



برداشت انرژی از جوشش استخری با استفاده از القای الکترومغناطیسی: مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی

رسول معروفی آذر*، مازیار فهیمی فرزاد

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

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۷
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳

کلمات کلیدی:

برداشت انرژی
جوشش
قانون القاء فارادی
آهنربا

سیم پیچ

خلاصه: در این مطالعه روشی برای برداشت انرژی از گرمای اتلافی پیشنهاد شده است. در سیستم پیشنهادی، یک آهنربا روی مایع در ظرف سیم پیچی شده شناور شده و سیستم روی منبع حرارت قرار گرفته است. با جوشش مایع و طبق قانون القای فارادی، با حرکت آهنربا در داخل ظرف، ولتاژ در سیم پیچ القا شده است. دمای مازاد، ابعاد ظرف، ارتفاع مایع در ظرف و شکل و قطر قاب به عنوان پارامترهای مؤثر انتخاب شده است. تأثیر این پارامترها بر ولتاژ قله به دره و جذر میانگین مربعات ولتاژ به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که حداکثر انرژی در مقادیر بالاتر دمای مازاد، ارتفاع مایع، دور سیم پیچ و قطر قاب با شکل قاب کروی برداشت می‌شود. بیشترین مقادیر اندازه‌گیری شده به ترتیب ۵۳۲ میلی ولت و ۹۵/۶۵ میلی ولت برای V_{rms} و V_{pp} بود. در بخش دوم این تحقیق از روش عددی برای شبیه‌سازی و تحلیل سیستم پیشنهادی استفاده شده است. تأثیر پارامترهای مختلف بر ویژگی‌های سطح مشترک بررسی شده است. نتایج نشان داد که روند تغییرات پارامترهای سطح مشترک (شامل فشار و ارتفاع آن) با داده‌های تجربی همخوانی دارد. بنابراین می‌توان از این روش برای طراحی و پیش‌بینی عملکرد دستگاه برداشت انرژی استفاده نمود.

۱- مقدمه

با توجه به محدود بودن سوخت‌های فسیلی و آسیب‌هایی که به محیط زیست می‌زند لزوم استفاده از انرژی‌های جایگزین روز به روز بیشتر احساس می‌شود. برداشت انرژی فرایندی است که از طریق آن انرژی از منابع خارجی از قبیل انرژی خورشیدی، انرژی حرارتی، انرژی باد و انرژی جنبشی ضبط و ذخیره شده و برای دستگاه‌های کوچک و بی سیم مانند آنهایی که در لوازم الکترونیکی پوشیدنی و شبکه حسگرهای بی سیم استفاده می‌شوند [۱].

در سالیان اخیر استفاده از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی مورد توجه بسیاری از صنایع قرار گرفته است. از اینرو تلاش‌های بسیاری برای کاهش مصرف انرژی این دستگاه‌ها صورت گرفته است [۲]. کاربردهایی نظیر حسگرها در ساختمان‌ها، ایمپلنت‌های پزشکی، شبکه‌های حسگرهای بی سیم، حسگرهای مورد استفاده در صنایع نظامی و ... از جمله موارد استفاده این سیستم‌ها می‌باشد [۳]. در حال حاضر از باتری‌ها برای تأمین انرژی الکتریکی این تجهیزات استفاده می‌گردد که دارای محدودیت‌ها و معایبی

می‌باشند از جمله عمر محدود، اندازه بزرگ، دشواری‌های جایگزینی و وجود مواد سمی و خطرناک. یک برداشت کننده انرژی می‌تواند باعث افزایش کارایی و عمر تجهیزات مورد استفاده گردد [۴]. اکثر صورت‌های مختلف انرژی قابل تبدیل به جریان الکتریسیته یا ولتاژ می‌باشند. از جمله مهم‌ترین انرژی‌هایی که مطالعات مختلفی در تبدیل آنها به الکتریسیته انجام گرفته است عبارتند از: حرکت، ارتعاش، گرما، صوت، نور و غیره. برای برداشت انرژی از هریک از صورت‌های گفته شده انرژی از تجهیزات مخصوصی استفاده می‌گردد. برداشت انرژی از گرمای اتلافی مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است [۵]. با توجه به دمای پایین در اکثر منابع گرمای اتلافی، نمی‌توان از سیستم‌های رایج تبدیل انرژی، مانند چرخه‌های برایتون و رانکین، برای تولید الکتریسیته استفاده نمود [۶]. بنابراین مبدل‌های مختلفی بدین منظور طراحی و ساخته شده است. با استفاده از این تجهیزات می‌توان گرماهای اتلافی کوچک را به طور مستقیم به توان الکتریکی در محدوده میلی وات و میکرووات تبدیل نمود. از جمله ساز و کارهای بکار رفته در این تجهیزات می‌توان به پدیده‌های ترموالکتریسیته [۷]، پیروالکتریسیته [۸]، ترمومگنتیسیته [۹] و ترموالاستیسیته [۱۰] اشاره نمود.

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: maroofiazar@maragheh.ac.ir

۲- مواد و روش‌ها

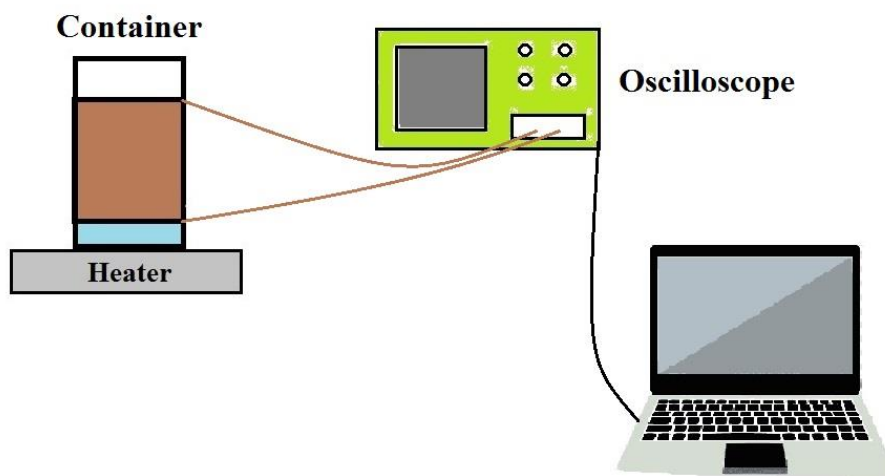
۲-۱- بخش آزمایشگاهی

در این مطالعه از روش آزمایشگاهی برای مطالعه برداشت انرژی از جوش سیالات استفاده شده است. بدین منظور سکوی آزمایشی مهیا گردیده که بصورت شماتیکی در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است. این سکو شامل ظرف حاوی سیال، سیم پیچ، آهنربا، چگالنده، اسیلوسکوپ یا مولتی متر و هیتر می‌باشد. روش انجام آزمایش بدین گونه است که ظرف اصلی سیم پیچی شده و در هر یک از حالت‌های مورد بررسی، سیال مورد نظر با ارتفاع مشخص داخل ظرف ریخته می‌شود. سپس ظرف حاوی سیال روی گرمکن قرار می‌گیرد تا دمای آن بالا رفته و به نقطه جوش برسد. بعد از جوشیدن سیال و پس از پایا شدن شرایط، آهنربا داخل قابی از جنس یونولیت قرار گرفته و روی سیال شناور می‌گردد. نمونه‌ای از قاب‌های یونولیتی استفاده شده در این مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. در ابتدای انجام پژوهش و برای بررسی تأثیر اندازه قاب، ابعاد (قطرهای) مختلف برای قاب‌های شناور انتخاب شده و چند آزمایش ابتدایی انجام گرفت. نتایج حاصل با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه شد که نشان می‌داد اگر قطر قاب از نصف قطر ظرف بیشتر باشد نتایج بخش عددی و تجربی تا حدودی متفاوت خواهند بود. لذا برای ادامه مطالعه، از قاب‌هایی با قطر کمتر از نصف قطر ظرف استفاده شد. همچنین از آنجاییکه وزن قاب‌ها بسیار کم می‌باشد تأثیر چشمگیری در رفتار مرز و فازها نداشته است.

