

## مطالعه تجربی و عددی برداشت انرژی از اسلاشینگ یک سیال و عملکرد آن در دستگاه صفحه تراش

رسول معروفی آذر\*، مازیار فهیمی فرزاد، ناصر پاشایی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۱۵

### کلمات کلیدی:

برداشت انرژی

القاء فارادی

اسلاشینگ

سیم پیچ

مدل حجم سیال

**خلاصه:** در این مطالعه روشی برای برداشت انرژی از اسلاشینگ مایعات پیشنهاد شده و تاثیر پارامترهای مختلف بر کارایی آن بررسی شده است. در بخش اول، ولتاژ و توان القایی بصورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است. بدین منظور آهنربایی روی مایع موجود در ظرف سیم پیچی شده شناور گردیده و سیستم مورد بررسی روی یک میز لرزه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد ولتاژ القایی با افزایش فرکانس افزایش یافته و در فرکانس طبیعی مجموعه سازه و مخزن به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین با افزایش قدرت آهنربا و افزایش ارتفاع سیال درون ظرف، ولتاژ القایی افزایش یافته است. بیشترین ولتاژ القایی و توان برداشت شده در این مطالعه به ترتیب  $850 \text{ mV}$  و  $400 \mu\text{W}$  ثبت شده است. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، سیستم مورد نظر روی یک ماشین صفحه تراش نصب شده و ولتاژ القایی و توان برداشت شده اندازه‌گیری گردیده است. در بخش دوم، از روش عددی برای شبیه‌سازی و تحلیل سیستم پیشنهادی استفاده گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند روند تغییرات پارامترهای مربوط به مرز مشترک از جمله فشار و ارتفاع آن، منطبق بر داده‌های تجربی بوده و بنابراین می‌توان از این روش جهت طراحی و پیش‌بینی عملکرد برداشت‌کننده انرژی استفاده نمود.

### ۱- مقدمه

در سالیان اخیر استفاده از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی مورد توجه بسیار قرار گرفته و بدین جهت تلاش‌های بسیاری جهت کاهش مصرف انرژی این تجهیزات انجام گرفته است تا بتواند مصرف انرژی آنها را از محدوده میلی وات تا محدوده میکرووات کاهش دهد [۱]. کاربردهایی نظیر سنسورها در ساختمان‌ها، ایمپلنت‌های پزشکی، شبکه‌های سنسورهای بی‌سیم، سنسورهای مورد استفاده در صنایع نظامی و ... از جمله موارد استفاده این سیستم‌ها می‌باشد [۱ و ۲]. در حال حاضر از باتری‌ها جهت تامین انرژی این سیستم‌ها استفاده می‌شود که دارای محدودیت‌های مختلفی از قبیل عمر کوتاه، اندازه بزرگ، مشکلات در تعویض و جایگزینی، و وجود مواد سمی و خطرناک درون آنها می‌باشد. در صورت استفاده از یک برداشت‌کننده انرژی می‌توان بر مشکلات ناشی از باتری‌ها غلبه نمود [۳ و ۴]. برداشت انرژی فرآیندی است که از طریق آن انرژی از منابع خارجی از قبیل انرژی‌های خورشیدی، حرارتی، باد و جنبشی برداشت و ذخیره شده و برای دستگاه‌های

کوچک و بی‌سیم، مانند آنهایی که در لوازم الکترونیکی پوشیدنی و شبکه حسگرهای بی‌سیم استفاده می‌شوند، بکار می‌رود. بنابراین یک برداشت‌کننده انرژی می‌تواند هم برای شارژ کردن باتری‌های موجود و هم جایگزینی به جای آنها استفاده شود که در نهایت موجب افزایش طول عمر سیستم خواهد شد [۵ و ۶].

ارتعاشات مکانیکی از جمله مهم‌ترین منابع انرژی هستند که در سیستم‌ها و دستگاه‌های مختلف وجود داشته و معمولاً بدون استفاده می‌باشند [۷ و ۸]. به طور مثال دوران موتور الکتریکی، انرژی باد، حرکت وسیله نقلیه، انرژی موج، زلزله و راه رفتن انسان از جمله عوامل تولید ارتعاش می‌باشند. روش‌های مختلفی جهت برداشت انرژی از ارتعاشات مکانیکی پیشنهاد شده است که عبارتند از الکترومغناطیس، پیزوالکتریک و الکترواستاتیک [۹]. در بین روش‌های برداشت انرژی از ارتعاشات، روش الکترومغناطیس دارای مزیت‌های مختلفی است [۳]. پدیده القای الکترومغناطیسی عبارتست از تولید نیروی محرکه الکتریکی در یک رسانا که در یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان قرار دارد. تغییر میدان مغناطیسی می‌تواند در اثر یک جریان متناوب یا حرکت

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r.marooft@gmail.com



تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه، معادلات ماکسول و ناویر-استوکس بصورت همزمان برای میدان مغناطیسی و جریان سیال حل شده‌اند. نتایج بدست‌آمده با داده‌های تجربی اعتباردهی شده‌است. نتایج ایشان بیانگر مناسب بودن مدل دوبعدی برای شبیه‌سازی و همچنین تاثیر کشش سطحی در نتایج بدست‌آمده می‌باشد [۱۹].

اگرچه مطالعات فوق نشان می‌دهد که استفاده از فروسیالات در پدیده اسلاشینگ جهت برداشت انرژی مناسب می‌باشد اما این روش خالی از اشکال نیست. از جمله مشکلات موجود در این روش، عدم پایدار بودن پخش نانوذرات درون سیال پایه و در نتیجه رسوب آنها بعد از مدت زمان مشخصی است. با وجود مطالعات مختلفی که در مورد پایدارسازی پخش نانوذرات درون سیال پایه با روش‌های مختلف از جمله استفاده از سورفکتانت‌ها شده است ولی هیچکدام از روش‌های موجود پخش دائمی و بدون رسوب برای نانوذرات ایجاد نمی‌کند. دیگر مشکل مهم در استفاده از فروسیالات جهت برداشت انرژی، جذب نانوذرات مغناطیسی به سمت آهنرباهای اطراف ظرف می‌باشد که در نهایت منجر به کاهش نانوذرات پخش شده درون سیال پایه و کاهش بازده سیستم برداشت انرژی با زمان خواهد شد. جهت استفاده از مزایای این سیستم برداشت انرژی و حذف معایب موجود، روشی در این مقاله پیشنهاد گردیده‌است، بدینصورت که به جای استفاده از فروسیال، از مایعات معمول مانند آب به عنوان سیال عامل استفاده گردد. در این روش، آهنربایی با اتصال به یک ماده دیگر مانند یونولیت بر روی سطح مایع شناور شده و ظرف حاوی سیال سیم پیچی گردیده‌است. در واقع روش پیشنهادی، علاوه بر دارا بودن مزایای سیستم برداشت انرژی ذکر شده در مطالعات فوق، با حذف مشکلات مورد اشاره باعث افزایش کارایی سیستم جدید خواهد بود. در ادامه، برای تحلیل و پیش بینی عملکرد سیستم پیشنهادی از مدلسازی عددی استفاده گردیده‌است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- بخش آزمایشگاهی

شماتیک سیستم پیشنهادی برای برداشت انرژی در شکل ۱ نشان داده شده‌است. مایع با ارتفاع‌های مختلف داخل ظرف ریخته شده و آهنربایی درون آن شناور گردیده‌است. در این مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان برداشت انرژی از سیستم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌است. متغیرهای ورودی عبارتند از: نسبت ارتفاع سیال به طول ظرف (ارتفاع بی بعد)، قدرت آهنرباهای مورد استفاده، فرکانس نوسان میز لرزه، و مقاومت‌های الکتریکی

