

Review Article

Effect of somatosensory impairments on balance control

Nastaran Ghotbi, Alireza Hassanpour

Department of Physiotherapy, School of Rehabilitation, Tehran University of Medical Sciences, Iran

Received: 13 May 2012, accepted: 10 September 2012

Abstract

Background and Aim: The somatosensory system is one of the most effective systems in balance control. It consists of peripheral and central components. Knowing the role of these components in balance control assists the developing of effective rehabilitation protocols. In some diseases peripheral components and in others central components are impaired. This paper reviews the effect of impairment of peripheral and central components of the somatosensory system on balance control.

Methods: In this study publication about somatosensory impairments from 1983 through 2011 in PubMed, Scopus, ProQuest, Google Scholar, Iran Medex, Iran Doc and Magiran were reviewed. Medical subject headings terms and keywords related to balance, somatosensory, somatosensory loss, and sensory integration/processing were used to perform the searches.

Conclusion: Somatosensory impairments either with peripheral or central origin, can cause problems in balance control. However, these problems are not considered in some patients. In these impairments, balance training is recommended to be used alongside other routine treatments in the patients' rehabilitation programs.

Keywords: Balance disorder/balance impairment, somatosensory loss, sensory processing

Corresponding author: Department of Physiotherapy, School of Rehabilitation, Tehran University of Medical Sciences, Nezam Alley, Shahid Shahnazari St., Madar Square, Mirdamad Blvd., Tehran, 15459-13487, Iran. Tel: 009821-22228051-2 ext. 382, E-mail: nghotbi@tums.ac.ir

تأثیر اختلالات سیستم حسی پیکری بر کنترل تعادل

نسترن قطبی، علیرضا حسن‌پور

گروه فیزیوتراپی، دانشکده توانبخشی دانشگاه علوم پزشکی تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: سیستم حسی پیکری یکی از مهم‌ترین دستگاه‌های مؤثر در حفظ تعادل است. این سیستم از اجزاء محیطی و مرکزی تشکیل شده است. دانستن نقش هر یک از این اجزاء در کنترل تعادل، به طراحی پروتکل‌های توانبخشی مؤثر کمک می‌کند. در برخی بیماری‌ها اجزاء محیطی و در برخی دیگر اجزاء مرکزی، دچار اختلال می‌شود. این مقاله تأثیر اختلال عملکرد اجزاء محیطی سیستم حسی پیکری را در کنار اختلال عملکرد اجزاء مرکزی آن بر تعادل مرور می‌کند.

روش بررسی: در این مطالعه به بررسی مقالات مختلفی که از سال ۱۹۸۳ تا سال ۲۰۱۱ پیرامون اختلالات حس پیکری نوشته شده است، پرداخته می‌شود. از بانک‌های اطلاعاتی PubMed، Scopus ProQuest، Magiran، Iran Doc، Iran Medex و Google Scholar استفاده شد. از واژه‌های Medical Subject Heading و کلمات کلیدی مرتبط با اختلال تعادل، حس پیکری، فقدان حس پیکری و پردازش حسی در ترکیبات مختلف برای انجام جستجو استفاده شد.

نتیجه‌گیری: اختلالات سیستم حسی پیکری خواه با منشأ محیطی و یا مرکزی، سبب بروز مشکل در حفظ تعادل می‌شوند. با این وجود در برخی موارد این مسئله مورد توجه قرار نمی‌گیرد. توصیه می‌شود در این اختلالات؛ در کنار سایر درمان‌های رایج استفاده از تمرینات تعادلی نیز حتماً در برنامه‌های توانبخشی بیماران گنجانده شود.

واژگان کلیدی: اختلال تعادل، فقدان حس پیکری، پردازش حسی

(دریافت مقاله: ۹۱/۲/۲۴، پذیرش: ۹۱/۶/۲۰)

مقدمه

در افراد سالم سیستم پیکری حسی ۷۰ درصد، سیستم دهلیزی ۲۰ درصد و سیستم بینایی ۱۰ درصد اطلاعات حسی لازم برای حفظ تعادل روی سطح باثبات را بر عهده دارند (۷۰). در موارد حفظ تعادل روی سطوح ناپایدار، درصد مشارکت سیستم پیکری حسی کاهش و دو سیستم دیگر افزایش می‌یابد. یکپارچه‌سازی (integration) اطلاعات محیطی گیرنده‌های حسی بر عهده سیستم عصبی مرکزی (Central Nervous System: CNS) است و به آن پردازش حسی (sensory processing) می‌گویند (۹۰۸). از آنجایی که هر یک از سیستم‌های فوق به تنهایی قادر به تأمین اطلاعات کامل در خصوص وضعیت و حرکت بدن برای CNS به‌منظور کنترل پوسچر (posture)

