

آنالیز مودال عددی و آزمایشگاهی پیل سوختی ۴۰۰ وات

محمد مهدی محمدی، محمد مهدی برزگری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۲-۰۶
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۳۱
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۱۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۱۱

کلمات کلیدی:

پیل سوختی پلیمری
آنالیز مودال
فرکانس طبیعی
شبیه‌سازی اجزای محدود

خلاصه: پیل سوختی پلیمری با توجه به وجود صفحات متعدد با هندسه و خواص مکانیکی متفاوت به عنوان یک سیستم با ساختار پیچیده در نظر گرفته می‌شود. شناخت این ساختار جهت طراحی پیل سوختی در برابر بارهای دینامیکی وارده مانند شوک و ارتعاش امری ضروری می‌باشد. در این مقاله، آزمون مودال پیل سوختی ۴۰۰ وات که از ۴ سلول تشکیل شده است انجام گردید و داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده با نتایج شبیه‌سازی عددی مورد مقایسه قرار گرفت. پیل سوختی مورد نظر در جهات عرضی و طولی تحریک شده و نتایج خروجی سنسورها در چند نقطه ثبت گردید. سپس، با تفسیر نتایج در حوزه زمان و استفاده از روش پاسخ فاز، فرکانس طبیعی عرضی و طولی اول مدل استخراج گردید. نتایج آزمون نشان داد که فرکانس عرضی اول مدل ۵۰۰ هرتز و فرکانس طولی اول حدود ۲۵۰۰ هرتز است. همچنین، مقایسه فرکانس‌های به دست آمده از آزمون و تحلیل عددی، اختلاف حداکثر ۸ درصد را نشان می‌دهد. بنابراین، تحلیل عددی مدل با جزئیات کافی می‌تواند به شکل مناسبی خواص ارتعاشی مدل واقعی را پوشش دهد. همچنین، نتایج نشان داد که با تغییر ۴۵ درصدی خواص هندسی و مکانیکی غشا، فرکانس طبیعی پیل سوختی تقریباً ۴٪ تغییر می‌یابد. حذف صفحات غشا علاوه بر کاهش تعداد المان‌های مدل منجر به کاهش قیود تماس نیز می‌گردد، به طوری که در پیل سوختی مورد نظر هزینه محاسباتی با حذف صفحات غشا در مدل عددی ۱۷٪ کاهش یافته است.

۱- مقدمه

وقتی که سازه پیل سوختی در محیط ارتعاشی قرار می‌گیرد، ممکن است صفحات بر روی یکدیگر بلغزند یا بر اثر شکست موضعی، نشستی گازهای هیدروژن و اکسیژن ایجاد شود که این نشستی می‌تواند منجر به ترکیب گازهای واکنشگر گشته و در پیل سوختی ایجاد انفجار نماید [۱]. بنابراین، بررسی رفتار پیل سوختی در برابر این نوع بارگذاری‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بر این اساس در سال‌های اخیر، بررسی رفتار ارتعاشی پیل سوختی مورد توجه محققین قرار گرفته است. راجالاکشمی و همکاران [۲] یک پیل سوختی شامل ۳۰ سلول با سطح فعال ۳۳۰ سانتی‌متر مربع را مورد آزمایش قرار دادند. صفحات دوقطبی مورد استفاده در این پیل سوختی از جنس گرافیت بود. عملکرد پیل سوختی پس از تست ارتعاشی مجدداً مورد بررسی

پیل سوختی یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در سال‌های اخیر استفاده از پیل سوختی به عنوان یک منبع انرژی جدید و پاک در حمل و نقل زمینی، هوایی و دریایی که با شوک و ارتعاش همراه هستند، مورد توجه قرار گرفته است. از لحاظ سازه‌ای، سری پیل سوختی از اجزای متعددی شامل صفحات دوقطبی، صفحات جمع‌کننده جریان، لایه عبور گاز، غشا، واشرهای آب‌بند و صفحات انتهایی تشکیل شده است که بوسیله فشار مهار ایجاد شده بر صفحات انتهایی در کنار هم قرار می‌گیرند.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: barzegari@mut.ac.ir



قرار گرفت و مشاهده شد که توان پیل سوختی از ۴۲۵ وات به ۴۱۰ وات کاهش یافت. روس و همکاران [۳ و ۴] تست ارتعاشی را روی یک پیل سوختی برای کاربردهای هواپیمایی انجام دادند. نتایج تست نشان داد که تغییرات نرخ نشتی بین آغاز و پایان مجموعه تست‌ها چشمگیر نبوده و هیچ مشکلی برای مجموعه غشا و الکتروود یا صفحات دیگر سری پیل سوختی مشاهده نشد. هو و همکاران [۵] با استفاده از یک میز آزمایش شبیه‌ساز جاده و یک میز شبیه‌ساز چندمحوره شش-کاناله، ارزیابی شوک و ارتعاش پیل سوختی تقویت‌شده را در زمان ۱۵۰ ساعت انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که ولتاژ پیل سوختی تحت شرایط ارتعاش، دچار نوسانات می‌شود و حدود ۲۰ ثانیه زمان می‌برد تا به شرایط پایدار جدید برسد. دیلیوان و همکاران [۶] اثر ارتعاش مکانیکی روی انباشتگی و رشد ذرات پلاتین در غشای پیل سوختی را مورد بررسی قرار دادند. مقایسه چندگانه آماری نشان داد که اندازه‌های متوسط ذرات پلاتین مربوط به لایه کاتالیزور تست‌شده تحت شرایط ارتعاش مکانیکی مختلف متفاوت هستند. شاکری و ایمن [۷] اثرات بارها یا ارتعاشات مکانیکی روی یک پیل سوختی پلیمری کاتد باز را مورد بررسی قرار دادند. پیل سوختی مورد ارزیابی دارای سطح فعال ۶۰ سانتی متر مربع و وزن ۲/۵۲ کیلوگرم بوده است. برای اعمال بار و ارتعاش مکانیکی پیل سوختی، یک مولد ارتعاش الکترو-دینامیکی مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر مطالعه عملکرد پیل سوختی در این تست‌ها، قابلیت اطمینان و آب‌بندی پیل سوختی طبق استاندارد ارزیابی شد. نتایج کلی نشان داد که ارتعاشات مکانیکی با شرایط در نظر گرفته‌شده اثر چشمگیری روی عملکرد پیل سوختی در مدت زمان تست نداشته و تنها نشتی هیدروژن به مقدار جزئی افزایش یافته است.

با پیشرفت امکانات محاسباتی، تحلیل‌های عددی به طور گسترده در زمینه تحلیل پاسخ دینامیکی ساختارهای مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مشکلات تحلیل عددی ساختار مکانیکی پیل سوختی، وجود صفحات متعدد در پیل سوختی است که منجر به پیچیدگی مدل عددی می‌شود. دشیپانده و همکاران [۸] مودهای ارتعاشی یک پیل سوختی پلیمری را به روش اجزای محدود تحلیل کردند. آن‌ها به کمک شکل مودها نشان دادند که در فرکانس‌های مورد بررسی تشدید در لبه‌های آب‌بند رخ می‌دهد که این امر باعث افزایش احتمال نشتی در پیل سوختی می‌شود. وو و همکاران [۹] به شکل

عددی پاسخ ارتعاشی یک پیل سوختی بزرگ را تحت بارگذاری ضربه شدید خارجی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که اثر محل پیچ‌های سیستم مهار تأثیر قابل توجهی بر مقاومت سری پیل سوختی در مقابل ضربه خارجی دارد. به علاوه، سلول‌های نزدیک به صفحات انتهایی در برابر ضربه آسیب پذیرتر از سایر سلول‌ها هستند. ونگ و همکاران [۱۰] پیل سوختی پلیمری را به صورت یک سازه کامپوزیتی چندلایه ساده‌سازی نمودند و پاسخ ارتعاشی یک سلول واحد را تحلیل کردند. اثر ضخامت هر جز، مدول الاستیسیته و چگالی بر مودهای ارتعاشی مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از نواقص پژوهش آن‌ها، عدم بررسی اثر آب‌بندها بر خواص ارتعاشی پیل سوختی می‌باشد. لیو و همکاران [۱۱] جهت مطالعه پاسخ ارتعاشی پیل سوختی به روش اجزای محدود، از روش آنالیز مودال استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از این روش توانستند مودهای موضعی را از مودهای اصلی سازه جداسازی کنند. علاوه بر این، اثر نیروی مهار بر فرکانس‌های مدل مورد بررسی قرار گرفت. مرور فوق به روشی نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر مطالعات اندکی در زمینه بررسی رفتار ارتعاشی پیل سوختی صورت گرفته است.

