

پیش‌بینی فشار پوشش‌های فشارنده بر روی بدن انسان با استفاده از روش اجزای محدود

زینب سلطانزاده*، بتول کریمی

یزد، دانشگاه یزد، دانشکده مهندسی نساجی، پردیس فنی و مهندسی، صندوق پستی ۸۹۱۹۵-۷۴۱
z.soltanzade@yazd.ac.ir

چکیده

مهم‌ترین کاربرد پوشش‌های فشارنده، درمان آثار سوختگی و رگ‌های واریسی می‌باشد. اصل درمان در این پوشش‌ها، مقدار و توزیع فشار بر روی بدن است که توسط پزشک معالج تعیین می‌شود. ابعاد و جنس پوشش‌ها بایستی به‌گونه‌ای انتخاب شود که فشار مورد نظر از طرف پوشش به بدن شخص بیمار اعمال شود. بدین منظور یکی از بهترین روش‌های پیش‌بینی فشار استفاده از شبیه‌سازی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار آباکوس، مدل سه‌بعدی از تماس و فشار بین پوشش فشارنده و بدن ارائه شده است. در ابتدا مدل به صورت استوانه‌ای طراحی شد و مقادیر فشار، کرنش و تنش روی دست و پوشش فشارنده و همچنین کانتورهای رنگی توزیع فشار نشان دادند که مدل به درستی در نرم‌افزار طراحی و اجرا شده است. سپس مدل‌سازی به صورت مخروطی با استفاده از اندازه‌های واقعی بدن و پوشش فشارنده انجام شد و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش تجربی مقایسه شدند. مقایسه نتایج عملی و مدل نرم‌افزاری نشان داد که این مدل به خوبی و با متوسط درصد خطای ۱۸ درصد، توزیع فشار و وضعیت تماس بین دست و پوشش فشارنده را شبیه‌سازی کرده است. روش استفاده شده در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل یک روش ساده و کاربردی است.

کلمات کلیدی: پوشش‌های فشارنده، روش اجزای محدود، توزیع فشار، بدن انسان، آباکوس

Prediction of pressure garment's pressure on human body using the finite element method

Zeynab Soltanzadeh*, Batoul Karimi

Department of Textile Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, P.O. Box: 89195-741
z.soltanzade@yazd.ac.ir

Abstract:

Today, the technical and engineering applications of textiles have received much attention from engineering researchers. It can be said that the most attention in this area is focused on medical textiles. There is a special group of medical textiles called compression garments, the function of which is to apply pressure to the body and was used for the first time for Pressure Therapy. The most important applications of these garments are to treat burns and varicose veins. The principle of treatment in these garments is the amount and distribution of pressure on the body, which is determined by the physician. The dimensions and material of the pressure garments should be chosen in such a way that the desired pressure is applied to the patient's body. For this purpose, one of the best methods for predicting pressure is to use simulation using finite element methods. In this research, a three-dimensional model of contact and pressure between the pressure garment and the human body is presented using ABAQUS software. Initially, the model was designed as a cylinder and the values of pressure, strain and stress on the hand and the pressure garment as well as pressure distribution showed that the model was properly designed and implemented in software. Then, the modeling was performed conically using real body sizes and pressure garment and the results were compared with the experimental results. Comparison of experimental results and model results showed that this model well simulates the pressure distribution and contact between the hand and the pressure garment. The method used in this research is a simple and practical method for model validation.

Keywords: Pressure garment, Finite element method, Pressure distribution, human body, ABAQUS

۱- مقدمه

می‌دهند. روش‌های اعمال فشار متفاوتی برای درمان اسکار پیشنهاد شده است که موفق‌ترین آنها استفاده از پوشش‌های فشارنده است که توسط پزشکان به صورت فراگیر استفاده می‌شود. علاوه بر روش اعمال فشار، در واقع مبنای استفاده از پوشش‌های فشاری بر اساس دو اصل استوار است: ایجاد محدودیت جریان خون در بافت (نسج) اسکار بر اثر اعمال فشار و ممانعت از رشد بافت متورم اسکار بر اثر اعمال فشار. از دیگر کاربردهای درمانی پوشش‌های فشارنده، درمان عارضه واریس است. در رگ‌هایی که دچار عارضه واریس شده‌اند، برگشت‌پذیری خون به قلب با مشکل مواجه می‌شود. اعمال فشار در ناحیه واریسی به کمک جوراب‌های واریس و باندهای کشسان یکی از راه‌های درمان است.

در پژوهش‌های مختلف سعی شده است که مقدار فشار مورد تحمل نواحی مختلف بدن و آستانه درد، آزمایش و اندازه‌گیری شود، در تعدادی از این تحقیقات فشار لباس به صورت مستقیم و با استفاده از یک حسگر اندازه‌گیری شده است [۴-۱]. اگرچه اندازه‌گیری‌ها با حسگرهای دقیق انجام می‌شود اما با این روش تنها فشار نقطه در تماس با حسگر اندازه‌گیری می‌شود و نمی‌توان توزیع فشار را مشخص کرد.

