

## EFFECTS OF HIGH HEELS ON CENTRE OF PRESSURE PROGRESSION DURING WALKING IN YOUNG WOMEN

### INFLUENȚA PANTOFILOR CU TOC ÎNALT ASUPRA PROGRESIEI CENTRULUI DE PRESIUNE ÎN TIMPUL MERSULUI LA FEMEILE TINERE

Meiling RAN, Furong HAO, Luming YANG\*, Shuwen WU

Key Laboratory of Leather Chemistry and Engineering (Sichuan University), Ministry of Education, Chengdu 610065; National Engineering Laboratory for Clean Technology of Leather Manufacture, Chengdu 610065; e-mail: yangluminglulu@qq.com

#### EFFECTS OF HIGH HEELS ON CENTRE OF PRESSURE PROGRESSION DURING WALKING IN YOUNG WOMEN

**ABSTRACT.** The purpose of this study was to discuss the differences in centre of pressure (COP) spatio-temporal progression during walking between barefoot condition and wearing high heels condition. The data were collected from 35 young women by a combined Footscan® system. The mean COP path, the displacement and phase of COP, the relationship of the peak medial-lateral displacement with time and the plantar pressure of five plantar regions were calculated in both barefoot and wearing high heels condition. The mean COP path from 160 mm to the end in the y-axis direction turned to the lateral again when walking in high heels, but the mean COP path kept shifting to the medial of the foot with an increasing speed when walking barefoot. Compared to walking barefoot, the percentage time of the initial contact phase and the foot flat phase significantly increased in wearing high heels condition. The maximum medial-lateral displacement of the COP and the maximum medial-lateral displacement of the forefoot COP were significantly greater in barefoot condition than wearing high heels, but the maximum anterior-posterior displacement of the COP showed a contrary consequence ( $p = 0.000; 0.000; 0.000$ , respectively). An eccentric second lateral shift occurred in forefoot push-off phase indicated a lateral deformation of hallux during walking in high heels. An increased plantar pressure under heel region suggested that the impact from ground reaction force was associated with heel types.

**KEY WORDS:** centre of pressure, high heels, walking, plantar pressure, phase

#### INFLUENȚA PANTOFILOR CU TOC ÎNALT ASUPRA PROGRESIEI CENTRULUI DE PRESIUNE ÎN TIMPUL MERSULUI LA FEMEILE TINERE

**REZUMAT.** Scopul acestui studiu a fost de a discuta diferențele de progresie spațio-temporală a centrului de presiune (COP) în timpul mersului desculț și cu tocuri înalte. S-au colectat date de la 35 de femei tinere utilizând un sistem combinat Footscan®. S-au calculat traectoria medie a COP, deplasarea și fază COP, relația dintre deplasarea medio-laterală maximă și timp și presiunea plantară în cinci regiuni, atât în cazul mersului desculț, cât și în cazul purtării unor pantofi cu toc înalt. Traectoria medie a COP de la 160 mm până la capăt în direcția y a axei s-a deplasat lateral din nou în cazul mersului cu tocuri înalte, însă traectoria medie a COP s-a tot deplasat spre centrul piciorului, cu o viteză crescândă în cazul mersului desculț. Comparativ cu mersul desculț, procentul temporal al fazelor de contact inițial și al fazelor de contact total a crescut semnificativ la purtarea pantofilor. Deplasarea medio-laterală maximă a COP și deplasarea medio-laterală maximă a COP al antepiciorului au fost semnificativ mai mari în cazul mersului desculț decât al celui cu tocuri înalte, însă deplasarea antero-posterioră maximă a COP s-a manifestat în sens opus ( $p = 0,000; 0,000$ ; respectiv  $0,000$ ). O a doua deplasare laterală excentrică a avut loc în fază de impulsie a antepiciorului și a indicat o deformare laterală a halucelui în timpul mersului cu tocuri înalte. Presiunea plantară ridicată în regiunea călcâiului a sugerat că impactul forței de reacție a solului este asociat cu tipul de toc.

**CUVINTE CHEIE:** centru de presiune, tocuri, mers, presiune plantară, fază

#### LES EFFETS DE TALONS HAUTS SUR LA PROGRESSION DU CENTRE DE PRESSION LORS DE LA DÉMARCHE CHEZ LES JEUNES FEMMES

**RÉSUMÉ.** Le but de cette étude a été d'examiner les différences dans la progression spatio-temporelle du centre de pression (CdP) lors de la démarche pieds nus et en talons hauts. Les données ont été recueillies à partir de 35 jeunes femmes par un système Footscan® combiné. On a calculé la trajectoire moyenne du CdP, le déplacement et la phase du CdP, la relation entre le déplacement médio-latéral maximal avec le temps et la pression plantaire de cinq régions plantaires pour la situation de la démarche pieds nus et en talons hauts. La trajectoire moyenne du CdP à partir de 160 mm jusqu'à la fin dans la direction y de l'axe a été déplacée latéralement de nouveau lors de la démarche en talons hauts, mais la trajectoire moyenne du CdP a été déplacée vers le centre du pied avec une vitesse croissante en marchant pieds nus. Comparé à la démarche pieds nus, le pourcentage de temps de la phase de contact initial et de la phase de contact total a augmenté significativement dans la démarche en talons hauts. Le déplacement médio-latéral maximal du CdP et le déplacement médio-latéral maximal du CdP de l'avant-pied ont été significativement plus élevés dans la démarche pieds nus qu'en portant des talons hauts, mais le déplacement antéro-postérieur maximal du CdP s'est manifesté au contraire ( $p = 0,000; 0,000$ ; respectivement  $0,000$ ). Un second déplacement latéral excentrique a eu lieu dans la phase de propulsion de l'avant-pied et a indiqué une déformation latérale de l'hallux lors de la démarche en talons hauts. La pression plantaire élevée dans la région du talon a suggéré que l'impact de la force de réaction du sol a été associé au type de talon.

**MOTS CLÉS:** centre de pression, talons hauts, démarche, pression plantaire, phase

\* Correspondence to: Luming YANG, National Engineering Laboratory for Clean Technology of Leather Manufacture, Chengdu 610065; e-mail: yangluminglulu@qq.com

## INTRODUCTION

High heels fashion emerged during the reign of Louis XIV of France. At that time, high heels were popular among men and women alike. Nowadays, high heels are associated with women exclusively. Helen Branthwaite et al. [1] investigated the choices about footwear made by only use high heels to enhance their sexuality and self-image. Women in high heels take more frequent and smaller steps, have less knee bend and greater hip rotation, which makes them look more attractive [2]. However, there is a great deal of research showing that high heels are responsible for hallux valgus deformity, plantar calluses, decreasing venous function in the lower limbs, et al. [3-5]. The rearfoot angle is significantly varus after wearing high-heeled shoes, and wearing high heels for a long time may trigger changes in the plantar arch [6].