در این پژوهش، آزمون مودال پیل سوختی ۴۰۰ وات که از ۴ سلول تشکیل شده است انجام گردید و داده‌های آزمایشگاهی به دست‌آمده با نتایج شبیه‌سازی عددی مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی آزمایشگاهی خواص مودال یک پیل سوختی با ابعاد واقعی، شبیه‌سازی عددی پیل سوختی با جزئیات کامل و صحت‌گذاری مدل عددی و ارائه راهکارهای ساده‌سازی مدل‌سازی عددی پیل سوختی از جمله نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

در بخش دوم این مقاله، مقدمه‌ای بر پاسخ فرکانسی و روش استفاده شده در مقاله بیان می‌گردد. سپس، آنالیز مودال پیل سوختی مورد نظر در بخش سوم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی پیل سوختی و نحوه استخراج فرکانس‌های طبیعی شرح داده می‌شود (بخش چهارم). در نهایت، نتایج آزمون مودال و شبیه‌سازی عددی در بخش پنجم مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۲- مقدمه‌ای بر پاسخ فرکانسی

در آنالیز مودال، مدل ریاضی سیستم‌های مکانیکی در حوزه فرکانس تحلیل می‌گردد. نسبت دامنه پاسخ به دامنه تحریک در

قابل استخراج می‌باشد.

$$\theta(\omega) = \arctan \left[\frac{-2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right]. \quad (5)$$

همانطور که مشاهده می‌گردد، اختلاف فاز میان تحریک و پاسخ در حالت تشدید، $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$ ، ۹۰ درجه می‌باشد. با دور شدن از فرکانس طبیعی سیستم اختلاف فاز به صفر یا ۱۸۰ درجه نزدیک می‌گردد. بنابراین، هنگام عبور از فرکانس طبیعی سیستم، اختلاف فاز بین پاسخ و تحریک ۱۸۰ درجه تغییر می‌کند. بر این اساس، علاوه بر دامنه دامنه تابع پاسخ فرکانسی، فاز آن نیز می‌تواند برای تشخیص فرکانس سیستم مورد استفاده قرار گیرد.

۳- آزمون مودال پیل سوختی

برای انجام آزمون مودال، پیل سوختی به کمک تسمه‌های لاستیکی روی یک چارچوب معلق می‌گردد تا شرایط مرزی آزاد را فراهم آورد (شکل ۱). این شرایط مرزی جهت تطابق با نتایج عددی مناسب می‌باشد. همچنین، تحریک خارجی به کمک شیکر به مجموعه وارد می‌شود. شیکر به نطقه‌ای از جسم متصل می‌گردد و نیرویی را با دامنه مشخص به مجموعه اعمال می‌نماید. فرکانس نیروی هارمونیک یک طیف فرکانسی را جاروب می‌کند. سنسورهایی به نواحی مختلف جسم چسبانده می‌شود که پاسخ مدل را ثبت می‌کنند. هنگام عبور فرکانس تحریک از فرکانس طبیعی مدل، دامنه داده‌های ثبت شده افزایش می‌یابد. با ثبت این داده‌ها و انجام آنالیز پاسخ فرکانسی^۲ یا تبدیل فوریه سریع^۳، فرکانس‌های مدل به صورت موضعی و کلی استخراج می‌گردد. در مجموعه‌ی تست‌های انجام شده، سازه پیل سوختی در دو راستای عرضی و طولی تحریک می‌شود و پاسخ به طور همزمان توسط سه عدد سنسور شتاب‌سنج که بر روی صفحات انتهایی و صفحات جمع‌کننده جریان پیل سوختی نصب شده‌اند، خوانده می‌گردد.

برای انجام آزمون مودال، پیل سوختی از ۱۰ ناحیه توسط تسمه‌های لاستیکی معلق و با استفاده از شیکر تحریک می‌شود. تحریک پیل سوختی از طریق شیکر در راستاهای عرضی و طولی انجام

سیستم یک درجه آزادی تحت تحریک هارمونیک به صورت معادله (۱) به دست می‌آید [۱۱].

$$X_0 / f = \frac{1}{m} \frac{1}{-\omega^2 + 2j\xi\omega_n\omega + \omega_n^2}, \quad (1)$$

در رابطه بالا ω فرکانس تحریک، ω_n فرکانس طبیعی، ξ ضریب میرایی، X دامنه پاسخ و f دامنه تحریک می‌باشد، می‌تواند به صورت معادله (۲) بازنویسی شود.

$$X_0 / f = \frac{1}{k} \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + 2j\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) + 1}. \quad (2)$$

این رابطه به شکل بدون بعد نیز قابل نوشتن می‌باشد (معادله (۳)).

$$kX_0 / f = Y(\omega) = \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + 2j\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) + 1}. \quad (3)$$

در معادله (۳)، $Y(\omega)$ تابع پاسخ فرکانسی^۱ نامیده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌گردد، هنگام عبور فرکانس تحریک از فرکانس طبیعی سیستم، دامنه پاسخ فرکانسی به شدت افزایش می‌یابد و تنها به دلیل وجود میرایی محدود می‌گردد. با ضرب کسر بالا در مزدوج مخرج می‌توان قسمت دامنه و فاز تابع تبدیل فرکانسی را به صورت معادله (۴) استخراج کرد.

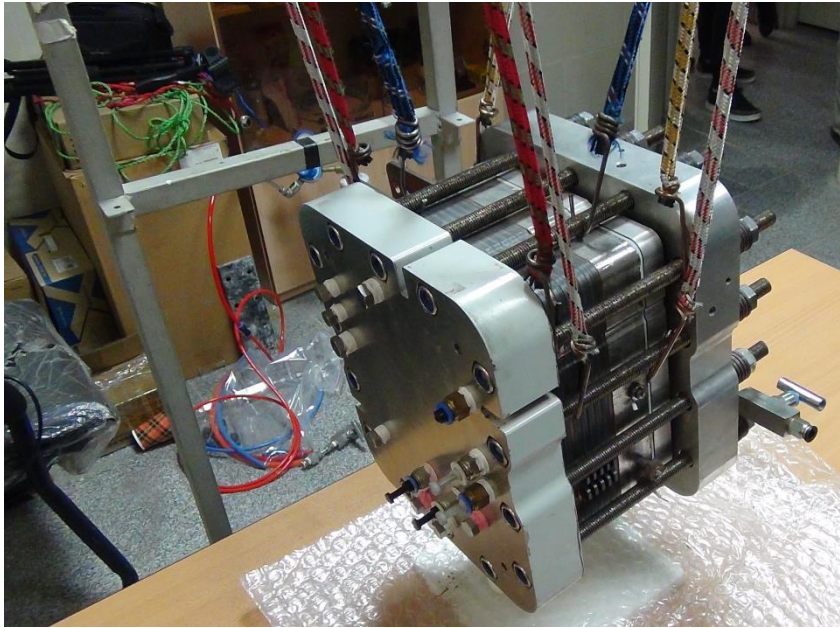
$$Y(\omega) = \frac{1}{-\left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + 2j\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) + 1} \times \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - 2j\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - 2j\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} - 2\xi \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} j. \quad (4)$$

بنابراین، اختلاف فاز بین تحریک و پاسخ به صورت معادله (۵)

2 Frequency Response Function (FRF)

3 Fast Fourier Transform (FFT)

1 Frequency response function



شکل ۱. تعلیق پیل سوختی با شرایط مرزی آزاد.

Fig. 1. Suspended fuel cell with free boundary conditions



(ب)



(الف)

شکل ۲. اتصال شیکر و نیروسنج به صفحات انتهایی در (الف) راستای طولی، (ب) راستای عرضی.

Fig. 2. Connect the shaker and the dynamometer to the end plates in (a) the longitudinal direction, (B) the transverse direction.

و در آخر، نتایج آزمون مودال و شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

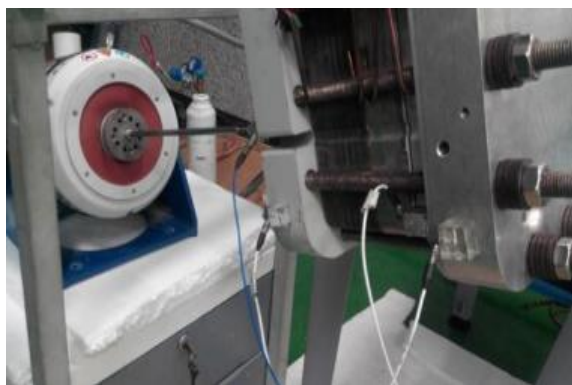
۴- شبیه‌سازی اجزای محدود پیل سوختی

جهت مدلسازی عددی پیل سوختی ۴ سل از نرم‌افزار تجاری استفاده شده است. اجزای اصلی سری پیل سوختی با رطوبت‌زن و جداساز یکپارچه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

برای این منظور ابتدا اجزای اصلی پیل سوختی و مشخصات

می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. برای دستیابی به نتایج با دقت قابل قبول، آزمون مودال برای موقعیت‌های مختلف اتصال شیکر به پیل سوختی تکرار گردید. تحریک به صورت تصادفی به قطعه اعمال شده و پاسخ به طور همزمان از طریق سنسورهای نصب شده روی زبانه‌های صفحات جمع‌کننده جریان و سه عدد سنسور متصل به صفحه انتهایی ورودی و سیلندر و پیستون صفحه انتهایی نیوماتیک پیل سوختی (شکل ۳) ثبت شده است.

