مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، شهریور 1399، دوره 7، شماره 6، ص.ص. 56- 64

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی عددی و تجربی عملکرد مواد لاستیک استایرن‌بوتادین، پلی‌اورتان و پلی‌وینیل‌کلراید در ساخت زیره‌ی کفش

علیرضا مسیبی[1]، احسان شکوری[2*]، بابک منافی[3]

1- دانش‌آموخته کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران

2- استادیار، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران

3- مربی، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی اوج، آبیک، قزوین

* تهران، کد پستی 1651153311، e_shakouri@iau-tnb.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 مهر 1398

داوری اولیه 19 آذر

پذیرش: 7 اسفند 1398

کلیدواژگان:

زیره کفش

فشار کف پا

سیستم پدار

تحلیل المان محدود

چکیده

کفش به منظور محافظت از پای انسان در برابر نیروهای وارده از سوی زمین در فعالیت‌های روزانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های کفش که نیروهای وارده را به خود جذب می‌کند، زیره‌ی آن است. هدف تحقیق حاضر بررسی کارایی سه جنس متفاوت در ساخت زیره‌ی کفش است. بدین منظور زیره‌هایی از جنس‌های لاستیک استایرن‌بوتادین، پلی‌اورتان و پلی‌وینیل‌کلراید با هندسه مشابه و فاقد آج ساخته شدند و توسط سیستم پدار آزمایش گردیدند تا فشاری که به کف پا توسط هر زیره منتقل می‌شود، تعیین گردد. علاوه‌بر این، هر 3 ماده توسط آزمون‌های خستگی، سختی‌سنجی و فشار تک‌محوره مورد آزمایش قرار گرفتند و پس از مدل-سازی، توسط نرم‌افزار المان محدود مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج سیستم پدار نشان داد که در حالت استاتیکی و دینامیکی، زیره کفش از جنس‌های PVC، SBR و PU به‌طور متوسط تقریباً فشار را به ترتیب 44%، 65%، و 59% نسبت به حالت پابرهنه کاهش می‌دهند. نتایج تحلیل المان محدود نیز نشان دادند که SBR در تنش (در حالت استاتیکی و دینامیکی) و کرنش (در حالت استاتیکی و دینامیکی) به‌طور متوسط به ترتیب 39/06% و 98/75% عملکرد بهتری نسبت به PVC دارد. نتایج تحلیل المان محدود نیز نشان دادند که SBR در تنش (حالت‌های استاتیکی و دینامیکی) و کرنش (حالت‌های استاتیکی و دینامیکی) به‌طور متوسط به ترتیب 3/45% و 8/5% عملکرد بهتری نسبت به PU دارد. نتایج تحقیق حاضر نشان دادند که برای ساخت زیره کفش باید از زیره‌های چند لایه استفاده شود تا بتوان به‌طور هم‌زمان از خواص مثبت چندین مواد بهره برد.

Numerical and Experimental Investigation of Performance of Styrene Butadiene Rubber, Polyurethane, and Polyvinyl chloride in Outsoles Fabrication

Alireza Mossayebi[1], Ehsan Shakouri[1*], Babak Manafi[2]

1- Mechanical Engineering-Manufacturing, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran

2- Instructor, Department of Mechanical Engineering, OOJ Institute of Higher Education, Abyek, Qazvin, Iran

* P.O.B. 1651153311, Tehran, Iran, e_shakouri@iau-tnb.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 7 October 2019

First Decision: 10 December 2019

Accepted 26 March 2020

Keywords:

Outsole

Plantar pressure

PEDAR system

FEM analysis

Abstract

Shoes are used in daily activities to protect the human foot against applied forces from the ground. One of the most important parts of shoes which absorb the incoming forces is the outsole. The aim of the present research is to investigate the efficiency of three different materials in fabricating outsoles. Outsoles made of styrene butadiene rubber (SBR), polyurethane (PU), and polyvinyl chloride (PVC) were fabricated with the same geometry and without shoe treads. Then, they were tested by the PEDAR system in order to determine the plantar pressure exerted by each outsole, and they were also tested in terms of fatigue, hardness, and uniaxial compression tests, and after the modeling they were analyzed by finite element method (FEM) software. In static and dynamic states, the outsole made of PVC, SBR, and PU reduces the pressure by 44%, 65%, and 59%, respectively on average compared to barefoot posture. SBR in stress (in static and dynamic states) and strain (in static and dynamic states) have 39.06% and 98.75% better performance on average respectively compared to PVC. In addition, SBR outperformed PU in stress (in static and dynamic states) and strain (in static and dynamic states) by 3.45% and 8.5% respectively. To fabricate outsoles, multilayer outsoles should be used in order to concurrently benefit from the positive characteristics of several materials.

1- مقدمه

هر فرد به‌طور متوسط روزانه ده هزار قدم برمی‌دارد و در هر قدم، دو یا سه برابر وزن بدن خود را بر روی پاها اعمال می‌نماید [1]. این شرایط در وضعیت فعالیت‌های ورزشی تشدید می‌گردد. از طرفی کفش‌ها نیز محافظ خوبی برای پاها هستند و نقش مهمی در امر راه رفتن ایفا می‌نمایند. بنابراین

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Mossayebi, E. Shakouri, B. Manafi, Numerical and Experimental Investigation of Performance of Styrene Butadiene Rubber, Polyurethane, and Polyvinyl chloride in Outsoles Fabrication, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 6, pp. 56- 64, 2020 (in Persian)