Recent studies have shown that the plantar pressure shifted from the midfoot and heel to the medial forefoot as the heel height increased [7-13]. The reduced walking speed and the transfer of the body weight were associated with reduced base of support while women wore high heels [13]. In addition to plantar pressure, wearing high heels also has effects on lower limbs. Previous studies have revealed that force across the patellofemoral joint and compressive force on the medial compartment of the knee increased when walking in high heels [14]. Wearing high heels changes the orientation of the legs with changing the ankle and knee [15].

Although many research studies proved that high heels have effects on foot and lower limb, few studies have compared the differences in the center of pressure (COP) progression between walking barefoot and walking in high heels. Most studies have focused on the kinetics and kinematics of the lower limbs and the greater pressure in medial forefoot with increasing heel height. Footwear has a great influence on natural foot condition [16]. There is more eversion of forefoot in barefoot locomotion, and more inversion while shod [17]. It is important to discuss the differences women, and suggested that women

## INTRODUCERE

Tocurile înalte au apărut în timpul domniei lui Ludovic al XIV-lea al Franței. La acea vreme, tocurile înalte erau populare deopotrivă în rândul bărbaților și al femeilor. În prezent, tocurile înalte sunt în mod exclusiv asociate cu femeile. Helen Branthwaite și colab. [1] au investigat alegerile femeilor referitoare la încălțăminte și au sugerat că femeile folosesc tocurile înalte în principal pentru a-și amplifica sexualitatea și imaginea de sine. Femeile care poartă tocuri înalte fac pași mai mici și mai deschi, genunchiul se îndoiește mai puțin și rotația șoldului este mai mare, ceea ce face ca femeile să arate mai atractiv [2]. Cu toate acestea, există multe studii care arată că tocurile înalte sunt responsabile pentru deformările de tip *hallux valgus*, bătăturile plantare, scăderea funcției venoase la nivelul membrelor inferioare și altele [3-5]. După purtarea pantofilor cu toc înalt, unghiul retropiciorului este vizibil în poziție *varus*, purtarea îndelungată a pantofilor cu toc înalt putând declanșa modificări ale bolții plantare [6].

Studii recente au arătat că presiunea plantară se deplasează de la zona mediană și călcâi la antepicior pe măsură ce crește înălțimea tocoului [7-13]. Viteza de mers redusă și transferul greutății corporale au fost asociate cu baza de sprijin redusă la femeile care poartă pantofi cu toc înalt [13]. Pe lângă presiunea plantară, purtarea pantofilor cu toc înalt influențează și membrele inferioare. Studiile anterioare au relevat faptul că forța din zona încheieturii patelofemurale și forța de compresie asupra compartimentului central al genunchiului au crescut în timpul mersului cu pantofi cu toc înalt [14]. Purtarea pantofilor cu toc schimbă orientarea picioarelor, modificând poziția gleznei și a genunchiului [15].

Cu toate că multe studii de cercetare au demonstrat că tocurile înalte influențează laba piciorului și membrele inferioare, puține studii au comparat diferențele privind progresia centrului de presiune (COP) în timpul mersului desculț și cu tocuri înalte. Cele mai multe studii s-au concentrat asupra cineticii și cinematicii membrelor inferioare și presiunii mai mari din zona centrală a antepiciorului odată cu creșterea înălțimii tocoului. Încălțăminta influențează semnificativ starea naturală a piciorului [16]. Antepiciorul prezintă o eversie mai mare în timpul mersului desculț și o inversie mai mare în timpul mersului cu pantofi [17]. Este important să se discute

mabetween barefoot and shod during walking deeply, especially when considering that the most natural state of foot is barefoot.

The spatial and temporal parameters of COP describe the sequenced contact coordinates and times of plantar pressure regions in the foot roll-over during walking, and they are recognized in their reliability to assess the motor pathologies [18]. The purpose of this study was to compare the differences in gait during walking between barefoot condition and wearing high heels condition in depth, by means of investigating the effects of high heels on COP spatio-temporal progression and plantar pressure, which may have an important reference value for more comfortable high heels design.

## METHODS

### Subjects

A subject was considered valid when the following inclusion criteria were met: (i) had a prior experience wearing high heels, (ii) had a normal arch based on assessment of plantar pressure footprint, (iii) had a standard foot type which is neither fat nor thin based on estimate of a 3-D scanning foot type, (iv) wearing shoe size Euro 37, and (v) had no history of lower extremity injury or foot pain in the past 3 years. Thirty-five women whose ages were between 21-35 were recruited in this study. The average age of these subjects was  $25 \pm 3$  years, the average height was  $161.8 \pm 3.4$  cm, and average weight was  $52.3 \pm 3.9$  kg. All subjects had read and signed an informed consent prior to testing.

### Data Collection

A 1 m Footscan® plantar pressure plate (Rsscan international, Belgium, 1068×418×12 mm, 250 Hz) was placed on top of a 1 m Footscan® force platform (Rsscan international, Belgium, 1068×418×180 mm, 250 Hz), flush and in the middle of an 8 m long walkway, used to record the data of COP spatio-temporal progression in overall foot and plantar

diferențele între mersul cu picioarele goale și cel cu pantofi, având în vedere că piciorul se află în stare naturală atunci când este desculț.

Parametrii spațiali și temporali ai COP descriu secvența de coordonate și timpi de contact în regiunile cu presiune plantară la nivelul piciorului în timpul mersului, recunoscându-se fiabilitatea acestora la evaluarea patologiilor motorii [18]. Scopul acestui studiu a fost acela de a compara diferențele apărute în timpul mersului desculț față de mersul cu tocuri înalte, prin intermediul investigării efectelor pantofilor cu toc înalt asupra progresiei spațio-temporale a COP și presiunii plantare, putând constitui o referință semnificativă pentru proiectarea unor pantofi cu toc înalt mai confortabili.

## METODE

### Subiecți

Un subiect a fost considerat valabil atunci când au fost îndeplinite următoarele criterii de includere: (i) experiență prealabilă în purtarea pantofilor cu toc, (ii) bolta piciorului normală, pe baza evaluării amprentei plantare, (iii) tip de picior normal, nici prea gros, nici prea subțire, pe baza estimărilor unui picior scanat 3D, (iv) măsura pantofului 37 în sistem european și (v) lipsa antecedentelor de leziuni la extremitățile inferioare sau a durerilor de picioare în ultimii 3 ani. În acest studiu au fost recrutate treizeci și cinci de femei ale căror vârste au fost cuprinse între 21 și 35 de ani. Vârsta medie a acestor subiecți a fost de  $25 \pm 3$  ani, înălțimea medie a fost de  $161,8 \pm 3,4$  cm, iar greutatea medie a fost de  $52,3 \pm 3,9$  kg. Toți subiecții au citit și au semnat un acord de consimțământ înainte de testare.