در ادامه مدلسازی عددی پیل سوختی مورد بررسی قرار می‌گیرد



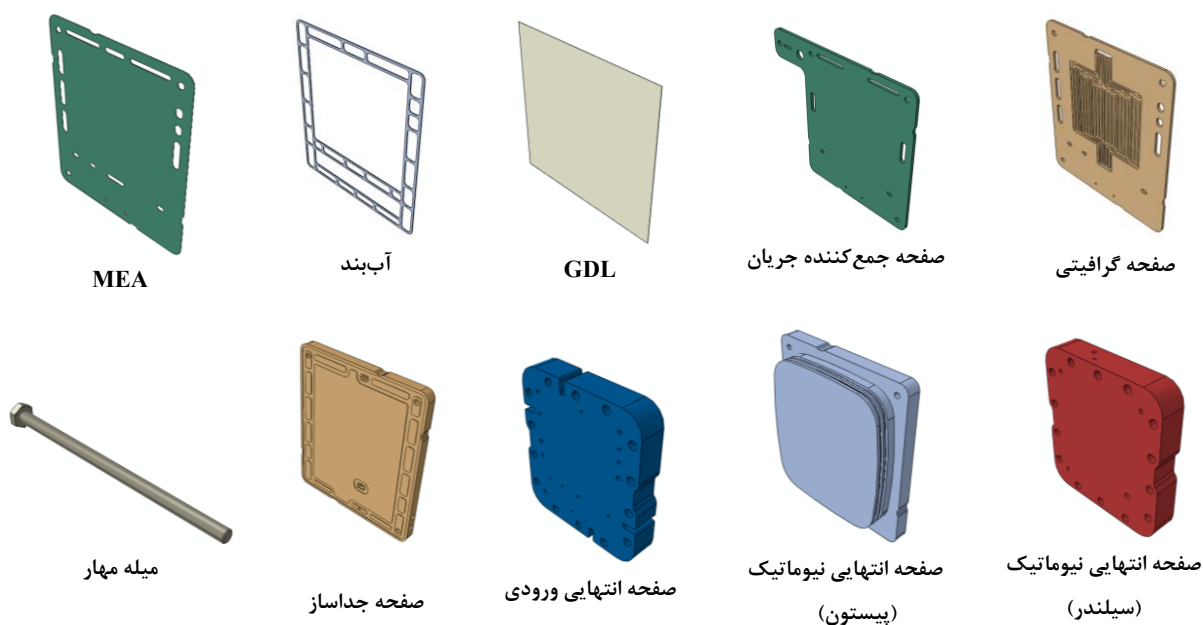
(ب)



(الف)

شکل ۳. موقعیت قرارگیری سنسورهای شتاب‌سنج.

Fig. 3. Location of accelerometer sensors.



شکل ۴. اجزای پیل سوختی.

Fig. 4. Fuel cell components.

استفاده شده است. دو پارامتر اساسی در تحلیل ارتعاش و شوک، جرم و سفتی تمامی اجزا می‌باشد. بنابراین، در حذف برخی از جزئیات اجزا مانند شعاع انحنا و یا سوراخ‌هایی که در شبکه‌بندی اجزا اشکال ایجاد می‌کنند، حفظ خواص جرم و سفتی ضروری می‌باشد. از اینرو، در مدلسازی اجزای محدود انجام شده این نکات مد نظر قرار گرفته است. مونتاژ مدل کامل پیل سوختی مورد نظر در شکل ۵ نمایش داده شده است. پیل سوختی مورد نظر دارای ۴ سلول با سطح فعال ۲۲۵ سانتیمتر مربع، ۲ سلول رطوبت‌زن برای رطوبت‌زنی گازهای

مکانیکی اجزای آن مورد بررسی قرار گرفته است که در جدول ۱ ارائه شده است.

همچنین، آب‌بندها به صورت ماده هایپیرالاستیک در نظر گرفته شده است که داده‌های آزمایشگاهی تنش-کرنش حاصل از تست فشار تک‌محوره آب‌بندهای مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

چگالی آب‌بندهای مورد استفاده برابر با ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب بوده و از مدل نئوهوکین^۱ برای مدلسازی آن در نرم‌افزار

1 Neo Hookean

جدول ۱. مشخصات مکانیکی اجزای پیل سوختی [12].

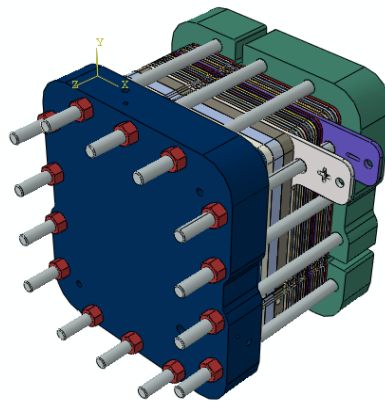
Table 1. Mechanical properties of fuel cell components [12].

| نام ماده | نماد | E (GPa) | ν | ρ (kg/m ³) |
|--|------|-----------|-------|-----------------------------|
| آلومینیوم (صفحه انتهایی نیوماتیک) | Al | ۷۰ | ۰/۳۵ | ۲۷۰۰ |
| استیل (صفحه انتهایی ورودی و میله‌های مهار) | St | ۲۰۰ | ۰/۳ | ۸۰۰ |
| کامپوزیت پایه گرافیت (صفحات دوقطبی و رطوبت‌زن) | Gr | ۳/۴۴۷ | ۰/۲۵ | ۱۸۲۰ |
| غشا | Mem | ۰/۱۹ | ۰/۲۵ | ۲۰۰۰ |
| لایه عبور گاز | GDL | ۰/۶۰۵ | ۰/۲۵ | ۴۰۰ |
| مس (صفحه جمع‌کننده جریان) | Cu | ۱۱۰ | ۰/۳۷ | ۸۹۰۰ |

جدول ۲. داده‌های آزمایشگاهی تنش- کرنش حاصل از تست فشار تک‌محوره واشر آب‌بند.

Table 2. Stress-strain experimental data from one-directional pressure test of sealing gasket.

| کرنش نرمال | تنش نرمال (MPa) | کرنش نرمال | تنش نرمال (MPa) |
|------------|-----------------|------------|-----------------|
| -۰/۰۴۳۹۶ | -۰/۱۲۱۲۵ | -۰/۲۶۳۷۴ | -۱/۰۷۴۶۸ |
| -۰/۰۸۷۹۱ | -۰/۲۷۵۵۶ | -۰/۳۰۷۶۹ | -۱/۲۹۵۱۲ |
| -۰/۱۳۱۸۷ | -۰/۴۴۰۸۹ | -۰/۳۵۱۶۵ | -۱/۵۴۳۱۲ |
| -۰/۱۷۵۸۲ | -۰/۶۳۳۷۸ | -۰/۳۹۵۶ | -۱/۸۱۸۶۸ |
| -۰/۲۱۹۷۸ | -۰/۸۵۴۲۳ | -۰/۴۳۹۵۶ | -۲/۱۸۷۹۳ |



شکل ۵. مدل مونتاژ شده پیل سوختی با جزئیات کامل.

Fig. 5. Model of fuel cell assembly with complete details.

اصطکاک می‌باشد بر طبق جدول ۳ انتخاب شده است. سپس مدل به صورت جزء به جزء شبکه‌بندی شده است. در این مرحله، به دلیل وجود شیارهای عبور گاز، شبکه‌بندی صفحات می‌بایست بسیار ریز انتخاب شود. جهت کاهش حجم محاسبات نوع المان به صورت المان درجه اول $C3D4$ انتخاب شده است که دارای ۴ گره می‌باشد. به طور کلی در مدلسازی اجزای محدود به

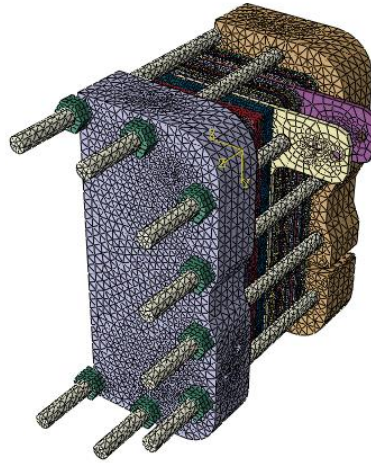
اکسیژن و هیدروژن و دو صفحه جداساز آب می‌باشد. فشار مهار در پیل سوختی مورد نظر از طریق اعمال فشار گاز در صفحه انتهایی نیوماتیک صورت می‌گیرد.

