

MERJENJE PRITISKOV V ORTOTIKI IN PROTETIKI

PRESSURE MEASUREMENT IN ORTHOTICS AND PROSTHETICS

Maja Mlakar, dipl. inž. ort. prot.

Univerzitetni rehabilitacijski inštitut Republike Slovenije – Soča, Ljubljana

Izvleček

V prispevku predstavljamo pregled objavljenih člankov o merjenju pritiskov v ortotiki in protetiki. Doslej so take merilne sisteme na področju protetike in ortotike razvili za merjenje pritiskov v ortopedski obutvi, v ležiščih protez za spodnje ude in za merjenje pritiskov pri sedenju. Članke smo iskali v podatkovni zbirki PubMed.

V člankih največkrat pišejo o ugotovitvah pri merjenju pritiskov na stopalih, čeprav so tudi te ugotovitve le delne in niso dokončne. Leta 2012 je bil objavljen prvi del Mednarodnega znanstvenega dogovora o medicinskih napravah za merjenje pritiskov na stopalih, v katerem so navedena tehnična priporočila in priporočila za izvedbo. Namen dogovora je povečati strokovnost pri uporabi merilnih sistemov in poenotiti interpretiranje zbranih podatkov. Najmanj je člankov o merjenju pritiskov pri sedenju. Dokumentov o poenotenju protokolov za merjenje le-teh nismo našli, pač pa zapise z opozorili o tem, da je treba biti kritičen pri uporabi serijsko izdelanih merilnih sistemov v klinični praksi in pri interpretaciji zbranih podatkov. Merjenje pritiskov v ležiščih protez je ravno tako kot merjenje pritiskov pri sedenju še vedno v začetni fazi zbiranja in objavljanja dokazov.

V pregledani literaturi torej nismo našli kakovostnih in trdnih znanstvenih dokazov, ki bi potrjevali uporabnost in zanesljivost katere od metod in načinov merjenja pritiskov v ortotiki in protetiki.

Ključne besede:

merjenje pritiskov, porazdelitev pritiskov, pritiski na stopalu, sedenje, ležišče proteze

Abstract

A review of the published literature on pressure measurement in orthotics and prosthetics is presented. So far, such systems have been developed for measuring plantar pressure in orthopaedic shoes, in prosthesis sockets for lower limbs, and during sitting. The literature was searched within the PubMed database.

The articles mainly describe the findings from measuring plantar pressure, but even those findings are partial and inconclusive. In 2012, the first part of the International scientific consensus on medical plantar pressure measurement devices was published, which lists technical and performance requirements. The aim of the consensus is to improve the use of the measurement systems and unify the interpretation of the gathered data. The articles on pressure measurement in the sitting position are the least frequent. We found no consensus documents, only recommendations to maintain a critical attitude when applying mass-produced measurement systems in clinical practice and interpreting the data gathered with such systems. Regarding pressure measurement in prosthesis sockets, the expert community is also still in the initial phase of gathering and publishing evidence.

Hence, we found no high-quality and firm evidence in the examined literature that would confirm usefulness and reliability of any of the methods of pressure measurement in orthotics and prosthetics.

Key words:

pressure measurement, pressure distribution, plantar pressure, sitting, prosthesis socket

UVOD

Ko človek nosi protezo ali ortozo, na njegovo telo oziroma dele telesa delujejo sile. Če so te sile prevelike ali na neprimernih mestih, lahko pride do težav, kot so odrgnine, otiščanci, žulji ipd. Pri preskušanju pripomočka in takrat,

ko ga uporabnik prevzame, ni možno vedno ugotoviti in predvideti teh težav. Dodatna težava pa je, če pacient na mestih, kjer je nameščen pripomoček, čuti slabo ali sploh ne. V takih primerih je še posebej dobrodošlo, da si lahko pomagamo z merjenjem pritiskov pri oceni in predvidevanju oziroma preprečevanju nastanka opisanih težav. Doslej so take merilne sisteme na področju protetike in ortotike razvili za merjenje pritiskov v ortopedski obutvi, v ležiščih

E-naslov za dopisovanje /Email for correspondence (MM):
maja.mlakar@ir-rs.si

protez za spodnje ude in za merjenje pritiskov pri sedenju. V članku predstavljamo pregled literature o meritvah pritiskov v ortotiki in protetiki.

