

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

سیامک جعفرپیشه^۱، احمدرضا تابش^۲، نسرین رضائی حسین‌آبادی^۲، محمد امین لطیفی^۲، حمیدرضا کارشناس^۲
^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران

Siamak_jafarpisheh@yahoo.com

^۲ عضو هیات علمی - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران

{a.tabesh}, {n.rezaei}, {latify}, {karshen}@iut.ac.ir

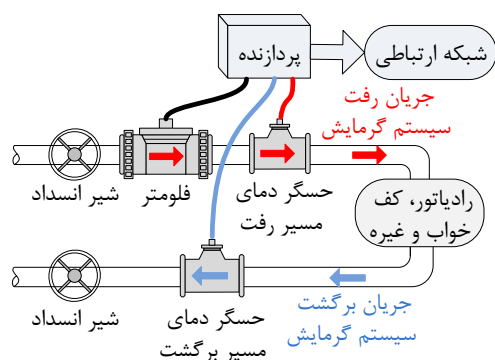
چکیده: این مقاله به ارائه ساختاری برای دستگاه گرمایش سنج بی سیم خودتوان می‌پردازد که تامین توان آن از طریق برداشتگر انرژی سیال با یک تیر پیزوالکتریک انجام می‌شود. کاربرد اصلی این دستگاه تعیین منصفانه‌تر سهم انرژی گرمایشی مصرفی واحدهای مستقل در مجتمع‌های مسکونی بزرگ با سیستم گرمایش مرکزی می‌باشد. در طرح ارائه شده، برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک علاوه بر تامین توان، نقش فلومتر نیز دارد که در نتیجه با کاهش توان مصرفی امکان طراحی دستگاه به صورت خودتوان را فراهم می‌سازد. کارآیی ساختار ارائه شده 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 به عنوان حسگر مرجع، بررسی و درستی عملکرد همزمان تیر پیزوالکتریک به عنوان برداشتگر انرژی سیال و حسگر نشان داده شده است.

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

۱. مقدمه

اندازه‌گیری دامنه ولتاژ تولیدی برداشتگر تخمین زده است. گرمایش سنج بی‌سیم در [۲۴]، برای تامین توان به منبع انرژی خارجی نیاز دارد و لذا نیاز به تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان پایین از معایب انرژی سنج ارائه شده می‌باشد.

موضوع اصلی این مقاله، ارائه طرحی برای گرمایش سنج بی‌سیم و خودتوان بر مبنای استفاده از یک تیر برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریکی است. در طرح ارائه شده، برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریکی علاوه بر تامین توان دستگاه و حذف باتری، امکان اندازه‌گیری فلو (دبی جریان) سیال را نیز فراهم می‌سازد. در نتیجه با طراحی صحیح زمان‌بندی مدهای دستگاه و نیز استفاده همزمان از تیر پیزوالکتریکی به عنوان برداشتگر انرژی و حسگر فلومتر، توان مصرفی دستگاه به کمتر از ۵۰ میکرووات کاهش یافته و امکان خودتوان نمودن دستگاه گرمایش سنج فراهم می‌شود. کارآیی 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، پردازنده 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 دبی، انرژی گرمایش مصرفی هر واحد، توسط پردازنده و بر اساس (۱) قابل محاسبه است [۲۴]:

مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌های مسکونی از اولویت‌های برنامه‌ریزی توسعه انرژی پایدار در بخش نظام ساختمان‌سازی کشورها است. پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی نیازمند ابزارهای پایش برخط و تجهیزات مرتبط با انرژی ساختمان است [۱، ۲]. در یک ساختمان مسکونی و به ویژه در مجتمع‌های مسکونی بزرگ، سیستم‌های گرمایش ساختمان با سهمی حدود ۴۵ درصد 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 مترآژ واحد مسکونی، به عنوان یک راهکار مناسب در ارتقا مدیریت مصرف انرژی مطرح است. اخیراً استفاده از گرمایش سنج مستقل برای هر واحد مسکونی به عنوان راهکاری برای محاسبه عادلانه‌تر سهم انرژی مصرفی هر واحد مطرح شده است [۴، 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 فن‌آوری‌های بی‌سیم و تکنیک‌های برداشت انرژی به ترتیب به عنوان جایگزین‌هایی برای ارتباطات و منبع تغذیه استفاده کند [۶].