کرنش محیطی به عنوان یک شاخص برای ارزیابی راحتی فشاری لباس می‌تواند اندازه‌گیری شود. بدن هنگام پوشیدن لباس‌های چسبان، جابجا می‌شود. این جابجایی در بعضی نقاط بدن می‌تواند خیلی کم باشد به طوری که با چشم دیده نشود. متدهای مختلفی برای اندازه‌گیری جابجایی وجود دارد اما در مورد اندازه‌گیری فشار ناشی از لباس بر بدن، این دستگاه‌ها قابل استفاده نیستند، چون سطح بدن در زیر

پوشش‌های کشسان^۱ تنگ و چسبانی^۲ که به منظور اعمال فشار بر روی قسمت‌های مختلف بدن پوشیده می‌شوند پوشش‌های فشارنده نام‌گذاری شده‌اند. در تهیه این محصول از پارچه‌هایی با ساختارهای متفاوت (تاری-پودی و حلقوی) استفاده می‌شود. با این حال کاربرد پارچه‌های حلقوی کشسان متداول‌تر است. خاصیت کشسانی این پارچه‌ها توسط الیاف کشسان (لایکرا^۳ اسپاندکس^۴ و غیره) که در ساختار پارچه قرار داده می‌شود تامین می‌گردد. پوشش‌های فشارنده برای اولین بار جهت کاربری درمانی مورد استفاده قرار گرفتند. در برخی عوارض و بیماری‌ها اعمال فشار بر روی عضو یکی از بهترین روش‌های درمان نسبت به سایر روش‌ها است. درمان با اعمال فشار را فشار درمانی^۵ می‌گویند. روش‌های متعددی برای اعمال فشار وجود دارد یکی از این روش‌ها استفاده از پوشش‌های الاستیک است که روی عضو مورد نظر پوشانده می‌شود. یکی از مهمترین کاربردهای پوشش‌های فشارنده در درمان آثار سوختگی است. در جراحات‌های سوختگی پس از بهبود اولیه، بافت بدن به صورت متورم، سرخ‌رنگ و نازیبا خواهد بود. این بافت، اسکار^۶ نامیده می‌شود. اثر این جراحی باعث می‌شود تا بیمار درد و خارش احساس کند. بافت اسکار از سلول‌های جوان و رو به رشد تشکیل شده‌اند که نسبت به تغییرات تنش و نیروهای فشاری خارجی عکس‌العمل سریع از خود نشان

^۱Elastic^۲Tight fitting^۳Lycra^۴Spandex^۵Pressure Therapy^۶Scar

که می‌تواند عکس‌العمل‌های دینامیکی بین بدن و لباس را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کنند. در این تحقیق مدل ارائه شده، اعتبارسنجی نشده است. دان^۱ و همکارانش [۸] برای شبیه‌سازی فشار ساق جوراب بر روی پا، مدلی را در نرم‌افزار ANSYS ارائه کردند و برای اعتبارسنجی مدل از دستگاه اندازه‌گیری فشار لباس AME3037S-5 در ۷۲ نقطه در محیط ساق پا استفاده کردند. یو^۲ و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۶، یک مدل بیومکانیکی با استفاده از روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی توزیع فشار در پشت دست، که با یک دستکش فشار درمانی پوشیده شده است ارائه دادند. دستکش یک پوسته الاستیک ایزوتروپیک و دست یک جسم همگن، ایزوتروپیک و الاستیک خطی فرض شد. برای اعتبارسنجی مدل و تایید توزیع فشار پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی، از یک دستکش مجهز به ۴۹ سنسور که در قسمت پشت دستکش با فاصله‌های منظم تعبیه شده است، استفاده شد.

نتایج به دست آمده از سنسورها با نتایج مدل، تطابق قابل قبولی دارد. ژائو و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۲۰ یک مدل سه بعدی بیومکانیکی برای اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی بازو را طراحی کردند و نتایج به دست آمده با فشارهای اندازه‌گیری شده از ۳۰۸ سنسور که در پوشش فشارنده جاسازی شده بود، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل ایجاد شده در نرم‌افزار اجزای محدود، به خوبی می‌تواند توزیع فشار را پیش‌بینی کند.

لباس را نمی‌توانند تشخیص دهند. می‌توان گفت روش تجربی برای اندازه‌گیری جابجایی بدن زیر لباس وجود ندارد. به همین دلیل بهترین روش را می‌توان شبیه‌سازی عنوان کرد. در بیشتر تحقیقات انجام شده از نرم‌افزارهای اجزای محدود برای شبیه‌سازی استفاده شده است [۵]. در مرحله بعد لازم است مدل، اعتبارسنجی^۱ شود و نتایج مدل با نتایج به دست آمده از آزمایشات تجربی یا یک مدل ریاضی مقایسه شود.

ژانگ^۳ و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۲ با تجزیه و تحلیل خصوصیات لباس‌های چسبان، یک مدل سه بعدی در یک نرم‌افزار تجاری شبیه‌سازی مجازی بدن انسان ارائه دادند. آن‌ها یک مانکن خانم را که لباس اسپرت چسبانی پوشیده است و با سرعت ثابت حرکت می‌کند، را در نظر گرفتند. دو نوع لباس با جنس‌های جین و نایلون مورد استفاده قرار گرفتند و توزیع تنش و فشار در این لباس‌ها به دست آمد. سپس نتایج به دست آمده از مدل اجزای محدود را با یک تئوری مکانیک تماس دینامیکی فوق‌العاده پیچیده مقایسه کردند و صحت مدل را تایید کردند.

