

مدل سازی الکترومکانیکی پارچه تار-پودی بافته شده با رشته های فلزی

Electromechanical Modeling of Woven Fabric Containing Metallic Filaments

مرضیه نظریان، پدram پیوندی*

یزد، دانشگاه یزد، مجتمع فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی ۷۴۱-۸۹۱۹۵

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۵/۱۵

چکیده

در سال های اخیر استفاده از پارچه های رسانای جریان الکتریکی به ویژه در پوشاک الکترونیکی و هوشمند گسترش زیادی یافته است. با توجه به اهمیت طراحی پارچه رسانا بر اساس خواص الکتریکی مدنظر، در این پژوهش مدلی الکترومکانیکی با استفاده از روش اجزای محدود برای پیش بینی مقاومت الکتریکی معادل پارچه های تار-پودی رسانای بافته شده با رشته فلزی ارائه شده است. مدل ارائه شده قابلیت بررسی اثر پارامترهایی نظیر زاویه قرارگیری پارچه نسبت به الکترودها، تراکم پارچه، ابعاد پارچه، مشخصات الکتریکی رشته فلزی استفاده شده و نیروی وارد بر پارچه را بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه دارد. به منظور بررسی صحت عملکرد مدل ارائه شده برای پیش بینی مقاومت الکتریکی معادل پارچه، پیش بینی های مدل سازی با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج حاصل از این بررسی، نمایانگر عملکرد مطلوب مدل الکترومکانیکی ارائه شده در پیش بینی اثر پارامترهای ذکر شده بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رساناست.

مقدمه

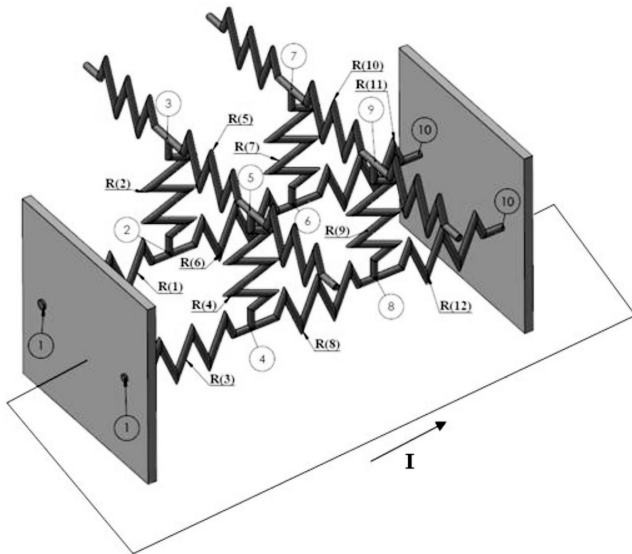
پودی رسانای جریان الکتریکی و انتقال گرما بررسی شده است [۴]. در مطالعه بعدی از نخ رسانا به عنوان رسانای جریان الکتریکی، برای ارتباط میان اجزای الکترونیکی در داخل پوشاک استفاده شد [۵]. پژوهش های انجام شده در سال ۲۰۰۴ نشان داد، مقدار تراکم و طرح پارچه به ترتیب ۹۰ و ۹۹ درصد بر ضریب رسانندگی گرمایی پارچه بافته شده با رشته فلزی اثر می گذارد [۶]. در مطالعه دیگری برای بررسی مقدار گرمای تولیدی، از سیم های رسانا (المنت های گرمایی) شامل مس و فولاد زنگ نزن به شکل ساده یا ناحیه ای به همراه نخ هایی از جنس آکرلیک و پلی استر در ساختار پارچه های حلقوی پودی ریب ۱×۱ استفاده شد. نتایج حاکی از اثر جنس رشته رسانا بر مقدار گرمای تولیدی و

مطالعه ضریب رسانندگی الکتریکی و گرمایی پارچه های رسانای بافته شده با رشته فلزی به علت کاربردهای مهندسی آنها اهمیت زیادی دارد [۱]. از جمله کاربردهای این پارچه ها را در زمینه منسوجات پزشکی [۱] و منسوجات هوشمند [۲] می توان نام برد. در سال ۱۹۵۲ پارچه های رسانای جریان الکتریکی و انتقال گرما به عنوان مجموعه از مقاومت های متوالی و موازی در نظر گرفته شد که زاویه تماس بین نخ ها و نیروی تماسی بین آنها از پارامترهای مهم اثرگذار روی جریان الکتریسیته و گرمای انتقالی شناخته شد [۳]. در مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران، اثر کشش و دما بر تغییر شکل پارچه تار-

کلمات کلیدی

مدل سازی الکترومکانیکی، پارچه رسانای تار-پودی، اجزای محدود، مقاومت الکتریکی، رشته فلزی

* مسئول مکاتبات، پیام نگار: peivandi@yazduni.ac.ir

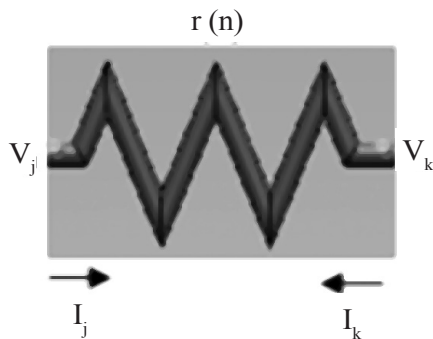


شکل ۲- یک قطعه پارچه رسانا شامل دو تار و دو پود محصور میان دو الکترو.

مشاهده می‌شود، مقاومت الکتریکی رشته محصور بین دو رشته موازی با R و مقاومت الکتریکی تماسی میان دو رشته متقاطع به R_c نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱- الف زاویه میان پارچه و الکترودها، به عنوان زاویه تماس (α) تعریف شده است و مقاومت الکتریکی پارچه رسانا (R_{total}) به شکل معادله (۱) است:

$$R_{total} = V/I \quad (1)$$

در این معادله، V و I به ترتیب ولتاژ و جریان میان الکترودهاست. پارچه رسانای جریان الکتریکی بافته شده با رشته فلزی را می‌توان به عنوان مدار الکتریکی که شامل مقاومت‌های متوالی و موازی است، در نظر گرفت (شکل ۱- ج). در شکل ۲ پارچه رسانا شامل دو تار و دو پود محصور در میان دو الکترو به شکل مجموعه‌ای از اجزای الکتریکی نشان داده شده است که در آن هر مقاومت، یک عنصر یا یک جزء الکتریکی است و محل تقاطع هر دو عنصر یک گره نامیده می‌شود. به‌طور مثال شکل ۲ شامل ۱۲ عنصر و ۱۰ گره است. در ادامه، مشخصه الکتریکی هر عنصر جزء الکتریکی مورد نیاز است. به عنوان مثال، برای



شکل ۳- یک مقاومت الکتریکی خطی (V_j ولتاژ گره j ، V_k ولتاژ گره k و $r(n)$ مقاومت الکتریکی عنصر n بین گره‌های j و k).