نسبی رسانا و میدان باشد. جریان تولیدشده را جریان القایی می‌نامند. هر عاملی که بتواند خطوط میدان و در نتیجه شار مغناطیسی را تغییر دهد می‌تواند منجر به القاء نیروی محرکه یا به عبارت دیگر جریان الکتریکی شود. مطالعات مختلفی در مورد برداشت انرژی بر پایه قانون القاء فارادی انجام شده‌است [۱۰-۱۴]. در برخی از مطالعات از حرکت سیالات به عنوان عامل حرکت آهنربا و قطع خطوط میدان مغناطیسی استفاده گردیده‌است. از جمله در مطالعه‌ای که توسط مونرو و همکاران انجام شده، در اثر حرکت آهنربا درون لوله حرارتی نوسانی، برداشت انرژی صورت گرفته‌است. دو آهنربا با اندازه‌های متفاوت درون لوله استفاده شده و نتایج بدست‌آمده نشان می‌دهد که آهنربای بزرگتر باعث افزایش توان برداشت انرژی می‌گردد ولی بخاطر کم کردن مقطع حرکت سیال، باعث کاهش عملکرد انتقال حرارتی آن می‌شود [۱۵].

فروسیالات مخلوطی از سیال پایه مانند آب و نانوذرات مغناطیسی هستند و با اعمال میدان مغناطیسی تحت تاثیر قرار می‌گیرند [۱۶]. یکی از روش‌های برداشت انرژی که در سالیان اخیر و بر اساس روش الکترومغناطیسی پیشنهاد شده‌است استفاده از اسلاشینگ فروسیالات است [۱۷-۱۹]. اگر ظرف نیمه‌پری از یک مایع تحت حرکات نوسانی قرار گیرد موج‌هایی در سطح مایع ایجاد می‌شود که در ادبیات فن به آن اسلاشینگ می‌گویند. در این روش فروسیال بصورت نیمه پر درون ظرفی که سیم‌پیچی شده‌است ریخته شده و مجموعه تحت اثر نیروی مغناطیسی قرار می‌گیرد. در اثر ارتعاشات مکانیکی، فروسیال درون ظرف شروع به حرکت و اسلاشینگ کرده و به دلیل تغییر خطوط میدان مغناطیسی، جریان الکتریکی در سیم پیچ القاء می‌شود. اولین بار بیبو و همکاران از فروسیالات در یک ژنراتور میکروتوان الکترومغناطیسی استفاده کرده و تاثیر پارامترهایی نظیر مقدار فروسیال، قدرت میدان مغناطیسی و میزان شتاب را در ولتاژ خروجی برداشت‌کننده مطالعه نموده‌اند. ایشان نتیجه گرفتند که میزان شتاب تاثیر بسزایی در ولتاژ خروجی داشته در حالیکه مقدار فروسیال تاثیر چندانی ندارد [۱۷]. ه و همکاران تاثیر اسلاشینگ فروسیال بر میزان ولتاژ تولیدی در یک برداشت‌کننده انرژی را تحلیل کردند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که ولتاژ خروجی که در حد میکروولت است با افزایش سرعت ارتعاش افزایش یافته و با افزایش شار مغناطیسی کاهش می‌یابد [۸]. العظمی و همکاران اسلاشینگ فروسیالات را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که حرکت موجی فروسیال باعث تولید شار مغناطیسی متغیر با زمان و در نتیجه موجب تولید نیروی محرک الکتریکی در سیم پیچ می‌گردد [۱۸]. لیو و همکاران برداشت‌کننده انرژی از اسلاشینگ فروسیالات را بصورت عددی،

جدول ۱. پارامترهای موثر در مطالعه

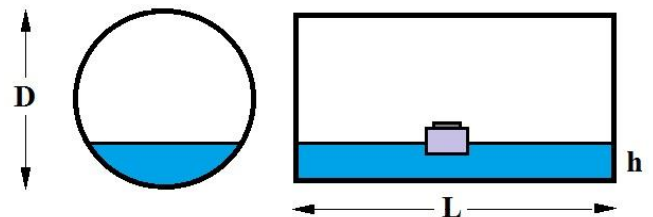
Table 1. Effective parameters in this study

پارامتر ورودی	نسبت ارتفاع آب به طول ظرف ( $h/L$ )	قدرت آهنربا ( $B$ [G])	فرکانس نوسان (Hz)	مقاومت الکتریکی ( $R$ [ $\Omega$ ])
مقادیر مورد بررسی	۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳	۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵	۳-۱ (با گام ۰/۳۳)	۱۴۷، ۸۱۹

حرکت خطی کار می‌کند. محدوده سرعت دورانی این دستگاه ۲۰-۵۰۰ دور بر دقیقه، دامنه نوسان آن ۱۷ میلی‌متر و جهت نوسان در راستای محور X بوده و قابلیت تحمل وزن حداکثر تا ۱۲ کیلوگرم را دارد. جهت جلوگیری از تاثیر میدان مغناطیسی الکتروموتور میز لرزه بر سیم پیچ اطراف ظرف، سازه‌ای جهت فاصله‌گرفتن سیم‌پیچ از الکتروموتور ساخته شده‌است. برای ثبت و اندازه‌گیری ولتاژ القایی در دو سر سیم پیچ اطراف ظرف، از اسیلوسکوپ مدل Megatek-Dso5070 که اسیلوسکوپ دیجیتالی دو کاناله می‌باشد استفاده شده‌است. این دستگاه ساخت کشور تایوان بوده و محدوده فرکانسی آن تا ۷۰ MHz و خطای اندازه‌گیری ولتاژ آن برای ولتاژهای بیشتر از ۱۰ mV در حدود ۳٪ می‌باشد. همچنین این اسیلوسکوپ می‌تواند داده‌ها را با سرعت ۱ GS/s نمونه‌برداری کرده و تاخیر زمانی آن در حدود ۵۰۰ ps می‌باشد. یک ظرف پلاستیکی به قطر ۹ cm و طول ۱۵ cm توسط سیم مسی به قطر ۱ mm و به تعداد ۵۰۰ دور به‌طور منظم سیم‌پیچی شده و دو سر سیم‌پیچ جهت اتصال به اسیلوسکوپ آزاد نگه داشته شده‌است. همچنین از سه آهنربای نئودیمیومی با قدرتهای مختلف استفاده شده‌است. نمونه‌ای از میز لرزه، سازه، ظرف و آهنربا در شکل ۲ نشان داده شده‌است. با توجه به اینکه اندازه‌گیری ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچ بایستی تحت بار صورت گیرد از دو نوع مقاومت الکتریکی به اندازه‌های ۱۴۷ و ۸۱۹ اهم استفاده شده‌است. برای هر حالت، ولتاژ القاء شده به صورت فایل از اسیلوسکوپ استخراج و ذخیره شده و به کامپیوتر منتقل می‌گردد تا جهت مقایسه پارامترها مورد تحلیل قرار گیرد. شکل شماتیکی مدار الکتریکی مورد استفاده در این مطالعه نیز در شکل ۳ آورده شده‌است.