استفاده از گرمایش سنج‌های بی‌سیم یک راهکار مطرح برای این منظور هستند که سادگی نصب و عدم نیاز به سیم‌کشی اضافی در ساختمان مهمترین ویژگی آن‌ها می‌باشد. در راستای بهبود این راهکار، استفاده از انرژی محیط به منظور تامین توان دستگاه سنجش انرژی گرمایشی ساختمان و حذف باتری یا سیم‌کشی اضافی برای تامین توان الکتریکی، به عنوان 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، ۸]، اما در کاربرد خاص گرمایش سنج، برداشت انرژی از حرکت سیال، مطمئن‌تر خواهد بود [۹، 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 برداشتگرهای انرژی پیزوالکتریکی نسبت به نوع ژنراتور مغناطیس دائم امکان تولید ولتاژ با دامنه زیاد در فرکانس لرزش کم است [۳، ۲۰]. در مراجع [۲۱-۲۳] از برداشتگرهای الکترومغناطیسی در کنتورهای آب هوشمند برای تامین توان استفاده کرده است که در [۲۳]، دبی آب عبوری را نیز با

(۱)

$$E = \rho Q C_p \Delta T \Delta t$$

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 بر حسب ثانیه هستند.

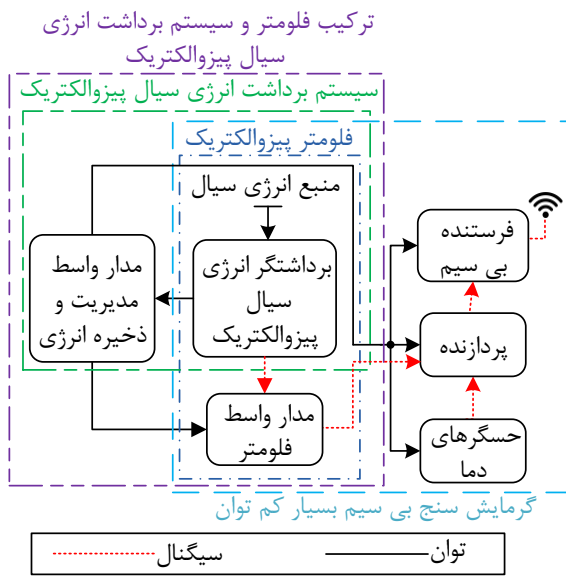
در یک ساختمان هوشمند مجهز به گرمایش سنج، انرژی گرمایش مصرفی هر واحد از طریق شبکه‌های ارتباطی به سیستم مرکزی جمع‌آوری داده‌ها منتقل و برای پردازش‌های مختلف از جمله صدور قبض انرژی، ذخیره می‌شود. از آنجا که معمولاً امکان دسترسی آسان به مسیر آب ورودی و خروجی ساختمان وجود ندارد، در طراحی یک دستگاه گرمایش سنج، دو ویژگی بی‌سیم بودن و خودتوان بودن دستگاه که نیاز آن را به تعویض باتری برطرف می‌کند، از اهمیت بسزایی برخوردار هستند. یک راهکار برای خودتوان کردن دستگاه، تامین 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 بی‌سیم را نیز فراهم نماید.

