



Available online at  
**SciVerse ScienceDirect**  
[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Elsevier Masson France  
**EM|consulte**  
[www.em-consulte.com](http://www.em-consulte.com)

Annals of Physical and Rehabilitation Medicine 55 (2012) 252–262



Original article / Article original

## Comparison of energy cost in transtibial amputees using “prosthesis” and “crutches without prosthesis” for walking activities

*Comparaison du coût énergétique chez les amputés transtibiaux avec « prothèse » et « béquilles sans prothèse » au cours des activités de marche*

R.K. Mohanty<sup>a,\*</sup>, P. Lenka<sup>b</sup>, A. Equebal<sup>c</sup>, R. Kumar<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Master in Prosthetics & Orthotics Training Section (Room No – 147), National Institute for the Orthopedically Handicapped (NIOH), B T Road, Bon Hooghly, Kolkata 700090, India

<sup>b</sup> Department of Research & Development, National Institute for the Orthopedically Handicapped, Kolkata, India

<sup>c</sup> Department of Medical Rehabilitation, National Institute for the Orthopedically Handicapped, Kolkata, India

Received 18 August 2011; accepted 20 February 2012

### Abstract

**Background.** – In a survey of 100 transtibial amputees (TTA) in the study place, it was noticed that nearly 30% of total activities performed by crutches. It was recorded nearly 52% of the amputees were totally independent, 39% had to use a crutch or cane and only 9% need not used any devices simply because they are unaware of current technology or availability. Out of 39 TTA, nine used crutches only for performing daily activities while 30 used both prosthesis and crutch. Walking is a major activity in lower limb amputees and therefore it is imperative to know the energy cost in both the mobility devices (prosthesis and crutches without prosthesis) for walking activities.

**Objectives.** – The purpose of this study was to quantify and compare the difference in energy cost between the two most commonly used assistive devices (prosthesis and axillary crutches) in adults with Transtibial amputation by indirect calorimetric method at the self-selected speed in plane surface walking.

**Methods.** – Thirty adults who had a unilateral transtibial amputation participated in this study. Oxygen consumption was measured with a Cosmed K4 b<sup>2</sup> oxygen analysis telemetry unit (Rome, Italy) as the participants walked over level ground for 30 meters at a self-selected speed. The variables that were analyzed were VO<sub>2</sub> rate (mL/min), VO<sub>2</sub> cost (mL/kg/m), heart rate (bpm), self-selected walking velocity (m/min) and energy expenditure per minute (Kcal/min).

**Results.** – It was observed that VO<sub>2</sub> uptake rate and EE comparisons were highly significant for both prosthesis and crutches without prosthesis walking in adults with transtibial amputation ( $P < 0.025$ ). There was significant difference between prosthesis walking and crutches without prosthesis walking in terms of VO<sub>2</sub> uptake rate ( $P < 0.005$ ) and EE/min ( $P < 0.00001$ ). It was noticed the adults with transtibial amputation using prosthesis walked with 21% more efficient in terms of VO<sub>2</sub> uptake rate and 92% more efficient in terms of EE/min as compared to crutches without prosthesis.

**Conclusions.** – The data on energy cost indicates that all below knee amputee groups walk with less effort by using prosthesis. It may be concluded that crutches without prosthesis may not be used as a permanent rehabilitative measure in transtibial amputations.

© 2012 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

**Keywords:** Axillary crutch; Energy cost; Telemetry unit; Transtibial amputees

### Résumé

**Contexte.** – Dans une enquête portant sur 100 amputés transtibiaux (ATT) effectuée dans le centre d'étude, il a été montré que près de 30 % des activités étaient effectuées à l'aide de béquilles. Près de 52 % des amputés étaient totalement indépendants, 39 % devaient utiliser une béquille ou une canne, et seuls 9 % n'avaient besoin d'aucun dispositif uniquement parce qu'ils ignoraient l'existence des technologies ou des disponibilités actuelles. Sur 39 ATT, neuf utilisaient des béquilles uniquement pour les activités quotidiennes, alors que 30 d'entre eux utilisaient à la fois des prothèses et des béquilles. La marche est une activité majeure pour les amputés des membres inférieurs et il est donc impératif de connaître le coût énergétique de chacun des deux dispositifs de mobilité (prothèse et béquilles sans prothèse) dans l'exercice de la marche.

\* Corresponding author. Tel.: +91 9804280322.

E-mail address: [rajeshmpo48@gmail.com](mailto:rajeshmpo48@gmail.com) (R.K. Mohanty).

**Objectifs.** – Le but de cette étude était de quantifier et de comparer la différence en coût énergétique entre les deux dispositifs d'assistance les plus communément utilisés (prothèse et béquilles axillaires) chez les adultes avec amputation transtibiale par méthode calorimétrique indirecte à une vitesse de marche choisie par le patient lui-même sur une surface de marche plane.

**Méthodes.** – Trente adultes avec une amputation transtibiale unilatérale ont participé à cette étude. La consommation d'oxygène était mesurée à l'aide de l'unité de télémétrie d'analyse d'oxygène Cosmed K4 b<sup>2</sup> (Rome, Italie) chez les participants qui marchaient à plat sur 30 mètres à la vitesse qu'ils avaient choisie. Les variables analysées étaient le taux de VO<sub>2</sub> (mL/min), la consommation de VO<sub>2</sub> (mL/kg/m), la fréquence cardiaque (bpm), la vitesse de marche choisie (m/min) et la dépense d'énergie (DE) par minute (Kcal/min).

**Résultats.** – On a observé que une lien hautement significatif entre le taux de consommation d'oxygène et la DE, que ce soit pour la marche avec prothèse ou la marche avec béquilles sans prothèse chez l'adulte avec amputation transtibiale ( $p < 0,025$ ). Il y avait une différence significative entre la marche avec prothèse et la marche avec béquilles sans prothèse en termes de taux de VO<sub>2</sub> ( $p < 0,005$ ) et de DE/minute ( $p < 0,00001$ ). Il a été noté que chez les adultes avec amputation transtibiale marchant avec prothèse, l'efficacité en termes de taux de consommation de VO<sub>2</sub> était supérieure de 21 et de 92 % en termes de DE par minute, par rapport à la marche avec béquilles sans prothèse.

**Conclusion.** – Les données sur le coût énergétique indiquent que tous les groupes avec amputations sous le genou marchent avec moins d'effort en utilisant une prothèse. On peut en conclure que l'utilisation permanente de béquilles sans prothèse ne doit pas être l'objectif de rééducation dans les amputations transtibiales.

