Edited with the trial version of
PDFPro
To remove this notice, visit
www.pdfpro.co

ارتباط مقاومت تماسی بر طراحی هادی‌های تابیده – بخش اول

نقش فشارگیره‌های دستگاه مقاومت بر مقدار اندازه‌گیری شده

ترجمه: مهندس محمدباقر پورعبداله (کارشناس صنایع)

خلاصهٔ مطلب: در هنگام فرآیند تولید، هادی‌های چند رشته‌ای در معرض نیروی فشاری و ممان چرخشی قرار می‌گیرند. توزیع جریان در هادی چندرشته‌ای یکنواخت نیست و توسط مقاومت عرضی کنترل می‌شود. این مقاومت اصولاً با مقاومت تماسی در محل اتصال رشته‌های تابیده و مقاومت تماسی بین رشته‌ها تعیین می‌شود. ویژگی‌های لایهٔ سطحی و بخصوص ساختار بلوری و میزان اکسید شدن از جمله عوامل اصلی در تعیین مقاومت عرضی است. انجام آزمایش‌های تجربی این امکان را فراهم می‌سازد که ارتباط مقاومت تماسی را به عنوان تابعی از تنش‌های کاری پیوسته و طراحی کابل کشف نمود. مطالعه‌ای بر مبنای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی عددی صورت گرفته است تا توابع مقاومت تماسی مشخص شوند.

کلمات کلیدی: هادی‌های تابیده، مقاومت تماسی، طراحی کابل، شبیه‌سازی کابل، اندازه‌گیری مقاومت تماسی

۱- مقدمه:

در مقولهٔ افزایش قیمت فلزات، خصوصاً مس، که مادهٔ اصلی به کار رفته در هادی‌های الکتریکی است، امروزه یکی از چالش‌های صنعت سیم و کابل کاهش مصرف مواد اولیه است. بنابراین میزان مصرف مس یا آلومینیوم (یا هر مادهٔ رسانای دیگر) در تولید کابل‌ها باید مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد تا هدایت الکتریکی مطلوب تحت شرایط مورد نظر حاصل شود. این مقاله نتایج خاصی از کار انجام شده در ارتباط با بسط مدل المان‌های محدود برای مدل‌سازی سه بعدی و بهینه‌سازی طراحی هادی‌های چند رشته‌ای ارایه می‌کند.

یکی از عوامل بازدارندهٔ این مطالعه، نبود درک درست از سطح تماس بین سیم‌ها می‌باشد. در واقع این سطوح تماس بین سیم‌های کابل، یکی از مشکلات اساسی برای ساخت مدلی با ترکیب قوی مکانیکی و الکتریکی است.

خصوصیات عوامل تماس الکتریکی بین رشته‌های هادی در برابر تنش مکانیکی و موقعیت نسبی هر کدام از رشته‌ها اثر قابل توجهی بر توزیع خطوط جریان در کابل دارد. [۱ تا ۳]

این نوشتار به تشریح مقاومت تماس الکتریکی از طریق اندازه‌گیری‌های تجربی و شبیه‌سازی الکترومکانیکی بر پایهٔ روش المان‌های محدود می‌پردازد. نقطه نظر نویسندگان این مقاله بر مطالعهٔ تماس الکتریکی مس با مس بین دو هادی، تحت تأثیر نیروی فشاری، متمرکز شده است. در این زمینه توجه خاصی به بررسی اثر نیروی تماسی و زاویهٔ تقاطع بین سیم‌ها و همچنین شکل و سایز سطح تماس معطوف شده است.

در مرحلهٔ نخست وسیلهٔ اندازه‌گیری تجربی آماده‌سازی شد. ابتدا میز مخصوص اعمال فشار و وسیلهٔ اندازه‌گیری نیروی تماسی ساخته شد. این مجموعه همچنین به سامانه‌ای برای تنظیم زاویهٔ تقاطع هادی‌ها مجهز گردید. اندازه‌گیری‌ها برای جریان‌های DC در نظر گرفته شد. مقاومت تماس الکتریکی برای بخش مربوطه با بکارگیری روش چهار نقطه‌ای (روش کلوین) و به وسیلهٔ میکرو اهم متر اندازه‌گیری شد. قواعد اندازه‌گیری و شرایط آزمون تجربی نیز تعیین گردیدند.

