

طراحی و ساخت کفی کفش هوشمند برای تحلیل راه رفتن**علی شریف‌نژاد^۱، محمد مجربی تبریزی^۲، محمدمهدی عاقلی حاجی آبادی^۳**

۱. گروه بیومکانیک و فناوری ورزشی، پژوهشگاه تربیت‌بدنی و علوم ورزشی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۳۱

چکیده

فشار صفحه‌ای پا فشاری است که بین سطح خارجی پا و مکان اتکای پا وجود دارد. اطلاعات مستخرج از چنین فشاری برای پژوهش‌های مربوط به مطالعه نحوه راه رفتن، مشکلات تعادلی، طراحی کفش، بیومکانیک ورزشی و پیشگیری از آسیب‌های ناشی از نبود حفظ تعادل به کار می‌رود؛ بنابراین، لزوم ایجاد روش‌ها و ساخت سیستم‌هایی برای اندازه‌گیری فشار و نحوه توزیع آن در کف پا به خوبی احساس می‌شود. با استفاده از یک سیستم قابل حمل می‌توان تحلیل پایداری و تحلیل رفتار حرکتی فرد را انجام داد. سیستم کفی هوشمند داخل کفش نیز می‌تواند از طریق ارسال داده بی‌سیم به صورت لحظه‌ای اطلاعات و داده‌های رفتار حرکتی و پایداری و تعادل فرد را در اختیار مربی یا حتی پزشک معالج فرد قرار دهد. از طرفی، لازمه اندازه‌گیری لحظه‌به‌لحظه پارامترهای راه رفتن طبیعی عبارت‌اند از: قابلیت حمل مجموعه سنسورها، نبود محدودیت از لحاظ برد کاری، قابلیت کاشت داخل کفش یا کفی و قابلیت داده‌خوانی در شرایط مطلوب که اصلی‌ترین الزام‌های چنین سنسورهایی هستند؛ براین اساس، هدف از انجام این مطالعه، طراحی ساخت و اعتبارسنجی کفی هوشمندی بود که توانایی اندازه‌گیری متغیرهای بیومکانیکی مدنظر را داشته باشد. با بررسی دقیق نتایج و نمودارهای حاصل، در نهایت سنسور اثر هال با ارتفاع پنج میلی‌متر و قطر دو میلی‌متری ناحیه مغناطیسی برای کاشت در کفی انتخاب شد. پس از ساخت کفی ذکر شده، ۱۰ نفر به‌عنوان آزمودنی به‌طور تصادفی انتخاب شدند. برای انجام مرحله تست برداری، هر فرد باید کفی‌ها را به پا می‌کرد و دو آزمایش ایستا و پویا را (راه رفتن) انجام می‌داد. تست‌های انجام‌شده برای کفی مجهز به سنسور اثر هال انجام شدند و با نتایج آزمون‌های حاصل از کفی پدار مقایسه شدند. نتایج دو آزمون پدار و کفی سنسور اثر هال تطبیق خوبی داشت و ضریب رگرسیون عددی نزدیک به یک بود که نشانگر هماهنگی زیاد نتایج کفی مجهز به سنسور اثر هال با پدار است. شایان ذکر است که طبق نتایج پژوهش امکان ساخت انواع سنسورها در اندازه‌ها و ابعاد گوناگون وجود دارد و نسبت به کاربرد موردنظر یا حتی تغییرات ساختاری و طراحی کفی در آینده آزادی عمل بیشتری وجود دارد. مجموعه عوامل یادشده علاوه‌براینکه کاربردی نوین برای

1. Email: a_sharifnezhad@dr.com

2. Email: tabrizi1372@gmail.com

3. Email: mmagheli@gmail.com

4. Lavery et. al

سنسورهای اثر حال ارائه می‌دهند، نوید امکان ساخت محصول تجاری با استفاده از این نوع سنسور را نیز می‌دهند.

واژگان کلیدی: فشار صفحه‌ای پا، سنسور اثر حال، سیستم‌های بی‌سیم، تعادل.

مقدمه

پا اولین سطح در تماس با زمین هنگام راه رفتن است؛ بنابراین، یافتن درمان برای مشکلات پا در مراحل اولیه به منظور جلوگیری از جراحی و مدیریت خطر مهم است. یکی از راهبردهایی که به طور گسترده‌ای برای تعیین میزان سلامت پا کاربرد دارد، مطالعه مشخصه‌های توزیع فشار کف پا است؛ به همین دلیل، استفاده از دستگاه‌های قابل اطمینان برای اندازه‌گیری فشار کف پا از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از اولین کاربردهای سیستم‌های اندازه‌گیری فشار، استفاده از آن برای تعیین صحت ساخت زیر انواع کفش بود. لوری^۴ و همکاران (۱) در سال ۱۹۹۷ میزان کارایی انواع کفش‌های طبی و ورزشی را با و بدون کفی ویسکو الاستیک و با استفاده از معیار میانگین ماکزیمم فشار صفحه‌ای بررسی کردند. از آن پس اشخاص بسیاری به مطالعه فشار صفحه‌ای روی آوردند؛ به عنوان مثال، میولر (۲) محاسبات منتج از فشار صفحه‌ای پا را در طراحی کفش مناسب برای افراد فاقد هرگونه اختلال روانی (مردم عادی جامعه) به کاربرد. پرائت و لورن^۱ (۳) و کوئین^۲ و همکاران (۴) دریافتند که مؤثرترین روش برای کاهش فشار روی اعصاب نواحی جلویی کف پا استفاده از کفش‌هایی با زیره‌ی راکر است. آن‌ها ادعا کردند که این نوع زیره فشار نواحی متاتارسال‌های اول و پنجم را کاهش می‌دهد. نواحی متاتارسال ذکر شده تنها نواحی‌ای هستند که در بیماران دارای گودی پا در معرض آسیب هستند. همچنین، کوئین و همکاران به این نکته اشاره کردند که در طراحی‌های آینده که برحسب اندازه‌گیری فشار پا صورت می‌گیرد، باید جنسیت شخص نیز در نظر گرفته شود؛ زیرا، جنسیت بر رفتار و نحوه توزیع فشار کف پا اثر دارد.

با توجه به کاربردهایی که شامل مطالعه انواع بیماری‌های پا می‌شوند، به‌تازگی پژوهشگران بیشتر بر بیماران متمرکز شده‌اند که قندخون دارند یا به اصطلاح «دیابتی» هستند؛ زیرا، در نواحی خاصی از کف پای این افراد جراحات‌های ناشی از فشار کف پا بیشتر روی می‌دهد؛ بنابراین، این مطالعات بیانگر ضرورت استفاده از سیستم‌های پایش رفتار حرکتی هستند.

