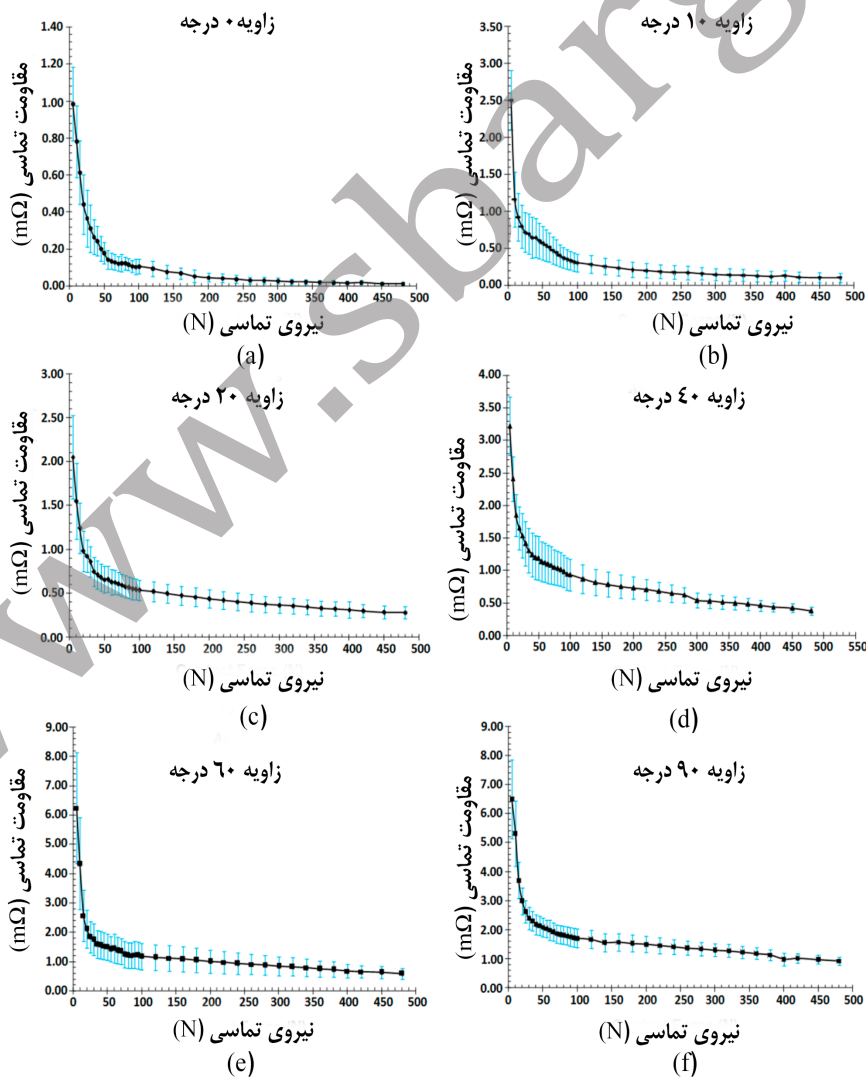


## ارتباط مقاومت تماسی بر طراحی هادی‌های تابیده – بخش دوم (پایانی)

ترجمه: مهندس محمدباقر پورعبداله (کارشناس صنایع)

نیروی اعمال شده برای همه زوایای تعیین شده مشابه آنچه که قبلاً عرضه شد، می‌باشد. شکل ۴ اثر زاویه تقاطع بر تغییرات مقاومت الکتریکی را نشان می‌دهد. با کاهش زاویه تقاطع، هادی‌های تماس با هم به سمت قرارگیری هادی‌ها به صورت موازی، که این امر در زاویه صفر درجه اتفاق می‌افتد، مقاومت الکتریکی نیز کاهش بیشتری نشان می‌دهد و پایدارتر خواهد بود.

بررسی در مورد تأثیر زاویه تقاطع در زوایای ۱۰ درجه‌ای انجام شده است. این بررسی‌ها به سمتی سوق داده شده‌اند که تکرارپذیری منحنی‌ها را ارزیابی نماید و آنچه در پی می‌خوانید تنها برای منحنی‌های بدست آمده در مورد زوایای ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۵۰، ۸۰ و ۹۰ درجه می‌باشد. این منحنی‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. به دلیل پرهیز از ابهام، نتایج مربوط به برخی از زوایا ارائه نشده است. می‌توان مشاهده کرد که ارتباط عملکرد مقاومت الکتریکی به