© 2012 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

**Mots clés :** Béquilles axillaires ; Coût énergétique ; Unité de télémétrie ; Amputés transtibiaux

## 1. English version

### 1.1. Introduction

Gait efficiency can be defined as the percentage of energy input that is transformed into useful work. Physiologic work during level walking also called as gait efficiency can also be defined as the amount of oxygen consumed per kilogram body weight per unit distance traveled (mL/kg/m) [25]. Previous studies have established that the lower limb amputees spend more energy as compared to the normal subjects [1,4,15,20,21,24,27]. In a study, Gailey et al. noticed that the metabolic cost (VO<sub>2</sub>), heart rate (HR) at self-selected speed of ambulation of transtibial amputees (TTAs) were 16% greater, and the ambulation pace 11% slower than the non-amputee controls [10]. Many studies have shown the effect of different types of crutches on energy efficiency with different crutch gaits. McBerth et al. found that use of a cane or crutches with two-point alternating and three points partial weight bearing gaits required about 33% more energy than normal walking. The swing through and three-points non-weight bearing gaits required about 73% more energy than normal walking [18]. In a comparison between underarm axillary crutches and elbow crutches, Fisher and Patterson had found no significant difference between them [9]. In another study, Lee noticed that oxygen consumption was less for axillary crutches than elbow crutches [16].

Waters et al. in a direct comparison of walking in unilateral amputees with and without a prosthesis utilizing a three-point crutch-assisted gait pattern revealed that prosthesis had a lower rate of energy expenditure (EE), HR, and O<sub>2</sub> cost [27]. Bryan et al. directly compared the walking in unilateral traumatic and dysvascular amputees at the symes, transtibial or transfemoral level using prosthesis or a swing through crutch assisted gait without a prosthesis found that almost all amputees have a lower rate of EE, HR and O<sub>2</sub> cost when using prosthesis [23]. In a comparison of mechanical efficiency, Datta et al. noticed that the below-knee rehabilitees and the crutch users needed 20.5

and 48.5% more energy, respectively, than the normal subjects while ascending stairs [6]. In another study, Waters et al. found that a well-fitted prosthesis results in a satisfactory gait not requiring crutches significantly reduces the physiologic energy demand. The rate of oxygen consumption, HR, respiratory quotient was significantly increased in all groups of amputees when using crutches and without prosthesis. This increase ranges from 1.3 ml/kg/min in vascular symes amputation to 6.9 ml/kg/min in traumatic below knee amputation [28].

Although there is a considerable body of literature on the physiologic EE of amputee gait in different prosthetic components or different types of crutches, a direct comparison of the results of the different studies is difficult for the following reasons. First, many comparison had been done for young or usually traumatic amputees with older or usually vascular amputees, and there are significant differences between these two groups with respect to gait performance. Secondly, there is often no distinction between amputees who use upper-limb assistive devices and those who do not. Although the oxygen uptake method has been shown to be a reliable method and is used by many, the previous instruments are cumbersome, more patient unwillingness, and not available in many clinics [22]. Other disadvantages include no breath by breath data can be obtained and therefore rapid changes in ventilation or VO<sub>2</sub> cannot be studied and secondly the method is time consuming due to the requirement of sampling and analysis after collection [14]. Many of the past studies used calculating the physiological cost index (PCI) as one of the methods of assessing metabolic energy cost but there is controversy over validity and reliability of the PCI as an outcome measure for the assessment of EE [3,14]. Hence there is a requirement for analyzing exact quantification of EE between “prosthesis” and “crutches without prosthesis” among subjects with little variation of age and clinical conditions. It is also required for clinical practice for prescription of aids and diet control. Therefore we made an attempt to compare the gait efficiency between two most commonly used assistive devices (patellar tendon bearing [PTB] exoskeletal prosthesis & axillary crutch)

in Indian conditions by using portable and highly reliable Respiratory Analyser System Cosmed® K4 b<sup>2</sup> based on automated on line breath by breath gas analysis system [2,8,19].

### 1.2. Material & methods

A sample of convenience of 30 unilateral TTA took part in this study. They were advised to walk in level ground surface using “prosthesis” and “crutches without prosthesis” individually. The environmental conditions were maintained the same throughout the study. No data was taken in rainy or extreme hot and humid environmental conditions. The patients were normal psychologically with no anxiety, stress, fear etc. They were taught to walk with their own self-selected walking speed for either prosthesis or crutch walking. They were advised to take their normal diet at least 2 days before the test.

Our inclusion criteria include:

- transtibial amputee with minimum muscle strength of Grade 3+ around the knee joint;
- only unilateral amputees of either side will be considered;
- origin of amputation: traumatic;
- the amputee must be a prosthetic user for a minimum period of one month;
- type of prosthesis: transtibial exoskeletal prosthesis with PTB socket with cuff suspension with each foot fabricated and fitted by same CPO;
- age range: 25–45 yrs;
- full ROM in knee and hip joints;
- adequate upper extremity strength (minimum Grade-4 as per Manual Muscle Testing);
- stump length: minimum 8 cms from tibial plateau;
- no contracture in the proximal joints (knee and hip, etc.);
- no neuroma or edema;
- must be a community ambulatory (at least K2 level);
- they should be ready to participate in this study on their own.

Similarly we have excluded:

- TTA with contracture and weak (less than grade 3) knee power;
- complicated stump (pain, wound, etc.);
- cause of amputation: peripheral vascular disease (PVD);
- patient with inadequate ROM and strength in contra lateral limb;
- patients with neurologic disorders, or other related psychological problems;
- patients with cardiovascular and respiratory problems;
- musculoskeletal disorder that might alter gait characteristics.

#### 1.2.1. Procedure

A detailed explanation of the procedure was given after which the subjects signed the informed consent. The fitting and efficacy of the prosthetic system as well as the height of the crutches and positions of handgrip were evaluated and approved by the Prosthetics & Orthotics Department and Department of R&D, N.I.O.H, Kolkata, India. The amputees



Fig. 1. The K4b2 system fitted and the subjects performed the test with Prosthesis.

were already accustomed to walk with both prosthesis and crutches in their normal life. Prior to the test there was 5 min of rest period for accommodation to the system. Two tests were performed during the study and were randomized in order:

- in Test I the physically fit TTAs performed a gentle walking session with prosthesis (Fig. 1) consisting of an easy 30 meters (with rest periods of 10 min separating each walk), on three separate occasions. Sessions were identical. During



Fig. 2. The K4b2 system fitted and the subjects performed the test with Crutches without Prosthesis.

Table 1  
Comparison of demographic data (subject information).