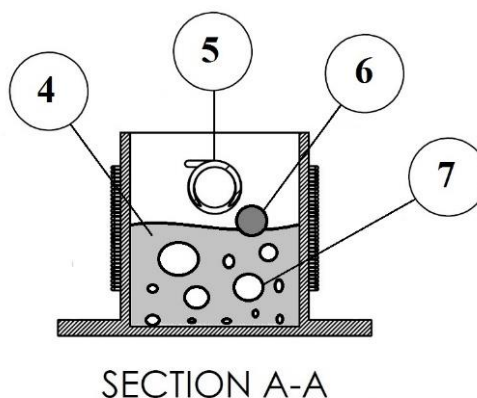
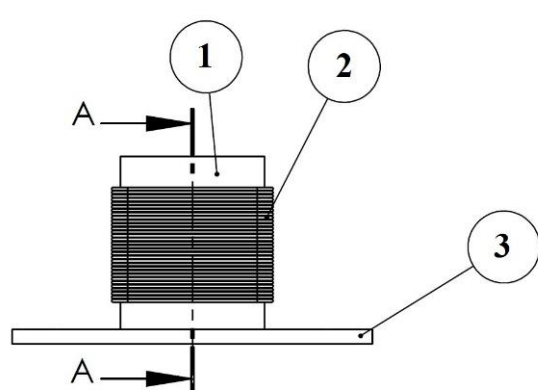
به دلیل حرکات سطح سیال در حین جوشش، قاب حاوی آهنربا دچار حرکت شده و در نتیجه بر اساس قانون القاء فارادی، جریان در سیم پیچ اطراف ظرف القاء می‌شود. آزمایش در حالت‌های مختلف انجام شده و نتایج توسط اسیلوسکوپ ذخیره شده است. برای ثبت و اندازه‌گیری ولتاژ القایی در دو سر سیم پیچ اطراف ظرف، از اسیلوسکوپ مدل Megatek-Dso5070 که اسیلوسکوپ دیجیتالی دو کاناله می‌باشد استفاده شده است. این دستگاه ساخت کشور تایوان بوده و محدوده فرکانسی آن تا 70 MHz و خطای اندازه‌گیری ولتاژ آن برای ولتاژهای بیشتر از 10 mV در حدود ۳٪ می‌باشد. لازم به ذکر است جهت جلوگیری از کاهش ارتفاع سیال در حین آزمایش، از یک چگالنده داخل ظرف برای چگالش بخارهای ایجاد شده استفاده می‌گردد. متغیرهای مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است جهت اطمینان از صحت داده‌های بدست آمده و همچنین تکرار پذیر بودن آزمایش، برای هر یک از

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 سرعتی رسانا و میدان باشد. نیروی محرکه الکتریکی تولیدشده در نارسانا (مانند یک سیم‌پیچ) در صورت باز بودن مدار، منجر به برقراری جریان الکتریکی می‌شود. جریان تولید شده 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. استفاده از حرکات سیال به عنوان منبعی برای برداشت انرژی، مورد توجه محققان مختلف قرار گرفته است [۱۱-۱۳]. در یکی از جدیدترین این مطالعات، برداشت انرژی از پدیده اسلاشینگ سیال بصورت تجربی مطالعه قرار گرفته است. ایشان برداشت انرژی از پدیده اسلاشینگ توسط سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی را مطالعه کردند که نتایج بدست آمده نشان‌دهنده برداشت انرژی بیشتر سیال نیوتنی می‌باشد [۱۴]. از جمله فرایندهایی که به نظر می‌رسد قابلیت برداشت انرژی به دلیل حرکات سیال را داشته باشد جوشش استخری مایعات است. در این فرایند، به دلیل تولید، جدایش و ترکیب حباب‌ها حرکاتی درون سیال شکل می‌گیرد که می‌توان با طراحی مکانیزی از این حرکات جهت تغییر شار مغناطیسی و القاء نیروی محرکه استفاده نمود. با جستجو در کارهای انجام گرفته در زمینه برداشت انرژی، مشاهده شده است که مطالعات چندانی در برداشت انرژی از جوشش سیالات انجام نگرفته است. در یک مطالعه با نصب پیزوالکتریک بر روی سطح آزاد سیال و جوشش آن، جریان الکتریکی به دلیل ارتعاش پیزوالکتریک ایجاد شده است [۱۵]، ولی ایشان هیچ مطالعه‌ای در زمینه میدان مغناطیسی و تأثیر آن نداشته‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، دگوچی و همکاران برداشت انرژی از تغییر فاز سیال را توسط پیزوالکتریک مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مطالعه ایشان از سیال با دمای جوش پایین به عنوان سیال عامل استفاده گردیده است [۱۶].

هدف از این مطالعه، برداشت انرژی از جوشش استخری یک سیال با استفاده از پدیده القاء الکترومغناطیسی می‌باشد. روش استفاده شده در این مطالعه روشی جدید بوده و تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته است. همانگونه که اشاره شد مطالعات بسیار کمی در زمینه برداشت انرژی از جوشش سیالات انجام گرفته است که در آنها از پیزوالکتریک برای این منظور استفاده شده است. علاوه بر این، اکثر مطالعات پیشین بصورت تجربی بوده و مطالعات عددی کمی در این زمینه صورت گرفته است. بنابراین، ترکیب روش‌های تجربی و عددی یکی دیگر از نوآوری‌های کار حاضر در زمینه برداشت انرژی است.



الف



- ۱- ظرف حاوی سیال
- ۲- سیم پیچ
- ۳- کف سکو (قرار گرفته روی گرمکن)
- ۴- سیال
- ۵- چگالنده
- ۶- قاب حاوی آهنربا
- ۷- حباب‌های بخار

ب

شکل ۱. شکل شماتیکی سکوی مورد آزمایش (الف نمای کلی، و ب) ظرف حاوی سیال

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup: a) Overview, and b) Interior view of the container.

که داده‌های بدست آمده در هر حالت و در دفعات متعدد تقریباً یکسان بوده و می‌توان از تکرارپذیر بودن آزمایش‌ها اطمینان حاصل نمود.

حالت‌های موجود ۴ مرتبه آزمایش انجام شده و مقدار نهایی برابر میانگین داده‌های آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان دادند



ب



الف

شکل ۲. نمونه‌ای از قاب‌های یونولیتی استفاده شده (الف) کروی با سه قطر مختلف، و (ب) استوانه‌ای

Fig. 2. An example of the frames used: a) spherical with three different diameters, and b) cylindrical.

