



## ساخت و بررسی جنس و هندسه ی کفی طبی مخصوص افراد دیابتی با استفاده از مدل سه بعدی و نرم افزار المان محدود آباکوس

علیرضا مسیبی<sup>۱</sup>، اعظم قاسمی<sup>۲</sup>، نیما جمشیدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مکانیک ساخت و تولید، دانشکده ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، alireza.mossayebi.researcher@gmail.com  
<sup>۲</sup> استادیار، گروه مکانیک، دانشکده ی فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، a\_ghassemi@pmc.iaun.ac.ir  
<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشکده ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، nima.jamshidi@gmail.com

### چکیده:

بیماران دیابتی به علت ترکیب نوروپاتی محیطی و تنش های مکانیکی بسیار بالا و تمرکز تنش به علت تغییر شکل ساختار پا به وجود می آید [۴، ۳]. بهترین روش برای جلوگیری و بهبود زخم پا، استفاده از کفی ها و کفش های طبی است [۸، ۷، ۶، ۵]. کفش ها و کفی های مناسب می توانند محل های ماکزیم فشار در کف پا را جابجا کنند و مقادیر آن ها را کاهش دهند. همچنین تمرکز تنش را در کف پا از بین برده و باعث توزیع مناسب تنش و کرنش می شوند. برای بررسی بهتر کفی ها و همچنین زخم کف پای افراد دیابتی آگاهی از چگونگی توزیع فشار در کف پا دارای اهمیت زیادی است.

سیستم ها و تکنولوژی های بسیاری قادر هستند توزیع فشار در کف پا و کفی را به دست آورند، یکی از این تکنولوژی ها سیستم پدار است که در مطالعات زیادی به منظور بررسی اختلالات و آسیب های پا در راه رفتن استفاده شده است [۱۰، ۹]. تحقیقات زیادی برای به دست آوردن مقادیر فشار و چگونگی توزیع فشار در کف پای افراد سالم یا بیمار با کفی های حاوی سنسورهای فشارسنج به صورت ایستاده و یا در حین راه رفتن صورت گرفته است. هرکدام از این محققان ماکزیم فشار را در مناطق مختلفی از کف پا از جمله: شست یا متاتارسال اول یا متاتارسال دوم یا پاشنه به دست آوردند [۱۳، ۱۲، ۱۱]. بررسی مطالعات نشان می دهد محل حداکثر فشار در پا در برخی مقالات انگشت شست یا متاتارسال اول یا دوم و در برخی دیگر پاشنه معرفی گردیده است. بنا به مطالعات پیشین ثابت شده است که از نقطه نظر عوامل نژادی تفاوت هایی بین ساختار پای افراد در نقاط مختلف جهان وجود دارد [۱۴].

ابو فرج زیاد<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۶ تحقیقی روی ۱۰ مرد بالغ دیابتی انجام داده است که در این تحقیق با قرار دادن گیرنده های حساس به فشار در نقاط مختلف پا توانست توزیع فشار در کف پا را در حالی که فرد روی رو دو پای خود ایستاده است به دست آورد. طبق این تحقیق، زمانی که فرد روی دو پای خود بایستد ۵۰ درصد وزن او روی یک پا قرار می گیرد که در این بین ۱۰ درصد به پاشنه، ۹/۵ درصد

اختلال متابولیک در بدن و مهم ترین مشکل افراد دیابتی زخم کف پا و قطع عضو آن ها است. یکی از بهترین راه های جلوگیری از قطع عضو این بیماران استفاده از کفی های طبی مناسب است. هدف از این مطالعه بررسی و ساخت بهترین کفی های تک لایه و سه لایه با استفاده از چهار نوع ماده ی هایپرالاستیک رایج به کار رفته در کفی های دیابتی است تا معیاری برای انتخاب کفی دیابتی مناسب باشد. خواص چهار ماده با تست فشار به دست آمد. با ساخت کفی سفارشی و اپتیک آن، فایل ابر نقاط به دست آمد و مدل سه بعدی به کمک روش اجزاء محدود با تحلیل استاتیکی، مورد بررسی قرار گرفت. برای صحت سنجی نتایج از سیستم پدار استفاده شد. طبق نتایج، در بین کفی های تک لایه سیلیکون و پلاستوزوت و در بین کفی های چند لایه پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات بهترین عملکرد را داشتند. نتایج تست های عملی با سیستم پدار در حالت ایستاده نشان می دهد کفی تک لایه سیلیکونی و سه لایه ی پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات به ترتیب ۷۲ درصد و ۷۸ فشار را در کف پا نسبت به حالت پابرهنه کاهش می دهند. روش های استفاده شده در این تحقیق یک رویکرد مناسب برای درک رفتار این مواد در مواقعی که به عنوان کفی استفاده می شود فراهم می کند و یک راهنمای المان محدود برای بررسی کفی های طبی می تواند باشد.

### کلمات کلیدی:

مواد هایپرالاستیک، کفی طبی دیابتی، مدل سه بعدی، سیستم پدار.

### مقدمه:

عوارض دیابت شامل رتینوپاتی، نوروپاتی و بیماری های عروق است. یکی از مشکلات عمده و قابل توجه در افراد مبتلا به دیابت زخم های مزمن در کف پای آن ها است. بیش از ۲۵ درصد افراد مبتلا به دیابت در دوره ی زندگی خود دچار زخم در کف پای خود می شوند [۱]. ۸۵ درصد از افراد دیابتی که دارای زخم در کف پای خود هستند دچار قطع عضو در ناحیه ی تحتانی می شوند [۲]. بیشتر زخم ها در کف پای

<sup>۱</sup> Abu faraj Ziad

به متاتارسال اول، ۸ درصد متاتارسال دوم، ۷ درصد به متاتارسال سوم و چهارم و ۱۰/۵ درصد آن به شست پا وارد می‌شود [۱۵]. در این پژوهش برای حالت استاتیکی از مقاله‌ی ابو فرج زیاد برای بارگذاری استفاده شد.