### Colectarea datelor

O platformă Footscan® (Rsscan International, Belgia, 1068×418×12 mm, 250 Hz) de 1 m pentru măsurarea presiunii plantare a fost plasată deasupra unei platforme de forță Footscan® (Rsscan International, Belgia, 1068×418×180 mm, 250 Hz) de 1 m, în mijlocul unei pasarele de 8 m lungime, și a fost utilizată pentru a înregistra datele privind progresia spațio-temporală a COP pentru piciorul întreg și presiunea plantară în fiecare

pressure in each region. This set-up was used to achieve a real-time calibration to the pressure plate (sum of force of the plate = the vertical component of ground reaction force of platform) (Figure 1).



Figure 1. 1m Footscan® plantar pressure plate

Figura 1. Platforma Footscan® de 1 m pentru măsurarea presiunii plantare

Subjects had a familiarization time prior to test. Subjects were asked to walk along the 8 m walkway at a self-selected speed and cadence for both conditions. Subjects were asked to complete five acceptable trails in each of the two conditions: barefoot and wearing high heels. An acceptable trail was defined as a trail in which the subject walked through the walkway naturally and bilateral plantar pressure data was collected.

According to the Scientific Footscan software (Rsscan international, Belgium), the plantar pressure footprint was divided into five anatomic regions: toe (T), medial metatarsal (MM), lateral metatarsal (LM), midfoot (MF) and heel (H) for each trail. The COP spatio-temporal progression includes the spatial and temporal parameters of COP, i.e. the displacement and phase of COP. In the coordinates of COP, the y-axis was defined as the line from the middle heel to the toe, over the second metatarsal. The x-axis was perpendicular to the y-axis. The forward direction from heel was defined as the positive direction of y-axis, and the lateral of foot was defined as the positive direction of x-axis. The temporal parameters related to foot contact were initial foot contact (IFC), initial metatarsal contact (IMC), initial forefoot flat contact (IFFC), heel off (HO) and last foot contact (LFC), which divided stance phase into four time phases: the initial contact phase (ICP), the forefoot contact phase

regiune. Acest sistem a fost folosit pentru a realiza o calibrare în timp real a platformei de presiune (suma forțelor platformei = componenta verticală a forței de reacție a solului a platformei) (Figura 1).

Subiecților li s-a acordat un timp de familiarizare înainte de testare. Aceștia au fost rugați să meargă de-a lungul pasarelei de 8 m, cu o viteză și cadență la alegere în ambele situații. Subiecții au fost rugați să finalizeze cinci trasee acceptabile în fiecare dintre cele două situații: desculț și purtând tocuri înalte. Un traseu acceptabil a fost definit ca un traseu în care subiectul a pășit în mod firesc pe pasarelă și s-au putut colecta datele presiunii plantare bilaterale.

Conform programului Footscan (Rsscan International, Belgia), amprenta plantară a fost împărțită în cinci regiuni anatomici: degete (T), metatarsian median (MM), metatarsian lateral (LM), zona centrală (MF) și călcâi (H) pentru fiecare traseu. Progresia spațio-temporală a COP include parametrii spațiali și temporali ai COP, adică deplasarea și faza COP. În coordonatele COP, axa y a fost definită ca linia de la mijlocul călcâiului până la degete, peste al doilea metatarsian. Axa x a fost perpendiculară pe axa y. Direcția pornind de la călcâi spre degete a fost definită ca direcție pozitivă a axei y, iar laterală piciorului a fost definită ca direcție pozitivă a axei x. Parametrii de timp referitori la contactul piciorului au fost: contactul inițial al piciorului (IFC), contactul inițial al metatarsienelor (IMC), contactul inițial total al antepiciorului (IFFC), desprinderea călcâiului (HO) și contactul final al piciorului (LFC), împărțind fază de sprijin în patru etape de timp: fază de contact inițial (ICP), fază de contact a antepiciorului

(FFCP), the foot flat phase (FFP) and the forefoot push off phase (FFPOP).

### Testing Shoes

The shoe was provided by Sheme® brand. The shoe is a business shoe with pointed toe and 6 cm height heel, which is constructed with black suede upper and a leather outsole. The shoe EU size is 37 (Figure 2).



Figure 2. Testing shoes  
Figura 2. Încălțăminte de testat

### Data Analysis

According to the research of Menz et al. [19], only data from the right foot was analyzed in this study. The original absolute coordinates were calculated to the relative x-and y-coordinates by the software of Matlab version 7.9 (Mathworks Inc.) (cubic spline interpolation). The average of the relative x- and y-coordinates of COP during walking was plotted as the COP path. The maximum medial-lateral displacement of the COP (MLD) and the maximum anterior-posterior displacement of the COP (APD) under two different conditions were calculated respectively, and the maximum medial-lateral displacement of the forefoot COP (FMLD) was also derived to compare the difference of the COP of the push off phase. Four time phases of the overall foot progression were represented with a percentage time respectively. The maximum plantar pressures under each region were compared in order to understand the differences of the COP trajectory between barefoot and wearing high heels during walking. The paired t test was applied to determine whether any significant differences existed in the COP spatio-temporal parameters and the plantar pressure between the two groups. Meanwhile, the

(FFCP), faza de contact total (FFP) și faza de propulsie a antepiciorului (FFPOP).

### Încălțăminte de testat

Încălțăminte de testat a fost furnizată de marca Sheme®. Pantofii sunt în stil business, cu vârful ascuțit și înălțimea tocului de 6 cm, cu față din piele velur neagră și talpa exterioară din piele. Pantoful are măsura 37 în sistem european (Figura 2).