جدول ۱. پارامترهای متغیر

Table 1. Studied variables

دور سیم پیچ	اندازه قاب [cm]	سطح سیال [cm]	دمای مازاد ($\Delta T = T_w - T_{sat}$) [°C]	هندسه قاب
۸۳۰، ۷۰۰، ۵۵۰، ۴۲۰	۷، ۶، ۵، ۴ (برای قاب کروی)	۹، ۸، ۶، ۵، ۴، ۳ ۱۲، ۱۰	۶۰، ۴۰، ۲۰، ۱۰، ۵	مکعب، مکعب مستطیلی، کره، استوانه (افقی و عمودی)

میدان سرعت و فشار یکنواختی را به اشتراک می‌گذارند. 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:

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

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

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (3)$$

۲-۲- بخش مدل‌سازی عددی

برداشت انرژی سیستم پیشنهاد شده در این مطالعه، بر پایه نوسانات مرز مشترک بین دو سیال و حرکات آنها 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 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 جوشش سیال استفاده شده و معادلات ناویر-استوکس به عنوان معادلات حاکم بر جوشش 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 حجمی هر یک از سیالات در دامنه محاسباتی انجام می‌دهد. در این مدل، هر دو فاز

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (9)$$

لازم به ذکر است معادله (۹) برای فاز اصلی حل نشده و فقط برای فاز ثانویه حل شده است. مجموع کسر حجمی دو فاز در هر سلول برابر یک بوده و برای محاسبه کسر حجمی فاز اولیه از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\alpha_l + \alpha_g = 1 \quad (10)$$

شرط مرزی در نظر گرفته شده در این مطالعه برای دیواره پایینی از نوع دما ثابت می‌باشد. برای دیواره جانبی استوانه از شرط مرزی عایق و برای مرز بالایی از شرط مرزی خروجی فشار ثابت استفاده شده است. از نرم افزار انسیس فلونت ۱۷ برای حل معادلات حاکم استفاده گردیده است. از الگوریتم فشار-ضمنی با تقسیم عملگرها^۱ برای حل میدان جریان، از طرح بالادست مرتبه دوم^۲ برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و از طرح باز ساخت هندسی^۳ برای معادله کسر حجمی استفاده گردیده است. شبکه‌بندی مورد استفاده در این مطالعه از نوع شبکه‌بندی باسازمان بوده و در شکل ۳ نشان داده شده است. گام زمانی استفاده شده در این مطالعه برابر ۰٫۰۰۱ ثانیه بوده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بخش تجربی

در ابتدا و برای بررسی کارایی سیستم پیشنهادی، مقادیر ولتاژ القایی اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه دمای مازاد (اختلاف دمای سطح و دمای اشباع) تأثیر بسزایی در فرایند جوشش دارد لذا مقادیر ولتاژ القایی در دماهای مازاد مختلف استخراج شده و در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.

از شکل ۴ مشاهده می‌شود که در هر یک از حالت‌ها ولتاژی متغیر با زمان در سیم پیچ القا می‌شود که با افزایش دمای مازاد و به دلیل تغییر در رژیم جوشش و مقدار و اندازه حباب‌های تولید شده تغییراتی در نحوه و مقدار ولتاژ القایی بوجود می‌آید. برای اختلاف دماهای کمتر از ۵ درجه، رژیم جریان از نوع جابجایی آزاد است. با افزایش دمای دیواره و زمانی که

عبارت دوم در سمت راست معادله (۲) بیانگر نرخ تغییر شکل است. 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:

$$F = F_n + F_t \quad (4)$$

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

برای محاسبه انرژی (E) در رابطه (۳) از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$E = \frac{\alpha_l \rho_l E_l + \alpha_g \rho_g E_g}{\alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g} \quad (5)$$

خواص بکار رفته در در معادلات (۱) تا (۳) خواص متوسط بوده و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

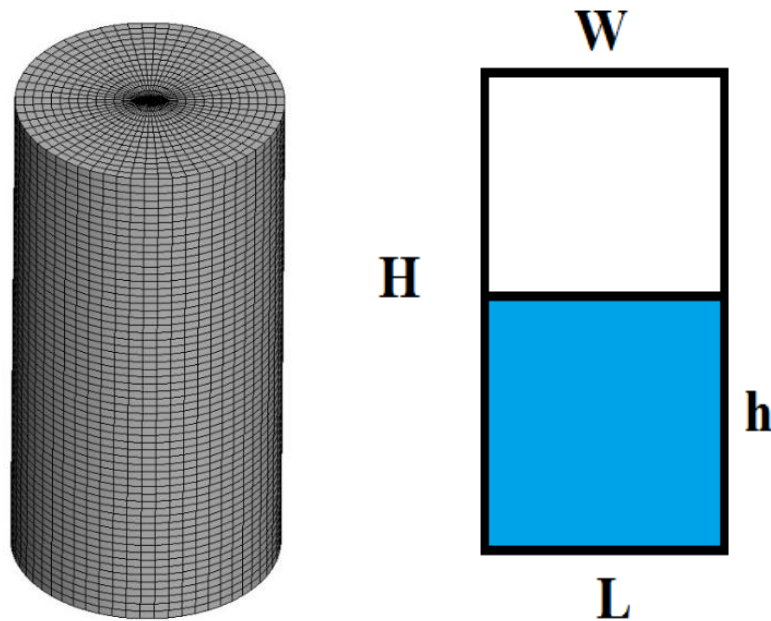
$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad (6)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \quad (7)$$

$$k_{eff} = \alpha k_l + (1 - \alpha) k_g \quad (8)$$

که ρ_l و ρ_g به ترتیب چگالی مایع (آب) و گاز (هوا) می‌باشند. همچنین در رابطه (۷)، μ_l و μ_g به ترتیب لزجت آب و هوا هستند. در رابطه (۸) نیز k_l و k_g به ترتیب چگالی مایع و گاز می‌باشند. α 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 α است. در این مدل برای هر فاز یک کسر حجمی در نظر گرفته شده و برای محاسبه آن از رابطه زیر استفاده می‌شود:

