

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۲/۷

گرمایش سنج بی سیم خودتوان با برداشتگر انرژی پیزوالکتریک برای سنجش انرژی گرمایشی در مجتمع‌های مسکونی

سیامک جعفرپیشه^۱، احمدرضا تابش^۲، نسرين رضائی حسین‌آبادی^{۳*}، محمدامین لطیفی^۴، حمیدرضا کارشناس^۵

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

Siamak_jafarpisheh@yahoo.com

^۲ دانشیار گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

a.tabesh@iut.ac.ir

^۳ استادیار گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

n.rezaei@iut.ac.ir

^۴ دانشیار گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

latify@iut.ac.ir

^۵ دانشیار گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

karshen@iut.ac.ir

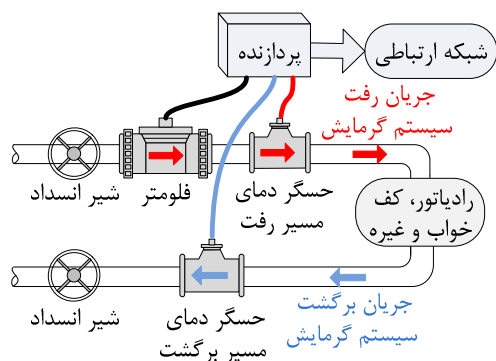
چکیده: این مقاله به ارائه ساختاری برای دستگاه گرمایش سنج بی سیم خودتوان می‌پردازد که تأمین توان آن از طریق برداشتگر انرژی سیال با یک تیر پیزوالکتریک انجام می‌شود. کاربرد اصلی این دستگاه، تعیین منصفانه‌تر سهم انرژی گرمایشی مصرفی واحدهای مستقل در مجتمع‌های مسکونی بزرگ با سیستم گرمایش مرکزی است. در طرح ارائه‌شده، برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک علاوه بر تأمین توان، نقش فلومتر نیز دارد که در نتیجه با کاهش توان مصرفی، امکان طراحی دستگاه به صورت خودتوان را فراهم می‌سازد. کارایی ساختار ارائه‌شده با استفاده از نمونه عملی دستگاه و تست آن در شرایط تغییر دبی از ۱۰۰ تا ۲۰۰ لیتر بر ساعت و مقایسه با نتایج اندازه‌گیری فلومتر اثر هال به‌عنوان حسگر مرجع، بررسی و درستی عملکرد همزمان تیر پیزوالکتریک به‌عنوان برداشتگر انرژی سیال و حسگر نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: گرمایش سنج، برداشتگر انرژی پیزوالکتریک، فلومتر پیزوالکتریک، ساختمان هوشمند.

۱. مقدمه

کنتورهای آب هوشمند برای تأمین توان استفاده کرده که در مرجع [۲۳]، دبی آب عبوری را نیز با اندازه‌گیری دامنه ولتاژ تولیدی برداشتنگر تخمین زده است. گرمایش سنج بی سیم در مرجع [۲۴]، برای تأمین توان به منبع انرژی خارجی نیاز دارد و لذا نیاز به تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان پایین از معایب انرژی سنج ارائه شده است.

موضوع اصلی این مقاله، ارائه طرحی برای گرمایش سنج بی سیم و خودتوان بر مبنای استفاده از یک تیر برداشتنگر انرژی سیال پیزوالکتریک است. در طرح ارائه شده، برداشتنگر انرژی سیال پیزوالکتریک علاوه بر تأمین توان دستگاه و حذف باتری، امکان اندازه‌گیری فلو (دبی جریان) سیال را نیز فراهم می‌سازد. در نتیجه با طراحی صحیح زمان بندی مدهای دستگاه و نیز استفاده همزمان از تیر پیزوالکتریک به عنوان برداشتنگر انرژی و حسگر فلو متر، توان مصرفی دستگاه به کمتر از ۵۰ میکرووات کاهش یافته و امکان خودتوان نمودن دستگاه گرمایش سنج فراهم می‌شود. کارایی طرح پیشنهادی از طریق ساخت یک نمونه عملی از دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱): دیاگرام روش سنجش انرژی گرمایشی ساختمان

۲. روش سنجش انرژی گرمایشی در ساختمان

۱.۲. گرمایش سنج

دستگاه گرمایش سنج مطابق شکل (۱) با هدف اندازه‌گیری انرژی گرمایش مصرفی هر واحد ساختمان، از ۳ بخش مجزا شامل حسگرها، پرزنده و شبکه ارتباطی تشکیل می‌شود. مطابق شکل (۱)، با نصب دو حسگر دما در مسیر آب ورودی و خروجی به رادیاتورهای هر واحد، اختلاف دمای مسیر رفت و برگشت آب ثبت می‌شود. همزمان با اندازه‌گیری دما، دبی آب عبوری نیز از طریق نصب فلومتر بر روی یکی از لوله‌های رفت یا برگشت آب هر واحد، اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن اطلاعات اختلاف دما و