در این مدل، بدن به عنوان جسمی صلب فرض شده است؛ بنابراین نمی‌توان عکس‌العمل‌های دینامیکی بین بدن و لباس را به صورت واقعی شبیه‌سازی کرد. مخصوصاً تغییر شکل بدن و توزیع فشار در قسمت‌های زیر پوست و بافت نرم قابل پیش‌بینی نیست. به همین دلیل ینگ^۴ و همکارانش [۷] در سال ۲۰۱۰ یک مدل بیومکانیکی از بدن ارائه داند

^۱Validation^۲Zhang^۳Yeung^۱Dan^۲Yu

همان‌طور که گفته شد، در تمام تحقیقات انجام شده برای اعتبارسنجی مدل از روش‌هایی استفاده شده است که نیازمند تعداد زیادی سنسور و یا یک مدل ریاضی پیچیده است. در این تحقیق یک مدل سه بعدی ساده برای پیش‌بینی توزیع فشار پوشش فشارنده بر روی دست ارائه شده است و برای اعتبارسنجی هم یک روش ساده و کاربردی پیشنهاد شده است.

برای شبیه‌سازی پوشش فشارنده، در بعضی از تحقیقات واحدهای ساختاری پارچه مدل می‌شوند [۱۱] ولی در این تحقیق پوشش فشارنده به عنوان یک پوسته‌ی کشسان نازک با مواد خطی و هندسه‌ی غیرخطی فرض می‌شود.

۲- آزمایشات انجام شده

۱-۲- اندازه‌گیری خواص مکانیکی نمونه‌های پوشش فشارنده

آزمایش‌هایی بر روی پوشش‌های فشارنده‌ی تهیه شده انجام شد تا پارامترهای ضریب پواسون، مدول الاستیسیته، وزن واحد سطح و ضخامت بدست بیایند. این پارامترها برای شبیه‌سازی دقیق‌تر مدل در نرم افزار لازم است.

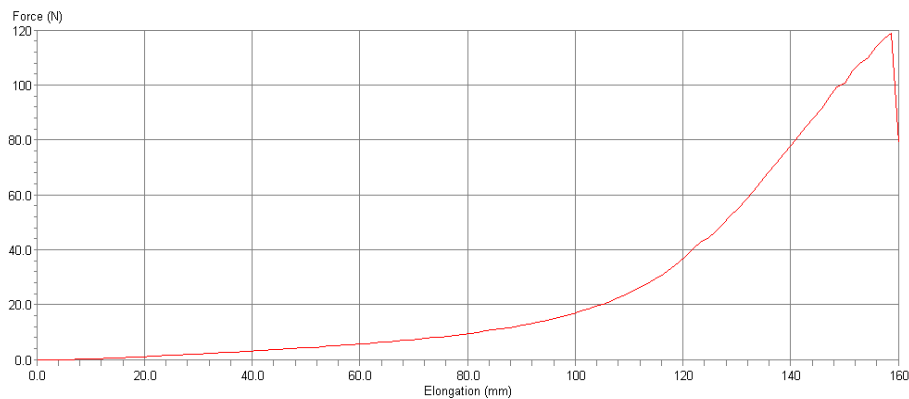
برای بدست آوردن ضخامت با استفاده از دستگاه ضخامت سنج، ضخامت ده نقطه مختلف نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین وزن پنج نمونه از هر کدام از پوشش‌های فشارنده اندازه‌گیری شد و میانگین‌ها در جدول ۱ ارائه شد.

جدول ۱- مشخصات پوشش‌های فشارنده نمونه

ضریب پواسون	مدول (KPa)		مدول برشی (KPa)	وزن میلی‌متر مربع $\times 10^{-4}$ (g)	ضخامت (mm)	محیط (mm)		شماره نمونه
	ردیف	رج				دور بازو	دور مچ	
0.13	150	107	27.5	2.1	0.756	180	150	1
0.32	532	363	11.7	1.5	0.521	250	180	2
0.15	321	258	4.6	2.3	0.868	210	170	3
0.44	72	40	9.1	1.5	0.481	200	160	4
0.42	144	114	3.6	1.3	0.522	190	170	5

با استفاده از نمودارهای نیرو ازدیاد طول نیز، مدول الاستیسیته برای هر نمونه در سه راستای رج، ردیف و ۴۵ درجه بدست آمد. به این صورت که نمونه‌هایی با ابعاد 200×50 میلی‌متر (طبق استاندارد ASTM D5035) در دستگاه استحکام‌سنج مدل MICRO350 آزمایش شدند. سرعت دستگاه به گونه‌ای تنظیم شد که مدت زمان شروع آزمایش تا پارگی 3 ± 20 ثانیه باشد (بین 450 mm/min تا 500 mm/min).