اتصال بین اجزای پیل سوختی بر اساس خواص تماسی در دو جهت مماسی و محوری و به کمک ماژول Interaction در نرم افزار قابل تعریف است. بر این اساس، خواص مماسی بین اجزا که ضریب

جدول ۳. ضریب اصطکاک بین اجزای پیل سوختی [۱۳]

Table 3. Friction coefficient between fuel cell components [13].

| نام اتصال | ضریب اصطکاک | نام اتصال | ضریب اصطکاک |
|----------------------|-------------|-----------------|-------------|
| آلومینیوم- آلومینیوم | ۱ | آلومینیوم- آبند | ۰/۹ |
| گرافیت- آبند | ۰/۱ | مس- آبند | ۰/۷ |
| فولاد- آبند | ۰/۷ | فولاد- گرافیت | ۰/۱ |
| لایه عبور گاز- آبند | ۰/۱ | فولاد- فولاد | ۰/۶۵ |



شکل ۶. شبکه‌بندی مدل پیل سوختی.

Fig. 6. Fuel cell model meshing.

بررسی قرار گرفته است. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی عددی پیل سوختی مورد مطالعه قرار گرفته و با نتایج آزمون مودال صحه‌گذاری شده است.

۱-۵- نتایج آزمون مودال

غالباً خروجی تست‌های مودال، داده‌های دامنه پاسخ فرکانسی از جنس اکسلرانس^۱ یا اینرتانس^۲ (نسبت طیفی فرکانس پاسخ شتاب به طیف فرکانسی نیروی تحریک) می‌باشد. در تست حاضر نیز داده‌های دامنه پاسخ فرکانسی که توسط نرم افزار ال.ام.اس داده برداری، محاسبه و ذخیره شده است، به عنوان خروجی تست یا ورودی تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها توسط همین نرم افزار مورد تحلیل قرار گرفته و سرانجام پارامترهای مودال استخراج گردید. در ادامه، منحنی دامنه پاسخ فرکانسی و منحنی تابع شناسایی مودال^۳ نمودار پایداری مود در یکی از مراحل آزمون مربوط به سنسورهای

کمک نرم افزارهای تجاری، جهت کاهش حجم المان‌های مدلسازی و حجم محاسبات، استفاده از تقارن متداول می‌باشد. با توجه به هندسه پیل سوختی می‌توان با ایجاد برش در جهت طولی، مدل پیل سوختی را تا حد بسیار زیادی ساده کرد. این برش منجر به کاهش قابل توجه تعداد شبکه مدل شده است. شبکه‌بندی اجزای محدود ایجاد شده روی مدل در شکل ۶ داده شده است.

توجه به این نکته ضروریست که ابعاد شبکه اجزای محدود در سطوح تماس، ریزتر از نقاط دیگر انتخاب شده است. به خصوص در سطح تماس بین آبندهای الاستومری و صفحات دو قطبی گرافیتی، شبکه‌بندی درشت منجر به ایجاد حجم منفی در المان‌ها می‌گردد. علاوه بر این، شبکه‌بندی یکنواخت مدل، حجم محاسبات عددی را افزایش خواهد داد.

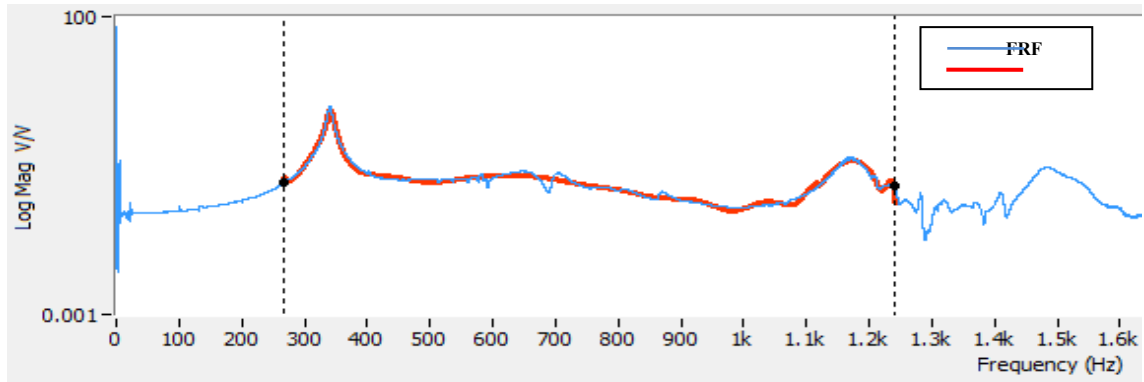
۵- نتایج

در این بخش، در ابتدا نتایج به دست آمده از آزمون مودال مورد

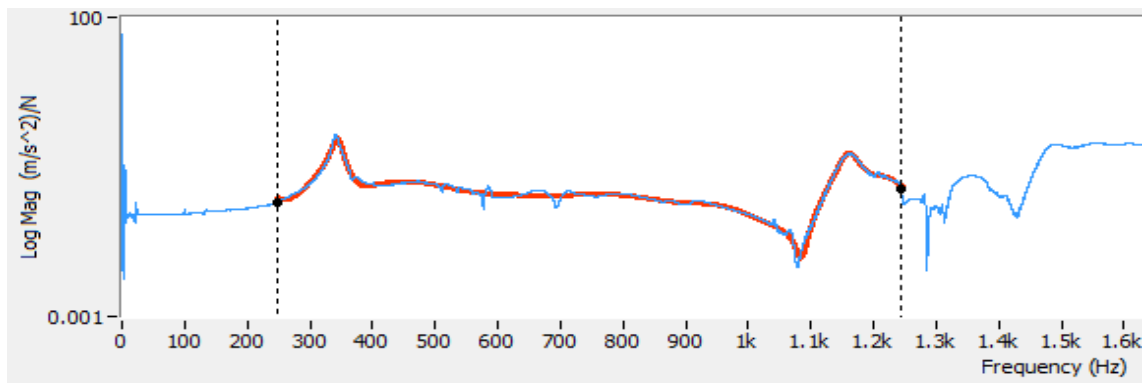
1 Accelerance

2 inertance

3 Mode Identification Function (MIF)



(الف)



(ب)

شکل ۷. نمودار پاسخ فرکانسی موضعی زبانه‌های صفحات جمع‌کننده جریان (الف) زبانه مثبت، (ب) زبانه منفی.

Fig. 7. Local frequency response diagrams of current collector paltes (A) Positive tab, (B) Negative tab.

می‌شود. نمودار پاسخ برای تحریک‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. نمودارهای تحریک به رنگ آبی و نمودارهای پاسخ با رنگ‌های قرمز، سبز و سفید قابل مشاهده هستند. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، اختلاف فاز بین تابع تحریک و تابع پاسخ در فرکانس تحریک ۵۰۰ هرتز تقریباً برابر با ۹۰ درجه شده است. بنابراین، فرکانس طبیعی اول عرضی سازه، تقریباً برابر با ۵۰۰ هرتز تعیین گردید.

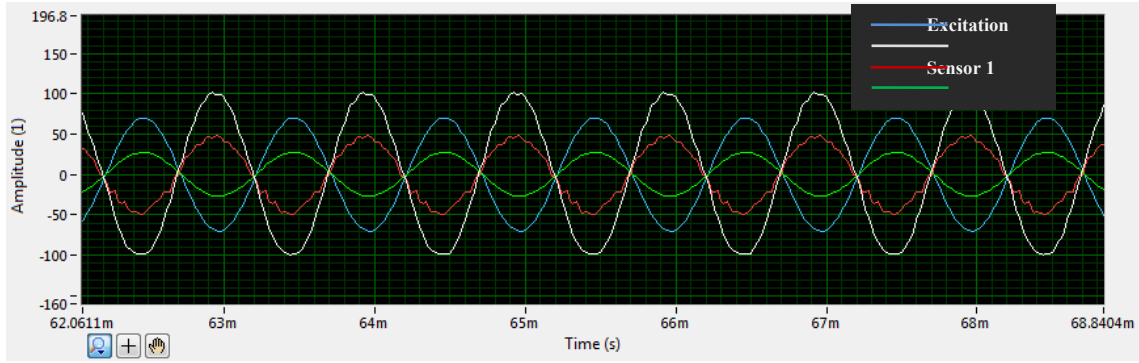
علاوه بر این، فرکانس تحریک تا نزدیک ۱۰۰ هرتز کاهش داده شد. نمودار پاسخ برای تحریک با فرکانس ۱۰۰ هرتز در شکل ۸ نمایش داده شده است.

هم فاز بودن تحریک و پاسخ در نزدیکی فرکانس ۱۰۰ هرتز نشان‌دهنده عدم وجود فرکانس طبیعی عرضی در این بازه فرکانسی است. بنابراین، فرکانس ۵۰۰ هرتز اولین فرکانس طبیعی عرضی پیل سوختی می‌باشد.