### Analiza datelor

Conform cercetărilor lui Menz și colab. [19], doar datele de la piciorul drept au fost analizate în acest studiu. Coordonatele absolute originale au fost calculate la coordonatele relative x și y cu ajutorul programului Matlab versiunea 7.9 (Mathworks Inc.) (interpolare prin funcții spline cubice). Media coordonatelor relative x și y ale COP în timpul mersului a fost reprezentată grafic ca traectoria COP. S-au calculat deplasarea medio-laterală maximă a COP (MLD) și deplasarea antero-posteroară maximă a COP (APD) în două situații diferite; de asemenea, deplasarea medio-laterală maximă a COP la antepicior (FMLD) a fost derivată pentru a compara diferențele privind COP în faza de propulsie. Patru faze temporale ale progresiei piciorului în ansamblu au fost reprezentate în procente. Presiunile plantare maxime din fiecare regiune au fost comparate pentru a ajuta la înțelegerea diferențelor dintre traectoria COP la mersul desculț și cea la mersul cu tocuri înalte. Testul t pentru eșantioane dependente a fost aplicat pentru a determina dacă există diferențe semnificative între parametrii spațio-temporali ai COP și presiunea plantară la cele două grupe. În același timp, s-a calculat

relationship of peak displacement in the x direction of COP and its corresponding time percentage were calculated. Statistical analysis was completed using the SPSS version 17.0 analysis software.

## RESULTS

The mean COP path of barefoot and wearing high heels during walking are shown in Figure 3 respectively.

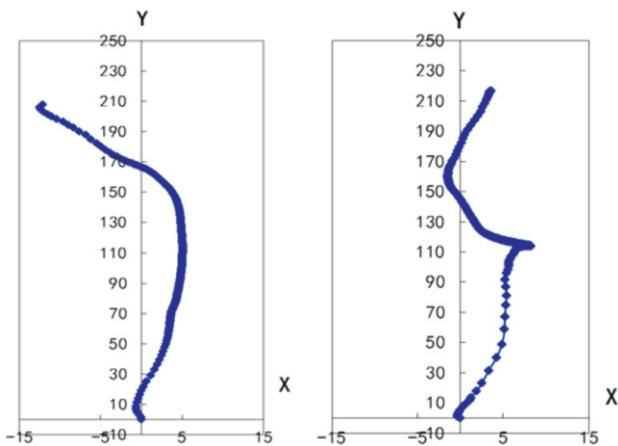


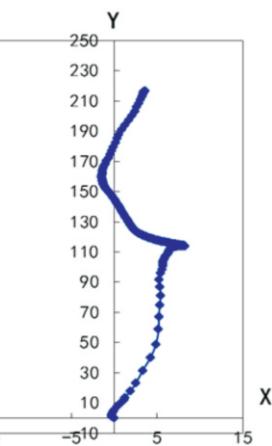
Figure 3. The mean COP path (left: walking barefoot; right: walking in high heels)  
Figura 3. Traекторia medie a COP (stânga: mers desculț; dreapta: mers cu pantofi cu toc înalt)

The mean COP path of both barefoot and wearing high heels showed a medial shift within the first 9 mm for barefoot and 4 mm for wearing high heels progressing in the anterior-posterior direction, followed by a lateral shift until 115 mm of the y-axis. After that, the COP path shifted medially again to 160 mm in both conditions. At the last section of the mean COP path that is from 160 mm to the end in the y-axis direction, the mean COP path turned to the lateral again when walking in high heels, but the mean COP path kept shifting to the medial of the foot with an increasing speed when walking barefoot.

relația dintre deplasarea maximă în direcția x a COP și procentajul temporal corespunzător. Analiza statistică a fost finalizată cu ajutorul programului SPSS versiunea 17.0.

## REZULTATE

Traectoriile medii ale COP pentru mersul desculț și cu tocuri înalte sunt prezentate în Figura 3.



Traекторia medie a COP pentru ambele situații a indicat o deplasare mediană în primii 9 mm pentru mersul desculț și în primii 4 mm pentru mersul cu tocuri înalte, progresând în direcția antero-posteroară, urmată de o deplasare laterală până la marcajul de 115 mm al axei y. După aceea, traectoria COP s-a deplasat median din nou la 160 mm în ambele situații. În ultima porțiune a traectoriei medii a COP, adică de la 160 mm până la sfârșit în direcția axei y, traectoria medie a COP s-a deplasat lateral din nou la mersul cu tocuri înalte, însă în situația mersului desculț, traectoria medie a COP a continuat să se depleteze spre centrul piciorului cu o viteză crescândă.

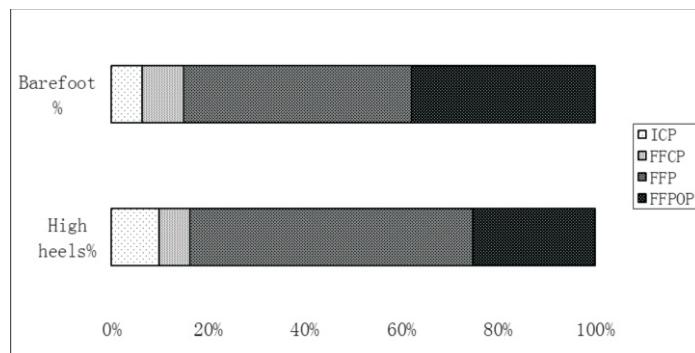


Figure 4. The comparison of four phases for two different conditions

Figura 4. Comparația a patru faze în două situații diferite

Figure 4 illustrates the comparison of four phases for two different conditions. Compared to barefoot, the percentage time of the initial contact phase (ICP) and the foot flat phase (FFP) significantly increased in wearing condition ( $p=0.000, 0.000$ ). On the contrary, the forefoot contact phase (FFCP) and the forefoot push off phase (FFPOP) demonstrated a decrease in wearing condition, but no significant difference in the forefoot contact phase.

Figura 4 prezintă o comparație a patru faze în două situații diferite. Comparativ cu mersul desculț, procentul temporal al fazei de contact inițial (ICP) și al fazei de contact total (FFP) a crescut semnificativ la mersul cu pantofi ( $p = 0,000, 0,000$ ). În contrast, faza de contact a antepiciorului (FFCP) și cea de propulsie a antepiciorului (FFPOP) au prezentat o scădere la mersul cu pantofi, dar nu s-a constatat nicio diferență semnificativă în faza de contact a antepiciorului.