در مرحلهٔ دوم، نتایج دهها آزمون به دست آمد. تجزیه و تحلیل این نتایج انجام شد تا اثر و میزان کمی ناشی از هر عامل مورد مطالعه بر چگونگی رفتار الکتریکی سطح تماس شامل مقاومت الکتریکی مربوط به آن به خوبی درک شود.

پس از هر اندازه‌گیری، نمونه زیر یک میکروسکوپ مورد بازرسی قرار می‌گرفت تا ابتدا در مورد شکل و سایز تصویر تحقیق شود و سپس ساختار داخلی هادی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سیم‌های مس که نمونه‌های اندازه‌گیری از آن تهیه گردید با بکارگیری فرآیند موسوم به تغییر شکل سرد یا کار سرد ساخته می‌شد. فرآیند تابیدن رشته‌ها و فشرده‌سازی، عملیاتی پیچیده است که دو نابجایی

www.sbargh.ir

Edited with the trial version of
PDFPro
To remove this notice, visit
www.pdfpro.co

انتقالی و چرخشی را به طور همزمان ترکیب می‌کند. از طریق این نابجایی‌های ترکیبی، سه نیروی مجزا بر روی سیم‌ها اعمال می‌شود: کشش، پیچش و فشار. برای مقایسهٔ اندازه‌گیری و نتایج شبیه‌سازی، این فرآیند با بکارگیری برنامهٔ Abacus [4] مدلسازی گردید که امکان شبیه‌سازی عملیات تابیدن رشته‌ها و فشرده‌سازی را فراهم می‌کند تا تغییر شکل‌های مکانیکی، تنش‌های پسماند، فشار تماسی بین رشته‌ها و کرنش پلاستیکی حاصل، محاسبه شود. این برنامه مناطق تماسی را مشخص و همچنین توزیع تنش را نیز محاسبه می‌کند.

در نتیجهٔ خصوصیات اندازه‌گیری شده، مقاومت به عنوان تابعی از تنش، امکان ملاحظهٔ مقاومت غیرهمگن مناطق تماسی میسر می‌شود. مقاومت غیرهمگن و در نظر گرفتن آن در مدل المان‌های محدود را از طریق تعیین یک استراتژی ترکیبی الکترومکانیکی می‌توان به کار گرفت. این موضوع ما را قادر خواهد ساخت تا به تجزیه و تحلیل دقیق‌تری از این پدیده‌های الکتریکی و اثر آنها بر مقاومت الکتریکی کل رشتهٔ هادی بپردازیم.

در نهایت، تعیین مقاومت تماس الکتریکی و مقاومت ویژهٔ مواد در ارتباط با تنش اعمال شده برای شبیه‌سازی کابل ۶+۱ رشته‌ای مورد نظر است. نتایج شبیه سازی برای نمونه‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و با اندازه‌گیری‌های تجربی مقایسه گردیده‌اند تا مدل عددی راستی آزمایی شود.

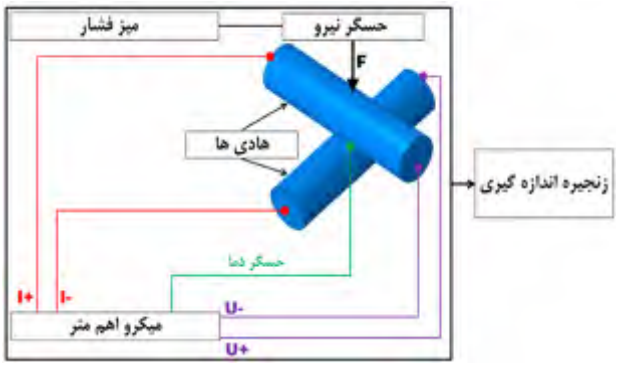
۲- بخش تجربی

۲-۱- روش اندازه‌گیری مقاومت تماسی

عوامل ناشناختهٔ بسیاری برای بهینه‌سازی مقاومت تماس الکتریکی و فنون تجربی برای اندازه‌گیری مقاومت و وابستگی آن به پارامترهای متعدد نظیر دما، فشار و زاویهٔ تماس وجود دارد [۵ تا ۹].

این دو سئوال اساسی مستلزم پاسخی است در ارتباط با مقدار مقاومت تماسی بین رشته‌های هادی چند رشته‌ای که در یک نیروی مشخص ایجاد شده توسط فرآیند تابیدن رشته‌ها یا در اثر اعمال فشار متعاقب آن، و راه‌هایی که باعث کاهش مقاومت تماسی از طریق در نظر گرفتن شکل، سایز و توزیع سطح تماس و مسیرهای عبور جریان می‌شود.