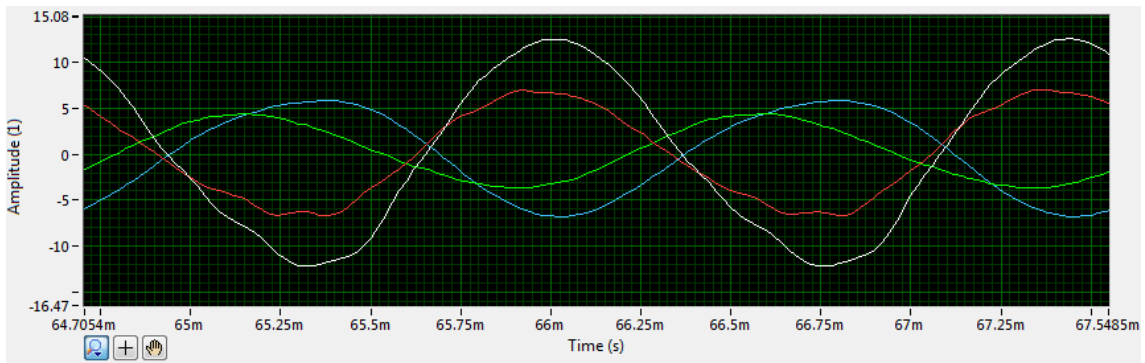
برای تعیین فرکانس طولی پیل سوختی، شیکر و نیروسنج بر

متصل به زبانه‌های صفحات جمع‌کننده جریان که با تحریک طولی توسط شیکر و نصب سنسور در دو نقطه بر روی زبانه‌ها انجام شده است، در شکل ۷ نمایش داده شده است.

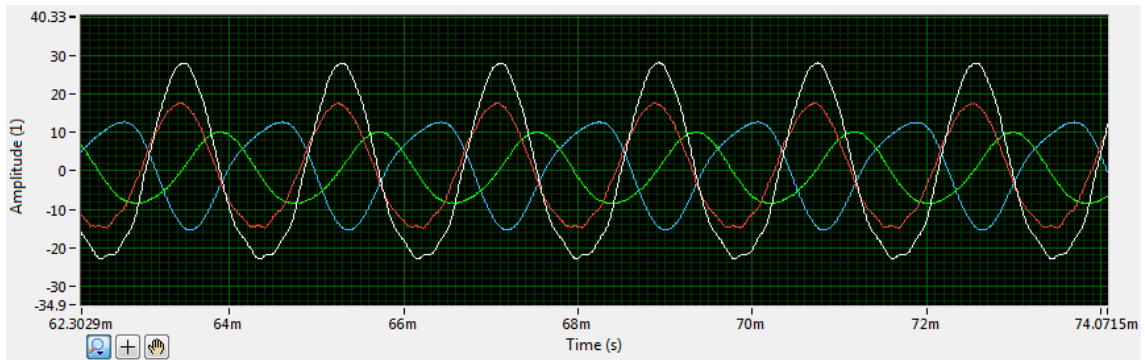
با توجه به تجهیزات آزمایشگاهی موجود و همچنین صلیبیت بسیار بالای پیل سوختی و پیچیدگی‌های موجود در آن، اخذ داده‌های قابل اطمینان در حوزه فرکانس امکان‌پذیر نبود. از اینرو، فرکانس‌های طبیعی پیل سوختی با مقایسه اختلاف فاز بین تابع تحریک ورودی (که فرم سینوسی دارد) و تابع پاسخ تعیین گردید. با توجه به معادلات اساسی حوزه فرکانس، زمانی که اختلاف فاز بین تحریک ورودی و تابع پاسخ ۹۰ درجه شود، فرکانس تحریک برابر با فرکانس طبیعی پیل سوختی می‌گردد [۱۴]. به منظور شناسایی فرکانس عرضی، تحریکی با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز به پیل سوختی اعمال شده و با مشاهده اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای، نتیجه‌گیری می‌شود که فرکانس تحریک، به میزان قابل ملاحظه‌ای از فرکانس اول، عبور کرده است. با کاهش تدریجی فرکانس، وضعیت اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای مشاهده



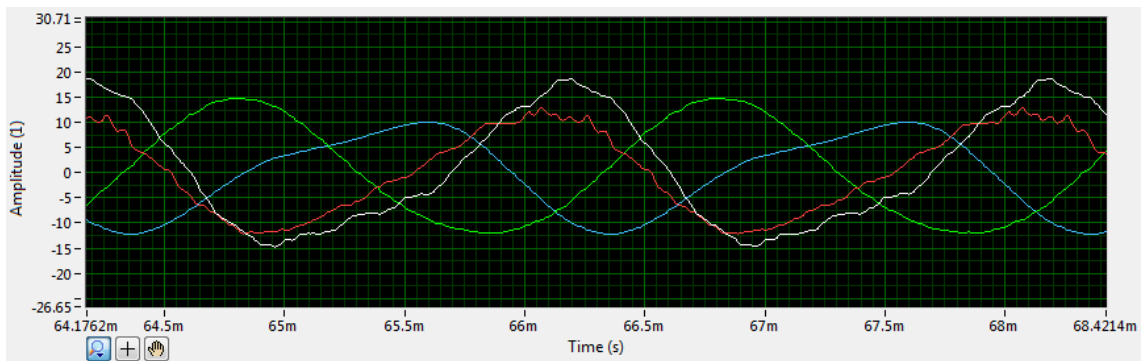
(الف)



(ب)



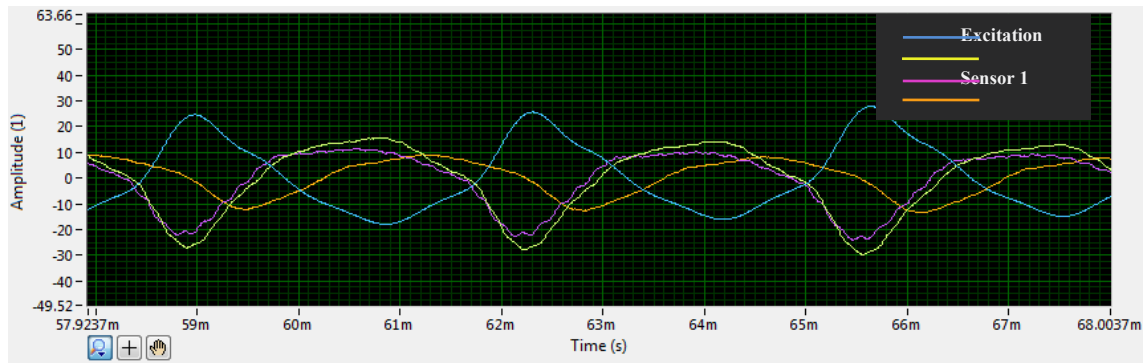
(ج)



(د)

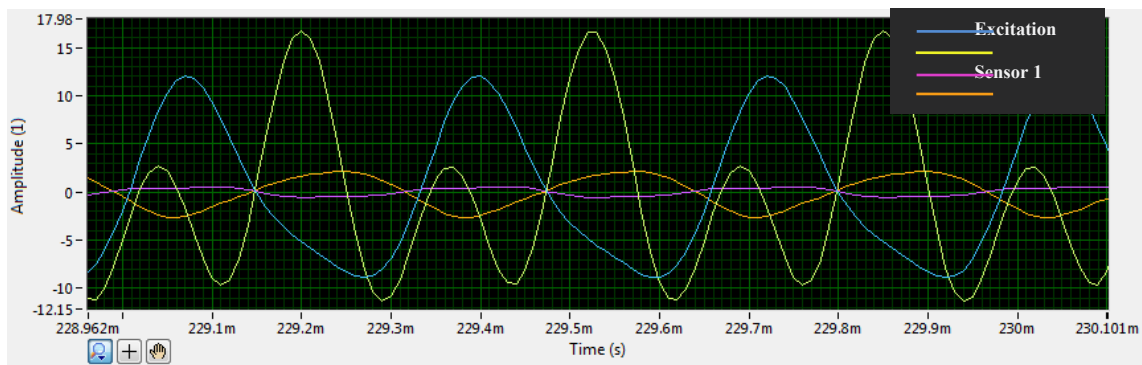
شکل ۸. نمودارهای تحریک و پاسخ در فرکانس تحریک (الف) ۱۰۰۰ هرتز، (ب) ۷۰۰ هرتز، (ج) ۵۵۰ هرتز، (د) ۵۰۰ هرتز.

Fig. 8. Stimulation and response diagrams at the excitation frequency (A) 1000 Hz, (B) 700 Hz, (C) 550 Hz, (D) 500 Hz.