METODE

Članke smo iskali v podatkovni zbirki PubMed, in sicer s ključnimi besedami: »pressure in measurement*« za vsa omenjena področja in z dodanimi gesli: »foot, plantar« – za pritiske na stopalih; »wheelchair, mapping, sitting« – za pritiske pri sedenju; »socket, prosthet*, prosthes*« – za pritiske v ležišču; za vsa področja in za obdobje od 1. 1. 2008 do 31. 12. 2012.

REZULTATI

Merjenje pritiskov na stopalih

V podatkovni zbirki PubMed smo za obdobje zadnjih petih let našli 89 člankov o merjenju pritiskov na stopalih.

Ko smo jih pregledali, smo ugotovili, da 38 člankov opisuje meritve pritiskov na stopalih pri osebah z različnimi boleznimi in okvarami. Preiskovali so porazdelitev pritiskov pri osebah s sladkorno boleznijo (3), revmatoidnim artritisom (4, 5), z osteoartritisom kolena (6) in z osteoartritisom gležnja (7), z nestabilnim gležnjem (8), s patelo-femoralnim bolečinskim sindromom (9), pri osebah z bolečinami v peti (10), pri otrocih z deformacijami stopala (11), pri otrocih s cerebralno paralizo po operativnem posegu za popravljanje valgusnega položaja stopala (12) ipd.

Petindvajset člankov obravnava porazdelitev pritiskov na stopalu pri različnih pogojih in z možnimi vplivi na to porazdelitev. Avtorji so ugotavljali, kaj vpliva na porazdelitev pritiskov na stopalu. Preučevali so vpliv teže osebe, indeksa telesne mase in spola pri zdravih otrocih (13), vpliv načina odvzema mere za ortozo za stopalo (14), vpliv uporabe ortoz (15-18), vpliv spola in hitrosti hoje (19), porazdelitev pritiskov med stojo pri ženskah in moških (20), pri uporabi individualno izdelanih vložkov (21-23), vpliv načina zavezovanja obutve (24) ipd. Uporabljeni merski sistemi in protokoli merjenja v teh študijah so različni in zato jih težko primerjamo.

Štirinajst člankov opisuje tehnične izboljšave in različne izvedbe merilnih sistemov za merjenje pritiskov na stopalih ali primerja veljavnost in zanesljivost podatkov, izmerjenih z različnimi merilnimi sistemi ali protokoli merjenja. V dveh člankih meritve pritiskov na stopalih niso opredeljene, ampak je v njih le omenjena ena od ključnih besed, s katerimi smo članke iskali. Le eden izmed omenjenih člankov je opredeljen kot sistematični pregled in vsebuje pregled tehničnih možnosti za merjenje pritiskov na stopalih (25). Sistematičnega preglednega članka, v katerem bi ocenili in opisali kakovost študij o meritvah pritiskov na stopalih,

nismo našli. Vendar je bil leta 2012 objavljen dokument Mednarodni znanstveni dogovor o medicinskih napravah za merjenje pritiskov na stopalih: tehnična priporočila in priporočila za izvedbo meritev (1), ki je nastal kot dogovor med načrtovalci in uporabniki merskih sistemov in katerega namen je bil standardizirati tako naprave kot tudi metodologijo merjenja.

Razak in sodelavci (25) so objavili sistematični pregledni članek o tehničnih možnostih na področju merjenja pritiskov na stopalih. Veliko različic merilnih sistemov za merjenje pritiskov na stopalih v grobem razvrščajo na: sisteme za merjenje v čevlju in sisteme za merjenje na plošči. Senzorji, uporabljeni v teh sistemih, se razlikujejo glede na linearnost, histerezo, velikost območja občutljivosti, razpon obremenitve in temperaturno občutljivost. Podrobno so opisane tudi različne vrste serijsko izdelanih senzorjev in uporabnost le-teh v posebnih okoliščinah. Najpogosteje uporabljeni senzorji so kapacitivni, uporni, tlačno-električni in tlačno-uporni. Avtorji v članku predstavljajo tudi lastni razvojni dosežek – mikro-električne senzorje (MEMS), za katere menijo, da so boljši po mnogih lastnostih v primerjavi s prej naštetimi (25).