Subject characteristics	Mean $\pm$ SD
Age (Years)	34.13 $\pm$ 4.40
Sex	Male = 26, Female = 4
Stump Length (cm)	16.48 $\pm$ 3.72
Weight (Kg)	59.26 $\pm$ 4.796

three (test retest) sessions a Cosmed K4 b<sup>2</sup> portable gas analysis system was used. The mean of the three trials was taken for analysis;

- in Test II then after a rest period of another 30 minutes again these amputees underwent another test of gentle walking with bilateral axillary crutches without prosthesis (Fig. 2) consisting of a easy 30 meters (with rest periods of 10 min separating each walk), on three separate occasions. Again the mean of three trials was taken for analysis.
- then comparative study was done between Test I & II.

### 1.2.2. Parameters

The efficiency of the prosthesis was tested by K4 b<sup>2</sup> by using different variables for gait efficiency like:

- VO<sub>2</sub> uptake (ml/min): the rate of O<sub>2</sub> uptake attained during exercise of large muscle groups. It is an indicator of physical fitness also called maximal aerobic capacity;
- O<sub>2</sub> cost: the amount of energy required to perform the task. During level walking the O<sub>2</sub> cost is the amount of O<sub>2</sub> consumed per kilogram of body weight per unit distance traveled (mL/kg/m) or rate of O<sub>2</sub> consumption divided by walking speed. Also called physiologic work;
- EE per minute (EE/min): the rate of energy required for a given activity per minute. It is expressed in terms of Kcal/min;
- HR and O<sub>2</sub> pulse: the number of beats per minute is called the HR. The rate of O<sub>2</sub> consumption divided by HR is called the O<sub>2</sub> pulse. It indicates the exercise efficiency of active muscle. In this study these two will be only used for the monitoring purposes;
- walking speed: the distance in meter travelled per minute. It is expressed in meter/min.

### 1.2.3. Instrumentation

The instrumentation is as follows:

- the efficiency of the prosthesis will be tested by Respiratory Analyser System Cosmed<sup>®</sup> K4 b<sup>2</sup> (Cosmed-spl-Italy) [2,8,19];
- stopwatch.

### 1.2.4. Data analysis

Data was managed on an Excel spread sheet. SPSS.10 statistical software was used for data analysis. Statistically the results were analyzed using the *t*-test. Paired *t*-test was used to compare the gait efficiency between the prosthesis walking and crutch walking. The significance level of  $P < 0.05$  was fixed.

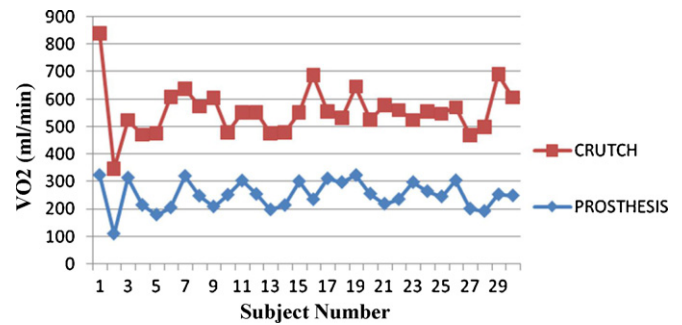


Fig. 3. Line graph of VO<sub>2</sub> uptake rate for Crutch and Prosthesis walking.

### 1.3. Results

The demographic data of the amputees included in the study are presented in Table 1. The VO<sub>2</sub> uptake and EE comparisons were highly significant for both prosthesis and crutches without prosthesis walking ( $P < 0.025$ ). The VO<sub>2</sub> uptake data showed more symmetry in prosthesis walking compared to crutch walking without prosthesis (Fig. 3). The EE/min data showed more symmetry in prosthesis walking compared to crutch walking without prosthesis (Fig. 4). The results for HR indicate that, the patients were in a comfortable range throughout this study (Table 2).

### 1.4. Discussion

The purpose of the study was to compare the gait efficiency and the effectiveness of the transtibial prosthesis over the crutches without prosthesis in patients with unilateral transtibial amputation for walking activities. The study included the unilateral TTA of either side with no consideration of sex. The other physical factors like height and weight were also not considered except the stump length. In results it was observed that VO<sub>2</sub> uptake and EE/min comparisons were highly significant for both prosthesis and crutches without prosthesis walking ( $P < 0.025$ ). This suggests that the change in VO<sub>2</sub> uptake can directly affects the EE/min values and vice versa. This well-established fact had been employed in many previous studies of the energy costs of both crutch-walking without prosthesis and prosthesis walking [5,7,9,11–13,18].

Bryan et al. [23] suggested that direct comparison in walking in unilateral traumatic and dysvascular amputees at the symes,

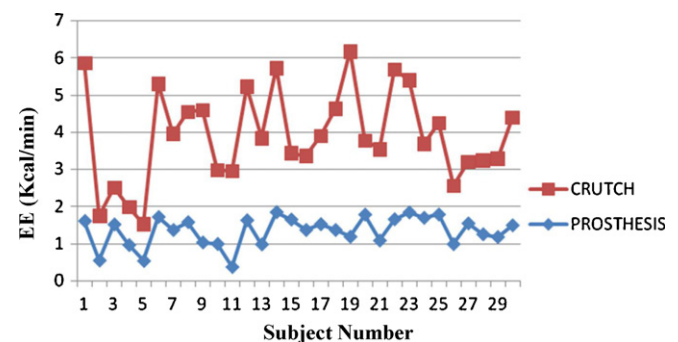


Fig. 4. Line graph of EE/min for Crutch and Prosthesis walking.

Table 2  
Comparisons of VO<sub>2</sub> uptake, EE/min, heart rate & self selected velocities (SSV) for prosthesis and crutches without prosthesis walking.

Parameters	Prosthesis walking (Mean ± S.D)	Crutch walking without prosthesis (Mean ± S.D)	P value
VO <sub>2</sub> uptake (ml/min)	251.5006 ± 52.053	305.8017 ± 73.837	< 0.005
EE/Min (Kcal/min)	1.3380 ± 0.402	2.5694 ± 1.033	< 0.00001
Heart rate (Beats/min)	82.0755 ± 5.869052	91.27 ± 7.401	
Velocity (Meter/min)	63.85 ± 2.898	60.58 ± 2.652	