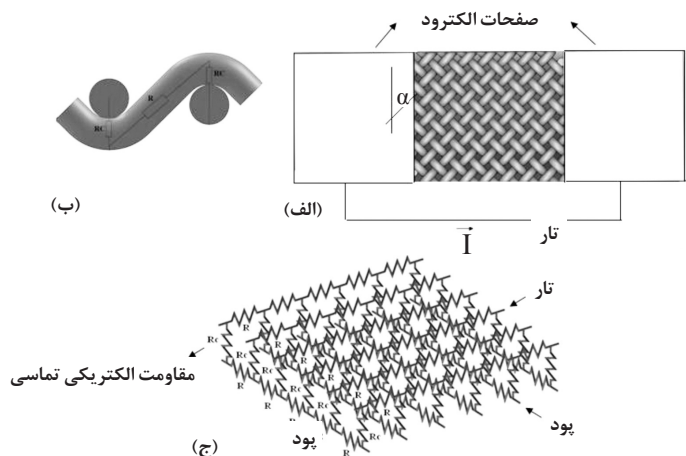
برتری رشته مسی نسبت به فولاد زنگ‌نزن در این زمینه بود [۷]. همچنین مقایسه طرح بافت پارچه‌های حلقوی نشان داد، تغییرات فشار در بافت ساده بیشترین اثر را بر مقاومت الکتریکی پارچه دارد، در حالی که بافت ریب 2×2 خواص رسانایی الکتریکی بهتری را نشان داد. نتایج حاکی از این موضوع است که استفاده از پارچه‌های حلقوی بافته شده همراه با رشته فلزی به عنوان حسگر فشار امکان‌پذیر است [۸]. در پژوهش انجام شده در سال ۲۰۰۸ برای اندازه‌گیری مقاومت تماسی در پارچه‌های بافته شده با رشته فلزی از روش گرمانگاری زیرقرمز استفاده شد [۹]. Banaszczyk و همکاران یک مدل الکتریکی نظری را براساس محاسبات تکراری برای تعیین تقریبی خواص الکتریکی پارچه‌های تار- پودی رسانای جریان الکتریکی تهیه شده از رشته فلزی، ارائه کردند [۱۰]. در آخرین مدل ارائه شده در این زمینه در سال ۲۰۰۹، Banaszczyk برای محاسبه مقدار مقاومت تماسی در نخ‌های پارچه به جای گذاری مقادیر تجربی اکتفا کرد. در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل الکتریکی ارائه شده توسط Banaszczyk مدل سازی الکتریکی پارچه براساس روش اجزای محدود انجام شد. همچنین، یک مدل مکانیکی برای محاسبه مقاومت الکتریکی تماسی براساس اطلاعات اولیه برای تکمیل مدل ارائه شد.

مدل سازی

مدل سازی الکتریکی

شرایط در نظر گرفته شده برای مدل سازی الکتریکی پارچه رسانای جریان الکتریکی به شرح زیر است:

- جنس رشته‌های تار و پودی یکسان در نظر گرفته شد.
- قطر رشته‌ها یکسان در نظر گرفته شد.
- تراکم تار و پودی با یکدیگر برابر در نظر گرفته شد.
- طرح کلی پارچه رسانای الکتریکی در شکل ۱- الف و مدل الکتریکی در شکل ۱- ب و ج نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱- ب



شکل ۱- طرح کلی: (الف) نحوه قرارگیری پارچه رسانا برای تعیین مقاومت معادل الکتریکی، (ب) مقاومت الکتریکی تماسی و (ج) مدل الکتریکی پارچه رسانا.

جدول ۱- دستگاه معادله‌های عناصر شکل ۲.

| شماره عنصر | دستگاه معادلات |
|------------|--|
| ۱ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(1)} & -\frac{1}{R(1)} \\ -\frac{1}{R(1)} & \frac{1}{R(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(1)_1 \\ I(1)_2 \end{bmatrix}$ |
| ۲ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(2)} & -\frac{1}{R(2)} \\ -\frac{1}{R(2)} & \frac{1}{R(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(2)_2 \\ I(2)_3 \end{bmatrix}$ |
| ۳ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(3)} & -\frac{1}{R(3)} \\ -\frac{1}{R(3)} & \frac{1}{R(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(3)_1 \\ I(3)_4 \end{bmatrix}$ |
| ۴ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(4)} & -\frac{1}{R(4)} \\ -\frac{1}{R(4)} & \frac{1}{R(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(4)_4 \\ I(4)_5 \end{bmatrix}$ |
| ۵ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(5)} & -\frac{1}{R(5)} \\ -\frac{1}{R(5)} & \frac{1}{R(5)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_3 \\ V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(5)_3 \\ I(5)_5 \end{bmatrix}$ |
| ۶ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(6)} & -\frac{1}{R(6)} \\ -\frac{1}{R(6)} & \frac{1}{R(6)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(6)_2 \\ I(6)_6 \end{bmatrix}$ |
| ۷ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(7)} & -\frac{1}{R(7)} \\ -\frac{1}{R(7)} & \frac{1}{R(7)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_6 \\ V_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(7)_6 \\ I(7)_7 \end{bmatrix}$ |
| ۸ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(8)} & -\frac{1}{R(8)} \\ -\frac{1}{R(8)} & \frac{1}{R(8)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_4 \\ V_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(8)_4 \\ I(8)_8 \end{bmatrix}$ |
| ۹ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(9)} & -\frac{1}{R(9)} \\ -\frac{1}{R(9)} & \frac{1}{R(9)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_8 \\ V_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(9)_8 \\ I(9)_9 \end{bmatrix}$ |
| ۱۰ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(10)} & -\frac{1}{R(10)} \\ -\frac{1}{R(10)} & \frac{1}{R(10)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_7 \\ V_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(10)_7 \\ I(10)_9 \end{bmatrix}$ |
| ۱۱ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(11)} & -\frac{1}{R(11)} \\ -\frac{1}{R(11)} & \frac{1}{R(11)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_6 \\ V_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(11)_6 \\ I(11)_{10} \end{bmatrix}$ |
| ۱۲ | $\begin{bmatrix} \frac{1}{R(12)} & -\frac{1}{R(12)} \\ -\frac{1}{R(12)} & \frac{1}{R(12)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_8 \\ V_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(12)_8 \\ I(12)_{10} \end{bmatrix}$ |