Zaradi razširjene uporabe množice merilnih sistemov ter načinov merjenja in vrednotenja podatkov, ki jih je med seboj težko primerjati, so znanstveniki iz različnih koncev sveta prišli do zamisli, da napišejo in predstavijo dokument Mednarodni znanstveni dogovor o medicinskih napravah za merjenje pritiskov na stopalih: tehnična priporočila in priporočila za izvedbo (1), katerega namen je povečati strokovnost pri uporabi merilnih sistemov in poenotiti tudi interpretacijo podatkov. Predstavljeni dokument je prvi od treh načrtovanih delov:

- definicija in standardizacija orodij in protokolov za tehnično oceno kakovosti medicinskih naprav za merjenje pritiskov na stopalih,
- definicija in standardizacija protokolov za merjenje pritiskov na stopalih,
- definicija in standardizacija zbiranja in interpretiranja podatkov.

Zaključki prvega dela Mednarodnega dogovora so strnjeni v osem sklopov:

1. Osnovna načela za tehnično oceno medicinskih naprav za merjenje pritiskov na stopalih;
2. Minimalni nabor parametrov, ki jih mora oceniti proizvajalec;
3. Minimalne zahteve za testno opremo proizvajalca;
4. Predlagani protokol za testiranje pri proizvajalcu;
5. Minimalne zahteve, priporočene za analizo hoje brez obutve pri proizvajalcu;
6. Predlog za tehnično poročilo proizvajalca;
7. Kriteriji in minimalne zahteve za periodično ocenjevanje na mestu uporabe;
8. Kontrolni seznam sestavnih delov medicinske naprave za merjenje pritiskov na stopalih za uporabnike.

O merjenju pritiskov na stopalih je objavljenih največ člankov, vendar je predstavljeni dokument šele začetek poenotenja in oblikovanja okoliščin za zbiranje primerljivih podatkov.

Merjenje pritiskov pri sedenju

Najmanj je objavljenih člankov o merjenju pritiskov pri sedenju. V podatkovni zbirki PubMed smo pri razširjenih pogojih iskanja in brez časovne omejitve našli 5 člankov. Med njimi ni sistematičnih pregledov. Eden od člankov opisuje primerjavo pritiskov med sedenjem v invalidskem vozičku pri uporabi različnih blazin (26). Dva članka opisujeta meritve pritiskov pri sedenju v invalidskem vozičku pod različnimi pogoji (27, 28). V dveh člankih pa so primerjali podatke, ki so jih izmerili z dvema različnima merilnima sistemoma (29, 30).

Na spletu lahko najdemo predstavitev strokovnjakov z Univerze v Pittsburghu, v kateri avtorja (2) predstavljata svoj pogled na merjenje pritiskov pri sedenju. V nadaljevanju bomo podrobneje predstavili njuno mnenje, ker menimo, da je glede na majhno število člankov, ki ne vsebujejo trdnih dokazov, umestno, da ga predstavimo.