trans tibial or transfemoral level using prosthesis or a swing through crutch assisted gait without a prosthesis revealed that almost all amputees have a lower rate of EE, O<sub>2</sub> cost than using a prosthesis. In another study, Waters et al. [28] found that the rate of oxygen consumption, HR, respiratory quotient was significantly increased in all group of amputees when using a crutches and without prosthesis. Tachycardia was found to be increased in all patients using crutches. All the amputee subgroups averaged between 120 and 125 heartbeats per minute. The results of this study also revealed the same findings in oxygen consumption only but not for HR. We found that throughout our study whether using prosthesis or crutches without prosthesis, the patients were within the comfortable range. (Mean HR for prosthesis walking and crutch walking was 82 and 91 beats/min respectively). This indicates that in comparison to previous reports, the patients were in a comfortable range throughout this study. The difference of this result with respect to the previous studies is may be due to the fact that, prior to the test the initial resting phase was meant for the accommodation to the system and in between the two tests the patients were rested for 30 minutes. By this time the patient's normal resting HR comes to a baseline level. However in a comparison between prosthesis and crutch walking, it was observed that the prosthesis walking was 6% more stable in regards to HR than crutch walking. In another study by Jessie [17], the authors concluded that the energy cost of walking with prosthesis is less than that expended when walking without it using crutches or a walker. Our study also revealed the same findings. In comparing the VO<sub>2</sub> uptake for both prosthesis and crutches, significant differences were observed ( $P < 0.005$ ). The comparison for EE/min values also showed a significant difference ( $P < 0.00001$ ). It was observed that the prosthesis walking in self selected velocities in level surface is 21% more efficient in terms of VO<sub>2</sub> uptake and 92% more efficient in terms of EE/min as compared to crutch walking in case of unilateral TTA.

The above findings clearly suggest that prosthesis walking is much more efficient than crutch walking without prosthesis in case of unilateral TTA. This may be due to the fact that the prosthesis not only replaced the lost anatomical part from cosmetic point of view but also replaced the weight of the lost part of the limb to maximum extent. It requires no extra exertions of upper limb muscles and lifting the body, etc. The prosthetic limb motion is symmetrical, and the displacement of the center of gravity of the head, arms, and trunk (HAT) in the vertical direction is of low-amplitude as because it is like the normal walking. The results may be due to the fact that most

patients were the prosthetic users for at least six months, by which they acquainted themselves in its use. As the amputee group choose the swing-through crutch locomotion, which requires a high rate of physical effort in comparison to normal and other means of crutch walking. The arms and shoulder girdle musculature must lift and then swing the entire body weight forward with each step. The metabolic energy demands of supporting the body weight with the arms and shoulders were more significant.

The results of this study can be clinically applied in view that, the crutches without prosthesis should not be used as a permanent rehabilitative measure in case of patients with unilateral trans tibial amputations. Crutch walking without prosthesis with a three-point gait pattern (as it requires less effort as compared to swing through crutch assisted gaits) in unilateral amputees may be a primary or secondary means of transportation when an adequate prosthesis is unavailable or inadequate. Crutches may be considered for times when the amputees choose not to wear their prosthesis or for occasions when they are unable to wear their prosthesis secondary to edema, skin irritation, or poor prosthetic fit. In addition it may only be used for the purpose of extra stability or security if needed by some amputees due to various pathological conditions. Whereas in all the case of patients with unilateral trans tibial amputations, the below knee prosthesis should be considered as a permanent rehabilitative measure as it is more efficient in terms of energy consuming gait in comparison with the crutches without prosthesis.

The hypothesis of this study that prosthesis is more effective in conserving energy in case of unilateral Trans tibial amputees than crutches without prosthesis for walking activities is well supported by the results of this study. The data on oxygen consumption, HR, and EE per minute clearly indicated that all below knee amputee groups walk with less effort by using prosthesis. We found that the amputee gait was 21% more efficient in terms of VO<sub>2</sub> uptake and 92% more efficient in terms of EE/min as compared to crutch walking in self-selected walking speed on level surface. So it can easily be concluded that a well-fitted prosthesis results in a satisfactory gait, which significantly reduces the physiologic energy demand when compared their EE while using crutches only. Instead of this also, the use of either crutch or prosthesis cannot be fully neglected. While some amputee may prefer to use the crutch for indoor activities where the increased EE can be compromised for small distance walking, the use of prosthesis can be undertaken for activities requiring long distance walking. Because crutch walking requires more exertion than walking

with prosthesis, patients with unilateral transtibial amputations should not be required to attempt to crutch walk without prosthesis as a permanent prescription, rather both of them can be prescribed together.

Some of the limitations of the study are as follows:

- a proper gait training with both the assistive devices should be have been imparted to the participants to quantify the real and exact EE as different gait pattern may alter the energy cost;
- the test was performed for 10 minutes only in three occasions, which can be increased to a week or so for better results.

#### *Disclosure of interest*

The authors declare that they have no conflicts of interest concerning this article.

#### *Acknowledgement*

This study was undertaken at the Department of R&D and MPO training Section at National Institute for the Orthopaedically Handicapped, Kolkata with financial and technical support from the Institute.

## **2. Version française**

### *2.1. Introduction*

L'efficacité de la marche peut être définie comme le pourcentage de consommation d'énergie transformé en travail utile. Le travail physiologique effectué pendant la marche à plat également appelé efficacité de la marche peut aussi être défini comme la quantité d'oxygène consommée par kilo de poids du corps par unité de distance parcourue (ml/kg/m) [25]. De précédentes études ont établi que les amputés des membres inférieurs dépensent plus d'énergie par rapport aux sujets normaux [1,4,15,20,21,24,26]. Dans leur étude, Gailey et al. ont remarqué que le coût métabolique ( $VO_2$ ) et la fréquence cardiaque des amputés transtibiaux (ATT) à vitesse de marche choisie par eux-mêmes étaient plus élevés de 16 %, et le rythme de marche plus lent de 11 % que dans le groupe témoin des non-amputés [10]. De nombreuses études ont montré l'effet de différents types de béquilles sur le rendement énergétique selon les différentes démarches données par les béquilles. McBerth et al. ont montré que l'utilisation d'une canne ou de béquilles avec une marche à deux points d'appui alternés et trois points avec décharge partielle du poids du corps exigeait près de 33 % d'énergie de plus que la marche normale. La marche pendulaire et la marche en décharge avec trois points d'appui exigeaient près de 73 % d'énergie en plus que la marche normale [18]. En comparant les béquilles axillaires (sous-aisselles) et les cannes à appui antébrachial, Fisher et Patterson n'ont pas trouvé de différence significative [9]. Dans une autre étude, Lee a remarqué que la consommation d'oxygène était inférieure pour les béquilles axillaires que pour les canne à appui natébrachial [16].