تعادل (balance) عبارت است از توانایی کنترل مرکز جرم بدن روی سطح تکیه‌گاه در محدوده‌ای که بدن دارای ثبات است. به عبارت دیگر، تعادل فرایند پیچیده‌ای است که به هماهنگی چندین جزء حسی، حرکتی و بیومکانیکی وابسته است (۱). بنابراین، تعادل یک فعالیت چندحسی است. حس تعادل ما از زمان رشد جنینی تا بزرگسالی، نتیجه عملکرد درست سیستم حسی پیکری (somatosensory)، دهلیزی (vestibular) و بینایی است (۵-۲).

حس پیکری، سیستمی است که از پوست، عضلات و مفاصل منشأ می‌گیرد. این سیستم اطلاعات مکانی داخل و خارج بدن را برای مغز برای حفظ تعادل تأمین می‌کند. گفته می‌شود که

در این مطالعه، مقالاتی که از سال ۱۹۸۳ تا سال ۲۰۱۱ میلادی درباره اختلالات حسی پیکری چاپ شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. همه مقالات با کلیدواژه‌های تعادل (balance)، اختلالات حسی پیکری (somatosensory/sensory, disturbances/loss)، تعادل اختلالات (balance disorders/impairments)، کاهش حس پیکری reduced/loss somatosensation و پردازش حسی در ترکیب‌های مختلف در Scholar Google، Pubmed، Iran Medex و Iran Doc، Magiran، Scopus، ProQuest به دست آمدند. مقالاتی که این اختلالات را از دید بالینی در سکتۀ مغزی، نوروپاتی دیابتی، MS و سالمندان بررسی کرده بودند، انتخاب شدند.

اختلالات تعادل در بیماران سکتۀ مغزی

۷۳ درصد بیماران سکتۀ مغزی در شش ماه اول بعد از ترخیص از بیمارستان، به علت مشکلات ناشی از اختلالات حسی، حرکتی، شناختی، بینایی و پردازش حسی زمین می‌خورند (۱۱ و ۱۲). از این رو، ارزیابی تعادل این بیماران قبل از طراحی برنامه توانبخشی ضروری است. در ارزیابی تعادل در موارد سخت بودن سطح اتکا باید تاکتیک مچ پا (ankle strategy) مورد استفاده قرار گیرد. این تاکتیک برای کنترل تغییرات حرکات نوسانی کوچک به کار می‌رود. با نزدیک کردن پاها به یکدیگر و افزایش سرعت یا دامنه نوسان‌ها، تاکتیک حرکتی مفصل ران آغاز می‌شود. افراد باید در این وضعیت قادر به حفظ تعادل خود با تاکتیک مچ پا و اندکی تاکتیک ران باشند. استفاده نکردن از تاکتیک مچ پا یا استفاده از تاکتیک حرکتی گام برداشتن در این وضعیت دلالت بر اختلال در توانایی تولید پاسخ‌های پوسچرال خودکار دارد. نداشتن کنترل تنه به همراه اختلال عملکرد اندام فوقانی و نیز تعادل لگن خاصره سبب ناتوانی در نگهداری وزن بدن می‌شود.

سکته‌های شریان مغزی میانی سبب اختلال آگاهی حس عمقی در سطح قشری (cortical) می‌شود. گرچه تمام حس‌ها می‌توانند درگیر شوند، اما حس عمقی و تشخیص دو نقطه مجزا

نیستند، یکپارچگی اطلاعات این سیستم‌هاست که مانع از زمین خوردن می‌شود. بعد از یکپارچگی، ارزیابی و انتخاب اطلاعات حسی مناسب، CNS تاکتیک‌های (strategy) حرکتی مناسبی (تاکتیک مفصل مچ پا، مفصل ران و گام برداشتن) را تولید می‌کند. در نتیجه، توانایی حفظ تعادل به تولید تاکتیک‌های حرکتی مناسب نیز بستگی دارد.