مقاومت الکتریکی (n) که بین گره‌های j و k قرار دارد (شکل ۳) خواهیم داشت:

$$I_j = \left(\frac{1}{r(n)} \right) \times (V_j - V_k) \quad (2)$$

$$I_k = \left(-\frac{1}{r(n)} \right) \times (V_j - V_k) \quad (3)$$

ماتریس معادله‌های (۱) و (۲) به شکل زیر است:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{r(n)} & -\frac{1}{r(n)} \\ -\frac{1}{r(n)} & \frac{1}{r(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_j \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_j \\ I_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

معادله (۴) یک دستگاه معادله الکتریکی است که هر عنصر نشان داده شده در شکل ۲ دارای چنین دستگاه معادله الکتریکی است. در روش اجزای محدود بنا به تعریف، ماتریس مربع سمت چپ معادله را ماتریس سختی هر عنصر و بردار سمت راست معادله را بردار نیرو می‌نامند [۱۱]. از آنجا که در شکل ۲ تعداد گره‌ها ۱۰ عدد است، ماتریس سختی نهایی به شکل ماتریس مربعی به ابعاد ۱۰×۱۰ به دست می‌آید. در جدول ۱ معادله‌های مربوط به هر عنصر نشان داده شده است. در ادامه با استفاده از قانون کیرشهف معادله‌های جریان هر گره مشخص می‌شود که معادله‌های مربوط در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- معادله‌های جریان گره‌های شکل ۲.

| شماره گره | معادلات جریان |
|-----------|-----------------------------------|
| ۱ | $I(1)_1 + I(1)_3 = I$ |
| ۲ | $I(2)_1 + I(2)_2 + I(2)_6 = I$ |
| ۳ | $I(3)_2 + I(3)_5 = I$ |
| ۴ | $I(4)_3 + I(4)_3 + I(4)_8 = I$ |
| ۵ | $I(5)_4 + I(5)_5 = I$ |
| ۶ | $I(6)_6 + I(6)_7 + I(6)_{11} = I$ |
| ۷ | $I(7)_7 + I(7)_{10} = I$ |
| ۸ | $I(8)_8 + I(8)_9 + I(8)_{12} = I$ |
| ۹ | $I(9)_9 + I(9)_{10} = I$ |
| ۱۰ | $I(10)_{11} + I(10)_{12} = I$ |

در مرحله بعد با جمع دستگاه معادله‌های عناصر خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R(1)} + \frac{1}{R(3)} & -\frac{1}{R(1)} & 0 & -\frac{1}{R(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R(1)} & \frac{1}{R(1)} + \frac{1}{R(2)} + \frac{1}{R(6)} & -\frac{1}{R(2)} & 0 & 0 & -\frac{1}{R(6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R(2)} & \frac{1}{R(2)} + \frac{1}{R(5)} & 0 & -\frac{1}{R(5)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R(3)} & 0 & 0 & \frac{1}{R(3)} + \frac{1}{R(4)} + \frac{1}{R(8)} & -\frac{1}{R(4)} & 0 & 0 & -\frac{1}{R(8)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R(5)} & -\frac{1}{R(4)} & \frac{1}{R(5)} + \frac{1}{R(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R(6)} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R(6)} + \frac{1}{R(7)} + \frac{1}{R(11)} & -\frac{1}{R(7)} & 0 & 0 & -\frac{1}{R(11)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R(7)} & \frac{1}{R(7)} + \frac{1}{R(10)} & 0 & -\frac{1}{R(10)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R(8)} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R(8)} + \frac{1}{R(9)} + \frac{1}{R(11)} & -\frac{1}{R(9)} & -\frac{1}{R(11)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R(10)} & -\frac{1}{R(9)} & \frac{1}{R(9)} + \frac{1}{R(10)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R(11)} & 0 & -\frac{1}{R(12)} & 0 & \frac{1}{R(11)} + \frac{1}{R(12)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \\ V5 \\ V6 \\ V7 \\ V8 \\ V9 \\ V10 \\ V11 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(1)1 + I(1)3 \\ I(2)1 + I(2)2 + I(2)6 \\ I(3)2 + I(3)5 \\ I(4)3 + I(4)4 + I(4)8 \\ I(5)4 + I(5)5 \\ I(6)6 + I(6)7 + I(6)11 \\ I(7)7 + I(7)10 \\ I(8)8 + I(8)9 + I(8)12 \\ I(9)9 + I(9)10 \\ I(10)11 + I(10)12 \end{bmatrix} \quad (5)$$

با استفاده از معادله‌های جدول ۲ و جای گذاری آنها در معادله (۵) خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R(1)} + \frac{1}{R(3)} & -\frac{1}{R(1)} & 0 & -\frac{1}{R(3)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R(1)} & \frac{1}{R(1)} + \frac{1}{R(2)} + \frac{1}{R(6)} & -\frac{1}{R(2)} & 0 & 0 & -\frac{1}{R(6)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R(2)} & \frac{1}{R(2)} + \frac{1}{R(5)} & 0 & -\frac{1}{R(5)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R(3)} & 0 & 0 & \frac{1}{R(3)} + \frac{1}{R(4)} + \frac{1}{R(8)} & -\frac{1}{R(4)} & 0 & 0 & -\frac{1}{R(8)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R(5)} & -\frac{1}{R(4)} & \frac{1}{R(5)} + \frac{1}{R(4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R(6)} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R(6)} + \frac{1}{R(7)} + \frac{1}{R(11)} & -\frac{1}{R(7)} & 0 & 0 & -\frac{1}{R(11)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R(7)} & \frac{1}{R(7)} + \frac{1}{R(10)} & 0 & -\frac{1}{R(10)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R(8)} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R(8)} + \frac{1}{R(9)} + \frac{1}{R(12)} & -\frac{1}{R(9)} & -\frac{1}{R(12)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R(10)} & -\frac{1}{R(9)} & \frac{1}{R(9)} + \frac{1}{R(10)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R(11)} & 0 & -\frac{1}{R(12)} & 0 & \frac{1}{R(11)} + \frac{1}{R(12)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \\ V4 \\ V5 \\ V6 \\ V7 \\ V8 \\ V9 \\ V10 \\ V11 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I \end{bmatrix} \quad (6)$$