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



شکل ۳. هندسه مورد بررسی و شبکه بندی بکار رفته

Fig. 3. Studied geometry and used mesh

جدول ۲. پارامترهای متغیر

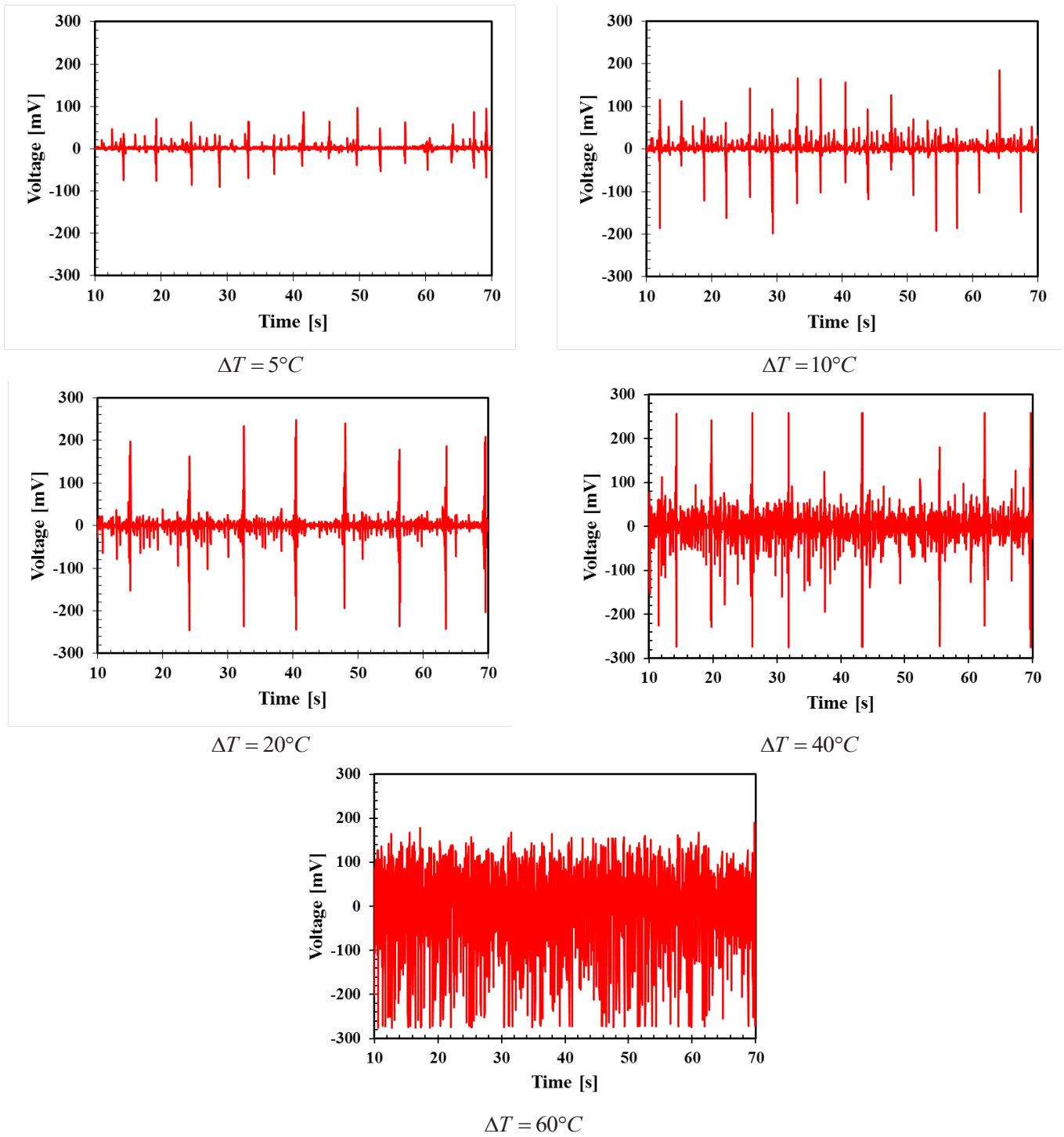
Table 2. Effective parameters in the numerical part

پارامتر	W/L	H/L	h/H	$T_w - T_{sat}$
مقادیر بررسی شده	۰٫۵، ۱، ۲	۰٫۵، ۱، ۲	۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵	۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰

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

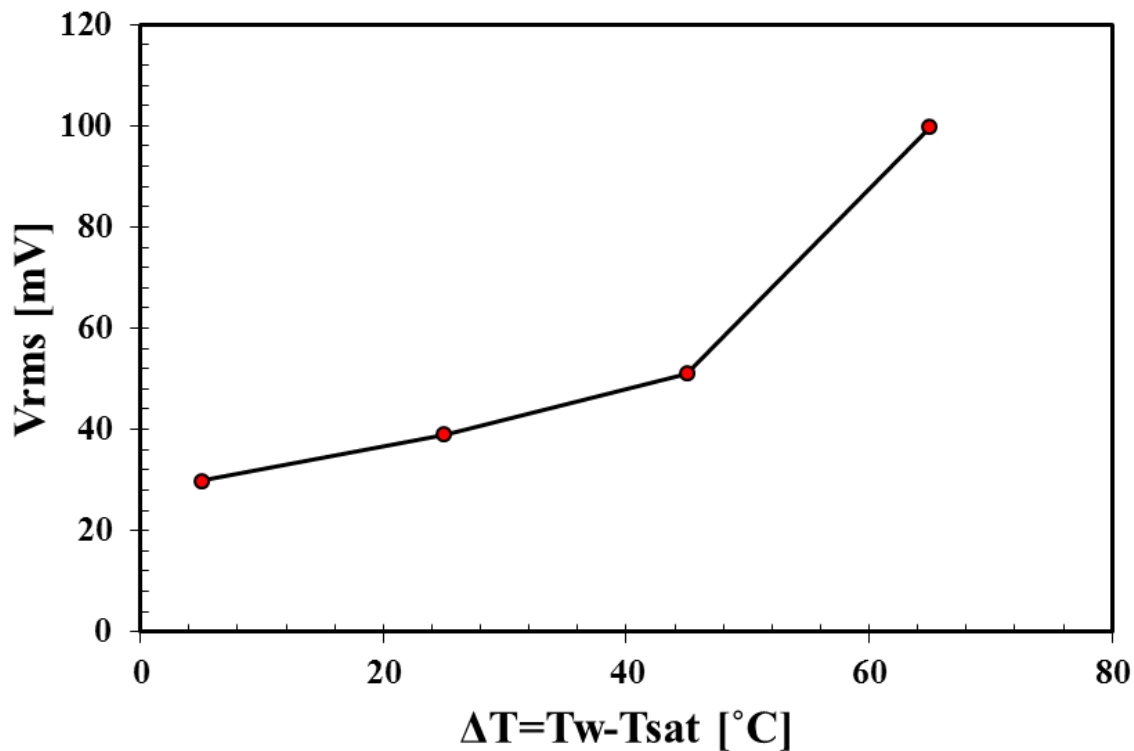
که در آن T زمان کل آزمایش می باشد. از شکل ۵ می توان دریافت همانگونه که انتظار می رود با افزایش دمای مازاد، برداشت انرژی نیز افزایش می یابد.

دمای مازاد به ۵ درجه سانتیگراد می رسد رژیم جریان به جوشش استخری تغییر یافته و حباب های کوچکی روی دیواره تولید می شوند. جدایش این حباب های کوچک که بعضاً تا سطح آزاد حرکت می کنند به همراه حرکات ناشی از جابجایی آزاد، باعث حرکات مختصری در سطح آزاد سیال می شوند که این امر به نوبه خود باعث حرکات آهنربا و تولید ولتاژ (هر چند بسیار کم) می گردد. با افزایش هر چه بیشتر دمای دیواره، رژیم جریان به حالت گذار وارد شده و اندازه حباب ها و سرعت جدایش آنها افزایش می یابد که در نهایت منجر به افزایش ولتاژ برداشت شده می گردد. برای بررسی دقیق تر این موضوع، مقدار ولتاژ میانگین (V_{rms}) با استفاده از فرمول (۱۱) محاسبه و در شکل ۵ رسم گردیده است:



شکل ۴. نمونه‌ای از تغییرات ولتاژ القایی با زمان به ازای دمای مازادهای مختلف

Fig. 4. Induction voltage changes with time for different excess temperatures



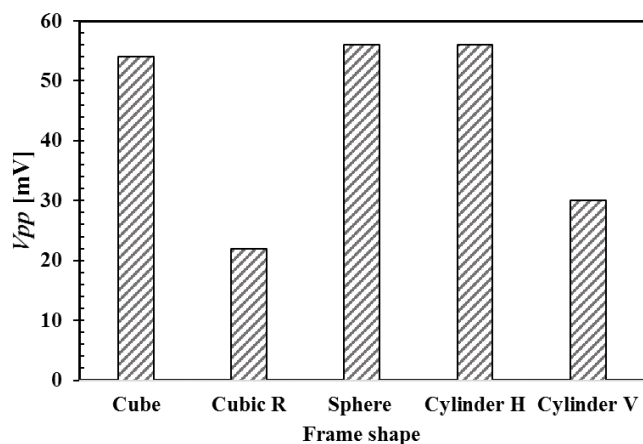
شکل ۵. تغییر ولتاژ با مازاد

Fig. 5. Voltage change with excess temperature

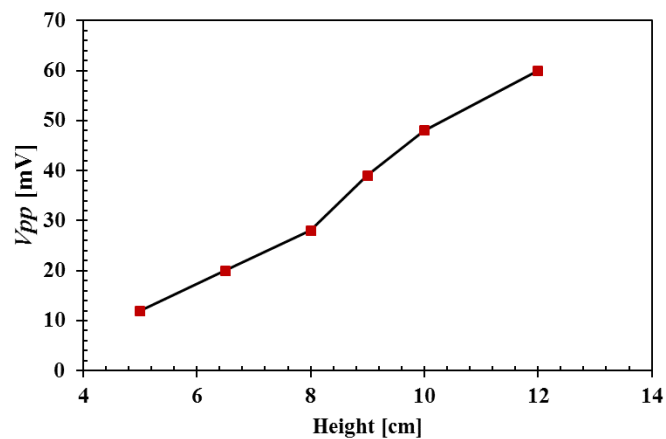
آمده بیان می‌کند که هندسه کروی بهترین عملکرد را برای این مطالعه داشته است. بنابراین در ادامه مطالعه از قاب کروی برای مطالعه تأثیر بقیه پارامترها استفاده شده است.

