کاربرد سطوح بازتولید انرژی و مصالح پیزوالکتریک در استادیوم‌های فوتبال به منظور خودکفایی در تولید انرژی

شهناز پورناصری[۱]، زهره حسینی[۲*]

۱- استادیار معماری دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد معماری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

Hosseini1731@gmail.com

چکیده

برای رسیدن به خودکفایی ساختمان‌ها در مبحث انرژی الکتریکی، علاوه بر تولید و صرفه‌جویی در انرژی، می‌توان به بازتولید و استفاده مجدد از انرژی‌های مصرف شده آن نیز پرداخت. مثلاً در بناهایی مانند استادیوم‌ها، فرودگاه‌ها، ایستگاه‌های مترو و... می‌توان از حجم عظیم انرژی جنبشی اتلافی کاربران به‌عنوان منبع انرژی استفاده کرد. برای این منظور می‌توان از مواد پیزوالکتریک باقابلیت تبدیل انرژی جنبشی به الکتریسیته بهره برد که در سال‌های اخیر برای سهولت کاربری، کف‌پوش‌هایی با این قابلیت تولید شده‌اند. در این پژوهش امکان برداشت الکتریسیته از یک استادیوم فوتبال و میزان آن در مقایسه با مصرف الکتریسیته ورزشگاه بررسی شد. برای این کار، در یک استادیوم، الکتریسیته تولید شده از سه بخش زمین‌بازی، سکوهای تماشاگران و مسیرهای تردد و ورودی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با محاسبه تعداد گام‌های دریافتی توسط این تایل‌ها با توان خروجی ۵ تا ۸ وات از هر گام، میزان الکتریسیته تولیدی هر بخش به دست آمد که جمعاً حدود ۹۰ درصد از نیاز ورزشگاه را تأمین می‌کند.۵۰ درصد از آن در سکوهای تماشاگران و باقی در زمین‌بازی و ورودی‌ها به دست می‌آید. با مقایسه گام‌های دریافتی، میزان الکتریسیته تولیدی و تعداد تایل‌های بکار رفته در هر قسمت درمی‌یابیم که بهینه‌ترین بخش برای تولید انرژی، راهرو و ورودی‌ها می‌باشند. در بخش‌های دیگر نیز یک‌سوم میانی زمین‌بازی و سکوهای تماشاگران در امتداد ضلع طولی زمین، به دلیل وجود تردد و تحرک بیش‌تر، در تولید انرژی مؤثرترند. استفاده از کف‌پوش‌های مولد الکتریسیته می‌تواند تأثیر بسزایی در خودکفایی ساختمان‌ها داشته باشد.

واژگان کلیدی: بازتولید انرژی، مصالح هوشمند، پیزوالکتریک، استادیوم فوتبال، کف‌پوش مولد الکتریسیته

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۱- مقدمه

به امروزه بحران انرژی و منابع آن شدت یافته و بهینه‌سازی انرژی در همه کشورها و تمامِ زمینه‌ها بسیار مطرح است. مقدار زیادی از انرژی مصرفی هر کشور در حوزه ساختمان می‌باشد. علاوه بر این، در حال حاضر ساختمان‌ها همگام با تکنولوژی روز پیش می‌روند و سال‌هاست که هوشمندسازی ساختمان‌ها آغاز شده و روز به روز پیشرفت می‌کند. در این مسیر تا کنون به ساختمان‌های صفر انرژی و پس از آن ساختمان‌های انرژی پلاس رسیده‌ایم که در آن‌ها ساختمان خود تولیدکننده انرژی مصرفی خود و حتی بیش از آن می‌باشد. در همین راستا می‌توان به جای تولید انرژی، آن را بازیافت و یا به عبارتی بازتولید کرد.

تا کنون بسیاری از مصالح هوشمند در حوزه ساختمان به کار رفته‌اند که با روش‌هایی جدید و نوآورانه، در مصرف انرژی صرفه‌جویی و یا به نحوی از هدررفت آن جلوگیری می‌کنند. اما، چه می‌شود اگر بتوان ساز و کاری تعریف کرد که علاوه بر این موارد، انرژی مصرف شده در ساختمان را بازتولید کرده و دوباره استفاده کرد؟

از روش‌هایی که می‌توان به وسیله آن انرژی را به صورت دیگری تبدیل کرد، استفاده از مصالح هوشمند با اثر پیزوالکتریک است. اثر پیزوالکتریک، خاصیت موادی است که می‌توانند در یک سیستم طراحی شده، انرژی مکانیکی را به الکتریسیته تبدیل کنند (Anshu Jain, 2015: 1581). می‌توان با این روش از صوت، حرکت افراد و راه رفتن، امواج، جریان هوا و ... در ساختمان انرژی الکتریکی تولید کرد و با این کار، هم نیاز ساختمان به تولید انرژی را کاهش داد و هم از اتلاف انرژی موجود در آن جلوگیری کرد. با استفاده از خاصیت مواد پیزوالکتریک کف‌پوش‌هایی ساخته شده‌اند که قابلیت تولید الکتریسیته از گام‌های دریافتی کاربران را دارند (شریفی و ظاهر، ۱۳۹۱). برای این منظور، ساختمان‌های عمومی با مراجعه‌کنندگان زیاد مناسب‌ترند چون انرژی‌هایی که قابلیت تبدیل دارند در این مکان‌ها بیش‌تر است. استفاده از این تکنولوژی در استادیوم‌ها از این حیث قابل توجه است که غالباً دارای تعداد کاربران زیادی است و انواع صورت‌های انرژی در این مکان‌ها به مقدار مناسبی وجود دارد که در نتیجه امکان بیش‌تری برای بهره‌برداری به ما می‌دهد. اما از مسائل مهم میزان الکتریسیته به دست آمده و در واقع اثربخشی مناسب این کفپوش‌ها است که در پژوهش حاضر، به آن پرداخته می‌شود.

۲- سوالات تحقیق

- نحوه استفاده از مواد پیزوالکتریک در ورزشگاه‌ها به چه صورت است؟
- میزان الکتریسیته تولید شده توسط کفپوش‌های مبدل انرژی در یک استادیوم فوتبال چقدر است؟
- با استفاده از این روش تولید الکتریسیته، تا چه میزان از مصارف ورزشگاه را می‌توان تامین کرد؟
- بهترین مکان برای نصب این تجهیزات در کدام قسمت‌های ورزشگاه می‌باشد؟

۳- روش تحقیق

روش تحقیق به‌صورت ترکیبی شامل کتابخانه‌ای تحلیل کمّی و کیفی می‌باشد. ابتدا نوع مصالح مورد نظر معرفی و انواع پوشش‌های کف که دارای این اثر می‌باشند و میزان بازدهی آن‌ها بررسی شد و ۴ نمونه از تایل‌های مولد که از محصولات پربازده تر و جدیدتر هستند انتخاب شدند. برای محاسبه گام‌های دریافت شده توسط کاربران، ۳ بخش از یک استادیوم درنظر گرفته شد: ورودی‌ها، جایگاه تماشاگران، زمین بازی. در هر بخش تعداد گام‌های دریافتی در یک رویداد ورزشی محاسبه شده و با توجه به بازده کاشی‌ها، میزان الکتریسیته تولید شده از هر بخش محاسبه شد. در ادامه، مجموع انرژی به دست آمده با میزان میانگین مصرف استادیوم‌های فوتبال مقایسه شد و درصد بهره‌وری این تایل‌ها در استادیوم به دست آمد. علاوه بر این، با توجه به نسبت میان تایل‌های مصرفی در هر بخش و مقدار الکتریسیته تولید شده از آن، قسمت‌های بهینه‌تر برای نصب این تایل‌ها معرفی شدند. پس از آن، با بررسی نقشه‌های حرارتی بازیکنان و رفتار تماشاگران، پرترددترین مناطق زمین بازی و سکوهای تماشاگران برای برداشت انرژی بیش‌تر معرفی شدند.