رشته پود و A_c مساحت تماس حاصل از تقاطع رشته‌های تار و پودی است (شکل ۴). برای محاسبه مساحت سطح تماس از مدل Hertz [۱۳] استفاده شد. این مدل دارای فرضیه‌های به شرح زیر است:

- تنش‌ها کوچک و ناچیزند.
- شعاع تماس خیلی کوچک‌تر از شعاع هر سطح است.
- سطوح تماس دایره‌ای شکل‌اند.
- سطوح سایش ناپذیرند.

معادله شعاع تماسی مطابق با مدل Hertz [۱۳] به شکل زیر است:

$$r_c = \left(\frac{3Fr}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

در این معادله، F نیروی تماس، E^* مدول یانگ به‌دست آمده از مدول یانگ دو سطح E_1 و E_2 ، v_1 و v_2 ضریب پواسون دو سطح و r شعاع به‌دست آمده از شعاع دو سطح r_1 و r_2 است. در این معادله E^* و r با استفاده از معادله‌های زیر محاسبه می‌شوند [۱۴]:

$$\frac{1}{E^*} \equiv \frac{(1 - \theta_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \theta_2^2)}{E_2} \quad (9)$$

در نهایت با حل معادله (۶) مقدار پتانسیل الکتریکی در تمام گره‌ها مشخص می‌شود که می‌توان با مشخص بودن پتانسیل گره‌ها مقدار جریان الکتریکی در هر بخش از پارچه و همچنین مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا را به‌دست آورد.

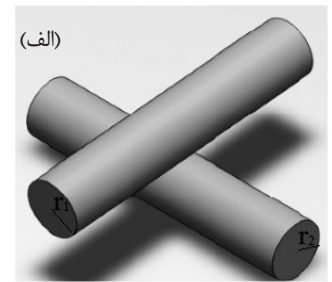
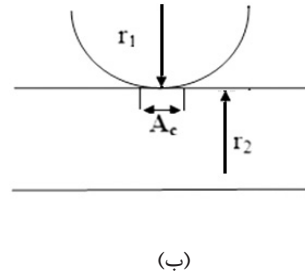
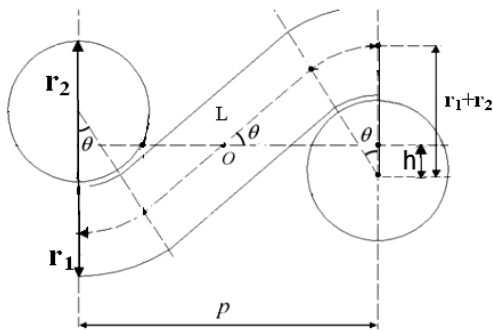
همان‌طور که قبلاً بیان شد، مقاومت الکتریکی پارچه رسانا دو نوع R و R_c است. با توجه به اینکه ورودی‌های مدل، زاویه قرارگیری پارچه نسبت به صفحه الکترودها (α)، تراکم تار و پودی و ابعاد پارچه است، برای انجام محاسبات، تعیین مقاومت الکتریکی تماسی میان دو رشته متقاطع ضروری است. بدین منظور یک مدل مکانیکی برای محاسبه مقاومت الکتریکی تماسی (R_c) ارائه شد.

مدل سازی مکانیکی سطح تماس رشته‌ها

برای محاسبه مقاومت الکتریکی تماسی حاصل از تقاطع رشته‌های تار و پودی از معادله (۷) استفاده شد [۱۲]:

$$R_c = \frac{\rho(r_1 + r_2)}{A_c} \quad (7)$$

در این معادله، ρ مقاومت ویژه الکتریکی رشته، r_1 شعاع رشته تار، r_2 شعاع



شکل ۴- (الف) نمایی از دو رشته متقاطع و (ب) نقطه تماس دو رشته متقاطع.

شکل ۵- برش تار پارچه رسانا با سطح مقطع دایره‌ای پود (مدل Peirce) [۱۵].

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (10)$$

با معلوم بودن تراکم پارچه، مقدار L مشخص می‌شود. با محاسبه شعاع تماسی به کمک معادله (۸)، مساحت سطح تماس برابر است با:

برای محاسبه شعاع تماسی نیاز به محاسبه نیروی تماسی (F) است که حداقل مقدار آن برابر با وزن رشته قرار گرفته روی رشته دیگر و برابر است با:

$$A_c = \pi \times r_c^2 \quad (14)$$

$$F = mg = \rho_w Vg = \rho_w \pi \left(\frac{(r_1 + r_2)^2}{4} \right) g \times 2 \times L \quad (11)$$

با به دست آوردن مساحت سطح تماس، مقاومت الکتریکی تماسی حاصل از تقاطع رشته‌های تار و پودی (مطابق با معادله ۷) محاسبه می‌شود. در نهایت، برای به کارگیری مدل الکترومکانیکی شرح داده شده، طراحی و کدنویسی در زبان برنامه‌نویسی انجام شد. برنامه نوشته شده قابلیت محاسبه ماتریس معادله (۶) را با هر تعداد تار و پود و همچنین با در نظر گرفتن زاویه قرارگیری پارچه نسبت به صفحه‌های الکترودها (α) دارد.

در این معادله، ρ_w چگالی جرمی، L طول رشته محصور بین رشته‌های متقاطع و g شتاب گرانشی زمین است.