از طرف دیگر، حفظ تعادل یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در موارد ورزشی و زیست‌پزشکی است که از موارد کاربرد آن می‌توان به تمرین حفظ تعادل در فوتبال (۵ و ۶) و تحلیل میزان نیروهای وارد شده به قسمت جلویی پا در حین دویدن (۷) اشاره کرد. علاوه بر این، محاسبه پارامترهایی همچون مسافت، سرعت، شتاب و تعداد گام‌ها نیز در موارد ورزشی اهمیت دارد و باید مطالعه شوند. با توجه

به موارد کاربردی پزشکی، فشار و نحوه توزیع آن در کف پا در مطالعه مقوله نبود تعادل درحین راه رفتن و ناهماهنگی در حفظ تعادل درحین راه رفتن در افراد مسن کاربرد دارد (۸). بیشتر مطالعات صورت گرفته در این زمینه با دستگاه‌هایی انجام شده‌اند که بیشتر جنبه تجاری دارند و چه از لحاظ همگونی ساختاری و چه از حیث تجهیزات استفاده شده در آن‌ها و همچنین، نحوه قرارگیری و تعبیه شدن این تجهیزات داخل کفش یا کفی مناسب نیستند؛ بنابراین، ضرورت ساخت کفی هوشمندی با داشتن مؤلفه‌های همگونی ساختاری و تعبیه کل تجهیزات به صورت ساختار یکپارچه به شدت احساس شد.

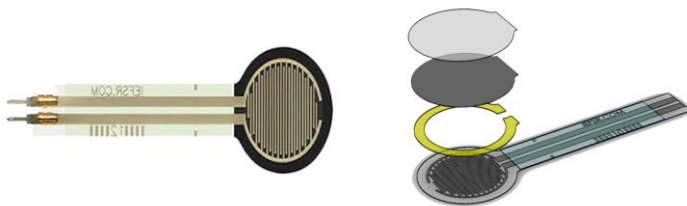
بر اساس بحث‌های انجام شده، لزوم ایجاد روش‌ها و ساخت سیستم‌هایی برای اندازه‌گیری فشار و نحوه توزیع آن در کف پا به خوبی احساس می‌شود. همچنین، ضرورت ارزیابی و صحت‌سنجی این سیستم‌ها توسط دستگاه‌های از پیش شناخته شده نیز به طور جدی احساس می‌شود؛ بنابراین، در انتها به این موضوع نیز پرداخته خواهد شد و نتایج حاصل از تست‌های انجام شده توسط این دستگاه با یک دستگاه معتبر از پیش شناخته شده مقایسه خواهد شد.

روش پژوهش

تجهیزات الکترونیک

سنسورهای مقاومت سنجش نیرو

سنسورهای نیروی استفاده شده در کفی از نوع FSR® Model ۴۰۲ هستند و دارای دنباله قابل لحیم کاری هستند که برای اتصال آن‌ها به مدار چاپی منعطف بسیار ایده‌آل هستند. این سنسورها نازک و نیز در دسترس‌تر هستند؛ به همین دلیل، برای این کار انتخاب شدند. ناحیه حسگر این سنسورها به قطر ۱۸/۳ میلی‌متر و طول آن‌ها ۵۶ میلی‌متر است و قابلیت اندازه‌گیری یک تا ۲۰ نیوتن را دارند. نمای بالا و انفجاری این سنسورها در شکل شماره یک نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای بالا و انفجاری سنسور FSR (۹)

نیروسنج مقاومتی ماده‌ای است که مقاومتش هنگامی که نیرو یا فشار بر آن وارد می‌شود، تغییر می‌کند. همچنین، «مقاومت حساس به نیرو» و گاهی به صورت مخفف، یعنی FSR خوانده می‌شود. توجه کنید که FSR و «Force Sensing Resistor» نشان‌های تجاری شرکت اینترلینک الکترونیکز هستند.

مقاومت‌های سنجش نیرو از پلیمر رسانا تشکیل شده‌اند که مقاومتشان به شیوه پیش‌بینی‌شدنی پیرو نیروی واردشده بر سطحشان است. این‌ها به صورت ورقه‌های پلیمر یا جوهری که قابل استفاده به وسیله چاپ سیلک هستند، عرضه می‌شوند. فیلم حساس از رسانای الکتروسیسته و نارسانا تشکیل شده است و قطعه‌های تشکیل‌دهنده در اندازه‌های زیر میکرومتر هستند و به صورتی محاسبه و ساخته شده‌اند که تأثیرپذیری گرمایی را کاهش دهند، خصوصیات مکانیکی را افزایش دهند و دوام سطحی بیشتری داشته باشند. اعمال نیرو بر سطح فیلم حساس موجب می‌شود که دو سطح همدیگر را لمس کنند و مقاومت فیلم تغییر کند. همانند همه سنسورهای برپایه مقاومت، سنسورهای حساس به نیرو به خط اتصال ساده‌ای نیازمند هستند و می‌توانند در محیط‌های خطرناک رضایت‌بخش عمل کنند. در مقایسه با دیگر سنسورهای نیرو، مزیت FSRها اندازه آن‌ها (عموماً ضخامتشان از ۰/۵ میلی‌متر کمتر است)، قیمت کم و چقرمگی (تغییر شکل کم سنسورها در فشارهای بالا) آن‌هاست؛ هرچند اگر به FSRها در مدت طولانی فشار وارد آید، خراب خواهند شد. یک ضعف آن‌ها دقت کم آن‌هاست؛ یعنی اندازه‌گیری‌شان می‌تواند ۱۰ درصد یا بیشتر، متفاوت باشد. مقاومت‌های حساس به نیرو معمولاً در ساخت دکمه‌های حساس به فشار استفاده می‌شوند و کاربردهای آن در زمینه سازها و دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل می‌باشند.

برد میکروکنترلر

به دلیل مهم بودن میزان فضای اشغالی اجزای الکترونیکی، کوچک بودن اجزا، به ویژه میکروکنترلر از اهمیت زیادی برخوردار است و به همین دلیل، میکروکنترلر آردوینو پرو مینی برگزیده شد. این میکروکنترلر هشت ورودی آنالوگ دارد و از این حیث برای کار ما که هشت عدد سنسور دارد، بسیار مناسب است. در ادامه، درباره این برد به اختصار توضیح داده شده است.

بردی حرفه‌ای که برای مکان‌هایی به کار می‌رود که محدودیت فضایی وجود دارد. کوچک بودن این برد تاجایی ادامه یافته است که حتی آی‌سی مبدل usb به سریال نیز در این برد حذف شده است؛ به همین دلیل، برای برنامه‌نویسی این برد به پروگرامر نیاز است و می‌توان سنسورهای مختلف را به این برد وصل کرد. این مدل از برد آردوینو در دو نسخه ۳/۳ ولت، با فرکانس کاری هشت مگاهرتز و

پنج ولت با فرکانس کاری ۱۶ مگاهرتز تولید می‌شود که باید در هنگام خرید به ولتاژ ورودی این برد دقت کرد تا به آن آسیبی نرسد.

پایه‌های این برد به سه قسمت تقسیم می‌شوند: پایه‌های ورودی و خروجی دیجیتال که در این برد ۱۴ تا هستند که شش تای آن‌ها برای تولید موج pwm استفاده می‌شوند. همچنین، هشت پایه ورودی آنالوگ برای آن در نظر گرفته شده است که همان پایه‌های ورودی ADC در میکروکنترلر AVR هستند و در نهایت، پایه‌های مربوط به تغذیه هستند که در صورت اتصال سنسورها و وسایل مختلف به این برد می‌توان تغذیه آن را از این برد گرفت؛ البته باید مواظب بود که دستگاه مورد نظر جریان زیادی از برد نکشد؛ زیرا، باعث سوختن آن می‌شود.