Waters et al. dans une comparaison directe de la marche chez des amputés unilatéraux avec et sans prothèse utilisant un

modèle de marche à trois points d'appui avec béquilles, ont révélé que l'utilisation de la prothèse s'accompagnait d'un taux plus faible de dépense énergétique, de fréquence cardiaque et de consommation d'oxygène [27]. Bryan et al., en comparant directement la marche chez des amputés unilatéraux traumatiques et vasculaires de type Syme, transtibial ou transfémoral qui utilisaient une prothèse ou marchaient en pendulaire avec des béquilles et sans prothèse, ont trouvé que presque tous les amputés ont un taux plus faible de dépense d'énergie (DE), de fréquence cardiaque et de consommation d' $O_2$  avec l'utilisation d'une prothèse [22]. En comparant la DE, Datta et al. ont noté que les patients rééduqués après amputation sous le genou et les utilisateurs de béquilles dépensaient 20,5 % et 48,5 % plus d'énergie, respectivement, que les sujets normaux pour monter des escaliers [6]. Dans une autre étude, Waters et al. ont montré qu'une prothèse bien ajustée permettait une démarche satisfaisante sans recourir à des béquilles et diminuait de façon significative la demande physiologique d'énergie. L'augmentation du taux de consommation d'énergie, de fréquence cardiaque, du quotient respiratoire, était significative dans tous les groupes d'amputés lorsqu'ils utilisaient des béquilles sans prothèse. Cette augmentation va de 1,3 mL/kg par minute chez les amputés vasculaires de type Syme à 6,9 mL/kg par minute chez les amputés traumatiques sous le genou [28].

Bien qu'il y ait une littérature considérable sur la DE physiologique au cours de la marche chez les amputés avec différents composants de prothèses ou différents types de béquilles, une comparaison directe des résultats des différentes études est difficile pour les raisons suivantes : premièrement, de nombreuses comparaisons ont été faites entre des amputés jeunes ou généralement traumatiques et des amputés plus âgés ou généralement vasculaires, et les différences sont significatives entre ces deux groupes en termes de performance de marche. Secondement, il n'y a souvent pas de distinction entre les amputés qui utilisent des dispositifs d'assistance des membres supérieurs et ceux qui n'en utilisent pas. Bien que la méthode de consommation d'oxygène ait montré sa fiabilité et soit fréquemment utilisée, les instruments utilisés préalablement sont encombrants, rencontrent plus de refus des patients et ne sont pas disponibles dans de nombreuses cliniques [22]. Cette méthode comporte d'autres inconvénients, tels que l'impossibilité d'obtenir des données en continu, et par conséquent d'étudier des changements rapides de ventilation ou de  $VO_2$ , ou encore la consommation en temps de, la méthode à cause des conditions de prélèvement des échantillons et de leur analyse après recueil [14]. De nombreuses études anciennes ont utilisé le calcul de l'indice de coût physiologique (ICP) comme l'une des méthodes d'évaluation du coût d'énergie métabolique, mais il existe une controverse sur la validité et la fiabilité de l'ICP comme mesure des données pour l'évaluation de la DE [3,14]. Il y a donc un vrai besoin d'analyse exacte de la quantification de DE entre « prothèse » et « béquilles sans prothèse » chez des sujets présentant peu de variations d'âge et de conditions cliniques. Par ailleurs, il faut aussi qu'en pratique clinique des aides et un contrôle alimentaire soient prescrits. Nous avons donc essayé de

comparer l'efficacité de la marche entre les deux dispositifs d'assistance les plus fréquemment utilisés (prothèses exosquelettiques PTB & béquilles axillaires) dans le contexte Indien en utilisant le système d'analyse respiratoire portable et hautement fiable Respiratory Analyser System Cosmed® K4 b<sup>2</sup> fondé sur le système d'analyse de gaz automatisé en ligne et en continu [2,8,19].

## 2.2. Matériel et méthodes

Un échantillon disponible de 30 amputés unilatéraux transtibiaux a pris part dans cette étude. Il a été demandé aux sujets de marcher sur une sol plat, à l'aide d'une « prothèse » et de « béquilles sans prothèse » individuellement. L'environnement devait être maintenu à l'identique tout au long de l'étude. En cas de pluie ou d'extrême chaleur et d'humidité, aucune donnée n'était recueillie. Les patients étaient en état psychologique normal, sans anxiété, stress, peur, etc. Il leur a été demandé de marcher à la vitesse de leur choix, que ce soit avec la prothèse ou les béquilles. Ils devaient prendre leur régime alimentaire normal au moins deux jours avant le test.

### 2.2.1. Critères d'inclusion

Les critères d'inclusion sont comme suit :

- amputation transtibiale avec une force musculaire minimale autour de l'articulation du genou de 3+ au testing;
- amputation unilatérale uniquement, quel que soit le côté ;
- origine de l'amputation : traumatique ;
- utilisation d'une prothèse par l'amputé depuis au moins un mois ;
- type de prothèse : prothèse transtibiale exosquelettique avec une emboiture à appui sous-rotulien, une gaine de suspension et un pied SACH fabriqué et ajusté par la même société ;
- âge : entre 25 et 45 ans ;
- amplitude de mouvement complète dans le genou et la hanche ;
- force acceptable des extrémités supérieures (−4 au minimum au testing manuel) ;
- longueur du moignon : 8 cm au minimum à partir du plateau tibial ;
- pas de contracture dans les articulations proximales (genou et hanche, etc.) ;
- pas de névrome ou d'œdème ;
- patients ambulatoires, faisant partie de la communauté locale ;
- patients prêts à participer à l'étude tout seuls.

### 2.2.2. Critères d'exclusion

Les critères d'exclusion sont comme suit :

- ATT avec flexion et faible force du genou (inférieure à 3) ;
- moignon avec complications (douleur, plaie, etc.) ;
- cause de l'amputation : maladie vasculaire périphérique (MVP) ;
- patients avec amplitude de mouvement et force dans le membre opposé inadéquats ;

- patients avec troubles neurologiques, ou autres problèmes psychologiques associés ;
- patients avec problèmes cardiovasculaires et respiratoires ;
- troubles musculosquelettiques pouvant altérer les caractéristiques de la démarche.

### 2.2.3. Procédure

Une explication détaillée de la procédure a été donnée aux sujets, qui ont ensuite signé le consentement éclairé. L'équipement et l'efficacité du système de prothèse ainsi que la hauteur des béquilles et la position de poignées ont été évalués et approuvés par le service des prothèses & orthèses & le département de recherche clinique de l'hôpital N.I.O.H, Kolkata, India. Les amputés avaient déjà l'habitude de marcher avec des prothèses ou de béquilles dans leur vie normale. Avant le test, une période de cinq minutes de repos permettait de s'habituer au système. Deux test étaient effectués pendant l'étude et étaient randomisés dans l'ordre :

- dans le Test I, les ATT en bonne forme physique effectuaient une séance de marche douce avec prothèse (Fig. 1) de 30 mètres (avec une période de dix minutes de repos entre les séances) à trois occasions séparées. Les séances étaient identiques. Pendant les trois séances, le système portable d'analyse gazeuse Cosmed K4b<sup>2</sup> était utilisé. La moyenne des trois tests était prise pour analyse ;
- dans le Test II, après une nouvelle période de repos de 30 minutes, ces mêmes amputés effectuaient un autre test de marche douce à l'aide de béquilles axillaires sans prothèse (Fig. 2) de 30 mètres (avec une période de dix minutes de repos entre les séances), à trois occasions séparées. À nouveau, la moyenne des trois tests était prise pour analyse ;
- puis l'étude comparative entre les Tests I et II était faite.