۲-۳- بخش مدل‌سازی عددی

برداشت انرژی سیستم پیشنهاد شده در این مطالعه، بر پایه نوسانات مرز مشترک بین دو سیال و حرکات آهنربا نسبت به سیم پیچ اطراف ظرف



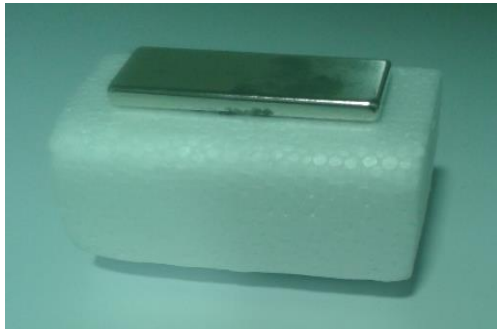
شکل ۱. شکل شماتیکی سیستم پیشنهادی

Fig. 1. Schematic diagram of the proposed system

در مسیر جریان. پارامترهای خروجی نیز عبارتند از: ولتاژ القاء شده در سیم پیچ و توان الکتریکی برداشت شده. محدوده تغییرات هر یک از پارامترهای ورودی در جدول ۱ آورده شده‌است. در این جدول  $h$  ارتفاع سیال درون ظرف و  $L$  طول ظرف می‌باشد. با توجه به جدول فوق، اگر هر آزمایش فقط یکبار انجام گیرد در مجموع ۱۲۶ آزمایش جهت استخراج کامل نتایج مورد نیاز بوده‌است، اما جهت اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌ها و حذف خطاهای احتمالی، هر آزمایش چهار بار انجام شده‌است که تعداد کل آزمایش‌های این مطالعه را به بیش از ۵۰۰ تست رسانده‌است. در نهایت میانگین داده‌های بدست آمده به عنوان داده نهایی در مقاله آورده شده‌است.

۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از: میز لرزه، اسیلوسکوپ، ظرف سیم‌پیچی شده، و آهنربا با سه قدرت مختلف. میز لرزه مورد استفاده در این مطالعه ساخت شرکت پرزان پژوه بوده و با تبدیل حرکت دورانی به



ب



الف

شکل ۲. الف) میز لرزه، سازه و ظرف سیم‌پیچی شده، ب) مجموعه آهنربا و یونولیت

Fig. 2. (a) Shaker, structure and coiled container, (b) magnet and frame unit

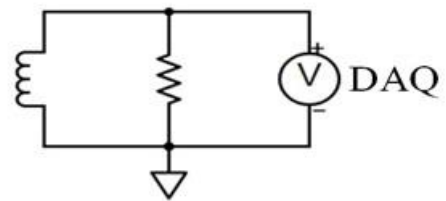
حجمی هر یک از سیالات در دامنه محاسباتی انجام می‌دهد. در این مدل، هر دو فاز میدان سرعت و فشار یکنواختی را به اشتراک می‌گذارند [۲۰]. مرز مشترک بین مایع و گاز به عنوان یک ناپیوستگی فیزیکی که خواص آن بصورت ناگهانی تغییر می‌کنند در نظر گرفته می‌شود. با فرض سیالات نیوتنی و تراکم ناپذیر، معادلات حاکم عبارتند از [۲۱]:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \left[ \nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

که عبارت دوم در سمت راست آن بیانگر نرخ تغییر شکل است.  $\mathbf{F}$  نیروی کشش سطحی بین مرزی در واحد حجم بوده و در فصل مشترک مایع و گاز به کار می‌رود. این نیرو برابر مجموع تنش‌های سطحی عمودی و مماسی می‌باشد:

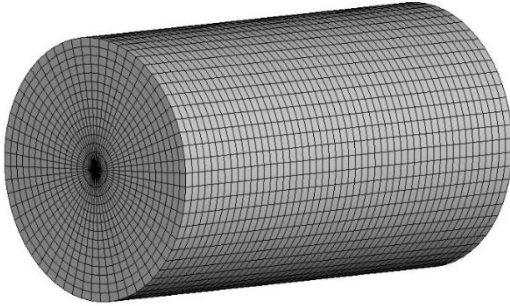
$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_t \quad (3)$$



شکل ۳. شکل شماتیک مدار الکتریکی مورد استفاده

Fig. 3. Schematic diagram of the used electrical circuit

است که در نهایت با توجه به قانون القاء فارادی باعث القاء ولتاژ در سیم پیچ می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود بتوان از پارامترهای مربوط به مرز مشترک از جمله فشار و تغییرات آن نسبت به زمان به عنوان پارامترهایی جهت پیش‌بینی عملکرد این سیستم استفاده نمود. دلیل این امر آن است که هر چقدر نوسانات سطح مشترک دو سیال بیشتر باشد باید انتظار برداشت انرژی بیشتری نیز داشته باشیم. بدین منظور در این مطالعه از مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی اسلاشینگ سیال استفاده شده و معادلات ناویر-استوکس به عنوان معادلات حاکم بر اسلاشینگ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین از مدل دوفازی حجم سیال برای تعقیب سطح مشترک دو سیال استفاده گردیده که این کار را با حل یک مجموعه معادلات مومنتوم و ردیابی کسر



شکل ۴. هندسه مورد بررسی و شبکه‌بندی بکاررفته

Fig. 4. Studied geometry and its mesh

تحریک اعمالی به مخزن در آزمایش‌های انجام‌شده بصورت سینوسی و در جهت افقی می‌باشد. رابطه ریاضی این تحریک و موقعیت مکانی مخزن از رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$x = A \sin(ft) \quad (8)$$

که در  $A$  دامنه نوسان و  $f$  فرکانس نوسان می‌باشد. برای اعمال این تحریک در مدل‌سازی عددی، سرعت حرکت مخزن توسط رابطه (۹) محاسبه شده و به کل مخزن اعمال گردیده‌است:

$$\dot{x} = Af \cos(ft) \quad (9)$$

که در آن  $\dot{x}$  مشتق زمانی تغییر مکان مخزن و در واقع سرعت حرکت آن می‌باشد.

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- بخش تجربی

در شکل ۵، نمودار ولتاژ القاء‌شده در سیم پیچ در طول زمان آزمایش نشان داده شده‌است. این داده‌ها مربوط قوی‌ترین آهنربا (G ۰/۱۵)، و مقاومت ۸۱۹ اهمی در فرکانس ۲ هرتز می‌باشند. مشاهده می‌گردد که در اثر اسلاشینگ سیال و حرکت آهنربا در سطح آن، ولتاژی در سیم پیچ القاء می‌شود که به دلیل تغییر جهت حرکت آهنربا، ولتاژ القایی می‌تواند مثبت یا منفی باشد. همچنین در شرایط یکسان و با تغییر ارتفاع سیال، ولتاژ القاء شده دچار تغییر می‌گردد. برای تمامی حالت‌های متغیرهای ورودی، آزمایش‌ها تکرار شده و داده‌هایی مشابه این شکل بدست آمده‌است. برای

که  $F_t$  و  $F_n$  به ترتیب تنش نرمال و مماسی در فصل مشترک فازها می‌باشد.