مزایا

از مزایای این برد و به‌طور کلی، بردهای Arduino می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- کوچک بودن؛
- ۲- محیط نرم‌افزاری بسیار ساده؛
- ۳- کدنویسی آسان؛
- ۴- متن‌باز بودن آن؛
- ۵- وجود کتابخانه‌های بسیار زیاد برای راه‌اندازی سنسورهای مختلف؛
- ۶- وجود شیلدهای مختلف سازگار با این برد برای راه‌اندازی وسایل جانبی مختلف مانند اتصال به شبکه و اینترنت.

معایب

شاید بتوان قدرت پردازش کم نسبت به بردهای مختلف دیگر را از عیب‌های این برد نام برد، اما در مقابل قابلیت‌های دیگر آن می‌توان از این عیب صرف‌نظر کرد؛ زیرا، در صورت نیاز به استفاده از برد قدرتمندتر می‌توان از سری‌های قدرتمندتر همین برد مانند آردوینو دوو با همین کدهای برد اونو (بدون هیچ تغییری) استفاده کرد. نکته دیگری که ذکر آن لازم است، نیاز به پروگرامر خارجی برای این برد است.

منبع تغذیه

به دلیل اینکه ولتاژ ورودی میکروکنترلر انتخابی پنج ولت بود و تمامی باتری‌های موجود در بازار ۳/۷ ولتی بودند، از دو باتری سری شده ۳/۷ ولتی استفاده شد که در مجموع ۷/۴ ولت می‌شود و توسط

رگولاتور خود میکرو به پنج ولت تقلیل داده می‌شود. جریان برق موردنیاز تمامی اجزا اعم از بلوتوث، سنسورها و ماژول آی.ام.یو. از خروجی VCC برد میکروکنترلر گرفته شد.

ماژول IMU

ماژول آی.ام.یو.ی استفاده شده نیز ماژول نه محوره ۹۲۵۰ MPU-۱۱۶/CJMCU است. در ادامه تعریف مختصری از این ماژول و خانواده آن‌ها ذکر شده است.

این ماژول یک ماژول قدرتمند و دقیق است که تقریباً تمام نیازها را برای ساخت یک سامانه اندازه‌گیری داخلی یا همان IMU با نه درجه آزادی و نه محور فراهم می‌کند. دقت بسیار زیاد و سیستم پیشرفته پردازش حرکت دیجیتال داخلی (DMP)، از ویژگی‌های منحصر به فرد این ماژول است. این ماژول از دو چیپ مجزا تشکیل می‌شود که سعی شده است هر کدام به صورت مختصر شرح داده شوند. با توجه به رابط I2C این ماژول، به راحتی می‌توان آن را به کمک بردهای آموزشی یا هر میکروکنترل دیگری راه‌اندازی کرد. سنسور gyfo سه‌محوره با دقت ۱۶ بیت و رنج اندازه‌گیری ۲۰۰۰ درجه در ثانیه، سنسور شتاب سه‌محوره با دقت ۱۶ بیت و رنج اندازه‌گیری تا ۱۶ g، سنسور قطب‌نمای سه‌محوره با دقت ۱۳ بیت و دارای بافر FIFO با ظرفیت ۱۰۲۴ بیت و سنسور دما با رنج اندازه‌گیری ۴۰- تا ۸۵+ درجه سانتی‌گراد است.

ماژول بلوتوث HC-۰۶

این ماژول یکی از پرکاربردترین ماژول‌های بلوتوث است که تقریباً در تمامی پروژه‌هایی که نیاز است توسط میکروکنترلر اطلاعات به صورت بلوتوث ارسال شود، از این ماژول استفاده می‌شود. نحوه راه‌اندازی ماژول بسیار ساده است و از طریق پروتکل سریال به میکروکنترلر متصل می‌شود. اطلاعات گوناگون در این ماژول مانند تغییر نام، تغییر بادریت، تغییر پسورد و غیره از طریق ارسال AT command می‌تواند تغییر کند. برای تبادل اطلاعات، در فواصل کوتاه بی‌سیم مناسب است. می‌توان با آن به کامپیوتر، تبلت، تلفن همراه یا بین دو ماژول ارتباط برقرار کرد. شایان ذکر است که استفاده نکردن از ماژول‌های وای‌فای به دلیل جای‌گیر بودن و مصرف انرژی نسبتاً زیاد آن‌هاست که در این طرح نیز محدودیت تأمین انرژی توسط باتری‌های تعبیه شده وجود داشت. نکته مهمی که در مورد این ماژول باید به خاطر سپرد، نبود اماکن پروگرامینگ میکروکنترلر است. ماژول بلوتوث فقط برای انتقال داده و مشاهده ورودی و خروجی است و به هیچ وجه برای برنامه‌نویسی میکرو و تغییر برنامه روی آن نمی‌توان از ماژول بلوتوث استفاده کرد؛ به همین دلیل، قسمت اتصال ماژول بلوتوث به برد میکروکنترلر طوری در این کفی طراحی و کاشته شد که برای اقدام‌های آینده (مثل تغییر برنامه و بارگذاری آن) دیگر به اقدام‌های سخت و وقت‌گیر همچون ذوب لحیم و بریدن اتصالات نیاز نباشد.

یکی از نکات مهم که باید برای ورود به محیط AT command این ماژول در نظر گرفته شود، لحیم‌بودن اتصال شماره ۲۶ روی برد این ماژول است؛ زیرا، درغیراین‌صورت با وجود امکان ارسال اطلاعات، امکان تغییر نام، تغییر بادریت، تغییر پسرورد و غیره وجود نخواهد داشت.

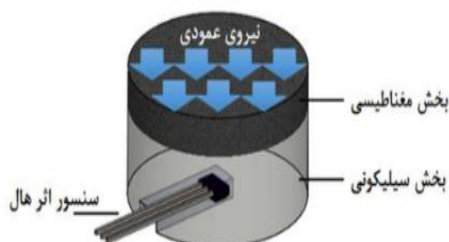
تجهیز کفی با سنسورهای اثر هال

پس از انجام آزمایش‌ها توسط کفی مجهز به سنسورهای FSR و به‌دست‌آمدن نتایج لازم، با توجه به اینکه این سنسورها دارای معایبی همچون غیرخطی‌بودن، کم شدن حساسیت در انتهای بازه، اشباع‌شدن سنسور در سقف نیرویی ۱۰۰ نیوتون و مواردی از این دست بودند، کفی توسط سنسورهایی از نوع دیگر مجهز شد که طراحی، ساخت و توسعه این سنسورهای نیرو درائت‌های همین پژوهش در آزمایشگاه انجام شد معایب ذکرشده را نداشت.

سنسور اثر هال و مراحل آماده‌سازی آن

میرزانژاد و آقایی (۱۰) در سال ۲۰۱۷ این سنسور را توسعه دادند. در ادامه به‌اختصار دربارهٔ مراحل ساخت و تجهیز کفی به این سنسور شرح داده شده است. برای دسترسی به توضیحات کامل‌تر درمورد سازوکار و روابط حاکم بر این نوع سنسور به منبع شماره ۱۱ مراجعه شود.

