

TVAROVÉ ZMĚNY NOHOU PŘI PŮSOBNÍ DEFORMAČNÍ SÍLY V OBLASTI METATARSOPHALANGEÁLNÍHO SKLOUBENÍ

Changes in the Shape of the Foot through Exposure to Deforming Forces in Metatarsophalangeal Articulations

Martina Černeková¹, Petr Ponižil²,
Jitka Bad'urová², Barbora Šibová²,
Jana Pavlačková¹

¹Ústav technologie tuků, tenzidů a kosmetiky,
Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
Zlín, Česká republika

²Ústav fyziky a materiálového inženýrství,
Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
Zlín, Česká republika

Abstract

The research presented herein concerns deformation behaviour of the foot, especially in the metatarsophalangeal joints, with the aim of describing the same. To this end, an instrument was specially developed to measure the deformability of the foot, designed in cooperation with the Institute of Physics and Materials Engineering at Tomas Bata University in Zlin. The first phase of the experiment involved devising a suitable methodology for measurement of the system, as well as determining whether a relationship existed between the dimensional characteristics of the feet and their deformability.

A trial was held comprising a total of 140 probands, made up of 70 males and 70 females aged 18 to 25 years. Each individual was checked for change in the circumference of the foot at the point of metatarsophalangeal articulation that was dependent on the force caused by tightening the tape, which is part of the device.

The results of the experiment suggest that the human foot is considerably deformable for a short time and can withstand heavy burden. It was revealed that the male probands were capable of enduring greater values as measured in tightened force than the women.

Keywords: *foot deformability, metatarsophalangeal joins, foot circumference*

Úvod

Pozornost odborníků z oblasti biomechaniky obuté nohy je často směřována k možnostem hodnocení správného padnutí (tzv. fittingu) obuvi na nohu, a to ať už obecně, nebo pro určité skupiny osob, např. děti, diabetiky, seniory, atp. (Fritz, Schmeltzpfenning, Plank, & Grau, 2013; Chantelau, 2002; Kusumoto, Suzuki, Yoshida, & Kwon, 2008; Luximon & Luximon, 2009; Menz, Auhl, Ristevski, Frescos, & Munteanu, 2014; Yoo, 2013). Obuv je dnes však do značné míry vnímána jako estetický a kulturní symbol, který vypovídá o společenském postavení nositele, a je v podstatě jakousi estetizací tvaru nohy. Z tohoto důvodu je poměrně běžné, že

noha je nošenou obuví více či méně deformována (Curwen & Park, 2014; Hohmann & Uhlig, 2005; Rossi, 1999). Výběr obuvi v prodejnách probíhá často na základě dvou parametrů, a to přímé délky chodidla a šířky (nebo obvodu) v oblasti metatarsophalangeálního skloubení (tzv. obvodu prstních kloubů, OPK). Prodejci i výrobci obuvi vycházejí z předpokladu, že se na základě těchto dvou základních údajů dá nabídnout správná velikost obuvi pro individuální tvary nohou většiny populace (Česká obuvnická a kožedělná asociace, 2013; Cheng & Perng, 1999; Xiong, Zhao, Jiang, & Dong, 2010).

V současné době jsou v obchodech jednotlivé modely obuvi nabízeny v jedné šířce (obvodové skupině), přičemž kopyto se častěji podřizuje módním tvarům a trendům, než výsledkům antropometrických studií. Počet nabízených modelů módní obuvi se v poslední době na evropských trzích výrazně zvyšuje a tento druh obuvi je výrazně užší, nebo není nabízen v širších obvodových skupinách. Obecně se dá konstatovat, že v nabídce obuvi ubývá širších a pohodlnějších modelů (Česká obuvnická a kožedělná asociace, 2013; Česká obuvnická a kožedělná asociace, 2016; Hlaváček, 2005; Menz, Auhl, Ristevski, Frescos, & Munteanu, 2014).

Navíc údaje o velikosti obuvi deklarované jednotlivými výrobci jsou založeny na různých délkových jednotkách (metr, anglický palec, francouzský steh), na různě stanoveném počátku číslování a s rozdílně stanoveným prstním nadměrkem. Chaos s označováním velikostí obuvi, nemá obdoby s žádnou jinou komoditou vyráběnou ve více velikostech (Česká obuvnická a kožedělná asociace, 2016; Hlaváček, 2005, Luximon & Luximon, 2009; Urca & Dzeroski, 2013).