Table 1: The displacement of COP path for two different conditions

Tabelul 1: Deplasarea traectoriei COP în două situații diferite

	High heels Toc înalt	Barefoot Desculț
MLD	14.1±3.8	19.7±5.4*
APD	216.6±4.0	210.0±8.9*
FMLD	8.5±2.7	18.8±5.7*

\*: $p<0.05$

Table 1 shows the maximum medial-lateral displacement of the COP (MLD), the maximum anterior-posterior displacement of the COP (APD) and the maximum medial-lateral displacement of the forefoot COP (FMLD) of the COP. The maximum medial-lateral displacement of the COP and the maximum medial-lateral displacement of the forefoot COP were significantly greater in barefoot condition than wearing high heels, but the maximum anterior-posterior displacement of the COP showed a contrary consequence ( $p=0.000; 0.000; 0.000$  respectively). It is worth noting that the maximum medial-lateral displacement of the forefoot COP value was much

Tabelul 1 prezintă deplasarea medio-laterală maximă a COP (MLD), deplasarea antero-posteroară maximă a COP (APD) și deplasarea medio-laterală maximă a COP al antepiciorului (FMLD) față de COP. Deplasarea medio-laterală maximă a COP și deplasarea medio-laterală maximă a COP al antepiciorului au fost semnificativ mai mari în cazul mersului desculț decât al celui cu tocuri înalte, însă deplasarea antero-posteroară maximă a COP s-a manifestat în sens opus ( $p = 0,000; 0,000$ ; respectiv 0,000). Este de remarcat faptul că deplasarea medio-laterală maximă a valorii COP a antepiciorului a fost mult mai apropiată de

close to the maximum medial-lateral displacement of the COP value when walking barefoot, but there was no such phenomenon in wearing condition.

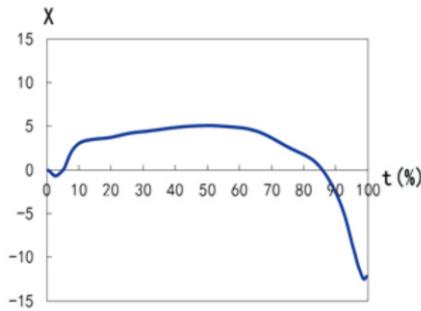
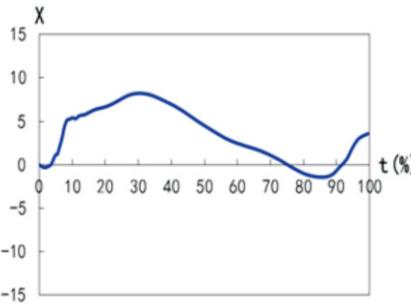


Figure 5. The relationship of the peak medial-lateral displacement with time  
(left: walking barefoot; right: walking in high heels)

Figura 5. Legătura dintre deplasarea medio-laterală maximă și timp  
(stânga: mers desculț; dreapta: mers cu pantofi cu toc înalt)

The relationship of the peak medial-lateral displacement with time was displayed in Figure 5. The first peak medial shift, first peak lateral shift, and the second peak medial shift occurred at 3%, 51.5%, 100% and 2.5%, 31%, 85.5% of totally walking time in barefoot condition and wearing high heels condition respectively. Finally, a second lateral shift was discovered at 85.5% of total time during walking in high heels.

deplasarea medio-laterală maximă a valorii COP la mersul desculț, dar nu a existat niciun astfel de fenomen în cazul mersului cu pantofi.



Relația dintre deplasarea medio-laterală maximă și timp a fost prezentată în Figura 5. Prima deplasare medială maximă, prima deplasare laterală maximă, și a doua deplasare mediană maximă au avut loc la 3%, 51,5%, 100% și respectiv 2,5%, 31%, 85,5% din timpul total de mers desculț și cu tocuri înalte. În cele din urmă, a doua deplasare laterală a fost descoperită la 85,5% din timpul total de mers cu tocuri înalte.

Table 2: The comparison of maximum plantar pressures for two different conditions  
Tabelul 2: Comparația presiunilor plantare maxime în două situații diferite

MaxP Presiune max.	High heel Toc înalt	Barefoot Desculț
Toe Degete	7.3±2.5	4.6±2.1*
Medial meta Metatarsian median	13.0±4.5	9.7±2.9*
Lateral meta Metatarsian lateral	10.1±4.0	11.5±4.0
Midfoot Centrul piciorului	0	3.1±1.3*
Heel Călcâi	19.7±4.7	8.1±2.9*

\*:  $p < 0.05$

Table 2 listed the maximum plantar pressures value and standard deviations for the different

În Tabelul 2 sunt enumerate valorile maxime ale presiunilor plantare și abaterile standard pentru diferitele

regions of the foot in both conditions. The increase in plantar pressure in the wearing condition was significant for the toe, the medial metatarsal and the heel regions ( $p<0.05$ ). Plantar pressures were lower for wearing condition under the lateral metatarsal and the midfoot regions. There was a significant difference in all these regions except under the lateral metatarsal ( $p<0.05$ ).

## DISCUSSIONS

In this study, the mean COP path for all subjects displayed a medial-lateral-medial shift when walking barefoot, which is similar to previous studies [20-22]. However, the mean COP path showed a medial-lateral-medial-lateral shift in wearing high heels condition, which is different from the path in barefoot condition. The first medial shift of the COP path in both conditions may reveal the fast initial foot pronation for loading shock absorption [20]. In the present study, the first medial shift was significantly less in high heels condition than in barefoot condition, which may be caused by the much narrower and harder contact area under the heel. In addition, it indicated that walking in high heels displayed a worse cushion for its shorter duration of this medial shift (2.5%, Figure 5). Following the fast initial foot pronation, the longitudinal arch delivered the body load forward. The COP path revealed a lateral shift to adapt to a changing foot structure that was associated with a rapid ankle plantar flexion during the initial contact phase and the forefoot contact phase [20, 21].

During the foot flat phase, there was a reversed shift of COP path in both conditions which shift toward lateral sequentially firstly, then turn to medial of foot again. In this phase, the load transferred along the anterior-posterior direction continuously and diverted from lateral to medial simultaneously. The forward shift occurred with the ankle joint dorsiflexion and heel rise, and foot changed to a rigid structure [21]. This reversal was earlier than in previous studies in which the second medial shift

regiuni ale piciorului în ambele situații. Creșterea presiunii plantare în timpul mersului cu pantofi a fost semnificativă pentru regiunile degetelor, metatarsianului median și călcâiului ( $p<0,05$ ). Presiunile plantare au fost mai mici în cazul mersului cu pantofi în regiunea metatarsianului lateral și în zona centrală a piciorului. A existat o diferență semnificativă în toate aceste regiuni, cu excepția metatarsianului lateral ( $p<0,05$ ).