خواص بکاررفته در در معادلات (۱) و (۲) خواص متوسط بوده و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad (4)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \quad (5)$$

که  $\rho_l$  و  $\rho_g$  به ترتیب چگالی مایع (آب) و گاز (هوا) می‌باشند. همچنین در رابطه (۵)،  $\mu_l$  و  $\mu_g$  به ترتیب لزجت آب و هوا هستند.  $\alpha$  کسر حجمی سیال است که برای آب مقدار ۱ و برای هوا صفر در نظر گرفته شده و در مرز مشترک بین دو سیال مقدار آن بین صفر و یک می‌باشد. کارکرد اصلی مدل حجم سیال در محاسبه  $\alpha$  است. در این مدل برای هر فاز یک کسر حجمی در نظر گرفته شده و برای محاسبه آن از رابطه زیر استفاده می‌شود:

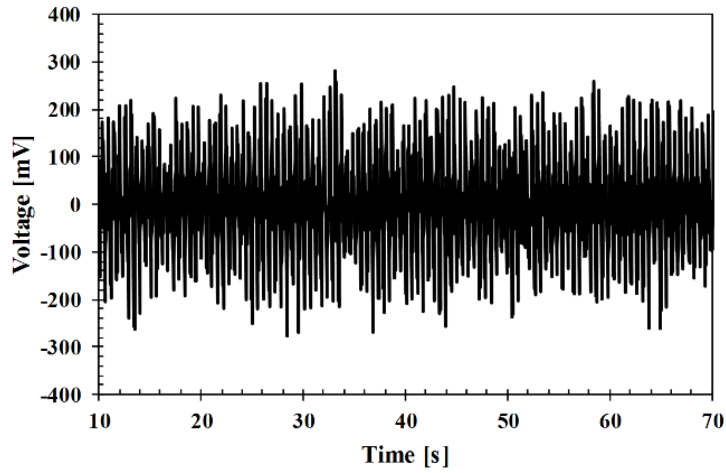
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (6)$$

لازم بذکر است معادله (۶) برای فاز اصلی حل نشده و فقط برای فاز ثانویه حل شده‌است. مجموع کسر حجمی دو فاز در حل سلول برابر یک بوده و برای محاسبه کسر حجمی فاز اولیه از رابطه زیر استفاده شده‌است:

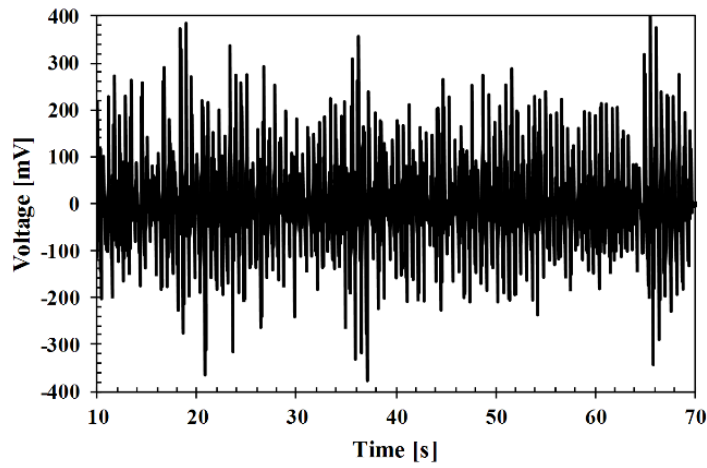
$$\alpha_l + \alpha_g = 1 \quad (7)$$

شرایط مرزی در نظر گرفته‌شده در این مطالعه برای تمامی مرزهای موجود در مسئله از نوع دیواره عایق می‌باشد. از نرم افزار آنسیس فلوئنت ۱۷ برای حل معادلات حاکم استفاده گردیده‌است. از الگوریتم فشار-ضمنی با تقسیم عملگرها<sup>۱</sup> برای حل میدان جریان، از طرح بالادست مرتبه دوم<sup>۲</sup> برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و از طرح باز ساخت هندسی<sup>۳</sup> برای معادله کسر حجمی استفاده گردیده‌است. شبکه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه از نوع شبکه‌بندی منظم بوده و در شکل ۴ نشان داده شده‌است.

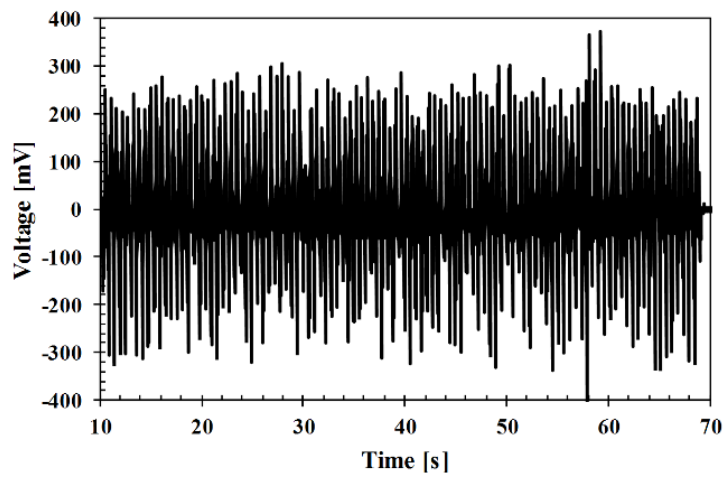
- 1 Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)
- 2 Second Order Upwind
- 3 Geo-Reconstruct



الف



ب



ج

شکل ۵. ولتاژ القاء شده با زمان با آهنربای ۰/۱۵ گاوسی و مقاومتی ۸۱۹ اهمی در فرکانس ۲ هرتز:  
الف)  $h/L=0.2$ ، ب)  $h/L=0.25$ ، ج)  $h/L=0.3$

Fig. 5. Variation of induced voltage with time for magnet strength of 0.15G, Electrical resistance of 819 at frequency of 2Hz: (a)  $h/L=0.2$ , (b)  $h/L=0.25$ , (c)  $h/L=0.3$



مهم دیگر، تاثیر مقاومت الکتریکی بر ولتاژ القاشده می‌باشد بدینصورت که تقریباً در تمامی حالات مورد مطالعه، با افزایش مقاومت الکتریکی، ولتاژ القاء شده افزایش می‌یابد. این یافته در تطابق با نتایج دیگر مقالات از جمله مرجع [۱۵] می‌باشد. با کاهش مقاومت الکتریکی، جریان الکتریکی افزایش یافته و با توجه به قانون اهم، ولتاژ القایی کاهش خواهد یافت. بیشترین ولتاژ القایی در حدود  $850 \text{ mV}$  ثبت شده‌است.

در شکل ۷، نتایج مربوط به توان الکتریکی برداشت‌شده نشان داده شده‌است. برای محاسبه توان الکتریکی از فرمول زیر استفاده شده‌است:

$$Power = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (10)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v(t))^2 dt} \quad (11)$$

که  $V_{rms}$ ،  $R$ ،  $T$  و  $v(t)$  به ترتیب ریشه میانگین مربعات ولتاژ، مقاومت الکتریکی، دوره تناوب و ولتاژ خروجی می‌باشند. در این شکل هم مشاهده می‌شود که بیشترین توان برداشت‌شده در هر حالت مربوط به فرکانس تشدید آن حالت بوده و ما بین فرکانس اول و دوم ابتدا کاهش و سپس افزایش توان روی می‌دهد. همچنین با افزایش قدرت آهنربا شاهد افزایش در برداشت انرژی هستیم. تاثیر ارتفاع بی‌بعد سیال در برداشت انرژی همانند تاثیر آن بر ولتاژ القایی است، بدینصورت که سیال با کمترین ارتفاع کمترین مقدار برداشت انرژی را داشته و با افزایش ارتفاع سیال شاهد افزایش توان الکتریکی برداشت‌شده خواهیم بود. نکته مهم این شکل، بالاتر بودن توان برداشت‌شده با مقاومت الکتریکی کوچکتر می‌باشد که این یافته با داده‌های موجود در مقالات پیشین از جمله مراجع [۱۵ و ۱۷] مطابقت دارد. دلیل این امر را می‌توان از رابطه (۱۱) دریافت که به دلیل قرارگرفتن مقاومت الکتریکی در مخرج کسر، افزایش مقاومت الکتریکی باعث کاهش توان برداشت‌شده خواهد گردید. دلیل فیزیکی این یافته نیز بیشتر بودن مقاومت الکتریکی از مقاومت خود سیم پیچ است که باعث کاهش توان الکتریکی می‌گردد. بنابراین اگر هدف از برداشت انرژی، ولتاژ القاء شده باشد استفاده از مقاومت بزرگتر پیشنهاد می‌شود اما برای مواردی که توان الکتریکی اهمیت بیشتری داشته باشد استفاده از مقاومت الکتریکی کوچک مفیدتر خواهد بود. بیشترین توان برداشت‌شده در این مطالعه حدود  $400 \mu W$  بوده‌است.