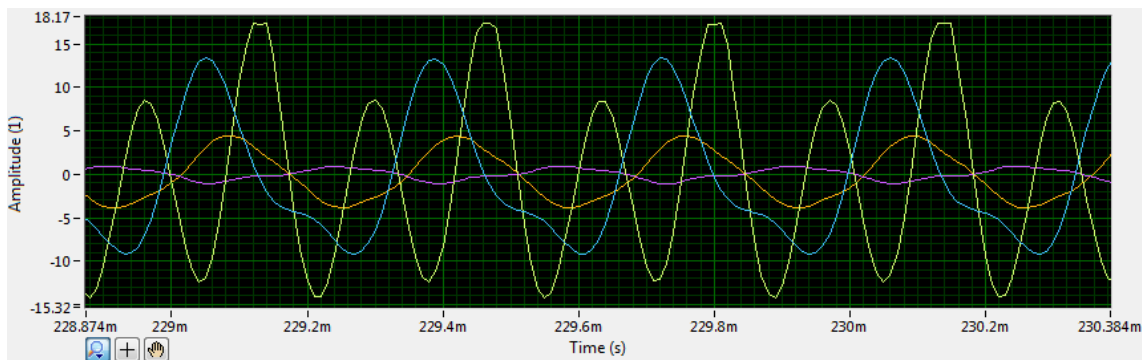


شکل ۹ نمودارهای تحریک و پاسخ، با فرکانس ۱۰۰ هرتز.

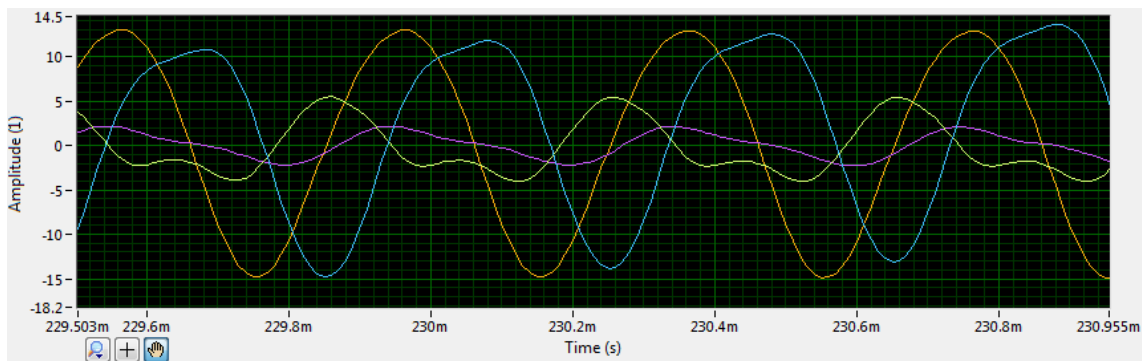
Fig. 9. Excitation and response diagrams with frequency of 100 Hz.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰. نمودارهای تحریک و پاسخ در فرکانس تحریک (الف) ۳۰۷۵ هرتز، (ب) ۲۹۷۵ هرتز، (ج) ۲۵۰۰ هرتز.

Fig. 10. Stimulation and response diagrams at the excitation frequency (A) 3075 Hz, (B) 2975 Hz, (C) 2500 Hz.

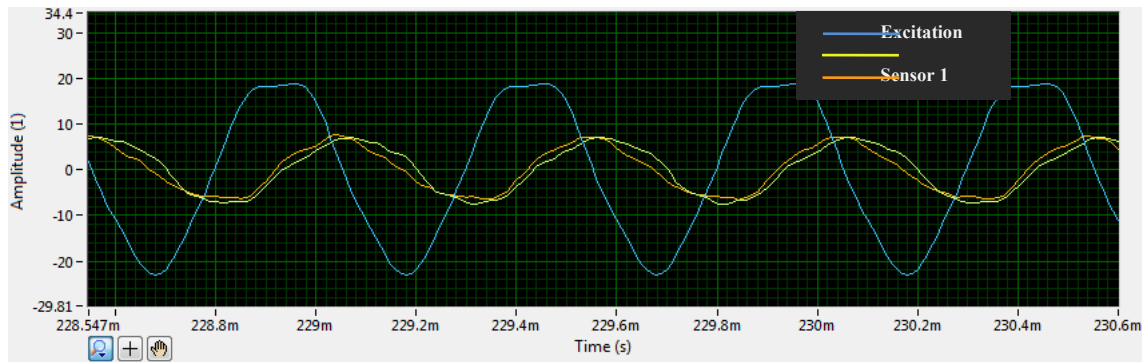
که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، پاسخ ثبت شده از هر دو سنسور بر یکدیگر منطبق می‌باشد. بنابراین، می‌توان اظهار نمود که صفحه انتهایی تنها دارای حرکت طولی بوده و هیچ حرکت چرخشی ندارد.

۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، نتایج تحلیل عددی پاسخ پیل سوختی به تحریک خارجی در حوزه فرکانس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، دامنه جابجایی نقاط مختلفی از پیل سوختی بر حسب تغییر فرکانس تحریک ترسیم گردید. در شکل ۱۲، نتایج آنالیز فرکانسی یکی از گره‌های متصل به زبانه صفحات جمع‌کننده جریان نمایش داده

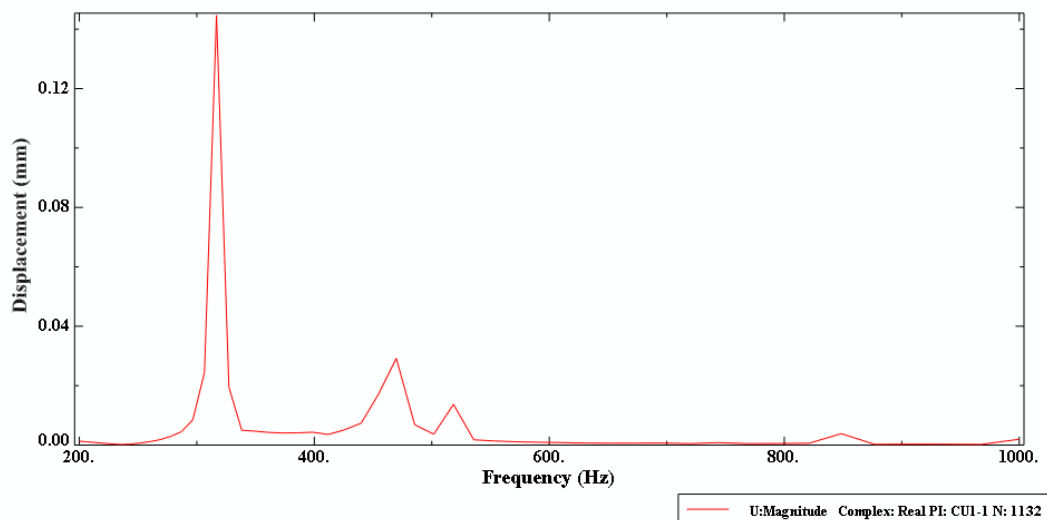
روی صفحه انتهایی ورودی نصب شده و تحریک در راستای طولی به پیل سوختی اعمال می‌شود. موقعیت قرارگیری سنسورهای شتاب‌سنج مشابه تست‌های پیشین است. برای این آزمون، در ابتدا تحریکی با فرکانس ۳۰۷۵ هرتز به پیل سوختی اعمال گردید. با کاهش فرکانس به ۲۵۰۰ هرتز، تقریباً وضعیت اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای مشاهده می‌شود که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. بنابراین، فرکانس طبیعی اول پیل سوختی در راستای طولی به طور تقریبی برابر با ۲۵۰۰ هرتز می‌باشد.

برای اطمینان از اینکه پیل سوختی مورد نظر تنها در جهت طولی حرکت نموده و هیچ حرکت پیچشی ندارد، دو سنسور شتاب‌سنج در دو گوشه متفاوت از صفحه انتهایی نیوماتیک نصب گردید. همان‌طور



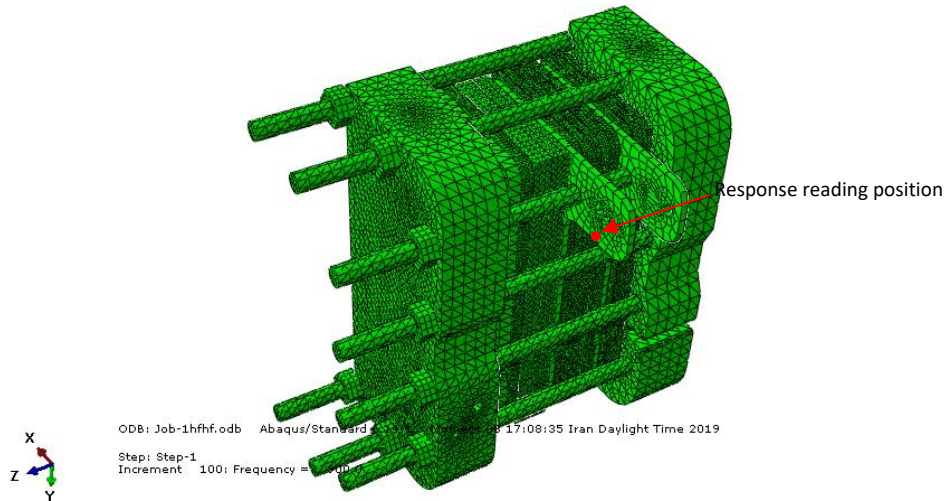
شکل ۱۱. نمودار تحریک و پاسخ جهت بررسی شکل مود طولی پیل سوختی.