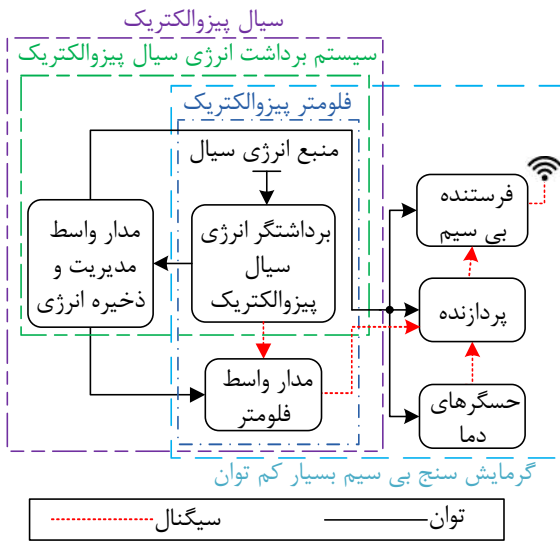
مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی از اولویت‌های برنامه‌ریزی توسعه انرژی پایدار در بخش نظام ساختمان‌سازی کشورهاست. پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی نیازمند ابزارهای پایش برخط و تجهیزات مرتبط با انرژی ساختمان است [۱ و ۲]. در یک ساختمان مسکونی و به‌ویژه در مجتمع‌های مسکونی بزرگ، سیستم‌های گرمایش ساختمان با سهمی حدود ۴۵٪ دارای بیشترین سهم مصرف انرژی فسیلی هستند [۳]. در مجتمع‌های مسکونی بزرگ با سیستم گرمایش مرکزی، پرداخت عادلانه هزینه شارژ ماهیانه بر مبنای محاسبه میزان مصرف انرژی گرمایی و نه بر اساس سرانه متراژ واحد مسکونی، به‌عنوان یک راهکار مناسب در ارتقای مدیریت مصرف انرژی مطرح است. به‌تازگی استفاده از گرمایش سنج مستقل برای هر واحد مسکونی به‌عنوان راهکاری برای محاسبه عادلانه‌تر سهم انرژی مصرفی هر واحد مطرح شده است [۴ و ۵]. موفقیت چنین طرحی منوط به ساخت دستگاهی است که در طول عمر مفید ساختمان، کمترین نیاز به تعمیر و نگهداری توسط نیروی متخصص داشته باشد و از فناوری‌های بی سیم و تکنیک‌های برداشت انرژی به ترتیب به‌عنوان جایگزین‌هایی برای ارتباطات و منبع تغذیه استفاده کند [۶].

استفاده از گرمایش سنج‌های بی سیم یک راهکار مطرح برای این منظور هستند که سادگی نصب و عدم نیاز به سیم‌کشی اضافی در ساختمان مهم‌ترین ویژگی آن‌هاست. در راستای بهبود این راهکار، استفاده از انرژی محیط به‌منظور تأمین توان دستگاه سنجش انرژی گرمایشی ساختمان و حذف باتری یا سیم‌کشی اضافی برای تأمین توان الکتریکی، به‌عنوان یک راهکار مناسب برای ساخت یک دستگاه گرمایش سنج خودتوان در این مقاله ارائه شده است.

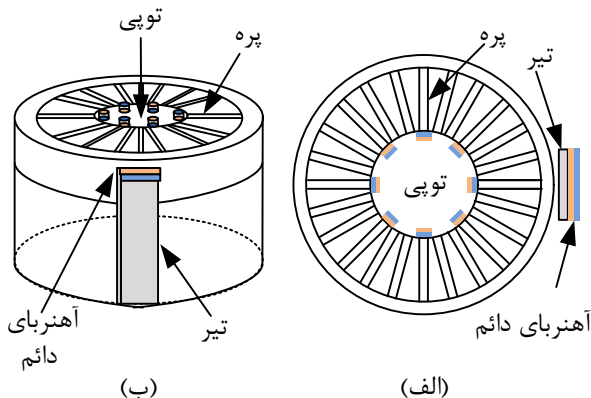
روش‌های متعددی برای برداشت انرژی در ساختمان در مراجع معرفی شده‌اند [۷ و ۸]، اما در کاربرد خاص گرمایش سنج، برداشت انرژی از حرکت سیال، مطمئن‌تر خواهد بود [۹ و ۱۰]. روش‌های جذب انرژی ناشی از حرکت سیال و تبدیل آن به انرژی لرزشی شامل روش گردابی [۱۱-۱۵]، روش بال زدن [۱۶]، فشار هیدرولیکی [۱۷] و ساختار توربینی [۱۸] است. مزیت برداشتنگرهای انرژی پیزوالکتریک نسبت به نوع ژنراتور مغناطیس دائم امکان تولید ولتاژ با دامنه زیاد در فرکانس لرزش کم است [۳ و ۲۰]. در مراجع [۲۱-۲۳] از برداشتنگرهای الکترومغناطیسی در

ایجاد شده است. در مجاورت بدنه این توربین مطابق شکل (۳) (ب)، یک تیر پیزوالکتریک نصب شده است. در رأس تیر یک آهنربای دائم قرار داده شده است که در اثر چرخش آهنرباهای درون توربین به تیر پیزوالکتریک نیروی نوسانی لرزشی وارد می‌شود. این لرزش مکانیکی در اثر حرکت سیال و چرخش توربین، به واسطه خاصیت پیزوالکتریک تیر به انرژی الکتریکی تبدیل شده و یک منبع ولتاژ ac ایجاد می‌شود که فرکانس آن متناسب با سرعت چرخش توربین است. در برداشتگر انرژی، ولتاژ تولیدشده توسط یک مدار یکسوساز به ولتاژ dc تبدیل شده و از آن برای تأمین توان مدارهای الکترونیکی استفاده می‌شود.

ترکیب فلومتر و سیستم برداشت انرژی



شکل (۲): دیاگرام گرمایش سنج بی سیم خودتوان پیشنهادی



شکل (۳): ساختار برداشتگر انرژی سیال توربینی پیزوالکتریک (الف) نمای بالا؛ (ب) نمای جانبی

چگالی توان تولیدی این نوع برداشتگرهای انرژی پیزوالکتریک در حدود ۵۰۰ میکرووات بر سانتی متر مکعب است

دبی، انرژی گرمایش مصرفی هر واحد، توسط پردازنده و بر اساس رابطه (۱) قابل محاسبه است [۲۴]:

$$E = \rho Q C_p \Delta T \Delta t \quad (1)$$

که در آن E انرژی گرمایش مصرفی هر واحد، ρ گرمای ویژه آب، Q دبی آب عبوری، ΔT اختلاف دمای مسیر رفت و برگشت آب و Δt زمان نمونه برداری برحسب ثانیه هستند.