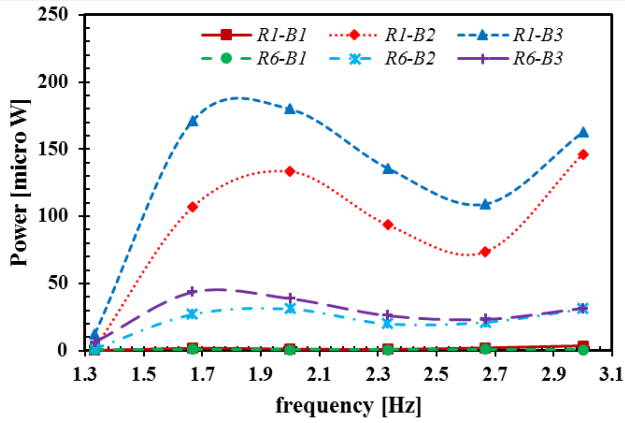
همانگونه که در قسمت مقدمه اشاره شد، روش مورد استفاده در این

سهولت در ایجاد نمودارهای بعدی، ولتاژهای بیشینه و کمینه القایی در هر یک از آزمایشها بدست آمده و با جمع قدر مطلق این مقادیر ولتاژی موسوم به ولتاژ قله به دره ( $V_{pp}$ ) محاسبه شده و در بقیه شکل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است.

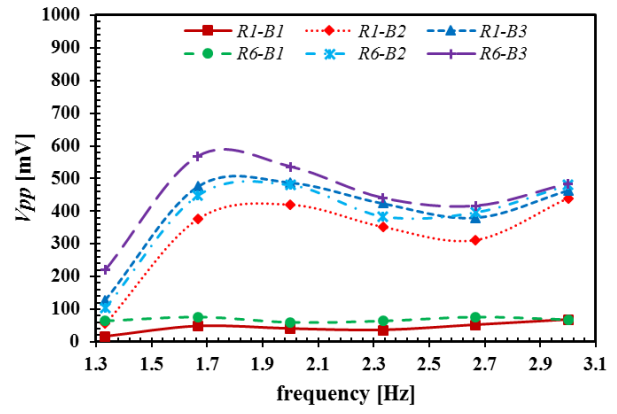
### ۳-۲- تاثیر پارامترهای مختلف در برداشت انرژی

تاثیر قدرت آهنربا، ارتفاع سیال و مقاومت الکتریکی بر ولتاژ القایی و توان برداشت شده در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌است. مقادیر  $B$  و  $R$  موجود در این شکل‌ها در جدول ۱ آورده شده‌است.

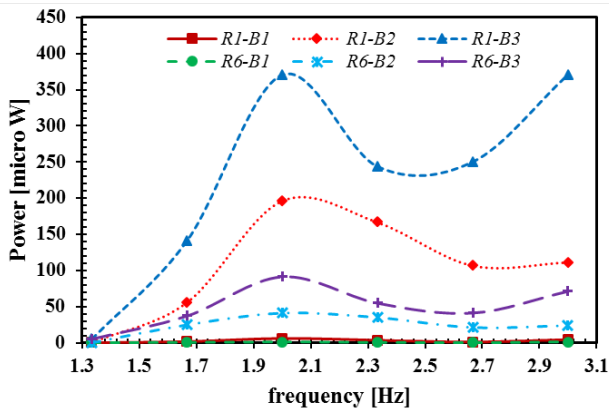
از شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس نوسانات، ولتاژ القایی افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود می‌رسد که دلیل این موضوع، وقوع پدیده تشدید در آن فرکانس بخاطر انطباق فرکانس تحریک با فرکانس طبیعی مجموعه سازه و ظرف است. در این فرکانس، تلاطم سطح سیال بیشتر شده که باعث حرکات بیشتر و سریعتر آهنربا درون ظرف و در نتیجه منجر به افزایش ولتاژ القایی گردیده‌است. می‌توان دریافت که با افزایش ارتفاع سیال درون ظرف، فرکانس طبیعی مجموعه سازه و ظرف افزایش یافته‌است. فرکانس طبیعی مجموعه سازه و ظرف در نسبت‌های  $0.2$ ،  $0.25$  و  $0.3$  برای  $h/L$  به ترتیب در حدود  $1/75$ ،  $2$  و  $2/3$  هرگز می‌باشد. بعد از این نقطه و با افزایش فرکانس نوسانات، شاهد کاهش ولتاژ القایی و رسیدن به کمترین مقدار می‌باشیم. مجدداً با افزایش فرکانس، ولتاژ القایی شروع به افزایش می‌نماید. دلیل این امر نزدیک شدن سیستم به فرکانس طبیعی در مد دوم است. البته با توجه به محدودیت‌های میز لرزه مورد استفاده، ادامه آزمایشات تا فرکانس‌های بالاتر امکان پذیر نبوده و فرکانس نوسانات تا  $Hz$  ۳ مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نکته دیگر قابل مشاهده در شکل ۶ تاثیر قدرت آهنربا بر ولتاژ القاء شده‌است بدینصورت که با افزایش قدرت آهنربا، ولتاژ القایی در سیم پیچ اطراف ظرف افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع بی‌بعد سیال از  $0.2$  به  $0.25$  شاهد افزایش ولتاژ القایی و با افزایش مجدد ارتفاع بی‌بعد از  $0.25$  به  $0.3$  تغییرات محسوسی اتفاق نمی‌افتد. برای توجیه این امر می‌توان اینگونه بیان کرد که با توجه به ثابت بودن وزن مجموع آهنربا و یونولیت، هر چقدر ارتفاع سیال بیشتر باشد بالطبع دارای جرم و لختی بیشتری نیز خواهد بود. به همین دلیل به ازای سایر شرایط یکسان، سیال با وزن بیشتر قادر به اعمال نیروی بیشتری به آهنربا بوده و باعث حرکت بیشتر آن درون ظرف خواهد شد. در نتیجه خطوط میدان بیشتری در این حالت قطع شده و ولتاژ بیشتری نیز در سیم پیچ القاء خواهد شد. مورد