۴- مصالح هوشمند و پیزوالکتریک‌ها

با پیشرفت سریع تکنولوژی هر روز به امکانات و کاربردهای مصالح اضافه می‌شود. با گذر زمان هر روز از مصالح سنتی مثل آجر و سفال و مصالح مدرن مثل بتن و فولاد، به سمت مصالحی می‌رویم که می‌توانند دما را حس کنند، به نور خورشید واکنش دهند، گرما را ذخیره و حساب شده تحویل دهند، از نور خورشید انرژی تولید کنند و امکاناتی دیگر از این قبیل (گرجی مهلبانی و حاج ابوطالبی, ۲۰۰۱: ۶۸).

به طور کلی مصالح ساختمانی موجود اعم از سنتی، طبیعی و مصنوعی با توجه به خصوصیات آن‌ها از جمله: نمود ظاهری، بافت، ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی، فیزیکی و... طبقه‌بندی می‌شوند. اما در طبقه‌بندی مصالح هوشمند علاوه بر درنظر داشتن مشخصه‌های فوق، خواص دیگری که به طور ویژه به تمییز دادن مصالح هوشمند از مصالح سنتی مربوط می‌شود نیز لحاظ شده است. در واقع طبقه‌بندی پیشنهادی مصالح هوشمند بر پایه سه خاصیت زیر ارائه شده‌اند.

الف) مصالح هوشمند دارای قابلیت تغییر خواص درونی:

- مصالح هوشمند تغییر شکل دهنده
- مصالح هوشمند تغییر رنگ دهنده
- مصالح هوشمند تغییر پیوند دهنده

ب) مصالح هوشمند دارای قابلیت مبادله انرژی:

- مصالح هوشمند ساطع کننده نور
- مصالح هوشمند تولید کننده الکتریسیته
- مصالح هوشمند ذخیره کننده انرژی

ج) مصالح هوشمند دارای قابلیت تغییر و مبادله مواد درونی:

این مصالح می‌توانند مواد را در فرم مولکول و به شکل گاز، مایع یا جامد با فرایندهای فیزیکی یا شیمیایی، در خود محصور و یا اینکه آزاد کنند. عملکرد آن ها به صورتی است که با قرار گرفتن در برابر انواع گاز، بخار آب، آب و یا حتی محلول‌های آبدار، با چسباندن آن‌ها به سطح داخلی خود و یا اضافه کردن آن‌ها به حجم خود واکنش نشان می دهند. (Ritter, 2007: 9)

مصالح هوشمند تغییرشکل دهنده، دارای قابلیت تغییر خواص درونی خود می‌باشند و در پاسخ به محرکات خارجی تغییراتی در شکل و ابعاد خود ایجاد می‌کنند که این تغییرات بستگی به نوع توزیع و آرایش ترکیبات درونی آن‌ها دارد . هم اکنون مصالح زیادی با این ویژگی در دسترس است اما از پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به مصالح هوشمند دما واکنشی[1]، الکترو واکنشی[2]، شیمی واکنشی[3] و پیزوالکتریک[4] اشاره نمود که در حال حاضر بیشترین توجه را در زمینه معماری به خود معطوف نموده اند (گرجی مهلبانی و حاج ابوطالبی, ۲۰۰۱: ۶۹).

مواد پیزوالکتریک از جمله مواد و مصالح پنهانی هستند که در اطراف ما فراوان وجود دارند، هرچند که برای عده کثیری ناشناخته‌اند. تلفن‌های همراه، الکترونیک خودرو، تکنولوژی پزشکی و سیستم‌های صنعتی فقط چند نمونه از زمینه‌هایی است که اجزای پیزوالکتریک در آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. پژواک‌نگاری برای دریافت تصاویری از کودک در رحم مادر با پیزوالکتریسیته ممکن می‌شود. حتی در سنسور پارکینگ در عقب خودروی ما نیز پیزوالکتریک وجود دارد (Holterman & Groen, 2013:3).

دلیل کاربرد فراوان مواد پیزوالکتریک چیست؟ این به دلیل طبیعتِ خود ماده است که می‌تواند انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند و برعکس. اثر پیزوالکتریک مستقیم هنگامی است که این مواد تحت فشار مکانیکی قرار می‌گیرند و در اثر آن، بارِ الکتریکی متناسب با آن نیرو ایجاد می‌کنند. اثر معکوس پیزوالکتریک هنگامی است که این مواد تحت تاثیر یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرند، که در اثر آن در ماده تنش (تغییر شکل) ایجاد می‌شود.

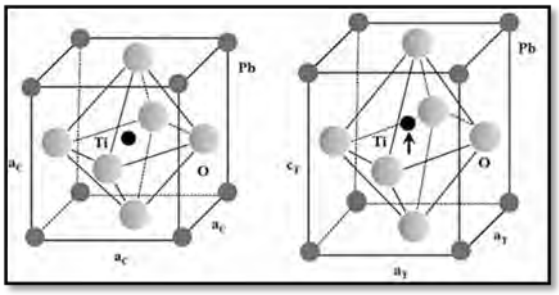
اثر پیزوالکتریک در کریستال‌هایی روی می‌دهد که بلور آن‌ها دارای تقارن است. کریستال‌ها از یون‌های مثبت و منفی ساخته شده‌اند و به همین دلیل میان آن‌ها نیروهای جاذبه و دافعه‌ای وجود دارد که به آن دو قطبی می‌گویند و در حالت طبیعی در تعادل‌اند. اما با اعمال نیروی مکانیکی شکل متقارن بلورها از بین رفته و فاصله‌ی بین بارهای مثبت و منفی تغییر می‌کند (تصویر۱). این تغییر فاصله حالت تعادل را از بین برده و در نتیجه این کنش‌ها، میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. در واقع، الکتریسیته همان اختلاف پتانسیلی است که بین بارهای موجود در این مواد به وجود می‌آید و علت آن فشار دینامیکی است. برای مثال، یک سانتی‌متر مکعب از کوارتز با ۲ کیلونیوتن نیروی اعمال شده می‌تواند اختلاف پتانسیلی برابر با ۱۲۵۰۰ ولت ایجاد کند (Ledoux, 2011:8).

1 Thermostrictive

2 Electroactive

3 Chemostrictive

4 Piezoelectric



تصویر (۱) : ساختار بلور پیزوالکتریک و اعمال نیرو (Ledoux, 2011:8).

از نمونه‌های کاربرد پیزوالکتریک در صنعت می‌توان به سنسورهای ضربه‌گیر موتور، عمق‌سنج و تجهیزات سونار و تجهیزات تنظیم نوری اشاره کرد. همچنین استفاده از این مواد در پزشکی رو به افزایش است از جمله استفاده از پیزوالکتریک به عنوان ژنراتور با قراردادن در تیشرت‌ها و سایر پوشش‌ها و استفاده از حرکات انسان برای تجهیزات پزشکی داخل بدن مانند باتری‌های ضربان ساز قلب، پمپ‌های انسولین و .... از پیزوالکتریک در بسیاری از تجهیزات دیگر نیز استفاده می‌شود. از جمله در پرینترهای پیزوالکتریک، مسواک‌های الکترونیکی، تلفن‌های همراه، انژکتورهای دیزلی، فندک‌ها، مبدل‌های فراصوت، سنسورهای ارتعاشی، میکروروباتیک‌ها و میکروهواپیماها، تجهیزات انتقال صدا مانند میکروفن، اسپیکرو .... به نوعی از پیزو الکتریک استفاده شده است (فخار, مهنام و ادریسی، ۱۳۹۲) و (APC International, 2015).