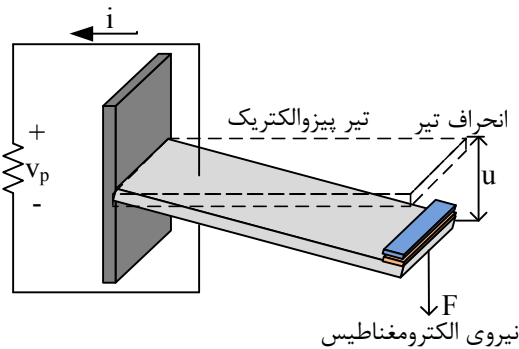
در یک ساختمان هوشمند مجهز به گرمایش سنج، انرژی گرمایش مصرفی هر واحد از طریق شبکه‌های ارتباطی به سیستم مرکزی جمع‌آوری داده‌ها منتقل و برای پردازش‌های مختلف از جمله صدور قبض انرژی ذخیره می‌شود. از آنجا که معمولاً امکان دسترسی آسان به مسیر آب ورودی و خروجی ساختمان وجود ندارد، در طراحی یک دستگاه گرمایش سنج، دو ویژگی بی سیم بودن و خودتوان بودن دستگاه که نیاز آن را به تعویض باتری برطرف می‌کند، از اهمیت بسزایی برخوردارند. یک راهکار برای خودتوان کردن دستگاه، تأمین توان دستگاه با استفاده از انرژی حرکت سیال (آب) در مسیر ورودی ساختمان است. برای نمونه فلومتر توربینی شکل (۱) می‌تواند علاوه بر اندازه‌گیری دبی آب، انرژی لازم برای تغذیه مدار پردازنده و بی سیم را نیز فراهم کند.

۲.۲. ساختار گرمایش سنج پیشنهادی

شکل (۲) دیاگرام اجزای یک گرمایش سنج بی سیم را که توان الکتریکی مصرفی آن توسط یک برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک تأمین می‌شود نشان می‌دهد. برداشتگر پیزوالکتریک شامل یک تیر پیزوالکتریک است که یک سر آن ثابت و سر دیگر آن آزاد می‌باشد. مواد پیزوالکتریک به دلیل دارا بودن مولکول‌های قطبی دارای توزیع الکترومکانیکی هستند که در آن‌ها تغییر طول در اثر نیروی مکانیکی منجر به تغییر میدان الکتریکی و چگالی بار الکتریکی روی سطح جانبی می‌شود [۲۵]. در نتیجه یک تیر پیزوالکتریک دارای لرزش، مشابه یک ژنراتور الکتریکی عمل می‌کند که در آن میدان واسط برای تبدیل انرژی از نوع میدان الکتریکی است.

ساختار پیشنهادی در شکل (۲) شامل شش قسمت برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک، مدار مدیریت و ذخیره انرژی، فلومتر پیزوالکتریک، حسگرهای دمای کم مصرف، پردازنده با مصرف توان بسیار پایین و فرستنده بی سیم بسیار کم مصرف است. برداشتگر انرژی مطابق شکل (۳ الف) شامل یک توربین در مسیر آب ورودی است که در آن، توسط آهنرباهای کوچک در محل اتصال پره‌ها به توپی خاصیت مغناطیسی با قطب‌های ناهمنام

که در آن، زیرنویس های b و m به ترتیب نمایشگر پارامترهای مرتبط با تیر و آهنربا بوده و $M_b = \rho_b L_b W_b T_b$ جرم فیزیکی تیر، $M_m = \rho_m L_m W_m T_m$ جرم آهنربا، ρ جرم حجمی، L طول، W عرض، و T ضخامت تیر را نشان می دهند. ثابت های $a_1 = 0.45$ ، $a_2 = -0.25$ و $a_3 = 0.036$ نیز با توجه به هندسه تیر در شکل (۴) برای جرم مؤثر قابل محاسبه اند که جزئیات محاسبات آن در مراجع [۲۷ و ۲۸] ارائه شده است.



شکل (۴): تیر یک سر درگیر پیزوالکتریک خمشی با بار مقاومتی

پارامتر C_m در مدل (۲) ضریب میرایی مکانیکی و K ضریب سختی مربوط به خاصیت فنری تیر هستند. جمله آخر سمت راست معادله (۲) نشان دهنده اثر تزویج الکترومکانیکی ماده پیزوالکتریک است که اثر ولتاژ دو سر تیر (V_p) را با ضریب تزویج (θ) در معادله مکانیکی مدل می کند. رفتار الکتریکی یک تیر پیزوالکتریک با یک خازن (C_p) با رابطه (۴) مدل می شود [۲۷]:

$$i = \frac{v_p(t)}{R} = -\theta \dot{u} - C_p \frac{dv_p}{dt} \quad (4)$$

در این مدل فرض شده که الکترودهای تیر پیزوالکتریک به یک مقاومت ثابت R متصل شده اند. t نشان دهنده کمیت زمان، i جریان الکتریکی ناشی از تبدیل انرژی لرزش مکانیکی به انرژی الکتریکی و C_p خازن تیر پیزوالکتریک هستند. همچنین اثر تزویج مکانیکی در مدل الکتریکی با جمله $\theta \dot{u}$ که معادل یک منبع جریان موازی با خازن تیر پیزوالکتریک است، مدل شده است. در این مدل هرچه سرعت لرزش یا دامنه نوسان تیر بیشتر باشد، جریان الکتریکی تولید شده نیز بیشتر می شود.