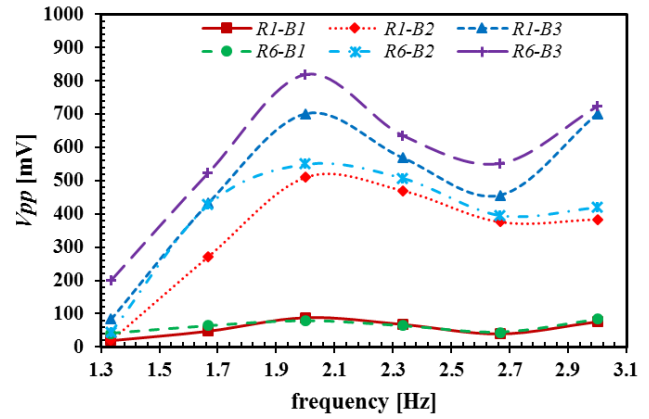
الف



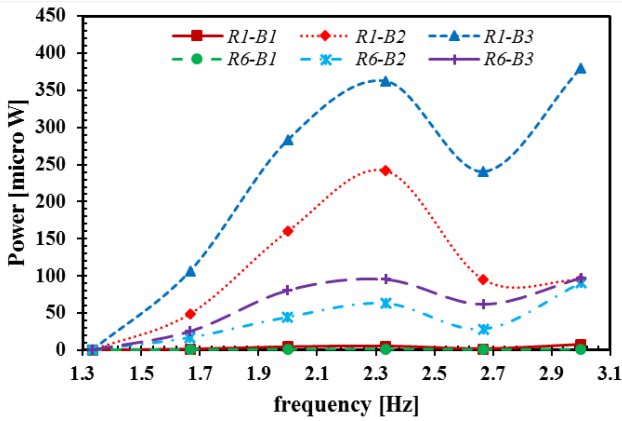
الف



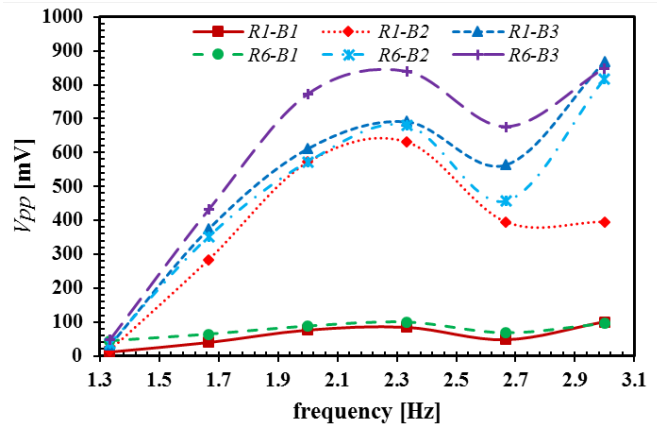
ب



ب



شکل ۷. توان برداشت‌شده، الف)  $h/L=0.2$ ، ب)  $h/L=0.25$ ، ج)  $h/L=0.3$



شکل ۶. ولتاژ القاء‌شده، الف)  $h/L=0.2$ ، ب)  $h/L=0.25$ ، ج)  $h/L=0.3$

Fig. 7. Harvested electrical power: (a)  $h/L=0.2$ , (b)  $h/L=0.25$ , (c)  $h/L=0.3$

Fig. 6. Induced voltage: (a)  $h/L=0.2$ , (b)  $h/L=0.25$ , (c)  $h/L=0.3$



جدول ۲. مقایسه بیشینه ریشه میانگین مربعات ولتاژ برداشت‌شده در مطالعه حاضر با مقالات مرجع

Table 2. Comparison of maximum root mean square of harvested voltage with reference papers

مقاله	فرکانس (Hz)	بیشینه ولتاژ برداشت‌شده ( $V_{rms}$ [mV])
مرجع ۱۷	۹	۲۰
مرجع ۱۸	۲/۱	۳/۵
مرجع ۱۹	۱/۹	۳۰
مطالعه حاضر	۲/۳	۴۸/۷

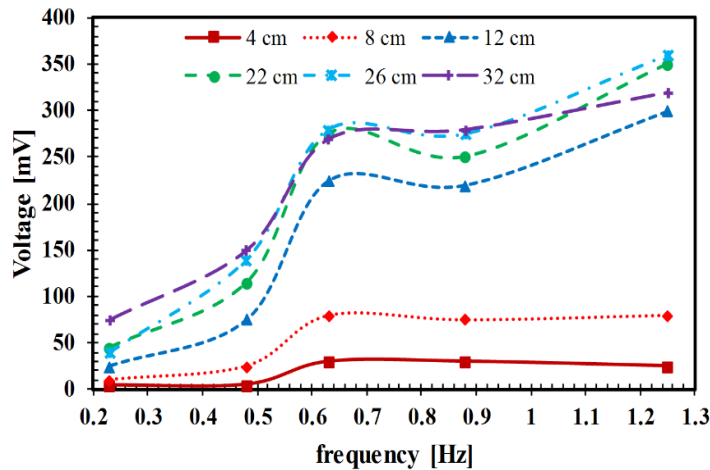


شکل ۸. دستگاه صفحه تراش و سیستم نصب‌شده روی آن

Fig. 8. Shaper machine and installed system on it

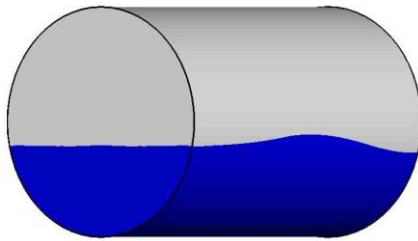
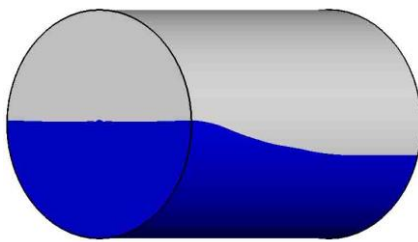
۳-۳- کاربرد روش پیشنهادی روی دستگاه صفحه تراش  
 برای بررسی کارکرد روش پیشنهادی، سیستم مورد نظر روی یک دستگاه صفحه تراش نصب‌شده و در حالات مختلف کارکرد این دستگاه، میزان برداشت انرژی اندازه‌گیری شده‌است. دستگاه صفحه تراش و سیستم نصب شده روی آن در شکل ۸ نشان داده شده‌است. دو متغیر اصلی این دستگاه، طول کورس و نوسان حرکت آن است. پس داده‌های تجربی برای هر یک از حالت‌های موجود استخراج شده و در شکل ۹ رسم شده‌است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی به خوبی بر روی دستگاه صفحه تراش عمل نموده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش طول کورس و همچنین نوسان حرکت صفحه تراش، ولتاژ القایی بیشتر شده‌است. بیشترین مقدار ولتاژ القایی در سیم پیچ  $350 \text{ mV}$  است که مربوط به طول

مطالعه نسبت به مطالعات قبلی که از فروسیالات استفاده کرده‌اند متفاوت است. بدین‌صورت که در مطالعات پیشین، فروسیال داخل ظرف پر شده و خارج از ظرف و نزدیکی آن آهنرباهای ثابتی قرار گرفته است. اما در این مطالعه آب داخل ظرف ریخته شده و آهنربا روی آن شناور گردیده‌است. با این حال مقایسه‌ای از عملکرد این دو سیستم در جدول ۲ آورده شده‌است. قابل ذکر است ولتاژ برداشت‌شده به عوامل مختلفی چون فرکانس نوسان، سطح مایع مخزن، قدرت آهنربا و دیگر پارامترها بستگی دارد که به دلیل متفاوت بودن این پارامترها در مطالعات مختلف، نمی‌توان مقایسه دقیقی بین عملکرد آنها انجام داد. اما بررسی جدول (۲) دید کلی از محدوده عملکردی سیستم‌های مختلف مورد مطالعه در مقالات بدست می‌دهد.