Fig. 1. Le système K4b2 était ajusté et les sujets réalisaient le test avec prothèse.



Fig. 2. Le système K4b2 était ajusté et les sujets réalisaient le test avec béquilles sans prothèse.

2.2.4. Paramètres

L'efficacité de la prothèse était mesurée par K4 b<sup>2</sup> avec différentes variables pour l'efficacité de la démarche telles que :

- consommation de VO<sub>2</sub> (mL/min) : taux de consommation d'O<sub>2</sub> atteint pendant l'exercice de grands groupes musculaires. C'est un indicateur de condition physique également appelé puissance maximale aérobie ;
- dépense d'O<sub>2</sub> : quantité d'énergie demandée pour réaliser la tâche. Pendant la marche sur terrain plat, la dépense d'O<sub>2</sub> est la quantité d'O<sub>2</sub> consommée par kilo de poids du corps par unité de distance parcourue (mL/kg/m) ou taux de consommation d'O<sub>2</sub> divisé par la vitesse de marche. Également appelé travail physiologique ;
- DE par minute (DE/min) : taux d'énergie sollicité pour une activité donnée par minute. Il est exprimé en Kcal/min ;
- fréquence cardiaque et pouls d'O<sub>2</sub> : le nombre de battements par minute est appelé fréquence cardiaque. Le taux de consommation d'O<sub>2</sub> divisé par la fréquence cardiaque est appelé pouls d'O<sub>2</sub>. Il indique l'efficacité de l'exercice du muscle actif. Dans cette étude, ces deux indices ne seront utilisés que pour des raisons de surveillance ;
- vitesse de marche : distance en mètres parcourue par minute. Elle est exprimée en mètre/minute

Tableau 1  
Comparaison des données démographiques (information sur les sujets).

Caractéristiques des sujets	Moyenne ± SD
Âge (années)	34,13 ± 4,40
Sexe	Male = 26, Femelle = 4
Longueur du moignon (cm)	16,48 ± 3,72
Poids (Kg)	59,26 ± 4,796

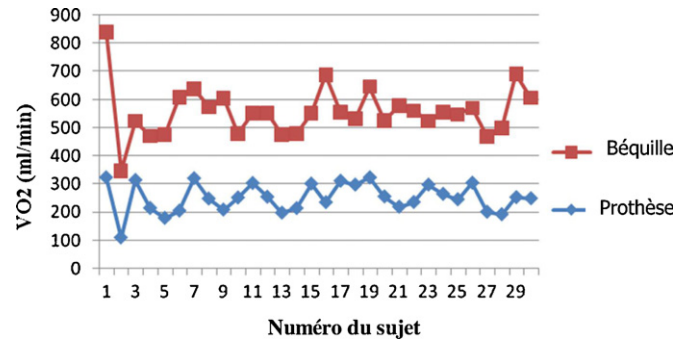


Fig. 3. Consommation d'oxygène pour chaque sujet lors de la marche avec béquille ou avec prothèse.

2.2.5. Instrumentation

L'instrumentation est comme suit :

- les mesures sont réalisées à l'aide du Système d'Analyse Respiratoire Cosmed<sup>®</sup> K4 b<sup>2</sup> (Cosmed-spl-Italie) ;
- un chronomètre

2.2.6. Analyse des données

Les données étaient gérées sur fichier Excel. Le logiciel de statistiques SPSS a été utilisé pour l'analyse des données. Les statistiques des résultats ont été analysées grâce au *t*-test. Le *t*-test apparié a été utilisé pour comparer l'efficacité de la marche entre la marche avec prothèse et la marche avec béquilles. Le niveau de significativité a été fixé à *p* < 0,05.

2.3. Résultats

Les données démographiques des patients amputés inclus dans l'étude sont présentées dans le Tableau 1. Les comparaisons de consommation de VO<sub>2</sub> et de DE étaient hautement significatives à la fois pour la marche avec prothèses et la marche avec béquilles sans prothèse (*p* < 0,025). Les données concernant la consommation d'O<sub>2</sub> ont montré plus de symétrie dans la marche avec prothèse que dans la marche avec béquilles sans prothèse (Fig. 3). Les données de DE/min ont montré plus de symétrie dans la marche avec prothèse que dans la marche avec béquilles sans prothèse (Fig. 4). Les résultats concernant la fréquence cardiaque indiquent que les patients

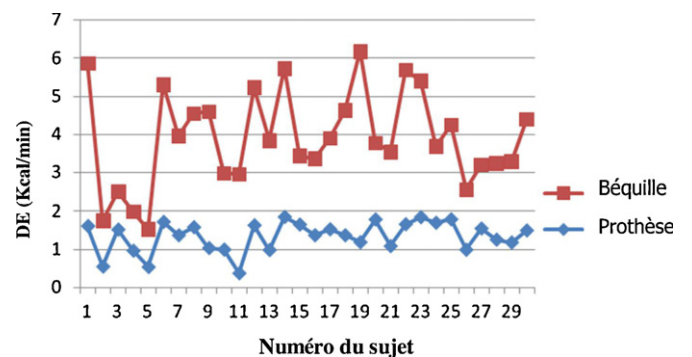


Fig. 4. Dépense énergétique par minute pour chaque sujet lors de la marche avec béquille ou avec prothèse.



Tableau 2

Comparaison de consommation de VO<sub>2</sub>, DE/min, fréquence cardiaque & vitesses choisies (SSV) pour marche avec prothèse et béquilles sans prothèse.

Paramètres	Marche avec prothèse (Moyenne ± S.D)	Marche avec béquilles sans prothèse (Moyenne ± S.D)	Valeur de <i>p</i>
Consommation VO <sub>2</sub> (mL/min)	251,5006 ± 52,053	305,8017 ± 73,837	< 0,005
DE/Min (Kcal/min)	1,3380 ± 0,402	2,5694 ± 1,033	< 0,00001
Fréquence cardiaque (Battement/min)	82,0755 ± 5,869052	91,27 ± 7,401	
Vitesse (Mètre/min)	63,85 ± 2,898	60,58 ± 2,652	

étaient dans une fourchette confortable tout au long de cette étude (Tableau 2).