Na základě uvedených skutečností je nutné předpokládat, že vlivem rozměrové disproporce jsou nohy zákazníků výrazně deformovány. Tvar přední části obuvi mění přirozené postavení prstů, které se dostávají do stísněných poloh, omezuje jejich pohyblivost a zhoršuje tlakový komfort. Z tohoto pohledu se stává tvar obuvi v první fázi příčinou defektů, jako jsou otlaky, puchýře, kuří oka, a následně nevratných deformací nohou, nejčastěji hallux valgus, příčně ploché nohy, kladívkovitých nebo drápovitých prstů, přeložených prstů a exostóz (Baron, Bonanno & Menz, 2009; Holoubek, 2015; Manna, Pradhan, Ghosh, Kar, & Dhara, 2001; Schwarzkopf, Perretta, Russell, & Sheskier, 2011).

Cíl

Cílem výzkumu je popsat deformační chování nohy, zejména v oblasti metatarsophalangeálního skloubení. Dílčím cílem první fáze experimentu bylo vytvořit vhodnou metodiku měření na daném zařízení a zjistit, zda existuje vztah mezi rozměrovými charakteristikami nohy a její deformovatelností.

Metodika

Experiment se uskutečnil v letech 2008–2011 v prostorách Fakulty technologické a experimentu se zúčastnilo celkem 140 probandů, z čehož bylo 70 žen a 70 mužů. Všichni probandi byli ve věku 18 až 25 let. Experimentu se zúčastnili zejména studenti naší univerzity a jejich výběr byl náhodný. Pro charakterizaci měřeného souboru byly zjištěny a zaznamenány informace o pohlaví probanda, o datu narození, a zda je proband pravoruký nebo levoruký (Barut, Ozer, Sevinc, Gumus, & Yuntun, 2007; Lavrysen et al., 2012). Dále byla změřena tělesná výška (pomocí antropometru), tělesná hmotnost (na váze Omron BF500), přímá délka chodidla (PDCH) (pomocí obuvnického měřidla pro PDCH), obvod prstních kloubů (pomocí obuvnického páskového měřidla) a byl pořízen otisk a obrys chodidla (pomocí membránového plantografu). Z naměřených hodnot byl vypočten BMI (WHO, 2011) bylo provedeno hodnocení plochohozí podle Chippaux-Šmiráka (Klementa, 1987).

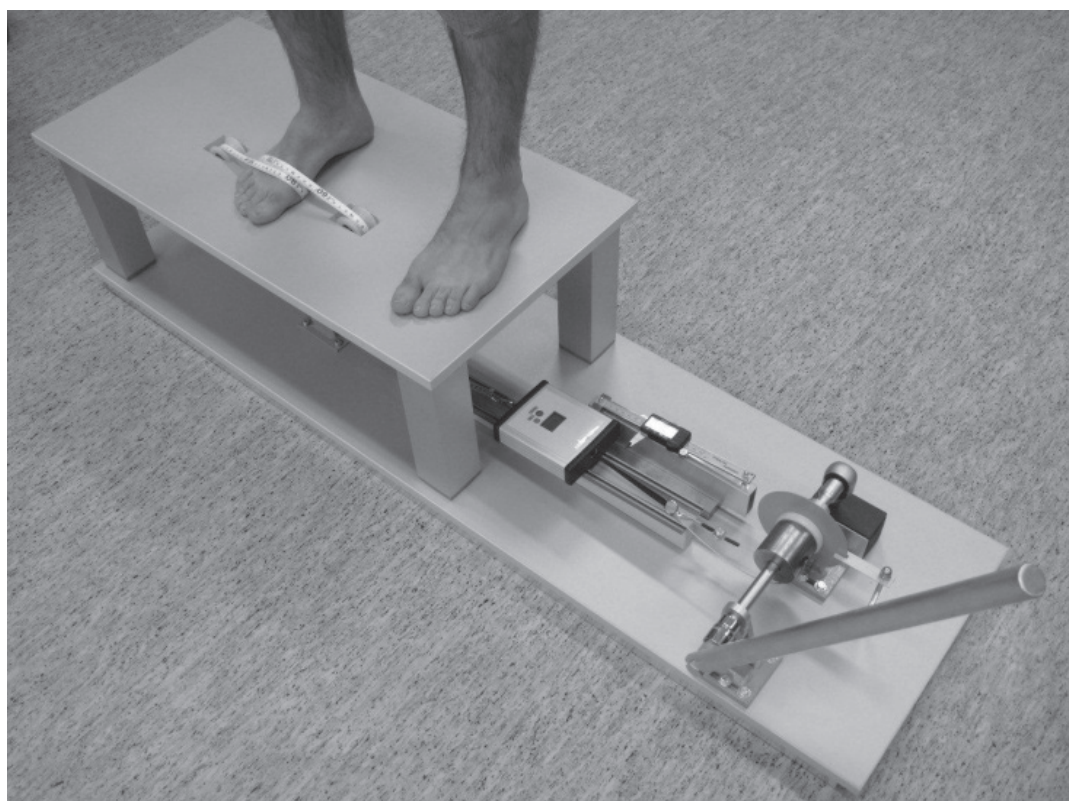
Tabulka 1. Charakteristika souboru probandů