بکارگیری فرضیهٔ تماس مکانیکی در تجزیه و تحلیل تماس الکتریکی ضرورت دارد. برای این منظور وسیله‌ای تجربی ساخته شد (میز آزمایش تجربی) و به این کار اختصاص یافت. این وسیله برای ارزیابی مقاومت تماس الکتریکی بین دو هادی تحت اعمال یک نیروی فشاری بر سطح تماس کابل‌ها بکار گرفته شد. سطح تماس بین دو هادی تک مفتولی به خاطر زبری اجتناب‌ناپذیر سطح و طول تاب شامل تعدادی بلوک‌های تماس مکانیکی است. تعداد و سایز تماس الکتریکی به عوامل متعددی نظیر نیرو، شکل میکروسکوپی سطوح، تحلیل موضعی میکروسکوپی سطوح (زبری)، ویژگی‌های مکانیکی مواد (سختی، مدول یانگ) و شکل هندسی آن بستگی دارد. لازم است مقاومت الکتریکی سطح ایجاد شده بین دو هادی فلزی قرار گرفته در یک بستر زاویه‌ای را دقیق اندازه‌گیری کنیم که تحت نیروی فشاری فزاینده قرار گرفته است. مقاومت تماس الکتریکی بر اساس روش ۴ نقطه‌ای (روش کلوین) اندازه‌گیری می‌شود. نمودار کلی اندازه‌گیری تجربی در شکل ۱ نشان داده شده است.

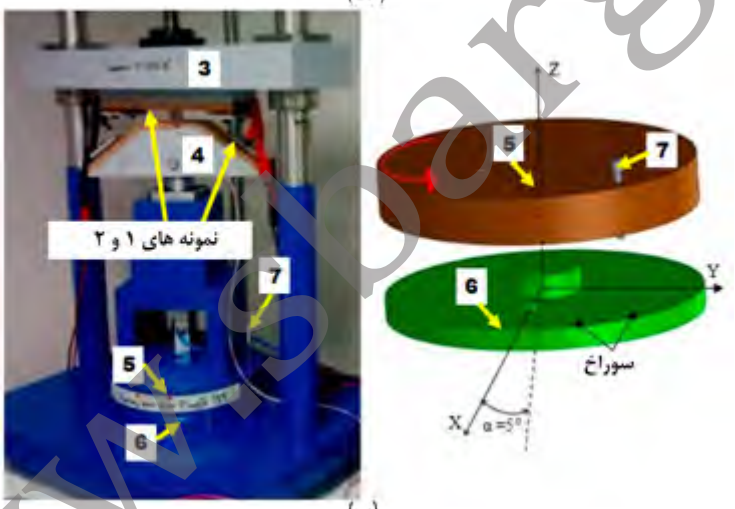


شکل ۱. نمودار اندازه‌گیری تجربی

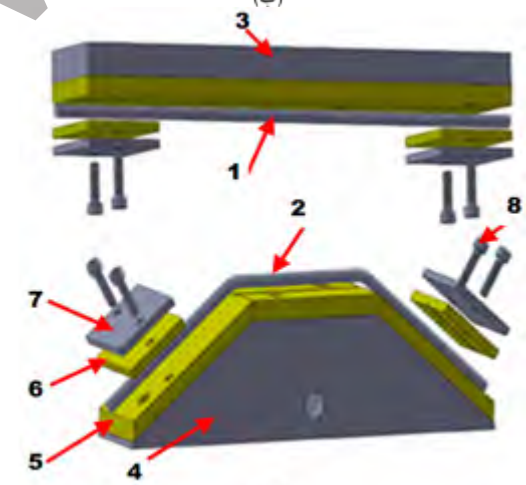
دو جزء به هم مرتبط شده‌اند: یک بخش مکانیکی که همچون یک ماشین فشاردهنده عمل می‌کند و بخش دیگری برای اندازه‌گیری‌های الکتریکی با بکارگیری روش کلوین برای اندازه گرفتن مقاومت تماسی ناشی از آن، میز دارای یک صفحهٔ چرخشی است تا امکان اندازه‌گیری مقاومت تماسی تحت زاویهٔ متغیر بین سیم‌های متقاطع را فراهم سازد (شکل ۲ (ب)). در این وسیله امکان تنظیم زاویه‌های تقاطع متفاوت مربوط به طول تاب مطلوب هادی تابیده وجود دارد. مقاومت تماسی با بکارگیری روش ۴ نقطه‌ای صورت می‌گیرد: دو نقطه برای ورود جریان و دو نقطه برای اندازه‌گیری ولتاژ. برای این منظور یک میکرواهم متر حساس مدل OM22 استفاده شده است. در این وسیله امکان تصحیح دما و جمع‌آوری اتوماتیک داده‌ها وجود دارد.