برای محاسبه طول رشته محصور بین رشته‌های متقاطع از مدل Peirce [۱۵] و با فرض $h=0$ (شکل ۵) استفاده شد:

$$L = 2 \times (r_1 + r_2) \times \left(\theta + \frac{1}{\sin \theta} \right) \quad (12)$$

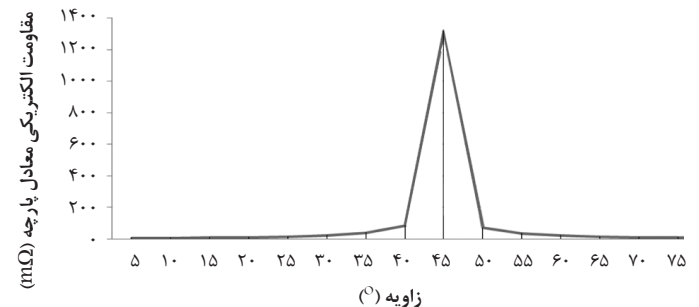
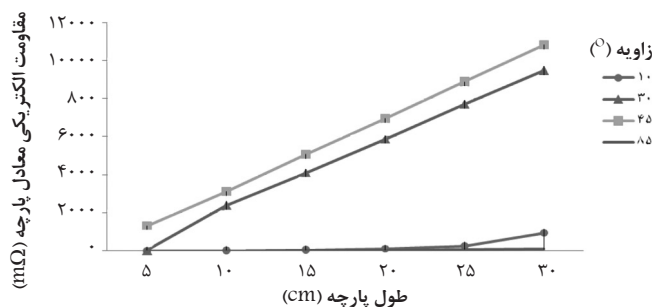
پیش‌بینی مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا با استفاده از مدل ارائه شده

در این معادله، P فضای رشته (فاصله رشته‌ها)، θ حداکثر زاویه محور رشته نسبت به سطح پارچه رسانا بر حسب رادیان و L طول رشته محصور بین رشته‌های متقاطع است. همچنین، در معادله (۱۲) θ برابر است با:

اثر زاویه تماس بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا

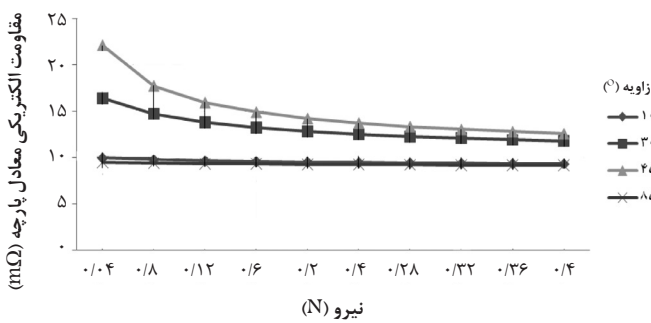
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2(r_1 + r_2)}{P} \right) \quad (13)$$

با استفاده از مدل الکترومکانیکی ارائه شده می‌توان اثر تغییر زاویه بین پارچه و صفحه‌های الکترودها را بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانای یافته‌شده با رشته فلزی بررسی کرد.

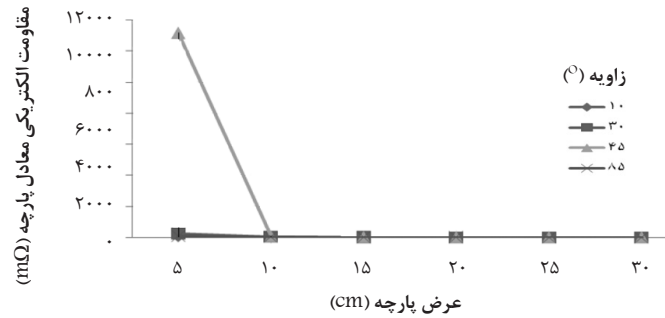


شکل ۷- اثر افزایش طول پارچه رسانا بر مقاومت الکتریکی معادل آن برای تراکم تار و پودی برابر با ۸/۵/cm.

شکل ۶- اثر تغییر زاویه بین پارچه و صفحه‌های الکترودها بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا برای تراکم تار و پودی برابر با ۸/۵/cm و طول و عرض پارچه برابر با ۵ cm.



شکل ۱۰- اثر نیرو بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا برای تراکم تار و پودی برابر با $8/5 \text{ cm}$ و طول و عرض پارچه برابر با 5 cm .



شکل ۸- اثر افزایش عرض پارچه رسانا بر مقاومت الکتریکی معادل آن برای تراکم تار و پودی برابر با $8/5 \text{ cm}$.

فشاری استفاده کرد. همچنین، در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش نیرو، مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا در زاویه‌های متفاوت کاهش می‌یابد.

بررسی صحت عملکرد مدل

برای بررسی صحت مدل ارائه شده در بخش تجربی از نمونه پارچه تهیه شده از رشته فلزی استفاده شد. ویژگی‌های رشته فلزی و همچنین پارچه استفاده شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی پارچه رسانای تهیه شده از رشته فلزی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی پارچه رسانای تهیه شده از رشته فلزی از دستگاه میلی‌اهم‌متر CROPICO مدل 4002Ω استفاده شد که قابلیت اندازه‌گیری مقاومت را در محدوده $4 \text{ m}\Omega$ تا 400Ω دارد. همچنین، از چهار صفحه الکتروود با ابعاد $5 \times 5 \text{ cm}$ استفاده شد که روی هر یک از صفحه‌ها یک سیم لحیم شده بود. سپس، سیم‌های صفحه‌های متقابل در زیر و روی پارچه

جدول ۳- مشخصات رشته فلزی و نمونه پارچه رسانای جریان الکتریکی.

| مقدار | مشخصه رشته فلزی |
|-----------|----------------------------|
| مس | جنس |
| 0.192 | قطر (cm) |
| 0.34 | ضریب پواسون |
| $110-128$ | مدول یانگ (GPa) |
| $8/94$ | چگالی (g/cm^3) |
| دایره | سطح مقطع |
| | مشخصه پارچه |
| $8/5$ | تراکم تار (cm) |
| $8/5$ | تراکم پودی (cm) |
| تافتة | نوع بافت |

نتایج حاصل از این تغییرات در ابعاد و تراکم مشخص در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا در زاویه ۴۵ درجه مشاهده می‌شود.