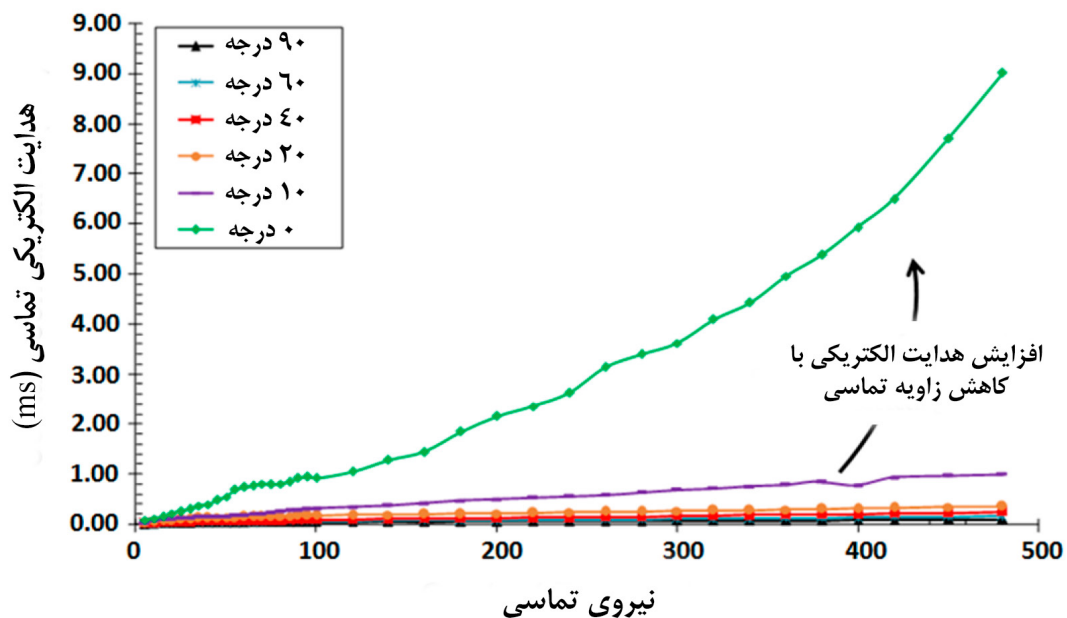
شکل ۴. مقاومت سطح تماس بر مبنای زاویه بین سیم‌های متقاطع، قطر سیم ۱/۸ میلی‌متر است

طرفی ممکن است با فرآیند هادی‌های چند رشته‌ای که در هنگام تابیدن هادی نیروهای مختلفی بکار می‌رود، مرتبط دانست. به طور کلی می‌توان گفت هر چند نیروی اعمال شده بیشتر باشد، مقاومت تماسی کمتر است. در شکل ۴ روی هر منحنی پراکندگی اندازه‌گیری و مقادیر میانگین نشان داده شده است.

شکل ۵ هدایت الکتریکی تماسی (۱/RC) را برای دو زاویه حدی ۰ و ۹۰ درجه در ارتباط با نیروی اعمال شده نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، هدایت الکتریکی برای زاویه تقاطع ۰ درجه بیشتر است. دلیل این امر افزایش سطح تماس با کاهش زاویه تقاطع بین هادی‌ها است.

با جمع‌بندی نتایج می‌توان چنین استنباط کرد که روند خاصی برای اندازه‌گیری‌های مختلف عمومیت دارد. در بخش اول منحنی‌ها این ویژگی، یعنی در نیروهای بین ۵ تا ۳۰ نیوتن، کاهش پرشیبی در مقاومت الکتریکی وجود دارد، و در پی آن، در محدوده نیروی بین ۳۰ تا ۱۰۰ نیوتن یک "نقطه زانویی معکوس" رخ می‌دهد که می‌توان آن را با پدیده تغییر شکل پلاستیکی در ناحیه تماس مربوط دانست در حالی که مابقی مواد هادی از تغییر شکل الاستوپلاستیک بهره می‌برد.

بخش پایانی منحنی به طور آشکار رفتاری کاملاً "پایدار" را تا حداکثر نیروی اعمال شده نشان می‌دهد. هر یک از این بخش‌ها از



شکل ۵. تغییرات هدایت الکتریکی به عنوان تابعی از نیروی تماس دو شکل قرارگیری حدی هادی‌ها (زاویه ۰ و ۹۰ درجه)

به منظور مشارکت دادن این موضوع به مدل بررسی ما، لازم است تجزیه و تحلیل مکانیکی را با توصیف الکتریکی در هم آمیخت زیرا هنگامی که دو هادی به درون یکدیگر نفوذ می‌کنند خواص فیزیکی و مکانیکی آنها دستخوش تغییر می‌شود. ابعاد دقیق چنین طرحی در زیر میکروسکوپ مشاهده شده است (وضوح تصویر بر اساس ۲۰۰ میکرومتر است) که در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. شکل ۶ ترتیب قرارگیری هادی‌ها را به صورت موازی نشان می‌دهد. مساحت