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع سیال موجود در ظرف، آزمایش‌هایی در حالت‌های مختلف با قاب کروی انجام گردیده و نتایج در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است. نتایج حاصل بیانگر این نکته هستند که ولتاژ القا شده با افزایش سطح سیال درون ظرف افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر میزان برداشت انرژی در ارتفاع‌های بالاتر سیال بیشتر خواهد بود. دلیل این پدیده را می‌توان اینگونه بیان کرد که هر چه ارتفاع سیال بیشتر می‌شود حباب‌ها فرصت کافی برای رشد و چسبیدن به یکدیگر و تشکیل حباب‌های بزرگتر را خواهند داشت که به نوبه خود باعث حرکات بیشتر سطح آزاد آب خواهد شد. دلیل دیگر افزایش برداشت انرژی با افزایش ارتفاع سیال، می‌تواند مربوط به افزایش مومنتوم وارد از سیال به سطح آزاد به دلیل بالاتر بودن جرم سیال در این حالت باشد.

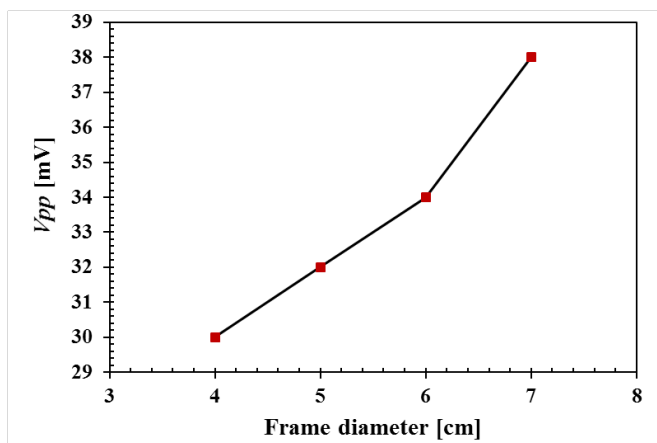
در ادامه به بررسی تأثیر سایر پارامترها بر عملکرد برداشت‌کننده انرژی پرداخته شده است. جهت بررسی تأثیر هندسه قاب حاوی آهنربا بر میزان برداشت انرژی، پنج قاب با شکل‌های مختلف تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است. این هندسه‌ها عبارتند از مکعبی، مکعب مستطیلی، کروی، استوانه‌ای افقی و استوانه‌ای قائم. بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند (سیال: آب، ابعاد آهنربا: ۱٫۵ در ۱٫۵ سانتیمتر مربع، ابعاد ظرف: ۱۴ در ۲۰ سانتیمتر، تعداد دور سیم پیچ ۸۳۰ و ارتفاع سیال ۹٫۴ سانتیمتر). در هر یک از حالت‌ها، بیشینه ولتاژ القایی اندازه‌گیری شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. همانگونه که از شکل ۶ (الف) مشاهده می‌شود قاب‌های کروی و استوانه‌ای افقی، ولتاژ بالاتری از بقیه هندسه‌ها دارند. دلایل این پدیده را می‌توان اینگونه بیان کرد که اولاً هر چه آهنربا به سیم پیچ نزدیک‌تر باشد می‌تواند نتیجه بهتری داشته باشد پس در مورد هندسه دایره‌ای و مکعبی باید نتیجه بهتری گرفته شود. ثانیاً هر چه هندسه قاب قابلیت بیشتری جهت حرکت خطی و یا دورانی داشته باشد حرکت نسبی بیشتری بین آهنربا و سیم‌پیچ ایجاد شده و در نتیجه ولتاژ بیشتری القاء خواهد شد. نتیجه بدست



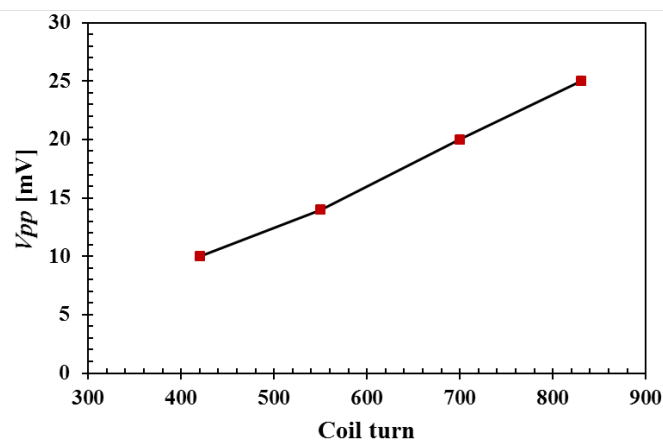
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۶. تأثیر پارامترهای مختلف بر ولتاژ القایی

Fig. 6. Influence of different parameters on induction voltage

مستقیمی بین دور سیم‌پیچ و میزان ولتاژ القایی وجود دارد. داده‌های این مطالعه نیز نشان می‌دهد که با افزایش دور سیم‌پیچ، میزان القاء ولتاژ افزایش می‌یابد.

۳-۲- بخش عددی

برای بررسی استقلال حل از تعداد شبکه، مقایسه‌ای بین حالت‌های مختلف انجام شده و در جدول ۳ ارائه گردیده است. در هر یک از حالت‌ها، عدد اول تعداد شبکه در جهت شعاعی، عدد دوم تعداد شبکه در جهت محیطی و عدد سوم تعداد شبکه در جهت محوری می‌باشد. لازم به ذکر

برای بررسی تأثیر اندازه قاب بر میزان برداشت انرژی، از قاب‌های کروی با ۴ قطر مختلف استفاده گردیده و نتایج در شکل ۶ (ج) آورده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر اندازه قاب باعث تغییر هر چند جزئی در میزان برداشت انرژی شده است. بدینصورت که با افزایش قطر قاب و به دلیل تماس بخش بیشتری از آن با سطح آزاد سیال، آهنربا دچار نوسانات و حرکات بیشتری در سطح سیال شده و در نتیجه برداشت انرژی افزایش می‌یابد. به منظور بررسی تأثیر تعداد دور سیم‌پیچ، آزمایش‌هایی در حالت‌های مختلف با قاب کروی انجام گردیده و نتایج حاصل در شکل ۶ (د) نشان داده شده است. همانگونه که قانون القاء الکترومغناطیسی فارادی بیان می‌کند رابطه