بعد از اطلاع از توزیع فشار در کف پای افراد سالم و افرادی که اختلالاتی در راه رفتن دارند از جمله بیماران دیابتی به بررسی و تأثیر کفی با جنس‌ها و هندسه‌های متفاوت با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پرداخته می‌شود. آنالیز به روش المان محدود روشی کارآمد برای ارزیابی پارامترهای مختلف کفش و کفی بدون استفاده از محصول پیش‌ساخته شده و آزمایش‌ها عملی است [۱۶، ۱۷]. تعدادی از تحقیقات بیشتر تمرکز را روی جنس کفی‌ها و کفش‌ها داشتند [۱۸، ۱۹، ۲۰].

محققان با استفاده از نرم‌افزار المان محدود به بررسی کفی‌های مختلف پرداختند، آن‌ها تأثیر جنس، ضخامت و مقدار سختی کفی‌ها را نسبت به توزیع مناسب و کاهش فشار در کف پا مورد بررسی قرار دادند [۲۱، ۲۲، ۲۳]. در سال ۲۰۰۵ بارانی و همکاران مدلی سه‌بعدی از کفی کفش بیماران دیابتی تهیه نمودند و تحلیل استاتیکی خطی و غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار انسیس انجام دادند. آن‌ها در مقاله‌ی خود تنش و کرنش را در چهار کفی تک لایه از جنس‌های سیلیکون، پلاستوزوت، پلی فوم و اتیلن وینیل استات گزارش کردند و سیلیکون را از بین چهار جنس بهترین کفی انتخاب کردند [۲۴]. مسیبی و همکارانش کفی‌هایی با چهار نوع جنس بنام سیلیکون ژل<sup>۲</sup>، پلاستوزوت<sup>۳</sup> فوم، پلی فوم<sup>۴</sup> و اتیلن وینیل استات<sup>۵</sup> فوم که رفتار هایپرالاستیک دارند، چهار نوع کفی تک لایه و ۱۸ نوع کفی سه لایه ساختند و با آنالیز مدل سه‌بعدی کفی به صورت دینامیکی و همچنین انجام تست عملی نتیجه گرفتند بهترین کفی سه لایه خیلی مناسب‌تر از بهترین کفی تک لایه در جذب تنش و ایجاد کرنش عمل می‌کند. آن‌ها موفق شدند با استفاده از کفی سه لایه به طور نسبی ۳۱ درصد تمرکز تنش ون میزز و ۳۰ درصد کرنش را نسبت به کفی‌های تک لایه در کف پای بیمار کمتر کنند. همچنین نتایج تست‌های عملی در حالت دینامیکی بهترین کفی تک لایه و سه لایه به ترتیب ۳۰ درصد و ۵۴ درصد نسبت به حالت پابرنه فشار را در کف پا کاهش می‌دهد [۲۵].

همچنین مدل کردن پای و بررسی آن در نرم‌افزارهای المان محدود به صورت گسترده‌ای در علم بیومکانیک گسترش یافته است که در آن تنش‌های وارده به بافت نرم و استخوان‌ها را با استفاده از کفی‌های مختلف و بدون استفاده از ارتز بررسی می‌کنند [۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹].

اما در برخی از تحقیقات از نرم‌افزارهای المان محدود استفاده نشده و فقط به کارهای آزمایشگاهی اکتفا شده است. در این تحقیقات کفی‌های مورد نظر ساخته شدند و مورد آزمایش عملی قرار گرفتند [۳۰، ۳۱]. در سال ۲۰۰۸ تامی و همکاران به صورت آزمایش

عملی دو نوع کفی سفارشی و تخت که روی آن با لایه‌ی نازکی از مواد هایپرالاستیک پوشیده شده بود را مقایسه کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که کفی طبی که با قوس‌های پا مطابقت بیشتری داشته باشد فشار بیشتری را می‌تواند کاهش دهد [۳۲].

ضخامت کفی باید در حد متعارف و استاندارد باشد زیرا که در ضخامت کمتر کفی تحمل فشارهای وارده را نخواهد داشت و اگر ضخامت بیش از حد لازم باشد در کفش جا نمی‌شود، همچنین از لحاظ دینامیکی در حرکت فرد اختلال به وجود می‌آورد [۳۳].

هدف از این مطالعه به دست آوردن اطلاعات جامعی از جنس‌های رایج و هندسه‌ی مناسب کفی‌ها و ساخت کفی‌های طبی مناسب برای بیماران دیابتی است. در این مطالعه از ۴ نوع جنس هایپرالاستیک که برای ساخت کفی‌های طبی مخصوص افراد دیابتی مناسب است با نام‌های سیلیکون، پلاستوزوت، اتیلن وینیل استات و پلی فوم استفاده شد. ۴ نوع کفی تک لایه و ۱۸ نوع کفی سه لایه از لحاظ المان محدود و تست عملی با سیستم پدار در حالت استاتیکی مقایسه شدند تا بهترین کفی از لحاظ توزیع تنش و کرنش مناسب و همچنین کاهش فشار در کف پا انتخاب و معرفی گردد. بررسی کفی سه لایه به این دلیل که می‌توان از خواص مثبت جنس‌های مختلف در یک کفی به نحو احسن بهره برد بسیار مهم است.

#### مواد و روش‌ها:

اغلب جنس مواد بکار رفته در ساخت کفی طبی برای افراد دیابتی هایپرالاستیک هستند. در این بخش مراحل ساخت کفی و همچنین ایجاد مدل سه‌بعدی و مراحل آنالیز آن در المان محدود شرح داده شده است. سپس با انجام تست‌های عملی نتایج المان محدود صحت سنجی شد.

#### روش ساخت کفی و مدل اجزا محدود:

ابتدا پای یک مرد بالغ ۲۶ ساله‌ای با وزن ۹۷ کیلوگرم که مبتلا به بیماری دیابت است و بدون زخم در کف پا است توسط دستگاه اسکنر سه‌بعدی کف پا (ECOPLAN Shoemaster Custom system, Torielli, Italy) اسکن و این اطلاعات به دستگاه تراش CNC (CNC Milling machine ۴۰۶-E, Torielli, Italy) انتقال داده شد تا فوم را بترشد و هندسه‌ی کفی از آن به دست بیاید. سپس کفی با دستگاه دیجیتایزر (COMET ۵, ۲mega, ۴:۱ Resolution, pixel) اپتیک شد و یک فایل ابر نقاط به دست آمد. این فایل در نرم‌افزار کتیا (V۰R۲۰, Dussault system) مدل‌سازی گردید تا مدل، سطح و حجم پیدا کند. برای ایجاد کفی‌های سه لایه نیز در این نرم‌افزار لایه‌ها را ایجاد نموده و مدل سه‌بعدی ایجاد شده را به نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس (version ۶.۱۱, Dussault system simulas) انتقال داده تا در آن مونتاژ، بارگذاری، شرایط مرزی و روابط بین سطوح تعریف و تحلیل بر روی آن‌ها انجام شود.