برای یک تیر مستطیلی دولایه با ضخامت یکنواخت، روابط تحلیلی معادله (۵) برای محاسبه پارامترهای تیر در مرجع [۲۷] ارائه شده اند:

$$K = \frac{W_b T_b^3}{3s_{11}^E L_b^3}, \theta = \frac{3d_{31} W_b T_b}{4s_{11}^E L_b}, C_p = \frac{4\epsilon_{33}^T L_b W_b}{T_b} \quad (5)$$

که s_{11}^E ضریب نرمی، ϵ_{33}^T ضریب دی الکتریک و d_{31} ثابت بار

و دامنه ولتاژ آن ها برای یک تیر در ابعاد سانتی متر در حدود چندین ولت می باشد که مناسب تغذیه مدارهای الکترونیکی است [۲۶]. با توجه به کم بودن سطح توان تولیدی، استفاده از برداشتنگر انرژی سیال پیزوالکتریک برای تأمین توان گرمایش سنج مستلزم انتخاب حسگرها و مدارهای پردازنده و واسط بسیار کم مصرف با توان متوسط مصرفی کمتر از صد میکرووات است [۱۹].

لرزش تیر پیزوالکتریک در اثر چرخش توربین، یک ولتاژ متناوب در دو سر تیر پیزوالکتریک ایجاد می کند که فرکانس آن متناسب با سرعت سیال (دبی) در مسیر آب ورودی است. بنابراین، علاوه بر امکان استفاده از ولتاژ تیر پیزوالکتریک برای تأمین توان، با اندازه گیری فرکانس نوسان های ولتاژ قبل از یکسوسازی می توان دبی جریان سیال (Q) را که طبق (۱) برای محاسبه انرژی مصرفی لازم است، نیز محاسبه کرد. برای این منظور، کافی است رابطه فرکانس دوران توربین با حجم آب گذرنده از آن با استفاده از یک حسگر فلومتر مرجع تعیین شده و رابطه محاسبه دبی برحسب فرکانس در واحد پردازنده انجام پذیرد.

در بخش های بعدی، ابتدا مدل الکترومکانیکی و نحوه تبدیل انرژی لرزشی به الکتریکی در مواد پیزوالکتریک مطرح می شود. سپس اصول طراحی مدارهای واسطه برای جذب حداکثر توان از برداشتنگر انرژی پیزوالکتریک ارائه شده و طراحی برای مدارهای آن ارائه می شود. در نهایت، به طور خاص، طراحی و تست عملی یک مدار کم توان برای گرمایش سنج بی سیم خودتوان ارائه خواهد شد.

۳. برداشتنگر انرژی و فلومتر پیزوالکتریک

۱.۳. مدل الکترومکانیکی تیر پیزوالکتریک

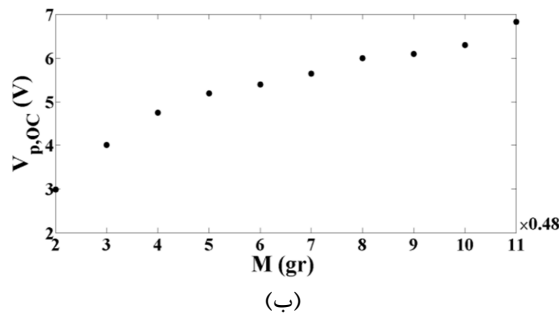
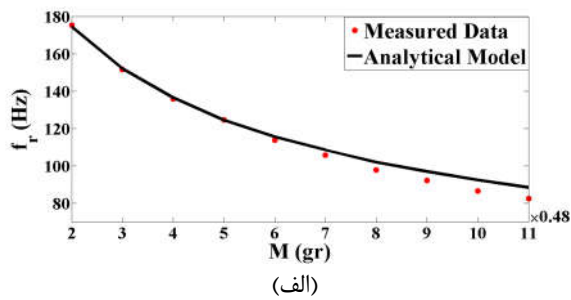
شکل (۴) جزئیات ساختار یک برداشتنگر انرژی از نوع تیر پیزوالکتریک را که به منظور تبدیل انرژی لرزشی مکانیکی به انرژی الکتریکی در سیستم توربینی شکل (۳) مورد استفاده قرار گرفته است، نشان می دهد. رفتار مکانیکی تیر لرزان با فرض دامنه لرزش کوچک با مدل جرم-میراکننده-فنر و بر اساس قانون دوم نیوتن توسط رابطه (۲) مدل می شود [۲۷]:

$$F = M_e \ddot{u} + C_m \dot{u} + Ku - \theta v_p \quad (2)$$

که در آن، F نیروی الکترومغناطیسی وارد بر تیر، u میزان نوسان سر آزاد تیر و M_e جرم مؤثر تیر است که از رابطه (۳) برحسب جرم فیزیکی و ابعاد تیر قابل محاسبه است [۲۸]:

$$M_e = \frac{33M_b}{140} + \sum_{n=1}^3 \frac{a_n M_m}{L_b^{4+n}} (L_b^{4+n} - (L_b - L_m)^{4+n}) \quad (3)$$

تولید ولتاژ الکتریکی می‌شوند.