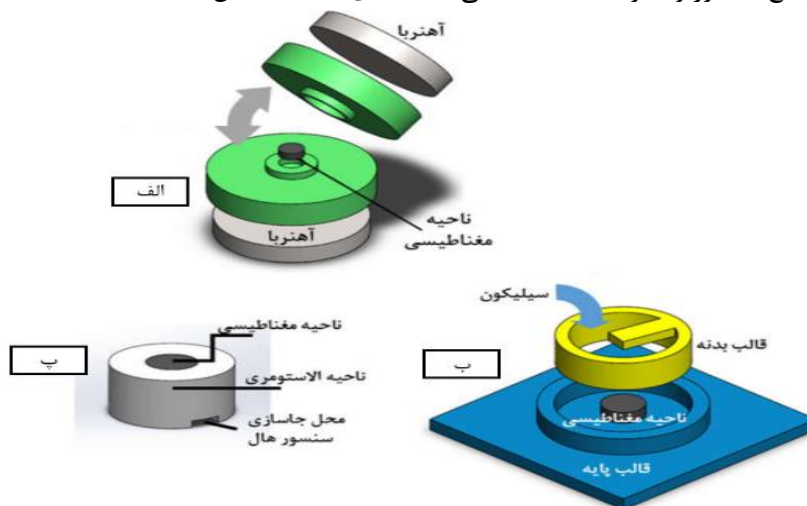
سنسور ارائه‌شده در این پژوهش، از یک سنسور اثر هال خطی برای اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی هنگام اعمال نیروی فشاری عمودی بهره می‌برد. ساختار سنسور به‌صورت استوانه‌ای است که در ابعاد مختلف برای بررسی تأثیر پارامترهای گوناگون روی آن طراحی و ساخته شده است. ساختار کلی آن دارای دو بخش مغناطیسی و الاستیک است. بخش مغناطیسی آهن‌ربای نئودیمی و بخش الاستیک از سیلیکون رابر بدون افزودنی دیگری تشکیل شده است. سنسور اثر هال در قسمت پایین ساختار جاسازی می‌شود؛ به‌گونه‌ای که قسمت جلوی آن رو به بالا قرار می‌گیرد. همچنین، قسمت مغناطیسی در وجه بالایی سنسور استوانه‌ای قرار می‌گیرد. مطابق شکل شماره ۲، اگر بر وجه بالایی سنسور نرم نیرویی فشاری در راستای عمود وارد شود، ساختار الاستومری فشرده می‌شود و موجب نزدیک‌ترشدن ناحیه مغناطیسی به سنسور اثر هال می‌شود؛ بنابراین، بزرگی میدان مغناطیسی که اندازه‌گیری می‌شود، تغییر می‌کند و موجب تغییر ولتاژ خروجی سنسور اثر هال می‌شود. از روی این تغییرات ولتاژ می‌توان به بزرگی نیرویی پی برد که وارد می‌شود.



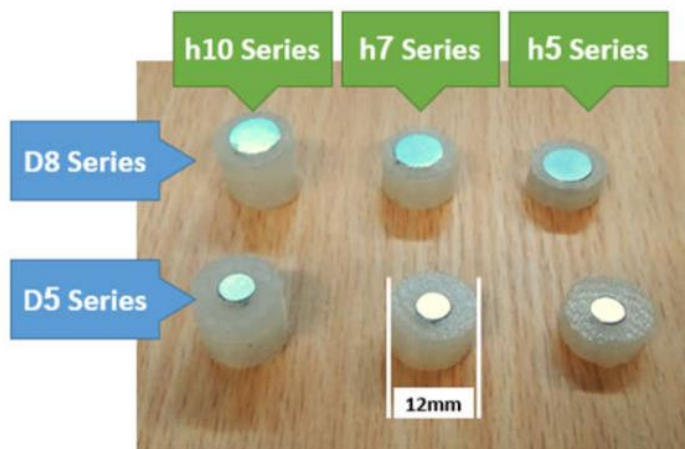
شکل ۲- نمایش شماتیک بخش‌های مختلف سنسور

سنسور اثر هال استفاده شده در این پژوهش، سنسور خطی SS49E ساخت شرکت هانیول است که دارای سه پایه شامل ولتاژ تغذیه، اتصال به زمین و خروجی ولتاژ است. عبارت خطی، یعنی خروجی ولتاژ آن به صورت خطی با بزرگی میدان مغناطیسی اعمال شده به آن تغییر می‌کند. از جمله خواص آن می‌توان به جریان مصرفی کم (شش میلی‌آمپر در تغذیه پنج ولت)، ولتاژ تغذیه از ۲/۷ ولت تا ۶/۵ ولت مستقیم، نویز کم، دمای کاری ۴۰- تا ۱۰۰+ درجه سانتی‌گراد و قابلیت سنجش هم‌زمان میدان مثبت و منفی با رنج کاری ۱۰۰۰- تا ۱۰۰۰+ گوس و حساسیت حدود ۱/۴ میلی‌ولت بر گوس در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و برای ولتاژ تغذیه پنج ولت، اشاره کرد (۱۱).

شماتیک مراحل ساخت این نوع سنسور با استفاده از آهن‌ربای نئودیمیوم در شکل شماره سه به ترتیب آورده شده است. همچنین، در شکل شماره چهار انواع مختلف سنسورهای آماده که برحسب ارتفاع سنسور و قطر ناحیه مغناطیسی دسته‌بندی شده‌اند، نشان داده شده است.

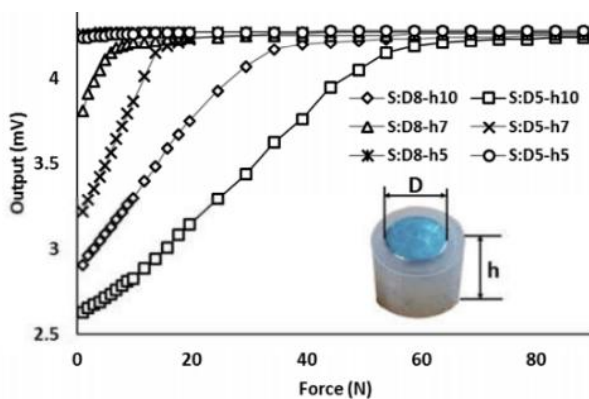


شکل ۳- مراحل ساخت و آماده‌سازی سنسور اثر هال: الف) اجزای مختلف سنسور و قالب آن به صورت دمونتاژ، ب) مرحله سیلیکون‌ریزی، پ) سنسور نهایی



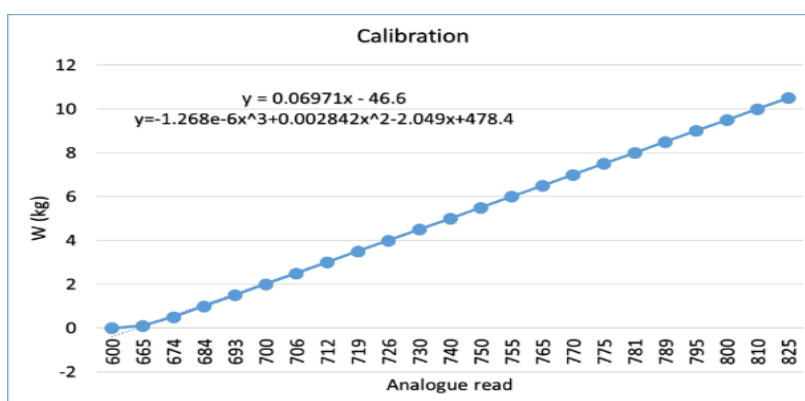
شکل ۴- سنسورهای اثر هال با ارتفاع و قطر آهن‌ربای مختلف

پس از انجام مرحله کالیبراسیون و مشاهده نتایج سنسورهای مختلف اثر هال و جمع‌بندی آن طبق نمودار شکل شماره پنج، این نتیجه حاصل شد که هرچه قطر ناحیه مغناطیسی کوچک‌تر باشد، بازه نیروی اندازه‌گیری شده برای کاربرد در کفی کفش بیشتر و مناسب است. ارتفاع سنسور نیز بنا به محدودیت طراحی کفی که از قبل تعیین شده بود، پنج میلی‌متر در نظر گرفته شد.