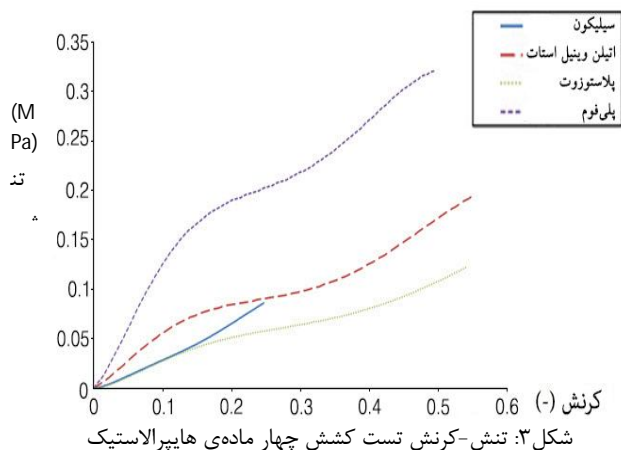
<sup>۲</sup> Silicone gel

<sup>۳</sup> Plastazote

<sup>۴</sup> Polyfoam

<sup>۵</sup> Ethylene vinyl acetate

این چهار ماده است. همچنین روی این مواد با دستگاه سختی سنج Zwick Shore Durometer Tester Close-up (SR: ۷۲۰۶.۰۷/۰۰) تست سختی سنجی با Shore A و استاندارد ASTM D۲۲۴۰ انجام شد و نتایج به شرح زیر بود:



جدول ۱: مقدار سختی چهار نوع ماده‌ی هایپرالاستیک

| سختی سنجی shore A | نام جنس           |
|-------------------|-------------------|
| ۱۲                | سیلیکون           |
| ۱۸                | پلاستوزوت         |
| ۲۴                | اتیلن وینیل استات |
| ۳۰                | پلی فوم           |

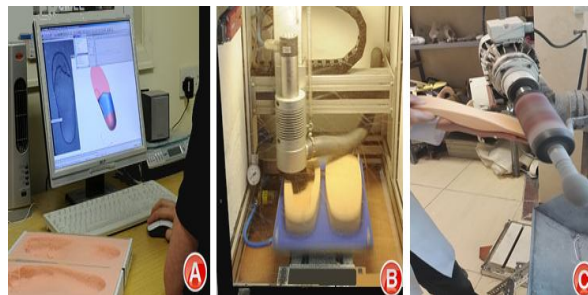
### المان بندی، اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در حالت استاتیکی:

نوع المان تتراهدرا ل چهار نقطه‌ای و به صورت خطی انتخاب شد و تعداد المان‌ها با سایز ۲ میلی‌متر در جدول (۲) آمده است. برای ایجاد شرایط طبیعی‌تر یک صفحه‌ی صلب به‌عنوان زمین تعریف شد و کفی روی آن قرار گرفت. بین صفحه‌ی صلب و زمین ضریب اصطکاک ۰/۳ [۲۱] در نظر گرفته شد. همچنین به علت اینکه کفی درون کفش قرار می‌گیرد و دور آن بسته است حرکت کفی در تمام جهات به‌جز در راستای ضخامت بسته شد. در قسمت بارگذاری مناطق انگشتان، متاتارسال‌ها، میانه‌ی پا و پاشنه مطابق شکل (۴) روی مدل مشخص گردید. فشارهایی که از طرف پا به کفی وارد می‌شود متناسب هر محل اعمال شد.

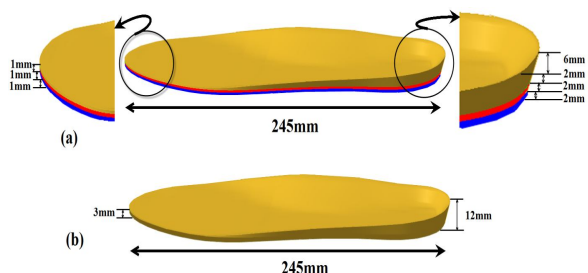
جدول ۲: تعداد المان‌های کفی‌ها

| نوع تحلیل                    | نوع کفی | مکان لایه | تعداد المان |
|------------------------------|---------|-----------|-------------|
| استاتیکی همراه با صفحه‌ی صلب | سه لایه | لایه اول  | ۶۰۷۸۰       |
|                              |         | لایه دوم  | ۲۵۳۳۳       |
|                              |         | لایه سوم  | ۲۴۹۶۱       |
|                              | تک لایه | -         | ۱۰۷۱۷۹      |

در شکل (۱) مراحل تراشیدن و سایز کردن کفی طبی نشان داده شده است. در شکل (۲) نحوه‌ی لایه‌بندی و ضخامت هر لایه مشخص شده است.



شکل ۱: دستگاه CNC برای شکل دادن کفی و سنباده‌زنی برای کم کردن ضخامت آن



شکل ۲: نما و اندازه‌های (a): کفی سه لایه و (b): تک لایه

در این تحقیق یک مدل سه‌بعدی از کفی‌های تک لایه و سه لایه مخصوص بیماران دیابتی طراحی شده و تحلیل‌های دینامیکی با نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و آنالیز تنش و کرنش برای چهار نوع ماده‌ی سیلیکون ژل، پلاستوزوت، پلی فوم و اتیلن وینیل استات با مدل آگدن<sup>۱</sup> درجه‌ی یک [۳۴] که معادله‌ی آن طبق فرمول (۱) است به دست آمد. این مدل برای تحلیل اجسام تراکم ناپذیر با کرنش و تغییر شکل بالا مناسب است.

$$(1)$$

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^2$$

در این رابطه: U: تابع پتانسیل انرژی کرنشی،  $\lambda$ : ناوردهای اصلی کرنش،  $\mu_i$  و  $\alpha_i$ : ثابت‌های مواد هستند که با تست آزمایشگاهی به دست می‌آید.