شیب اولیه نمودار نیرو ازدیاد طول برابر مدول الاستیسیته است. یک نمونه از نمودارهای بدست آمده در شکل ۱ ارائه شده است. با این آزمایش‌ها ثابت‌های E_1 و E_2 به دست آمدند. اما ثابت دیگر، مدول برشی است که برای پارچه برابر است با مدول الاستیسیته در جهت ۴۵ درجه تقسیم بر ۴ [۱۲].



شکل ۱- نمودار تنش کرنش یک نمونه پارچه

۲-۲- آزمایشات تجربی اندازه‌گیری کرنش

محیطی

از شخصی که از اندازه‌های دست وی، برای مدل‌سازی در نرم افزار آباکوس استفاده شد، برای مقایسه با مدل تجربی نیز استفاده شد؛ به این ترتیب که بعد از رسم خطوطی با طول مشخص روی پوشش‌های فشارنده، از وی درخواست شد آن‌ها را دست کند. متوسط تغییرات اندازه خطوط (کرنش محیطی تجربی) برای مقایسه با نتایج تغییرات اندازه‌ی لباس (کرنش محیطی مدل) در مدل نرم افزار اندازه‌گیری شدند. نتایج این مقایسه برای بررسی میزان خطای مدل استفاده خواهد شد.

۳- شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس^۱

۳-۱- فرضیات مدل

این مدل بر اساس فرضیات زیر شبیه‌سازی شده است:

- ۱- بدن انسان یک جسم جامد کشسان است.
- ۲- پوشش فشارنده به عنوان یک پوسته‌ی کشسان نازک با مواد خطی و هندسه‌ی غیرخطی فرض می‌شود.

مقدار قدر مطلق نسبت کرنش عرضی یا جانبی به کرنش طولی یا محوری را به افتخار ریاضی دان فرانسوی سیمون دنیس پواسون، نسبت پواسون می‌نامند. به تعبیری دیگر هنگامی که نمونه‌ای تحت بار قرار می‌گیرد، مادام اینکه از حد کشسانی ماده تجاوز نشود، تنش کرنش حاصل، از قانون هوک تبعیت می‌کند. در تمام ماده‌های مهندسی، افزایش طول حاصل از نیروی کشش محوری، در راستای این نیرو باعث یک انقباض در راستای عرض می‌شود.

قدر مطلق نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری، ضریب پواسون نامیده می‌شود، که معمولاً با ν نمایش داده شده و اغلب برای ارتباط کرنش‌ها در دو جهت عمود بر هم استفاده می‌شود [۱۳].

برای اندازه‌گیری ضریب پواسون، نمونه‌هایی با ابعاد 30×6 سانتی متر تهیه شد و خطوط عمودی و افقی به طول ۳ سانتی متر روی آن‌ها کشیده شد. هر نمونه با اعمال ۲۰٪ نیروی پارگی در دستگاه استحکام سنج، کشیده شد و تغییرات طول هر کدام از خطوط رسم شده، اندازه‌گیری شد.

در این شبیه‌سازی، برای هر جزء مدل در نرم افزار، مدول یانگ و ضریب پواسون مورد نیاز است که طبق جدول ۲ اعمال شدند [۱۴].

جدول ۲- ثابت‌های مهندسی بدن انسان [۱۴]

ضریب پواسون	مدول یانگ (MPa)	ماده
0.49	0.06	بافت نرم
0.3	7300	استخوان

پنج مدل مختلف پوشش فشارنده نیز تهیه شدند که علاوه بر مدول یانگ و ضریب پواسون، وزن واحد سطح و ضخامت آن‌ها نیز اندازه‌گیری شد.

برای نزدیک‌تر کردن مدل مخروطی به واقعیت، اندازه‌های دست شخصی که برای این مدل‌سازی کاندید شده بود اندازه‌گیری شد. دور مچ ۱۸ سانتی‌متر و دور بازو (۵ سانتی‌متر بالاتر از آرنج) ۳۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

۳-۳- مراحل شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

ابتدا لازم است مدل هندسی در نرم افزار ایجاد شود. برای مدل کردن پوشش فشارنده ابتدا شکل هندسی استوانه‌ای برای هر ۵ پوشش فشارنده با مشخصاتی که ذکر شدند طراحی و اجرا شد. بعد از محاسبه درصد خطای مدل و آزمایش تجربی، در مرحله بعد مدل مخروطی، با توجه به ابعاد دست در جدول ۳ ترسیم شد.

جدول ۳- اندازه‌های بدن

مدل	دور مچ (cm)	دور بازو (cm)	طول (cm)
استوانه‌ای	-	31	30
مخروطی	18	31	30

۳- تغییرات تنش در اثر تغییرات ضخامت پارچه صفر در نظر گرفته می‌شود.

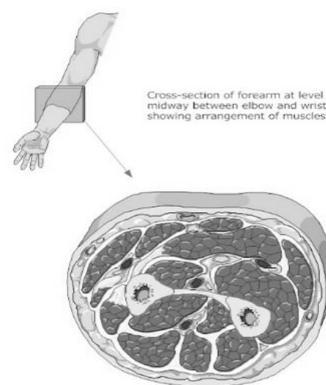
۴- اصطکاک بین لباس و بدن ناچیز فرض شده است.