از آنجایی که اجزای مختلف سیستم مذکور نقش گسترده‌ای در کنترل تعادل بر عهده دارند، اختلالات سیستم حسی پیکری طیف بسیار وسیعی را شامل می‌شود و شاید بتوان آنها را در دو دستۀ نورولوژیک و ارتوپدیک قرار داد. از این میان، برخی اختلالات نظیر سکتۀ مغزی و اسکروز متعدد منشأ مرکزی و برخی دیگر نظیر نوروپاتی‌ها، وجود دردهای مفصلی و سالمندی منشأ محیطی دارند. افراد دارای ضایعۀ CNS (سکتۀ مغزی و MS) به علت نقص در پردازش حسی و یا برنامه‌ریزی حرکتی، اختلال تعادل یا راه رفتن دارند (۱۰) و در نتیجه خطر افتادن در آنها زیاد است. در افرادی با اختلالات بینایی، دهلیزی و یا حسی پیکری که اساساً ضایعۀ CNS دارند، ناتوانی گیرنده‌های حسی برای کسب اطلاعات محیطی سبب ناتوانی در کنترل مناسب پوسچر می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت که اختلال تعادل می‌تواند به علت ضایعۀ هر یک از ساختارهای درگیر در پردازش اطلاعات، اعم از ورودی‌های حسی پیکری، بینایی، دهلیزی، یکپارچگی حسی و یا تولید پاسخ‌های حرکتی، ایجاد شود.

این مطالعه با هدف مرور مقالاتی که به بررسی تأثیر اختلال سیستم حسی پیکری بر تعادل می‌پردازند انجام شد. مقالات یافت شده، هر یک از بیماری‌ها را به تفکیک مورد مطالعه قرار داده بودند. در این مطالعه، مقالاتی که اختلال تعادل را در بیماران مبتلا به سکتۀ مغزی، اسکروز متعدد، نوروپاتی دیابتی و سالمندان بررسی کرده بودند، در کنار هم مرور شدند تا دیدگاه جامع‌تری از تأثیر اختلالات حسی پیکری (خواه با منشأ محیطی و یا مرکزی) بر تعادل به‌طور هم‌زمان در یک مقاله واحد فراهم آید.

روش بررسی

پوسچرال غیرطبیعی که ناشی از هدایت عصبی آهسته‌تر از حد طبیعی در سیستم حسی پیکری و میلین‌زدایی (demyelination) در ستون خلفی طناب نخاعی است، در این بیماران مشاهده می‌شود (۲۲). وجود پتانسیل‌های عمل چندفازی و با دامنه کم و تأخیر در هدایت عصب حرکتی (ناشی از میلین‌زدایی اکسون)، اختلال در ماده سفید مناطق اطراف بطنی و جسم پینه‌ای (corpus callosum) نیز از دیگر مواردی است که در بیماران MS گزارش می‌شود (۲۳).

یکی از علل کاهش تعادل در افراد مبتلا به MS کاهش حس کف پا است. اختلال در فیبرهای عصبی صعودی ناشی از کاهش حس‌های لمس فشاری ملایم، عمقی (proprioception) و ارتعاش (vibration) از عوامل مهم اختلال تعادل این بیماران به‌ویژه در وضعیت ایستاده است (۲۴ و ۲۵). در بیماران که حس عمقی ندارند، انرژی بیشتری برای حفظ تعادل ایستاده صرف می‌شود (۲۶). نبود تعادل در حالت نشسته ناشی از نقص در پردازش مرکزی علاوه بر تأخیر در هدایت عصبی اندام تحتانی است (۲۷). با توجه به این موارد منطقی به نظر می‌رسد که شیوع زمین خوردن در این بیماران ۵۲ درصد گزارش شده است (۲۸). بسیاری از نشانه‌های بیماری با افزایش خطر زمین خوردن همراه هستند. در این بیماران به‌دلیل مصرف استروئیدها و کمی فعالیت فیزیکی، بروز پوکی استخوان بالاست و افتادن می‌تواند سبب بروز ضایعه شود. این مسئله اهمیت تمرینات تعادلی را پررنگ‌تر می‌کند.