## DISCUȚII

În acest studiu, traiectoria medie a COP pentru toți subiecții a prezentat o deplasare mediană-laterală-mediană în cazul mersului desculț, similar studiilor anterioare [20-22]. Cu toate acestea, traiectoria medie a COP a prezentat o deplasare mediană-laterală-mediană-laterală în cazul mersului cu tocuri înalte, diferită de traiectoria pentru mersul desculț. Prima deplasare mediană a traiectoriei COP în ambele situații ar putea dezvălui pronația inițială rapidă a piciorului pentru absorbția șocului [20]. În acest studiu, prima deplasare mediană a fost semnificativ mai mică în cazul mersului cu tocuri înalte decât în cazul mersului desculț, posibil cauzată de zona de contact mult mai îngustă și mai greu de atins de sub călcâi. În plus, studiul indică faptul că mersul cu tocuri înalte implică o amortizare mai slabă pentru durata scurtă a acestei deplasări mediane (2,5%, Figura 5). După pronația inițială rapidă a piciorului, bolta longitudinală deplasează greutatea corpului înainte. Traекторia COP a relevat o deplasare laterală pentru a se adapta la o structură de schimbare a piciorului care a fost asociată cu o flexie plantară rapidă a gleznei în timpul fazei inițiale de contact și al fazei de contact al antepiciorului [20, 21].

În timpul fazei de contact total, a avut loc o deplasare inversată a traiectoriei COP în ambele situații, mai întâi lateral secvențial, apoi revenind spre centrul piciorului. În această fază, sarcina este transferată în direcția antero-posteroară în mod continuu și se deplasează de la lateral la median simultan. Deplasarea înainte a avut loc cu flexiunea dorsală a încheieturii gleznei și ridicarea călcâiului, iar piciorul a căpătat o structură rigidă [21]. Această inversare a avut loc mai devreme comparativ cu studiile anterioare, în care a

occurred during the forefoot push off phase [20]. The above difference may be due to the differences in speed and gender.

A flexible foot was required to accommodate the variations in the external condition. A semirigid foot can act as a spring and lever arm for foot push off during walking [23]. With the heel lifting, the forefoot pushed off. During forefoot push off phase, the COP path revealed an obvious medial shift through the metatarsals and hallux when walking barefoot. Although the COP path of walking in high heels also displayed an observable medial shift during forefoot push off phase, it is worth noting that a lateral shift was revealed after the medial shift and ended at the tip of high heeled shoes. It was determined by the structure of high heels in which the tip of the shoes is the last contact region. In addition, it may be another reason of the lateral shift of the COP path that the toes deformation in high heeled shoes caused the lateral deformation of the hallux. A biomechanical simulation of high heeled shoes based on finite element analysis was established by Jia Yu et al. [24], who pointed out that the maximum valgus angle of the first metatarsophalangeal joint can increase by 51% during walking in high heels.

In this study, the durations of the initial contact phase, the forefoot contact phase, the foot flat phase and the forefoot push off phase were 6.4%, 8.5%, 47.2%, 37.9% and 9.9%, 6.3%, 58.6%, 25.3% of total walking time in barefoot condition and wearing high heels condition, respectively. These differences may be caused by the unique structure of high heels. During walking in high heels, the gait is not a continuous roll over for the middle of the sole not contacting with ground. This discontinuous contact of high heels led an increased time from initial foot contact to initial metatarsal contact. The less duration of the forefoot contact phase indicated that the foot in high heels as a more rigid whole displayed a less plantar flexion movement to prevent the foot from dropping down to the foot flat position [23]. At the foot flat position, the lower limb starts to rotate externally, and the rotation of the ankle mortise is transmitted to the talus [25]. The

două deplasare mediană a avut loc în timpul fazei de propulsie a antepiciorului [20]. Diferența de mai sus se poate datora diferențelor de viteză și sex.

A fost necesar un picior flexibil pentru a se adapta la variațiile condițiilor externe. Un picior semirigid poate acționa ca un mecanism cu arc și pârghie pentru a propulsa piciorul în timpul mersului [23]. Antepiciorul a fost propulsat odată cu ridicarea călcâiului. În timpul fazei de propulsie a antepiciorului, traiectoria COP a relevat o deplasare mediană evidentă în zona metatarsiană și a halucelui, în timpul mersului desculț. Deși traiectoria COP în cazul mersului cu tocuri înalte a prezentat, de asemenea, o deplasare medială vizibilă în timpul fazei de propulsie a antepiciorului, este de remarcat faptul că o deplasare laterală a urmat celei mediane și s-a încheiat la vârful pantofilor cu toc. Aceasta a fost determinată de structura tocurilor, vârful pantofilor fiind ultima zonă de contact. În plus, poate fi un alt motiv al deplasării laterale a traiectoriei COP pentru care deformarea degetelor la purtarea pantofilor cu toc cauzează deformarea laterală a halucelui. O simulare biomecanică a mersului cu pantofi cu toc, bazată pe analiza cu elemente finite a fost efectuată de Jia Yu și colab. [24], care au subliniat faptul că unghiul valgus maxim al primei articulații metatarsofalangiene poate crește cu 51% în timpul mersului cu tocuri înalte.

În acest studiu, duratele fazei inițiale de contact, fazei de contact a antepiciorului, fazei de contact total și fazei de propulsie a antepiciorului au fost de 6,4%, 8,5%, 47,2%, 37,9% și respectiv 9,9%, 6,3%, 58,6%, 25,3% din timpul total de mers desculț, respectiv cu tocuri. Aceste diferențe pot fi cauzate de structura unică a tocurilor înalte. În timpul mersului cu tocuri înalte, mersul nu se desfășoară continuu, întrucât mijlocul tălpii nu intră în contact cu solul. Acest contact discontinuu în mersul cu tocuri înalte a condus la o creștere a timpului de la contactul inițial al piciorului la contactul inițial al zonei metatarsienelor. Durata mai mică a fazei de contact al antepiciorului a indicat că piciorul pe tocuri, fiind mai rigid, a prezentat o mișcare de flexie plantară mai restrânsă pentru a preveni coborârea piciorului în poziția de contact total [23]. În poziția de contact total, membrul inferior începe să se rotească în exterior, iar mișcarea de rotație a scobitului gleznei este transmisă la talus [25]. Instabilitatea tocurilor

instability of high heels led to a longer duration of the foot flat phase for producing increased stability at the tarsal joint and along the longitudinal arch of the foot. After heel off, the ankle moves back into plantar flexion. Just before the last foot contact, the foot is in a maximally stable position for pushing off, then the leg rotates medially and the foot returns to flexible for the following swing phase [26]. The elevated heel was designed in high heels which bent the ankle into a certain angle in which the foot was placed in a more plantar-flexed position as heel height increased [27]. The reduced ankle dorsiflexion may be due to the less duration of the forefoot push off phase during walking in high heels. The maximum dorsiflexion of ankle became less dorsiflexed as heel height increased, and the ankle never attained a dorsiflexed position at 7.62 cm heel height [28].