انتخاب یک کفش مناسب می‌تواند از طریق کاهش فشار اعمال‌شده به پاها، کمک بزرگی به فعالیت‌های روزانه نظیر ایستادن، راه رفتن، و دویدن نماید. با توجه به آنکه فعالیت‌های راه رفتن و دویدن موجب اعمال نیروهای مکانیکی تکرارشونده به کفش‌ها و پاها می‌گردند، ضروری است موادی که در ساخت زیره‌ی کفش بکار می‌روند، از مقاومت بالا در برابر خستگی و جذب مناسب ضربه برخوردار باشند تا در کوتاه مدت آسیب ندیده و نیروها را به پای فرد منتقل ننمایند. پژوهش‌های متعددی انجام پذیرفته است که در آن‌ها موادی که در ساخت زیره‌ی کفش بکار می‌روند، تحت آزمون خستگی قرار داده‌اند تا مقاومت به خستگی و دوام این مواد را بررسی نمایند [2- 4]. همچنین کفش و کفی مناسب می‌تواند از بروز بیماری‌ها و ناهنجاری‌های بسیاری مانند زخم پای دیابتی، هالوکس والگوس، کف پای صاف، میخچه و خار پاشنه، درد کمر و زانو و موارد دیگر جلوگیری کند [5- 12]. زیره‌ی کفش مناسب باید دارای مشخصاتی ازجمله نرمی و راحتی مناسب، انعطاف‌پذیری مناسب و برخورداری از هندسه و متریال مناسب باشد و فشار را از کف پا به‌خوبی دفع نموده و از قابلیت جذب شوک برخوردار باشد [13]. مواد بکار رفته در ساخت کفش یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در کیفیت و عملکرد آن می‌باشند. چونگ و ژانگ در سال 2008 پنج پارامتر نوع قوس، ضخامت کفی و لایه میانی[1]، و سختی کفی و لایه میانی در ساخت کفی و کفش را به‌منظور کاهش فشار بر کف پا مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه دست یافتند که دومین پارامتر مؤثر بر کاهش فشار، سختی متریال بکار رفته می‌باشد [14]. زیره‌ی کفش یکی از مهم‌ترین قسمت‌های کفش است که با زمین در ارتباط است و نیروهای وارد به کف پا از سمت زمین را دفع می‌کند. طبق تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی کفش، رایج‌ترین ماده در ساخت زیره‌ی کفش PU[2] وEVA[3] است [15- 18]. در سال 2010 بروکنر و همکاران EVA و PU را در ساخت زیره‌های کفش ورزشی مورد مقایسه قرار دادند. آنها به این نتیجه دست یافتند که علیرغم آنکه فوم EVA کاربرد بیشتری در ساخت زیره‌ی کفش‌های ورزشی دارد، اما فوم PU دارای مقاومت به خستگی بالاتر و توانایی دمپ انرژی بیشتری نسبت به EVA می‌باشد [19]. ساوای و همکاران در سال 2000 برای ساخت زیره‌ی کفش، با تغییراتی در زنجیره‌ی PU، یک PU فوق سبک ساختند تا بتواند با کفش‌های ورزشی ساخته‌شده از جنس EVA قابل رقابت باشد [20]. اما همچنان زمینه گسترده‌ای برای انجام تحقیقات بیشتر و استفاده از مواد متنوع‌تر برای ساخت زیره‌ی کفش وجود دارد تا بتوان به نتایج مطلوب‌تری در این زمینه دست‌یافت. با توجه به اینکه ماده‌ی SBR[4] کاربرد اندکی در ساخت زیره‌ی کفش داشته و مواد PU و PVC[5] جنس بسیار رایج در ساخت زیره‌ی کفش هستند، هدف از این مقاله بررسی این سه ماده در زیره‌ی کفش و مقایسه‌ی آنها با دو رویکرد تجربی و عددی است. برای این منظور، یک جفت کفش با زیره از جنس SBR، یک جفت کفش با زیره از PU، و یک جفت کفش با زیره از جنس PVC با هندسه‌ی یکسان ساخته شدند و آزمون‌های تعیین فشار در نقاط مختلف کف پا توسط سیستم پدار[6]، مدل‌سازی کفش و آنالیز آن در نرم‌افزار آباکوس انجام شد تا ماده‌ی مناسب برای ساخت زیره‌ی کفش تعیین گردد. با وجود آنکه مواد PU، PVC و SBR بیشترین مصرف را در ساخت زیره‌های کفش دارند، ولی هیچگونه مقایسه‌ی علمی بر روی آنها انجام نپذیرفته است. پژوهش کنونی بر پایه مطالعه‌ی دقیق خواص سه ماده ذکر شده و مطالعات آزمایشگاهی عملی و تست عددی برای استخراج بهترین ماده در زیره کفش می‌باشد و بر طبق پژوهش‌های پیشین تاکنون چنین مطالعه جامعی صورت نگرفته است و نیاز آن به شدت احساس می‌گردد.

2- مواد و روش‌ها

ابتدا مواد PU، PVC و SBR که همگی هاپرالاستیک هستند [21] تهیه و تست فشار تک‌محوره توسط دستگاه آزمون مواد[7] و تست سختی‌سنجی مواد پلیمری به‌وسیله‌ی دستگاه تست سختی[8] انجام پذیرفت. به‌منظور انجام تست فشار تک‌محوره، استاندارد ASTM D575 برای مواد PVC، PU الاستومر و SBR مورداستفاده قرار گرفت. در این استاندارد نمونه‌ها به‌صورت قرصی شکل با قطر 29/5 mm و ضخامت 12 mm تهیه شدند و سرعت فک دستگاه تست فشار تک‌محوره 12 mm/min با نیروی 2 N در نظر گرفته شد. ضمن آنکه تست سختی‌سنجی برای تمامی مواد طبق استاندارد ASTM D2240 انجام پذیرفت. ضخامت نمونه‌های تست در این استاندارد 6 mm است. نتایج تست فشار در شکل‌های 1 و 2 و نتایج تست سختی‌سنجی در جدول 1 ارائه گردیده است.

[1] Midsole
[2] Polyurethane (Elastic)
[3] Ethylene Vinyl Chloride
[4] Styrene Butadiene Rubber
[5] Poly Vinyl Chloride
[6] Pedar
[7] Hiwa 200/material testing, Korea, Sales@hiwa.cn
[8] Zwick Shore Durometer Tester Close-up SR:7206.07/00