اختلالات تعادل در بیماران مبتلا به نوروپاتی دیابتی

یکی از مشکلات شایع در بیماران دیابتی، نوروپاتی اعصاب محیطی است که به‌صورت درد یا بی‌حسی یا تحریک‌پذیری بروز می‌کند. اختلال حس پیکری به‌صورت فقدان حس وضعیت، ارتعاش و لمس وجود دارد (۲۹). در این بیماران در مقایسه با افراد سالم آستانه درک حرکت غیرفعال (passive) مفصل افزایش می‌یابد (۳۰). همچنین کنترل پوسچر در حالت ایستاده ساکن در دو وضعیت چشم باز و چشم بسته ضعیف‌تر از افراد عادی است. انحراف تنه بیماران دیابتی حتی در موارد باز

معمولاً بیشتر از درک درد و حرارت در اندام‌های سمت مقابل ضایعه، مختل می‌شوند. در این نوع از سکتۀ مغزی، اختلال در راه رفتن رایج است (۱۳). فقدان حس عمقی به مقدار زیادی مانع از بهبود حرکتی بعد از سکتۀ می‌شود. فقدان حس همچنین می‌تواند به‌صورت انکار (neglect) سمت مبتلا وجود داشته باشد. اختلالات حسی با تعادل و استقلال عملکردی فرد رابطه دارد (۱۴ و ۱۵). بیماران که اختلالات حسی و حرکتی دارند در یک دوره زمانی مشخص، در مقایسه با بیماران که فقط اختلالات حرکتی دارند، کمتر نتایج درمانی مطلوب را کسب می‌کنند (۱۴). ضعف عضلانی (hemiparesis) هم در طرف مقابل ضایعه و هم در سمت ضایعه (۱۶) وجود دارد. خود ضایعه وارد بر مناطق قشری به‌دلیل اختلال و کندی زمان پردازش اطلاعات حسی می‌تواند سبب افزایش تعداد دفعات افتادن بیماران شود (۱۱). تمام این عوامل شامل ناکفایتی در پردازش اطلاعات حسی، ضعف یا کوتاهی عضلات، تون عضلانی غیرطبیعی و یا مشکلات شناختی، در اختلالات راه رفتن و تعادل مشارکت دارند (۱۷، ۱۲، ۱۸) و سبب می‌شوند تا این بیماران بیشتر از منابع توجهی (attention) resources خود برای حفظ تعادل استفاده کنند. در کل، اختلال در وزن‌اندازی مجدد و یکپارچگی اطلاعات آوران‌ها به‌همراه ضعف عضلانی، در بی‌ثباتی پوسچرال و افزایش تعداد زمین خوردن این بیماران مشارکت دارند. در بیماران سالمند کاهش حس پیکری ناشی از افزایش سن (۱۹ و ۲۰)، حفظ تعادل را با چالش بیشتری مواجه می‌کند.

اختلالات تعادل در بیماران مبتلا به اسکروز متعدد

تقریباً ۷۵ درصد بیماران اسکروز متعدد درجاتی از مشکلات تعادلی را در دوره بیماری خود گزارش می‌کنند (۲۱). این اختلال تعادل عملکرد بیمار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این بیماری نقاط مختلفی از CNS شامل نخاع، سیستم حسی، مخچه، سیستم حرکتی، سیستم بینایی و دهلیزی می‌تواند درگیر شود (۲۲). از این رو، هرچه تعداد این سیستم‌ها بیشتر باشد، اختلال بیشتری در تعادل ایجاد شده و جبران آن نیز مشکل‌تر می‌شود. پاسخ‌های

(sway) بدن را افزایش می‌دهد و این عوامل از اصلی‌ترین دلایل کاهش تعادل افراد مسن هستند. همچنین کاهش سرعت انتقال پیام عصبی و افزایش زمان عکس‌العمل، با کاهش کنترل عصبی عضلانی در این افراد بر تعادل آنان اثر می‌گذارد (۳۴ و ۳۵). برخی مطالعات نشان داده‌اند که اختلال تعادل این افراد می‌تواند به علت تغییر در فراخوانی فضایی و زمانی عضلاتی باشد که مسئول حفظ تعادل هستند (۳۶). از دیگر عواملی که می‌تواند بر تعادل اثر بگذارد، مشکلات سیستم عضلانی اسکلتی است. برای مثال، تخریب مفصل زانو (knee osteoarthritis) می‌تواند از طریق چندین مکانیسم شامل درد، ضعف عضلانی، کوتاهی مفصل در وضعیت خم شده (flexion contracture) و کاهش حس عمقی سبب اختلال تعادل سالمندان شود (۳۷). ناهنجاری‌های پا نظیر بیرون‌زدگی مفصل انگشت شست پا (bunion) که منجر به راه رفتن غیرطبیعی می‌شود نیز با کاهش حس عمقی می‌تواند حفظ تعادل را با مشکل مواجه کند (۳۸).