### خواص مکانیکی:

سیلیکون ژل و فوم‌های پلاستوزوت، پلی فوم و اتیلن وینیل استات جزو گروه مواد هایپرالاستیک هستند، عموماً این مواد ضریب پواسونی بین ۰/۴۵ تا ۰/۴۹ دارند [۳۴]. با استفاده از استانداردهای ASTM D۵۷۵ تست فشار بر روی سیلیکون و با استفاده از ASTM D1۶۲۱ تست فشار بر روی فوم‌های پلاستوزوت، پلی فوم و اتیلن وینیل استات انجام شد که شکل (۳) نشان‌دهنده‌ی تنش کرنش

<sup>۱</sup> Ogden



شکل ۶: کفی سه لایه با جنس پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات روش تست عملی:

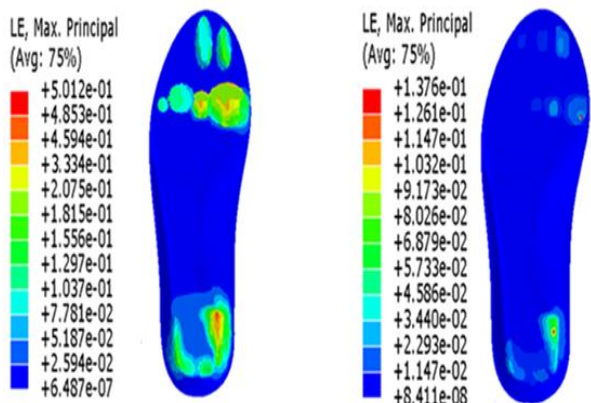
بعد از ساخت کفی‌ها تعدادی از آن‌ها برای انجام تست آماده شدند. با استفاده از سیستم پدار تست عملی از فرد گرفته شد. در ابتدا کفی‌های سنسور داری که با کابل به رایانه‌ای متصل بود کالیبره کرد. برای کالیبره شدن به این شکل عمل می‌شود که ابتدا پای راست بلند و پای چپ روی زمین گذاشته می‌شود. سپس بعد از شناختن پای چپ و صفر کردن فشارهای کفی پای راست، این کار برای پای دیگر تکرار می‌شود. بعد از کالیبره کردن یکبار بدون ارتز و بار دیگر با ارتزهای مختلفی که ساخته شد تست‌های ایستادن (استاتیکی) انجام گرفت.

#### یافته‌ها:

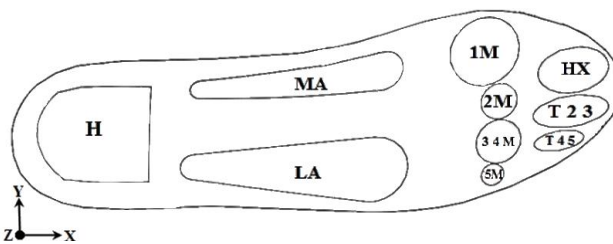
نتایج المان محدود با اندازه‌گیری‌های تجربی با استفاده از کفی‌های فشارسنج سیستم پدار معتبر سازی شد. مدل‌های المان محدود روش بسیار قدرتمندی برای درک رفتار مکانیکی پا و ابزاری برای فرایند بهینه‌سازی طراحی کفی‌های کفش است. پس از نتیجه‌گیری و اثبات نزدیک بودن نتایج تجربی و آزمایشی، طیف گسترده‌ای از هندسه و جنس‌های کفی را می‌توان به منظور مطالعه‌ی رفتار راحتی پا از طریق اصلاح طراحی هندسی و جنس‌های کفی مورد آزمایش و بررسی قرارداد.

#### نتایج المان محدود برای کفی طبی:

برای انجام این تحقیق در قسمت نرم‌افزاری ۲۲ تحلیل برای کفی‌ها انجام شد که از این بین، نتایج مربوط به تحلیل‌های کفی در زیر به صورت کانتور تنش و کرنش و نمودارهای میله‌ای آمده است. برای کفی‌های چندلایه نمادگذاری از لایه‌ی بالایی به پایینی انجام گرفته است. مثلاً E-P-F کفی سه لایه از جنس‌های اتیلن وینیل استات و پلاستوزوت و پلی فوم از بالا به پایین است.



شکل ۷: کانتور کرنش در حالت استاتیکی: قسمت (a) کانتور کرنش کفی تک لایه‌ی سیلیکونی. (b) کانتور کرنش کفی تک لایه‌ی پلی فومی



شکل ۴: مکان‌های مشخص شده برای اعمال نیرو که HX: شست پا، ۲-۳-T: ۴-۵: انگشت دوم، سوم، انگشت چهارم و پنجم، ۵-۴-۳-۲-M: متاتارسال اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم، MA: قوس داخلی پا، LA: قوس خارجی پا، H: پاشنه

جدول (۳) فشارهای وارده بر پا در حالت استاتیک از مقاله‌ی ابو فرج زیاد [۱۵] استخراج شد، که در جدول زیر آمده است.