۲.۲. ساختار گرمایش سنج پیشنهادی

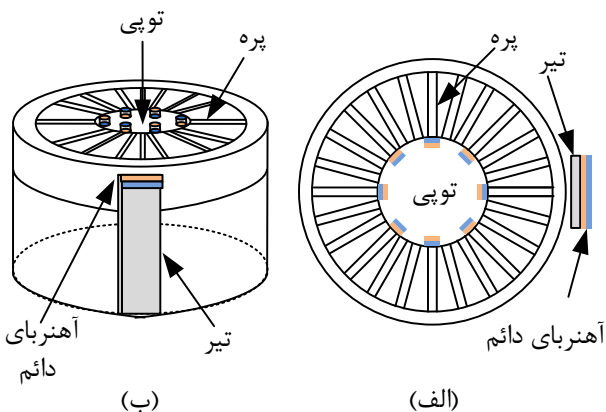
شکل (۲) دیاگرام اجزای یک گرمایش سنج بی‌سیم که توان الکتریکی مصرفی آن توسط یک برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریکی تامین می‌شود را نشان می‌دهد. برداشتگر پیزوالکتریکی شامل یک تیر پیزوالکتریکی است که یک سر آن ثابت و سر دیگر آن آزاد می‌باشد. مواد پیزوالکتریکی به دلیل دارا بودن مولکول‌های قطبی دارای تزویج الکترومکانیکی 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 پیزوالکتریکی 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 پیزوالکتریکی، مدار مدیریت و ذخیره انرژی، فلومتر پیزوالکتریکی، حسگرهای دمای کم مصرف، پردازنده با مصرف توان بسیار پایین و فرستنده بی‌سیم 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 ایجاد شده است. در مجاورت

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



شکل (۲): دیاگرام گرمایش سنج بی‌سیم خودتوان پیشنهادی



شکل (۳): ساختار برداشتگر انرژی سیال توربینی پیزوالکتریکی

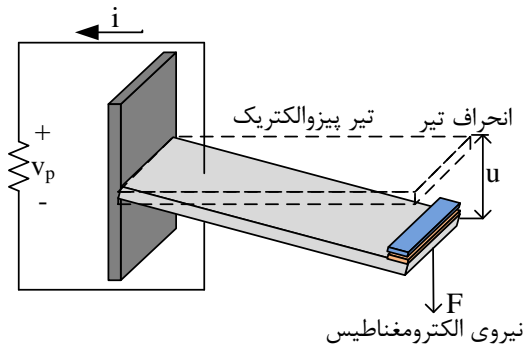
(الف) نمای بالا (ب) نمای جانبی

چگالی توان تولیدی این نوع برداشتگرهای انرژی پیزوالکتریکی در حدود ۵۰۰ میکرووات بر سانتی‌متر مکعب است و دامنه ولتاژ آن‌ها

برحسب جرم فیزیکی و ابعاد تیر قابل محاسبه است [۲۸]:

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

که در این رابطه زیرنویس‌های 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 می‌دهند. ثابت‌های $a_1 = 0.45$ ، $a_2 = -0.25$ و $a_3 = 0.036$ نیز با توجه به هندسه تیر در شکل (۴) برای جرم موثر قابل محاسبه هستند که جزئیات محاسبات آن در مراجع [۲۷، 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 ترویج الکترومکانیکی ماده پیزوالکتریک است که اثر ولتاژ دو سر تیر (v_p) را با ضریب ترویج (θ) در معادله مکانیکی مدل می‌کند. رفتار الکتریکی یک تیر پیزوالکتریک با یک خازن (C_p) با رابطه (۴) مدل می‌شود [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 شده‌اند. 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 ترویج 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 می‌شود.

برای یک تیر در ابعاد سانتی‌متر در حدود چندین ولت می‌باشد که مناسب تغذیه مدارهای الکترونیکی است [۲۶]. با توجه به کم بودن سطح توان تولیدی، استفاده از برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک جهت تامین 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 می‌کند که فرکانس آن متناسب با سرعت سیال (دبی) در مسیر آب ورودی است. بنابراین، علاوه بر امکان استفاده از ولتاژ تیر پیزوالکتریک برای تامین توان، با اندازه‌گیری فرکانس نوسان‌های ولتاژ قبل از یکسوسازی می‌توان دبی جریان سیال (Q) که طبق (۱) برای محاسبه انرژی مصرفی لازم است را نیز محاسبه نمود. برای این منظور، کفایت رابطه فرکانس دوران توربین با حجم آب گذرنده از آن با استفاده از یک حسگر فلو متر مرجع تعیین شده و رابطه محاسبه دبی بر حسب فرکانس در واحد پردازنده انجام پذیرد.