#### 2.4. Discussion

Le but de l'étude était de comparer l'efficacité de la marche et l'efficacité de la prothèse transtibiale par rapport à l'utilisation de béquilles sans prothèse chez des patients avec amputation transtibiale unilatérale. L'étude a inclus les ATT unilatéraux sans distinction de côté, et sans considération de sexe. Les autres facteurs physiques tels que taille et poids n'étaient pas non plus pris en compte, mis à part la longueur du moignon. Les résultats ont montré que la comparaison de consommation de VO<sub>2</sub> et de DE/min était hautement significative à la fois pour la marche avec prothèse et la marche avec béquilles sans prothèse ( $p < 0,025$ ). Cela suggère que le changement de consommation de VO<sub>2</sub> peut directement affecter les valeurs de DE/min et vice versa. Ce fait bien établi a été employé dans de nombreuses études préalables sur les coûts énergétiques de la marche avec béquilles sans prothèse et de la marche avec prothèse [5,7,9,11–13,18]. Bryan et al. [23] ont suggéré que la comparaison directe de la marche chez des amputés traumatiques unilatéraux et vasculaires de type Syme, transtibial ou transfémoral utilisant des prothèses ou une démarche pendulaire assistée de béquilles sans prothèse a révélé que presque tous les amputés ont un taux plus faible de DE, de coût d'O<sub>2</sub>, par rapport à l'utilisation d'une prothèse. Dans une autre étude, Waters et al. [28] ont trouvé que le taux de consommation d'oxygène, la fréquence cardiaque, le quotient respiratoire augmentaient de façon significative dans tous les groupes d'amputés lorsqu'ils utilisaient des béquilles et sans prothèse. La tachycardie était augmentée chez tous les patients utilisant des béquilles. Tous les sous-groupes d'amputés avaient entre 120 et 125 battements de cœur par minute. Les résultats de cette étude ont trouvé les mêmes conclusions pour la consommation d'oxygène, mais pas pour la fréquence cardiaque. Nous avons trouvé que tout au long de notre étude, les patients, qu'ils utilisent une prothèse ou des béquilles sans prothèse, se trouvaient dans une fourchette confortable de fréquence cardiaque moyenne, à 82 et 91 battements par minute respectivement pour les amputés marchant avec prothèse et pour ceux marchant avec des béquilles sans prothèse. La différence entre ce résultat et les données des études précédentes peut être due au fait que, avant le test, la phase initiale de repos était destinée à la familiarisation avec le système, et entre les deux tests, les patients se reposaient pendant 30 minutes. À ce moment-là, la

fréquence cardiaque normale du patient au repos revient au niveau de base. Cependant, dans une comparaison entre la marche avec prothèse et la marche avec béquilles, il a été observé que la marche avec prothèse était plus stable de 6 % en termes de fréquence cardiaque par rapport à la marche avec béquilles. Dans l'étude de Jessie [17], les auteurs concluent que le coût énergétique de la marche avec prothèse est inférieur à celui de la marche sans prothèse en utilisant des béquilles ou un déambulateur. Notre étude a également montré les mêmes conclusions. La comparaison de la consommation de VO<sub>2</sub> entre prothèse et béquilles a mis en évidence des différences significatives ( $p < 0,005$ ). La comparaison des valeurs de DE/min a elle aussi montré une différence significative ( $p < 0,00001$ ). Nous avons observé que la marche avec prothèse à vitesse choisie par le patient sur surface plane était de 21 % plus efficace en termes de consommation de VO<sub>2</sub> et de 92 % plus efficace en termes de DE/min par rapport à la marche avec béquilles, chez des amputés unilatéraux transtibiaux.

Les résultats ci-dessus suggèrent clairement que la marche avec prothèse est plus efficace que la marche avec béquilles sans prothèse chez des amputés unilatéraux transtibiaux. Cela peut être dû au fait que la prothèse remplace non seulement la partie anatomique perdue d'un point de vue esthétique, mais remplace le poids de la partie perdue du membre le mieux possible. Elle ne requiert pas d'effort supplémentaire des muscles des membres supérieurs et pour soulever le corps etc. Le mouvement du membre avec prothèse est symétrique, et le déplacement du centre de gravité de la tête, des bras et du tronc à la verticale est de faible amplitude puisqu'il est semblable à la marche normale. Les résultats peuvent être dus au fait que la plupart des patients utilisaient une prothèse depuis six mois au moins, pendant lesquels ils ont pu se familiariser avec son utilisation. L'un des groupes d'amputés a choisi la démarche pendulaire avec béquilles qui exige un effort physique élevé comparé à la marche normale et d'autres méthodes de marche avec béquilles. Les bras et la musculature de la ceinture de l'épaule doivent se soulever, puis lancer tout le poids du corps vers l'avant à chaque pas. L'exigence en termes d'énergie métabolique pour soutenir le poids du corps avec les bras et les épaules étaient plus significatifs.

Les résultats de cette étude peuvent trouver une application clinique dans le sens où les béquilles sans prothèse ne devraient pas être utilisées comme moyen permanent de rééducation à la marche chez les patients avec amputation unilatérale transtibiale. La marche avec béquilles sans prothèse selon un schéma à trois points d'appui (qui requiert moins d'efforts comparé aux

démarches pendulaires assistées de béquilles) chez des amputés unilatéraux peut être un moyen de déplacement primaire ou secondaire lorsqu'une prothèse adéquate est indisponible ou inappropriée. Les béquilles peuvent être une option pour les amputés qui choisissent de ne pas porter une prothèse ou lorsqu'ils ne peuvent pas porter leur prothèse suite à un œdème, une irritation de la peau ou un mauvais ajustement de la prothèse. De plus, celles-ci peuvent être simplement utilisées dans un but de stabilité ou de sécurité supplémentaires si certains amputés en ont besoin à cause de conditions pathologiques variées. Mais dans tous les cas de patients avec une amputation unilatérale transtibiale, l'utilisation d'une prothèse sous-gonale devrait être considérée comme la méthode de marche habituelle à acquérir lors de la rééducation, puisqu'elle est plus efficace en termes de consommation d'énergie.

L'hypothèse de cette étude selon laquelle l'utilisation d'une prothèse est plus efficace pour limiter la DE chez les amputés unilatéraux transtibiaux que l'usage des béquilles sans prothèse pour les activités de marche est bien confirmée par nos résultats. Les données de consommation d'oxygène, fréquence cardiaque et DE par minute indiquent clairement que tous les groupes d'amputés sous le genou marchent avec moins d'efforts en utilisant une prothèse. Nous avons montré que la démarche des amputés était 21 % plus efficace en termes de consommation de  $VO_2$  et 92 % plus efficace en termes de DE/min par rapport à la marche avec béquilles à vitesse de marche choisie par les sujets sur terrain plat. On peut ainsi facilement conclure qu'une prothèse bien ajustée permet une marche satisfaisante réduisant de manière significative la demande d'énergie par rapport à l'utilisation de béquilles seules. Cependant, l'utilisation alternée de béquilles ou de prothèses ne peut pas être entièrement rejetée. Certains amputés préfèrent utiliser des béquilles pour les activités d'intérieur où l'augmentation de la DE peut être acceptable compte tenu des petites distances de marche, et recourir à l'utilisation d'une prothèse pour des activités impliquant de plus longs parcours. Puisque la marche avec béquilles exige plus d'efforts que la marche avec prothèse, on ne devrait pas demander aux patients avec une amputation unilatérale transtibiale d'essayer de marcher avec des béquilles sans prothèse de façon permanente, les deux solutions pouvant plutôt être prescrites ensemble.