Edited with the trial version of
PDFPro
To remove this notice, visit
www.pdfpro.co

(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲ (الف). میز اندازه‌گیری/ شکل ۲ (ب). دو صفحه که امکان تنظیم زاویهٔ تقاطع را فراهم می‌سازد/ شکل۲ (ج). سامانهٔ نصب سیم

www.sbargh.ir

Edited with the trial version of
PDFPro
To remove this notice, visit
www.pdfpro.co

میـز فشـار دهنـده در شـکل ۲ نشـان داده شـده اسـت؛ کـه در آن یک نیـروی گیرشـی اسـتفاده می‌شـود و سـاخت آن بـا بهره‌گیـری از برخی مقـالات منتشـر شـده [۲ و ۵ و ۱۰] صـورت گرفته اسـت. فشـار بر روی سـیمها بـا چرخش دسـتهٔ چـرخ ماننـد، واقع در بـالای وسـیله همانگونه کـه در شـکل ۲(ب) نشـان داده شـده اسـت، اعمـال می‌شـود؛ همچنین اندازه‌گیـری نیـروی فشـاری برای دو رشـتهٔ متقاطع امکانپذیر می‌باشـد. ترتیـب اندازه‌گیـری (محـدودهٔ نیـرو از ۰/۵ نیوتـن تـا ۵۰۰ نیوتـن) اندازه‌گیری‌هـای متعـدد را بـر روی یـک نمونـهٔ خاص فراهم می‌سـازد. در مـورد ایـن بررسـی، ما ۲۰۰ نمونـهٔ برگرفته از کلاف مس تولید شـده توسـط شـرکت Nexans در اختیـار داشـتیم کـه نمونه‌هایـی بـه طول ۴۰ سـانتی‌متر بـرای اسـتفاده در میـز آزمـون را از آن بریدیـم و سـامانهٔ نصـب کردن سـیم در شـکل ۲ (ج) نشـان داده شـده اسـت. هـادی (۶) بـر یـک نگهدارنـدهٔ عایقـی (۲) جاگـذاری می‌شـود و توسـط بلوک‌های فشـارندهٔ عایقـی (۳ و ۴) در موقعیـت خـود قرار می‌گیرنـد. کل مجموعه بـا اسـتفاده از دو پیـچ (۵) بـه چهارچوب (۱) نصب می‌شـود. لازم اسـت هـادی دارای شـکلی هماننـد تصویر ۲ (ج) نشـان داده شـده باشـد.

هـرگاه تمـاس مکانیکـی تحـت نیـروی فشـاری معینـی بیـن دو سـیم مسـی برقرار شـود، یک جریان پالسـی به دو سـر مقابل دو رشـته سـیم اعمـال می‌شـود. ایـن جریـان به خاطـر اختـلاف پتانسـیل برقرار شـده بین دو سـیم، از طریق سـطح تماس از یک سـیم به سـیم دیگر شـارش پیـدا می‌کنـد. بـا افزایش فشـار تمـاس خصوصیـات ناحیهٔ تمـاس تغییر می‌یابـد. چندیـن منبـع خطـای سیسـتم اندازه‌گیـری از جملـه محیـط اطـراف می‌توانـد بـر دقـت اندازه‌گیری‌های مقاومـت کم، اثرگذار باشـد. بـرای کاهـش ایـن خطاهـا، اندازه‌گیری‌هـای مقاومـت در دمـای محیط بـا روش کلویـن انجـام می‌شـود [۱۱]. مـدار جریـان و مـدار ولتـاژ از یکدیگـر جـدا می‌شـوند تـا مقاومـت کابل‌های اتصـال حذف شـود. این آزمون‌هـا بـا تصحیـح دمـا بـا بکارگیـری ترموکوپـل حسـاس و دقیـق صـورت می‌گیـرد. مجموعـه‌ای از اندازه‌گیری‌هـا مطابـق نیـروی وارد و زاویـهٔ تقاطـع انجـام می‌شـوند. محـدودهٔ نیـروی تمـاس از ۰/۵ تـا ۵۰۰ نیوتـن تنظیـم می‌شـود و تغییـرات زاویـهٔ تمـاس از صفـر درجـه تـا ۹۰ درجـه تحـت یک جریـان پالسـی ۱۰ آمپری بـا فاصلهٔ زمانـی ۰/۵ ثانیه می‌باشـد. بکارگیـری یـک جریـان پالسـی بـه خاطـر کاهـش گرمایش ژولی در واسـطه‌های تماسـی اسـت. نیروی تماس با اسـتفاده از حسـگر اندازه‌گیری کشـش و فشـار S شـکل نـوع SM5424 صـورت می‌گیرد کـه بـه یـک مبـدل داده‌گیـری SMI8USB2 متصـل اسـت. برخی از عوامـل مربـوط بـه شـرایط اندازه‌گیـری ممکـن اسـت یکـی از منابـع خطـای اندازه‌گیـری باشـند. یکـی از چنیـن مـوارد هنگامـی رخ می‌دهد کـه زاویـهٔ بیـن هادی‌هـا صفـر درجـه باشـد، چـون بـه سـادگی ممکن اسـت مقـدار کمی از همراسـتا نبودن یکـی از محورها با دیگـری نادیده گرفتـه شـود و در نتیجه سـطح تمـاس کاهش یابـد و بنابرایـن مقاومت تماسـی بیـش از حد انتظار مشـاهده شـود.