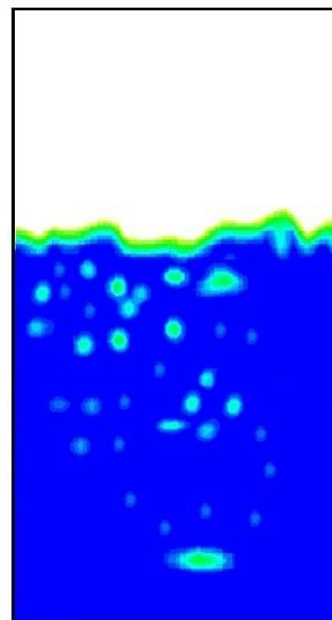
جدول ۳. بررسی استقلال حل از شبکه

Table 3. Grid independency test

Y_{max-h}	P [Pa]	شبکه مورد استفاده	حالت
۳,۷۳	۲۷,۳۲	۱۰ × ۴۰ × ۶۰	اول
۴,۱۲	۲۸,۴۲	۱۲ × ۵۰ × ۷۰	دوم
۴,۳۷	۲۹,۳۱	۱۵ × ۵۵ × ۸۰	سوم
۴,۴۹	۳۰,۰۱	۱۵ × ۶۰ × ۱۰۰	چهارم
۴,۵۲	۳۰,۰۹	۲۰ × ۸۰ × ۱۲۰	پنجم



الف



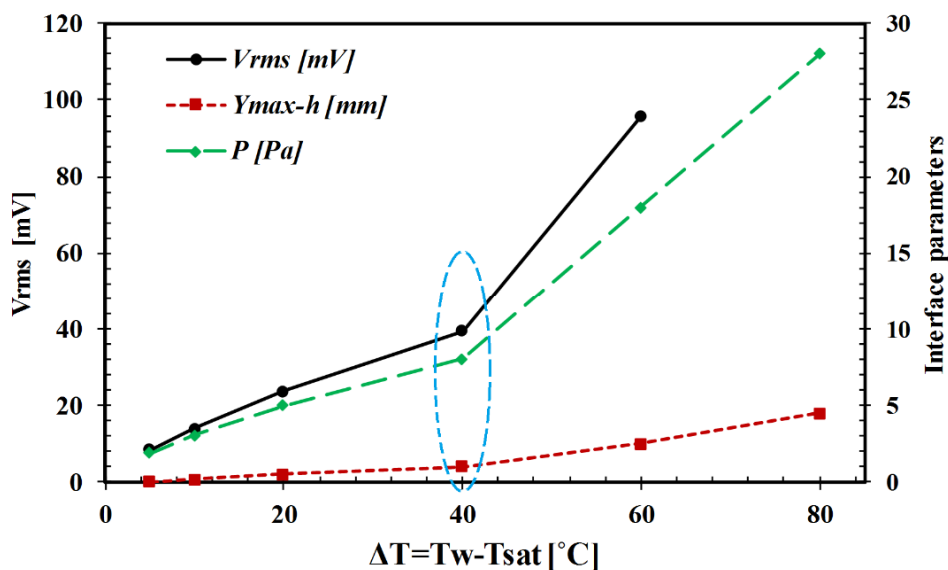
ب

شکل ۷. پروفیل سطح مایع در اثر جوشش در دمای (الف) مطالعه تجربی، و (ب) مدلسازی عددی

Fig. 7. Liquid surface profiles due to boiling at : a) Experimental study, and b) Numerical modeling.

برای بررسی دقت روش عددی بکار رفته، مقایسه‌ای بین یافته‌های آزمایشگاهی و نتایج مدلسازی انجام شده است. برای این منظور، پروفیل حرکت مایع در دو حالت ذکر شده مقایسه گردیده و در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل عددی، به خوبی تغییرات پروفیل مایع در اثر اسلاشینگ را محاسبه نموده است.

است هندسه مورد مطالعه در این جدول در شرایط $H/L=2$, $W/L=1$ و $h/H=0.5$ بوده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد شبکه از حالت اول تا حالت چهارم، مقادیر پارامترهای عددی تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارند اما با افزایش شبکه از حالت چهارم به حالت پنجم، تغییر چندانی در نتایج بدست آمده ایجاد نمی‌شود. لذا جهت صرفه‌جویی در زمان حل، حالت چهارم به عنوان شبکه مورد استفاده انتخاب گردیده است.



شکل ۸. مقایسه تغییرات پارامترهای سطح مشترک و ولتاژ برداشت شده

Fig. 8. Comparison between variations of the selected interface parameters and the harvested voltages

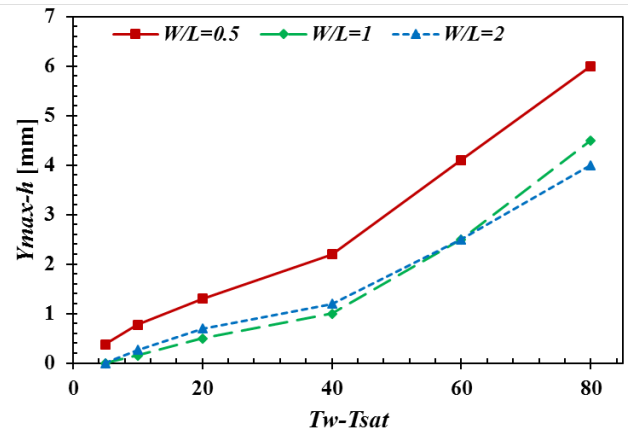
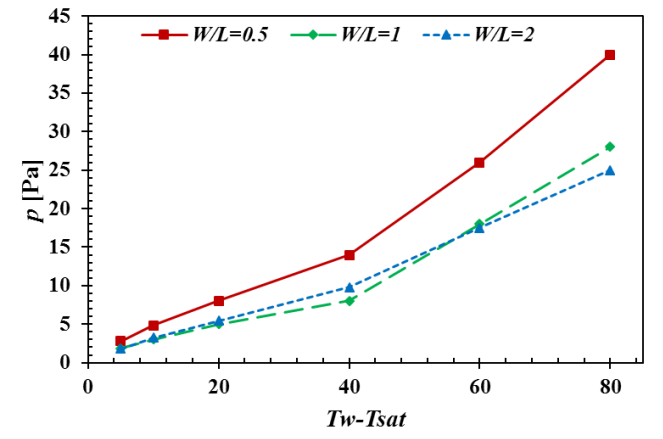
شبهه‌سازی عددی پیش بینی مناسبی از داده‌های تجربی بدست آورد. در نتیجه می‌توان از تغییرات نمودار فشار و ارتفاع سطح مشترک، برآورد اولیه‌ای از میزان برداشت انرژی احتمالی بدست آورد. لازم به ذکر است مقدار دقیق ولتاژ القایی در سیم پیچ به عوامل دیگری از جمله قدرت آهنربا، تعداد دور سیم پیچ و مقاومت الکتریکی استفاده شده در مدار بستگی دارد.

تأثیر پارامترهای اشاره شده در جدول ۲ بر خواص فصل مشترک (فشار و حداکثر جابجایی) در شکل ۹ رسم گردیده است. اولین یافته از این شکل مربوط به تأثیر دمای مازاد بر این خواص است. بدینصورت که با افزایش دمای مازاد، فشار و جابجایی سطح مشترک افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود در حالت تجربی نیز با افزایش دمای مازاد میزان برداشت انرژی افزایش یابد. این یافته در تطابق با مشاهدات تجربی مورد اشاره در شکل ۵ است.