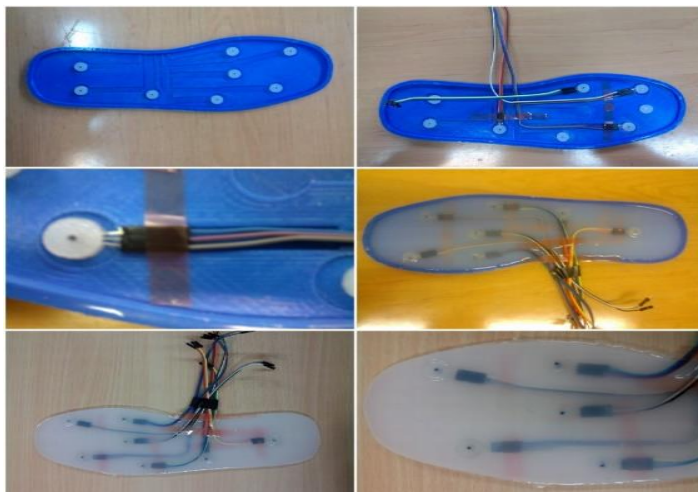
شکل ۵- نمودار مقایسه‌ای پاسخ‌های ولتاژی سنسور اثر هال با مشخصات مختلف

با بررسی دقیق نتایج و نمودارها، درنهایت سنسور اثر هال با ارتفاع پنج میلی‌متری و قطر دو میلی‌متری ناحیه مغناطیسی برای کاشت در کفی انتخاب شد. شایان ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده از این سنسور بسیار خوب است و تاجایی که مشهود است این سنسورها در بازه نیرویی صفر تا ۱۰۰ نیوتون (بازه تقریبی موردنیاز ما) بدون مشکل کار می‌کنند و حتی تا حدود ۱۴۰ نیوتون (حد تقریبی اشباع سنسور) نیز داده می‌دهند، خطی بودن خود را از ابتدا تا انتهای بازه نیرویی موردنیاز در کاربرد کفی کفش (شکل شماره شش) حفظ می‌کنند، رزولوشن قابل‌قبولی دارند و همچنین، اثر تنش پسماند نیرویی بر آن‌ها در سیکل برگشتی کالیبراسیون ناچیز است.



شکل ۶- نمودار کالیبراسیون سنسور D2-H5 به‌همراه معادلات درجه یکم و سوم حاکم بر آن

پس از انتخاب و آماده‌سازی سنسورهای اثر هال، این سنسورها مطابق شکل شماره هفت داخل قالب جاگذاری شدند و آماده سیلیکون‌ریزی شدند. پس از قراردادن اتصالات و سنسور اثر هال در جای خود و ریختن سیلیکون، حدود ۱۰ ساعت زمان صرف خشک‌شدن و آماده‌شدن کفی شد. کفی نهایی طوری بود که تمامی اجزای آن کاملاً یکپارچه بودند و مرز بین سنسور و کفی به‌هیچ‌عنوان قابل تشخیص نبود؛ زیرا، هر دو از یک جنس مشخص سیلیکون با شری ۱۰ ساخته شده‌اند؛ به‌همین دلیل، سنسورها در این موقعیت احتمال بروز رفتارهایی نامنتطبق دارند در مقایسه با حالتی که خارج این محیط قرار گرفته باشند؛ بنابراین، با حاضر شدن کفی، سنسورها در محل خود قرار گرفتند و عملیات کالیبراسیون آنها انجام شد و نتایج آن در بخش قبلی ارائه شد.



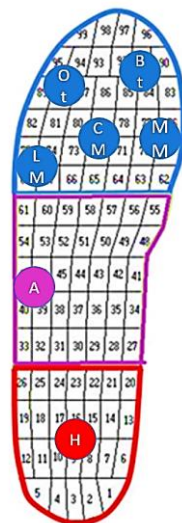
شکل ۷- آماده‌سازی کفی و قالب‌ریزی سیلیکون به همراه سنسورهای اثر هال

ارزیابی کفی مجهز به سنسور FSR با دستگاه پدار

برای اینکه از صحت داده‌های حاصل از تست حتی پس از فرایند کالیبراسیون اطمینان حاصل شود، یک مسیر خاص به‌عنوان مسیر تست در نظر گرفته شد و هم با دستگاه پدار و هم با کفی هوشمند این مسیر پیموده شد تا همبستگی میان نتایج حاصل از این دو حالت با هم مقایسه شود و این کفی بدین طریق ارزیابی شود.

نکته‌ای که باید در حین تحلیل نتایج در نظر گرفته می‌شد، تفاوت تعداد سنسورهای پدار و همچنین، فرکانس داده‌برداری آن با کفی بود. برای حل مورد فرکانسی که برای پدار ۱۰۰ هرتز بود و برای کفی ۱۰ هرتز، یعنی پدار در ثانیه ۱۰۰ داده در اختیار می‌گذاشت و کفی فقط ۱۰ داده ارائه می‌داد، داده‌های متناظر هر ثانیه انتخاب شدند که در هر دو تست موجود بودند.

برای حل مسئله تفاوت میان تعداد سنسورها نیز این روش به‌کار برده شد. شکل شماره هشت نشان‌دهنده ترتیب چینش سنسورها در کفی پدار است.



شکل ۸- ترتیب چینش سنسورها در کفی پدار و نقاط متناظر آن‌ها با کفی هوشمند

نقطه متناظر پاشنه در کفی هوشمند همان میانگین نقاط سنسورهای ۸، ۹، ۱۰، ۱۵، ۱۶ و ۱۷، نقطه متناظر قسمت طاقی یا نقاط ۳۹، ۴۰، ۴۶ و ۴۷، قسمت لبه‌ای میانی نقاط ۶۷، ۶۸، ۷۴ و ۷۵، قسمت مرکزی میانی نقاط ۷۱، ۷۲، ۷۳، ۷۸، ۷۹ و ۸۰، قسمت خارجی میانی نقاط ۶۹، ۷۱، ۷۶ و ۷۷، انگشتان کوچک نقاط ۸۷، ۸۸، ۸۹، ۹۴ و ۹۵ و انگشت بزرگ نقاط ۸۴، ۸۵، ۹۱ و ۹۲ در نظر گرفته شدند. از نتایج حاصل از خروجی سنسورهای ذکر شده میانگین گرفته شده است و معادل هر سنسور کفی هوشمند در نظر گرفته شده است.