۲-۲- ارایه تجزیه و تحلیل نتایج

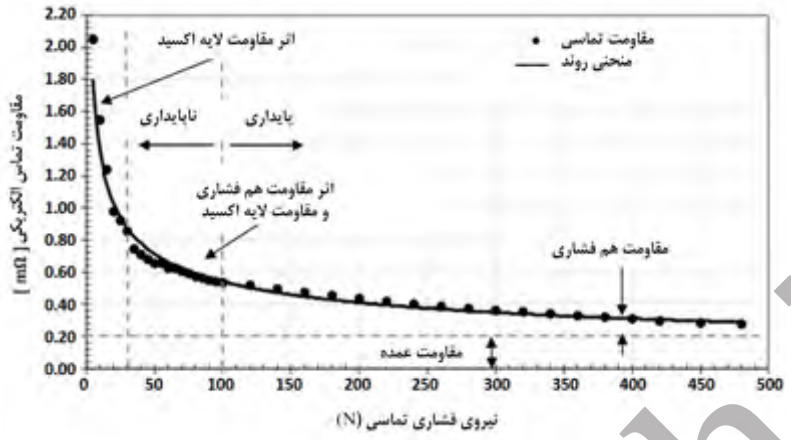
چندیـن سـری از اندازه‌گیری‌هـا انجام شـده‌اند. اولین سـری اندازه‌گیری اساسـاً بـرای تعییـن اثـر نیـروی وارده بـر مقاومـت الکتریکـی در مـورد ترتیـب قرارگیـری مختلـف سـیمها اختصـاص یافـت. میانگیـن قطـر سـیم‌ها ۲/۰۶ میلی‌متـر اسـت. سـری دوم اندازه‌گیـری بـرای تجمیـع عوامـل مختلـف بـا یکدیگـر انجـام گرفـت تـا تأثیـر آنهـا بـر مقاومـت تمـاس الکتریکـی مشـخص و درک شـود.