### ۳-۲- تأثیر تغییرات سطح تماس

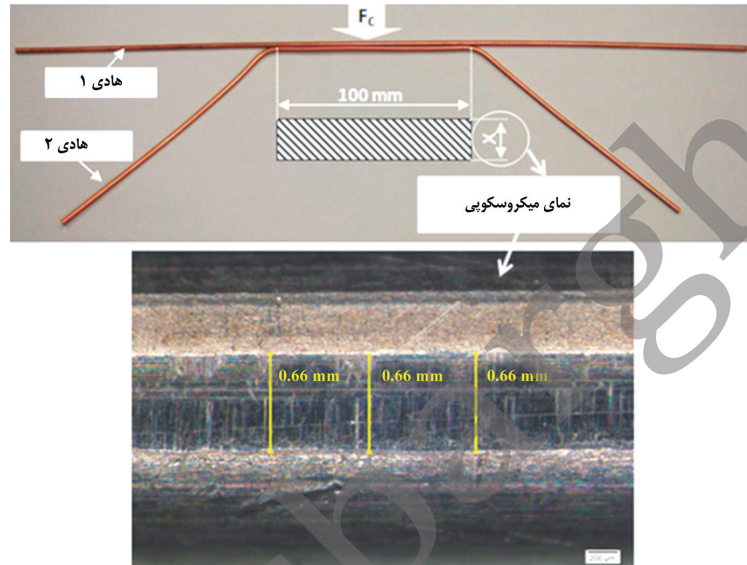
اثر دیگری که به نیروی اعمال شده بستگی دارد و در حین انجام آزمون به صورت تغییرات در مقاومت الکتریکی تماسی مشاهده می‌شود. این اثر به سطح تماس تشکیل شده توسط زاویه تقاطع بین دو سیم مربوط است. باید توجه نمود که نه تنها توزیع مقاومت تماسی غیریکنواخت است بلکه عمق نفوذ یک هادی به درون هادی دیگر نیز ثابت نیست.

مستطیل مورد نظر افزایش می‌یابد. مساحت مستطیل را در نتیجه می‌توان به صورت:

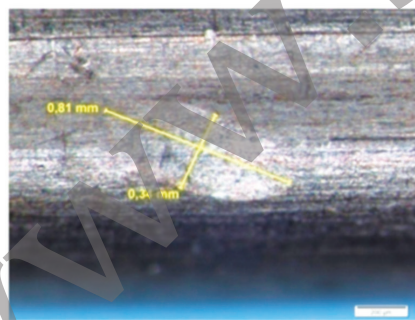
$$S=100 \times [(0.386+0.258+0.279+0.274)/4]=2.35 \text{ mm}^2$$

محاسبه نمود.

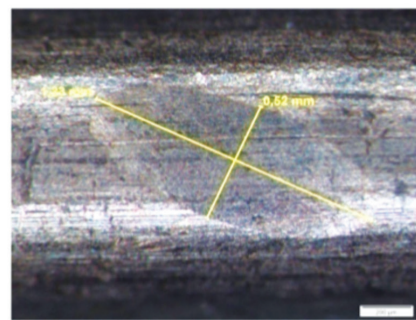
سطح تماس تحت نیروی حداکثر در زاویهٔ صفر درجه را شاید بتوان از نظر تحلیلی توسط تقریب شکل سطح تماس بین دو استوانهٔ موازی با مستطیلی به طول مشخص و مساوی با طول نمونهٔ بکار رفته در اندازه‌گیری پیدا نمود. اعمال نیروی زیاد ۴۸۰ نیوتنی منجر به صاف شدن سطح نایک‌نواخت تماس می‌شود و در نتیجه سطح تماس همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، به حد سطح کامل



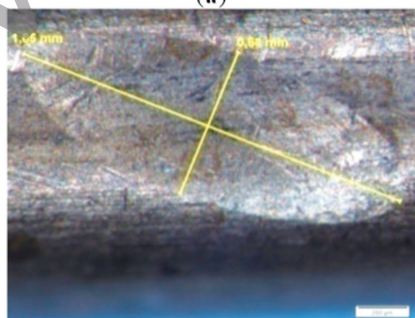
شکل ۶. اندازه‌گیری شکل سطح تماس در یک زاویهٔ تقاطع + درجه برای نیروی تماسی ۴۸۰ نیوتنی و تنش معادل ۷/۲۷ نیوتن بر میلی‌متر مربع



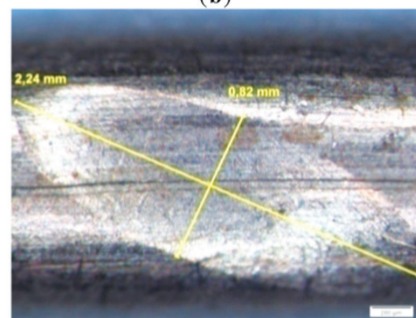
(a)



(b)



(c)



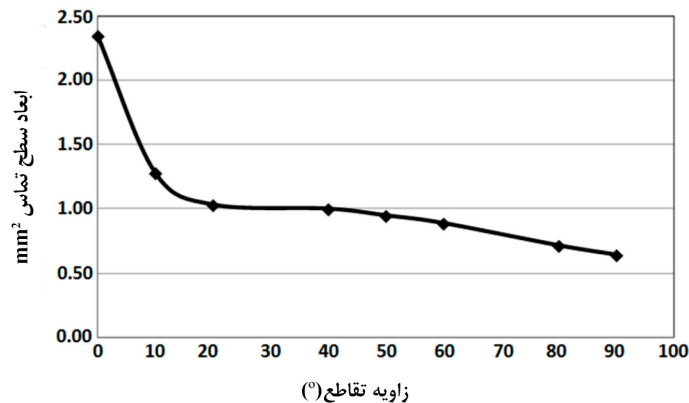
(d)

