

برداشت انرژی از ارتعاشات مکانیکی، از انرژی هدررفته تا منابع تغذیه هوشمند

جواد محمدی^۱

^۱ گروه مکانیک، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

در بسیاری از سیستم های مهندسی، ارتعاشات مکانیکی به عنوان یک پدیده مزاحم یا حتی مخرب شناخته می شوند که باید کنترل یا حذف شوند. با این حال، در سالهای اخیر رویکردی جامع تری نسبت به ارتعاشات توسط پژوهشگران صورت گرفته است و به جای میرا کردن ارتعاشات، می توان انرژی نهفته در آن ها را استخراج نموده و به انرژی الکتریکی تبدیل نمود. این مقاله به صورت کلی، روش های اصلی استخراج انرژی از ارتعاشات مکانیکی، شامل روش های پیزوالکتریک، الکترومغناطیسی، تریبوالکتریک و الکترواستاتیک را معرفی می نماید و کاربردهای آن ها را در حسگرهای بی سیم خودتغذیه، پوشیدنی های هوشمند، زیرساخت های حمل و نقل و تجهیزات پزشکی مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین چالش های موجود در این حوزه، از جمله بازده پایین تبدیل انرژی و محدودیت باند فرکانسی مؤثر، و مسیرهای تحقیقاتی آتی از قبیل بهره گیری از فراموادها و سامانه های تطبیقی هوشمند پرداخته می شود.

واژه های کلیدی: برداشت انرژی از ارتعاشات، پیزوالکتریک، تریبوالکتریک، حسگرهای خودتغذیه، انرژی تجدیدپذیر

۱. مقدمه

در علم مهندسی مکانیک، ارتعاش به عنوان یک عامل مخرب معرفی می شود که باید با میراگرها، جاذب های دینامیکی یا سامانه های کنترل فعال کاهش یابد. اما واقعیت این است که در بسیاری از محیط های مربوطه، از حرکت خودروها و راه رفتن انسان گرفته تا لرزش ماشین آلات صنعتی و ارتعاش پل ها، مقدار زیادی از انرژی مکانیکی به صورت گرما یا صدا از بین می رود. با رشد سریع اینترنت اشیا (IoT)^۱ و نیاز به حسگرهای بی سیم توزیع شده که در مکان های دورافتاده نصب می شوند، تغذیه این حسگرها با باتری های قابل تعویض عملاً غیرعملی و با هزینه بالایی صورت می گیرد. این محدودیت، انگیزه اصلی توسعه فناوری هایی است که بتوانند انرژی ارتعاشی محیط موزد نظر را به انرژی الکتریکی که قابل ذخیره یا مصرف مستقیم باشد، تبدیل کنند؛ که در تحقیقات علمی با عنوان «برداشت انرژی از ارتعاش» یا (VEH)^۲ شناخته می شود.

هدف اصلی برداشت انرژی ارتعاشی این است که به عنوان مثال یک عنصر مکانیکی (معمولاً یک تیر یکسرگیردار با جرم متمرکز) در نظر گرفته شود که تحت تاثیر ارتعاشی محیط اطراف قرار می گیرد و حرکت نسبی آن، توسط یک مکانیزم تبدیل انرژی، به ولتاژ یا جریان الکتریکی تبدیل می شود. آنچه از دیدگاه مهندسی مکانیک در این زمینه اهمیت دارد این است که طراحی مناسب مبدل، نیازمند درک عمیقی از دینامیک سازه ها، تشدید (رزونانس)، میرایی و رفتار غیرخطی سیستم است؛ با این تفاوت که در اینجا هدف اصلی، به حداکثر رساندن پاسخ سیستم است، نه کمینه کردن آن [۱].

۲. روش های اصلی برداشت انرژی ارتعاشی

۲-۱. برداشت پیزوالکتریک

مواد پیزوالکتریک، مانند سرامیک های PZT یا فیلم های پلیمری PVDF، هنگام تغییر شکل مکانیکی، بار الکتریکی تولید می کنند. رایج ترین روش برداشت انرژی پیزوالکتریک، یک تیر یکسرگیردار دولایه است که در انتهای آزاد آن جرمی متمرکز تعبیه شده است تا فرکانس طبیعی سازه با فرکانس تحریک محیطی مطابقت داشته باشد و پدیده تشدید، دامنه ارتعاش و در نتیجه ولتاژ خروجی را به حداکثر برساند [۲]. در این روش به دلیل اینکه چگالی توان بالا بوده و همچنین به دلیل سادگی ساختار آن، از پرکاربردترین ساختارها در مقیاس میلی متری تا سانتی متری می باشد اما شکنندگی سرامیک ها و کاهش عملکرد خارج از باند تشدید از محدودیت های اصلی این روش به حساب می آید [۳].