در بخش‌های بعدی، ابتدا مدل الکترومکانیکی و نحوه تبدیل انرژی لرزشی به الکتریکی در مواد پیزوالکتریک مطرح می‌شود. سپس اصول طراحی مدارهای واسطه برای جذب حداکثر توان از برداشتگر انرژی پیزوالکتریک ارائه شده و طراحی برای مدارهای آن ارائه می‌شود. در نهایت، به طور خاص، طراحی و تست عملی یک مدار کم توان برای گرمایش سنج بی‌سیم خودتوان ارائه خواهد شد.

۳. برداشتگر انرژی و فلو متر پیزوالکتریک

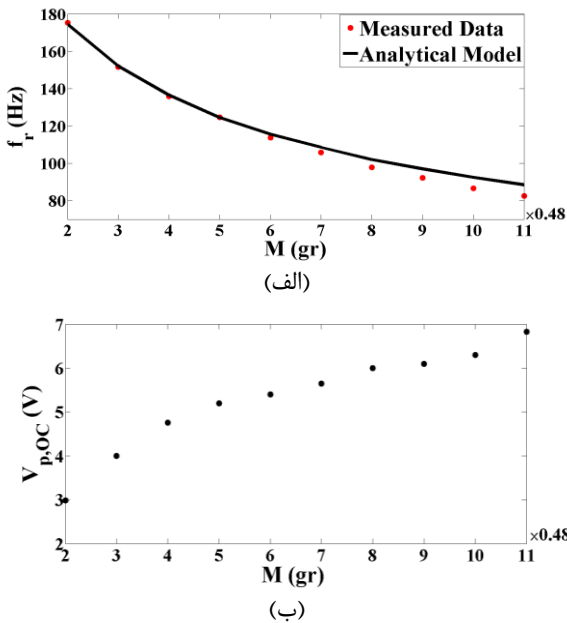
۱.۳. مدل الکترومکانیکی تیر پیزوالکتریک

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

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

که در این رابطه F نیروی الکترومغناطیسی وارد بر تیر، u میزان نوسان سر آزاد تیر و M_e جرم موثر تیر است که از رابطه (۳)

جنبشی آب به انرژی مکانیکی در ابتدای مسیر عبور آب استفاده شده است. برداشتگر انرژی در این تست تیر پیزوالکتریک دو لایه موزی ساخت شرکت پیزو سیستم با شماره Q220-A4-303YB [29] است که بر سر آزاد آن آهنرباهایی از جنس نئودیمیوم نصب شده است. مشخصات تیر پیزوالکتریک و هر یک 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 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

برای یک تیر مستطیلی دو لایه با ضخامت یکنواخت، روابط تحلیلی معادله (۵) برای محاسبه پارامترهای تیر در مرجع [27] ارائه شده‌اند:

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

که s_{11}^E ضریب نرمی، ϵ_{33}^T ضریب دی الکتریک و d_{31} ثابت بار 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 مضرری 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 موثر با انتخاب مناسب جرم نصب شده در راس تیر مهم و کلیدی خواهند بود.

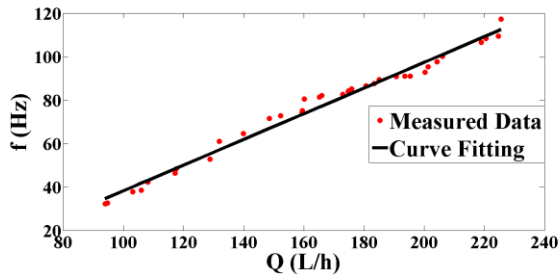
جدول (۱): مشخصات تیر پیزوالکتریک و آهنربا [29]