Voici quelques limites de l'étude :

- un entraînement approprié à la marche avec chacun des deux dispositifs aurait dû être proposé aux participants pour quantifier la DE réelle et exacte, puisque des modèles de démarche différents peuvent altérer le coût énergétique ;
- le test était réalisé pendant dix minutes seulement en trois occasions, ce qui peut être augmenté à une semaine environ pour de meilleurs résultats.

#### Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

#### Remerciements

Cette étude a été réalisée au département de R&D et la section d'entraînement MPO à l'Institut national pour handicapés orthopédiques, Kolkata, avec le soutien financier et technique de l'Institut.

#### References

- [1] Barnett C, Vanicek N, Polman R, Hancock A, Brown B, Smith L. Kinematic gait adaptations in unilateral transtibial amputees during rehabilitation. *Prosthet Orthot Int* 2009;33(2):135–47.
- [2] Brehma MA, Harlaara J, Groepenhof H. Validation of the portable VmaxST system for oxygen-uptake measurement. *Gait Posture* 2004;20(1):67–73.
- [3] Carter J, Kendrup AE. Validity and reliability of three commercially available breath-by-breath respiratory system. *Eur J Appl Physiol* 2002;86:435–41.
- [4] Chow DH, Holmes AD, Lee CK, Sin SW. The effect of prosthesis alignment on the symmetry of gait in subjects with unilateral transtibial amputation. *Prosthet Orthot Int* 2006;30(2):114–28.
- [5] Cordrey LJ, Ford AB, Ferrer MT. Energy expenditure in assisted ambulation. *J Chronic Dis* 1958;7:228–33.
- [6] Datta SR, Chatterjee BB, Ganguli S, Roy BN. Mechanical efficiencies of lower-limb amputees rehabilitated with crutches and prostheses. *Med Biol Eng* 1974.
- [7] Dounis E, Rose GK, Wilson RSE, Steventon RD. A comparison of efficiency of three types of crutches using oxygen consumption. *Rheumatol Rehabil* 1980;19:252–5.
- [8] Duffield R, Dawson B, Pinnington HC, Wong P. Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 portable gas analysis system. *J Sci Med Sport* 2004;7(1):11–22.
- [9] Fisher SV, Patterson RP. Energy cost of ambulation with crutches. *Arch Phys Med Rehabil* 1981;62:250–6.
- [10] Gailey RS, Wenger MA, Raya M, Kirk N, Erbs K, Spyropoulos P, Nash MS. Energy expenditure of transtibial amputees during ambulation at self-selected pace. *Prosthet Orthot Int* 1994;18(2):84–91.
- [11] Ganguli S, Bose KS. Biomechanical approach to the functional assessment of the use of crutches for ambulation. *Ergonomics* 1974;17:365–74.
- [12] Ghosh AK, Tibarewala DN, Dasgupta SR. Metabolic cost of walking at different speeds with axillary crutches. *Ergonomics* 1980;23:571–7.
- [13] Hinton CA, Cullen KE. Energy expenditure during ambulation with Ortho crutches and axillary crutches. *Physical therapy* 1982;62:813–9.
- [14] Ijzerman MJ, Nene AV. Feasibility of the physiological cost index as an outcome measure for the assessment of energy expenditure during walking. *Arch Phys Med Rehabil* 2002;83:1777–82.
- [15] Jia X, Suo S, Meng F, Wang R. Effects of alignment on interface pressure for transtibial amputee during walking. *Disabil Rehabil Assist Technol* 2008;3(6):339–43.
- [16] Lee RYW. Energy expenditure of three-point non-weight bearing walking with axillary crutches and elbow crutches. *Physiother Hong Kong* 1987;9:29–37.
- [17] Lusardi MM, Nielsen C. *Orthotics and prosthetics in rehabilitation*. Butterworth: Heinemann; 2000. p. 53–70.
- [18] McBerth AA, Bahrke M, Balke B. Measurement of efficiency of assisted ambulation determined by oxygen consumption. *J Bone Joint Surg Am* 1974;56:994–1000.
- [19] McLaughlin JE, King GA, Howley ET, Bassett DR, Ainsworth BE. Validation of the COSMED K4 b2 portable metabolic system. *Int J Sports Med* 2001;22(4):280–4.
- [20] Medscape reference, on Gait Analysis After Amputation [<http://emedicine.medscape.com/article/1237638-overview>]
- [21] Nadollek H, Brauer S, Isles R. Outcomes after trans-tibial amputation: the relationship between quiet stance ability, strength of hip abductor muscles and gait. *Physiother Res Int* 2002;7(4):203–14.

- [22] Olney SJ, Bateni H. Effect of the weight of prosthetic components on the gait of transtibial amputees. *JPO* 2004;16(4):113–20.
- [23] O'Young B, Young MA, Stiens SA. *Physical medicine and rehabilitation secrets*, Third Edition, Mosby; 2007. p. 569–26.
- [24] Portnoy S, Yizhar Z, Shabshin N, Itzhak Y, Kristal A, Dotan-Marom Y. Internal mechanical conditions in the soft tissues of a residual limb of a transtibial amputee. *J Biomech* 2008;41(9):1897–909.
- [25] Robert L, Waters MD. The energy expenditure of amputee gait. *Atlas of limb prosthetics: surgical, prosthetic, and rehabilitation principles*, edition 2, Mosby: American Academy of Orthopedic Surgeons; 1992Chapter 15.
- [26] Selles R, Bussmann J, Van Soest AJ, Stam H. The effect of prosthetic mass properties on the gait of transtibial amputees – a mathematical model. *Disabil Rehabil* 2004;26(12):694–704.
- [27] Waters RL, Perry J, Antonelli D, et al. The energy cost of walking of amputees – Influence of level of amputation. *J Bone Joint Surg (Am)* 1976;58:42–6.
- [28] Waters RL, Perry J, Chambers R. Energy expenditure of amputee gait. In: Moore WS, et al., editors. *Lower extremity amputation*. Philadelphia: WB Saunders Co; 1989. p. 250–60.