شکل (۵) اثر افزایش تعداد آهنرباهای موجود در سر آزاد تیر بر (الف) فرکانس تشدید؛ (ب) ولتاژ مدار باز

در این تست، اثر جرم آهنرباهای موجود در سر آزاد تیر پیزوالکتریک، بر روی ولتاژ مدار باز و فرکانس تشدید تیر، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور با افزایش تعداد آهنرباهای سر آزاد تیر از ۲ تا ۱۱ عدد که معادل افزایش جرم سر تیر از ۰/۹۶ تا ۵/۲۸ گرم است، فرکانس تشدید و ولتاژ مدار باز تیر پیزوالکتریک در حالت تشدید اندازه‌گیری شده است. شکل (۵-الف)، اثر افزایش جرم سر آزاد تیر را بر فرکانس تشدید نشان می‌دهد که در آن مقادیر اندازه‌گیری شده با نماد دایره و نتایج تئوری با خط تیره نمایش داده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که افزایش جرم انتهای سر آزاد تیر پیزوالکتریک به دلیل افزایش جرم موثر تیر، منجر به کاهش فرکانس تشدید آن می‌شود.

با مقایسه نتایج عملی و تئوری در شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود که دقت مدل تحلیلی، با افزایش تعداد آهنرباها کاهش می‌یابد. علت آن این است که مدل خطی استفاده شده برای تیر پیزوالکتریک، با فرض نوسان با دامنه کوچک برای تیر به دست آمده است. این در حالی است که افزایش بیش از اندازه جرم موجود بر سر آزاد تیر، موجب افزایش دامنه نوسان تیر شده و دقت مدل تئوری برای توصیف نوسانات بزرگ کاهش می‌یابد.

شکل (۵-ب)، اثر افزایش جرم موجود بر سر آزاد تیر را بر ولتاژ مدار باز تحت شرایط تشدید نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش تعداد آهنرباها، منجر به افزایش نیروی وارد بر سر آزاد

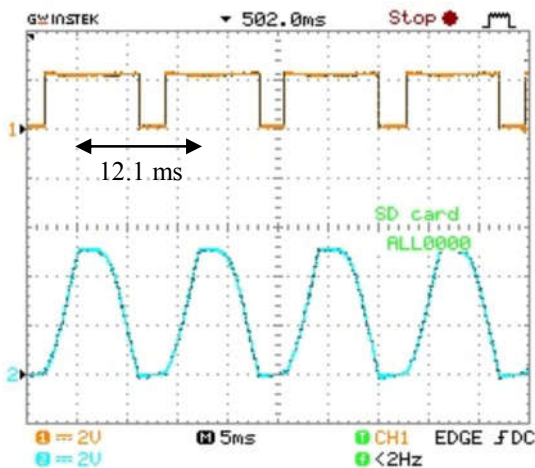
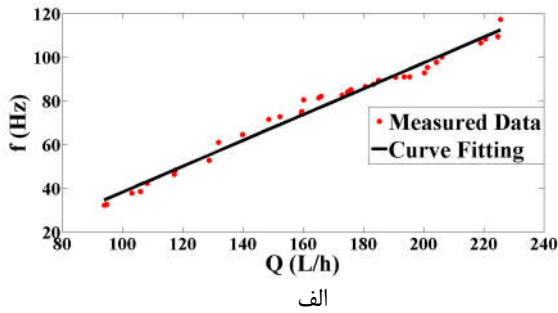
ماده پیزوالکتریک هستند. با توجه به رابطه (۴) جریان الکتریکی تولید شده در اثر لرزش متناسب با دامنه لرزش تیر است. این دامنه لرزش بر اساس رابطه (۳) تابعی از نیروی الکترومغناطیسی ناشی از برهم کنش آهنرباهای توربین و تیر است که برای یک ساختار ثابت فرض می‌شود. تحت این شرایط، حداکثر دامنه لرزش در فرکانس تشدید تیر اتفاق می‌افتد. در این فرکانس، نوسان‌های نیرو که مضربی از سرعت دوران توربین و تعداد قطب‌های آهنرباهای درون توربین است، برابر با $\sqrt{K/M_e}$ است. بنابراین در طراحی برداشتگر انرژی انتخاب ابعاد تیر و تنظیم جرم مؤثر با انتخاب مناسب جرم نصب شده در رأس تیر مهم و کلیدی خواهند بود.

جدول (۱): مشخصات تیر پیزوالکتریک و آهنربا [۲۹]

مشخصات	واحد	تیر پیزوالکتریک	آهنربای دائم
وزن	g	۲/۳	۰/۴۸
طول	mm	۳۱/۸	۱۲/۷
عرض	mm	۱۲/۷	۶/۳۵
ضخامت	mm	۰/۵۰۸	۰/۷۹
ضریب سختی	N/m	۸۶۰	-
ضریب تزویج	mN/V	-۲/۴	-
ظرفیت خازنی	nF	۵۲	-
فرکانس تشدید	Hz	۲۷۵	-

۲.۳. ارزیابی عملکرد برداشتگر انرژی سیال

به منظور ارزیابی عملکرد برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریکی و تأثیر جرم آهنربا در فرکانس تشدید تیر از یک سامانه تست شامل یک پمپ آب با ولتاژ نامی ۱۲ ولت و قطر اتصال ۰/۵ اینچ جهت گردش آب در یک مسیر بسته که شامل لوله‌هایی به قطر ۰/۵ اینچ است، استفاده شده است. با اتصال پمپ آب به یک منبع ولتاژ و تغییر ولتاژ آن در محدوده ۶ تا ۱۸ ولت، پمپ آب قادر خواهد بود تا دبی‌هایی در محدوده ۶۰ تا ۴۰۰ لیتر بر ساعت تولید نماید. همچنین از یک توربین آبی مینیاتوری ۱۲ قطب با قطر اتصال ۰/۵ اینچ برای تبدیل انرژی جنبشی آب به انرژی مکانیکی در ابتدای مسیر عبور آب استفاده شده است. برداشتگر انرژی در این تست یک تیر پیزوالکتریک دو لایه موازی ساخت شرکت پیزوسیستم با شماره [۲۹] Q220-A4-303YB است که بر سر آزاد آن آهنرباهایی از جنس نئودیمیوم نصب شده است. مشخصات تیر پیزوالکتریک و هریک از آهنرباها در جدول (۱) آورده شده است. با چرخش توربین، آهنرباهای موجود در توربین در مقابل آهنرباهای سر تیر پیزوالکتریک قرار می‌گیرند و با اعمال نیروی الکترومغناطیسی به آن‌ها، موجب خمش تیر پیزوالکتریک و