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	-

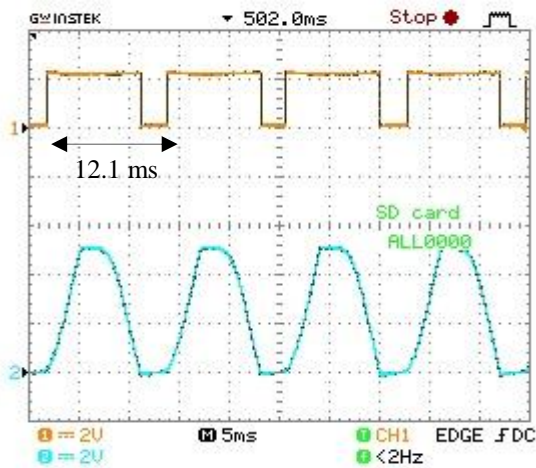
۲.۳. ارزیابی عملکرد برداشتگر انرژی سیال

به منظور ارزیابی عملکرد برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریکی و تاثیر 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 جهت تبدیل انرژی

می‌کند. به منظور اندازه‌گیری فرکانس توربین، مطابق شکل (۶) ولتاژ تیر پیزوالکتریک قبل از یکسوسازی توسط مدار دوبرابرکننده ولتاژ دیودی به یک مقایسه‌کننده ولتاژ اعمال شده و با مقدار صفر مقایسه می‌شود. مدار مقایسه‌کننده از نوع بسیار کم‌مصرف LTC1540 است که محدوده ولتاژ عملیاتی آن بین ۲ تا ۱۱ ولت است [۳۰]. برای حفاظت مقایسه‌کننده در برابر دامنه ولتاژ زیاد پیزوالکتریک (۶/۸ ولت)، از یک تقسیم مقاومتی استفاده شده است.



(الف)



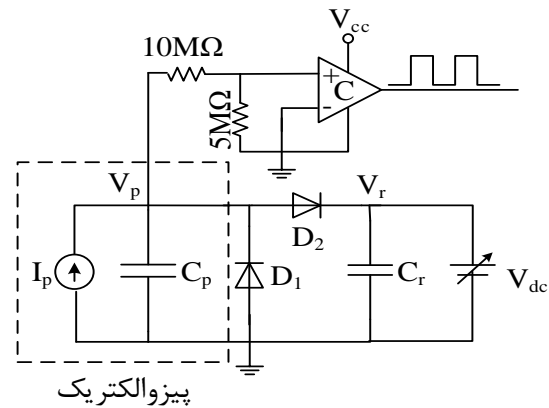
(ب)

شکل (۷): (الف) اثر تغییرات دبی آب عبوری بر فرکانس تیر (ب) شکل موج مقایسه‌کننده 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 می‌دهد که با نماد دایره مشخص شده‌اند. هر دبی سیال، متناسب با یک سرعت زاویه‌ای 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. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش دبی آب عبوری منجر به افزایش فرکانس لرزش تیر پیزوالکتریک می‌شود. شکل (۷-ب) نیز نمونه شکل مدار عملی مربوط به خروجی مقایسه‌کننده و ولتاژ

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 بدست 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 تیر و در نتیجه افزایش ولتاژ مدار باز می‌شود. از این مرحله به بعد، با هدف جذب حداکثر توان خروجی از تیر پیزوالکتریک جهت تامین توان گرمایش سنخ، از حداکثر تعداد آهنربا بر روی تیر استفاده شده است. افزایش تعداد آهنربا، موجب افزایش نیروی وارد بر تیر نیز می‌شود 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 می‌باشد، فرکانس تشدید تیر ۸۲/۶ هرتز و ولتاژ مدار باز تیر در شرایط تشدید ۶/۸ ولت می‌شود. 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، برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک طراحی شده منطبق بر فرکانس تشدید ۸۲/۶ هرتز، نوسان می‌کند و ولتاژ مدار باز آن ۶/۸ ولت است.

۳.۳. ارزیابی عملکرد فلومتر پیزوالکتریک

فلومتر پیزوالکتریک، از طریق فرکانس برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک طراحی شده در بخش ۳-۲ که در شکل (۶) با یک منبع جریان موازی با خازن نشان داده شده است، دبی سیال را اندازه‌گیری

دو سر تیر قبل از یکسوسازی را نشان می‌دهد.