۴-۱- کاربرد مواد پیزوالکتریک در ساختمان‌ها

پیزوالکتریک‌ها بسیار مورد توجه معماران قرار گرفته‌اند زیرا استفاده از آن‌ها در روش‌های نسبتاً ساده برای تولید انرژی الکتریکی از ارتعاشات ناشی از باد و یا تردد مراجعه‌کنندگان در ساختمان‌ها بسیار رو به رشد بوده است (شریفی و ظاهر، ۱۳۹۱). با تلاش محققین این امکان ایجاد شده است تا از حرکات انسانی در تاسیسات شهری نظیر ایستگاه‌های قطار و پیاده‌روها، جاده‌ها، باشگاه‌های ورزشی و سایر محل‌های پرازدحام، انرژیِ برق تولید شود (یاوری گهر و آصفی پور، ۱۳۸۸). از موارد دیگر استفاده از پیزوالکتریک، در کنترل ارتعاشات سازه‌ها (پل‌ها، تیرهای طره‌ای و ...) است که به این روش کنترل فعال گفته می‌شود و از مزایای آن دقت و نامحدود بودن منبع انرژی است.

در پژوهشی استفاده از حس‌گرهای پیزوالکتریک در سیستم حفاظتی زندان‌ها بیان شده است. حس‌گرهای حساس به فشار و بسیار نازک در کف‌پوش‌های ایستگاه پلیسی در فنلاند نصب شده است که اگر زندانیان از محدوده تعریف شده خارج شوند، سیستم هشداردهنده به مراکز مخابراتی و ایستگاه‌های پلیس هشدار می‌دهد (موسوی و آقازاده, ۱۳۹۳).

همچنین با بکار بردن عملگرهای پیزوالکتریک در پای ستون‌ها و واکنش آن‌ها هنگام لرزش ساختمان می‌توان پاسخ‌های لرزه‌ای بنا را کاهش داد (Fallah & Ebrahimnejad, 2013: 450).

. در پژوهش دیگری، با اتصال پیزوالکتریک به یک تیر، میزان انرژی به دست آمده از ارتعاشات مکانیکی محاسبه شده و در صورت نیاز تیر تقویت می‌شود (Ledoux, 2011:11). همچنین با قرار دادن پیزوالکتریک در نقطه میانی پل دو سرمفصل می‌توان ارتعاشات پل‌ها را تبدیل به الکتریسیته کرد (کریمی، تیکنی و ضیائی راد، ۱۳۹۵: ۱۰۷). و یا از نیروی باد و ارتعاشات ناشی از آن بدون نیاز به توربین، برق تولید کرد (Wu, Wang & Xie, 2013: 25)

در پژوهشی دیگر نشان داده شد که با کاربرد صفحات پیزوالکتریک در پله‌های ساختمان، امکان برداشت انرژی افراد وجود دارد که به مرور افزایش پیدا کرده و می‌تواند در تامین بخشی از انرژی ساختمان بکار رود (موسوی و آقازاده, ۱۳۹۳). برداشت انرژی مکانیکی مصرفی بر اساس اثر پیزوالکتریک توسعه یافته و تا کنون در زمینه‌های مختلفی بررسی شده است. از جمله ارتعاش کمک‌فنرهای وسایل‌نقلیه، سازه‌های مهندسی، ریل قطارها، جاده‌ها، امواج اقیانوس، جریان‌ها و حرکات انسان (Kong et al., 2014, 21) تولید انرژی از منابع انرژی موجود در ساختمان‌ها همانند ارتعاشات ایجاد شده در مناطق بادخیز، انرژی امواج صوت در مکان‌های ورزشی، تردد افراد در پیاده‌روها و نیز در ساختمان‌های پررفت‌وآمد همانند موزه‌ها، ادارات، مراکز فرهنگی، مساجد و ورزشگاه‌ها، می‌تواند سهم عمده‌ای در تامین انرژی آن‌ها به عهده گیرد.

۴-۲- تایل‌های مولد الکتریسیته

به منظور سهولت در استفاده و نصب، شرکت‌هایی در این زمینه به صنعتی کردن این فناوری روی آورده و کف‌پوش‌های مبدل انرژی را به تولید انبوه رسانده‌اند. سهولت در نصب تجهیزات و مدارات، طول عمر ۵ تا ۲۰ سال، مقاومت در برابر رطوبت و شرایط جوی نامناسب، افزایش بازدهی، تنوع در روکش‌ها و سفارشی‌سازی این کف‌پوش‌ها از جمله ویژگی‌هایی ست که باعث شد از این تکنولوژی استقبال بیش‌تری شود. از جمله شرکت‌هایی که به تولید انبوه و نصب این کاشی‌ها پرداختند می‌توان به شرکت پیوژن[1]، انرژی فلورز[2] و تریولت[3] اشاره کرد.

هنگامی‌که روی ماژول‌های کف گام گذاشته می‌شود مقداری خم می‌شوند. در هر کاشی سیستم الکترومکانیکی قرار دارد که حرکت ناچیز عمودی ایجاد شده توسط فرد را به یک حرکت چرخشی تبدیل کرده و ژنراتور را فعال می‌کند. این کاشی‌ها به‌صورت مدولار هستند و متصل کردن ۴۰ عدد از کاشی‌ها به شبکه می‌تواند بیش از ۱ کیلووات انرژی تولید کند. توان خروجی اسمی متداول هر مدول انرژی فلورز برای گام‌های پیوسته توسط یک فرد بین ۱ تا ۱۰ وات است. این شرکت تا کنون بیش از ۲۵۰ پروژه در نقاط مختلف دنیا اجرا کرده است و به طور کلی ۵۰۱۲ میلیون ژول انرژی برداشت کرده است (Energy-Floors, 2016) و (Pavegen, n. d.). شرکت پیوژن بیش از ۱۵۰ پروژه در سراسر دنیا را در بخش‌های مختلف از جمله ایستگاه‌های قطار، مراکز خرید، فرودگاه‌ها و فضاهای عمومی به اتمام رسانده است. نصب تجهیزات در نقاط مختلف دنیا باعث شده تا مردم ارزش بیش‌تری برای انرژی تولیدی‌شان قائل شوند. میزان خروجی اسمی هر ماژول به ازای هر گام ۵ وات و در نمونه‌های اصلاح شده تا ۸ وات می‌رسد (Pavegen, n. d.).

با استفاده از کاشی‌های مبدل انرژی در مکان‌های پرتردد و مناطقی که کاربران تحرک زیادی دارند انرژی بیش‌تری تولید می‌شود. مثلا ورزشگاه‌ها که دارای کابران زیاد، مقیاس وسیع، تحرک فراوانی است. از بین ورزش‌های مختلف بدیهی است که ورزش‌های گروهی مثل فوتبال که تعداد بازیکنان حاضر در زمین بیش‌تر باشد تولید انرژی بیش‌تری دارند. این ورزش همچنین بیش‌تر مورد استقبال مردم قرار می‌گیرد.