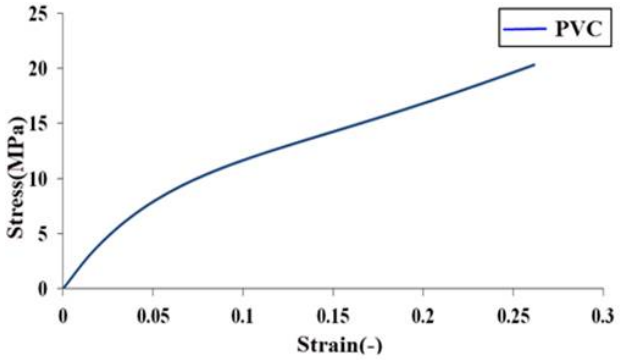

Fig. 1 Stress-strain diagram of PVC

شکل 1 نمودار تنش و کرنش PVC

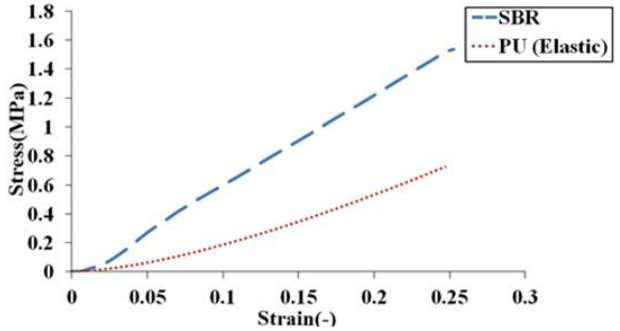

Fig. 2 Stress-strain diagram of SBR and PU

شکل 2 نمودار تنش و کرنش SBR و PU

جدول 1 مقادیر سختی مواد مورداستفاده در تحقیق حاضر

Table 1 The hardness values of the materials used in the present research

ماده	سختی (Shore A)
PVC	71
SBR	70
PU	70

همچنین برای انجام آزمون خستگی، نمونه‌های استاندارد ویژه آزمون با توجه به مرجع [22] ساخته شدند و با استفاده از دستگاه تست خستگی[1] بر روی هر سه ماده انجام پذیرفت. ابعاد ساخته‌شده در شکل 3 آمده است و نتایج حاصل از این آزمون در جدول 2 ارائه گردیده است.

2-1- مدل‌سازی و ساخت زیره کفش

به‌منظور مدل‌سازی کفش، ابتدا یک نمونه کفش با قالب مدنظر ساخته شده و سپس توسط دستگاه اسکن سه‌بعدی[2] اسکن شده شده و با استفاده از فایل ابر نقاطی که از اسکن نمونه به دست آمد، مدل‌سازی آن در نرم‌افزار کتیا[3] انجام پذیرفت. سپس جهت جهت انجام تحلیل المان محدود، مدل اولیه به نرم‌افزار آباکوس منتقل گردید. به‌منظور ساده‌سازی و عدم دخالت پارامترهای دیگر ازجمله آج کفش، هم مدل تحلیل المان محدود و هم زیره‌های ساخته‌شده بدون آج در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که تمام مدل‌ها بدون رویه ساخته شدند. به‌منظور صرفه‌جویی در هزینه و زمان پروسه ساخت رویه، بندهایی بر روی این زیره دوخته شدند و کفش‌های نهایی به فرم صندل ساخته شدند. شکل 4 نمونه‌ی ساخته‌شده از جنس لاستیک استایرن بوتادین در کنار نمونه‌ی مدل‌سازی شده‌ی آن را نمایش می‌دهد و شکل 5 نمونه‌ی کفش نهایی ساخته‌شده که برای سهولت در ساخت به حالت صندل در آمده است را ارائه می‌دهد.

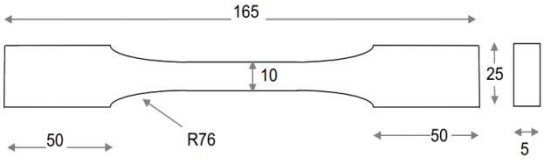

Fig. 3 Specimen fatigue test

شکل 3 نمونه تست خستگی

جدول 2 نتایج آزمون خستگی مواد در دمای محیط

Table 2 The results of the fatigue test of materials at room temperature

ماده	عمر تجربی (cycles)
SBR	33028
PVC	50223
PU	66214

Fig. 4 The fabricated outsole and its model

شکل 4 زیره‌ی ساخته‌شده و مدل آن

Fig. 5 The final fabricated outsole shoes sample

شکل 5 نمونه زیره کفش نهایی ساخته‌شده

[1] Fatigue to failure tester MONSANTO

[2] 3D optical measurement device COMET 52mega-pixel, Resolution 1:4, recrutement@directindustry.com

[3] V5R20, Dussault system 2009

2-2- آزمون تجربی

پس از ساخت زیره‌های کفش از سه جنس SBR، PU و PVC، آزمون تجربی با استفاده از سیستم پدار انجام شد. سیستم پدار دارای دو کفی است که هرکدام شامل 99 سنسور می‌باشد و فشار وارد شده به کف پا را اندازه‌گیری می‌نماید.

در این آزمون یک مرد با جرم 97 kg و قد 176 cm، تست با سیستم پدار را در دو مرحله ایستاده (استاتیکی) و راه رفتن (دینامیکی) انجام داد. در تست استاتیکی فرد ایستاده و 30 ثانیه روبروی خود را نگاه می‌کند. همچنین برای انجام تست دینامیکی از فرد خواسته شد تا با سرعت راه رفتن معمولی خود و در حالت عادی به‌گونه‌ای که روبه‌جلو نگاه می‌کنند، 9 متر را راه برود [23]. نتایج به دست آمده از این آزمون در جدول 3 ارائه گردیده است.

3-2- تحلیل عددی مدل با استفاده از نرم‌افزار آباکوس

مدل ایجادشده در نرم‌افزار کتیا به نرم‌افزار آباکوس انتقال داده شد و پس از تعریف خصوصیات ماده در قسمت هایپرالاستیک برای مدل ساخته‌شده با استفاده از نتایج شکل 1، اقدام به بارگذاری فشار روی مدل و اعمال شرایط مرزی به‌منظور تحلیل گردید. در بخش بارگذاری، مناطق انگشتان پا، متاتارسال‌ها، میانه‌ی پا و پاشنه مطابق شکل 6 روی مدل مشخص گردیدند. برای بارگذاری از اعداد فشار به‌دست‌آمده برای پای‌برهنه (جدول 3) استفاده گردید.

همچنین برای شرایط مرزی باید به‌گونه‌ای عمل نمود که شرایط طبیعی هنگام ایستادن و راه رفتن ایجاد گردد:

تحلیل استاتیکی: در این تحلیل، کف کفش در تمام جهات (X, Y, Z) به‌صورت کامل بسته‌شده است. درواقع برای تعریف شرایط مرزی در نرم‌افزار گزینه‌ی Encastre انتخاب‌شده است. لازم به ذکر است که در این تحلیل از مدول استاتیک استفاده شده است. زمان حل 1 ثانیه در نظر گرفته شده است.