۵- بدن انسان ترکیبی از استوانه و مخروط است.

۶- تماس بین بدن و لباس در تمام نقاط تماس یکسان است.

۲-۳- مشخصات دست و پوشش فشارنده در مدل

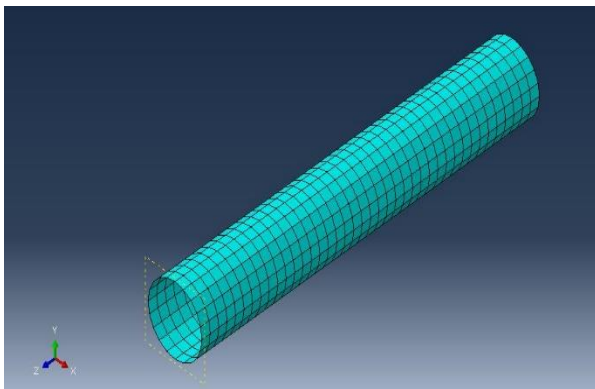
مچ دست تا پنج سانتی متر بالای آرنج، هدف این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. در این قسمت به جز ناحیه آرنج، بافت تقریباً یکسانی وجود دارد. دو استخوان و در اطراف آن تعدادی ماهیچه، اعصاب و رگ‌ها تشکیل دهنده ساق دست هستند (شکل ۲). به منظور ساده سازی این مدل، دست به صورت ترکیبی از یک استخوان و بافت نرم فرض شده است. بافت نرم شامل عضلات، رگ‌ها و اعصاب است که از نظر ثابت‌های مهندسی می‌توان آن‌ها را تقریباً یکسان در نظر گرفت. در ابتدا تمام این قسمت به صورت یک استوانه فرض می‌شود. بعد از شبیه سازی و مشاهده نتایج اولیه، مدل به صورت مخروطی نیز طراحی و اجرا می‌شود تا پارامترهای مورد نظر در حالت نزدیک‌تری به واقعیت اندازه‌گیری شوند.



شکل ۲- نمایی از سطح مقطع دست

قسمت استخوان و بافت نرم به صورت یک جسم سه بعدی، جامد^۱ و تغییرشکل‌پذیر^۲ در نظر گرفته شدند. برای مدل کردن پوشش فشارنده نیز از یک مدل استوانه‌ای از نوع پوسته‌ای تغییرشکل‌پذیر استفاده شد. برای هر کدام از قطعات ایجاد شده در مرحله قبل باید ثابت‌های مهندسی و چگالی آن‌ها در قسمت خصوصیات^۴ وارد شده و سپس ویژگی‌های مربوط به هر قطعه به آن نسبت داده شود. تمامی قطعات مدل به صورت همگن^۵ فرض شدند، به این معنی که ویژگی‌های آن‌ها در همه‌ی نقاط یکسان است. برای پوشش فشارنده که به صورت پوسته طراحی شده، ضخامت نیز مورد نیاز است، که طبق جدول (۲) وارد می‌شود. قطعات ایجاد شده را در قسمت مونتاژ^۶ مدل از نرم افزار آباکوس فراخوانی می‌کنیم و پوشش فشارنده را به گونه‌ای قرار می‌دهیم که هنگام اجرای مدل، کشیده شده و روی سطح دست قرار بگیرد (شکل ۳).

دقت کار تاثیر مستقیمی دارد. به همین دلیل تعداد مش‌ها تا جایی افزایش می‌یابد که تأثیری بر روی نتایج نداشته باشد. برای تنظیم تعداد المان‌ها، می‌توان تمام خطوط مدل را به هر تعداد مورد نیاز تقسیم کرد. یعنی تعداد گره‌ها روی هر خط توسط کاربر قابل تنظیم است. سپس با استفاده از دستور مش‌بندی، مطابق این تقسیم‌بندی‌ها، مدل المان‌بندی می‌شود. برای مش‌بندی ابتدا، مشخصات مش بر اساس خصوصیات قطعه که قبلاً وارد کرده‌ایم، تنظیم می‌شود، یعنی نوع المان‌ها برای بدن و پوشش فشارنده انتخاب می‌شود. المان به کار رفته در قطعه دست C3D8R و المان مورد استفاده در پوشش فشارنده S4R (شکل ۴) می‌باشند. سپس مش‌بندی روی حجم اعمال می‌شود.