۵- انرژی به‌دست‌آمده از سطوح مختلف در استادیوم‌های فوتبال

در یک استادیوم ۳ بخش برای برداشت الکتریسیته مورد بررسی قرار گرفته است: زمین بازی، سکوهای تماشاگران، ورودی‌ها و مسیرهای تردد تماشاگران. تایل‌هایی که برای این بررسی انتخاب شده‌اند ۲ نمونه از شرکت انرژی فلورز با توان خروجی ۱۵ و دیگری ۵ الی ۱۰ وات و ۲ نمونه از شرکت پیوژن با توان ۵ و ۸ وات است. ابعاد تایل‌های مورد استفاده در ورزشگاه ۵۰ در۵۰ سانتی‌متر می‌باشد (Energy-Floors, 2016).

۵-۱- انرژی تولید شده توسط بازیکنان فوتبال در زمین

ابعاد زمین فوتبال به طور میانگین ۱۰۵ در ۷۰ متر است. با توجه به ابعاد کاشی‌ها (۵۰ در۵۰ سانتی‌متر) برای پوشاندن زمین به تعداد ۲۹۴۰۰ کاشی نیاز است. با توجه به اینکه کاشی‌های مولد انرژی با هر گام تولید انرژی می‌کنند، برای به دست آوردن انرژی تولید شده توسط بازیکنان ابتدا باید تعداد گام‌هایی که توسط آن‌ها طی می‌شود را محاسبه کرد. برای به دست آوردن تعداد گام‌های یک بازیکن، اول باید بدانیم که او در یک بازی چه مسافتی را طی می‌کند. این میزان با توجه به جایگاه هر بازیکن در زمین متفاوت است اما مقدار متوسط آن برای هر بازیکن در هر بازی به طور میانگین ۱۱ کیلومتر یا ۷ مایل است (Fox, 2016). حال باید دانست که این مسافت با چند گام طی می‌شود؟ اگر بخواهیم در حالت عادی این مقدار را به دست آوریم هر گام بین ۶۲,۵ تا ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد (Neufert & Thackara, 1980: 17) اما نکته اینجاست که این مسافت مثل یک مسیر پیاده‌روی معمولی نیست؛ بلکه هر بازیکن در هر بازی حالت‌های مختلف از جمله راه رفتن، دویدن با سرعت کم، دویدن با حداکثر سرعت، چرخش، پرش و... را انجام می‌دهد که هر کدام از این فعالیت‌ها در سرعت‌های متفاوتی انجام می‌شود. علاوه بر سرعت، مدت زمان این فعالیت‌ها نیز متفاوت است. لازم است برای اینکه سرعت میانگین را بیابیم از سرعت متوسط یا میانگین وزنی استفاده کنیم

1 Pavegen

2 SEF: Sustainable Energy Floors

3 Treevolt

یعنی میانگین سرعت‌های مختلف را با توجه به مدت زمان طی شده با همان سرعت محاسبه کنیم. میانگین سرعت بازیکنان فوتبال بین ۶ تا ۸ کیلومتر بر ساعت است که به طور میانگین، ۷ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته می‌شود (Verheijen, 1998: 17).

در سال ۲۰۰۸ پژوهشی درباره تعداد گام‌ها در سرعت‌های مختلف انجام شد (Hoeger, Bond, Ransdell, Shimon, & Merugu, 2008: 15). این میزان با توجه به جنسیت، قد و میزان سرعت افراد متفاوت است. باتوجه به اینکه میانگین قد فوتبالیست‌ها ۱۸۱٫۶۸ سانتی‌متر بوده، و با سرعت متوسط ۷ کیلومتر بر ساعت می دوند، هر مایل را در حدود ۱۴ دقیقه طی می‌کنند (Fifa, 2014) طبق یافته های این پژوهشگر تعداد گام‌های این ورزشکار در یک مایل ۱۸۱۷ گام است. که در کل بازی (هر بازیکن ۷ مایل طی می‌کند) تعداد گام‌های طی شده توسط هر بازیکن، ۱۲۷۱۹ گام می‌شود. با حضور ۲ تیم ۱۱ نفره در زمین تعداد بازیکنان ۲۲ نفر می‌شود. علاوه بر بازیکنان، حضور یک داور داخل زمین مسابقه الزامی ست. با توجه به اینکه میزان دوندگی داور در هر بازی ۱۱ کیلومتر تخمین زده شده است (Di Salvo, Carmont, & Maffulli, 2011) پس می‌توان داور را جز دوندگان زمین محسوب کرد جدول (۱). طبق این جدول در هر بازی توسط بازیکنان ۲۹۲،۵۳۷ گام دریافت می‌شود.

با توجه به اینکه ماژول‌های مختلف میزان تولید انرژیِ متفاوتی دارند، با توجه به نوع آن‌ها انرژی تولید شده در جدول (۲) محاسبه شده است.

البته باید توجه داشت که این تعداد گام فقط در یک بازه ۹۰ دقیقه‌ای است و گاهی بازی‌ها بیش‌تر به طول می‌انجامد. علاوه بر این، بازیکنان حدود ۱۵ دقیقه قبل از شروع بازی در زمین حضور پیدا کرده و به گرم کردن می‌پردازند. به جز موارد گفته شده باید این را هم در نظر بگیریم که در یک استادیوم علاوه بر مسابقات، تمرینات یک باشگاه هم انجام می‌شود که ساعات تمرین بسیار بیش‌تر از ۹۰ دقیقه یک مسابقه است و در تمام این حالات باز هم می‌توان از زمین بازی انرژی دریافت کنیم.

جدول (۱): تعداد گام‌های دریافت شده از همه افراد حاضر در زمین در یک بازی

تعداد گام‌های هر نفر در یک مایل	۱،۸۱۷
تعداد گام‌های هر نفر در طول بازی	۱،۸۱۷× ۷ = ۱۲،۷۱۹
تعداد تیم‌ها	۲
تعداد اعضای هر تیم	۱۱
مجموع اعضا بعلاوه داور	۲۳
تعداد گام‌های هر دوتیم در کل بازی	۱۲،۷۱۹× ۲۳ =۲۹۲،۵۳۷

جدول (۲): میزان الکتریسیته تولید شده از زمین فوتبال توسط تایل‌های مبدل انرژی

نوع ماژول	توان (watt)	میانگین توان (watt)	میزان تولید انرژی توسط بازیکنان		
			watt	kw	mw
SEF	۱۰-۱	۵	۲۹۲،۵۳۷× ۵ =۱،۴۶۲،۶۸۵	۱،۴۶۲،۷	۱،۵
	۱۵	۱۵	۲۹۲،۵۳۷× ۱۵ =۴،۳۸۸،۰۵۵	۴،۳۸۸	۴،۴
Pavegen	۸	۸	۲۹۲،۵۳۷× ۸ =۲،۳۴۰،۲۹۶	۲،۳۴۰،۲	۲،۳
	۵	۵	۲۹۲،۵۳۷× ۵ =۱،۴۶۲،۶۸۵	۱،۴۶۲،۷	۱،۵

۵-۲- انرژی تولید شده از هیاهوی تماشاگران

شاید بارها شاهد این بوده‌اید که در برخی مسابقات فوتبال، استادیوم‌ها حتی پیش از شروع مسابقه، مملو از جمعیت می‌شود. آن‌ها مدام و حتی پیش از شروع بازی تا پایان آن و حتی پس از برنده شدن یک تیم، در ورزشگاه حضور دارند و با هیاهوی بسیار تیمشان را حمایت می‌کنند. حال که از ۲۳ نفر حاضر در زمین حدود ۱،۵ مگاوات انرژی تولید می‌شود، از هزاران نفر دیگر حاضر در ورزشگاه چه انرژی عظیمی می‌توان دریافت کرد؟