تحلیل دینامیکی: در این بخش مراحل حل به 4 بخش تقسیم‌بندی و تا مرحله‌ی Mid Stance شبیه‌سازی می‌شود: 1- پاشنه، 2- پاشنه و میانه کف پا، 3- پاشنه، میانه کف پا و متاتارسال‌ها، 4- پاشنه، میانه کف پا، متاتارسال‌ها و انگشت‌ها. در حالت طبیعی اگر زمان کل راه رفتن[1] حدود 1 ثانیه در نظر گرفته شود، فاز استنس (stance) را می‌توان حدود 0/8 ثانیه در نظر گرفت و می‌توان فاز Mid stance را 0/4 ثانیه در مدنظر قرارداد. درواقع مدت زمان هرکدام از این چهار مرحله بالا 0/1 ثانیه می‌شود [24]. شکل 7 بیانگر بارگذاری و اعمال شرایط مرزی در حالت دینامیک می‌باشد.

با توجه به پیچیدگی هندسه برای مش‌بندی، نوع المان چهاروجهی (تتراهدرال) در نظر گرفته شد. با انجام عملیات حساسیت سایز مش مشخص گردید که مش 3 mm برای این مدل مناسب است و در نظر گرفتن مقدار ریزتر از آن، تأثیر چندانی در پاسخ نهایی ندارد و فقط سرعت تحلیل را پایین می‌آورد. شکل 8 نمودار حساسیت مش را نشان می‌دهد. در نهایت تعداد المان‌های زیره کفش 54673 گردید که شکل‌های 9 و 10 نمایش‌دهنده نتایج حاصل از تحلیل المان محدود زیره کفش در نرم‌افزار آباکوس برای حالت‌های به ترتیب استاتیکی و دینامیکی می‌باشد. لازم به ذکر است که در تحلیل دینامیک از مدول دینامیک صریح[2] استفاده گردیده است.

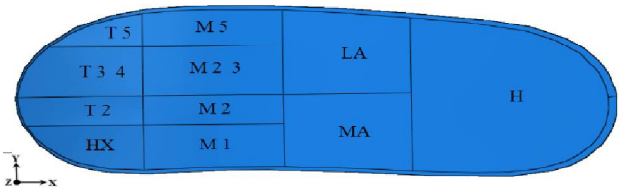

Fig. 6 The parts specified for exerting pressure, where HX represents hallux, T 2-3-4-5 denote the second, third, fourth, and fifth toes; M 1-2-3-4-5 indicate first, second, third, fourth, and fifth metatarsals; MA is the medial longitudinal arc foot; LA is the lateral longitudinal arc foot, and H is the heel

شکل 6 مکان‌های مشخص‌شده برای اعمال نیرو که HX: شست پا، T 2-3-4-5: انگشت دوم، سوم، انگشت چهارم و پنجم، M1-2-3-4-5: متاتارسال اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم، MA: قوس داخلی پا، LA: قوس خارجی پا، H: پاشنه

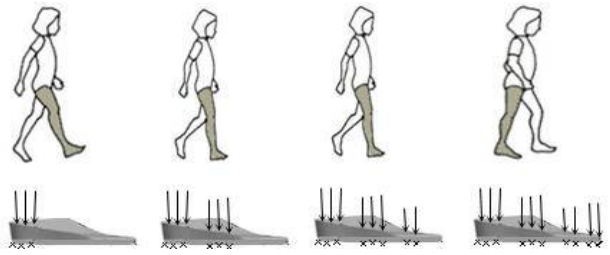

Fig. 7 The loading and boundary conditions in dynamic analysis in the stance phase until the mid-stance phase

شکل 7 نحوه‌ی بارگذاری و شرایط مرزی در تحلیل دینامیکی در فاز استنس تا مرحله‌ی Mid stance

معادله پتانسیل انرژی کرنشی نیز به دو دلیل اگدن[3] در نظر گرفته شده است که معادله‌ی آن در رابطه (1) آمده است.

[1] Gait

[2] Dynamic Explicit

[3] Ogden

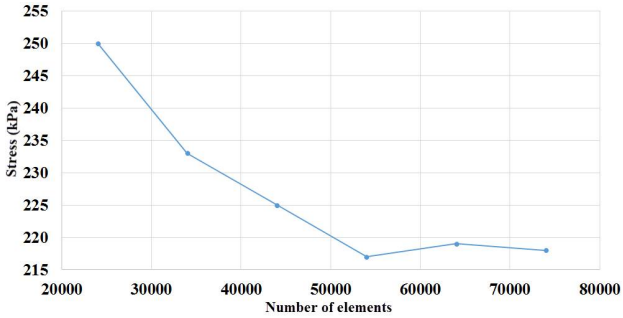

Fig. 8 Diagram of Mesh sensitivity

شکل 8 نمودار حساسیت مش

اولین دلیل این است که مدل اگدن برای مواد غیرقابل تراکم پذیر با کرنش و فرم پذیری بالا مناسب است. [25]. همچنین با آزمایش دیگر معادله‌ها در آباکوس معادله اگدن درجه‌ی 3 با نمودار تست این مواد مطابقت بیشتری داشت. بنابراین معادله‌ی اگدن برای پتانسیل انرژی کرنشی انتخاب شد.

$$U = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3\right) + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{D_i} (J_{e1} - 1)^{2i} \quad (1)$$

در این رابطه U تابع پتانسیل انرژی کرنشی، λ ناوردهای اصلی کرنش، μ_i و α_i ثابتهای مواد هستند که از تست‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند.

3- نتایج

نتایج تحلیل المان محدود مدل‌ها با اندازه‌گیری‌های تجربی با استفاده از کفی‌های فشارسنج سیستم پدار، اعتبارسنجی گردید. در بخش ذیل، نتایج تست تجربی با سیستم پدار، و تحلیل عددی با نرم‌افزار آباکوس ارائه گردیده است.