Parametr	Muži	Ženy
	M ± SD	M ± SD
Věk (roky)	20,0 ± 1,8	21,0 ± 1,8
Hmotnost (kg)	77 ± 12	61 ± 9
Tělesná výška (m)	1,80 ± 0,06	1,70 ± 0,07
BMI (kg/m ²)	24 ± 3,00	22 ± 3
PDCH pravá noha (mm)	269 ± 13	243 ± 11
PDCH levá noha (mm)	270 ± 13	242 ± 12
OPK pravá noha (mm)	260 ± 15	232 ± 11
OPK levá noha (mm)	260 ± 15	232 ± 10

Poznámka: M – aritmetický průměr; SD – směrodatná odchylka průměru; BMI – index tělesné hmotnosti; PDCH – přímá délka chodidla; OPK – obvod prstních kloubů

Ve spolupráci s Ústavem fyziky a materiálového inženýrství na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně byl vyvinut přístroj na měření deformovatelnosti chodidla (Obrázek 1). Toto zařízení je unikátním přístrojem, který byl v roce 2012 zapsán Úřadem průmyslového vlastnictví jako užitný vzor a v současné době probíhá patentové řízení. Pomocí tohoto přístroje byla zjišťována míra deformace obvodu nohou v místě metatarsophalangeálního skloubení v závislosti na síle, kterou je utahována páska. Na zařízení stojí měřená osoba mírně rozkročena na horní plošinu konstrukce přístroje a kolem jedné nohy má omotanou pásku s metrickou stupnicí v místě metatarsophalangeálního skloubení. Tato páska je vedena přes soustavu kladek a součástí mechanismu je i snímač síly (siloměr). Síla je na nohu přenášena prostřednictvím pohybu páky. Velikost tahové síly je nastavitelná a vzniká působením měřidla (pásky) na nohu, přičemž maximální působící síla, kterou lze přístrojem dosáhnout, je 300 N. Velikost síly je odečtena na siloměru, deformace nohy na měřítku na pásce. Interval aplikované síly byl stanoven u mužů od 0 do 80 N a u žen od 0 do 60 N (pro ženy bylo utažení pásky silou větší než 60 N nepříjemně bolestivé).

Obrázek 1. Přístroj pro měření deformovatelnosti nohy



Měřicí cyklus aplikované síly byl stanoven na 10 N, 20 N, 30 N, 40 N, 50 N, 60 N, 70 N a 80 N, přičemž nulová deformace byla vztažena k 10 N. Měření bylo prováděno vždy zvlášť pro pravou a pro levou nohu probanda. Výsledkem měření je závislost deformace nohy v místě OPK na aplikované síle. Při měření byla také stanovena deformace nohy probandů při maximální utahovací síle. Horní hranice síly byla individuálně omezena prahem bolesti.

Zjištěná data byla vyhodnocena pomocí programu Microsoft Office Excel a pro hodnocení výsledků byla použita regresní lineární analýza, jednovýběrový t-test a korelační koeficient.

Výsledky

U každého probanda byla tedy změřena závislost deformace obvodu nohy v místě metatarsophalangeálního skloubení v závislosti na síle, kterou byla utahována páska, přičemž nulová deformace byla vztažena k utažení silou 10 N. Závislostí deformace nohy na aplikované síle byla proložena přímka, jejíž směrnice charakterizovala deformovatelnost nohy. Tato směrnice byla označena jako deformovatelnost nohy a její jednotkou je mm · N⁻¹. Vyšší hodnota deformovatelnosti nohy odpovídá větší deformaci nohy při stejné síle.