این نتایج در شکل‌های شماره ۱ تا شماره ۱۵ به تفکیک هر سنسور آورده شده است. نمودارهای مثلی نتایج حاصل از کفی و نمودارهای دایروی نتایج حاصل از پدار هستند. شایان ذکر است که رگرسیون بر مبنای چندجمله‌ای درجه چهار یا پنج انجام شده است و بر همین اساس، ضریب R^2 محاسبه شده است.

این تست‌ها بدین گونه بودند که از هر فرد (تعداد افراد آزمایش شده، ده نفر با میانگین سنی 25 ± 5 و میانگین وزنی 65 ± 10) آزمایش شده خواسته شد سه قدم را در طی یک مسیر بپیماید و این حرکت را سه بار تکرار کند. در نهایت، از میان تست‌ها چند نمونه به صورت تصادفی از هر سنسور گرفته شد و نتایج آن‌ها به تفکیک هر سنسور در نمودارهای جداگانه ارائه شد.

تست و آزمایش کفی کفش مجهز به سنسور اثر هال

تست‌های انجام شده در بخش قبل همگی به همان منوال برای کفی مجهز به سنسور اثر هال نیز انجام شدند و با نتایج تست‌های حاصل از کفی پدار مقایسه شدند. نمودار نتایج مربوط به هر قسمت از کف پا، به ترتیب برخورد با زمین درحین مرحله اولیه قرارگیری پا روی زمین تا انتهای این مرحله، در ادامه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج دو تست پدار و کفی سنسور اثر هال تطبیق خوبی دارند و ضریب رگرسیون عددی نزدیک به یک است که نشانگر هماهنگی زیاد نتایج کفی مجهز به سنسور اثر هال با پدار است. نمودارهایی که در ادامه آورده شده‌اند، حاصل مقایسه همبستگی نتایج داده‌های کفی مجهز به سنسور اثر هال و همچنین، کفی تجاری پدار و کفی مجهز به سنسور FSR هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

با مشاهده نمودارهای مقایسه‌ای شکل‌های (۹) تا (۱۴) به خوبی مشاهده می‌شود کفی‌ای که با سنسورهای اثر هال تجهیز شده است، عمده‌ترین مشکل کفی‌های مجهز به سنسور FSR، یعنی به‌اشباع‌رسیدن در بازه نیرویی بیشتر از ۱۰۰ نیوتون را ندارد؛ بازه‌ای که چه‌بسا اهمیت بسزایی در تجزیه و تحلیل نوع رفتارهای حرکتی فرد دارد. به غیر از این مورد، مزیت درخور توجه کفی جدید حفظ میزان حساسیت سنسورها در همین بازه ذکر شده است؛ زیرا، در بازه حول ۱۰۰ نیوتون به‌ازای افزایش نیروی بزرگ‌تر، تغییرات ولتاژ کوچک‌تری توسط سنسور FSR حس می‌شود که براساس آن، نتایج حاصل از کفی مجهز به سنسور FSR قابلیت اطمینان کمتری دارد.

یکپارچگی و ادغام ساختاری سنسورها و خود کفی نیز در نوع خود یک مزیت محسوب می‌شود؛ زیرا، در مراحل بعدی، محصول باید دارای قوام و زیبایی بصری درخوری باشد و تا حد امکان از هرگونه حرکت و جابه‌جایی انتقالی سنسور نسبت به کفی خودداری شود. مجموعه عوامل یادشده علاوه‌براینکه کاربردی نوین برای سنسورهای اثر هال ارائه می‌دهند، نوید امکان ساخت محصول تجاری با استفاده از این نوع سنسور را نیز به‌همراه دارند.

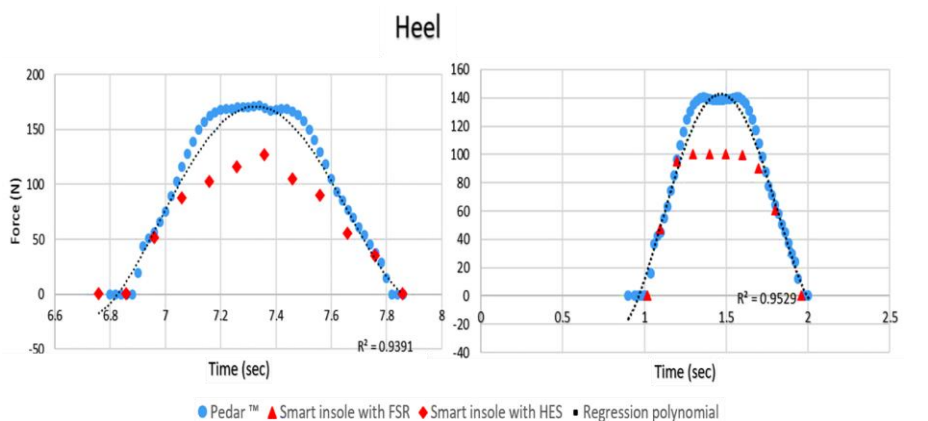
نتایج به‌دست‌آمده از تست‌های مربوط به کفی اثر هال همبستگی عالی‌ای با نتایج کفی پدار دارد و در مقایسه با کفی سنسور FSR نیز عملکرد بهتری دارد.

استفاده از سنسورهای FSR به‌جز مورد نازک و سبک‌بودن توجیه دیگری ندارد و صرفاً برای حس کردن حضور یا حضورنداشتن نیرو در یک محل باید استفاده شود.

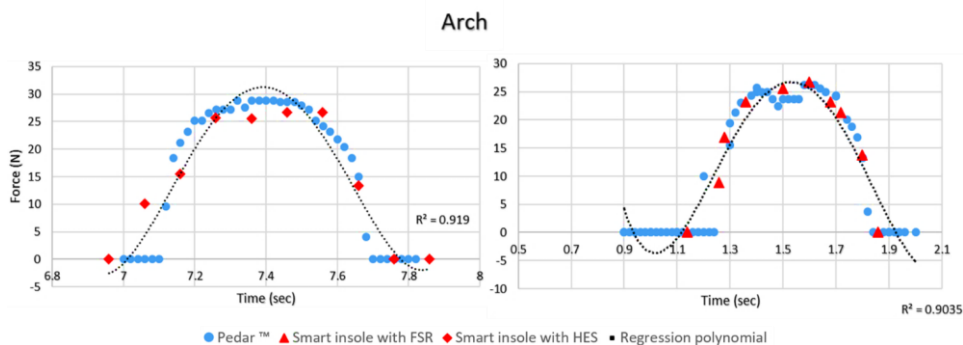
در نسخه کفی اثر هال که به دلیل کاشت سنسورهای پنج میلی متری اثر هال در کفی امکان کاشت دیگر تجهیزات نبود، طبیعی است که این تجهیزات به بیرون کفی برده شدند که این در نوع خود یک مزیت و در مقایسه با نوع کفی FSR یک عیب محسوب می شود.

هر دو نوع کفی در بازه قابل قبولی همبستگی دارند، ولی دیگر مشخصات سنسورهاست که استفاده از کفی اثر هال را موجه تر می کند؛ مشخصاتی همچون اشباع سریع سنسور و ازدست دادن خاصیت خطی بودن در اواخر بازه نیرویی.