جدول ۳: فشارهای (کیلو پاسکال) وارده به پای برهنه توسط دستگاه پدار در حالت استاتیکی [۱۵]

| مکان             | فشار استاتیکی (پاسکال) |
|------------------|------------------------|
| انگشت شست        | ۵۹۴۵۰۰                 |
| انگشت ۲ و ۳      | ۲۰۰۰۰۰                 |
| انگشت ۴ و ۵      | ۱۲۰۰۰۰                 |
| متاتارسال ۱      | ۵۲۷۱۰۰                 |
| متاتارسال ۲      | ۴۶۹۳۰۰                 |
| متاتارسال ۳ و ۴  | ۳۹۲۲۰۰                 |
| متاتارسال ۵      | ۲۷۱۶۰۰                 |
| میانه‌ی داخلی پا | ۶۰۰                    |
| میانه‌ی خارجی پا | ۱۱۷۰۰                  |
| پاشنه            | ۵۶۷۶۰۰                 |

#### ساخت قالب و کفی طبی:

برای ساخت کفی‌های طبی تک لایه‌ی فومی همان‌طور که در قسمت روش ساخت کفی توضیح داده شده بود عمل می‌شود. برای ساخت کفی طبی تک لایه‌ی سیلیکونی، از قالب سیلیکونی با طرح کف پا استفاده شد. همچنین اگر لایه‌ی دوم سیلیکون باشد یک قالب برای آن باید درست کرد، به این ترتیب که با نرم‌افزار کورل قالب طراحی گردید و با واترجت برش خورد که قالب و سیلیکون قالب‌گیری شده را در شکل (۵) مشاهده می‌شود. باقی لایه‌ها اگر فوم باشد با پرس به راحتی بریده می‌شود. شکل (۶) یک کفی ساخته شده‌ی سه لایه از جنس‌های پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات است.



شکل ۵: قالب کفی و سیلیکون قالب‌گیری شده برای لایه‌ی دوم

جدول ۴: به دست آوردن مقادیر مختلف فشار در مناطق مختلف پا با استفاده از ارتز و بدون ارتز در حالت ایستاده

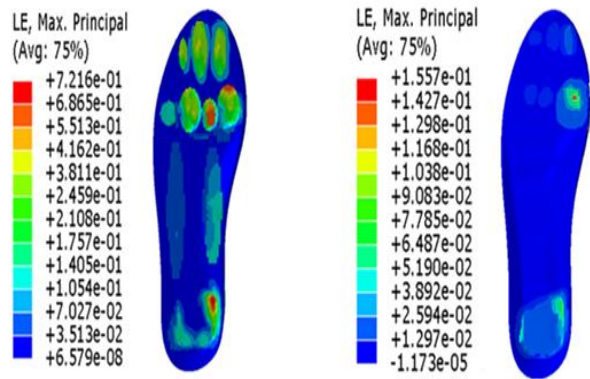
| فشار (کیلو پاسکال) پای راست در حالت ایستاده |      |       |       |       |         |                        |
|---|------|-------|-------|-------|---------|------------------------|
| S   | P    | P-S-E | P-F-E | F-P-E | پابرهنه | منطقه                  |
| ۴۵  | ۴۷   | ۲۷    | ۴۵    | ۹۵/۵  | ۱۷۱     | انگشت شست              |
| ۱۷  | ۱۷/۸ | ۱۰/۳  | ۱۸/۸  | ۱۹    | ۲۰      | انگشت دوم، سوم و چهارم |
| ۸   | ۹/۴  | ۳/۷   | ۸/۶   | ۹     | ۱۰      | انگشت پنجم             |
| ۲۰/۲  | ۲۵   | ۲۴/۸  | ۳۵/۸  | ۹۲/۹  | ۱۱۱     | متاتارسال اول          |
| ۱۹  | ۲۰/۷ | ۱۷    | ۳۹/۵  | ۷۸    | ۱۰۲     | متاتارسال دوم          |
| ۱۸/۵  | ۲۵/۴ | ۹     | ۴۱/۶  | ۶۶/۴  | ۹۵      | متاتارسال سوم و چهارم  |
| ۱۵  | ۲۰   | ۱     | ۲۸/۳  | ۲۷    | ۲۹      | متاتارسال پنجم         |
| ۱۳  | ۲۷/۵ | ۲۵    | ۴۰    | ۳۶    | ۴۶/۸    | قوس داخلی پا           |
| ۳۰  | ۳۱/۳ | ۲۹    | ۴۹    | ۷۸/۷  | ۸۹/۸    | قوس خارجی پا           |
| ۴۸  | ۵۷   | ۴۰    | ۸۴/۶  | ۱۰۹/۲ | ۱۷۰     | پاشنه                  |

چهار نوع ماده‌ی سیلیکون ژل، پلاستوزوت، پلی فوم و اتیلن وینیل استات جهت ساخت کفی‌های تک لایه انتخاب شدند، مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب سیلیکون ژل و پلاستوزوت در حالت استاتیکی بیش‌ترین تنش و کرنش را نشان می‌دهند. با توجه به کانتور کرنش نشان داده‌شده در شکل (۷) سیلیکون توزیع کرنش بیشتری دارد لذا بهترین جذب انرژی را انجام می‌دهد، پس در بین کفی‌های تک لایه جزو بهترین جنس‌ها محسوب می‌شود. همچنین پلی فوم و اتیلن وینیل استات با توجه به کرنش کم و کانتور تنشی که از خود نشان می‌دهد دارای تمرکز تنش بالا بوده و کفی‌های تک لایه از این جنس مناسب نیست.

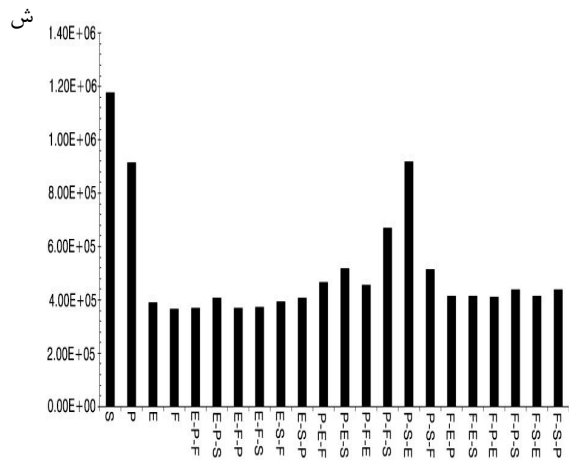
برای بررسی کفی‌های چندلایه، ۱۸ چیدمان مدنظر قرار گرفت. از تحلیل‌های انجام‌گرفته می‌توان نتیجه‌گیری کرد که جنس نرم‌تر بهتر است با کف پا و جنس سخت‌تر با زمین در تماس باشند، البته این نتیجه با ماهیت کفی طبی برای افراد دیابتی کاملاً سازگار است. مطابق شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود در بین چیدمان‌های موجود به ترتیب از لایه‌ی اول پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات بیش‌ترین توزیع کرنش و تنش را دارا است. لذا این کفی عملکرد بهتری در جذب انرژی را دارد و فشار کف پا را بهتر توزیع می‌کند.