گفته می‌شود که در سیستم حسی پیکری سالمندان، تغییرات آناتومیکی و فیزیولوژیکی صورت می‌گیرد (۳۹). برای مثال در دوک‌های عضلانی افزایش ضخامت کپسول، کاهش تعداد فیبرهای داخل دوکی و کاهش قطر دوک دیده شده است. همچنین صفحات حرکتی انتهایی (motor end plate) وسیع‌تر می‌شوند. این تغییرات به از دست دادن عصب (denervation) نسبت داده می‌شود. البته تغییرات مورفولوژیک دوک‌ها فقط در برخی عضلات (دلتوئید و اکستانسور دی‌ترتروم برویس) و در سنین خیلی بالا (۸۰ سال به بالا) گزارش شده است. از سویی تعداد گیرنده‌های پاچینی و مایسنر هم کاهش می‌یابد. در مجموع این تغییرات منجر به کاهش عملکرد فیزیولوژیک افراد در سنین بالا می‌شود.

نتیجه‌گیری

در اختلالات تعادلی، از دیدگاه توانبخشی مهم‌ترین عامل، تعیین علت اختلال است. برهم‌خوردگی تعادل می‌تواند ناشی از مشکلات حسی پیکری، بینایی، دهلیزی، عضلانی اسکلتی یا

بودن چشم‌ها بیشتر از افراد سالم است که این مسئله نشان می‌دهد حس بینایی نمی‌تواند به‌طور کامل کمبود حس پیکری را جبران کند.

مطالعات نشان داده است بین شدت نوروپاتی ناشی از دیابت و بی‌ثباتی پوسچرال ارتباط خطی وجود دارد. فیبرهای گروه $A\beta$ نه تنها عصب‌دهی گیرنده‌های پوستی [شامل گیرنده‌های تماسی با نوک پهن (Merkel discs)، گیرنده‌های پاچینی (Pacinian) و مایسنر (Meissner) و پایانه‌های رافینی (Ruffini end organs)]، بلکه همچنین عصب‌دهی دوک‌های عضلانی، گیرنده‌های مفصلی رافینی و گیرنده‌های مفصلی پاچینی را بر عهده دارند. به عبارتی، فیبرهای $A\beta$ عهده‌دار حس لمس و همچنین حس عمقی هستند. گفته می‌شود در حفظ تعادل ایستاده ساکن، گیرنده‌های کندسازش (گیرنده‌های تماسی نوک‌پهن و پایانه‌های رافینی) نقش کلیدی‌تری از گیرنده‌های تندسازش (گیرنده‌های پاچینی و مایسنر) دارند. بنابراین بیماران دیابتی که درگیری هر دو فیبر $A\alpha$ و $A\beta$ را دارند بر خلاف بیماری‌های نوروپاتی نظیر شارکوماری توت نوع A1 که فقط درگیری فیبرهای α را دارند، ثبات پوسچرال خوبی ندارند (۳۱).

اختلالات تعادل در سالمندان

۳۰ درصد افراد بالای ۶۵ سال، سالی یک‌بار زمین می‌خورند. پنج درصد این زمین خوردن‌ها منجر به شکستگی می‌شود. مشکل فقط شکستگی استخوان‌ها نیست بلکه اعتماد به نفس بیماران برای راه رفتن کاهش می‌یابد (۳۲). با افزایش سن سیستم تعادلی دستخوش تغییرات خاصی می‌شود، برای مثال حس ارتعاش پوستی و حس وضعیت مفصل در سالمندان کاهش می‌یابد. مطالعات نشان داده است که بین سنین ۳۰ تا ۸۰ سالگی، حجم عضلانی ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. این مسئله باعث کاهش قدرت عضلانی شده و در اندام تحتانی باعث کاهش تعادل می‌شود (۳۳).