شکل ۹. ولتاژ القایی در دستگاه صفحه تراش

Fig. 9. Induced voltage in the shaper machine



(ب)

(الف)

شکل ۱۰. پروفیل سطح مایع در اثر اسلاشینگ در فرکانس ۲ هرتز: (الف) مطالعه تجربی، و (ب) مدل‌سازی عددی

Fig. 10. Interface profile during sloshing at  $f=2\text{Hz}$ : (a) experimental study, (b) numerical modeling

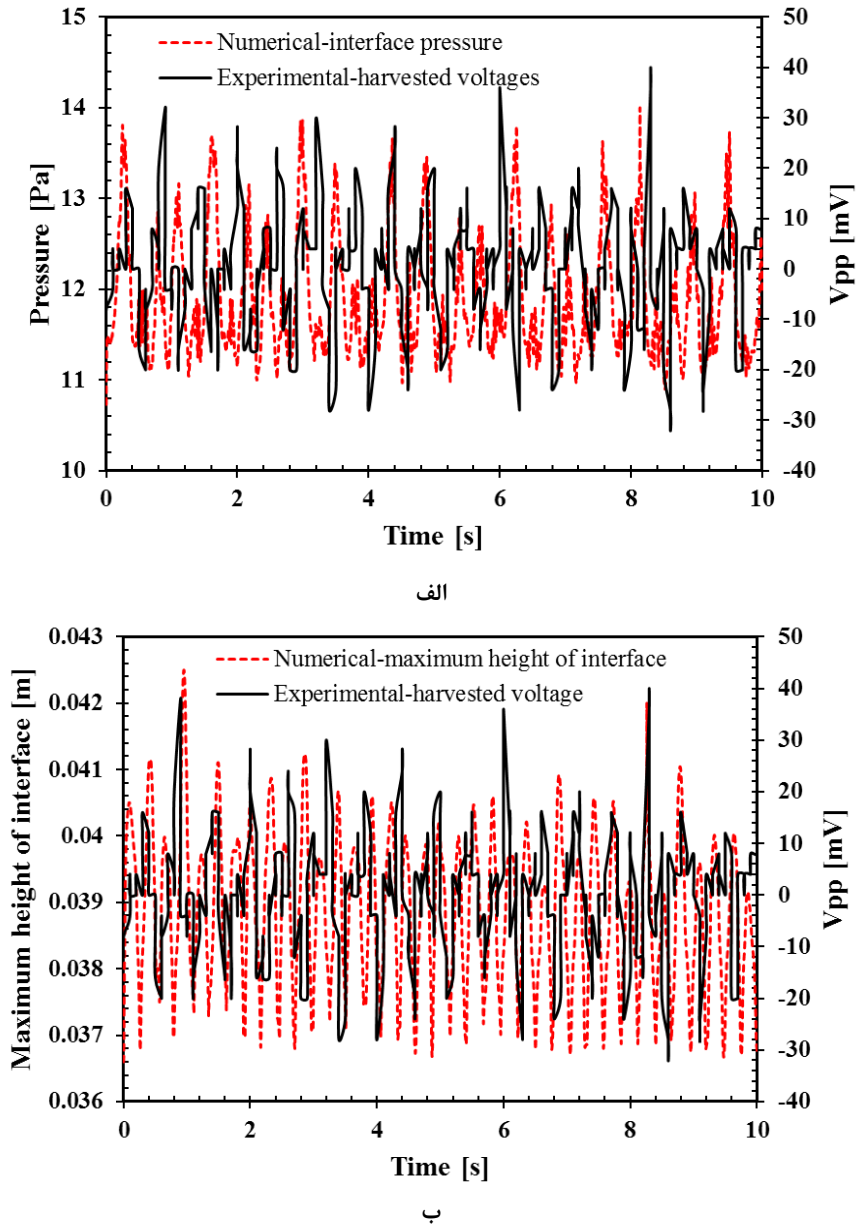
شده‌است. مشاهده می‌شود که مدل عددی، به خوبی تغییرات پروفیل مایع در اثر اسلاشینگ را محاسبه نموده‌است.

همانگونه که در بخش قبل گفته شد، برداشت انرژی در سیستم پیشنهادی، به خاطر نوسانات مرز مشترک بین دو سیال و حرکات آهنربا نسبت به سیم پیچ اطراف ظرف است که در نهایت با توجه به قانون فارادی باعث القاء ولتاژ در سیم پیچ می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود پارامترهای مربوط به مرز

کورس ۲۶ cm و فرکانس ۱/۲۵ هرتز می‌باشد.

۳-۴- بخش عددی

برای بررسی دقت روش عددی بکاررفته، مقایسه‌ای بین یافته‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی انجام شده‌است. برای این منظور، پروفیل حرکت مایع در دو حالت ذکر شده مقایسه گردیده و در شکل ۱۰ نشان داده



شکل ۱۱. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و ولتاژ برداشتی با زمان در فرکانس ۲ هرتز و  $h/L=0.25$  با  $R1$  و  $B1$ : (الف) فشار مرز مشترک، و (ب) ارتفاع بیشینه مرز مشترک

Fig. 11. Comparison of numerical results and harvested voltage variations with time at  $f=2\text{Hz}$  and  $h/L=0.25$  with  $R1$  and  $B1$ : (a) interface pressure, (b) maximum height of the interface

حاصل از روش عددی تقریباً مشابه نوسانات ولتاژ برداشتی بوده و قله و دره‌های آنها تقریباً در زمان‌های یکسانی اتفاق افتاده‌اند. در نتیجه می‌توان از تغییرات نمودار فشار و ارتفاع سطح مشترک، برآورد اولیه‌ای از میزان برداشت انرژی احتمالی بدست آورد. مقدار دقیق ولتاژ القایی در سیم پیچ به عوامل دیگری از جمله قدرت آهنربا و مقاومت الکتریکی استفاده‌شده در مدار بستگی دارد.

مشترک و تغییرات آنها نسبت به زمان، پیش‌بینی‌کننده مشاهدات تجربی باشند. بدین منظور و برای بررسی کارایی مدل عددی بکاررفته در این مطالعه، تغییرات فشار و ارتفاع مرز مشترک حاصل از روش عددی و ولتاژ برداشت‌شده آزمایشگاهی با زمان انجام گردیده و در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که شباهت کیفی بسیار زیادی بین نمودارهای عددی و داده‌های تجربی وجود دارد. بدین صورت که نوسانات هر دو پارامتر

#### ۴- نتیجه گیری

در این مطالعه روشی جهت برداشت انرژی از ارتعاشات مکانیکی و تبدیل آن به جریان و ولتاژ الکتریکی پیشنهاد شده است. ظرفی حاوی سیال، سیم پیچی گردیده و آهنربایی درون آن شناور گردیده است. با حرکت نوسانی ایجاد شده توسط میز لرزه، پدیده اسلاشینگ درون سیال اتفاق افتاده و آهنربا درون ظرف حرکت کرده است. بدلیل حرکت نسبی بین آهنربا و سیم پیچ و در نتیجه قطع خطوط میدان مغناطیسی، جریان و ولتاژی در سیم پیچ القاء گردیده است. ولتاژ و توان برداشت شده به ازای پارامترهای مختلف از قبیل فرکانس نوسان، قدرت آهنربا، ارتفاع سیال و مقدار مقاومت الکتریکی محاسبه و نتایج زیر بدست آمده است.

- بیشترین ولتاژ القایی و توان برداشت شده در این مطالعه به ترتیب  $850 \text{ mV}$  و  $400 \mu\text{W}$  ثبت شده است.

- با افزایش فرکانس نوسانات، ولتاژ و توان برداشتی افزایش یافته و در فرکانسی موسوم به فرکانس طبیعی سازه و ظرف داده‌های ثبت شده بیشترین مقدار را دارند. فرکانس طبیعی مجموعه سازه و ظرف در نسبت‌های  $0/25$ ،  $0/3$  و  $0/75$  برای  $h/L$  به ترتیب در حدود  $1/75$ ،  $2$  و  $2/3$  هرگز می‌باشد. با افزایش فرکانس و دور شدن از حالت تشدید در مد اول، اسلاشینگ سیال کاهش یافته و در نتیجه مقادیر برداشت شده نیز کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر فرکانس و نزدیک شدن به فرکانس طبیعی دوم سیستم و سازه، مجدداً تلاطم سیال درون ظرف افزایش یافته که منجر به افزایش برداشت انرژی گردیده است.