ب

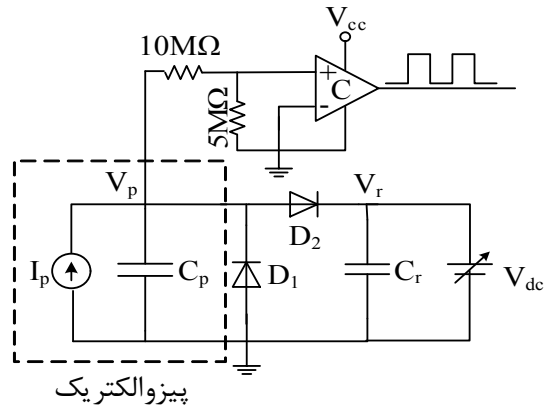
شکل (۷): الف. اثر تغییرات دبی آب عبوری بر فرکانس تیر؛
ب. شکل موج مقایسه کننده و ولتاژ دوسر تیر پیزوالکتریک

شکل (۷-الف) اثر تغییر دبی آب عبوری را بر فرکانس لرزش یک تیر پیزوالکتریک با فرکانس رزونانس ۸۲/۶ هرتز را نمایش می دهد که با نماد دایره مشخص شده اند. هر دبی سیال، متناسب با یک سرعت زاویه ای چرخش توربین و یک فرکانس لرزش تیر پیزوالکتریک خواهد بود که با توجه به کوچکی توان برداشت شده توسط تیر پیزوالکتریک، مستقل از انتخاب فرکانس رزونانس تیر پیزوالکتریک است. همان گونه که مشاهده می شود، افزایش دبی آب عبوری منجر به افزایش فرکانس لرزش تیر پیزوالکتریک می شود.

شکل (۷-ب) نیز نمونه شکل موج مدار عملی مربوط به خروجی مقایسه کننده و ولتاژ دو سر تیر قبل از یکسوسازی را نشان می دهد. با مقایسه دبی اندازه گیری شده با یک حسگر اثرهال به عنوان فلومتر مرجع می توان نشان داد که فلومتر پیزوالکتریک طراحی شده، در محدوده دبی ۹۵ تا ۲۲۵ لیتر بر ساعت دارای عملکرد قابل قبولی است و مشخصه آن در این محدوده، از طریق برازش منحنی شکل (۷-الف) به دست می آید و توسط رابطه خطی (۶) بیان می شود:

$$Q = \frac{f + 20.95}{0.591} \quad (6)$$

تیر و در نتیجه افزایش ولتاژ مدار باز می شود. از این مرحله به بعد، با هدف جذب حداکثر توان خروجی از تیر پیزوالکتریک برای تأمین توان گرمایش سنج، از حداکثر تعداد آهنربا بر روی تیر استفاده شده است. افزایش تعداد آهنربا، موجب افزایش نیروی وارد بر تیر نیز می شود که این نیرو نباید از حداکثر نیروی قابل تحمل توسط تیر بیشتر باشد.



شکل (۶): مدار یکسوساز و فلومتر توربینی پیزوالکتریک

بنابراین، با انتخاب یازده آهنربا بر روی تیر که معادل جرم ۵/۲۸ گرم است، فرکانس تشدید تیر ۸۲/۶ هرتز و ولتاژ مدار باز تیر در شرایط تشدید ۶/۸ ولت می شود. تحت این شرایط، دبی آب عبوری ۱۷۳ لیتر بر ساعت است. بنابراین با انتخاب یک توربین دوازده قطب، انتخاب یازده آهنربا بر روی تیر و تنظیم دبی آب بر روی ۱۷۳ لیتر بر ساعت، برداشتنگر انرژی سیال پیزوالکتریک طراحی شده منطبق بر فرکانس تشدید ۸۲/۶ هرتز، نوسان می کند و ولتاژ مدار باز آن ۶/۸ ولت است.

۳.۳. ارزیابی عملکرد فلومتر پیزوالکتریک

فلومتر پیزوالکتریک از طریق فرکانس برداشتنگر انرژی سیال پیزوالکتریک طراحی شده در بخش ۲.۳ که در شکل (۶) با یک منبع جریان موازی با خازن نشان داده شده است، دبی سیال را اندازه گیری می کند. به منظور اندازه گیری فرکانس توربین، مطابق شکل (۶) ولتاژ تیر پیزوالکتریک قبل از یکسوسازی توسط مدار دوبرابرکننده ولتاژ دیودی به یک مقایسه کننده ولتاژ اعمال شده و با مقدار صفر مقایسه می شود. مدار مقایسه کننده از نوع بسیار کم مصرف LTC1540 است که محدوده ولتاژ عملیاتی آن بین ۲ تا ۱۱ ولت است [۳۰]. برای حفاظت مقایسه کننده در برابر دامنه ولتاژ زیاد پیزوالکتریک (۶/۸ ولت)، از یک تقسیم مقاومتی استفاده شده است.