Omenjena avtorja opozarjata, da je merilni sistem za merjenje pritiskov pri sedenju sicer zelo dober pripomoček, vendar mora biti pravilno uporabljen. Opozarjata, da lahko zaradi nepravilne uporabe in interpretacije izmerjenih podatkov pride do napačnih odločitev. Nasprotujeta temu, da bi sedežne blazine izbrali samo na osnovi meritev pritiskov. Izmerjeni podatki o pritiskih, so lahko le izhodišče za izbiro določene sedežne blazine. Opozarjata, da je porazdelitev pritiskov le eden od dejavnikov, ki vplivajo na nastanek razjed na izpostavljenih točkah. Poudarjata tudi, da pri teh merjenjih ne upoštevajo velikosti in učinka strižnih sil. Merijo le vertikalne sile pritiska. Poudarjata, da je vprašljiva tudi zanesljivost teh meritev, ki je odvisna od vsakokratnega umerjanja naprave, saj je po podatkih, ki jih navajata, obseg napake pri merjenju lahko tudi od 20 do 50 %. Ne strinjata se tudi s standardno vrednostjo pritiska 32 mm Hg (vrednost kapilarnega pritiska v predelu srca), ki jo v sisteme za merjenje vnesejo kot vrednost, od katere se meri povečanje in zmanjšanje pritiska na določenem področju. Navajata, da je 60 mm Hg (31) veliko primernejša vrednost kapilarnega pritiska na telesnih predelih, ki jih pri sedenju merimo, in bi morala biti vnescena kot mejna vrednost. Menita, da meritve pritiskov pri sedenju dovoljujejo primerjavo pred in po uporabi določene sedežne blazine, ne pa primerjave med njimi in kot pomoč pri klinični presoji. Kot zelo uporabno orodje meritve pritiskov navajata v primerih, ko imamo uporabnika, ki ima težave s sporazumevanjem. Menita, da je sistem merjenja pritiskov zelo uporaben za nazoren prikaz, kako spremembe v drži in naklonu vozička vplivajo na prerazporeditev pritiskov pri sedenju. V zaključku opozarjata na pomembnost klinične

presoje in upoštevanja različnih dejavnikov pri odločanju v klinični praksi in ovrednotita meritev pritiskov pri sedenju kot napredek v primerjavi s preverjanjem le-teh z roko pod zadnjico uporabnika invalidskega vozička.

Merjenje pritiskov v ležišču proteze

O merjenju pritiskov v ležišču proteze smo v podatkovni zbirki PubMed našli 24 člankov, ko smo iskali brez časovne omejitve, ali 9 za obdobje zadnjih petih let. Trije članki so v naslovu opredeljeni kot sistematični pregledi. Štirinajst jih opisuje merjenje pritiskov v ležišču v različnih okoliščinah. Devet člankov pa eno od ključnih besed, s katerimi smo članke v podatkovni zbirki izbirali, samo omenja in vsebinsko niso povezani z obravnavano tematiko.

Pri merjenju pritiskov v ležiščih protez so ravno tako kot pri merjenju pritiskov pri sedenju v začetni fazi zbiranja in objavljanja dokazov. V podatkovni zbirki PubMed nismo našli kakovostnih raziskovalnih člankov, na podlagi katerih bi lahko predstavili utemeljene ugotovitve.

V preglednem članku je Mak s sodelavci (32) pripravil pregled literature o biomehaniki ležišča, vključno z merjenjem pritiskov, in o pojavljanju strižnih sil v ležišču, računalniškem modeliranju ter o odzivu mehkih tkiv na zunanje obremenitve. V pregledu člankov o merjenju pritiskov v ležišču navajajo pet različnih senzorjev, ki jih uporabljajo za merjenje pritiskov v ležišču, in dva načina njihovega nameščanja: med vložek in kožo krna ali v ležišče oziroma vložek. Primerjajo tri serijsko izdelane sisteme za merjenje, pri vsakem od njih ugotavljajo tako prednosti kot slabosti, predvsem pri uporabi različnih senzorjev in njihovih lastnosti. Opažajo, da so v literaturi zelo velike razlike v navedenih maksimalnih vrednostih pritiskov. Za PTB ležišče navajajo, da so najvišje izmerjene sile na predelu podpatelarnega pritiska 400 kPa. Večinoma pa avtorji navajajo, da so sile na tem predelu pod 220 kPa (med hojo). Mak in sodelavci (32) opredelijo tudi vzroke za neenotne in razpršene rezultate merjenj: različni tipi ležišč in vrste protez, razlike v velikosti krnov in količini mehkih tkiv in načinu hoje, različni položaji oziroma področja merjenj in različne lastnosti merilnih sistemov in njihovega nameščanja.