برای به دست آوردن این مقدار باید میزان ایستادن و نشستن، پریدن و جست‌وخیز کردن تماشاگران را تخمین زد که البته تا حدودی غیرممکن است. برای به دست آوردن یک مقدار تقریبی از انرژی تولیدی تماشاگران به یک نمونه اجرا شده اشاره می‌شود. در سال۲۰۱۴ انرژی حاصل از تماشاگران با استفاده از بسترهای انرژی پایدار[1] در ورزشگاه دکایپ روتردام جمع‌آوری شد. آن‌ها با به کار گذاشتن ۴،۵ مترمربع کاشی در یکی از ورودی‌ها و ۲۰ عدد کاشی در مقابل یک ردیف از صندلی‌ها، ۵۰،۰۰۰ ژول انرژی دریافت کردند.(تصویر ۲و ۳.) لازم است که میزان انرژی دریافت شده از ورودی را به‌صورت مجزا از انرژی دریافت شده از داخل ورزشگاه محاسبه شود. این وزشگاه، ورزشگاه خانگی تیم فاینورد از لیگ هلند است. میانگین حضور تماشاچیان در مسابقات این تیم در سال ۲۰۱۴، ۴۵،۴۱۹ نفر است (Transfermarkt, 2016). با توجه به اینکه ورودی مورد نظر از ورودی‌های اصلی است، می‌توان

[1] SEF: Sustainable Energy Floors

در نظر گرفت حداقل ۳۳ درصد جمعیت از این درگاه وارد می‌شود که به ازای جمعیت حاضر در ورزشگاه این مقدار حدود ۱۵،۰۰۰ نفر به دست می‌آید. در مقابل ورودی ذکر شده ۸ ماژول به‌صورت ۲ آرایه چهارتایی کار گذاشته شدند. تصویر ۴. (Energy-Floors, 2016).

تصویر (۲): تایل‌های مولد انرژی در سکوی تماشاگران ورزشگاه دکایپ

تصویر (۳): تایل‌های مولد انرژی نصب شده در ورودی ورزشگاه دکایپ

تصویر (۴): آرایش تایل‌ها در ورودی

با توجه به مکان نصب کاشی‌ها نسبت به درگاه، می‌توان در نظرگرفت که به طور میانگین دو سوم جمعیت از روی کاشی‌ها عبور می‌کنند. از این قرار ۱۰ هزار نفر از روی کاشی‌ها رد شدند. بازده این کاشی‌ها ۲ الی ۲۰ ژول است که این مقدار بستگی به وزن و شدت ضربه وارده دارد. چون افراد در حال پیاده روی با سرعت معمولی هستند، از هر گام ۲ ژول انرژی تولید می‌شود. اگر از هر نفر ۲ یا ۳ گام دریافت شود، ۲۴،۵۰۰ گام دریافت شده که با احتساب همین مقدار در خروج، ۴۹ هزار ژول انرژی از ورودی به دست آمده است. در نتیجه از ۵۰ هزار ژول انرژی تولیدی، ۱۰۰۰ ژول باقیمانده از سکوی تماشاگرها تولید شده است. این هزار ژول تولید شده توسط ۲۰ تایل که هر کدام در مقابل یک تماشاچی نصب شده بود به دست آمده است، یعنی از هر تایل ۵۰ ژول انرژی تولید شده است. با توجه به اینکه ضربه‌ها شدت زیادی نداشتند به‌صورت تخمینی حدود ۱۰ تا ۲۵ ضربه از هر تماشاچی دریافت شده است. با توجه به مطالب گفته شده از هر تماشاچی هنگام تماشای بازی، ۱۰ الی ۲۵ گام دریافت می‌شود. اگر بتوانیم به ازای هر تماشاگر یک تایل نصب کنیم، با در نظر گرفتن اینکه میزان حضور تماشاگران در ورزشگاه ۴۵،۴۱۹ نفر است، از تماشاچیان حداقل ۴۵۴،۱۹۰ گام و حداکثر ۱،۱۳۵،۴۷۵ گام دریافت می‌شود. جدول (۳). طبق این جدول انرژی تولید شده از تماشاگران در ورزشگاه دکایپ، ورزشگاه خانگی تیم فاینورد هلند میزان ۳،۹۷۴ کیلووات است. اگر بخواهیم میانگین میزان انرژی مسابقات فوتبال را به طور کلی تخمین بزنیم می‌توان میانگین حضور تماشاچیان در لیگ‌های هر کشور یا مسابقات قاره‌ای و یا مسابقات جهانی (مانند المپیک و جام جهانی) را مد نظر قرار داد. دو نمونه به عنوان مثال در جدول (۴) ارائه شده است (UEFA League, 2016), (Fifa, 2014).

جدول (۳): میانگین الکتریسیته تولید شده از تماشاگران در ورزشگاه فوتبال دکایپ

نوع کاشی	نام	Pavegen,SEF	SEF	Pavegen (V3)
	بازده	۵	۱۵	۸
تعداد گام‌های دریافتی از هر نفر	حداقل	۱۰		
	حداکثر	۲۵		
خروجی به ازای یک نفر (watt)	حداقل	۵۰	۱۵۰	۸۰
	حداکثر	۱۲۵	۳۷۵	۲۰۰
تعداد کل تماشاگران		۴۵،۴۱۹		
انرژی تولید شده از کل تماشاگران (kw)	حداقل	۲،۲۷۱	۶،۸۱۳	۳،۶۳۳،۵
	حداکثر	۵،۶۷۷	۱۷،۰۳۲	۹،۰۸۴
میانگین (kw)		۳،۹۷۴	۱۱،۹۲۲،۵	۶،۳۴۴

جدول (۴): میانگین الکتریسیته تولید شده از تماشاگران در مسابقات فوتبال

مسابقات	لیگ قهرمانان اروپا ۲۰۱۶،۱۷	جام جهانی ۲۰۱۴ برزیل
میانگین تماشاگران	۴۱،۸۸۷	۵۳،۵۹۲
میانگین انرژی تولید شده از هر نفر (watt)	۸۷،۵	
انرژی کل(kw)	۳،۶۶۵	۴،۶۷۲

۵-۳- انرژی تولید شده از تردد کاربران

علاوه بر سکوهای داخل ورزشگاه، مسیرهای تردد آن‌ها نیز منابع خوبی برای دریافت انرژی است. حتی بسیار بهینه تر هم می‌باشد چون در مساحت کمتر، حجم بالاتری از تردد افراد صورت می‌گیرد. برای این منظور می‌توان جلوی درگاه‌ها، مسیرهای عبوری تماشاگران، راه پله‌ها و... ماژول‌ها را نصب کرد. به عنوان مثال، اگر در مقابل هر ورودی ۶ ماژول به‌صورت یک آرایه ۲ در۳ نصب شود از هر نفر می‌توان ۲ یا ۳ گام هنگام ورود و به همان مقدار هنگام خروج به دست آورد. یعنی از هر نفر به طور میانگین ۵ گام. اگر در راهروها و مسیر تردد هم به همین مقدار از سطوح مبدل نصب گردد، حداقل ۵ گام دیگر از هر نفر دریافت می‌شود. برای ۲ مثال بالا، میزان انرژی به دست آمده محاسبه شده است جدول (۵).