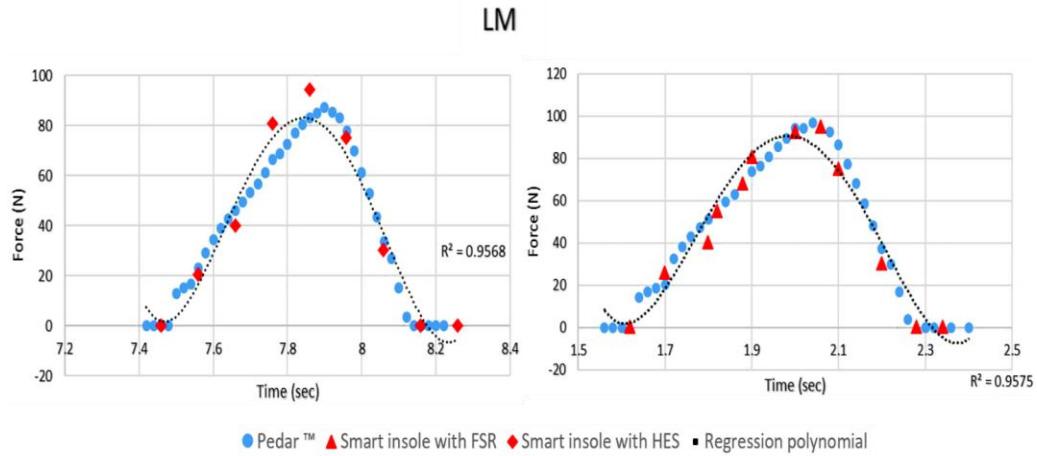
کفی نوع اثر هال به دلیل درهم آمیخته بودن کفی و سنسورها و قابل تشخیص نبودن سنسور از دیگر قسمت های کفی یا به عبارتی، یکپارچه بودن آن برای استفاده در داخل کفش و راحتی پا از کفی نوع FSR بسیار مناسب تر است.



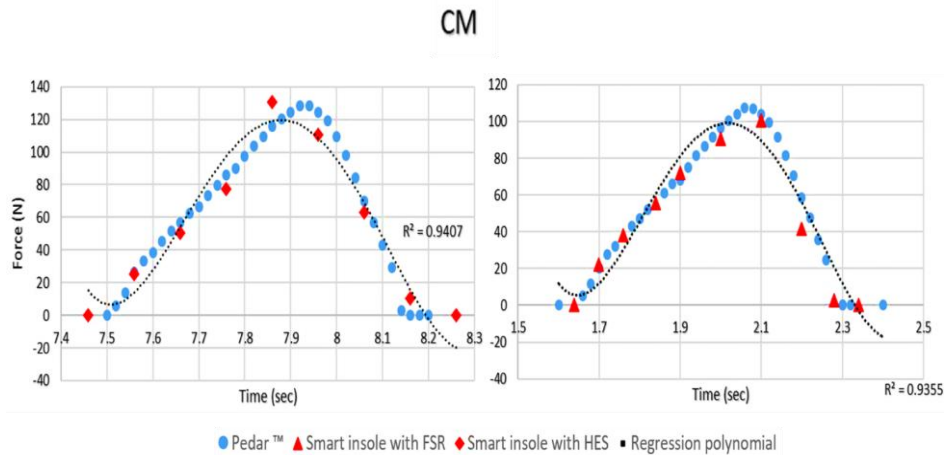
شکل ۹- نتایج همبستگی و تطبیق Heel دو نمودار حاصل از پدار و کفی اثر هال و کفی FSR با ضریب رگرسیون ۰/۹۴ و ۰/۹۵



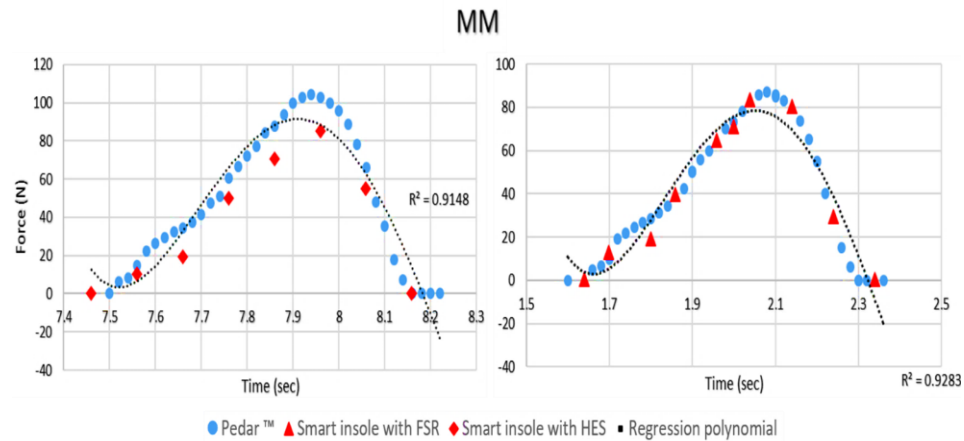
شکل ۱۰- نتایج همبستگی و تطبیق Arch دو نمودار حاصل از پدار و کفی اثر هال و کفی FSR با ضریب رگرسیون ۰/۹۲ و ۰/۹۱



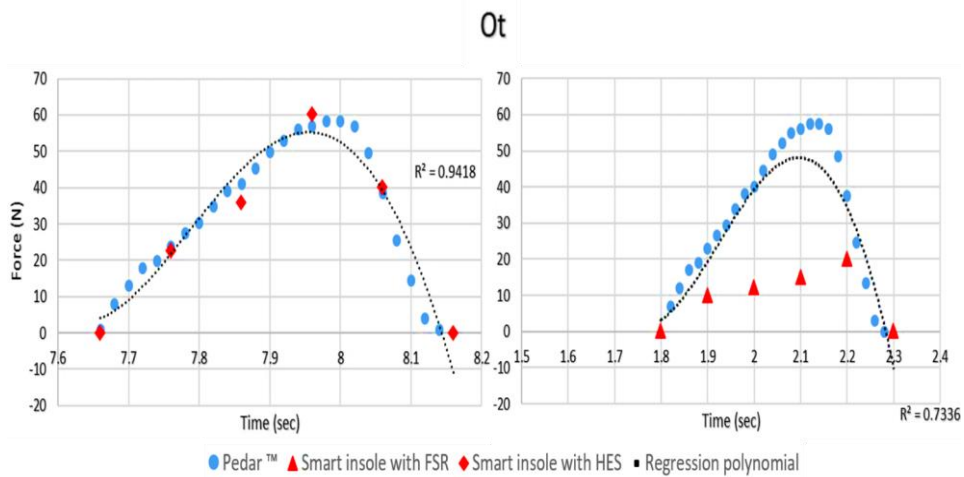
شکل ۱۱- نتایج همبستگی و تطبیق LM دو نمودار حاصل از پدار و کفی اثر هال و کفی FSR با ضریب رگرسیون ۰/۹۶ و ۰/۹۶