کنترل مرکزی از ماژول فرستنده nrf24l01+ ساخت شرکت نوردیک استفاده شده است. محدوده ولتاژ عملیاتی این ماژول بین ۱/۹ تا ۳/۶ ولت و برد مسافتی آن در حدود ۱۰۰ متر است [۳۳].

با مقایسه دبی اندازه‌گیری شده با یک حسگر اثرهال به عنوان فلومتر مرجع می‌توان 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) بدست آمده و توسط رابطه خطی (۶) بیان می‌شود:

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

به طوری که f فرکانس لرزش تیر پیزوالکتریک بر حسب هرتز و Q دبی آب عبوری بر حسب لیتر بر ساعت هستند.

۴. طراحی گرمایش سنج بی‌سیم خودتوان

۱.۴. انتخاب سخت‌افزار

تحقق ایده خودتوان بودن گرمایش سنج بی‌سیم مستلزم استفاده از حسگرها و تجهیزات بسیار کم مصرف در ساختار گرمایش سنج است. با در نظر گرفتن این موضوع، مشخصات سخت‌افزار استفاده شده در گرمایش سنج بی‌سیم توربینی پیشنهادی به شرح زیر است:

- **پردازنده:** برای انجام پردازش‌های لازم در محاسبه انرژی گرمایش مصرفی از پردازنده کم مصرف ATmega328P ساخت شرکت اتمل استفاده شده است. ATmega328P، یک میکروکنترلر ۸ بیتی بسیار کم مصرف با ۳۲ پایه ورودی و خروجی است. ولتاژ این میکروکنترلر بین ۱/۸ تا ۵ ولت است [31].

- **حسگر دما:** به منظور اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی به رادیاتورهای هر واحد در گرمایش سنج پیشنهادی از دو حسگر دمای HTU21D ساخت شرکت میس استفاده شده است. دقت بالا در حدود ۰/۰۱ درجه سانتی‌گراد، محدوده ولتاژ کاری مناسب در محدوده ۱/۵ تا ۳/۶ ولت، محدوده دمای کاری قابل قبول در محدوده ۴۰- تا ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد و داشتن خروجی دیجیتال از ویژگی‌های این حسگر به شمار می‌آیند [۳۲].

- **فرستنده بی‌سیم:** جهت ارسال اطلاعات به سیستم پایش و

- **فلومتر:** چالش اصلی در طراحی گرمایش سنج بی‌سیم خودتوان، انتخاب فلومتر توربینی با توان مصرفی بسیار پایین به منظور اندازه‌گیری دبی آب عبوری است. در این مقاله طرح پیشنهادی فلومتر پیزوالکتریک با استفاده از مدار برداشگر انرژی ارائه شد. برای مقایسه مزیت طرح ارائه شده با سایر روش‌ها، فلومتر توربینی YF-S201c با قطر اتصال ۰/۵ اینچ که به منظور کاهش توان مصرفی، حسگر اثرهال آن با یک حسگر اثرهال بسیار کم مصرف تعویض شده است، نیز در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله از حسگر اثرهال بسیار کم مصرف MLX92213 ساخت شرکت ملکسیس استفاده شده که ولتاژ عملیاتی آن بین ۱/۶ تا ۳/۶ ولت است [۳۴].

در طرح ارائه شده برای گرمایش سنج بی‌سیم برنامه زمان‌بندی به‌گونه‌ای تنظیم شده است که مدار گرمایش سنج هر ۶۰ ثانیه یکبار به مدت ۱ ثانیه در حالت فعال قرار می‌گیرد و با نمونه‌برداری از دمای آب ورودی، دمای آب خروجی و دبی آب عبوری، میزان مصرف انرژی گرمایشی هر واحد ساختمان را محاسبه و در حافظه داخلی پردازنده ذخیره می‌کند. پس از ۲۰ مرتبه ذخیره اطلاعات که جمعاً ۱۲۲۰ ثانیه به طول می‌انجامد، مجموع انرژی گرمایشی ذخیره شده در حافظه پردازنده توسط فرستنده بی‌سیم و طی مدت ۳/۷۵ میلی‌ثانیه به گیرنده مرکزی ارسال می‌شود. این زمان‌بندی در راستای کاهش توان مصرفی گرمایش سنج بی‌سیم پیشنهاد شده است.