۲-۲-۱- اثر نیروی فشاری

ایـن بخـش اساسـاً مربـوط بـه بررسـی اثر نیـروی فشـاری بـر مقاومت تمـاس الکتریکـی اسـت. اندازه‌گیری‌هـا بـه طـور پیوسـته و در فاصلـهٔ زمانـی ۹ ثانیـه‌ای بیـن هـر اندازه‌گیـری انجـام گرفتـه اسـت. تعـداد آزمونه‌هـا ۲۰۰ عـدد اسـت. تعـداد نمونه‌هـا بـرای اندازه‌گیری‌هـای آمـاری مربوطـه در مـورد هـر زاویـهٔ تقاطـع اهمیـت دارد. ده آزمـون نخسـت بـرروی نمونه‌هـا قـرار گرفتـه بـه صـورت عمـود بر هـم (زاویهٔ تمـاس ۹۰ درجـه) انجـام شـد. در پایـان ایـن آزمون‌هـا، تغییـر مقاومت تماسـی بـه عنـوان تابعـی از نیـرو تعییـن گردیـد. (شـکل ۳ را ببینیـد) ایـن منحنـی میانگیـن مقاومـت تماسـی برگرفتـه از ۱۰ آزمـون را ارایه می‌کنـد. پـس از هـر اندازه‌گیـری، هـادی در زیـر یـک میکروسـکوپ بازرسـی شـد. سـایز تصویـر هـادی بررسـی و سـطح مقطـع آن نیـز محاسـبه گردیـد. برای نیـروی کمتـر از ۳۰ نیوتن چیز قابل مشـاهده‌ای وجـود نداشـت. از ایـن موضـوع چنیـن برمی‌آید کـه تغییر شـکل از نوع الاسـتیک (برگشـت‌پذیر) بوده اسـت. بـرای نیروهای بیـش از ۳۰ نیوتن نتایـج قابـل مشـاهده بـود و این بـه بـدان معنی اسـت که درگیـر تغییر شـکل پلاسـتیک (برگشـت ناپذیـر) می‌باشـیم. می‌تـوان دریافـت کـه در مـورد نیـروی فشـاری تماسـی کـم (کمتـر از ۳۰ نیوتـن) بـا تغییـر الاسـتیک سـر و کار داریـم و شـارش جریـان در سـطح تمـاس توسـط لایـهٔ اکسـید کنتـرل می‌شـود، بنابراین سـطح تمـاس حاصل به شـدت کوچـک اسـت. در حالـی کـه از ۳۰ نیوتـن تـا ۱۰۰ نیوتـن تغییر شـکل پلاسـتیک پدیـد می‌آیـد و یـک مقاومت هم‌فشـاری در تعـدادی از نقاط تمـاس ظاهـر می‌گـردد. در ایـن ناحیـه، می‌تـوان مشـاهده کـرد کـه مقاومـت لایـهٔ اکسـید و مقاومت هم‌فشـاری بـه صورت همزمـان وجود دارد [۱۳ و ۱۲].

سـرانجام، پایـداری مقاومـت تماسـی را می‌توان در نیروی فشـاری بیش از N ۱۰۰ ملاحظـه کرد (جدول ۱).

Edited with the trial version of
PDFPro
To remove this notice, visit
www.pdfpro.co



شکل۳. مقاومت تماس الکتریکی به عنوان تابعی از نیروی فشاری (زاویه تماس ۹۰ درجه) برای مس
(جریان اندازه‌گیری ۱۰ آمپر، افت ولتاژ نامی ۲۰ میلی ولت، قطر سیم‌ها ۲/۰۶ میلی‌متر، زاویهٔ تماس ۹۰ درجه)

جدول ۱. اندازه‌گیری مقاومت تماس الکتریکی ($m\Omega$) به عنوان تابعی از نیروی اعمال شده (N) و ابعاد سطح تماس (میلی‌متر مربع) که این اندازه‌گیری‌ها در زاویه‌های تقاطع ۹۰، ۶۰ و ۴۵ درجه برای سیم به قطر ۱/۸ میلی‌متر انجام شده است.

زاویهٔ تقاطع	میانگین نیروی اندازه‌گیری شده (N)	سطح تماس ^{۲} (mm)	مقاومت تماسی(mΩ)
۹۰ درجه	۵۰/۵۸	–	۳/۸۷۸
	۱۰۱/۵۰	۰/۲۲۱	۲/۳۲۸
	۲۰۲/۱۴	۰/۴۷۸	۱/۵۰۰
	۳۰۰/۷۵	۰/۷۲۴	۰/۹۸۴
	۴۰۱/۳۷	۱/۰۲۱	۰/۷۸۵
	۴۸۱/۱۲	۱/۲۸۷	۰/۶۸۴
۶۰ درجه	۵۰/۵۸	//	۲/۸۵۴
	۱۰۱/۵۰	۱/۰۲۷	۱/۷۰۳
	۲۰۲/۱۴	۱/۹۷۹	۰/۹۴۵
	۳۰۰/۷۵	۲/۸۵۹	۰/۶۸۸
	۴۰۱/۳۷	۴/۱۳۴	۰/۴۷۹
	۴۸۱/۱۲	۴/۹۷۱	۰/۴۱۳
۴۵ درجه	۵۰/۵۸	//	۲/۲۴۲
	۱۰۱/۵۰	۰/۸۶۵	۱/۵۸۷
	۲۰۲/۱۴	۲/۰۰۹	۰/۸۱۴
	۳۰۰/۷۵	۳/۳۱۸	۰/۵۶۱
	۴۰۱/۳۷	۴/۳۶۶	۰/۳۰۹
	۴۸۱/۱۲	۵/۷۷۰	۰/۲۷۶

www.sbargh.ir