اولتراسونیک، محل قراگیری حسگر، عملگر و یا لرزاننده. همانگونه که بیان گردید، هرچه فرکانس‌های اولتراسونیک و ارتعاشی نزدیک‌تر به فرکانس‌های طبیعی سازه باشد، کارایی روش افزایش خواهد یافت؛ هرچند در حالت کلی افزایش فرکانس اولتراسونیک سبب کاهش نسبی شاخص شل‌شدگی می‌گردد، در حالی که افزایش فرکانس ارتعاشی، افزایش اندک شاخص شل‌شدگی را به همراه خواهد داشت. رفتار شاخص شل‌شدگی در مقابل افزایش دامنه تحریک اولتراسونیک و ارتعاشی تقریباً یکسان بوده و در هر دو حالت افزایش خواهد یافت. علاوه بر این نزدیک بودن عملگر به پیچ و مهره و همچنین دور بودن حسگر، سبب عملکرد بهتر روش مدولاسیون و ویبرواکوستیک در تشخیص و ارزیابی شل‌شدگی اتصالات پیچی خواهد شد.

دیده می‌شود که یک لایه میانی با تعداد ۵ نرون و آموزش توسط الگوریتم *lm*، شبکه مناسب‌تری را ارائه می‌کند. پس از آموزش شبکه نیاز است تا ارتباط بین خروجی‌های بدست آمده از شبکه عصبی و خروجی‌های واقعی (نرم‌افزار آباکوس) نسبت به دسته آموزشی سنجیده شود. بدین منظور، ۵ مجموعه داده تست مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و میزان تطابق نتایج شبکه عصبی با نتایج نرم‌افزار عددی بررسی می‌شود. این مقایسه در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. همانگونه که دیده می‌شود، شبکه آموزش دیده می‌تواند نتایج مورد نظر را با دقت بسیار بالایی پیش‌بینی کند به طوری که در ۴ مجموعه داده، اختلاف نتایج تا چهار رقم اعشار، کمتر از ۲۵ هزارم درصد می‌باشد. قابل ذکر است که زمان پیش‌بینی نتایج توسط شبکه عصبی آموزش دیده بسیار ناچیز و کمتر از یک ثانیه می‌باشد. مقایسه بین نتایج دو روش را همچنین می‌توان در شکل ۲۱ مشاهده کرد. همانگونه که از این شکل بر می‌آید نتایج بر همدیگر منطبق هستند.

۶- نتیجه‌گیری و بحث

همانگونه که بیان گردید روش مدولاسیون و ویبرواکوستیک به واسطه ماهیت غیرخطی بودن خود نه تنها دقت بالاتری در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم همچون روش‌های اولتراسونیک، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس و یا روش‌های مبتنی بر ارتعاشات دارد؛ بلکه به واسطه



شکل ۲۱: مقایسه بین مقادیر شاخص شل شدگی بدست آمده از مدل سازی در آباکوس و شبکه عصبی

Fig. 21. Comparison of looseness index which calculated by ABAQUS and ANN

nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection, NDT & E International, 39(3) (2006) 184-194.

[6] K.-A. Van Den Abeele, P.A. Johnson, A. Sutin, Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, part I: nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS), Journal of Research in Nondestructive Evaluation, 12(1) (2000) 17-30.

[7] D. Donskoy, A. Sutin, A. Ekimov, Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing, Ndt & E International, 34(4) (2001) 231-238.

[8] D.M. Donskoy, A.M. Sutin, Vibro-acoustic modulation nondestructive evaluation technique, Journal of intelligent material systems and structures, 9(9) (1998) 765-771.

[9] M. Meo, U. Polimeno, G. Zumpano, Detecting damage in composite material using nonlinear elastic wave spectroscopy methods, Applied composite materials,

منابع

[1] S.M.Y. Nikravesh, M. Goudarzi, A Review Paper on Looseness Detection Methods in Bolted Structures, Latin American Journal of Solids and Structures, 14(12) (2017) 2153-2176.

[2] V.Y. Zaitsev, A. Sutin, I.Y. Belyaeva, V. Nazarov, Nonlinear interaction of acoustical waves due to cracks and its possible usage for cracks detection, Modal Analysis, 1(3) (1995) 335-344.

[3] V. Zaitsev, P. Sas, M. Wevers, Nonlinear modulation methods of structural damage detection based on dissipative nonlinear effects, in: Proceedings of the International Seminar on Modal Analysis, KU Leuven; 1998, 2001, pp. 233-242.

[4] V. Kazakov, A modulation crack-detection technique: I. Instrumental method of implementation, Russian Journal of Nondestructive Testing, 42(11) (2006) 709-716.

[5] V. Zaitsev, V. Nazarov, V. Gusev, B. Castagnede, Novel

- [15] T.H. Ooijevaar, Vibration based structural health monitoring of composite skin-stiffener structures, PhD Thesis, Universiteit Twente, (2014)
- [16] M. Meo, G. Zumpano, Nonlinear elastic wave spectroscopy identification of impact damage on a sandwich plate, *Composite structures*, 71(3-4) (2005) 469-474.
- [17] D. Broda, W. Staszewski, A. Martowicz, T. Uhl, V. Silberschmidt, Modelling of nonlinear crack-wave interactions for damage detection based on ultrasound—A review, *Journal of Sound and Vibration*, 333(4) (2014) 1097-1118.
- [18] J.E. Shigley, C.R. Mischke, R.G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*, International, Mc-Graw Hill Book Co., Singapore, 1989.
- [19] J.A. Guinto, L.F. Rose, P. Blanloeuil, M. Veidt, W. Chiu, H. Sohn, C.H. Wang, Baseline-Free Characterisation of a Delamination using Nonlinear Vibro-Acoustic Modulation, 8th Eur. Work. Struct. Heal. Monit. (EWSHM 2016), (2016) 5-8.
- 15(3) (2008) 115-126.
- [10] V. Zaitsev, P. Sas, Nonlinear response of a weakly damaged metal sample: a dissipative modulation mechanism of vibro-acoustic interaction, *Journal of Vibration and Control*, 6(6) (2000) 803-822.
- [11] F. Amerini, M. Meo, Structural health monitoring of bolted joints using linear and nonlinear acoustic/ultrasound methods, *Structural health monitoring*, 10(6) (2011) 659-672.
- [12] J. Jaques, D. Adams, Using Impact Modulation to Identify Loose Bolts on a Satellite, PURDUE UNIV LAFAYETTE IN, 2011.
- [13] M.G. S. M. Y. Nikraves, Looseness Detection and Assessment of Flange Type Joints Using Vibro-Acoustic Modulation Method, in: 8th International Conference on Acoustics and Vibration, Iran (Tehran), 2018. (In Persian)
- [14] F. Amerini, E. Barbieri, M. Meo, U. Polimeno, Detecting loosening/tightening of clamped structures using nonlinear vibration techniques, *Smart materials and structures*, 19(8) (2010) 085013.