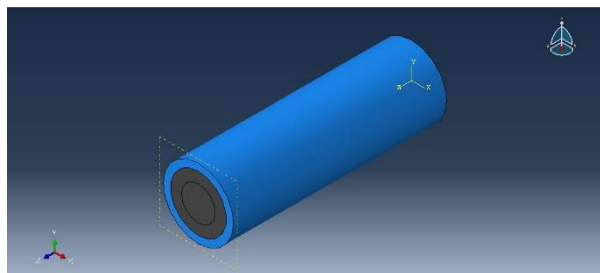


شکل ۴- مش بندی پوشش فشارنده

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج مدل استوانه‌ای

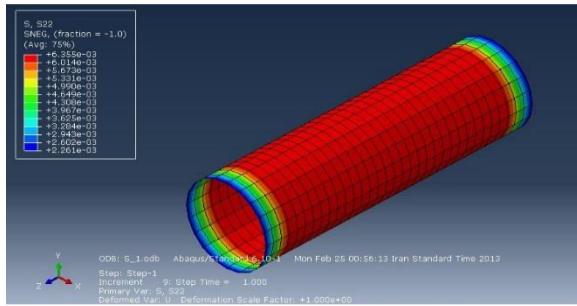
بعد از رسم مدل و تعیین تمام پیش فرض‌های مسأله در نرم افزار، فرمان حل صادر می‌شود و پس از انجام فرآیند حل مسأله می‌توان نتایج را مشاهده و به تحلیل آن‌ها پرداخت. گفته شد که به منظور بررسی فشار وارد بر دست، ابتدا مدلی



شکل ۳- نمونه‌ای از مدل مونتاژ شده

به منظور مش بندی قطعات از روش مش بندی منظم سه بعدی استفاده شد. نکته قابل توجه تعداد مش‌ها است که بر

- 1 Solid
- 2 Deformable
- 3 Shell
- 4 Property
- 5 Homogeneous
- 6 Assemble model



(ب)

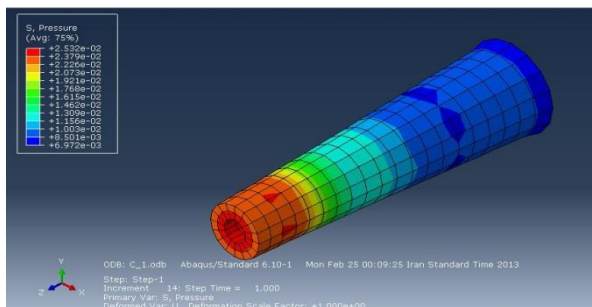
شکل ۷- توزیع تنش شعاعی در لباس.

فشار ایجاد شده از طرف لباس بر روی بدن همیشه مثبت است که در اثر همین فشار، بدن فشرده شده و لباس کشیده می شود. در نتیجه تنش منفی در بدن و مثبت در لباس ایجاد می شود. مقدار فشار ایجاد شده از طرف لباس بر روی بدن در بیشتر محیط تماس بین 800 Pa تا 1200 Pa تغییر می کند.

۴-۲- نتایج مدل مخروطی

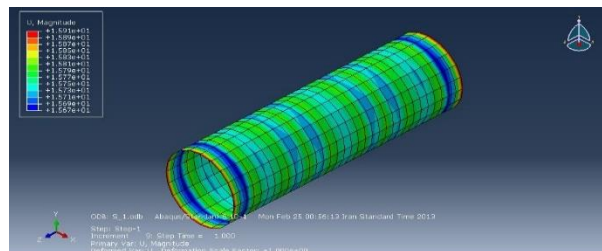
بعد از مدل سازی موفقیت آمیز دست و پوشش فشارنده به صورت استوانه، مدل به صورت مخروطی طراحی شد. اندازه های مورد استفاده در نرم افزار، دقیقاً برابر اندازه گیری های صورت گرفته روی دست و پوشش های فشارنده در نظر گرفته شدند.

شکل های ۸ تا ۱۱ توزیع فشار وارد بر دست، توزیع تنش و توزیع جابجایی را برای دست و پوشش فشارنده شماره ۱ به تفکیک نشان می دهد.



ساده به صورت استوانه ای طراحی و اجرا شد. این مدل برای هر ۵ نوع پوشش فشارنده تهیه شده، اجرا شد.

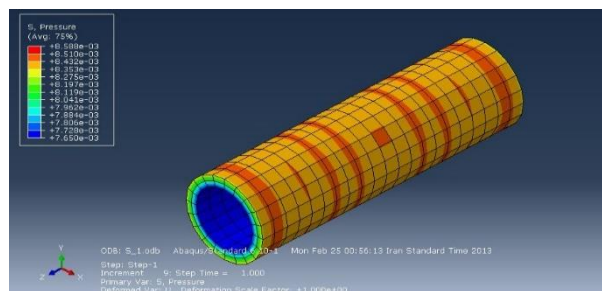
در شکل ۵ نمونه ای از مدل که نتایج حاصل از جابجایی روی پوشش فشارنده و دست را نمایش می دهد، ارائه شده است. کانتورهای رنگی نواحی دارای بیشترین و کمترین جابجایی را نشان می دهند. در نمودار سمت چپ نیز مقدار جابجایی ها را برحسب میلی متر آمده است.



شکل ۵- جابجایی پوشش فشارنده (نمونه ش.۱)

همین طور در این نرم افزار می توان علاوه بر جابجایی، توزیع های مربوط به فشار، تنش و کرنش را برای هر کدام از قطعات یا کل مدل، مشاهده کرد.

در شکل ۶ توزیع فشار روی دست و شکل ۷ توزیع تنش شعاعی در لباس، در حالتی که بدن و لباس استوانه ای هستند، نشان داده شده است.