Fig. 11. Excitation and response diagram to investigate the longitudinal mode shape of fuel cell.



شکل ۱۲. تحلیل عددی پاسخ فرکانسی پیل سوختی تحت تحریک عرضی.

Fig. 12. Numerical frequency response analysis of fuel cell under transverse excitation.



شکل ۱۳. محل خواندن پاسخ فرکانسی پیل سوختی تحت تحریک عرضی.

Fig. 13. Frequency response reading position of fuel cell under transverse excitation.

جدول ۴. آنالیز حساسیت به تغییر ابعاد شبکه اجزای محدود.

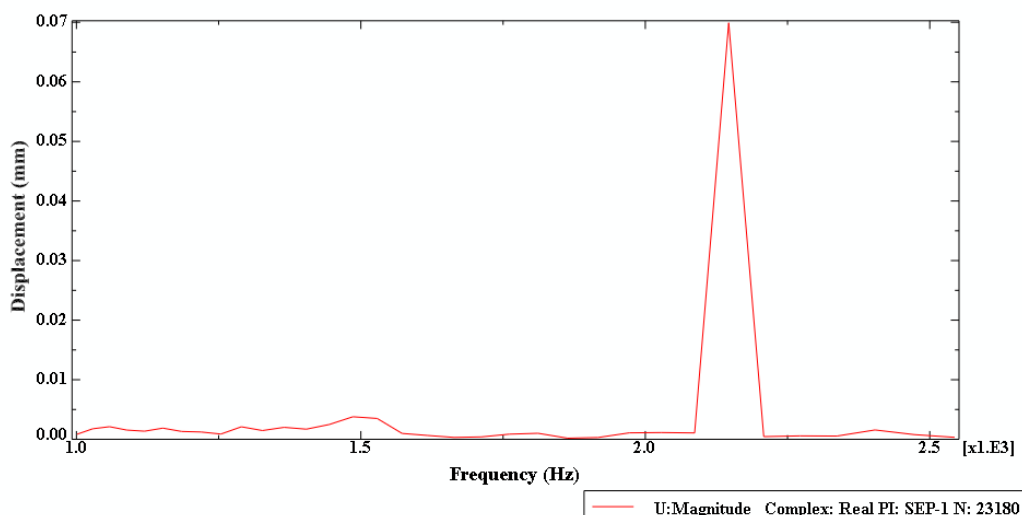
Table 4. Sensitivity analysis to change the dimensions of the finite element mesh.

| تعداد المان | فرکانس زبانه جمع کننده جریان (Hz) | فرکانس خمشی اول (Hz) |
|-------------|-----------------------------------|----------------------|
| ۲۳۵۸۴۱ | ۳۳۲ | ۴۹۳ |
| ۳۴۵۲۳۱ | ۳۲۵ | ۴۸۲ |
| ۴۳۰۵۴۹ | ۳۲۰ | ۴۷۰ |
| ۵۱۱۹۵۳ | ۳۲۰ | ۴۷۰ |

طوری که در تست انجام شده برای مود خمشی پیل سوختی، فرکانس اول برابر با ۵۰۰ هرتز و در تحلیل عددی برابر با ۴۷۰ هرتز شده است که اختلاف آن تقریباً برابر با ۶ درصد است. این اختلاف می تواند مربوط به خطای تحلیل عددی یا خطای موجود در تست آزمایشگاهی باشد. همچنین، فرکانس زبانه صفحه جمع کننده جریان در تحلیل عددی و تست های آزمایشگاهی به ترتیب برابر با ۳۲۰ و ۳۴۰ هرتز گردید که اختلاف حداکثر ۵ درصدی را نشان می دهد. بنابراین، تحلیل عددی مدل به صورت متقارن و با جزئیات کافی می تواند به شکل مناسبی جزئیات خواص ارتعاشی مدل واقعی را پوشش دهد. در ادامه، نتایج مربوط به شبیه سازی تحت تحریک طولی مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج شبیه سازی در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می گردد، شبیه سازی عددی فرکانس طولی پیل سوختی مورد نظر را ۲۳۰۰ هرتز نمایش می دهد که تطابق

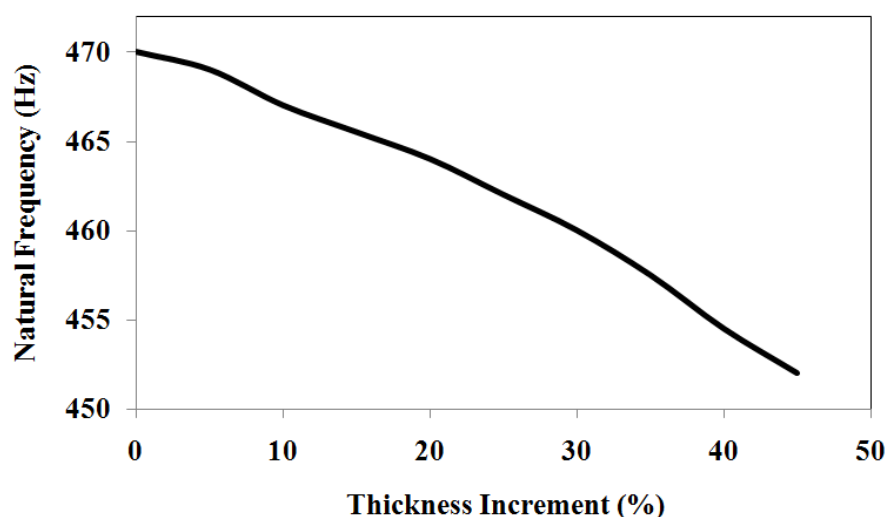
شده است. همان طور که مشاهده می گردد، فرکانس اول منطبق بر ۳۲۰ هرتز بوده و دومین فرکانس ۴۷۰ هرتز می باشد. محل خواندن پاسخ فرکانسی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. محل نشان داده شده همان مکان قرارگیری سنسور شتاب سنج در آزمون تجربی تحت تحریک عرضی می باشد. علاوه بر این، آنالیز حساسیت به تغییر ابعاد شبکه اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۴ تغییرات فرکانس طبیعی زبانه جمع کننده جریان و فرکانس خمشی اول را به تغییر ابعاد شبکه نشان می دهد. در نتیجه، تعداد المان شبکه اجزای محدود ۴۳۰۵۴۹ المان انتخاب گردید. بر این اساس می توان نتیجه گیری کرد که فرکانس خمشی اول سازه و فرکانس های مشاهده شده در زبانه صفحات جمع کننده جریان با فرکانس های مشاهده شده در آزمون تجربی تطابق مناسبی دارد. به



شکل ۱۴. تحلیل عددی پاسخ فرکانسی پیل سوختی تحت تحریک طولی.

Fig. 14. Numerical frequency response analysis of fuel cell under longitudinal excitation.



شکل ۱۵. اثر تغییرات ضخامت غشا بر فرکانس طبیعی اول پیل سوختی.

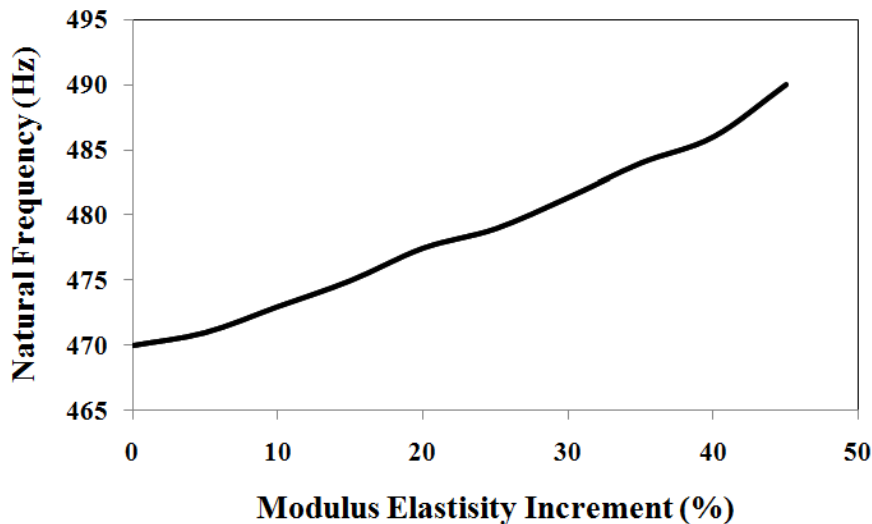
Fig. 15. The effect of membrane thickness on the first natural frequency of the fuel cell.