شکل ۷. طرح حاصله بر روی سیم برای زاویهٔ تماس ۴۵ درجه تحت نیروهای تماسی نزولی

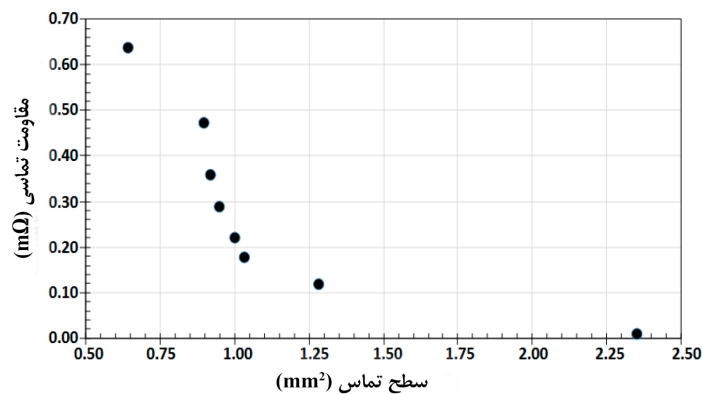
حین شبیه‌سازی الکترومکانیکی مورد نظر قرار گرفت. از روی این آزمون‌های تجربی، افزایشی را در ابعاد سطح تماس بین رشته‌ها در هنگام کاهش زاویه تقاطع مشاهده می‌کنیم. (شکل ۸).  
بنابراین در مورد سیم‌های موازی همانگونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، مقاومت تماسی کاهش می‌یابد. در مورد هادی‌های تابیده، از نوعی که توسط یکی از سازندگان مطرح سیم و کابل تأمین گردیده و در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است، طول تاب رشته‌های تابیده، تعیین‌کننده زاویه‌ای است که هادی‌ها در تقاطع با یکدیگر قرار گرفته‌اند. شکل‌های ۸ و ۹ مقاومت تماسی بدست آمده و سطح تماس را به صورت تابعی از زاویه بین رشته‌ها نشان می‌دهند. تأثیر قابل توجه این زاویه بر مقدار مقاومت الکتریکی را می‌توان مشاهده کرد. با افزایش زاویه بین رشته‌ها سطح تماس کم می‌شود، به عنوان مثال تفاوت بین سطح تماس در زاویه‌های صفر و ۹۰ درجه برابر  $1/491 \text{ mm}^2$  است.

- (a)  $F_c=100\text{N}$ , تنش میانگین  $115 \text{ N/mm}^2$
- (b)  $F_c=100\text{N}$ , تنش میانگین  $99/5 \text{ N/mm}^2$
- (c)  $F_c=100\text{N}$ , تنش میانگین  $90/4 \text{ N/mm}^2$
- (d)  $F_c=100\text{N}$ , تنش میانگین  $83/2 \text{ N/mm}^2$

مثالی دیگر از اندازه‌گیری شکل سطح تماس برای یک زاویه تقاطع ۴۵ درجه در مورد تنش‌های تماسی مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. شکل سطوح تماس در همه زاویه‌های تقاطع همواره به صورت بیضی است، و تنها استثنا در زاویه صفر درجه است که در آن زاویه هادی‌ها به صورت موازی قرار گرفته‌اند. با افزایش زاویه تماس "عرض" شکل سطح تماس کاهش می‌یابد در حالی که به "طول" آن افزوده می‌شود. توزیع یکنواخت تنش بر سطح تماس در این مرحله برقرار می‌شود. بخش‌بندی تنش غیریکنواخت در



شکل ۸. ابعاد ناحیه تماسی به عنوان تابعی از زاویه تقاطع (نیروی فشار دهنده  $480$  نیوتن)



شکل ۹. مقاومت‌های تماسی به عنوان تابعی از "ابعاد" سطح تماس

تغییرات در هدایت الکتریکی مواد هادی به دست آید. این شبیه‌سازی با بکارگیری مدول دینامیکی برنامه Abaqus توسعه یافت. این مدول امکان تجزیه و تحلیل مسایل فیزیکی پیچیده دارای ابعاد غیرخطی زیاد، شکل‌های هندسی و شرایط تماسی پیچیده را فیما بین فراهم می‌سازد. مقاومت الکتریکی کلی هادی تاییده به تعداد این پارامترها بستگی دارد. عوامل اصلی شامل هدایت الکتریکی مواد هادی و طراحی کلی هادی (قطر رشته سیم‌ها، تعداد سیم‌ها، تعداد لایه‌ها، طول تاب هر لایه، جهت تابیدن لایه‌ها و میزان فشردگی هادی) می‌باشند. مراحل مختلف تولید کابل دارای منابعی از عوامل تأثیرگذار بر مقاومت الکتریکی هستند. در واقع تغییر شکل ناشی از فرآیند تابیدن، فشار تماسی بین رشته‌های سیم، کاهش سطح در اثر نیروهای کششی و غیره به شدت بر رفتار الکتریکی مواد هادی اثر گذارند. به منظور سهولت در تعیین سطوح تماس و بازشناسی حجم‌های معادل مربوط به آن به وسیله Abaqus رویه‌ای که بتواند فرآیند تابیدن را بازسازی کند، فراهم شد. این رویه به این صورت است: ابتدا شکل هندسی سیم‌ها به صورت میله‌های موازی آماده گردید و سپس نیروهای تنش بر آنها اعمال شد. در مرحله بعدی فشردگی و اکستروژن هادی انجام شد. این فرآیند در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