A survey was investigated by Hylton B. Menz et al. [5] indicated that most women wore outdoor shoes narrower than their feet. The narrower shoe may be one reason of the less medial-lateral displacement of the COP path in wearing high heels condition. Besides that, the second lateral shift occurred in the forefoot push off phase also contributed to the decrease of the maximum medial-lateral displacement of the COP and the maximum medial-lateral displacement of the forefoot COP during walking in high heels. The greater the maximum anterior-posterior displacement of the COP of the COP path of wearing high heels may be caused by longer sole design of high heels.

The peak point of the medial-lateral displacement of the COP path, which is the turning point of the COPx. The first peak medial displacement both of two conditions occurred in the initial contact phase. The earlier first peak medial displacement moment of high heels condition indicated a shorten time of foot pronation. The first peak lateral displacement occurred in the foot flat phase in both of barefoot and high heels condition. The earlier first peak lateral displacement moment of high heels suggested that the plantar pressure was transmitted from lateral to medial earlier. During walking barefoot, the second peak medial displacement is the

înalte a condus la o durată mai mare a fazei de contact total pentru a produce o stabilitate crescută la nivelul articulației tarsiene și de-a lungul boltii longitudinale a piciorului. După desprinderea călcâiului, glezna revine în flexie plantară. Chiar înainte de ultimul contact al piciorului, acesta se află într-o poziție de maximă stabilitate pentru propulsie, apoi se rotește median și laba piciorului revine în poziție flexibilă pentru următoarea fază de balans [26]. Pantofii cu toc au fost proiectați cu călcâi ridicat, care îndoiaje glezna într-un anumit unghi, flexia plantară a piciorului accentuându-se pe măsură ce crește înălțimea tocului [27]. Flexia dorsală redusă a gleznei se poate datora duratei mai mici a fazei de propulsie a antepiciorului în timpul mersului cu tocuri înalte. Flexia dorsală maximă a gleznei s-a redus pe măsură ce a crescut înălțimea tocului, iar glezna nu a atins o poziție de flexie dorsală la înălțimea tocului de 7,62 cm [28].

Hylton B. Menz și colab. [5] au efectuat un studiu care a arătat că cele mai multe femei poartă pantofi mai înguști decât picioarele lor. Pantoful îngust poate fi un motiv pentru o deplasare medio-laterală mai mică a traectoriei COP la purtarea tocurilor înalte. În plus, cea de a doua deplasare laterală a avut loc în faza de propulsie a antepiciorului, contribuind, de asemenea, la scăderea deplasării medio-laterale maxime a COP și a deplasării medio-laterale maxime a COP al antepiciorului în timpul mersului cu pantofi cu tocuri. Deplasarea antero-posterioră maximă semnificativă a COP a traectoriei COP la purtarea tocurilor înalte poate fi cauzată de proiectarea tălpii mai lungi a pantofilor cu tocuri înalte.

Punctul maxim al deplasării medio-laterale a traectoriei COP este punctul de cotitură al COPx. Prima deplasare mediană maximă în ambele condiții a avut loc în faza de contact inițial. Deplasarea mediană maximă anteroară în cazul mersului cu tocuri înalte a indicat un timp redus al pronăției piciorului. Prima deplasare laterală maximă a avut loc în faza de contact total al piciorului atât la mersul desculț, cât și la mersul cu tocuri înalte. Deplasarea laterală maximă anteroară în cazul mersului cu tocuri înalte a sugerat că presiunea plantară a fost transmisă anterior de la lateral la median. În cazul mersului desculț, a doua deplasare mediană maximă are loc la punctul terminal al

terminal point of the gait. Generally, the foot push-off pattern was found first over 4<sup>th</sup> metatarsal, 3<sup>rd</sup> metatarsal, 1<sup>st</sup> metatarsal and finally over the hallux just similar to this study [20, 29]. However, the second peak medial displacement occurred at 85.5% of total stance phase, and it turned to lateral. This reverse was due to the hallux valgus deformation when walking in high heels.

In high heels, the peak plantar pressure shifted toward the medial forefoot and hallux has been provided by previous studies [9, 11, 28]. High heels increased the load under medial forefoot and hallux, but relieved it under the heel region [10]. In this study, the maximum plantar pressure was increased in toe and medial metatarsal regions in accordance with previous studies during walking in high heels. There was no plantar pressure in midfoot region, because there was no contact with ground under the midfoot region of high heels. Conversely, high heels increased the maximum plantar pressure under heel region in this study, which was caused by a significantly smaller contact area in the high thin heels.

## CONCLUSIONS

Walking in high heels displayed a significantly different COP spatio-temporal progression, which may be one of the chief culprits of the health problems for wearing high heels. In addition, even if the heel height increased, a high thin heel will also cause a significantly greater plantar pressure. It is necessary to gain an insight into high heels gait for improving high heels comfort and providing more advice for better health control. However, a distinction between different heel heights and different heel types should be discussed in future research.

mersului. În general, s-a constatat un tipar de propulsie a piciorului pornind de la al patrulea metatarsian, urmat de al treilea metatarsian, primul metatarsian și în final de haluce, în mod similar altor studii [20, 29]. Cu toate acestea, cea de a doua deplasare mediană maximă a avut loc la 85,5% din faza de echilibru total, devenind laterală. Această inversare s-a datorat deformării de tip *hallux valgus* la mersul cu tocuri înalte.

Deplasarea presiunii plantare maxime spre antepiciorul median și haluce la mersul cu tocuri înalte a fost menționată în studii anterioare [9, 11, 28]. Tocurile înalte au crescut sarcina sub antepiciorul median și haluce, ducând la scăderea acesteia în regiunea călcâiului [10]. În acest studiu, presiunea plantară maximă a crescut în regiunile degetelor și metatarsienelor în timpul mersului cu tocuri, în conformitate cu studiile anterioare. Nu a existat nicio presiune plantară în zona centrală a piciorului, deoarece nu a existat niciun contact cu solul în acea regiune la mersul cu tocuri înalte. Pe de altă parte, în acest studiu, pantofii cu toc au crescut presiunea plantară maximă în regiunea călcâiului, cauzată de o zonă de contact semnificativ mai mică cu tocurile înalte și subțiri.

## CONCLUZII

Mersul cu tocuri a prezentat o progresie spațio-temporală a COP semnificativ diferită, care se poate număra printre principalele cauze ale problemelor de sănătate provocate de purtarea tocurilor înalte. În plus, chiar și la creșterea înălțimii tocului, un toc mare și subțire va provoca, de asemenea, o presiune plantară semnificativ mai mare. Este necesară înțelegerea mersului cu tocuri înalte pentru îmbunătățirea confortului în acest sens și pentru a oferi mai multe sfaturi în vederea unei sănătăți mai bune. Cu toate acestea, în cercetările viitoare trebuie să se analizeze distincția dintre diferențele înălțimi și tipuri de toc.