بی سیم خودتوان ارائه شد که با استفاده از برداشتنگر انرژی سیال امکان حذف باتری و سیم کشی برای تأمین توان را فراهم می سازد. همچنین در طرح پیشنهادی، استفاده همزمان از برداشتنگر انرژی لرزشی به الکتریسته به عنوان فلومتر پیزوالکتریک نیز ارائه شده و کارایی آن با تست عملی و مقایسه با نتایج اندازه گیری به وسیله فلومتر اثرهال به عنوان حسگر مرجع مقایسه شد.

بر مبنای نتایج تست های عملی و اتصال برداشتنگر انرژی سیال پیزوالکتریک طراحی شده به مدارهای واسط مدیریت و ذخیره انرژی مشخص شد که حداکثر متوسط توان تولیدی برداشتنگر انرژی ۲۲۷ میکرووات است. این در حالی است که در طرح پیشنهادی، توان متوسط مصرفی مدار کمتر از ۲۲۷ میکرووات است. در نتیجه، برای یک گرمایش سنج واقعی که محدوده دبی آب در آن بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ لیتر در ساعت است، تأمین توان مدارهای گرمایش سنج با استفاده از انرژی حرکت سیال (آب) در مسیر لوله های ورودی و خروجی امکان پذیر بوده و پیاده سازی طرح پیشنهادی گرمایش سنج بی سیم به صورت خودتوان و بدون نیاز به باتری امکان پذیر است.

اگرچه فناوری های برداشت انرژی هنوز در کاربردهای تجاری گرمایش سنج های بی سیم تجاری ادغام نشده اند، نتایج تست های عملی نشان می دهد که پیاده سازی گرمایش سنج بی سیم خودتوان امکان پذیر است و کوچک کردن یا حذف باتری، مزیت های تجاری و نیز کاهش مشکلات زیست محیطی در طولانی مدت را به همراه دارد. همچنین قرائت پیوسته در طول زمان میزان انرژی گرمایی مصرفی هر خانوار و ذخیره داده های حاصل از آن، امکان پیش بینی میزان مصرف آب گرم با تغییرات فصلی دمای فضای باز را با استفاده از تحلیل های آماری و یادگیری ماشین فراهم می کند. همچنین با استفاده از این تحلیل ها می توان دستورالعمل هایی برای استفاده بهینه از آب گرم خانگی توسط خانوارها و بهره برداری کارآمد تأمین کننده گرما استخراج کرد.

با استفاده از این سامانه تست، میزان جریان مصرفی تجهیزات گرمایش سنج در دو حالت، یکی با استفاده از حسگر فلومتر اثرهال و دیگری با استفاده از طرح پیشنهادی فلومتر پیزوالکتریک، اندازه گیری شده اند. نتایج حاصل از اندازه گیری جریان اجزا و محاسبه جریان و توان متوسط هر یک از دو طرح، در جدول (۲) به صورت خلاصه ارائه شده است. در این جدول وضعیت جریان و توان مصرفی هر یک از دو مدار در دو مد کاری فعال و مد کاری توان پایین در دو ستون جداگانه جدول ارائه شده است.

جدول (۲): مقایسه جریان و توان مصرفی گرمایش سنج ها

شرایط تست		۲ ولت و ۱ مگاهرتز
مد کاری	مد فعال	مد توان پایین
ATmega328P	۳۴۰ μA	۳/۸ μA
HTU21D	۲۵۰ μA	≈ 0
nrf2401+	۱۱/۳ mA	۹۰۰ nA
فلومتر اثرهال	۳۶ μA	۴/۵ μA
فلومتر پیزوالکتریک	۴۳۰ nA	۴۳۰ nA
متوسط مصرف گرمایش سنج با فلومتر اثرهال	۲۶/۷۳ μA (۵۳/۵ μW)	
متوسط مصرف گرمایش سنج با فلومتر پیزوالکتریک	۲۲/۱۴ μA (۴۴/۳ μW)	

بررسی نتایج تست نشان می دهد که متوسط توان مصرفی در طرح پیشنهادی با فلومتر پیزوالکتریک در حدود ۴۴ میکرووات و در طرح حسگر اثرهال در حدود ۵۳ میکرووات است. از طرفی بر مبنای نتایج تست های عملی و اتصال برداشتنگر انرژی سیال پیزوالکتریک طراحی شده به مدارهای واسط مدیریت انرژی مشخص شد که حداکثر متوسط توان تولیدی برداشتنگر ۲۲۷/۳ میکرووات است که نشان دهنده امکان استفاده از برداشتنگر انرژی برای تأمین توان گرمایش سنج است.

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، یک طرح عملی برای ساخت یک گرمایش سنج

مراجع

- [1] Sun, B., Luh, P. B., Jia, Q., Jiang, Z., Wang, F., and Song, C., "Building energy management: integrated control of active and passive heating, cooling, lighting, shading, and ventilation systems", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 588-602, 2013.
- [2] Manic, M., Wijayasekara, D., Amarasinghe, K., and Rodriguez-Andina, J., "Building energy management systems: the age of intelligent and adaptive buildings", IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 10, No. 1, pp. 25-39, 2016.
- [3] U. S. Department of Energy, *Buildings energy data book*, 2011.
- [4] Sun, Q., Li, H., Ma, Z., Wang, C., Campillo, J., Zhang, Q., Wallin, F., Guo, J., "A