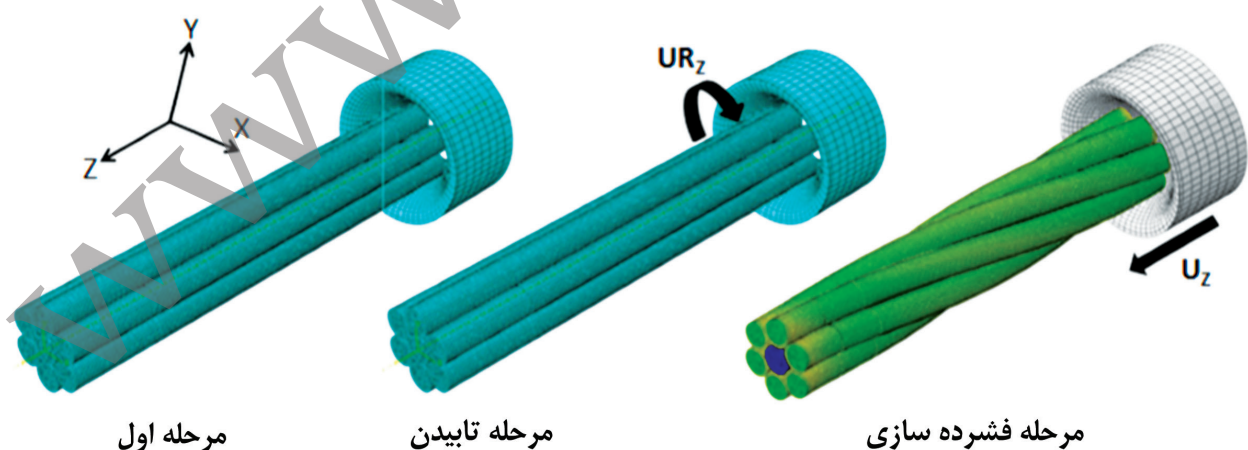
تغییر در سطح تماس بر توزیع جریان الکتریکی مؤثر است. چون زاویه بین رشته‌ها با طول تاب‌ی که هادی تاییده شده است، مرتبط است. بدیهی است که با تغییر ضریب تاب می‌توانیم بر مقاومت الکتریکی ناشی از آن تأثیر بگذاریم.

### ۳- مدل عددی

#### ۳-۱- طراحی هادی‌ها

فرآیند تابیدن و فشردگی عملیاتی است که در آن دو جابجایی به طور همزمان با هم ترکیب می‌شود: حرکت انتقالی و حرکت چرخشی. سیم‌ها در معرض سه نیرو قرار می‌گیرند: کشش، پیچش و فشار که این موضوع را در شکل ۱۰ ملاحظه می‌کنید.

نیروی کششی به خاطر سرعت خطی فراهم شده توسط کپستن کشنده، پیچش نیز توسط چارچوب‌های نگهدارنده فرقره و نهایتاً نیروی فشاری به وسیله کاهش سطح مقطع در محل تاب تأمین می‌شود. شبیه‌سازی مکانیکی برای تعیین شکل هندسی تغییر یافته عملی هادی، تنش باقی‌مانده، کرنش پلاستیکی و سخت شدن مواد در اثر کاهش سطح رشته‌های تاییده صورت گرفت. بین نتایج به دست آمده با اندازه‌گیری‌های تجربی ارتباطی حاصل شد تا مقدار