کاهش قدرت عضلات دورسی فلکسور میچ پا، کاهش حس‌های لمس، وضعیت مفصل و حس عمقی، میزان نوسانات

می‌شود (۲۲ و ۲۴). با توجه به مصرف داروهای استروئیدی متعدد که بروز پوکی استخوان را افزایش می‌دهد، پیشگیری از زمین خوردن این بیماران مورد تأکید است. در نوروپاتی‌های دیابتی از سویی فقدان حس وضعیت، ارتعاش و لمس و از سوی دیگر مشکلات بینایی می‌تواند تعادل را مختل کند (۲۹). در سالمندان کاهش حس ارتعاش پوستی و حس وضعیت مفصل از سویی و کاهش قدرت عضلات و توان بینایی از سوی دیگر در حفظ تعادل اختلال ایجاد می‌کند (۳۴ و ۳۵). علاوه بر این افرادی که تخریب مفصلی دردناک دارند، به دلیل تغییرات مفصلی و عضلانی ناشی از آن مشکلات تعادلی بیشتری را تجربه می‌کنند (۳۷). در برخی از سالمندان علاوه بر این موارد به علت وجود مشکلات شناختی یا سکتۀ مغزی، اختلال تعادل زیاد سبب افزایش دفعات زمین خوردن می‌شود. این امر به نوبۀ خود با توجه به شیوع بالای پوکی استخوان در افراد مسن، با ایجاد شکستگی‌های متعدد، اعتماد به نفس آن‌ها برای راه رفتن را متزلزل می‌کند (۳۲) و با ترغیب بیمار به بی‌حرکی چرخۀ معیوبی در حفظ تعادل سالمندان ایجاد می‌کند.

با توجه به نقش سیستم حسی پیکری در حفظ تعادل بیماران مبتلا به سکتۀ مغزی، MS، نوروپاتی دیابتی و سالمندان، لازم است در این بیماران پس از ارزیابی تعادل، تمرینات تعادلی مناسب در برنامه‌های توانبخشی بیمار گنجانده شود.

شناختی (ترس از افتادن) باشد. از این میان، اختلالات سیستم حسی پیکری طیف وسیعی را دربرمی‌گیرد؛ از بیماری‌های با منشأ مرکزی نظیر سکتۀ مغزی و اسکروز متعدد گرفته تا بیماری‌های با منشأ محیطی نظیر نوروپاتی‌های دیابتی. این اختلالات در سالمندان در بیشتر موارد منشأ محیطی دارد، هر چند در برخی سالمندان ترکیبی از عوامل محیطی و مرکزی وجود دارند که سبب افزایش دفعات زمین خوردن آنان می‌شود. این مرور نشان داد که اختلالات حسی پیکری در هر یک از بیماری‌های گفته شده در بالا به نوعی سبب برهم‌خوردن تعادل می‌شوند. در سکتۀ مغزی ضایعۀ وارد بر مناطق قشری با کند کردن پردازش مرکزی اطلاعات و بروز تون عضلانی غیرطبیعی، تعادل بیماران را مختل می‌کند (۱۱). از سویی اختلال حس عمقی و نیز انکار سمت مبتلا، حفظ تعادل را با چالش بیشتری مواجه می‌کند، به‌گونه‌ای که بیماران مبتلا به اختلالات حسی و حرکتی در یک دورۀ زمانی مشخص نسبت به بیمارانی که فقط اختلالات حرکتی دارند، کمتر نتایج درمانی مطلوب را کسب می‌کنند (۱۴). به این ترتیب می‌توان گفت که برهم‌خوردگی تعادل بیماران مبتلا به سکتۀ مغزی، ناشی از اختلال در هر سه عامل مؤثر در حفظ پوسچر یعنی اطلاعات آوران‌ها، پردازش مرکزی و تاکتیک‌های حرکتی است. در بیماران MS درگیری مناطق مختلف CNS سبب بروز مشکلات حسی متعدد، ضعف یا اسپاستیسیته عضلانی و تاری دید