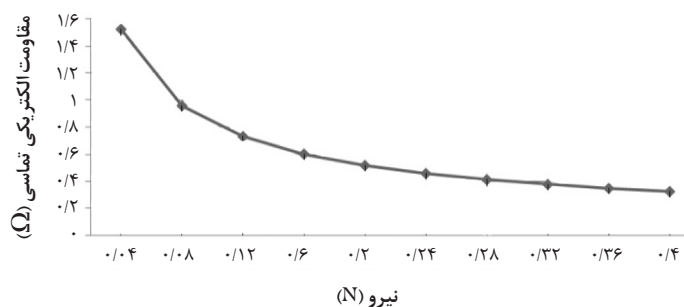
اثر اندازه پارچه رسانا بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا

اثر ابعاد پارچه بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا در طول و عرض‌های مختلف و برای زاویه‌های متفاوت، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش طول پارچه رسانا مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۸، با افزایش عرض پارچه مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا کاهش می‌یابد. سرعت افزایش مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا با افزایش طول پارچه و کاهش مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا با افزایش عرض پارچه در زاویه ۴۵ درجه شدیدتر است.

اثر نیرو بر مقاومت الکتریکی تماسی و مقاومت الکتریکی پارچه رسانا

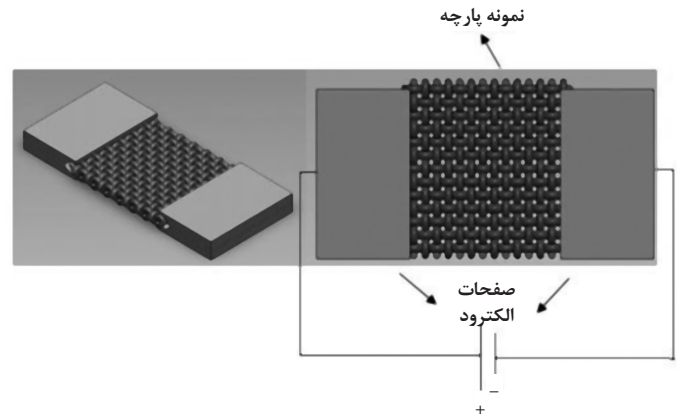
با مدل ارائه شده می‌توان اثر تغییر نیروی فشاری را بر مقاومت الکتریکی تماسی میان رشته‌های متقاطع بررسی کرد. نتایج حاصل از این تغییرات در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش نیرو، مقاومت الکتریکی تماسی میان رشته‌های متقاطع کاهش می‌یابد.

از این اثر می‌توان در طراحی پارچه‌ای با قابلیت واکنش به نیروی



شکل ۹- اثر نیرو بر مقاومت الکتریکی تماسی پارچه رسانا.

طرح کلی آزمون در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج مقاومت الکتریکی نمونه پارچه رسانا در فواصل متفاوت صفحه‌های الکتروود (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ cm) در زاویه ۹۰ درجه در جدول ۴ آمده است. همچنین، مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا برای زاویه‌های متفاوت قرارگیری پارچه نسبت به صفحه‌های الکتروودها (۳۰، ۴۰، ۴۵، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ درجه) با استفاده از دستگاه میلی اهم‌متر به دست آمده و نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۱- پارچه رسانای جریان الکتریکی محصور بین صفحه‌های الکتروود.

نتایج و بحث

مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی الکترومکانیکی پارچه رسانا با مقادیر تجربی

برای مقایسه نتایج به دست آمده از مدل با مقادیر تجربی، پارامترهای

به یکدیگر متصل شده و برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی معادل پارچه در بین صفحات، در نهایت دو رشته سیم حاصل به میلی اهم‌متر متصل شد.

جدول ۵- مقاومت الکتریکی معادل (mΩ) پارچه رسانا در زاویه‌های متفاوت قرارگیری پارچه با صفحه‌های الکتروودها.

جدول ۴- مقاومت الکتریکی معادل (mΩ) پارچه رسانا برای فاصله‌های متفاوت صفحه‌های الکتروود در زاویه ۹۰°.

| شماره نمونه | زاویه‌های تماس (°) | | | | | |
|-------------|--------------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | ۹۰ | ۸۰ | ۶۰ | ۴۵ | ۴۰ | ۳۰ |
| ۱ | ۹/۷۹ | ۲۴/۸۹ | ۷۷/۹۶ | ۱۱۹۵/۳ | ۲۳/۰۳ | ۹/۳۹ |
| ۲ | ۹/۷۷ | ۲۴/۸۷ | ۷۷/۹۵ | ۱۱۹۵/۵ | ۲۳/۰۲ | ۹/۴۱ |
| ۳ | ۹/۷۵ | ۲۴/۸۶ | ۷۷/۹۴ | ۱۱۹۵/۳ | ۲۳/۰۷ | ۹/۴۶ |
| ۴ | ۹/۷۴ | ۲۴/۸۷ | ۷۷/۹۴ | ۱۱۹۵/۱ | ۲۳/۰۴ | ۹/۴۱ |
| ۵ | ۹/۷۲ | ۲۴/۸۹ | ۷۷/۹۲ | ۱۱۹۵/۸ | ۲۳/۰۱ | ۹/۴۷ |
| ۶ | ۹/۷۱ | ۲۴/۸۲ | ۷۷/۸۸ | ۱۱۹۵/۶ | ۲۳/۰۳ | ۹/۴۴ |
| ۷ | ۹/۷۱ | ۲۴/۸۵ | ۷۷/۷۵ | ۱۱۹۵/۱ | ۲۳/۰۵ | ۹/۴۳ |
| ۸ | ۹/۷۰ | ۲۴/۹۲ | ۷۶/۹۹ | ۱۱۹۵/۳ | ۲۳/۰۹ | ۹/۴۳ |
| ۹ | ۹/۷۰ | ۲۴/۸۵ | ۷۷/۹۰ | ۱۱۹۵/۳ | ۲۳/۰۶ | ۹/۴۷ |
| ۱۰ | ۹/۷۰ | ۲۴/۸۱ | ۷۷/۸۹ | ۱۱۹۵/۷ | ۲۳/۰۵ | ۹/۴۶ |
| ۱۱ | ۹/۶۹ | ۲۵/۱۱ | ۷۷/۸۷ | ۱۱۹۵/۵ | ۲۳/۰۹ | ۹/۴۳ |
| ۱۲ | ۹/۶۸ | ۲۵/۴۲ | ۷۷/۸۷ | ۱۱۹۵/۸ | ۲۳/۰۸ | ۹/۴۱ |
| ۱۳ | ۹/۶۸ | ۲۴/۹۲ | ۷۷/۶۵ | ۱۱۹۵/۴ | ۲۳/۰۸ | ۹/۳۹ |
| ۱۴ | ۹/۶۷ | ۲۴/۹۲ | ۷۷/۸۷ | ۱۱۹۵/۷ | ۲۳/۰۹ | ۹/۳۹ |
| ۱۵ | ۹/۶۵ | ۲۵/۰۱ | ۷۷/۸۸ | ۱۱۹۵/۱ | ۲۳/۱۲ | ۹/۴۰ |
| میانگین | ۹/۷۱ | ۲۴/۹۳ | ۷۷/۸۱ | ۱۱۹۵/۴۳ | ۲۳/۰۶ | ۹/۴۳ |
| Cv% | ۰/۳۹۲ | ۰/۶۱۹ | ۰/۳۱۱ | ۰/۰۲۱ | ۰/۱۳۶ | ۰/۳۰۷ |