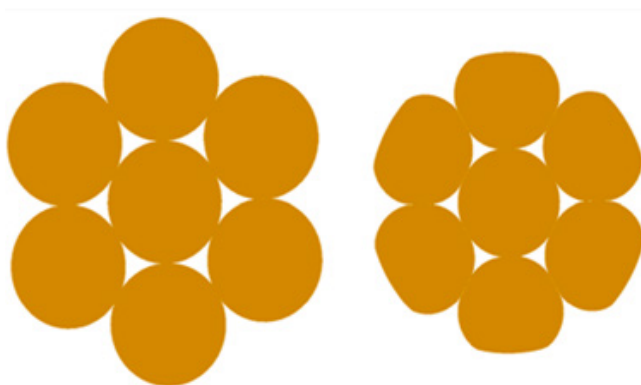


شکل ۱۰. شرایط حدی فرآیند تابیدن و فشردگی سازی Abaqus

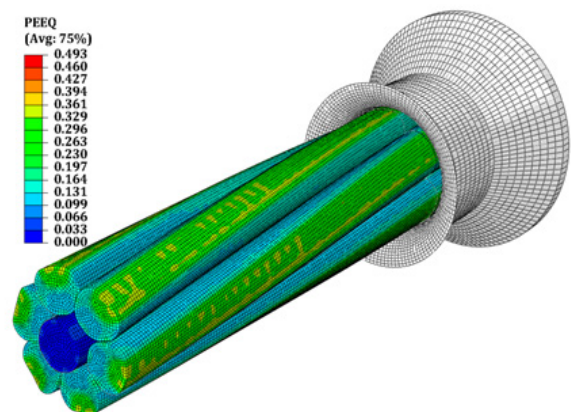


۳-۲ - مدل‌سازی FEM فرآیند تابیدن با Abaqus Explicit Module تغییر شکل پلاستیکی حین فرآیند فشرده‌سازی نابجایی موضعی ایجاد می‌کند. از طریق شبیه‌سازی‌های جامع و اندازه‌گیری‌های پشتیبان مربوط به آن، داده‌های مقاومت الکتریکی هادی برای پارامترهای متعدد طراحی هادی به دست آمده است. اهداف اصلی شبیه‌سازی مکانیکی شامل تعیین شکل هندسی تغییر یافته عملی هادی، تنش‌های باقیمانده، کرنش پلاستیکی و حد سخت شدن در اثر کاهش مقطع است. در واقع، نتایج مکانیکی مربوط به اندازه‌گیری‌های تجربی این امکان را فراهم می‌سازد که مقدار تغییرات خصوصیات الکتریکی مواد هادی را به صورت مقاومت ویژه الکتریکی تعیین کنیم. در این بررسی از الگوریتم خطای تماس با متغیر محدود استفاده می‌کنیم. مزیت تماس متغیر محدود این است که همهٔ چرخش‌ها و حرکت‌های انتقالی در فعل و انفعالات تماسی در نظر گرفته می‌شوند. این شبیه‌سازی تحت بارگذاری‌های نیمه ایستایی محاسبه می‌شوند. تنش‌های مکانیکی ایجاد شده و تغییر شکل‌های پلاستیکی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

پدیدهٔ الکتریکی در سطح تماس بین رشته‌ها دارای پیچیدگی است. این فعل و انفعال با فشار تماسی و قابلیت مواد برای پذیرش تغییر شکل پلاستیکی کنترل می‌شود. مشخص گردید که سطوح واقعی صاف نیستند بلکه دارای چولگی زیادی می‌باشند [۱۷-۱۴ و ۱۰]. توزیع جریان الکتریکی در کابل اساساً به استقامت هر رشته و کیفیت تماس الکتریکی بین رشته‌ها بستگی دارد. هنگامی که رشته‌های اطراف هادی در معرض تنش کششی ذاتی در ساخت هادی قرار می‌گیرند، مقاومت الکتریکی تمایل دارد قدری افزایش پیدا کند، خطوط جریان الکتریکی حول رشته‌های دارای کمترین مقاومت الکتریکی متمرکز می‌شود. حتی تنش‌های مکانیکی کم، تغییراتی را بین رشته‌ها ایجاد می‌کنند که منجر به نامتعادلی بین رشته‌های متصل موازی با هم می‌شود. نامتعادلی‌های کوچک می‌تواند سبب اختلافات بزرگ بین چگالی جریان موضعی شود. همچنین باید در نظر داشت که در حین آسیب دیدن ناحیهٔ تماس ویژگی‌های آن نیز تغییر می‌یابد.



(ب)

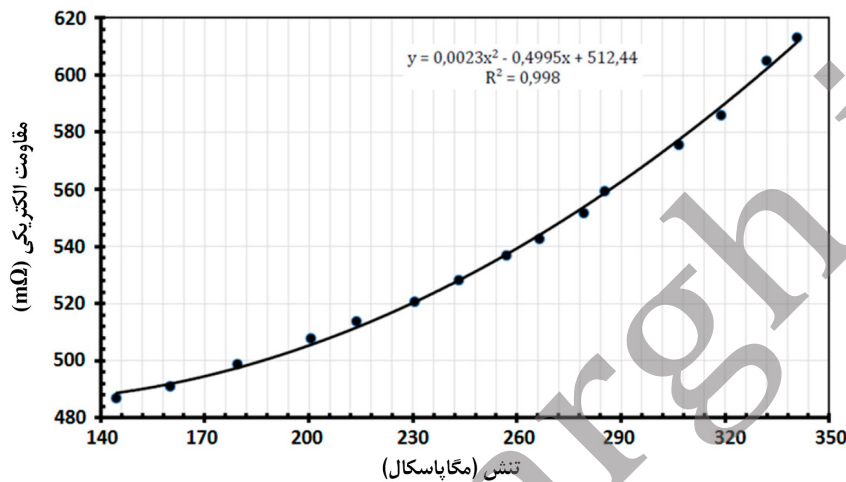


(الف)

شکل ۱۱. شبیه‌سازی فرآیند فشرده‌سازی: (الف) تغییر شکل معادل (ب) سطح مقطع هادی پیش و پس از فرآیند تابیدن و فشرده‌سازی

فشرده‌سازی به وسیله شبیه‌سازی مکانیکی با مقاومت ویژه الکتریکی معادل مس به اندازه ۰/۴ درصد نسبت به مقاومت ویژه اولیه مس ( $10^{-8} \times 328 \times 1/7$  Ω m<sup>2</sup>/m) افزایش یافته است.