#### بحث:

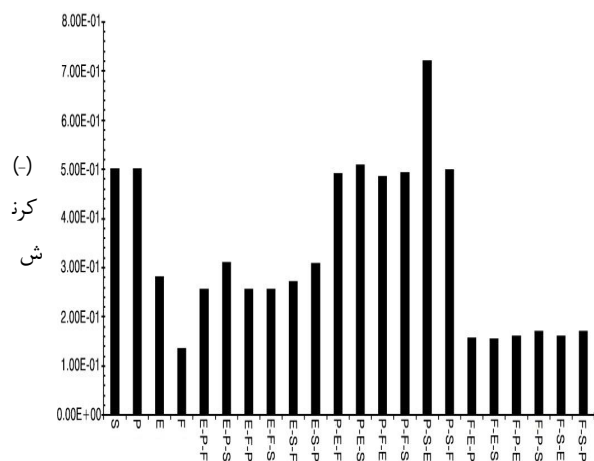
یکی از نکاتی که باید به آن توجه داشت این است که با توجه به اینکه زمان حل استاتیکی بسیار پایین می‌باشد این تحلیل می‌تواند کمک زیادی در به دست آوردن جواب اولیه و مقایسه‌ی کفی‌ها در جنس‌ها و هندسه‌های متفاوت باشد. به‌رحال بسیاری از فعالیت‌های



شکل ۸: کانتور کرنش در حالت استاتیکی: قسمت (a) کانتور کرنش کفی سه لایه‌ی پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات. (b) کانتور کرنش کفی سه لایه‌ی پلی فوم-اتیلن وینیل استات-پلاستوزوت



شکل ۹: مقایسه‌ی ماکزیمم تنش



شکل ۱۰: مقایسه‌ی ماکزیمم کرنش

#### نتایج تست عملی:

اعداد جدول (۴) فشار وارده به کفی که توسط سنسورهای نصب‌شده در کفی‌های سیستم پدار می‌باشد، را نشان می‌دهند. این تست‌ها در حالت ایستاده انجام شد.

روزانه‌ی انسان‌ها در حالت ایستاده انجام می‌شود و آنالیز استاتیکی از این جهت نیز حائز اهمیت است. از آنالیز کفی‌ها نتیجه‌گیری شد که استفاده از کفی طبی برای بیماران دیابتی بهتر از عدم وجود آن است. با توجه به نتایج تحقیقات قبلی [۳۲] کفی‌های سفارشی خیلی بهتر در توزیع تنش و کرنش مناسب نسبت به کفی‌های تخت عمل می‌کنند، در این تحقیق نیز سطح کفی به صورت کامل مطابق با قوس‌های پا ساخته شد. عملکرد بهترین کفی سه لایه خیلی مناسب‌تر از بهترین کفی‌های تک لایه است که سیستم پدار هم بیانگر همین موضوع است. همچنین نتایج المان محدود پا با نتایج دیگران مقایسه شده است. کفی‌های رایج در بازار برای افراد دیابتی سیلیکون است. منتها سیلیکون باعث تعرق پا می‌شود و عرق کردن باعث زخم شدن می‌گردد. راه‌حل ارائه‌شده در این تحقیق برای ساخت کفی‌ها به این گونه است که از خواص مثبت سیلیکون به عنوان لایه‌ی دوم بهره برده شود تا سیلیکون با پا در ارتباط نباشد. همچنین در لایه‌ی اول از پلاستوزوت استفاده شود زیرا فوم پلاستوزوت فوم هم خواص خوبی در جذب تنش و ایجاد کرنش مناسب دارد و همچنین به دلیل فوم بودن عرق کف پا را جذب می‌کند. مشاهده می‌شود وجود سیلیکون به عنوان لایه‌ی میانی عملکرد کفی را بسیار بهبود می‌بخشد، از طرفی کفی چندلایه‌ی پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات نسبت به کفی تک لایه‌ی سیلیکونی وزن بسیار کمتری دارد.

همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود بهترین کفی سه لایه عملکرد بهتری نسبت به کفی‌های تک لایه دارد به طوری که ماکزیمم تنش در تحلیل استاتیکی سیلیکون ۱۱۷۸ کیلو پاسکال و در کفی سه لایه‌ی پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات ۹۱۶/۲ کیلو پاسکال است. پس می‌توان نتیجه گرفت کفی تک لایه‌ی سیلیکونی حدود ۲۲ درصد بهتر از کفی سه لایه‌ی اتیلن وینیل استات در توزیع تنش عمل می‌کند. همچنین ماکزیمم کرنش در تحلیل استاتیکی سیلیکون ۰/۵۰۱۲ و در کفی سه لایه‌ی پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات ۰/۷۲۱۶ است. پس می‌توان نتیجه گرفت کفی سه لایه حدود ۳۰٪ بیشتر از کفی تک لایه‌ی سیلیکونی در کرنش عمل می‌کند و چون کرنش در کفی نشان‌دهنده‌ی میزان جذب انرژی عکس‌العمل از طرف زمین است پس کفی سه لایه پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات عملکرد بهتری نسبت به سیلیکون دارد. پس با توجه به نتایج شبیه‌سازی می‌توان گفت از خواص مثبت سیلیکون می‌توان در کفی‌های چندلایه به نحو احسن بهره برد.

تحقیق بارانی و همکاران [۲۴] فقط روی کفی‌های تک لایه و در حالت استاتیکی انجام شد که سیلیکون و پلاستوزوت بهترین نتایج را دادند. در مقاله‌ی حاضر بین کفی‌های تک لایه در حالت استاتیکی سیلیکون و پلاستوزوت بهترین نتیجه را دادند.