جدول (۵): میانگین الکتریسیته تولید شده از تماشاگران در ورزشگاه فوتبال دکایپ

نوع کاشی	نام	Pavegen, SEF	SEF	Pavegen (V3)
	بازده	۵	۱۵	۸
تعداد گام‌های دریافتی از هر نفر		۱۰		
خروجی به ازای یک نفر (watt)		۵۰	۱۵۰	۸۰
جام باشگاه‌های اروپا	تعداد افراد	۴۱،۸۸۷		
	انرژی تولیدی(kw)	۲،۰۹۴	۶،۲۸۳	۳،۳۵۱
جام جهانی برزیل	تعداد افراد	۵۳،۵۹۲		
	انرژی تولیدی(kw)	۲،۶۸۰	۸،۰۳۹	۴،۲۸۷

اگر مانند ورزشگاه دکایپ تعداد ورودی‌های ورزشگاه ۷ عدد و مسیرهای دسترسی تماشاگران به سکوها ۱۰ مسیر باشد، تعداد ماژول‌های استفاده شده در ورودی‌ها ۴۲ و در مسیرها ۶۰ عدد است که در مجموع، ۱۰۲ عدد کاشی نصب می‌شود. مزیت تولید انرژی از مسیرها و ورودی، این است که تعداد تایل‌های مورد استفاده کمتر از خود زمین بازی و سکوها است ولی تولید انرژی آن تفاوت زیادی با آن بخش‌ها ندارد.

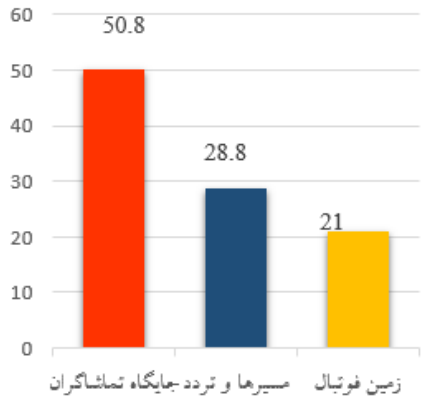
۵-۴- یافته ها

با توجه به مطالب فوق، انرژی تولید شده برای یک ورزشگاه ۴۰،۰۰۰ نفری و با استفاده از ماژول‌هایی با توان خروجی ۵ وات، به تفکیک و در مجموع، در جدول (۶و۷) گردآوری شده است.

مشاهده می‌شود که بیش‌ترین میزان انرژی از سکوهای تماشاگران و سپس از تردد آن‌ها دریافت می‌شود، و نشان‌دهنده این است که تعداد افراد مشارکت‌کننده بیش از نوع فعالیت آن‌ها موثر است. بهترین مکان نصب کاشی‌ها نیز در مسیرهای تردد و ورودی‌ها است که میزان تولید انرژی به ازای هر کاشی در آن‌ها بیش‌تر است. نمودار (۱و۲).

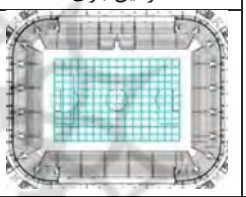
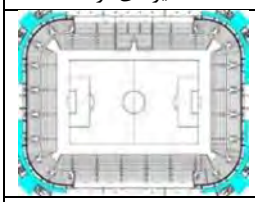
جدول (۶): میزان الکتریسیته تولید شده از استادیوم فوتبال در یک بازی

بخش‌های دارای مبدل	تعداد ماژول‌ها	میزان انرژی تولیدی		
		kw	درصد	هر ماژول(watt)
زمین فوتبال	۲۹،۴۰۰	۱،۴۶۳	۲۱	۱،۴۶۳،۰۰۰÷۲۹،۴۰۰ =۴۹،۸
جایگاه تماشاگران	۴۰،۰۰۰	۳،۵۰۰	۵۰،۲	۳،۵۰۰،۰۰۰÷۴۰،۰۰۰ =۸۷،۵
مسیرهای تردد و ورودی	۱۰۲	۲،۰۰۰	۲۸،۸	۲،۰۰۰،۰۰۰÷۱۰۲ =۱۹،۶۰۷
مجموع	۶۹،۵۰۲	۶،۹۶۳	۱۰۰	---



نمودار (۱): درصد تاثیر بخش‌های مختلف استادیوم در تولید الکتریسیته

جدول (۷): میزان الکتریسیته تولیدی هر بخش و تعدادتایل‌های نصب شده

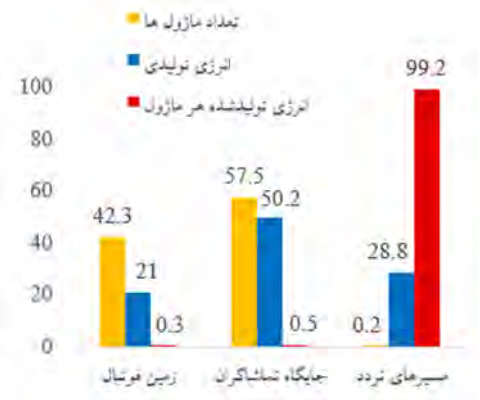
محل نصب تایل‌ها در استادیوم	زمین بازی	جایگاه تماشاگران	مسیرهای تردد
			
تعداد تایل‌ها	۲۹،۴۰۰	۴۰،۰۰۰	۱۰۲
الکتریسیته تولید شده (kw)	۱،۴۶۳	۳،۵۰۰	۲،۰۰۰
هزینه[1] (دلار)	۵،۸۸۰،۰۰۰	۸،۰۰۰،۰۰۰	۲۰،۴۰۰

البته باید به این نکته دقت کرد که مزیت تولید انرژی از زمین فوتبال این است که در ساعت‌های تمرین که معمولاً تماشاگری حضور ندارد و بسیار بیش‌تر از ساعت مسابقات است، تولید انرژی وجود دارد. یعنی با وجود نصب تجهیزات کمتر، انرژی بیش‌تری دریافت می‌شود. مزیت تولید انرژی از تماشاگران نیز این است که میزان تولید انرژی در بعضی رویدادها بسیار زیاد است و قابل چشم‌پوشی نیست. گذشته از آن کافی است میزان انرژی تولید شده به تفکیک تیم در تابلوهای ورزشگاه نمایش داده شود. این موضوع تبدیل به یک چالش میان هواداران شده و هنگامی‌که تماشاگران بدانند با ضربه زدن به زمین می‌توانند تولید انرژی کنند، برای این هدف بیش‌تر همکاری می‌کنند. یکی از مهم‌ترین اهداف توسعه این روشِ تولید انرژی، آگاهی افراد از تولید و مصرف انرژی به روش‌های پایدار است که باعث توسعه در روند تولید و مصرف انرژی‌های سبز می‌شود و همکاری این حجم عظیم از مردم در یک رویداد تولید انرژی آگاهی آن‌ها را افزایش داده، اهمیت تولید انرژی را درک کرده و آن‌ها را به سمت تولید و مصرف انرژی به‌صورت پایدار سوق می‌دهد (Cramm, El-Sherif, Lee, & Loughlin, 2011).

اما انرژی تولید شده در مجموع، چه میزان از نیازهای ورزشگاه را برآورده می‌کند؟ با توجه به مطالب گفته شده کل الکتریسیته تولیدی (در یک ورزشگاه ۴۰،۰۰۰ نفره و با استفاده از ماژول‌هایی با خروجی ۵ وات)، میزان ۶،۹۶۳ کیلووات یعنی حدود ۷ مگاوات است. در هر رویداد ورزشی، انرژی مصرفی برای تامین نیازهایی از جمله روشنایی بخش‌های مختلف ورزشگاه، گرمایش و سرمایش بخش‌های خدماتی، تهویه، پارکینگ، سیستم آبرسانی، سیستم اتوماسیون ساختمان، آشپزخانه و رستوران و ... استفاده می‌شود.