| شماره نمونه | فاصله صفحه‌های الکتروود (cm) | | | | |
|-------------|------------------------------|-------|-------|-------|------|
| | ۲۵ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۵ |
| ۱ | ۳۸/۹۸ | ۳۱/۲۹ | ۲۳/۰۷ | ۱۵/۲۹ | ۸/۵۱ |
| ۲ | ۳۸/۹۶ | ۳۱/۲۵ | ۲۳/۰۱ | ۱۵/۲۷ | ۸/۵ |
| ۳ | ۳۸/۹۲ | ۳۱/۳۱ | ۲۳/۰۴ | ۱۵/۲۵ | ۸/۴۸ |
| ۴ | ۳۸/۹۵ | ۳۱/۲۹ | ۲۳/۰۱ | ۱۵/۲۴ | ۸/۴۸ |
| ۵ | ۳۸/۹۱ | ۳۱/۲۷ | ۲۳/۰۸ | ۱۵/۲۲ | ۸/۴۴ |
| ۶ | ۳۸/۹۳ | ۳۱/۳۰ | ۲۳/۰۵ | ۱۵/۲۰ | ۸/۴۱ |
| ۷ | ۳۸/۸۹ | ۳۱/۲۵ | ۲۳/۰۳ | ۱۵/۲۰ | ۸/۴۱ |
| ۸ | ۳۸/۹۰ | ۳۱/۲۵ | ۲۳/۰۸ | ۱۵/۲۳ | ۸/۴۰ |
| ۹ | ۳۸/۸۸ | ۳۱/۳۱ | ۲۳/۰۷ | ۱۵/۲۱ | ۸/۳۷ |
| ۱۰ | ۳۸/۹۱ | ۳۱/۳۱ | ۲۳/۰۶ | ۱۵/۲۵ | ۸/۳۹ |
| ۱۱ | ۳۸/۹۵ | ۳۱/۲۹ | ۲۳/۰۹ | ۱۵/۲۹ | ۸/۴۰ |
| ۱۲ | ۳۸/۹۵ | ۳۱/۲۹ | ۲۳/۰۲ | ۱۵/۲۸ | ۸/۳۶ |
| ۱۳ | ۳۸/۹۳ | ۳۱/۲۶ | ۲۳/۰۴ | ۱۵/۲۸ | ۸/۳۸ |
| ۱۴ | ۳۸/۹۵ | ۳۱/۲۵ | ۲۳/۰۷ | ۱۵/۲۷ | ۸/۳۶ |
| ۱۵ | ۳۸/۹۷ | ۳۱/۲۶ | ۲۳/۰۹ | ۱۵/۲۵ | ۸/۴۰ |
| میانگین | ۳۸/۹۳ | ۳۱/۲۸ | ۲۳/۰۵ | ۱۵/۲۵ | ۸/۴۲ |
| Cv% | ۰/۰۷۷ | ۰/۰۷۶ | ۰/۱۲ | ۰/۲۰۶ | ۰/۶۰ |

جدول ۶- مقادیر پارامترهای ورودی مدل.

| مقدار | پارامتر |
|------------------------|---|
| ۸/۵ | تراکم تار (cm) |
| ۸/۵ | تراکم پودی (cm) |
| ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ | فاصله صفحه‌های الکتروود (cm) |
| ۱۰، ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۶۰، ۸۰ | زاویه قرارگیری پارچه با صفحه‌های الکتروودها (°) |

ورودی مدل که شامل فاصله صفحه‌های الکتروود، تراکم تار و پودی، مقاومت رشته فلزی و زاویه قرارگیری پارچه با صفحه‌های الکتروودهاست، با توجه به نمونه‌های مورد آزمون مطابق جدول ۶ معین شد.

جدول ۸- مقایسه نتایج مدل سازی و تجربی مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا در فاصله‌های متفاوت صفحه‌های الکتروود در زاویه ۹۰°.

| درصد خطا | میانگین مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا (mΩ) | | فاصله صفحه‌های الکتروود (cm) |
|----------|--|-------|------------------------------|
| | مدل سازی | تجربی | |
| ۳/۴۴ | ۸/۱۳۰۳ | ۸/۴۲ | ۵ |
| ۶/۶۳ | ۱۶/۲۶۰۶ | ۱۵/۲۵ | ۱۰ |
| ۵/۸۲ | ۲۴/۰۳۹۰۸ | ۲۳/۰۵ | ۱۵ |
| ۳/۹۷ | ۳۵/۵۲۱۱ | ۳۱/۲۸ | ۲۰ |
| ۴/۴۲ | ۴۰/۶۵۱۴ | ۳۸/۹۳ | ۲۵ |

ایجاد خطا در آزمون می‌شود. مقدار اختلاف ناچیز بین پیش‌بینی مدل و نتایج تجربی بیانگر این موضوع است که مدل الکترومکانیکی ارائه شده به‌خوبی قابلیت پیش‌بینی اثر پارامترهایی مانند زاویه قرارگیری پارچه نسبت به صفحه‌های الکتروودها و ابعاد پارچه را دارد. همچنین، به کمک این مدل می‌توان اثر نیروهای متفاوت بر مقاومت الکتریکی تماسی دو رشته متقاطع را بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانای بافته‌شده با رشته فلزی پیش‌بینی کرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدلی الکترومکانیکی برای پیش‌بینی مقاومت الکتریکی معادل پارچه‌های تار-پودی رسانای بافته‌شده با رشته فلزی ارائه شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی نمایانگر کارایی مدل ارائه شده برای پیش‌بینی مقاومت الکتریکی معادل پارچه رساناست. مدل ارائه شده قابلیت بررسی اثر پارامترهایی مانند زاویه قرارگیری پارچه با صفحه‌های الکتروودها، ابعاد پارچه و فشار وارد بر مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانای بافته‌شده را با رشته فلزی دارد. همچنین، این مدل دارای محدودیت‌هایی نظیر برابر بودن تراکم تار و پودی، یکسان بودن نمره و جنس رشته تار و پودی است. از نتایج این مدل می‌توان برای پیش‌بینی و طراحی حسگرهای فشاری پارچه‌ای استفاده کرد.