در تحقیق مسیبی و همکاران [۲۵] که روی همین کفی‌ها در حالت دینامیکی انجام شده است نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از کفی سه لایه به طور نسبی ۳۱٪ تمرکز تنش ون میز و ۳۰٪ کرنش

نسبت به کفی‌های تک لایه در کف پای بیمار می‌توان کاهش داد. ولی روش حل به صورت استاتیکی کفی سیلیکونی حدود ۲۲ درصد در جذب تنش بهتر عمل کرده است. همچنین نتایج تست عملی در حالت دینامیکی کفی تک لایه‌ی سیلیکونی و سه لایه پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات به ترتیب ۳۰٪ و ۵۴٪ نسبت به حالت پابرهنه فشار را در کف پا کاهش می‌دهد. همچنین نتایج تست عملی در حالت استاتیکی نشان می‌دهد کفی تک لایه‌ی سیلیکونی و سه لایه‌ی پلاستوزوت-اتیلن وینیل استات به ترتیب ۷۲ درصد و ۷۸ فشار را در کف پا نسبت به حالت پابرهنه کاهش می‌دهند. با یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان نمود کفی سه لایه‌ی پلاستوزوت-سیلیکون-اتیلن وینیل استات حدود ۵ درصد در جذب کرنش و ۳۰ درصد در کرنش بهتر از کفی سیلیکونی عمل می‌کند. همچنین در تست‌های عملی مشاهده می‌شود به طور میانگین کفی تک لایه‌ی سیلیکونی و سه لایه‌ی اتیلن وینیل استات به ترتیب ۵۱ درصد و ۶۶ درصد فشار را در کف پا نسبت به حالت پابرهنه کاهش می‌دهند.

لاوری و دیگران [۳۰] تنش برشی بین لایه‌های کفی سه لایه و سفت بودن کفی را بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که اتیلن وینیل استات در لایه‌ی وسط مناسب نیست و باعث صلب بودن کفی می‌شود. در این تحقیق اتیلن وینیل استات نیز در لایه‌ی وسط مناسب نیست که این نتایج را شکل‌های (۹) و (۱۰) اثبات می‌کند.

بر طبق جدول (۴) ماکزیمم فشارها زیر شست، متاتارسال اول و دوم و پاشنه به دست آمدند که مطابقت خوبی با تحقیقات [۹، ۱۲، ۱۳، ۱۰، ۱۱، ۱۵] دارد.

#### منابع:

- [۱] Singh, N., Armstrong, DG., Lipsky, BA., ۲۰۰۵. "Preventing foot ulcers in patients with diabetes". JAMA, ۱۲;۲۹۳(۲), Jan, pp.۲۱۷-۲۲۸.
- [۲] Reiber, GE., Pecoraro, RE., Koepsell, TD., ۱۹۹۲ "Risk factors for amputation in patients with diabetes mellitus. A case-control study" Ann Intern Med, ۱۵;۱۱۷(۲), Jul, pp.۹۷-۱۰۵.
- [۳] Veves, A., Murray, HJ., Young, MJ., Boulton, AJ., ۱۹۹۲. "The risk of foot ulceration in diabetic patients with high foot pressure: a prospective study". Diabetologia, ۳۵(۷), Jul, pp.۶۶۰-۳.
- [۴] Reiber, GE., Vileikyte, L., Boyko, EJ., del Aguila, M., Smith, DG., Lavery, LA., Boulton, AJ., ۱۹۹۹. "Causal pathways for incident lower-extremity ulcers in patients with diabetes from two settings". Diabetes Care, ۲۲(۱), Jan, pp.۱۰۷-۱۱۲.
- [۵] Chantelau E., ۲۰۰۰. "Footwear for the high-risk patient". In: Boulton AJM, Connor, H., Cavanagh, PR., The Foot in Diabetes. Wiley John & Sons, Ltd ۲rd ed. New York: Wiley John & Sons Inc. P.۱۳۱-۱۴۲.
- [۶] Wooldridge, J., Bergeron, J., Thornton, C., ۱۹۹۶. "Preventing diabetic foot disease: lessons from the Medicare therapeutic shoe demonstration". American Journal Public Health, ۸۶(۷), July, pp. ۹۳۵-۹۳۸.
- [۷] Bus, SA., Ulbrecht, JS., Cavanagh, PR., ۲۰۰۴. "Pressure relief and load redistribution by custom-made