رابطه بین تنش مکانیکی و مقاومت ویژه مس نیز به دست آمده است. نمودارهای نشان داده شده در شکل ۱۲ با فرآیند کشش سرد به دست آمده‌اند. ارتباط سخت شدن معادل هادی در اثر



شکل ۱۲. مقاومت الکتریکی به عنوان تابعی از تنش مکانیکی

(۱+۶) بکار گرفته شده است. شبیه‌سازی‌های مکانیکی و الکتریکی متعددی به منظور تعیین اثر سطح تغییر شکل یافته مکانیکی و سخت شدن بر رفتار الکترومکانیکی هادی‌ها صورت گرفته است. برای اثبات صحت عملکرد این مدل، مقایسه‌ای را بین نتایج حاصله از اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی‌های المان محدود انجام دادیم. دو پارامتر اصلی برای اعتباربخشی به این مدل عددی در نظر گرفتیم: وزن و مقاومت الکتریکی هادی در کیلومتر. اختلاف بین این دو مدل در جدول ۲ نشان داده شد است.

جدول ۲. نتایج اصلی مدل‌های عملی و FEM مربوط به برآورد مقاومت الکتریکی و وزن هادی

پارامترهای طراحی	مدل تولید واقعی	مدل FEM
وزن هادی (Kg/Km)	۲۱۸/۰۳	۲۱۸
مقاومت الکتریکی (Ω/Km)	۰/۷۰۷	۰/۷۰۸۶
اختلاف میانگین در مقاومت	درصد ۰/۲۳	

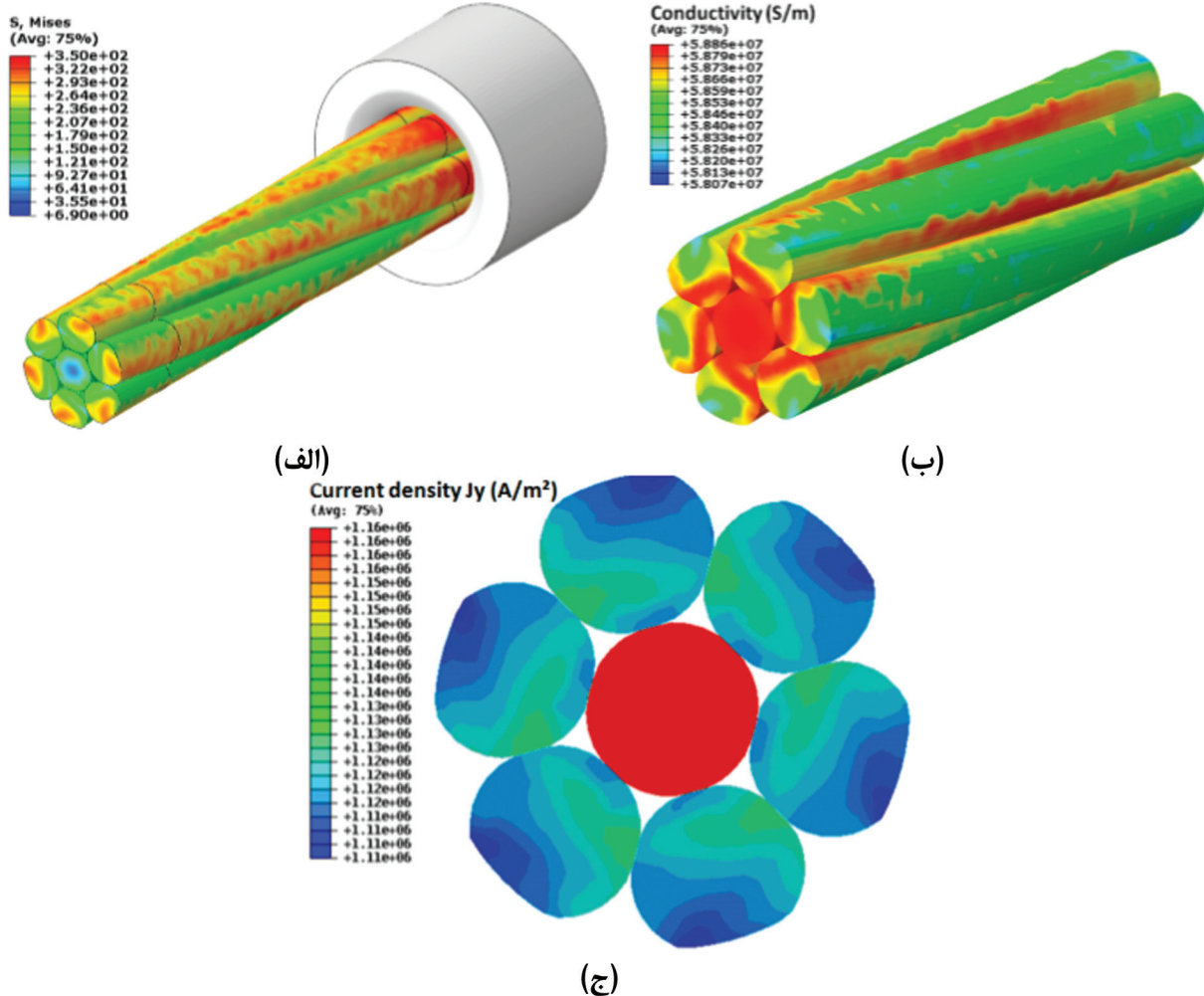
مقایسه اندازه‌گیری و شبیه‌سازی یک ناحیه گذر مطلوب بیانگر وجود لایه‌های گذر با هدایت الکتریکی مختلف نسبت به هدایت الکتریکی مس است. چنین برمی‌آید که توزیع ولتاژ و جریان شدیداً