فرکانس طبیعی عرضی اول مدل بر حسب درصد افزایش ضخامت لایه غشا نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نمایش داده شده است، افزایش ضخامت غشا اثر کمی بر فرکانس طبیعی پیل سوختی داشته است. به طوریکه با تغییر ۴۵ درصدی ضخامت، فرکانس طبیعی پیل سوختی ۳ درصد کاهش یافته است. این امر به دلیل ضخامت پایین غشا نسبت به ابعاد کلی پیل سوختی می باشد. همچنین، اثر افزایش مستقل مدول الاستیسیته غشا بر فرکانس طبیعی عرضی اول مدل در شکل ۱۶ مشاهده می گردد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، افزایش ۴۵ درصدی مدول

مناسبی با نتایج آزمایشگاهی (۲۵۰۰ هرتز) دارد. اختلاف نتایج شبیه سازی و آزمون تجربی برای فرکانس اول طولی پیل سوختی تقریباً برابر با ۸ درصد می باشد.

نتایج حاکی از بیشتر بودن سطح فرکانس های طولی پیل سوختی نسبت به فرکانس های عرضی مدل می باشد. بنابراین، فرکانس های عرضی پیل سوختی مورد نظر تحت تحریک های دینامیکی، فرکانس های غالب مدل می باشد.

در ادامه، اثر افزایش پارامترهای تاثیرگذار بر تغییر خواص ارتعاشی پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۵ تغییرات



شکل ۱۶. اثر تغییرات مدول الاستیسیته غشا بر فرکانس طبیعی اول پیل سوختی.

Fig. 16. The effect of membrane elastic modulus on the first natural frequency of the fuel cell.

جدول ۵. درصد کاهش قیود تماس، شبکه اجزای محدود و هزینه محاسباتی.

Table 5. The percentage reduction in contact constraints, the finite element mesh, and computational cost.

| درصد کاهش هزینه محاسباتی | درصد کاهش تعداد المان | درصد کاهش قیود تماس | تعداد صفحات غشا |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| ۳٪ | ۲٪ | ۵٪ | ۱ |
| ۷٪ | ۴٪ | ۱۰٪ | ۲ |
| ۱۲٪ | ۶٪ | ۱۵٪ | ۳ |
| ۱۷٪ | ۸٪ | ۲۰٪ | ۴ |

۶- نتیجه گیری

پیل سوختی پلیمری با توجه به وجود صفحات متعدد با هندسه و خواص مکانیکی متفاوت به عنوان یک سیستم با ساختار پیچیده در نظر گرفته می‌شود. شناخت این ساختار جهت طراحی پیل سوختی در برابر بارهای دینامیکی وارده مانند شوک و ارتعاش امری ضروری می‌باشد. در این مقاله، آزمون مودال پیل سوختی ۴۰۰ وات که از ۴ سلول تشکیل شده است انجام گردید و داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده با نتایج شبیه‌سازی عددی مورد مقایسه قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج تحقیق به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- به دلیل صلبیت بسیار بالای پیل سوختی و پیچیدگی‌های موجود در سازه آن، فرکانس‌های طبیعی پیل سوختی با مقایسه

الاستیسیته غشا منجر به افزایش ۴ درصدی فرکانس طبیعی عرضی اول پیل سوختی شده است. بر این اساس، ساده‌سازی و حذف غشا از مدل پیل سوختی تأثیر چندانی بر نتایج پاسخ فرکانسی پیل سوختی نخواهد داشت.

توجه به این نکته ضروریست که حذف صفحات غشا، علاوه بر کاهش تعداد المان‌های مدل اجزای محدود، منجر به کاهش قیود تماس می‌گردد. جدول ۵ درصد کاهش قیود تماس، درصد کاهش شبکه اجزای محدود و درصد کاهش هزینه محاسباتی را به ازای حذف هر غشا نشان می‌دهد.

بنابراین حذف صفحات غشا، با حفظ دقت مدل، حجم محاسبات عددی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

- Andersen, Mechanical behaviour of a fuel cell stack under vibrating conditions linked to aircraft applications part I: Experimental, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(22) (2008) 6755-6765.
- [4] V. Rouss, D. Candusso, W. Charon, Mechanical behaviour of a fuel cell stack under vibrating conditions linked to aircraft applications part II: Three-dimensional modelling, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(21) (2008) 6281-6288.
- [5] Y. Hou, W. Zhou, C. Shen, Experimental investigation of gas-tightness and electrical insulation of fuel cell stack under strengthened road vibrating conditions, *international journal of hydrogen energy*, 36(21) (2011) 13763-13768.
- [6] G. Diloyan, M. Sobel, K. Das, P. Hutapea, Effect of mechanical vibration on platinum particle agglomeration and growth in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell catalyst layers, *Journal of Power Sources*, 214 (2012) 59-67.
- [7] S. Imen, M. Shakeri, Reliability Evaluation of an Open-Cathode PEMFC at Operating State and Longtime Vibration by Mechanical Loads, *Fuel Cells*, 16(1) (2016) 126-134.
- [8] J. Deshpande, T. Dey, P.C. Ghosh, Effect of vibrations on performance of polymer electrolyte membrane fuel cells, *Energy Procedia*, 54 (2014) 756-762.
- [9] C.W. Wu, B. Liu, M.Y. Wei, W. Zhang, Mechanical response of a large fuel cell stack to impact: A numerical analysis, *Fuel Cells*, 15(2) (2015) 344-351.
- [10] X. Wang, S. Wang, S. Chen, T. Zhu, X. Xie, Z. Mao, Dynamic response of proton exchange membrane fuel cell under mechanical vibration, *International Journal Of Hydrogen Energy*, 41(36) (2016) 16287-16295.
- [11] B. Liu, M. Wei, W. Zhang, C. Wu, Effect of impact acceleration on clamping force design of fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, 303 (2016) 118-125.
- [12] A. Baroutaji, J. Carton, M. Sajjia, A. Olabi, Materials in PEM fuel cells, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, (2016).
- [13] P.J. Blau, *Friction Science and Technology: From اختلاف فاز بین تابع تحریک ورودی که دارای فرم سینوسی می باشد و تابع پاسخ تعیین گردید. این روش در جداسازی مودهای موضعی و اصلی پیل سوختی بسیار مؤثر می باشد.*
- نتایج آزمون مودال نشان داد که فرکانس عرضی اول پیل سوختی ۴۰۰ وات، ۵۰۰ هرتز و فرکانس طولی اول آن حدود ۲۵۰۰ هرتز است.
 - فرکانس های به دست آمده از شبیه سازی عددی با فرکانس های تخمین زده شده در آزمون تجربی تطابق مناسبی دارد. مقایسه فرکانس های به دست آمده از آزمون تجربی و تحلیل عددی اختلاف حداکثر ۸ درصدی را نشان می دهد. بنابراین، شبیه سازی عددی پیل سوختی با جزئیات کافی می تواند خصوصیات ارتعاشی مدل واقعی را تا حد زیادی پوشش دهد.
 - تغییر خواص هندسی و مکانیکی غشا تأثیر بسیار کمی روی فرکانس طبیعی اول پیل سوختی دارد. به طوریکه با تغییر ۴۵ درصدی خواص هندسی و مکانیکی صفحات غشاء، فرکانس طبیعی پیل سوختی ۴ درصد تغییر یافته است. این امر به دلیل ضخامت پایین غشا نسبت به ابعاد کلی پیل سوختی می باشد.
 - حذف صفحات غشا، علاوه بر کاهش تعداد المان های مدل اجزای محدود، منجر به کاهش قیود تماس می گردد. به طوریکه در پیل سوختی مورد بررسی با حذف صفحات غشا، هزینه محاسباتی ۱۷٪ کاهش یافته است. بنابراین توجه به این نکته در کاهش هزینه محاسباتی پیل سوختی هایی با ابعاد بزرگ، بسیار مؤثر می باشد.
- داده های فرآهم آورده شده در این مقاله علاوه بر بیان خصوصیات ارتعاشی یک پیل سوختی صنعتی، می تواند جهت توسعه و صحت گذاری مدل های عددی پیل های سوختی دیگر مورد استفاده قرار گیرد.
- مراجع**
- [1] T. Wilberforce, A. Alaswad, A. Palumbo, M. Dassisi, A. Olabi, Advances in stationary and portable fuel cell applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(37) (2016) 16509-16522.
- [2] N. Rajalakshmi, S. Pandian, K. Dhathathreyan, Vibration tests on a PEM fuel cell stack usable in transportation application, *International journal of hydrogen energy*, 34(9) (2009) 3833-3837.
- [3] V. Rouss, P. Lesage, S. Bégot, D. Candusso, W. Charon, F. Harel, X. François, V. Selinger, C. Schilo, S. Yde-

- [14] J.H. Lumkes, Control Strategies for Dynamic Systems: Concepts to Applications, Second Edition, CRC Press, Design and Implementation, Taylor & Francis, 2001. 2008.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.M. Mohammadi , M.M. Barzegari, Numerical and Experimental Modal Analysis of a 400 W Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 101-116.

DOI: [10.22060/mej.2019.15878.6216](https://doi.org/10.22060/mej.2019.15878.6216)