۲.۴. محاسبه و مقایسه توان مصرفی گرمایش سنج‌ها

به منظور بررسی عملکرد گرمایش سنج، از یک سامانه تست که بلوک دیاگرام آن مطابق شکل (۸) است، استفاده شده است. در این سامانه، به منظور تولید همزمان آب گرم و سرد، از المان خنک‌کننده ترموالکتریک Tec1-12710 و دو رادیاتور استفاده شده است. عملکرد المان ترموالکتریک به این گونه است که در صورت اعمال ولتاژ به آن، یک طرف آن گرم و طرف دیگر آن سرد می‌شود. بنابراین با قرار دادن دو رادیاتور در دو طرف المان ترموالکتریک، آب عبوری از یکی از رادیاتورها به دلیل تماس با سطح گرم ترموالکتریک، گرم و رادیاتور

دیگر به دلیل تماس با سطح سرد ترموالکتریک، سرد می‌شود.

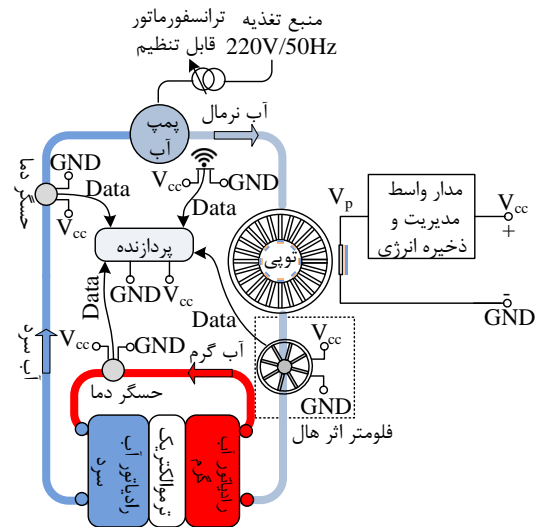
طرح پیشنهادی، استفاده همزمان از برداشتگر انرژی لرزشی به الکتريسته به عنوان فلومتر پیزوالکتریک نیز ارائه شده و کارایی آن با تست عملی و مقایسه با نتایج اندازه‌گیری به وسیله فلومتر اثرهال به عنوان حسگر مرجع مقایسه شد.

جدول (۲): مقایسه جریان و توان مصرفی گرمایش‌سنج‌ها

شرایط تست		۲ ولت و ۱ مگاهرتز	
مد کاری	مد فعال	مد کاری	مد توان پایین
ATmega328P	۳۴۰ μA	۳/۸ μA	
HTU21D	۳۵۰ μA	≈ 0	
nrf2401+	۱۱/۳ mA	۹۰۰ nA	
فلومتر اثرهال	۳۶ μA	۴/۵ μA	
فلومتر پیزوالکتریک	۴۳۰ nA	۴۳۰ nA	
متوسط مصرف گرمایش‌سنج با فلومتر اثرهال		۲۶/۷۳ μA (۵۳/۵ μW)	
متوسط مصرف گرمایش‌سنج با فلومتر پیزوالکتریک		۲۲/۱۴ μA (۴۴/۳ μW)	

بر مبنای نتایج تست‌های عملی و اتصال برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک طراحی شده به مدارهای واسط مدیریت و ذخیره انرژی مشخص شد که حداکثر متوسط توان تولیدی برداشتگر انرژی ۲۲۷ میکرووات است. این درحالی است که در طرح پیشنهادی، توان متوسط مصرفی مدار کمتر از ۲۲۷ میکرووات است. در نتیجه، برای یک گرمایش‌سنج واقعی که محدوده دبی آب در آن بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ لیتر در ساعت است، تامین توان مدارهای گرمایش‌سنج با استفاده از انرژی حرکت سیال (آب) در مسیر لوله‌های ورودی و خروجی امکان‌پذیر بوده و پیاده‌سازی طرح پیشنهادی گرمایش‌سنج بی‌سیم به صورت خودتوان و بدون نیاز به باتری امکان‌پذیر است.