شکل ۶- توزیع فشار روی دست

بسیار کم در مچ و بازو و همچنین ضریب پواسون کم، فشار بسیار زیادی به دست وارد می کند.

۴-۳- مقایسه نتایج مدل مخروطی با آزمایش تجربی

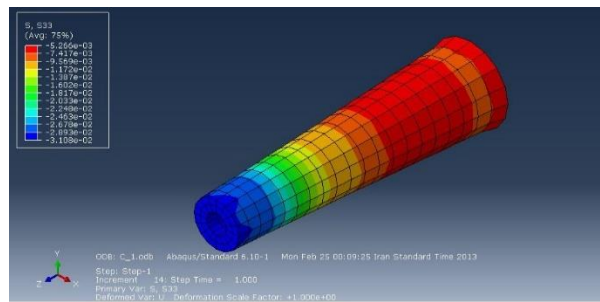
جدول ۵ نتایج تغییرات اندازه (کرنش محیطی) حاصل از ۵ مدل را که مربوط به ۵ نمونه پوشش فشارنده است را نشان می دهد. این ۵ نمونه بر روی مدل شبیه سازی یک دست با اندازه ثابت، به صورت مخروط، قرار گرفتند.

جدول ۵- نتایج مدل مخروطی

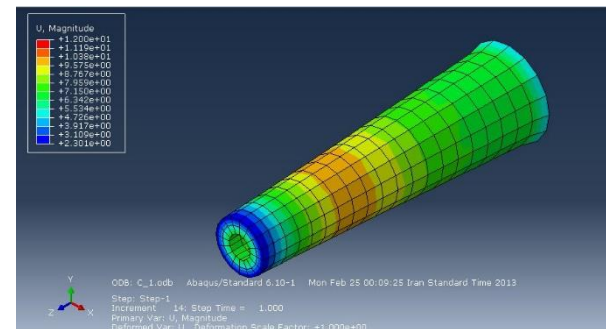
شماره نمونه	کرنش محیطی مدل	کرنش محیطی تجربی	درصد خطا
1	0.54	0.69	22
2	0.19	0.23	17
3	0.27	0.4	32
4	0.53	0.57	7
5	0.61	0.68	10

در ردیف سوم نیز، کرنش محیطی آزمایشات تجربی مشاهده می شود. همان طور که گفته شد، متوسط تغییرات اندازه خطوطی که روی پوشش های فشارنده رسم شده بود، روی دست شخص اندازه گیری شد. همچنان که در قبل نیز ذکر شد، اندازه گیری فشار بین لباس و بدن به طور مستقیم نیاز به تجهیزات خاص دارد تا بتوان نتایج تئوری و نرم افزاری را با نتایج آزمایشگاهی و عملی تأیید کرد. اما ویژگی مهم آزمایشی که در اینجا انجام شد، سادگی فوق العاده آن است. در این آزمایش، فشار بین بدن و لباس به طور غیرمستقیم اندازه گیری می شود. بدین ترتیب که نمونه پوشش فشارنده را قبل از پوشاندن به بدن (در اینجا دست) در چند ناحیه با مژیک علامت گذاری می شود. هر علامت قطعه خطی به طول ۳ cm است. پس از پوشاندن لباس به دلیل کشیده شدن، آن هر یک از این علامت ها تغییر طول می دهند که با مقایسه آن ها با طول اولیه و تقسیم حاصل تفریق طولی

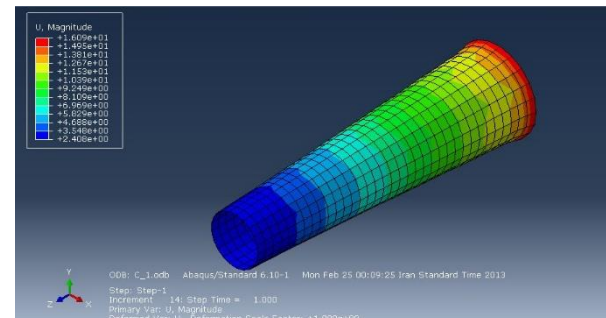
شکل ۸- توزیع فشار وارد بر دست



شکل ۹- توزیع تنش شعاعی روی دست



شکل ۱۰- توزیع میزان جابجایی روی دست



شکل ۱۱- توزیع میزان جابجایی روی پوشش فشارنده

بیشترین و کمترین فشار وارد بر دست در هر کدام از پوشش های فشارنده مورد آزمایش در جدول ۴ ارائه شده اند.

جدول ۴- بیشترین و کمترین فشار وارد بر نمونه ها

نمونه	کمترین فشار (Pa)	بیشترین فشار (Pa)
1	6972	25320
2	1527	8036
3	7759	15760
4	131	1540
5	960	11250

به طور کلی، بیشترین فشار وارد بر دست مربوط به پوشش فشارنده شماره ۱ است. این پوشش فشارنده به علت ابعاد

پوشش فشارنده را تعیین کرد و یا فشار یک ناحیه را با ناحیه‌ی دیگر مقایسه کرد. ممکن است میزان فشار با گذشت زمان و استفاده متوالی از پوشش فشارنده تغییر کند. در این مواقع، محاسبه کرنش محیطی می‌تواند وضعیت تغییرات فشار را نسبت به زمان اولیه‌ی مصرف پوشش با دقت قابل قبولی مشخص کند.