Deformovatelnost nohy, zjištěná ze směrnice regresní přímky závislosti deformace nohy na aplikované síle, měla ve skupině mužů průměrnou hodnotu pro pravou nohu 0,207 ± 0,005 mm · N⁻¹ a pro levou nohu 0,173 ± 0,005 mm · N⁻¹. Ve skupině žen byla průměrná hodnota deformovatelnosti pravé nohy 0,214 ± 0,005 mm · N⁻¹ a pro levou nohu 0,192 ± 0,005 mm · N⁻¹.

V průběhu měření byla zjišťována také hodnota deformace nohou probandů v místě metatarsophalangeálního skloubení při maximální utahovací síle. Maximální hodnota síly je dána jednak prahem bolesti probandů, jednak konstrukcí přístroje. U mužů bylo možno působit na pravou nohu průměrnou maximální silou 147 ± 11 N a obvod nohy se pak zmen-

Tabulka 2. Popisné charakteristiky parametrů deformace nohou

Síla (N)	Muži		Ženy	
	Deformace pravé nohy	Deformace levé nohy	Deformace pravé nohy	Deformace levé nohy
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
	M ± SD	M ± SD	M ± SD	M ± SD
10	0	0	0	0
20	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1	2 ± 1
30	5 ± 1	4 ± 1	5 ± 1	4 ± 1
40	7 ± 2	5 ± 1	7 ± 2	6 ± 1
50	9 ± 2	7 ± 2	9 ± 2	8 ± 2
60	11 ± 2	9 ± 2	11 ± 2	10 ± 2
70	13 ± 2	10 ± 2	–	–
80	15 ± 3	3 ± 2	–	–

Poznámka: M – aritmetický průměr; SD – směrodatná odchylka průměru

šil o 24 ± 2 mm. Na levou nohu bylo možné působit silou 146 ± 12 N a obvod nohy se zmenšil o 22 ± 2 mm. U žen došlo při průměrné maximální síle 58 ± 5 N ke zmenšení obvodu pravé nohy o 14 ± 2 mm a při průměrné maximální síle 55 ± 4 N u levé nohy ke zmenšení obvodu o 12 ± 1 mm.

Dalším cílem bylo zjistit, zda existuje korelace mezi zjišťovanými charakteristikami nohy a její deformovatelností. Pomocí korelačního koeficientu bylo otestováno, zda existuje souvislost mezi deformovatelností nohy a některým z následujících parametrů: přímou délkou chodidla, OPK v zatížení, indexem plochonoží vyhodnoceným podle Chippaux-Šmiřáka. Dále byl statisticky testován pomocí t-testů rozdíl v deformovatelnosti nohou u mužů a žen a u pravorukých a levorukých probandů.

Diskuze

Ve skupině mužů se při deformaci obvod prstních kloubů obou nohou průměrně zmenšil o více než 3 obvodové skupiny, zatímco ve skupině žen to bylo o 2 obvodové skupiny (dvě po sobě jdoucí obvodové skupiny v jednom velikostním čísle se liší o přibližně 6 mm, v závislosti na systému číslování).

Bohužel se v tomto souboru nepodařilo prokázat staticky významnou souvislost mezi deformovatelností nohy a zmíněnými charakteristikami probandů (na hladině významnosti $\alpha = 0,05$), což může být způsobeno prozatím poměrně nízkým počtem změřených osob. Dle našeho názoru by bylo velmi zajímavé v experimentu pokračovat a získat větší soubor dat pro statistické zpracování. Přínosné by také bylo porovnat deformovatelnost nohy v různých věkových skupinách.