- [۲۲] Chu, TM., Reddy, NP., ۱۹۹۵. "Stress distribution in the ankle-foot orthosis used to correct pathological gait". *J Rehabil Res Dev*, ۳۲(۴), Nov, pp. ۳۴۹-۶۰.
- [۲۳] Syngellakis, S., Arnold, MA., Rassoulian, H., ۲۰۰۰, "Assessment of the non-linear behaviour of plastic ankle foot orthoses by the finite element method". *Proc Inst Mech Eng H*, ۲۱۴(۵), pp. ۵۲۷-۳۹.
- [۲۴] Barani, Z., Haghpanahi, M., Katoozian, H., ۲۰۰۵. "Three dimensional stress analysis of diabetic insole: a finite element approach". *Technol Health Care*, ۱۳(۳), February, pp. ۱۸۵-۹۲.
- [۲۵] Ali Reza, Mossayebi., Aazam, Ghassemi., Nima, Jamshidi., Payam, Saraeian., ۲۰۱۴. "Investigation on the effect of applied hyper elastic materials in the diabetic insole during the gait by finite element method". *Journal of Rehabilitation Medicine* (in press).
- [۲۶] Gefen, A., Megido-Ravid, M., Itzchak, Y., Arcan, M., ۲۰۰۰. Biomechanical analysis of the three-dimensional foot structure during gait: a basic tool for clinical applications. *Journal of Biomechanical Engineering* ۱۲۲, ۶۳۰-۶۳۹.
- [۲۷] Giddings, V.L., Beaupre, G.S., Whalen, R.T., Carter, D.R., ۲۰۰۰. Calcaneal loading during walking and running. *Medicine and Science in Sports and Exercise* ۳۲, ۶۲۷-۶۳۴.
- [۲۸] Camacho, D.L., Ledoux, W.R., Rohr, E.S., Sangeorzan, B.J., Ching, R.P., ۲۰۰۲. A three-dimensional, anatomically detailed foot model: a foundation for a finite element simulation and means of quantifying foot-bone position. *Journal of Rehabilitation Research & Development* ۳۹, ۴۰۱-۴۱۰.
- [۲۹] Chen, W.P., Ju, C.W., Tang, F.T., ۲۰۰۳. Effects of total contact insoles on the plantar stress redistribution: a finite element analysis. *Clinical Biomechanics* ۱۸, S۱۷-S۲۴.
- [۳۰] Lavery, LA., lanctot, DL., Constantinides, G., Zamorano, RG., Athanasiou, KA., Mauliagrawal, C., ۲۰۰۵. "Wear and Biomechanical Characteristics of a Novel Shear-Reducing Insole with Implications for High-Risk Persons with Diabetes". *Diabetes Technology and Therapeutics*, ۷(۴), Aug, pp. ۶۳۸-۶۴۶.
- [۳۱] Ricardo, LA., Liliana, BV., Donovan, JL., Kirk, ES., Paul, KC., Mary, KH., Michael, JM., Multi-plug ۲۰۰۸. "insole design to reduce peak plantar pressure on the diabetic foot during walking" *Medical and Biological Engineering and Computing*, ۴۶(۴), April, pp. ۳۶۳-۳۷۱.
- [۳۲] Owings, TM., Woerner, JL., Frampton, JD., Cavanagh, PR., Botek, G., ۲۰۰۸. "Custom Therapeutic Insoles Based on Both Foot Shape and Plantar Pressure Measurement Provide Enhanced Pressure Relief" *Diabetes Care*, ۳۱(۵), May, pp. ۸۳۹-۴۴.
- [۳۳] چگینی، ز، "ارتزهای پا و کفش طبی"، ۱۳۷۲، پایان نامه کارشناسی، ارتوپدی فنی دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی ایران.
- [۳۴] ABAQUS Available at: [http://www.tuchemnitz.de/projekt/abq\\_hilfe/docs/v۶.۱۱/books/usb/default.htm.۲۱.۵.۱](http://www.tuchemnitz.de/projekt/abq_hilfe/docs/v۶.۱۱/books/usb/default.htm.۲۱.۵.۱), Hyper elastic behavior of rubberlike materials. Accessed Mar ۵, ۲۰۱۴.
- insoles in diabetic patients with neuropathy and foot deformity". *Clin Biomech*, ۱۹(۶), Jul, pp. ۶۲۹-۳۸.
- [۸] Viswanathan, V., Madhavan, S., Gnanasundaram, S., Gopalakrishna, G., Das, BN., Rajasekar, S., Ramachandran A. ۲۰۰۴. "Effectiveness of different types of footwear insoles for the diabetic neuropathic foot: a follow-up study". *Diabet Care*, ۲۷(۲), Feb, pp. ۴۷۴-۷.
- [۹] Abboud, RJ., Rowley, DI., ۱۹۹۶. "Foot pressure measurement—History and development. In: *Surgery of Disorders of Foot and Ankle*", (Ch III. ۴). Martin Dunitz Ltd.
- [۱۰] Grampp, J., Willson, J., Kernozek, T. ۲۰۰۰. "The plantar loading variations to uphill and downhill gradients during treadmill walking". *Foot Ankle Int*, ۲۱(۳), Mar, pp. ۲۲۷-۳۱.
- [۱۱] Safaeepoor, Z., Ebrahimi, I., Saedi, H., Kamali, M., ۱۳۸۸. "investigate plantar pressure distribution in healthy adults during standing and walking". *Journal of Rehabilitation*, ۱۰(۲), pp. ۸-۱۵. (In Persian)
- [۱۲] Cavanagh, PR., Rodgers, MM., Iiboshi, A., ۱۹۸۷. "Pressure distribution under symptom free feet during barefoot standing", *Foot ankle*, ۷(۵), Apr, pp. ۲۶۲-۷۶.
- [۱۳] Putti, AB., Arnold, GP., Cochrane, L., ۲۰۰۶. "The pedar in-shoe system: Repeatability and normal pressure values", *Gait and Posture*, ۲۵(۳), Mar, pp. ۴۰۱-۵.
- [۱۴] Hennig, E.M., "The human foot during locomotion -Applied research for footwear", ۲۰۰۲. Invited Wei Lun Public Lecture, ۱۰ October, Hong Kong.
- [۱۵] Abu-Faraj, ZO., Harris, GF., Chang, AH., Shereff, MJ., ۱۹۶۹. "Evaluation of a rehabilitative pedorthic: plantar pressure alterations with scaphoid pad application". *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, ۴(۴), Dec, pp. ۳۲۸-۳۶.
- [۱۶] Actis, RL., Ventura, LB., Smith, KE., Commean, PK., Lott, DJ., Pilgram, TK., Mueller, MJ., ۲۰۰۶. "Numerical simulation of the plantar pressure distribution in the diabetic foot during the push-off stance". *Med Biol Eng Comput*, ۴۴(۸), Aug, pp. ۶۵۳-۶۳.
- [۱۷] Verdejo, R., Mills, NJ., ۲۰۰۴. "Heel-shoe interactions and the durability of EVA foam running-shoe midsoles". *J Biomech*, ۳۷(۹), Sep, pp. ۱۳۷۹-۸۶.
- [۱۸] Koyama, K., Umezawa, J., Kurihara, T., Naito, H., Yanagiya, T., ۲۰۱۰. "The influence of position and area of shock absorbing material of shoes on ground reaction force during walking". *۱۳th World Congress of Biomechanics*.
- [۱۹] Keenan, GS., Franz, JR., Dicharry, J., Croce, UD., Kerrigan, DC., ۲۰۱۱. "Lower limb joint kinetics in walking: The role of industry recommended footwear". *Gait & posture*, ۳۳(۳), March, pp. ۳۵۰-۵.
- [۲۰] Shakoor, N., Lidtke, RH., Sengupta, M., Fogg, LF., Block, JA., ۲۰۰۸ "Effects of specialized footwear on joint loads in osteoarthritis of the knee". *Arthritis Care & Research*, ۵۹(۹), Sep, pp. ۱۲۱۴-۲۰.
- [۲۱] Chen, WP., Ju, CW., Tang, FT., ۲۰۰۳. "Effects of total contact insoles on the plantar stress redistribution: a finite element analysis". *Clin Biomech* (Bristol, Avon), ۱۸(۶), Jul, pp. ۱۷-۲۴.