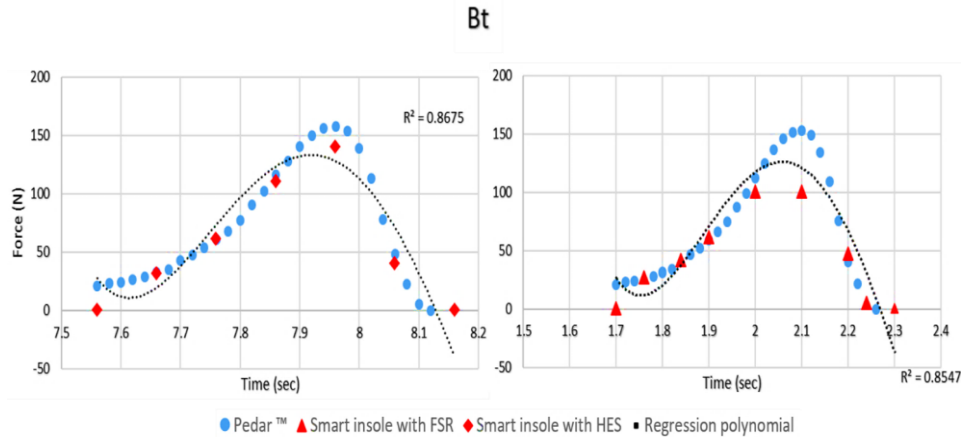
شکل ۱۲- نتایج همبستگی و تطبیق CM دو نمودار حاصل از پدار و کفی اثر هال و کفی FSR با ضریب رگرسیون ۰/۹۳ و ۰/۹۴



شکل ۱۳- نتایج همبستگی و تطبیق MM دو نمودار حاصل از پدار و کفی اثر هال و کفی FSR با ضریب رگرسیون ۰/۹۱ و ۰/۹۳



شکل ۱۴- نتایج همبستگی و تطبیق Ot دو نمودار حاصل از پدار و کفی اثر هال و کفی FSR با ضریب رگرسیون ۰/۷۳ و ۰/۹۴



شکل ۱۵- نتایج همبستگی و تطبیق Bt دو نمودار حاصل از پدار و کفی اثر هال و کفی FSR با ضریب رگرسیون ۰/۸۷ و ۰/۸۵

منابع

- Lavery L, Vela S, Fleishli J, Armstrong D, Lavery D. Reducing plantar pressure in the neuropathic foot. *Diabetes Care*. 1997; 20:1706–10.
- Mueller M. Application of plantar pressure assessment in footwear and insert design. *J Orthop Sports Phys. Ther*. 1999; 29:747–5.
- Praet S, Louwerens J. The influence of shoe design on plantar pressures in neuropathic feet. *Diabetes Care*. 2003; 26:441–5.
- Queen RM, Abbey AN, Wiegerinck JI, Yoder JC, Nunley JA. Effect of shoe type on plantar pressure: A gender comparison. *Gait and Posture*. 2010;31:18–22.
- Larejani B, Zahedi F. Epidemiology of diabetes mellitus in Iran. *Iranian journal of Diabetes and metabolism*. 2001; 1 (1) :1-8
- Miranda DL, Hsu W-H, Gravelle DC, Petersen K, Ryzman R, Niemi J, Lesniewski-Laas N. Sensory enhancing insoles improve athletic performance during a hexagonal agility task. *J biomech*. 2016; 7:1058-63.
- Gregor K, Pias M, Bezodis I, Kerwin D, Coulouris G, Irwin G. Custom-built wireless pressure sensing insoles for determining contact-times in 60m maximal sprint running. In: *ISBS-Conference Proceedings Archive*. 2009;1(1):1-4.
- Saito M, Nakajima K, Takano C, Ohta Y, Sugimoto C, Ezoe R, Sasaki K, et al. An in-shoe device to measure plantar pressure during daily human activity. *Medical engineering and physics*. 2011;33(5):638-45.
- Interlink Electronics, Inc, “FSR 402”. Available at: <http://interlinkelectronics.com/FSR402.php> (cited 2019 July).

10. Mirzanejad H, Agheli M. Soft force sensor made of magnetic powder blended with silicone rubber. *Sensors and Actuators*. 2019; 293:108-118.
11. SS49E Linear Hall-Effect Sensor, ADDICARE-TM. (Online). Available: <https://www.addicore.com/SS49E-Linear-Hall-Sensor-p/ad316.htm> (cited 2019 July).

ارجاع دهی

عاقلی حاجی آبادی محمد مهدی، شریف نژاد علی، مجری تبریزی محمد. طراحی و ساخت کفی کفش هوشمند برای تحلیل راه رفتن. مطالعات طب ورزشی. بهار و تابستان ۱۳۹۸؛ ۱۱(۲۵): ۱۸۹-۲۰۶. شناسه دیجیتال: 10.22089/smj.2020.7683.1384

Sharifnezhad A, Mojarrabi Tabrizi M, Agheli Haji Abadi M. Design and Manufacturing of an Intelligent Insole for Gait Analysis. *Sport Medicine Studies*. Spring & Summer 2019; 11(25): 189-206. (In Persian). DOI: 10.22089/smj.2020.7683.1384

Design and Manufacturing of an Intelligent Insole for Gait Analysis

A. Sharifnezhad¹, M. Mojarrabi Tabrizi², M. M. Agheli Haji Abadi³

1. Department of Sport Biomechanics and Technology, Sport Science Research Institute, Tehran, Iran (Corresponding Author)

2. MSc, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3. Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Received: 2019/09/22

Accepted: 2020/04/04

Abstract

Plate foot pressure is the pressure that exists between the foot and the surface under it. Information extracted from such pressure is used for research on gait, balance, shoe design, sport biomechanics and injury prevention. Therefore, it is necessary to develop methods and systems for measuring pressure. A portable system is useful for stability analysis as well as motor behavior analysis. The intelligent insole system can also provide instantaneous information for trainer or even a medical person about motor behavior, stability and balance of subject via wireless data transmission. On the other hand, measurements of natural gait needs some parameters such as: portability of sensors, unlimited range of work, implantability of shoes or soles and readability of data in optimum conditions which are the main requirements of such sensors. The purpose of this study was to design and validate intelligent insoles capable of measuring biomechanical gait variables. After careful examination of the results and diagrams, the Hall effect sensor with a height of 5 mm and a diameter of 2 mm magnetic field was selected for implantation. After fabrication of the aforementioned insole, 10 subjects were randomly selected. In order to perform the test phase, each participant had to wear the pads and perform both static and dynamic (walking) experiments. Tests were performed for the insole equipped with a Hall effect sensor and compared with the results of the tests with the Pedar insoles system. The results of the two Pedar and Hall effect sensor tests were matched and the numerical regression coefficient were close to one indicating high concordance of the Pedar results with the Hall effect sensor. According to the results of this study, different types of sensors can be manufactured in different sizes and dimensions and there is more freedom in future for application of such insole. The aforementioned set of factors, in addition to providing a new application for Hall effect sensors, also promises the possibility of building a commercial product using this type of sensor.

Keywords: Sole plantar pressure, Pressure sensor, Wireless systems, Balance

1. Email: a_sharifnezhad@dr.com

2. Email: tabrizi1372@gmail.com

3. Email: mmagheli@gmail.com