### ۳-۳- مدل الکتریکی

برای بکارگیری مدل الکتریکی از مدول جریان الکتریکی مستقیم Abaqus استفاده می‌کنیم. شکل هندسی تغییر یافته مجدداً شبکه‌بندی می‌شود. یک اختلاف پتانسیل الکتریکی به دو سر هادی اعمال می‌شود. در سطح ورودی ولتاژ زمین  $U=0$  mV و در سطح خروجی ولتاژی معادل  $U=1$  mV اعمال می‌کنیم. شکل هندسی با المان‌های چهاروجهی ۰/۲ میلی‌متری شبکه‌بندی می‌شود.

طول مورد نظر برای این مدل DC پنجاه میلی‌متر است. دما در ۲۰ درجه سانتیگراد تثبیت شده است. قاعده رفتار مقاومت تماسی به صورت تابعی از فشار تماسی و زاویه تقاطع به صورت یک تابع درونیابی بکار گرفته شد. بر اساس توزیع تنش‌ها در هادی، توزیع هدایت الکتریکی و چگالی جریان محاسبه شده‌اند شکل ۱۳ نتایج توزیع تنش در سطح مقطع کابل و توزیع هدایت الکتریکی موضعی ناشی از آن را نشان می‌دهد. هدایت الکتریکی مس سیم‌های فشرده‌شده به اندازه ۲ درصد کاهش یافته‌اند ولی حتی چنین تغییر کمی می‌تواند اثر قابل توجهی بر توزیع چگالی جریان و مقاومت الکتریکی ناشی از آن در کابل بگذارد.

این مدل الکترومکانیکی برای درک و پیش‌بینی تأثیر فرآیند تابیدن و فشرده کردن بر خواص مکانیکی و الکتریکی یک هادی هم‌مرکز



شکل ۱۳. الف) توزیع تنش باقیمانده (ب) توزیع هدایت الکتریکی نسبی به دست آمده (نسبت به هدایت الکتریکی مبنی) (ج) چگالی جریان حاصله

بوده است. ارتباط بین هدایت الکتریکی مس و تنش‌های مربوطه توسط اندازه‌گیری‌های تجربی مشخص گردیده است. شرایط سطح هادی بسیار مهم بوده و بر قابلیت اطمینان و تکرارپذیری اندازه‌گیری‌ها مؤثر است. صدها نمونه، مورد آزمون قرار گرفته و میانگین نتایج آنها برای معنی‌دار شدن به دست آمده‌اند به طوری که ارتباطات به گونه‌ای برقرار شود که وابستگی مقاومت تماسی بین هادی‌های تاییده بر نیروی فشاری وارده نشان داده شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که محدوده مقاومت الکتریکی به سه پارامتر اصلی وابسته است: نیروی فشاری که به هادی وارد می‌شود، ابعاد دو سطح تماس که مستقیماً به نیروی اعمال شده بستگی دارد و زاویه بین رشته‌های کابل. خصوصیات برآمده از مقاومت تماسی و هدایت الکتریکی سیم تکی در برابر کرنش برای مدل‌سازی یک کابل ۶ رشته‌ای بکار گرفته شده است.

به نیروی اعمال شده در حین ساخت هادی بستگی دارد. مسئله دیگر این است که در حین تغییر شکل هادی، ویژگی‌های ناحیه تماس تغییر می‌کند. در این بررسی نشان داده‌ایم که ناحیه تماسی از چه اهمیتی برخوردار است و هنگامی که نیروهای فشرده‌گی اعمال می‌شود، این ناحیه چگونه تغییر می‌کند. توزیع چگالی جریان از طرفی توسط ساختار منطقه تماس بین سیم‌ها و مقاومت لایه گذر به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی و الکتریکی یک هادی هم‌مرکز (۱+۶) بر اساس پارامترهای فرآیند تابیدن و فشرده کردن ارایه شده است. هدف از این کار در نظر گرفتن تغییر شکل‌های مکانیکی هادی و اثر آن بر هدایت الکتریکی مواد هادی