[1] هزینه نصب به ازای هر تایل، ۲۰۰ دلار محاسبه شده است (Manthorpe, 2016)

میزان الکتریسیته مصرفی در هر رویداد ورزشی بین ۵ تا ۱۰ مگاوات است (Dietrich & Melville, 2011). اگر این مقدار را به طور میانگین ۷٫۵ مگاوات درنظر بگیریم، با نصب این کاشی‌ها ۷ مگاوات از این الکتریسیته تامین می‌شود (نمودار ۳).



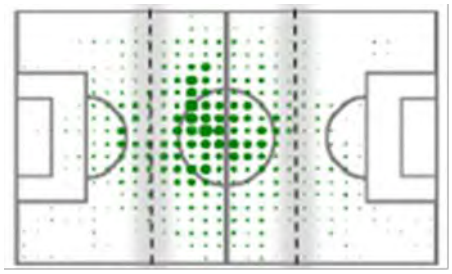
نمودار (۲): مقایسه تعداد ماژول‌ها و میزان الکتریسیته تولیدی (٪)

نمودار (۳): نسبت میزان کل انرژی تولیدی از ماژول‌ها به انرژی مورد نیاز ورزشگاه

در مرحله دوم، سکوهای تماشاگران و پس از آن زمین فوتبال در تولید انرژی موثرند. به عنوان مثال، در نمونه‌ی ذکر شده، ورزشگاه دکایپ، مشاهده شد که از ۵۰،۰۰۰ ژول انرژی دریافت شده تنها ۱۰۰۰ ژول از سکوها و ۴۹،۰۰۰ ژول از ورودی دریافت شد. با توجه به اینکه در ورزشگاه ۲۰ تایل و در ورودی ۸ تایل نصب شده بود، هر تایل ورودی ۶،۱۲۵ ژول و هر تایل موجود در ورزشگاه ۵۰ ژول انرژی تولید کرده است. این مطلب نشان دهنده آن است که تایل‌های ورودی تقریباً ۱۲۰ برابر بهینه‌تر هستند و با نصب تعداد کمتری از عناصر به نسبت داخل ورزشگاه، می‌توان انرژی بیش‌تری تولید کرد. البته این نتیجه بسیار منطقی هم به نظر می‌رسد چون تعداد گام‌های دریافتی هر ماژول در ورودی به طور میانگین ۳۰۰۰ گام و تعداد گام‌های دریافتی از داخل ورزشگاه تقریبا ۱۰ الی ۲۵ گام است. با این اوصاف، با نصب کاشی‌ها در مسیرهای پرتردد تماشاگران، به جای اینکه تنها گام‌های یک نفر را دریافت کنیم از هزاران نفر توسط تعداد معدودی کاشی انرژی بسیاری ذخیره می‌کنیم.

راهروها و مسیرهای دسترسی با توجه به هر ورزشگاه و تعداد و کیفیت خاصی دارند پس می‌توان در نظر گرفت که همین تعداد از ماژول‌ها را با توجه به ویژگی‌های دسترسی ورزشگاه در مسیرها باید نصب کرد. به عنوان مثال، تعداد ۱۰۰ ماژول با توجه به میزان تردد ورودی‌ها میان آن‌ها تقسیم می‌گردد. این نقاط کم‌هزینه‌ترین و پربازده‌ترین مناطق برای دریافت انرژی هستند. ماژول‌های نصب شده در سکوهای تماشاگران با توجه به ظرفیت ورزشگاه متغیر می‌باشد. برای پوشاندن سکوها مهم است که بدانیم در سکوهای تماشاگران کدام بخش‌ها معمولاً مورد اقبال قرار می‌گیرد و تقریباً در تمام مسابقات پر از جمعیت است. این بخش‌ها برای نصب ماژول‌ها اهمیت بیش‌تری دارند. علاوه بر این موضوع، هیاهوی تماشاگران هم در یک سطح نیست، بعضی از آن‌ها در جای خود آرام و قرار ندارند و بعضی دیگر، برعکس. در یک ورزشگاه معمولاً پرطرفدارترین مکان ضلع طولی زمین در طبقات پایین است. چون دید از این نقاط به زمین مناسب‌تر است. ورزشگاه ابتدا از نیمه ضلع طولی و سپس سمت کرنرها و در آخر پشت دروازه‌ها پر می‌گردد. سپس در طبقه بالا به همین صورت تا آخرین طبقه. به عنوان نمونه، مناطق مورد استقبال تماشاگران در تصویر شماره (۵) لکه‌گذاری شده است. حال اگر بخواهیم موثرترین نقاط زمین فوتبال را برای نصب مدول‌ها انتخاب کنیم، باید بخشی از زمین را انتخاب کنیم که بیش‌ترین تردد بازیکنان و اکثر وقایع بازی در آن قسمت‌ها اتفاق بیفتد. با بررسی نقشه‌های حرارتی از حضور بازیکنان در زمین، مشاهده می‌شود که یک سومِ میانی زمین بیش‌ترین حضور بازیکنان را داشته است. تصویر شماره (۶). (Fifa, 2014)

تصویر (۵): مناطق مورد استقبال تماشاگران در ورزشگاه



تصویر (۶): تردد بیشتر بازیکنان در میانه زمین

۶- بحث و نتیجه‌گیری

برای بازیافت انرژی جنبشی کاربران در یک استادیوم فوتبال می‌توان از موادی با اثر پیزوالکتریک استفاده کرد که تنش‌های مکانیکی را به پالس‌های الکتریکی تبدیل می‌کنند. ساده ترین روش استفاده، به کاربردن آن‌ها در زیر کف پوش نهایی است اما تایل‌هایی با همین خاصیت تولید شده اند که نصب و بهره برداری از این مواد را بسیار ساده کرده اند، طول عمر بیشتر، مقاومت در برابر رطوبت و فشار، روکش‌های متنوع و مقاوم، نصب آسان و بازدهی بالا از ویژگی‌های این محصولات است. در بخش‌های مختلف استادیوم می‌توان به عنوان پوشش نهایی و در زمین چمن می‌توان زیر لایه گیاهی از این تایل‌ها استفاده کرد. با استفاده از آن‌ها می‌توان از گام‌های کاربران میزان قابل توجهی الکتریسیته برداشت کرد.

برای محاسبه میزان الکتریسیته به دست آمده از گام‌ها، این مقدار در سه بخش محاسبه شد: انرژی به دست آمده از بازیکنان در زمین فوتبال، انرژی به دست آمده از تحرک تماشاگران در سکوها، انرژی ناشی از تردد تماشاگران هنگام ورود و خروج در راهروها و ورودی‌ها. به این وسیله در مجموع از یک ورزشگاه ۴۰،۰۰۰ نفره در هر رویداد ورزشی به میزان ۶,۹ مگاوات الکتریسیته تولید می‌شود که در مقایسه با میانگین مصرف الکتریسیته ورزشگاه‌ها در هر رویداد ورزشی به میزان ۵ تا ۱۰ مگاوات، حدود ۹۰ درصد از نیاز ورزشگاه تامین می‌شود. میزان تولید الکتریسیته در هر بخش به تفکیک و تعداد ماژول‌های نصب شده در هر بخش در جدول (۷) مشاهده می‌شود. همانطور که در جدول آمده است، بیشترین الکتریسیته به ترتیب از سکوهای تماشاگران، مسیرهای تردد و در آخر توسط زمین بازی به دست می‌آید ولی با در نظر گرفتن تعداد ماژول‌های مولد به کار رفته، بهینه ترین بخش‌ها در تولید انرژی به ترتیب مسیرهای تردد، جایگاه تماشاگران و در نهایت زمین فوتبال می‌باشند. به دلیل اینکه تعداد ماژول‌های مورد نیاز برای پوشاندن سکوهای تماشاگران و زمین چمن بسیار زیاد است می‌توان فقط بخش‌هایی را که پرتردد ترند مجهز کرد. با توجه به نقشه‌های حرارتی و تحلیل رفتار بازیکنان در زمین، مشخص شد که در طول بازی در یک سوم میانی زمین تحرک بیشتری وجود دارد. تصویر (۶).