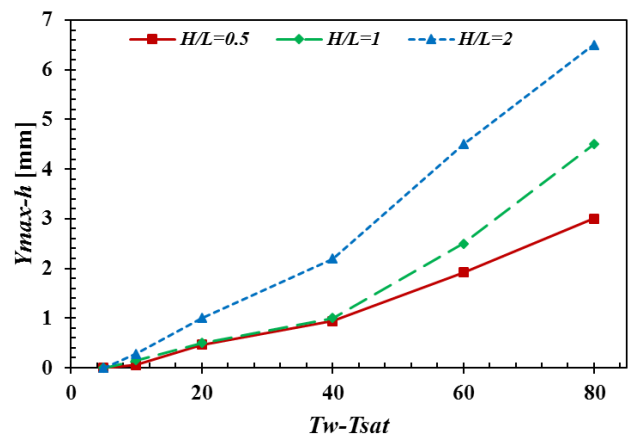
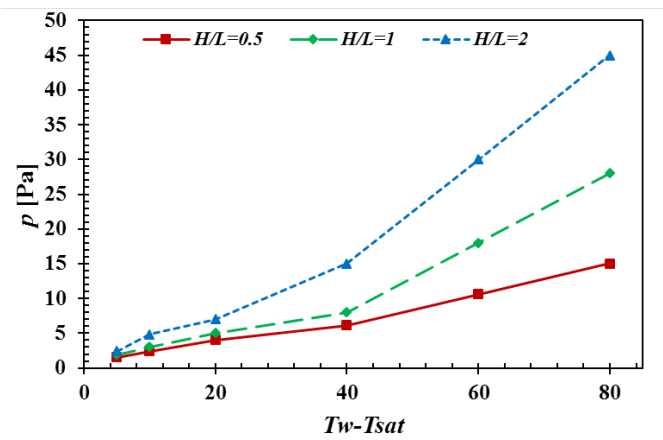
از شکل ۹ مشاهده می‌گردد که نسبت W/L بر پارامترهای فصل مشترک تأثیر بسزایی دارد. بدینصورت که هرچه قدر این نسبت کمتر باشد فشار و جابجایی فصل مشترک بیشتر خواهد بود. کاهش سطح مقطع ظرف حاوی سیال با افزایش ارتفاع آن باعث کاهش فضای حرکتی سیال در راستای افقی شده و سیال مجبور به حرکات شدیدتر و با دامنه بیشتر در راستای قائم خواهد شد که این امر در نهایت می‌تواند باعث افزایش برداشت

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 القاء فارادی باعث القاء ولتاژ در سیم پیچ می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود پارامترهای مربوط به مرز مشترک و تغییرات آنها نسبت به زمان، پیش‌بینی کننده مشاهدات تجربی باشند. بدین منظور و برای بررسی کارایی مدل عددی بکار رفته در این مطالعه، تغییرات فشار و ارتفاع مرز مشترک حاصل از روش عددی و ولتاژ برداشت شده آزمایشگاهی با زمان انجام گردیده و در شکل ۸ نشان داده شده است.

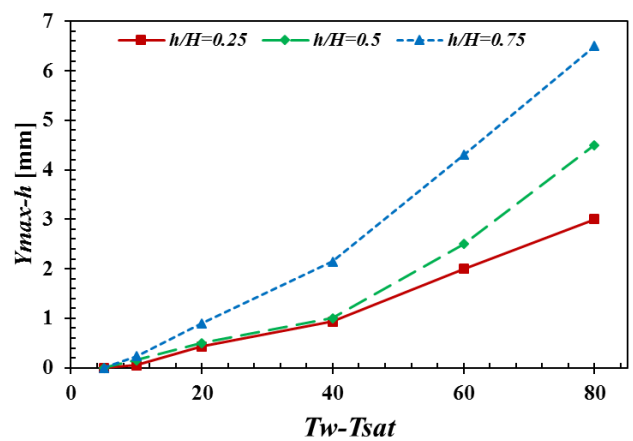
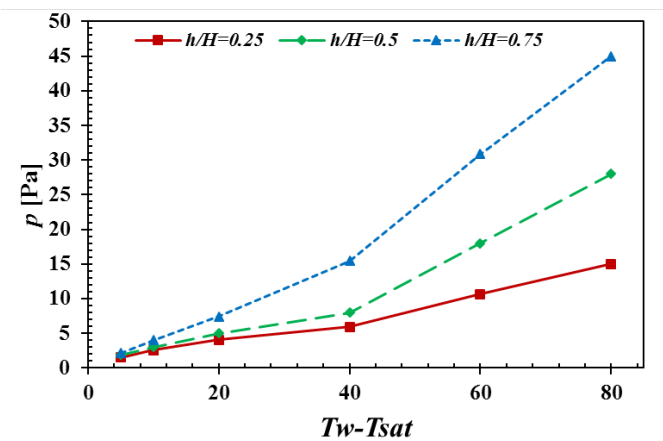
مشاهده می‌شود که شباهت کیفی بسیار زیادی بین نمودارهای عددی و داده‌های تجربی وجود دارد. نوسانات هر دو پارامتر حاصل از روش عددی تقریباً مشابه نوسانات ولتاژ برداشتی بوده و قله و دره‌های آن‌ها تقریباً در زمان‌های یکسانی اتفاق افتاده‌اند. نتایج حاصل از هر دو روش تجربی و عددی نشان می‌دهند که برای دمای مازاد کمتر از ۴۰ درجه سانتیگراد، نمودارها با شیب مشخصی افزایشی بوده و در دمای مازاد ۴۰ درجه، رفتار مشابهی در همه نمودارها وجود داشته و از این نقطه به بعد شیب نمودارها افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر پارامترهای تجربی و عددی رفتار مشابهی با تغییر دمای مازاد انجام می‌دهند که باعث می‌شود بتوان با استفاده از



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. تأثیر پارامترهای مختلف بر خواص سطح مشترک

Fig. 9. Effect of studied parameters on the interface properties

- با افزایش ارتفاع مایع در ظرف، ولتاژ القایی افزایش می‌یابد. برای ارتفاع سیال ۵ سانتی متر مقدار ولتاژ قله به دره ۱۲ میلی‌ولت و برای ارتفاع ۱۲ سانتیمتری، این ولتاژ در حدود ۶۰ میلی‌ولت بوده است. برای ارتفاع‌های بیشتر سیال، حباب‌ها زمان کافی برای رشد و ادغام با یکدیگر و تشکیل حباب‌های بزرگ‌تری خواهند داشت که باعث حرکات بیشتر سطح مشترک خواهد شد. دلیل دیگر این یافته می‌تواند مربوط به تکانه بیشتر وارد شده از مایع به سطح مشترک به دلیل جرم بیشتر سیال در این حالت باشد.
- همانطور که از مطالعات قبلی انتظار می‌رود، رابطه مستقیم بین تعداد دور سیم پیچ و ولتاژ القایی مشاهده می‌شود. با افزایش تعداد دور از ۴۲۰ تا ۸۳۰، مقدار ولتاژ برداشتی از ۱۰ تا ۲۵ میلی‌ولت افزایش می‌یابد.
- بالاترین مقادیر اندازه‌گیری شده در این مطالعه به ترتیب ۲۹۳ میلی‌ولت و ۹۵۶۵ میلی‌ولت برای V_{pp} و V_{rms} می‌باشند.
- شباهت‌های کیفی زیادی بین نمودارهای عددی و داده‌های تجربی وجود دارد. روند مشابهی بین پارامترهای سطح مشترک و ولتاژ برداشت با توجه به دمای مازاد وجود دارد. به عنوان مثال، مشابه V_{rms} ، فشار و جابجایی سطح مشترک با افزایش دمای اضافی افزایش می‌یابد. در نتیجه، می‌توان یک برآورد اولیه از برداشت انرژی را از پارامترهای سطح مشترک بدست آورد.
- پارامترهای سطح مشترک با کاهش نسبت W/L افزایش می‌یابد. با کاهش سطح مقطع ظرف حاوی سیال، فضای حرکت مایع در جهت کاهش می‌یابد. در نتیجه، مایع مجبور به حرکات شدیدتر و با دامنه بیشتر در جهت عمودی می‌شود که در نهایت می‌تواند برداشت انرژی را افزایش دهد.
- پارامترهای سطح مشترک با افزایش نسبت ابعاد ظرف (H/L) و ارتفاع بدون بعد مایع (h/H) افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع سیال داخل ظرف و بر اساس مشاهدات تجربی، حباب‌های بخار زمان کافی برای رشد و ادغام با یکدیگر و تولید حباب‌های بزرگتر خواهند داشت. این امر می‌تواند باعث افزایش نیروی وارده از حباب‌ها به سطح مشترک شده و در نهایت آن را متلاطم‌تر کند. در نتیجه می‌توان انتظار داشت در این شرایط انرژی بیشتری برداشت کنیم.