3-1- نتایج آزمون تجربی به‌وسیله سیستم پدار

آزمون تجربی زیره‌های کفش ساخته‌شده، توسط سیستم پدار انجام پذیرفت که نتایج آن در جدول 3 ارائه گردیده است. نتایج ارائه‌شده در جدول 3، فشار واردشده به کفی که توسط سنسورهای نصب‌شده در کفی‌های سیستم پدار اندازه‌گیری گردیده است، را نشان می‌دهند. این تست‌ها در دو حالت ایستاده و راه رفتن انجام‌شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، در حالت پابرهنه و استاتیکی بیشترین فشار در انگشت شست و پس‌ازآن در منطقه‌ی پاشنه اتفاق می‌افتد و در حالت دینامیکی بیشترین فشار در حالت پابرهنه در متاتارسال اول و دوم و پس‌ازآن در پاشنه مشاهده می‌شود. ضمن آنکه قابل‌ملاحظه است که در حالت استاتیکی، زیره کفش از جنس‌های PVC، SBR و PU تقریباً فشار را به ترتیب 45%، 64%، و 56% نسبت به حالت پابرهنه کاهش می‌دهند. همچنین جدول 3 در حالت دینامیکی نشان می‌دهد زیره‌ی PVC، SBR و PU فشار را به ترتیب 43%، 66%، و 62% نسبت به حالت پابرهنه کاهش می‌دهند. همچنین نتایج تست خستگی در جدول 2 ارائه گردیده است. این نتایج نشان می‌دهند که طول عمر SBR، PVC و PU به ترتیب برابر 33028، 50223 و 66214 سیکل است. همان‌طور که مشاهده می‌شود طول عمر SBR کمتر از دو ماده‌ی دیگر است.

جدول 3 نتایج مقادیر مختلف فشار در مناطق مختلف پا در دو حالت استفاده از کفش ساخته و پابرهنه، در شرایط ایستاده و راه رفتن

Table 3 The results of different pressure values across different regions of the feet in two states of using the fabricated shoes and barefoot, in stance and gait positions

فشار پای راست (بر حسب kPa) در حالت ایستاده و راه رفتن

مناطق مختلف پا	پا برهنه		PVC		PU		SBR	
	استاتیک	دینامیک	استاتیک	دینامیک	استاتیک	دینامیک	استاتیک	دینامیک
هالوکس	171	161	91	95/5	87	55	75	66
انگشت 2	70	110	32	54	30	40	20	37
انگشت 3 و 4	20	87	17	34/5	17	30	16	29
انگشت 5	10	57	8	23	5	17	3	14
متاتارسال 1	111	325	85	204/5	76	77	54	71
متاتارسال 2	102	222	68	123	49	90	36	66
متاتارسال 3 و 4	95	190	39	101	22	90	21	72
متاتارسال 5	29	165	19	65	12	44	12	40
قوس میانی پا	46/8	46	26	51	30	30	30	31
قوس جانبی پا	89/9	89	31	68	20	59	19	61
پاشنه	170	192	83	119	55	90	43	74
مجموع	914/6	1644	499	938/5	403	622	329	561

3-2- نتایج تحلیل المان محدود زیره

پس از به دست آوردن خواص مکانیکی سه ماده‌ی PVC، SBR و PU، بارگذاری مدل در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت و حل مدل در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی انجام شد که نتایج آن در شکل‌های 9 و 10 ارائه گردیده است. تنش و کرنشی که از نتایج تحلیل المان محدود مدل تحت بارگذاری استاتیکی به دست می‌آید برای PVC به ترتیب برابر با 3163 kPa و 0/0003081، برای SBR به ترتیب برابر با 3938 kPa و 0/06845 و برای PU به ترتیب برابر با 3724 kPa و 0/05847 می‌باشد. بنابراین SBR 19/6% و 99/5% به ترتیب در تنش و کرنش در حالت استاتیکی عملکرد بهتری نسبت به PVC دارد. همچنین SBR 5/4% و 14/5% به ترتیب در تنش و کرنش در حالت استاتیکی عملکرد بهتری نسبت به PU دارد.

تنش و کرنشی که از نتایج تحلیل المان محدود تحت بارگذاری دینامیکی برای PVC به‌دست‌آمده است، به ترتیب برابر با 105 kPa و 0/001204 می‌باشد. از طرفی SBR تنش و کرنشی که تحت همان بارگذاری در حالت دینامیکی از خود نشان می‌دهد، به ترتیب برابر با 220/4 kPa و 0/06280 است. همچنین در PU تنش و کرنشی که تحت همان بارگذاری در حالت دینامیکی از خود نشان می‌دهد، به ترتیب برابر با 217 kPa و 0/06119 است. بنابراین SBR 52/3% و 98% به ترتیب در تنش و کرنش در حالت دینامیکی عملکرد بهتری نسبت به PVC دارد. همچنین SBR 1/5% و 2/5% به ترتیب در تنش و کرنش در حالت دینامیکی عملکرد بهتری نسبت به PU دارد. با توجه به نتایج فوق، SBR گزینه‌ی مناسب‌تری نسبت به PVC و PU برای ساخت زیره‌ی کفش است.

4- بحث

در پژوهش حاضر سعی شده است سه ماده‌ی SBR، PVC، و PU از جهات مختلف جهت استفاده در ساخت زیره‌ی کفش موردبررسی قرار گیرند. به همین منظور بعد از آماده‌سازی نمونه‌های تست، آزمایش‌های تجربی همراه با سیستم پدار جهت به دست آوردن فشار کف پا با استفاده از سه نوع زیره‌ی ساخته‌شده، تحلیل عددی با نرم‌افزار تحلیل المان محدود آباکوس جهت بررسی تنش و کرنش در سه نوع زیره‌ی ساخته‌شده، و تست خستگی جهت به دست آوردن دوام این سه نوع زیره انجام پذیرفت. نتایج تست تجربی نشان داد که بیشترین فشارها در حالت استاتیکی به ترتیب به شست، پاشنه، متاتارسال اول و دوم و در حالت دینامیکی به ترتیب به متاتارسال اول و دوم، پاشنه و شست وارد گردیدند که مطابق با نتایج تحقیق [8] می‌باشد.