## REFERENCES

1. Branthwaite, H., Chockalingam, N., Grogan, S., Jones, M., Footwear choices made by young women and their potential impact on foot health, *J Health Psychol*, **2013**, 18, 11, 1422-1431.
2. Morris, P.H., White, J., Morrison, E.R., Fisher, K., High heels as supernormal stimuli: How wearing high heels affects judgements of female attractiveness, *Evol Hum Behav*, **2013**, 34, 3, 176-181.
3. Tedeschi Filho, W., Dezzotti, N.R.A., Joviliano, E.E., Moriya, T., Piccinato, C.E., Influence of high-heeled shoes on venous function in young women, *J Vasc Surg*, **2012**, 56, 4, 1039-1044.
4. Al-Abdulwahab, S.S., Al-Dosry, R.D., Hallux valgus and preferred shoe types among young healthy Saudi Arabian females, *Ann Saudi Med*, **2000**, 20, 3-4, 319-321.
5. Menz, H.B., Morris, M.E., Footwear Characteristics and Foot Problems in Older People, *Gerontology*, **2005**, 51, 5, 346-351.
6. de Oliveira Pezzan, P.A., Sacco, I.C.N., Amado Joao, S.M., Foot posture and classification of the plantar arch among adolescent wearers and non-wearers of high-heeled shoes, *Rev Bras Fisioter*, **2009**, 13, 5, 398-404.
7. Speksnijder, C.M., Munckhof, R., Moonen, S.A.F.C.M., Walenkamp, G.H.I.M., The higher the heel the higher the forefoot-pressure in ten healthy women, *The Foot*, **2005**, 15, 1, 17-21.
8. Cong, Y., Cheung, J.T., Leung, A.K., Zhang, M., Effect of heel height on in-shoe localized triaxial stresses, *J Biomech*, **2011**, 44, 12, 2267-2272.
9. Hong, W.H., Lee, Y.H., Chen, H.C., Pei, Y.C., Wu, C.Y., Influence of Heel Height and Shoe Insert on Comfort Perception and Biomechanical Performance of Young Female Adults During Walking, *Foot Ankle Int*, **2005**, 26, 12, 1042-1048.
10. Nyska, M., McCabe, C., Linge, K., Klenerman, L., Plantar foot pressures during treadmill walking with high-heel and low-heel shoes, *Foot Ankle Int*, **1996**, 17, 11, 662-666.
11. Mandato, M.G., Nester, E., The effects of increasing heel height on forefoot peak pressure, *J Am Podiatr Med Assoc*, **1999**, 89, 2, 75-80.
12. Chien, H.L., Lu, T.W., Liu, M.W., Control of the motion of the body's center of mass in relation to the center of pressure during high-heeled gait, *Gait Posture*, **2013**, 38, 3, 391-396.
13. Zhou, J., Zhang, W., Xu, B., Chen, W., Effect of Arch Support on the Insole Pressure Distribution of Heel Heighted Shoes, *Revista de Pielarie Incaltaminte (Leather and Footwear Journal)*, **2012**, 12, 4, 295-304.
14. Kerrigan, D.C., Todd, M.K., Riley, P.O., Knee osteoarthritis and high-heeled shoes, *Lancet*, **1998**, 351, 9113, 1399-1401.
15. Ebbeling, C.J., Hamill, J., Crussemeyer, J.A., Lower extremity mechanics and energy cost of walking in high-heeled shoes, *J Orthop Sports Phys Ther*, **1994**, 19, 4, 190-6.
16. Mocanu, R., Cioara, I., A Finite Element Analysis Study of Footwear Lower Ensemble Influence on the Plantar Pressure Distribution, *Revista de Pielarie Incaltaminte (Leather and Footwear Journal)*, **2014**, 14, 2, 85-92.
17. Morio, C., Lake, M.J., Gueguen, N., Rao, G., Baly, L., The influence of footwear on foot motion during walking and running, *J Biomech*, **2009**, 42, 13, 2081-2088.
18. Macellari, V., Giacomozi, C., Saggini, R., Spatial-temporal parameters of gait: reference data and a statistical method for normality assessment, *Gait Posture*, **1999**, 10, 2, 171-181.
19. Menz, H.B., Two feet, or one person? Problems associated with statistical analysis of paired data in foot and ankle medicine, *The Foot*, **2004**, 14, 1, 2-5.
20. De Cock, A., De Clercq, D., Willems, T., Witvrouw, E., Temporal characteristics of foot roll-over during barefoot jogging: reference data for young adults, *Gait Posture*, **2005**, 21, 4, 432-439.
21. Chiu, M.C., Wu, H.C., Chang, L.Y., Gait speed and gender effects on center of pressure progression during normal walking, *Gait Posture*, **2013**, 37, 1, 43-48.
22. De Cock, A., Vanrenterghem, J., Willems, T., Witvrouw, E., De Clercq, D., The trajectory of the centre of pressure

- during barefoot running as a potential measure for foot function, *Gait Posture*, **2008**, 27, 4, 669-675.
23. Rodgers, M.M., Dynamic foot biomechanics, *J Orthop Sports Phys Ther*, **1995**, 21, 6, 306-316.
24. Yu, J., Cheung, J.T.M., Wong, D.W.C., Cong, Y., Zhang, M., Biomechanical simulation of high-heeled shoe donning and walking, *J Biomech*, **2013**, 46, 12, 2067-2074.
25. Mann, R., Inman, V.T., Phasic Activity of Intrinsic Muscles of the Foot, *J Bone Joint Surg Am*, **1964**, 46, 469-81.
26. Chan, C.W., Rudins, A., Foot biomechanics during walking and running, *Mayo Clin Proc*, **1994**, 69, 5, 448-61.
27. Cong, Y., Cheung, J.T., Leung, A.K., Zhang, M., Effect of heel height on in-shoe localized triaxial stresses, *J Biomech*, **2011**, 44, 12, 2267-2272.
28. Ebbeling, C.J., Hamill, J., Crussemeyer, J.A., Lower extremity mechanics and energy cost of walking in high-heeled shoes, *J Orthop Sports Phys Ther*, **1994**, 19, 4, 190-196.
29. Blanc, Y., Balmer, C., Landis, T., Vingerhoets, F., Temporal parameters and patterns of the foot roll over during walking: normative data for healthy adults, *Gait Posture*, **1999**, 10, 2, 97-108.
- 

Article received/Data primirii articolului: 12.10.2015

Accepted/Acceptat la data: 28.02.2016