۲-۲. برداشت الکترومغناطیسی

در این روش، حرکت نسبی یک مغناطیس دائم نسبت به یک سیم پیچ، بر اساس قانون القای فارادی، باعث تولی جریان الکتریکی می شود [۴]. مبدل های الکترومغناطیسی معمولاً برای ارتعاشات با دامنه بزرگ تر و فرکانس پایین تر (نظیر ارتعاش خودرو یا

¹ Internet Of Things

² Vibration Energy Harvesting

ماشین آلات صنعتی) مناسب تر می باشند و به دلیل اینکه نیازی به بارگذاری الکتریکی خارجی برای شروع کار ندارند، از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار می باشند، اما در مقیاس های کوچک، بازده آن ها به مراتب از پیزوالکتریک کمتر می باشد [۵].

۲-۳. برداشت تریبوالکتریک

نانوژنراتورهای تریبوالکتریک (TENG)^۳ بر پایه اثر تریبوالکتریک و القای الکتریکی کار می کنند. تماس و جدایی متناوب دو سطح با قابلیت الکتریکی متفاوت، باعث تولید بار الکتریکی می شود [۶]. این فناوری نسبتاً جدید، به دلیل هزینه ساخت پایین، وزن سبک و امکان طراحی در قالب های انعطاف پذیر، در سال های اخیر در حوزه پوشیدنی ها و سطوح تعاملی مورد توجه قرار گرفته است.

۲-۴. برداشت الکترواستاتیک

مبدل های الکترواستاتیک از تغییر ظرفیت خازنی بین دو صفحه رسانا در اثر حرکت نسبی ناشی از ارتعاش مورد استفاده قرار می گیرند. این روش به دلیل سازگاری بالا با فرآیندهای ساخت میکروالکترومکانیکی (MEMS)^۴، برای یکپارچه سازی مستقیم با مدارهای الکترونیکی سیلیکونی روشی قابل قبول محسوب می شود، اما نیاز به منبع بایاس اولیه یا بارگذاری الکتریکی از معایب آن محسوب می شود.

۳. کاربردهای صنعتی و روزمره

۳-۱. حسگرهای بی سیم خود تغذیه

در پایش سلامت سازه ها، خطوط لوله، توربین های بادی و تجهیزات صنعتی دورافتاده، جایگزینی مکرر باتری حسگرها با هزینه بالا و در برخی موارد غیرعملیاتی می باشد. برداشت کننده های انرژی ارتعاشی می توانند به طور مستقیم از ارتعاش تجهیزات، انرژی لازم برای تغذیه حسگر و ارسال بی سیم داده را تأمین کنند و به این ترتیب، شبکه های حسگر «بدون باتری» یا با عمر باتری بسیار طولانی را میسر نمایند [۶].

۳-۲. پوشیدنی ها و انرژی زیستی-مکانیکی

حرکت بدن انسان هنگام راه رفتن یا دویدن، منبع قابل توجهی از انرژی مکانیکی محسوب می شود. کفش ها، مچ بندها و پارچه های هوشمند مجهز به برداشت کننده های پیزوالکتریک یا تریبوالکتریک، می توانند قسمتی از این انرژی را به برق تبدیل نموده و دستگاه های کوچک الکترونیکی مانند حسگرهای سلامتی یا واحدهای مکان یابی را تغذیه نمایند [۷][۸].

³ Triboelectric Nanogenerators

⁴ Microelectromechanical Systems

۳-۳. زیرساخت‌های حمل و نقل

جاده‌ها، ریل‌ها و پل‌ها به صورت مکرر تحت تاثیر بار دینامیکی ناشی از عبور خودرو و قطار قرار دارند. نصب واحدهای برداشت انرژی زیر آسفالت یا در تکیه‌گاه پل‌ها، این قابلیت را دارد که بخشی از انرژی هدررفته را برای تغذیه چراغ‌های هشداردهنده، حسگرهای ترافیکی یا سامانه‌های پایش سازه‌ای تولید نماید [۹].

۳-۴. تجهیزات پزشکی کاشتنی

ضربان قلب و حرکات طبیعی بدن می‌توانند به عنوان یک منبع انرژی برای دستگاه‌های کاشتنی مانند ضربان‌سازهای قلبی محسوب شوند. برداشت انرژی از این حرکات، امکان کاهش یا حذف نیاز به جراحی مجدد برای تعویض باتری را به وجود می‌آورد اما الزامات زیست‌سازگاری و ابعاد بسیار کوچک، طراحی این مبدل‌ها را با موانعی مواجه می‌کند.