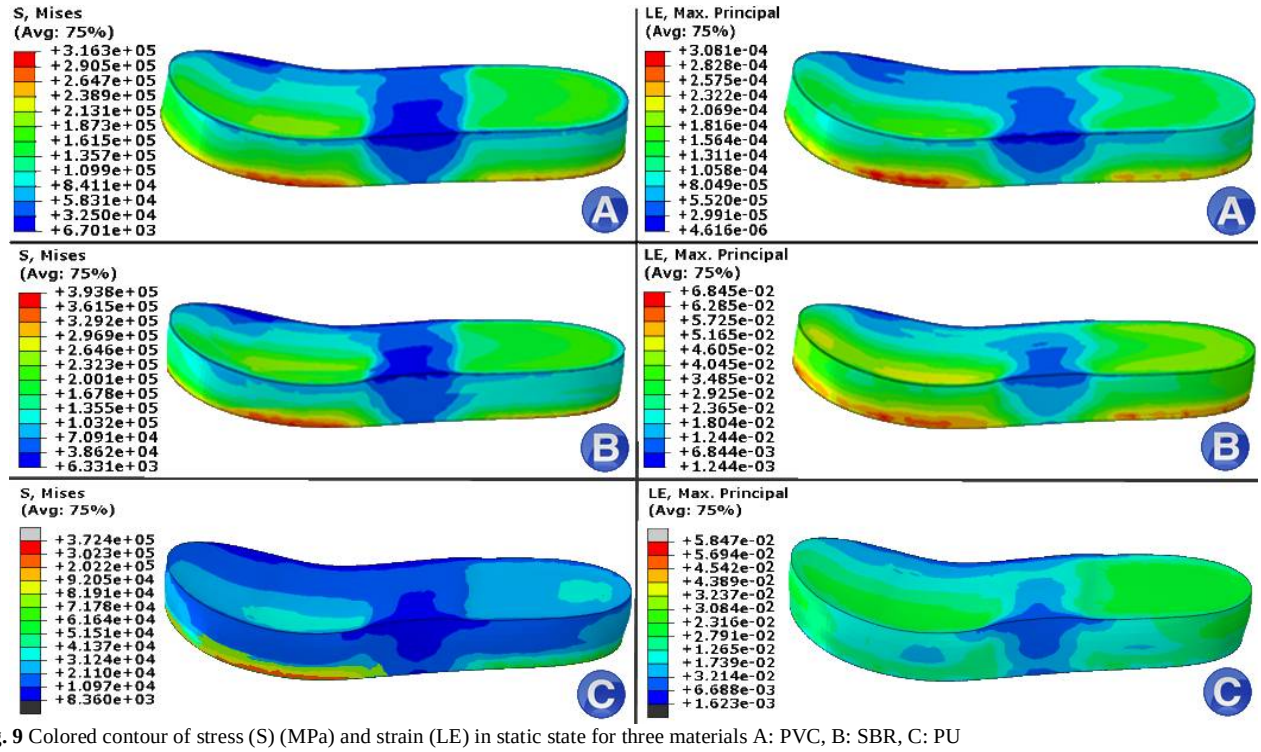

Fig. 9 Colored contour of stress (S) (MPa) and strain (LE) in static state for three materials A: PVC, B: SBR, C: PU

شکل 9 کانتور رنگی تنش (S) (MPa) و کرنش (LE) در حالت استاتیکی برای سه ماده A: PVC, B: SBR, C: PU

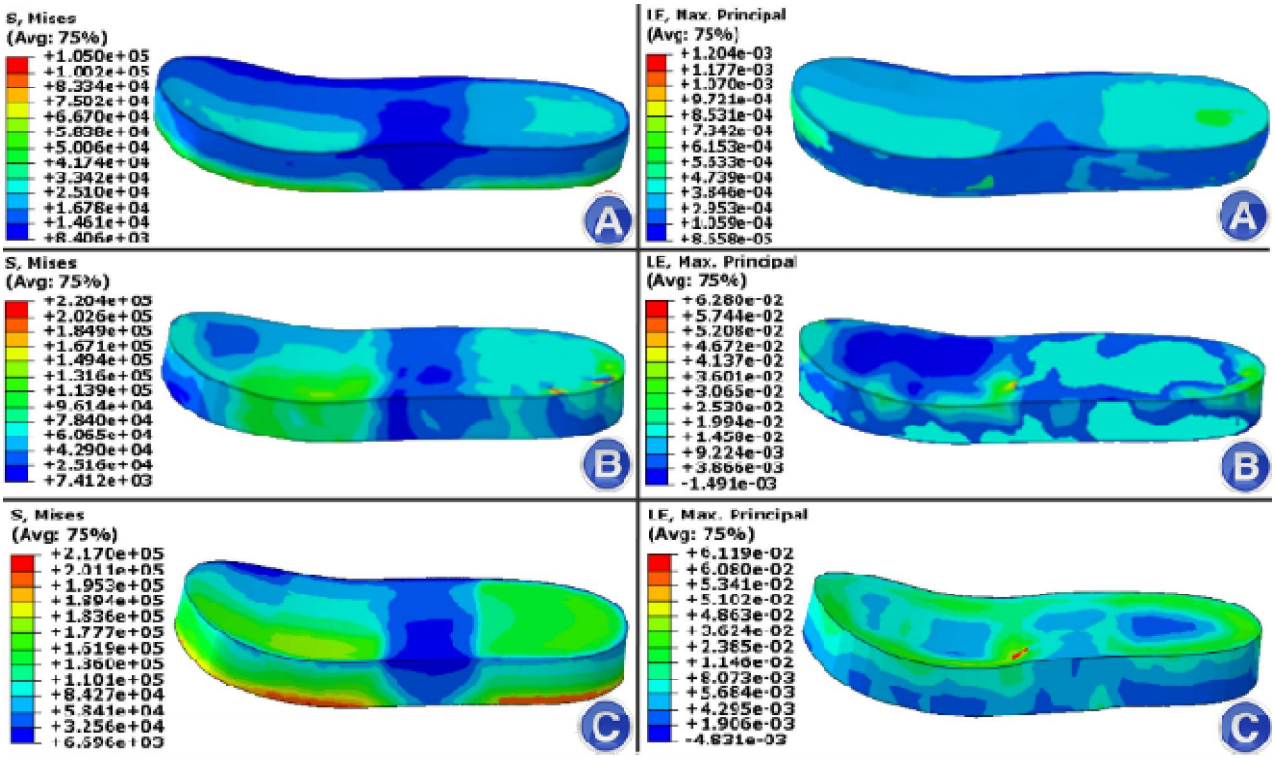

Fig. 10 Colored contour for stress (S)(MPa) and strain (LE) in dynamic state for three materials A: PVC, B: SBR, C: PU