Tato skutečnost nebyla doposud dostatečně studována ani z hlediska vlivu na změny funkčního chování, či z hlediska zdravotní nezávadnosti obouvání. Dostupné studie se zabývají převážně hodnocením míry a způsobu deformace bosé nohy při různých stupních zátěže. S vhodným měřicím zařízením a vhodnou technikou je dnes možné provést například kinematickou analýzu nohy při chůzi a běhu nebo provést 3D skenování nohy odlehčené a v různých stupních zátěže. Tyto studie na rozdíl od našeho experimentu posuzují schopnost nohy kompenzovat působící zátěž fyziologickou změnou tvaru a rozměrů. Nicméně i tyto závěry potvrzují, že noha je obzvláště v oblasti metatarsophalangeální skloubení velmi snadno deformovatelná. Například Kouchi, Kimura a Mochimaru (2009) ve svých experimentech sledovali změny tvaru nohy a nožní klenby při chůzi a popisují, že mimo jiné dochází ke snížení příčné klenby a rozšíření nohy v oblasti příčné klenby v důsledku přirozené funkce nohy rozkládat a přenášet zatížení na podložku. Ze studie Blenkinsoppa, Harlanda, Price, Lucase a Robertse (2012) provedené metodou 3D image korelace vyplývá, že změna šířky nohy v oblasti hlaviček nártních kostí při běhu ve fázi opory může dosahovat až 8 mm. Xiong, Goonetilleke, Zhao,

Li a Witana (2009) ve své práci potvrzují individuální mechanismy těchto jevů na noze, protože nenacházejí souvislost mezi změnou šířky nohy po zatížení a tělesnou hmotností probanda.

V době vzniku univerzálního systému číslování obuvi se předpokládalo, že zúžení/rozšíření vnitřních prostor obuvi o 6 mm (= jedné šířkové skupině) se musí projevit v subjektivním vnímání jako zlepšení/zhoršení tlakového komfortu. Závěry tohoto měření by na straně druhé vysvětlovaly, proč se i přes teoreticky doporučenou potřebu vyrábět obuv ve více šířkách, toto nikdy v dostatečném rozsahu neujalo. Zajímavé bylo zjistit, jaký je vliv takového působení síly při dlouhodobém zatížení a jak rychle dochází k nevratnému poškození nohy. Ovšem provedení takového experimentu by samozřejmě naráželo na mnohá úskalí organizačního a etického rázu. Provedený experiment byl pilotní studií a jeho hlavním cílem bylo stanovit vhodnou metodiku měření na nově vyvinutém měřicím přístroji tak, aby byla dosažena dobrá reprodukovatelnost výsledků.

Závěr

Z uvedených naměřených hodnot vyplývá, že probandi muži snesli větší hodnotu síly utažení než ženy.

Výsledky experimentu naznačují, že lidská noha je krátkodobě poměrně značně deformovatelná a vydrží velkou zátěž. U poloviny probandů byla dlouhodoběji snesitelná zátěž stanovena až na 80 N, přičemž se obvod prstních kloubů zmenšil v některých případech až o 15 mm, což odpovídá dvěma obvodovým skupinám. Experiment vysvětluje, proč se většina obuvi vyrábí pouze v jedné šířkové skupině a všichni lidé jsou si schopni vybrat „vhodnou“ obuv.

Poděkování

Prezentované výsledky byly z části získány v rámci projektu LF11021 PREDICTUS – Výzkum a vývoj software pro modelování růstu dětských nohou s cílem eliminace rizik jejich poškození nevhodnou obuví (2011–2013).

Klíčová slova: deformace nohy, metatarsophalangeální skloubení, obvod prstních kloubů

Literatura

- Baron, C. J., Bonanno, D., & Menz, H. B. (2009). Development and Evaluation of a Tool for the Assessment of Footwear Characteristics. *Journal of Foot and Ankle Research*, 2(110).
- Barut, C., Ozer, C. M., Sevinc, O., Gumus, M., & Yuntun, Z. (2007). Relationships Between Hand and Foot Preferences. *International Journal of Neuroscience*, 117(2), 177–185.
- Blenkinsopp, R., Harland, A., Price, D., Lucas, T., & Roberts, J. (2012). A Method to Measure Dynamic Dorsal Foot Surface Shape and Deformation During Linear Running