V pregledu raziskav o pritiskih v ležišču protez (33) ravno tako ugotavljajo, da je težko oziroma nemogoče primerjati rezultate do tedaj objavljenih študij, ker so rezultati meritev odvisni od vrste uporabljenih senzorjev in uporabljene metode umerjanja naprav za merjenje. Pišejo o 27 eksperimentalnih študijah, od katerih jih 24 navaja uporabo individualno izdelanih in vgrajenih senzorjev v ležišče in le tri uporabo serijsko izdelanih merilnih sistemov in senzorjev. Opozarjajo, da njihova natančnost in točnost ni dokumentirana, kljub temu da senzorji serijsko izdelanih merilnih sistemov omogočajo zajetje podatkov na večjih področjih v primerjavi s senzorji, vgrajenimi v ležišče. Enako ugotovitev

lahko zapišemo tudi danes. Poleg tega poudarjajo, da s temi sistemi lahko izmerimo podatke le v treh ključnih trenutkih faze hoje: dotik pete s podlago, faza opore in odziv.

Pollack in sodelavci (34) poudarjajo, da je pomembna razlika v primerjavi z merjenji pritiskov na stopalih ali pri sedenju v tem, da pri statični in dinamični obremenitvi v ležišču delujejo veliko večje strižne sile, ker je stična površina med ležiščem in krnom navpična. Vsi sistemi za merjenje pritiskov ne omogočajo merjenja strižnih sil (32). Dumbelton in sodelavci (35) v svoji študiji, v kateri primerjajo porazdelitev pritiskov v dveh različnih ležiščih, pišejo, da se zavedajo omejitev uporabljenega merilnega sistema. Omejitve, ki jih povzemajo po članku Buisa s sodelavci (36), se nanašajo na senzorje in so: histereza, zgostitve zaznavanja, občutljivost na okrogline, temperaturna povprečnost, interval občutljivosti in obremenitvena vrednost. Na pravilno uporabo rezultatov merjenja v klinični praksi opozarja tudi Pollack s sodelavci (37). Pregled naštetih omejitev pri uporabi senzorjev v ležišču proteze je v preglednem članku podrobno predstavil Sanders (38).

Wheeler in sodelavci (39) predstavljajo nove senzorje za merjenje pritiskov v ležišču, katerih sestavni del so senzorji MEMS. Avtorji opisujejo prednosti le-teh pred najbolj uporabljanimi upornimi senzorji, in sicer so te prednosti v manjših zgostitvah zaznavanja in boljši porazdelitvi občutljivosti. Da bi zmanjšali histerezo, avtorji predlagajo, naj te senzorje namestimo med vložek in kožo. Člankov, ki bi opisovali uporabo omenjenih novih senzorjev, nismo našli.

RAZPRAVA

Merjenje pritiskov v ortotiki in protetiki lahko zagotovi uporabne informacije za izdelavo in aplikacijo nekaterih pripomočkov ter za prilagoditev pri individualni izdelavi le-teh. Najprej so začeli meriti pritiske pri izdelovanju vložkov in obutve, nato pa so razvili še merilne sisteme na področju sedežne tehnologije ter na področju protetike. Razloga za manjšo uporabo na teh področjih sta predvsem ekonomičnost nakupa naprav za merjenje pritiskov in tudi zahtevnost interpretacije podatkov. Poleg tega je še vedno nedorečeno vprašanje o uporabnosti in natančnosti senzorjev in s tem verodostojnost pridobljenih podatkov. Te sisteme so razvili v raziskovalne namene, ne pa za klinične meritve. Za merjenje z njimi ter za uporabo in interpretacijo izmerjenih podatkov je treba imeti obširno tehnično znanje. Lahko predvidevamo, da je vzrok za dokaj razširjeno uporabo in malo objavljenih kakovostnih dokazov ravno v tem.

SKLEP

Kakovostnih in trdnih znanstvenih dokazov, ki bi potrjevali uporabnost in zanesljivost katere od metod in načinov merjenja pritiskov v ortotiki in protetiki, nismo našli.