شکل 10 کانتور رنگی تنش (S) (MPa) و کرنش (LE) در حالت دینامیکی برای سه ماده A: PVC, B: SBR, C: PU

در مقاله‌ی قاسمی و همکاران در حالت بدون استفاده از کفی و استاتیک بیشترین فشار در شست، متاتارسال اول و پاشنه به ترتیب 594، 527 و 567 kPa و در حالت دینامیک به ترتیب 485، 911 و 414 kPa گزارش شده است که در این مقاله نیز در حالت بدون کفی و استاتیک بیشترین فشارها در شست، متاتارسال اول و پاشنه به ترتیب 171، 111 و 170 kPa و در حالت دینامیک 161، 325 و 192 kPa به دست آمده است. البته باید درنظر داشت در مقاله قاسمی و همکارانش فرد دیابتی مورد تست بوده است. همچنین وزن و نوع راه رفتن نیز می‌تواند تاثیر بسزایی در به دست آوردن اعداد فشار داشته باشد. همچنین مانند مراجع [2-4] تست استحکام خستگی مواد انجام پذیرفت تا تعیین گردد کدام ماده تحت بارهای مکانیکی وارده از دوام بیشتری برخوردار است. نتایج این تست نشان داد SBR نسبت به سایر مواد ازنظر مقاومت خستگی ضعیف‌تر عمل می‌کند. اما SBR در آزمون‌های تجربی با سیستم پدار و در تحلیل عددی با نرم‌افزار آباکوس نتایج مناسب و بهتری نسبت به PU و PVC از خود نشان داد. همان‌طور که از نتایج تست پدار مشاهده می‌شود، SBR در حدود 64% تا 66% به ترتیب در تست‌های استاتیکی و دینامیکی فشار را از کف پای فرد کاهش داده و توزیع تنش و کرنش مناسبی را از خود نسبت به دو متریال دیگر نشان می‌دهد. باید توجه داشت که بروز بسیاری از بیماری‌های مرتبط با پا مانند زخم‌های پای افراد دیابتی، هالوکس والگوس و یا حتی زانودرد و کمردرد می‌تواند ناشی از توزیع نامناسب تنش و کرنش و فشار بیش‌ازحد واردشده به کف پا توسط استفاده از کفی و کفش‌های نامناسب باشد. با توجه به کاهشی که توسط زیره‌ی SBR در فشار وارده به کف پا ایجاد می‌گردد، می‌تواند یکی از گزینه‌های مناسب پیشنهادی در ساخت زیره کفش باشد.

به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی باید بیان نمود که هر ماده از مجموعه‌ای از خواص مثبت و منفی برخوردار است. در این تحقیق سعی شده است که از طریق سه تست مهم پدار، تجزیه‌وتحلیل نرم‌افزار آباکوس و استحکام خستگی، مقایسه‌ای میان سه ماده‌ی متفاوت برای ساخت زیره‌ی کفش انجام پذیرد تا خواص مثبت و منفی هر ماده تعیین گردد. به‌عنوان‌مثال SBR به‌عنوان ماده زیره کفش از ویژگی‌های کاهش فشار بیشتر، جذب تنش و میزان کرنش بالاتر نسبت به دو ماده‌ی PVC و PU برخوردار است، اما استحکام خستگی آن از دو متریال ذکرشده کمتر است.

PU نیز پس از SBR کاهش فشار بیشتری برای کف پا ایجاد نموده و از طول عمر بیشتری نیز حتی نسبت به SBR برخوردار است. این نکته نشان می‌دهد برای ساخت زیره کفش باید از

زیره‌های چندلایه استفاده نمود و مواد می‌بایست با در نظر گرفتن خواصی که دارند، به‌صورت دولایه یا سه لایه از بیرون به داخل یعنی جایی که با پا در ارتباط است، چیده شوند. این نوع چیدمان موجب می‌گردد توانایی بهره‌برداری هم‌زمان از خواص مثبت چندین ماده فراهم آید. برای ادامه‌ی این تحقیق، پیشنهاد می‌شود انواع دیگر مواد باهم مقایسه شوند و زیره‌ی کفش به‌صورت لایه چینی ساخته‌شده و تحت آزمون قرار گیرند. همچنین می‌توان برای تست عملی از تعداد افراد بیشتر در رنج سنی‌های مختلف با BMI مختلف استفاده شود.

5- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، بررسی جامعی از جنبه‌های عددی و تجربی بر روی مواد مورداستفاده در ساخت زیره کفش انجام پذیرفت. درواقع در این مطالعه سه ماده SBR و PU و PVC موردبررسی قرار گرفتند تا زیره‌ی کفشی ساخته شود که کاهش فشار و توزیع مناسبی از تنش و کرنش را ایجاد کند تا افراد در حین راه رفتن، آسایش بیشتری را تجربه نمایند. نتایج حاصل از این تحقیق عبارت‌اند از:

- نتایج تست خستگی نشان دادند که طول عمر SBR، PVC و PU به ترتیب برابر 33028، 50223 و 66214 سیکل بارگذاری می‌باشد.

- بر مبنای نتایج حاصل از سیستم پدار در حالت استاتیکی، زیره کفش از جنس‌های PVC، SBR و PU تقریباً فشار را به ترتیب 45%، 64%، و 56% نسبت به حالت پابرهنه کاهش می‌دهند.

- نتایج حاصل از آزمون با سیستم پدار در حالت دینامیکی نشان می‌دهد که زیره‌های PVC ، SBR و PU فشار را به ترتیب 43%، 66%، و 62% نسبت به حالت پابرهنه کاهش می‌دهند.