گرچه فن‌آوری‌های برداشت انرژی هنوز در کاربردهای تجاری گرمایش‌سنج‌های بی‌سیم تجاری ادغام نشده‌اند، نتایج تست‌های عملی نشان می‌دهد که پیاده‌سازی گرمایش‌سنج بی‌سیم خودتوان امکان‌پذیر است و کوچک کردن و یا حذف باتری، مزیت‌های 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 داده‌های حاصل از آن، امکان پیش‌بینی میزان مصرف آب گرم با تغییرات فصلی دمای فضای باز را با استفاده از تحلیل‌های آماری و یادگیری ماشین فراهم می‌کند. همچنین با استفاده از این



شکل (۸): بلوک دیاگرام سامانه تست گرمایش‌سنج بی‌سیم خودتوان

با استفاده از این سامانه تست، میزان جریان مصرفی تجهیزات گرمایش‌سنج در دو حالت: یکی با استفاده از حسگر فلومتر اثرهال و دیگری با استفاده از طرح پیشنهادی فلومتر پیزوالکتریک، اندازه‌گیری شده‌اند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری جریان اجزاء 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.

بررسی نتایج تست نشان می‌دهد که متوسط توان مصرفی در طرح پیشنهادی با فلومتر پیزوالکتریک در حدود ۴۴ میکرووات و در طرح حسگر اثرهال در حدود ۵۳ میکرووات می‌باشد. از طرفی بر مبنای نتایج تست‌های عملی و اتصال برداشتگر انرژی سیال پیزوالکتریک طراحی شده به مدارهای واسط مدیریت انرژی مشخص شد که حداکثر متوسط توان تولیدی برداشتگر ۲۲۷/۳ میکرووات است که نشان‌دهنده امکان استفاده از برداشتگر انرژی برای تامین توان گرمایش‌سنج است.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک طرح عملی برای ساخت یک گرمایش‌سنج بی‌سیم خودتوان ارائه شد که با استفاده از برداشتگر انرژی سیال امکان حذف باتری و سیم‌کشی برای تامین توان را فراهم می‌سازد. همچنین در

- Harvesting", Proc. SPIE 8688, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2013.
- [13] Gao, X., Shih, W., 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., Schwesinger, N., "Piezoelectric Energy Harvester Operating in Flowing Water", Proc. SPIE 7643, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems, 2010.
- [15] Allen, J., Smits, A., "Energy Harvesting EEL", Journal of Fluids and Structures, Vol. 15, No. 3-4, pp. 629-640, 2001.
- [16] Bryant, M., Shafer, M., 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., 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., 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., Rabaey, J., *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks*, Boston, MA: Springer US, 2004.
- [20] Ahmad, I., Hee, L.M., Abdelrhman, A.M., Imam, S.A., Leong, M.S., "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., 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., 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, X.J., Chong, P.H.J., "Design and Implementation of a Self-Powered Smart Water Meter", Sensors, Vol. 19, No.19, 2019.
- [24] Moczar, G., Csubak, T., 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., Manoli, Y., *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters*, Springer Series in Advanced Microelectronics, 2015.
- [26] Knight, C., Davidson, J., Behrens, S., "Energy Options for Wireless Sensor Nodes", Sensors, Vol. 8, No. 12, pp. 8037-8066, 2008.
- [27] Tabesh, A., Fréchette, 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., 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.

تحلیل‌ها می‌تواند دستورالعمل‌هایی برای استفاده بهینه از آب گرم خانگی توسط خانوارها و بهره‌برداری کارآمد تامین‌کننده گرم استخراج کرد.

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., 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., 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., 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, M.K., Amin, N., Nadarajah, M., Roy, R.B., Rahman, K.S., Buhari, A.M., Binzaid, S., Shakeri, M., 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, 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., 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., 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., Inman, D., "Electromechanical and Statistical Modeling of Turbulence-Induced Vibration for Energy

- [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.