Literatura:

1. Giacomozzi C, Keijsers N, Pataky T, Rosenbaum D. International scientific consensus on medical plantar pressure measurement devices: technical requirements and performance. *Ann Ist Super Sanita* 2012; 48(3): 259-71.
2. Schmeler M, Buning ME. Pressure mapping. Center for Assistive Technology, UPMC Health System, Department of Rehabilitation Science & Technology, University of Pittsburgh. Dostopno na: http://www.wheelchairnet.org/wcn_wcu/SlideLectures/MS/3PressureMapping.pdf
3. Waldecker U. Pedographic classification and ulcer detection in the diabetic foot. *Foot Ankle Surg* 2012; 18(1): 42-9.
4. Novak P, Burger H, Tomsič M, Marinček C, Vidmar G. Influence of foot orthoses on plantar pressures, foot pain and walking ability of rheumatoid arthritis patients--a randomised controlled study. *Disabil Rehabil* 2009; 31(8): 638-45.
5. Hodge MC, Nathan D, Bach TM. Plantar pressure pain thresholds and touch sensitivity in rheumatoid arthritis. *Foot Ankle Int* 2009; 30(1): 1-9.
6. Leitch KM, Birmingham TB, Jones IC, Giffin JR, Jenkyn TR. In-shoe plantar pressure measurements for patients with knee osteoarthritis: reliability and effects of lateral heel wedges. *Gait Posture* 2011; 34(3): 391-6.
7. Rouhani H, Crevoisier X, Favre J, Aminian K. Outcome evaluation of ankle osteoarthritis treatments: plantar pressure analysis during relatively long-distance walking. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2011; 26(4): 397-404.
8. Ateşalp S, Demiralp B, Ozkal UB, Uğurlu M, Bozkurt M, Başbozkurt M. Modified Evans technique improves plantar pressure distribution in lateral ankle instability. *Eklemler Hastalıkları* 2009; 20(1): 41-6.
9. Aliberti S, Costa Mde S, Passaro Ade C, Arnone AC, Hirata R, Sacco IC. Influence of patellofemoral pain syndrome on plantar pressure in the foot rollover process during gait. *Clinics (Sao Paulo)* 2011; 66(3): 367-72.
10. Bonanno DR, Landorf KB, Menz HB. Pressure-relieving properties of various shoe inserts in older people with plantar heel pain. *Gait Posture* 2011; 33(3): 385-9.
11. Pauk J, Daunoraviciene K, Ihnatouski M, Griskevicius J, Raso JV. Analysis of the plantar pressure distribution in children with foot deformities. *Acta Bioeng Biomech* 2010; 12(1): 29-34.