- Using Digital Image Correlation. *Procedia Engineering*, 34, 266–271.
- Chantelau, E. (2002). Shoe-Fitting, Doesn't It Really Matter? *Gerontology*, 48(6), 408.
- Cheng, F. T., & Perng, D. B. (1999). A Systematic Approach for Developing a Foot Size Information System for Shoe Last Design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 25(2), 171–185.
- Curwen, L. G., & Park, J. (2014). When the Shoe Doesn't Fit: Female Consumers' Negative Emotions. *Journal of Fashion Marketing and Management*, 18(3), 338–356.
- Česká obuvnická a kožedělná asociace. (2013). *Obuvnická ročenka 2013*. Retrieved from <http://www.coka.cz/informace/26-statistiky/279-obuvnicka-rocenka-2013>
- Česká obuvnická a kožedělná asociace. (2016). *Obuv a obsluha zákazníka – e-learning*. Retrieved from <http://e-coka.cepac.cz/inf-portal/Login.aspx>
- Fritz, B., Schmeltzpfenning, T., Plank, C., & Grau, S. (2013). Development of Well-fitting Shoes for Children and Adolescents. *Footwear Science*, 5(1), S93–S94.
- Hlaváček, P. (2005). Demografické změny v České republice a jejich význam na obouvání. *Pohybové ústrojí*, 11, 125–126.
- Hohmann, D., & Uhlig, R. (2005). Überarbeitete und neu gestaltete. *Ortopädische Technik*, 9(8), 567.
- Holoubek, V. (2015). *Jak obuv ovlivňuje vývoj dětské nohy*. XIV. Mezinárodní podiatrické sympozium BVV Brno, 21. 10. 2015
- Klementa, J. (1987). *Somatometrie nohy*. Praha: SPN
- Kouchi, M., Kimura, M., & Mochimaru, M. (2009). Deformation of Foot Cross-section Shapes During Walking. *Gait & Posture*, 30(4), 482–486.
- Kusumoto, A., Suzuki, T., Yoshida, H., & Kwon, J. (2008). Intervention Study to Improve Quality of Life and Health Problems of Community-Living Elderly Women in Japan by Shoe Fitting and Custom-Made Insoles. *Gerontology*, 53(6), 348–356.
- Lavrysen, A., Heremans, E., Peeters, R., Wenderoth, N., Feys, P., Swinnen S. P., & Helsen, W. F. (2012). Hemispheric Asymmetries in Goal-Directed Hand Movements Are Independent Ofhand Preference. *NeuroImage*, 62(3), 1815–1824.
- Luximon, Y., & Luximon, A. (2009). Shoe-last Design Innovation for Better Shoe Fitting. *Computers in Industry*, 60(8), 621–628.
- Manna, I., Pradhan, D., Ghosh, S., Kar, S. K., & Dhara, P. (2001). A Comparative Study of Foot Dimension Between Adult Male and Female and Evaluation of Foot Hazards Due to Using of Footwear. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 20(4), 241–246.
- Menz, H. B., Auhl, M., Ristevski, S., Frescos, N., & Munteanu, S. E. (2014). Evaluation of the Accuracy of Shoe Fitting in Older People Using Three-dimensional Foot Scanning. *Journal of Foot and Ankle Research*, 7(1), 3–11.
- Rossi, W. A. (1999). Why shoes make “normal” gait impossible. *Podiatry Management*, 50–61.
- Schwarzkopf, R., Perretta, D. J., Russell, T. A., & Sheskier, S. C. (2011). Foot and Shoe Size Mismatch in Three Different New York City Populations. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 50(4), 391–394.
- Urca, A., & Dzeroski, S. (2013). Length Dispersion of Shoes Labelled with the Same Size in the UK Shoe-size System. *Footwear Scienc*, 5(1), S39–S41.
- WHO. (2011). *Global Database on Body Mass Inde*. Retrieved from the World Wide Web: http://apps.who.int/bmi/index.jsp?introPage=intro_1.html
- Xiong, S., Goonetilleke, R. S., Zhao, J., Li, W., & Witana, C. P. (2009). Foot Deformations Under Different Load-bearing Conditions and Their Relationships to Stature and Body Weight. *Anthropological Science*, 117(2), 77–88.
- Xiong, S., Zhao, J., Jiang, Z., & Dong, M. (2010). A Computer-aided Design System for Foot-feature-based Shoe Last Customization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1), 11–19.
- Yoo, W. G. (2013). Effect of Tight-fitting High-heeled Shoes on the Activities of the VMO, BF, and GCM Muscles During Stair Ascent. *Journal of Physical Therapy Science*, 25(1), 45–46.
- Černeková, M., Ponížil, P., Baďurová, J., Šibová, B., & Pavlačková, J. (2016). Tvarové změny nohou při působení deformační síly v oblasti metatarsophalangeálního skloubení. *Česká antropologie*, 66(1), 8–11.