مراجع

- Lawrence M., Kirstein T., and Keller T., Textile electrodes for transcutaneous electrical stimulation, Emergency Media and Public Affairs (EMPA) Conference talk, DU-bendorf, Switzerland, 2004.
- Locher I., Klemm M., Kirstein T., and Troster G., Design and characterization of purely textile patch antennas, *IEEE*

مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی الکتریکی پارچه رسانا با مقادیر تجربی اعتبار مدل با مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده بررسی شد. مقایسه نتایج مدل سازی و تجربی (حاصل از آزمون) در زاویه‌های متفاوت قرارگیری پارچه نسبت به صفحه‌های الکتروودها و همچنین در فواصل متفاوت صفحه‌های الکتروود در جدول‌های ۷ و ۸ آمده است. همان‌طور که در این جدول‌ها مشاهده می‌شود، هنگامی که پارچه زاویه‌دار با صفحه‌های الکتروود قرار می‌گیرد، درصد خطا بیشتر است. علت موضوع این است، هنگامی که پارچه رسانا با زاویه ۹۰ درجه نسبت به صفحه‌های الکتروود قرار می‌گیرد، مقاومت الکتریکی تماسی هیچ اثری روی مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا ندارد و هنگامی که پارچه زاویه‌دار با صفحه‌های الکتروود قرار می‌گیرد، مقاومت الکتریکی تماسی نقش مهمی در مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا دارد و به علت حرکت و جابه‌جایی رشته‌ها در نقاط تقاطع و احتمال اکسیدبودن سطح رشته‌ها در نقطه تماس، مقاومت الکتریکی تماسی تغییر می‌کند و باعث

جدول ۷- مقایسه نتایج مدل سازی و تجربی مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا در زاویه‌های متفاوت قرارگیری الکتروودها روی سطح پارچه.

| درصد خطا | میانگین مقاومت الکتریکی معادل پارچه رسانا (mΩ) | | زاویه قرارگیری پارچه با صفحه الکتروودها (°) |
|----------|--|---------|---|
| | مدل سازی | تجربی | |
| ۸/۲۷ | ۱۰/۵۱۲۹ | ۹/۷۱ | ۱۰ |
| ۸/۰۸ | ۲۶/۹۴۴۴ | ۲۴/۹۳ | ۳۰ |
| ۱۲/۸۹ | ۸۷/۸۴۶۰ | ۷۷/۸۱ | ۴۰ |
| ۱۰/۲۴ | ۱۳۱۷/۹ | ۱۱۹۵/۴۳ | ۴۵ |
| ۹/۱۵ | ۲۵/۱۶۸۹ | ۲۳/۰۶ | ۶۰ |
| ۸/۰۲ | ۱۰/۱۸۶۶ | ۹/۴۳ | ۸۰ |
| ۳/۴۴ | ۸/۱۳۰۳ | ۸/۴۲ | ۹۰ |

- Transactions on Advanced Packaging*, 29, 777-788, 2006.
3. Hersh S.P. and Montgomery D.J., Electrical resistance measurements on fibers and fiber assemblies, *J. Tex. Res.*, 22, 805-818, 1952.
 4. De Rossi D., Della Santa A., and Mazzoldi A., Wearable hardware, *J. Mater. Sci. Eng.*, 7, 31-35, 1999.
 5. Boderover E. and Wagner S., A Woven inverter circuit for e-Textile Applications, *IEEE Electron Device Letters*, 25, 295-297, 2004.
 6. Uçar N. and Yılmaz T., Thermal properties of 1×1, 2×2, 3×3 Rib knit fabrics, *Fibres Text. East. Eur.*, 12, 34-38, 2004.
 7. مصفا، ع.، پارچه‌های گرمازا با بافت‌های مختلف حلقوی پودی جهت کنترل انتقال حرارتی، پایان نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۶.
 8. پورباقی، ر.، حاجب، ا.، و پیوندی، پ.، بررسی خصوصیات الکتریکی و حرارتی پارچه‌های هادی حلقوی بافته شده همراه با سیم رشته فلزی، اولین کنفرانس بین‌المللی و هفتمین کنفرانس ملی نساجی ایران، رشت، ۱۳۸۸.
 9. Banaszky J., Anca A., and De Mey G., Infrared thermography of electroconductive woven textiles, *The Proceedings of the 9th International Conference of Quantitative Infra Red Thermography*, Krakow, Poland, 2-5 July, 2008.
 10. Banaszczyk J., De Mey, G., Schwarz A., and Van Langenhove L., Current distribution modelling in electroconductive fabrics, *Fibres Text. East. Eur.*, 17, 28-33, 2009.
 11. افجهای، ا.، مقدمه‌ای بر روش اجزای محدود، شرکت چاپ و نشر پرنیان، چاپ اول، ۱۳۷۷.
 12. Henry T., *Ohm's Law, Electrical Math and Voltage Drop Calculations*, Tom Henrys Code Electrical, Revised ed., 1992.
 13. Hertz H.R., Ueber die beruehrung elastischer koerper (On contact between elastic bodies), *Gesammelte Werke* (Collected Works), Leipzig, Germany, 1, 324-347, 1882.
 14. Adams G.G. and Nosonovsky M., Contact modeling-forces, *Tribol. Int.*, 33, 431-442, 2000.
 15. Peirce F.T., The geometry of cloth structure, *J. Text. Inst.*, 28, 45-96, 1937.