12. Park KB, Park HW, Lee KS, Joo SY, Kim HW. Changes in dynamic foot pressure after surgical treatment of valgus deformity of the hind foot in cerebral palsy. *J Bone Joint Surg Am* 2008; 90(8): 1712-21.
13. Phethean J, Nester C. The influence of body weight, body mass index and gender on plantar pressures: results of a cross-sectional study of healthy children's feet. *Gait Posture* 2012; 36(2): 287-90.
14. Štajer T, Burger H, Vidmar G. Influence of casting method on effectiveness of foot orthoses using plantar pressure distribution: a preliminary study. *Prosthet Orthot Int* 2011; 35(4): 411-7.
15. Van Lunen B, Cortes N, Andrus T, Walker M, Pasquale M, Onate J. Immediate effects of a heel-pain orthosis and an augmented low-dye taping on plantar pressures and pain in subjects with plantar fasciitis. *Clin J Sport Med* 2011; 21(6): 474-9.
16. Stolwijk NM, Louwerens JW, Nienhuis B, Duysens J, Keijsers NL. Plantar pressure with and without custom insoles in patients with common foot complaints. *Foot Ankle Int* 2011; 32(1): 57-65.
17. Spooner SK, Smith DK, Kirby KA. In-shoe pressure measurement and foot orthosis research: a giant leap forward or a step too far? *J Am Podiatr Med Assoc* 2010; 100(6): 518-29.
18. Deleu PA, Leemrijse T, Vandeleene B, Maldague P, Devos Bevernage B. Plantar pressure relief using a forefoot offloading shoe. *Foot Ankle Surg* 2010; 16(4): 178-82.
19. Chung MJ, Wang MJ. Gender and walking speed effects on plantar pressure distribution for adults aged 20-60 years. *Ergonomics* 2012; 55(2): 194-200.
20. Periyasamy R, Mishra A, Anand S, Ammini AC. Preliminary investigation of foot pressure distribution variation in men and women adults while standing. *Foot (Edinb)* 2011; 21(3): 142-8.
21. Chia KK, Suresh S, Kuah A, Ong JL, Phua JM, Seah AL. Comparative trial of the foot pressure patterns between corrective orthotics, formthotics, bone spur pads and flat insoles in patients with chronic plantar fasciitis. *Ann Acad Med Singapore* 2009; 38(10): 869-75.
22. Dixon SJ. Use of pressure insoles to compare in-shoe loading for modern running shoes. *Ergonomics* 2008; 51(10): 1503-14.
23. Owings TM, Woerner JL, Frampton JD, Cavanagh PR, Botek G. Custom therapeutic insoles based on both foot shape and plantar pressure measurement provide enhanced pressure relief. *Diabetes Care* 2008; 31(5): 839-44.
24. Fiedler KE, Stuijffzand WJ, Harlaar J, Dekker J, Beckerman H. The effect of shoe lacing on plantar pressure distribution and in-shoe displacement of the foot in healthy participants. *Gait Posture* 2011; 33(3): 396-400.
25. Razak AH, Zayegh A, Begg RK, Wahab Y. Foot plantar measurement system: a review. *Sensors (Basel)* 2012; 12(7): 9884-912.
26. Yuen HK, Garrett D. Comparison of three wheelchair cushions for effectiveness of pressure relief. *Am J Occup Ther* 2001; 55(4): 470-5.
27. Crawford SA, Walsh DM, Porter-Armstrong AP. Hammocking: the effect of cushion covers on interface pressure measurements. *Disabil Rehabil Assist Technol* 2006; 1(1-2): 141-4.
28. Stinson M, Porter A, Eakin P. Measuring interface pressure: a laboratory-based investigation into the effects of repositioning and sitting. *Am J Occup Ther* 2002; 56(2): 185-90.
29. Lacoste M, Therrien M, Côté JN, Shrier I, Labelle H, Prince F. Assessment of seated postural control in children: comparison of a force platform versus a pressure mapping system. *Arch Phys Med Rehabil* 2006; 87(12): 1623-9.
30. Ferguson-Pell M, Cardi MD. Prototype development and comparative evaluation of wheelchair pressure mapping system. *Assist Technol* 1993; 5(2): 78-91.
31. Bar C. Pressure: why measure it and how. A presentation at the 14th International Seating Symposium. Vancouver, 1998.
32. Mak AFT, Zhang M, Boone DA. State-of-the-art research in lower-limb prosthetic biomechanics-socket interface: a review. *J Rehabil Res Dev* 2001; 38(2): 161-74.
33. Silver-Thorn MB, Steege JW, Childress DS. A review of prosthetic interface stress investigations. *J Rehabil Res Dev* 1996; 33(3): 253-66.
34. Polliack AA, Craig DD, Sieh RC, Landsberger S, McNeil DR. Laboratory and clinical tests of a prototype pressure sensor for clinical assessment of prosthetic socket fit. *Prosthet Orthot Int* 2002; 26(1): 23-34.
35. Dumbleton T, Buis AW, McFadyen A, McHugh BF, McKay G, Murray KD, et al. Dynamic interface pres-

- sure distributions of two transtibial prosthetic socket concepts. *J Rehabil Res Dev* 2009; 46(3): 405-16.
36. Buis AW, Convery P. Calibration problems encountered while monitoring stump/socket interface pressures with force sensing resistors: techniques adopted to minimise inaccuracies. *Prosthet Orthot Int* 1997; 21(3): 179-82.
37. Polliack AA, Sieh RC, Craig DD, Landsberger S, McNeil DR, Ayyappa E. Scientific validation of two commercial pressure sensor systems for prosthetic socket fit. *Prosthet Orthot Int* 2000; 24(1): 63-73.
38. Sanders JE. Interface mechanics in external prosthetics: review of interface stress measurement techniques. *Med Biol Eng Comput* 1995; 33(4): 509-16.
39. Wheeler JW, Dabling JG, Chinn D, Turner T, Filatov A, Anderson L, et al. MEMS-based bubble pressure sensor for prosthetic socket interface pressure measurement. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc* 2011; 2011: 2925-8. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090805.