در سکوهای تماشاگران هم باید به این نکته توجه داشت که در بسیاری از مسابقات از کل ظرفیت استادیوم استفاده نمی‌شود و همیشه صندلی‌های خالی وجود دارند پس می‌توان سکوهایی را مجهز کرد که برای تماشاگران در اولویت باشند و اغلب اوقات رزرو می‌شوند. دلیل اصلی این مزیت، دید مناسب تر به زمین بازی است. که این سکوها به ترتیب، اضلاع طولی زمین در طبقه اول و بعد از آن اضلاع طولی در طبقات بالا وگوشه‌ها و سکوهای پشت دروازه‌ها هستند. تصویر (۵). با توجه به نتایج به دست آمده نشان داده شد که استفاده از تایل های مولد الکتریسیته در تامین نیاز به انرژی استادیوم فوتبال بسیار موثر است. با تولید انرژی پاک از این روش در کنار موارد دیگر همچون برق خورشیدی و... می توان گام بلندی در زمینه پایداری و خودکفایی در انرژی ساختمان ها برداشت.

منابع

۱. شریفی، سینا و ظاهر، شیما، (۱۳۹۲)، «تدوین معماری پاسخگو درساختمان‌های پرتردد امکان تولیدانرژی الکتریکی بابهره وری از ارتعاشات»، مقاله ارائه شده در همایش ملی معماری پایدار و توسعه شهری. تهران، شرکت سازه کویر

۲. گرجی مهلبانی، یوسف و حاج ابوطالبی، الناز، (۱۳۸۸)، «مصالح هوشمند و نقش آن در معماری»، نشریه علمی پژوهشی مسکن و محیط روستا، جلد. ۲۸، شماره. ۱۲۷، صص. ۸۱-۶۶

۳. فخار، مصطفی.، مهنام، امین و ادریسی، مهدی، (۱۳۹۲)، «برداشت انرژی از راه رفتن جهت تامین انرژی یک سیستم الکترونیکی با استفاده از مبدل پیزوالکتریک»، مجله پژوهش در علوم توانبخشی، جلد. ۹، شماره. ۴، صص. ۷۰۴-۶۹۳

۴. یاوری گهر، محمودرضا و آصفی پور، رضا، (۱۳۸۸)، «تولید جریان الکتریسیته از الیاف سرامیکی پیزوالکتریک جهت صرفه جویی و خودکفایی در شهر الکترونیکی»، مقاله ارائه شده در دومین کنفرانس شهر الکترونیکی. تهران، پژوهشکده فناوری اطلاعات و ارتباطات جهاد دانشگاهی

۵. موسوی، هادی و آقازاده، جعفر، (۱۳۹۳)، «استخراج و ذخیره انرژی از پله‌های ساختمان با تکنولوژی پیزوالکتریک»، مقاله ارائه شده در چهارمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی. تهران

۶. کریمی، مسعود.، تیکنی، رضا و ضیائی راد، سعید، «برداشت انرژی از ارتعاشات پل تحت عبور جرم‌های متوالی با استفاده از مواد پیزوالکتریک»، مجله مهندسی مکانیک مدرس، جلد. ۱۶، شماره. ۶، صص. ۱۰۸-۱۱۸

7. Jain, A., Barve, A. and Sharma, V. (2015). Energy Harvesting for Piezoelectric Using Multidevice Architecture with Parallel Charge, International Journal of Science and Research, Vol. 4, No.4, p.1581.
8. Holterman, J. and Groen, P.(2013). An Introduction to Piezoelectric Materials and Applications, Stichting Applied Piezo., Apeldoorn, p. 3.
9. Ledoux, A. (2011). Theory of piezoelectric materials and their applications in civil engineering, MASTER Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering.
10. APC International. (2015). The Top Uses of Piezoelectricity in Everyday Applications, Retrieved from https://www.americanpiezo.com/blog/top-uses-of-piezoelectricity-in-everyday-applications/
11. Fallah, N. and Ebrahimnejad, M. (2013). Active control of building structures using piezoelectric actuators, Applied Soft Computing, Vol. 13, pp. 449-461.
12. Wu, N., Wang, Q. and Xie, X. (2013). Wind energy harvesting with a piezoelectric harvester, Smart Materials and Structures, Vol. 22, No.9, pp. 23-95.
13. Kong, L., Li, T., Hng, H., Boey, Fr., Zhang, T. and Li, S. (2014). Waste Mechanical Energy Harvesting (I): Piezoelectric Effect, Springer, pp. 19-31.
14. Energy-Floors. (2016). Energy Floors Technology & Products, Retrieved from http://www.energy-floors.com/
15. Pavegen. (2016). Products & Permanents, Retrieved from http://www.pavegen.com/
16. Fox, K. (2016). The Distance Run Per Game in Various Sports. Retrieved from https://www.runnersworld.com/
17. Neufert, E., Jones, V., and Thackara, J. (1980) Architects' Data, Granada, p. 17.
18. Verheijen, R. (2008). The Complete Handbook of Conditioning for Soccer, Reedswain Inc., Utah, p. 17.
19. Hoeger, W.W., Bond, L., Ransdell, L., Shimon, J.M. and Merugu, S. (2008). One-mile step count at walking and running speeds. ACSM's Health & Fitness Journal, Vol. 12, No. 1, pp.14-19.
20. FIFA. (2014). 2014 FIFA World Cup Brazil صin numbers, Retrieved from http://www.fifa.com/worldcup/news/
21. Di Salvo, V., Carmont, M.R. and Maffulli, N. (2011). Football official activities during matches: a comparison of activity of referees and linesmen in European, Premiership and Championship matches. Muscles, ligaments and tendons journal, Vol. 1, No. 3, p.106.
22. transfermarkt. Feyenoord Rotterdam. (2016). Retrieved from https://www.transfermarkt.co.uk/feyenoord-rotterdam/
23. UEFA League. C. (2016). Number of spectators 16/17, Retrieved from https://www.transfermarkt.co.uk/uefa-champions-league/besucherzahlen/
24. Cramm, J., El-Sherif, A., Lee, J. and Loughlin, J. (2011). Investigating the feasibility of implementing Pavegen energy: harvesting piezoelectric floor tiles in the new SUB. University of British Columbia ˚ APSC, Vol. 261, pp. 11-21.
25. Dietrich, A. and Melville, C. (2011). Energy Demand Characteristics and the Potential for Energy Efficiency in Sports Stadiums and Arenas in Environmental management, Duke university, p. 2.
26. Manthorpe, R. (2016). This football pitch is floodlit by foot power, Retrieved from https://www.wired.co.uk/article/pavegen-kinetic-energy-tiles-floodlit-football-pitch