۴. چالش‌ها و چشم‌انداز آینده

با وجود اینکه در سالیان اخیر پیشرفت‌های زیادی در علوم مهندسی صورت گرفته است اما برداشت انرژی ارتعاشی هنوز با چند چالش اساسی مواجه می‌باشد. یکی از این موارد این است که بازده تبدیل انرژی در بیشتر مبدل‌ها پایین بوده و توان خروجی معمولاً در محدوده میکرو وات تا میلی‌وات باقی می‌ماند که برای تغذیه مستقیم بسیاری از تجهیزات مناسب نمی‌باشد. یکی دیگر از موارد چالشی این است که اغلب مبدل‌ها تنها در بازه‌ای نزدیک به فرکانس تشدید خود عملکرد مطلوب دارند، در صورتی که ارتعاشات محیطی واقعی دارای باند وسیع و متغیر با زمان می‌باشند. از موارد دیگری می‌توان به دوام و پایداری بلندمدت مواد فعال در شرایط محیطی سخت از قبیل دما، رطوبت و خستگی اشاره کرد که نیاز به بهبود می‌باشد.

اما برای برطرف کردن این موانع، تحقیقات و پژوهش‌های انجام شده در سالیان اخیر، توجه زیادی از پژوهشگران را به طراحی سازه‌های غیرخطی برای گسترش باند فرکانسی موثر، بهره‌گیری از فراموادها و ساختارهای رزونانس محلی برای تقویت انتخابی ارتعاش در فرکانس‌های موردنظر، و ترکیب چند مکانیزم برداشت (مثلاً پیزوالکتریک و الکترومغناطیسی به صورت هم‌زمان) برای افزایش توان خروجی کل جلب نموده است. همچنین، مدیریت هوشمند توان با مدارهای الکترونیکی تطبیقی و یکپارچه‌سازی این سامانه‌ها با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی بلادرنگ عملکرد مبدل، از موضوعات جذاب و کاربردی در سال‌های آتی محسوب خواهد شد.

۵. نتیجه‌گیری

برداشت انرژی از ارتعاشات مکانیکی، موضوع مهمی در تغییر آینده علمی مهندسی مکانیک است که به جای حذف پدیده ناخواسته ارتعاش و لرزش به سمت بهره‌برداری هوشمندانه از آن سوق داده خواهد شد. در این حوزه از ترکیب دانش کلاسیک دینامیک سازه‌ها با علم مواد پیشرفته و الکترونیک، راه را برای توسعه نسل جدیدی از تجهیزات خودتغذیه، از قبیل حسگرهای

صنعتی تا ابزارهای پزشکی کاشتنی باز می‌نماید. اما با توجه به محدودیت‌ها و چالش‌های فنی باقی‌مانده، روند رو به رشد مقالات و طرح‌های تحقیقاتی نشان می‌دهد که برداشت انرژی ارتعاشی به‌زودی جایگاه خود را در خیلی از کاربردهای صنعتی و حتی روزمره انسانها پیدا خواهد کرد.

مراجع

1. Rao, S. S. (2017). Mechanical Vibrations. Pearson Education.
2. Erturk, A., & Inman, D. J. (2011). Piezoelectric Energy Harvesting. Wiley.
3. Anton, S. R., & Sodano, H. A. (2007). A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart Materials and Structures*, 16(3), R1–R214. Beeby, S. P., Tudor, 4. Priya, S., & Inman, D. J. (Eds.). (2009). *Energy Harvesting Technologies*. Springer.
5. M. J., & White, N. M. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, 17(12), R175–R195.
6. Cook-Chennault, K. A., Thambi, N., & Sastry, A. M. (2008). Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures*, 17(4), 043001.
7. Wang, Z. L., & Song, J. (2006). Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. *Science*, 312(5771), 242–246.
8. Fan, F. R., Tian, Z. Q., & Wang, Z. L. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328–334.
9. Roundy, S., Wright, P. K., & Rabaey, J. (2003). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*, 26(11), 1131–1144.

Vibration Energy Harvesting from Wasted Energy to Smart Power Sources

Javad Mohammadi^{*1}

^{1*}Department of Mechanic, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran.

Abstract

In many engineering systems, mechanical vibration is regarded as an unwanted or even destructive phenomenon that must be suppressed. In the last decade, however, a complementary approach has gained attention: instead of merely damping vibration, the energy embedded in it can be harvested and converted into usable electrical power. This review paper introduces the main mechanisms of vibration energy harvesting—piezoelectric, electromagnetic, triboelectric, and electrostatic transduction—and examines their applications in self-powered wireless sensors, smart wearables, transportation infrastructure, and implantable medical devices. Current challenges, including low conversion efficiency and narrow effective bandwidth, together with future research directions such as metamaterial-based structures and adaptive smart systems, are also discussed.

Keywords: Vibration Energy Harvesting, Piezoelectric, Triboelectric, Self-Powered Sensors, Renewable Energy