- comprehensive review of smart energy meters in intelligent energy networks*", IEEE Internet of Things Journal, Vol. 3, No. 4, pp. 464-479, 2016.
- [5] Skagestad, B. and Mildenstein, P. I, *District heating and cooling connection handbook - programme of research*, Development and Demonstration on District Heating and Cooling, 2002.
- [6] Saavedra, E., Mascaraque, L., Calderon, G., Campo, G., and Santamaria, A., "The smart meter challenge: feasibility of autonomous indoor iot devices depending on its energy harvesting source and iot wireless technology", Sensors, Vol. 21, No. 22, 2021.
- [7] Rokonzaman, M., Mishu, MK., Amin, N., Nadarajah, M., Roy, RB. Rahman, KS. Buhari, AM., Binzaid, S., Shakeri, M., and Pasupuleti, J., "Self-sustained autonomous wireless sensor network with integrated solar photovoltaic system for internet of smart home-building (IoSHB) applications", Micromachines, Vol. 12, No. 6, pp. 653, 2021.
- [8] Hidalgo-Leon, R., Urquizo, J., Macias, J., Siguenza, D., Singh, p., wu, j., jinsong, and soriano, g., "energy harvesting technologies: analysis of their potential for supplying power to sensors in building", IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), pp.1-6, 2018.
- [9] Ma, X., Zhou, S., "A review of flow-induced vibration energy harvesters", Energy Conversion and Management, Vol. 254, pp. 115223, 2022.
- [10] Hamlehdar, M., Kasaeian, A., and Safaei MR., "Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: a critical review", Renewable Energy, Vol. 143, pp. 1826-1838, 2019.
- [11] Molino-Minero-Re, E., Carbonell-Ventura, M., Fisac-Fuentes, C., Manuel-Lazaro, A., and Toma, D., "Piezoelectric energy harvesting from induced vortex in water flow", IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, pp. 624-627, 2012.
- [12] Hobeck, J., and Inman, D., "Electromechanical and statistical modeling of turbulence-induced vibration for energy harvesting", Proc. SPIE 8688, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2013.
- [13] Gao, X., Shih, W., and Shih, W., "Flow energy harvesting using piezoelectric cantilevers with cylindrical extension", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 3, pp. 1116-1118, 2013.
- [14] Bischur, E., Pobering, S., Menacher, M., and Schwesinger, N., "Piezoelectric energy harvester operating in flowing water", Proc. SPIE 7643, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2010.
- [15] Allen, J., and Smits, A., "Energy harvesting EEL", Journal of Fluids and Structures, Vol. 15, No. 3-4, pp. 629-640, 2001.
- [16] Bryant, M., Shafer, M., and Garcia, E., "Power and efficiency analysis of a flapping wing wind energy harvester", Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, Vol. 8341, pp. 83410E, 2012.
- [17] Skow, E., Cunefare, K., and Erturk, A., "Design and performance enhancement of hydraulic pressure energy harvesting systems", Proc. SPIE 8688, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2013.
- [18] Hoffmann, D., Willmann, A., Göpfert, R., Becker, P., Folkmer, B., and Manoli, Y., "Energy harvesting from fluid flow in water pipelines for smart metering applications", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 476, pp. 012104, 2013.
- [19] Roundy, S., Wright, P., and Rabaey, J., *Energy scavenging for wireless sensor networks*, Boston, MA: Springer US, 2004.
- [20] Ahmad, I., Hee, LM., Abdelrhman, AM., Imam, SA., and Leong, MS., "Hybrid vibro-acoustic energy harvesting using electromagnetic transduction for autonomous condition monitoring system", Energy Conversion and Management. Vol. 258, pp. 115443, 2022.
- [21] Becker, P., Folkmer, B., Goepfert, R., Hoffmann, D., Willmann, A., and Manoli, Y., "Energy autonomous wireless water meter with integrated turbine driven energy harvester" Journal of Physics Conference Series, Vol. 476, pp. 2046, 2013.
- [22] Pimenta, N., and Chaves, P., "Study and design of a retrofitted smart water meter solution with energy harvesting integration", Discover Internet of Things, Vol. 1, 2021.
- [23] Li, XJ., and Chong, PHJ., "Design and implementation of a self-powered smart water meter", Sensors, Vol. 19, No.19, 2019.
- [24] Moczar, G., Csubak, T., and Varady, P., "Distributed measurement system for heat metering and control", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 51, No. 4, pp. 691-694, 2002.

- [25] Hehn, T., and Manoli, Y., *CMOS circuits for piezoelectric energy harvesters*, Springer Series in Advanced Microelectronics, 2015.
- [26] Knight, C., Davidson, J., and Behrens, S., "Energy options for wireless sensor nodes", *Sensors*, Vol. 8, No. 12, pp. 8037-8066, 2008.
- [27] Tabesh, A., and Fréchet, L., "An improved small-deflection electromechanical model for piezoelectric bending beam actuators and energy harvesters", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, No. 10, pp. 104009, 2008.
- [28] Rezaei, N., Tabesh, A., Dehghani, R., and Aghili, A., "An efficient piezoelectric windmill topology for energy harvesting from low speed air flows", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 6, pp. 3576-3583, 2014.
- [29] *Piezo systems product catalog describing pzt piezoceramic materials, actuators, sensors, fans, energy harvesters, high voltage amplifiers, ultrasonic devices and piezoelectric engineering services*, Piezo.com, 2018.
- [30] *LTC1540 - Nanopower comparator with reference - linear technology*, Linear.com, 2017.
- [31] *ATmega328P-Microcontrollers and Processors*, Microchip.com, 2018.
- [32] *I2C relative humidity sensor with temperature - HTU21D | TE connectivity*, Te.com, 2018.
- [33] *nRF24L01-Ultra low power wireless solutions from nordic semiconductor*, Nordicsemi.com, 2018.
- [34] *Hall-effect magnetic sensor-Low power consumption*, Melexis.com, 2018.