- استفاده از ماده‌ی SBR بجای PVC در ساخت زیره کفش مناسب می‌باشد. چراکه نتایج تحلیل المان محدود نشان داد که SBR در تنش و کرنش در حالت استاتیکی به ترتیب 19/6% و 99/5% عملکرد بهتری نسبت به PVC دارد. همچنین SBR در تنش و کرنش در حالت دینامیکی به ترتیب 52/3% و 98% عملکرد بهتری نسبت به PVC دارد.

- استفاده از ماده‌ی SBR بجای PU در ساخت زیره کفش مناسب می‌باشد، چراکه نتایج تحلیل المان محدود نشان داد که SBR در تنش و کرنش در حالت استاتیکی به ترتیب 5/4% و 14/5% عملکرد بهتری نسبت به PU دارد. همچنین SBR در تنش و کرنش در حالت دینامیکی به ترتیب 1/5% و 2/5% عملکرد بهتری نسبت به PU دارد.

6- مراجع

[1] Tudor-Locke C., Bassett D.R., How Many Steps/Day Are Enough? Preliminary Pedometer Indices for Public Health, *Sports Medicine*, 2004, 34(1):1-8.

[2] Kanny K., Mahfuz H., Carlsson L.A., Thomas T., Jeelani. S., Dynamic mechanical analyses and flexural fatigue of PVC foams, *Composite Structures*, 2002, 58(2):175-183.

[3] Witkiewicz W., Zieliński A., Properties of the polyurethane (PU) light foams, *Advances in Materials Science*, 2006, 6(2):35-51.

[4] Harbour R.J., Fatemi A., Mars W.V., Fatigue life analysis and predictions for NR and SBR under variable amplitude and multiaxial loading conditions, *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(7):1231-1247.

[5] Woody J., Overview of Diabetic Foot Care for the Nurse Practitioner, *The Journal for Nurse Practitioners*, 2019, In Press, Corrected Proof.

[6] Paterson K.L., Kasza J., Bennell K.L., Wrigley T.V., Metcalf B.R., Campbell P.K., Hunter D.J. Hinman R.S., Moderators and mediators of effects of unloading shoes on knee pain in people with knee osteoarthritis: an exploratory analysis of the SHARK randomised controlled trial, *Osteoarthritis and Cartilage*, 2018, 26(2):227-235.

[7] Glasoe W.M., Nuckley D.J., Ludewig P.M., Hallux valgus and the first metatarsal arch segment: a theoretical biomechanical perspective, *Phys Ther*, 2010, 90(1):110-20.

[8] Ghassemi A., Mossayebi A.R., Jamshidi N., Naemi R., Karimi M.T., Manufacturing and finite element assessment of a novel pressure reducing insole for Diabetic Neuropathic patients, *Australas Phys Eng Sci Med*, 2015, 38(1):63-70.

[9] Choi J.Y., Hong W.H., Suh J.S., Han J.H., Lee D.J.,, Lee Y.J., The long-term structural effect of orthoses for pediatric flexible flat foot: A systematic review, *Foot Ankle Surg*, 2019, doi.org/10.1016/j.fas.2019.01.007.

[10] Din N.U., Rahman S., Determining the mean reduction in pain score after treatment with heel pad in planter fasciitis, *Journal of Saidu Medical College*, 2018, 8(2):90-93.

[11] Lewis G., Finite element analysis of a model of a therapeutic shoe: effect of material selection for the outsole, *Biomed Mater Eng*, 2003, 13(1):75-81.

[12] Aboutorabi A., Saeedi H., Kamali M., Farahmand B., Eshraghi A., Dolagh R.S., Immediate effect of orthopedic shoe and functional foot orthosis on center of pressure displacement and gait parameters in juvenile flexible flat foot, *Prosthetics and Orthotics International*, 2014, 38(3):218-223.

[13] Lewis G., Tan T., Shiue Y.S., Characterization of the performance of shoe insert materials, *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 1991,

damping, *Procedia Engineering*, 2010, 2(2):2789-2793.

[20] Sawai M., Miyamoto K., Takemura K., Mori M., Kiuchi K., Super Low Density Polyurethane Systems for Sports Shoes, *Journal of Cellular Plastics*, 2000, 36(4):286-293.

[21] Fung Y.C., Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues, 3 ed *Springer-Verlag* New York, 1988

[22] Manjunatha C.M., Taylor A.C., Kinloch A.J., The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy composite, *Composites Science Technology*, 2010,vol 70:193-199.

[23] Aminian G., Safaeepour Z., Farhoodi M., Pezeshk A.F., Saeedi H., Majddoleslam B., The effect of prefabricated and proprioceptive foot orthoses on plantar pressure distribution in patients with flexible flatfoot during walking, *Prosthet Orthot Int*, 2013, 37(3):227-232.

[24] Mijailoviü N., Gavriloviü M., Rafajloviü S., Gait Phases Recognition from Accelerations and Ground Reaction Forces: Application of Neural Networks, *Telfor Journal*, 2009, 1(1): 34-36.

[25] http://serverifb147.ethz.ch:2080/v6.14/books/usi/default.htm?startat=pt03ch12s07hlb07.html. Accessed 12 June 2014

81(8):418-424.

[14] Cheung J.T., Zhang M., Parametric design of pressure-relieving foot orthosis using statistics-based finite element method, *Med Eng Phys*, 2008, 30(3):269-277.

[15] Lewis G., Finite element analysis of a model of a therapeutic shoe: effect of material selection for the outsole, *Biomed Mater Eng*, 2003, 13(1):75-81.

[16] Suherna S., Patunru P., Maspah M., Analisis ketahanan abrasi material outsole polyurethane (PU) & nitrile butadine rubber (NBR) pada, *Sintek Jurnal: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 2019, 13(1):26-31.

[17] Milgrom C., Finestone A., Ekenman I., Simkin A., Nyska M., The Effect of Shoe Sole Composition on In Vivo Tibial Strains During Walking, *Foot & Ankle International*, 2001, 22(7):598-602.

[18] Lippa N., Hall E., Piland S., Gould T., Rawlins J., Mechanical Ageing Protocol Selection Affects Macroscopic Performance and Molecular Level Properties of Ethylene Vinyl Acetate (EVA) Running Shoe Midsole Foam, *Procedia Engineering*, 2014, 72:285-291.

[19] Brückner K., Odenwald S., Schwanitz S., Heidenfelder J., Milani T., Polyurethane-foam midsoles in running shoes-impact energy and