۶-مراجع

1. Tsujisaka, T., Azuma, Y., Matsumoto, Y., I.Morooka, H., Comfort Pressure of the Top Part of Men's Socks, 74, 598-602, 2004.
2. Van den Kerckhove, E., Fiewes S, M., P, Hierner, R., Boeckx, W., Deleuze, J.-P., Laperre, J. Anthonissen, M., Reproducibility of repeated measurements with the Kikuhime pressure sensor under pressure garments in burn scar treatment, Burns, 33, 572-578, 2007.
3. Macintyre, L. Ferguson, R., Pressure garment design tool to monitor exerted pressures, Burns : journal of the International Society for Burn Injuries, 39, 2013.
4. Fan, J. Chan, A. P., Prediction of girdle's pressure on human body from the pressure measurement on a dummy, International Journal of Clothing Science and Technology, 17, 6-12, 2005.
5. طهرانی دهکردی، م. تحلیل عددی خواص فشاری درون صفحه ای کامپوزیت های غیرخطی با استفاده از روش اجزای محدود، مجله علوم و فناوری نساجی، ۴، ۳-۹، ۱۳۹۳.
6. Zhang, X., Yeung, K. W. Li, Y., Numerical Simulation of 3D Dynamic Garment Pressure, 72, 245-252, 2002.
7. Yeung, K. W., Li, Y. Zhang, X., A 3D Biomechanical Human Model for Numerical Simulation of Garment-Body Dynamic Mechanical Interactions During Wear, The Journal of The Textile Institute, 95, 59-79, 2004.
8. Dan, R., Fan, X.-r., Chen, D.-s. Wang, Q., Numerical simulation of the relationship between pressure and displacement for the top part of men's socks, Textile research journal, 81, 128-136, 2011.
9. Yu, A., Lun Yick, K., Pui Ng, S., Yip, J. Fan Chan, Y., Numerical simulation of pressure therapy glove by using Finite Element Method, BURNS, 42, 141-151, 2016.
10. Zhao, l., yu, j., zhang, s. li, c., a three-dimensional biomechanical model for prediction of garment pressure in pressure therapy for burn patients, thermal science, 24, 2357-2365, 2020.
11. سمنانی، د.، آجلی، س.، امیرنصر، ا.، بررسی توزیع تنش در آویزش عمودی پارچه تور ویل با استفاده از روش اجزای محدود، مجله علوم و فناوری نساجی، ۱، ۳۹-۴۲، ۱۳۹۰.
12. Grosberg, P., Leaf, G. A. V. Park, B. J., The Mechanical Properties of Woven Fabrics: Part VI:

آن‌ها بر طول اولیه، کرنش محیطی یعنی ϵ_{θ} بدست می‌آید. این کرنش را می‌توان با نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار مقایسه کرد. واضح است که ϵ_{θ} خود تابعی از فشار بین بدن و لباس است. درصد خطای مدل با آزمایش تجربی نیز در ردیف چهارم جدول ۵ محاسبه و ارائه شده است. این خطا نشان می‌دهد که تا چه حد این مدل با اندازه‌های واقعی سازگاری دارد. با توجه به خطاهای بدست آمده برای هر کدام از نمونه‌ها، خطای میانگین برابر ۱۸٪ می‌باشد. این درصد خطا برای مدل‌سازی کاملاً قابل قبول است و نشان دهنده این است که می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی مقدار فشار استفاده کرد. نکته قابل توجه این است که می‌توان گفت درصد خطا در هر یک از نمونه‌های پوشش فشارنده نسبت معکوس با ضریب پواسون آن نمونه است یعنی با افزایش ضریب پواسن، درصد خطا کاهش می‌یابد. این بدین علت است که با افزایش ضریب پواسون، پوشش انعطاف‌پذیرتر است و تغییرات کرنش محیطی را با دقت بیشتری به نمایش می‌گذارد.

۵-نتیجه‌گیری

مدل‌های سه بعدی ارائه شده می‌توانند به خوبی و با دقت قابل قبولی (۱۸٪)، کانتورهای فشار پوشش فشارنده بر روی دست و کرنش ایجاد شده در پوشش فشارنده را پیش‌بینی کنند. رسم خطوطی با طول ثابت در راستاهای مختلف پوشش فشارنده و محاسبه کرنش‌های ایجاد شده، روش کاملاً عملی و کاربردی است که برای اعتبارسنجی این مدل استفاده شده است. حتی با این روش می‌توان در زمان مصرف، میزان فشار حدودی اعمال شده بر روی بدن از طرف

14. Jacob, S. Patil, M. K., Three-dimensional Foot Modeling and Analysis of Stresses in Normal and Early Stage Hansen's Disease with Muscle Paralysis, Journal of Rehabilitation Research and Development, 36, 1999.

The Elastic Shear Modulus of Plain-Weave Fabrics, Textile Research Journal, 38, 1085-1100, 1968.

13. راسل جانسون، ا.، مقاومت مصالح، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۰