- با افزایش ارتفاع سیال درون ظرف برداشت انرژی نیز بیشتر شده است. دلیل این موضوع می‌تواند افزایش لختی به علت افزایش جرم سیال درون ظرف و در نتیجه افزایش جابجایی آهنربا روی سطح سیال باشد. همچنین همانگونه که انتظار می‌رود افزایش قدرت آهنربا منجر به افزایش برداشت انرژی شده است.

- ولتاژ القایی برای مقاومت قوی‌تر بیشتر بوده و در توان الکتریکی برداشت شده عکس این موضوع روی می‌دهد. این یافته در تطابق با یافته‌های مقالات پیشین از جمله مراجع [۱۷ و ۱۵] است. دلیل این پدیده، کاهش ولتاژ در مقاومت‌های کمتر به دلیل افزایش جریان الکتریکی است.

- سیستم پیشنهادی در دستگاه صفحه تراش استفاده شده و بیشترین مقدار ولتاژ القایی در سیم پیچ  $350 \text{ mV}$  ثبت گردید که مربوط به

طول کورس  $26 \text{ cm}$  و فرکانس  $1/25$  هرگز می‌باشد. لذا این سیستم در دستگاه صفحه تراش عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده است، بطوریکه این میزان ولتاژ برداشت شده قادر به استفاده در سنسورهای بیسیم جهت کنترل دقیق عملکرد این دستگاه می‌باشد.

- با توجه به اینکه عامل اصلی برداشت انرژی در سیستم مورد بررسی، حرکات مرز مشترک دو سیال به دلیل اسلاشینگ است بنابراین با مدلسازی عددی می‌توان به طراحی و تحلیل عملکرد آن پرداخت. برای این منظور از فشار سطح مشترک و ارتفاع ماکزیمم آن استفاده شده و تطابق خوبی با داده‌های تجربی مشاهده گردید. بدینصورت که وقوع نوسانات شدید در فشار و یا ارتفاع سطح آزاد، تقریباً همزمان با القاء بیشترین ولتاژها می‌باشد.

#### ۵- فهرست علائم

##### علائم انگلیسی

$A$	دامنه نوسان، m
$B$	قدرت میدان مغناطیسی، G
$D$	قطر ظرف، m
$F$	نیرو در واحد حجم، $\text{N/m}^3$
$f$	فرکانس، Hz
$g$	شتاب جاذبه، $\text{m/s}^2$
$h$	ارتفاع سیال، m
$L$	طول ظرف، m
$m$	انتقال جرم،
$P$	فشار، Pa
$R$	مقاومت الکتریکی، $\Omega$
$T$	دوره زمانی، s
$t$	زمان، s
$U$	سرعت، m/s
$v$	ولتاژ، V
$V_{rms}$	ریشه میانگین مربعات ولتاژ، $\text{V}^2$

##### علائم یونانی

$\alpha$	کسر حجمی
$\rho$	چگالی، $\text{kg/m}^3$

##### زیرنویس

$l$	مایع
$g$	گاز

- [10] M.P. Soares dos Santos, J.A.F. Ferreira, J.A.O. Simões, R. Pascoal, J. Torrão, X. Xue, E.P. Furlani, Magnetic levitation-based electromagnetic energy harvesting: a semi-analytical non-linear model for energy transduction, *Scientific Reports*, 6(1) (2016) 18579.
- [11] Z. Li, Z. Yan, J. Luo, Z. Yang, Performance comparison of electromagnetic energy harvesters based on magnet arrays of alternating polarity and configuration, *Energy Conversion and Management*, 179 (2019) 132-140.
- [12] M.A. Halim, H. Cho, M. Salauddin, J.Y. Park, A miniaturized electromagnetic vibration energy harvester using flux-guided magnet stacks for human-body-induced motion, *Sensors and Actuators A: Physical*, 249 (2016) 23-31.
- [13] R.M. Toyabur, M. Salauddin, H. Cho, J.Y. Park, A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric-electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations, *Energy Conversion and Management*, 168 (2018) 454-466.
- [14] X. Liu, J. Qiu, H. Chen, X. Xu, Y. Wen, P. Li, Design and Optimization of an Electromagnetic Vibration Energy Harvester Using Dual Halbach Arrays, *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11) (2015) 1-4.
- [15] J.G. Monroe, O.T. Ibrahim, S.M. Thompson, N. Shamsaei, Energy harvesting via fluidic agitation of a magnet within an oscillating heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, 129 (2018) 884-892.
- [16] J.L. Neuringer, R.E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics, The Physics of Fluids*, 7(12) (1964) 1927-1937.
- [17] A. Bibo, R. Masana, A. King, G. Li, M.F. Daqaq, Electromagnetic ferrofluid-based energy harvester, *Physics Letters A*, 376(32) (2012) 2163-2166.
- [18] S. Alazmi, Y. Xu, M.F. Daqaq, Harvesting energy from the sloshing motion of ferrofluids in an externally excited container: Analytical modeling and experimental validation, *Physics of Fluids*, 28(7) (2016) 077101.
- [19] Q. Liu, S.F. Alazemi, M.F. Daqaq, G. Li, A ferrofluid based energy harvester: Computational modeling, analysis, and experimental validation, *Journal of*
- [1] I. Sari, T. Balkan, H. Kulah, An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations, *Sensors and Actuators A: Physical*, 145-146 (2008) 405-413.
- [2] P. Glynne-Jones, M.J. Tudor, S.P. Beeby, N.M. White, An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems, *Sensors and Actuators A: Physical*, 110(1) (2004) 344-349.
- [3] S.P. Beeby, M.J. Tudor, N.M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technology*, 17(12) (2006) R175-R195.
- [4] A. Kansal, M. B. Srivastava, Distributed Energy Harvesting for Energy Neutral Sensor Networks, UCLA: Center for Embedded Network Sensing, (2005) <https://escholarship.org/uc/item/96j1w5jc>.
- [5] D. Zhu, S. Roberts, M.J. Tudor, S.P. Beeby, Design and experimental characterization of a tunable vibration-based electromagnetic micro-generator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 158(2) (2010) 284-293.
- [6] M. El-hami, P. Glynne-Jones, N.M. White, M. Hill, S. Beeby, E. James, A.D. Brown, J.N. Ross, Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 92(1) (2001) 335-342.
- [7] A. Munaz, B.-C. Lee, G.-S. Chung, A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet, *Sensors and Actuators A: Physical*, 201 (2013) 134-140.
- [8] D.W. Oh, D.Y. Sohn, D.G. Byun, Y.S. Kim, Analysis of electromotive force characteristics and device implementation for ferrofluid based energy harvesting system, in: 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014, pp. 2033-2038.
- [9] C. Sravanthi, J.M. Conrad, A survey of energy harvesting sources for embedded systems, in: *IEEE SoutheastCon 2008*, 2008, pp. 442-447.

[21] P.-j. Ming, W.-y. Duan, Numerical Simulation of Sloshing in Rectangular Tank with VOF Based on Unstructured Grids, *Journal of Hydrodynamics*, 22(6) (2010) 856-864.

Magnetism and Magnetic Materials, 449 (2018) 105-118.  
[20] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39(1) (1981) 201-225.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Maroofiazar, M. Fahimi Farzam, N. Pashaei, *Experimental and numerical study of energy harvesting from sloshing of a liquid and its performance on shaper machine*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(Special Issue 6)(2021) 3911-3924.

DOI: 10.22060/mej.2021.19169.6967