انرژی گردد. همچنین افزایش نسبت منظری ظرف (H/L) و همچنین افزایش ارتفاع بی بعد سیال باعث افزایش مقدار پارامترهای فصل مشترک می‌شوند. دلیل این یافته را نیز اینگونه می‌توان تفسیر کرد که با افزایش ارتفاع سیال درون ظرف و مطابق یافته‌های تجربی، با افزایش ارتفاع سیال فرصت کافی برای رشد و به چسبیدن حباب‌ها و تولید حباب‌های بزرگتر فراهم می‌گردد که این امر در نهایت می‌تواند منجر به افزایش قدرت ضربات به فصل مشترک و تلاطم بیشتر آن گردد. در نتیجه می‌توان انتظار برداشت انرژی بیشتری در اینحالت داشت.

در نهایت توصیه می‌شود برای داشتن حداکثر برداشت انرژی از پدیده جوش استخری، دمای مازاد، ارتفاع مایع، نسبت ارتفاع به قطر ظرف و تعداد دور سیم پیچ در حداکثر مقادیر خود باشند. همچنین بهتر است سطح مقطع ظرف با افزایش ارتفاع آن کاهش یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه روشی برای برداشت انرژی از گرمای هدر رفته پیشنهاد شد. در سیستم پیشنهادی، یک آهنربا بر روی مایع در ظرف سیم پیچی شده شناور گردید و سیستم روی منبع حرارت قرار گرفت. با جوشش مایع و طبق قانون القایی فارادی، با حرکت آهنربا در داخل ظرف، ولتاژ در سیم پیچ القا می‌شود. هر دو روش تجربی و عددی به طور همزمان برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد برداشت انرژی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج زیر بدست آمده‌اند:

- ولتاژ القایی با افزایش دمای مازاد افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این یافته، تغییر رژیم جوش استخری از جابجایی طبیعی به جوشش هسته‌ای، انتقالی و فیلم با افزایش دمای مازاد است. بیشترین مقدار ولتاژ برداشت شده برای دمای مازاد ۶۰ درجه بوده و در حدود ۹۵ میلی‌ولت می‌باشد.
- قرار دادن آهنربا در داخل قاب کرووی و شناور کردن آن بر روی سطح مایع منجر به ایجاد ولتاژ القایی بالاتری نسبت به سایر اشکال قاب می‌شود. قاب کرووی دارای پتانسیل بیشتری برای حرکات خطی و چرخشی در سطح مشترک سیال است که باعث حرکت نسبی بیشتر بین آهنربا و سیم پیچ و در نتیجه ولتاژ القایی بالاتری می‌گردد.

413.

۵- فهرست علائم

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] D. Zabeka, F. Morini, Solid state generators and energy harvesters for waste heat recovery and thermal energy harvesting, *Thermal Science and Engineering Progress* 9 (2019) 235–247.
- [6] A. Landelle, N. Tauveron, P. Haberschill, R. Revellin, S. Colasson, Organic Rankine cycle design and performance comparison based on experimental database, *Appl. Energy* 204 (2017) 1172–1187.
- [7] C.T. Hsu, G.Y. Huang, H.S. Chu, B. Yu, D.J. Yao, An effective seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module. *Appl. Energy* 88 (2011) 5173–5179.
- [8] C.R. Bowen, J. Taylor, E. LeBoulbar, D. Zabek, A. Chauhan, R. Vaish, Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications. *Energy Environ. Sci.* 7 (2014) 3836–3856.
- [9] R.A. Kishore, S. Priya, A review on design and performance of thermomagnetic devices. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 33–44.
- [10] Y. Sato, N. Yoshida, Y. Tanabe, H. Fujita, N. Ooiwa, Characteristics of a new power generation system with application of a shape memory alloy engine. *Electr. Eng. Jpn.* 165 (2008) 8–15.
- [11] A. Bibo, R. Masana, A. King, G. Li, M.F. Daqaq, Electromagnetic ferrofluid-based energy harvester, *Physics Letters A*, 376(32) (2012) 2163-2166.
- [12] 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

علائم انگلیسی

F	نیرو در واحد حجم، N/m^3
g	شتاب جاذبه، m/s^2
H	ارتفاع ظرف، m
h	ارتفاع سیال، m
L	طول ضلع پایینی ظرف، m
m	انتقال جرم،
p	فشار، Pa
T	دوره زمانی، s
T_W	دمای دیواره، K
T_{sat}	دمای اشباع، K
ΔT	دمای مازاد، K
t	زمان، s
U	سرعت، m/s
v	ولتاژ، V
V_{pp}	ولتاژ قله به دره، V
V_{rms}	ریشه میانگین مربعات ولتاژ، V^2
W	طول ضلع بالایی ظرف، m
Y_{max}	بیشینه ارتفاع سطح مشترک، m

علائم یونانی

α	کسر حجمی
ρ	چگالی، kg/m^3
μ	لزجت سیال، Pa.s

زیرنویس

l	مایع
g	گاز
max	بیشینه

منابع

- [1] U. Guler, M.S.E. Sendi, M. Ghovanloo, A dual-mode passive rectifier for wide-range input power flow, in: 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2017, pp. 1376-1379.
- [2] I. Sari, T. Balkan, H. Kulah, An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations, *Sensors and Actuators A: Physical*, 145-146 (2008) 405-

- Harvesting from Boiling Phenomenon with Piezoelectric Devices, TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Series B, 79 (2013) 1624-1636.
- [16] S. Deguchi, A. Miyajima, H. Arimura, H. Banno, N. Kobayashi, N. Isu, K. Takagi, T. Inoue, T. Nozoe, S. Saito, and T. Sano, (2018) Piezoelectric Power Harvesting Process via Phase Changes of Low-Boiling-Point Medium Together with Water for Recovering Low-Temperature Heats. *Journal of Power and Energy Engineering*, 6 (2018) 65-77.
- system, in: 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (2014) 2033-2038.
- [13] 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.
- [14] R. Maroofiazar, M. Fahimi Farzam, Experimental investigation of energy harvesting from sloshing phenomenon: Comparison of Newtonian and non-Newtonian fluids, *Energy* 225 (2021) 120264.
- [15] N. Yamada, Y. Kato, Experimental Study of Energy

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Maroofiazar , M. Fahimi Farzam, *Energy Harvesting from Pool Boiling Using Electromagnetic Induction: Experimental Study and Numerical Simulation* , *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(7) (2022) 1701-1716.

DOI: 10.22060/mej.2022.21002.7358