REFERENCES

- Nashner LM. Practical biomechanics and physiology of balance. In: Jacobson GP, Newman CW, Kartush JM, editors. Handbook of balance function and testing. 1st. Louis: Mosby Year Book; 1993. p. 261-79.
- Hijmans JM, Geertzen JH, Dijkstra PU, Postema K. A systematic review of the effects of shoes and other ankle or foot appliances on balance in older people and people with peripheral nervous system disorders. *Gait Posture*. 2007;25(2):316-23.
- Maurer C, Mergner T, Bolha B, Hlavacka F. Human balance control during cutaneous stimulation of the plantar soles. *Neurosci Lett*. 2001;302(1):45-8.
- Guskiewicz Km, Perrin DH. Research and clinical applications of assessing balance. *J Sport Rehabil*. 1996;5(1):45-63.
- Schiffman HR. Sensation and perception: an integrated approach. 5th ed. New York: John Wiley & Sons; 2001.
- Kars HJ, Hijmans JM, Geertzen JH, Zijlstra W. The effect of reduced somatosensation on standing balance: a systematic review. *J*

- Diabetes Sci Technol. 2009;3(4):931-43.
7. Peterka RJ. Sensorimotor integration in human postural control. *J Neurophysiol.* 2002;88(3):1097-118.
 8. Bray JJ, Cragg PA, Macknight ADC, Mills RG. Lecture notes on human physiology. 4th ed. Oxford: Blackwell Science; 1999.
 9. Kavounoudias A, Roll R, Roll JP. The plantar sole is a 'dynamometric map' for human balance control. *Neuroreport.* 1998;9(14):3247-52.
 10. Bohannon RW. Evaluation and treatment of sensory and perceptual impairments following stroke. *Top Geriatr Rehabil.* 2003;19(2):87-97.
 11. Marigold DS, Eng JJ, Tokuno CD, Donnelly CA. Contribution of muscle strength and integration of afferent input to postural instability in persons with stroke. *Neurorehabil Neural Repair.* 2004;18(4):222-9.
 12. Oliveira CB, Medeiros IR, Greters MG, Frota NA, Lucato LT, Scaff M, et al. Abnormal sensory integration affects balance control in hemiparetic patients within the first year after stroke. *Clinics (Sao Paulo).* 2011;66(12):2043-8.
 13. Gillen G, Burkhardt A. Stroke rehabilitation: a function-based approach. 2nd ed. St. Louis Mosby; 2004.
 14. Smith DL, Akhtar AJ, Garraway WM. Proprioception and spatial neglect after stroke. *Age Ageing.* 1983;12(1):63-9.
 15. Nogaki H, Ohba Y, Matsumoto K, Morimatsu M, Fukuoka Y. Statistical analysis of post-stroke patients in a rehabilitation institution. *Nihon Ronen Igakkai Zasshi.* 1991;28(5):678-82. Japanese.
 16. Adams RW, Gandevia SC, Skuse NF. The distribution of muscle weakness in upper motoneuron lesions affecting the lower limb. *Brain.* 1990;113(Pt 5):1459-76.
 17. Ghotbi N, Olyaei GR, Hadian MR, Ansari NN, Bagheri H. Is there any relationship between the Modified Ashworth Scale scores and alpha motoneuron excitability indicators? *Electromyogr Clin Neurophysiol.* 2006;46(5):279-84.
 18. Ghotbi N, Hadian MR, Olyaei GR, Bagheri H, Talebian S, Nakhostin-Ansari N, Nafissi S. The investigation of criterion validity of the Modified Ashworth Scale using the alpha motoneuron excitability indicators. *Acta Medica Iranica.* 2007;45(4):290-4.
 19. Desrosiers J, Hébert R, Bravo G, Dutil E. Hand sensibility of healthy older people. *J Am Geriatr Soc.* 1996;44(8):974-8.
 20. Kaplan FS, Nixon JE, Reitz M, Rindfleish L, Tucker J. Age-related changes in proprioception and sensation of joint position. *Acta Orthop Scand.* 1985;56(1):72-4.
 21. www.msaustralia.org.au/documents/MS-Practice/balance for people with multiple sclerosis, June 2009.
 22. Cameron MH, Horak FB, Herndon RR, Bourdette D. Imbalance in multiple sclerosis: a result of slowed spinal somatosensory conduction. *Somatosens Mot Res.* 2008;25(2):113-22.
 23. Schmierer K, Niehaus L, Röricht S, Meyer BU. Conduction deficits of callosal fibres in early multiple sclerosis. *J Neurol Neurosurg Psychiatry.* 2000;68(5):633-8.
 24. Citaker S, Gunduz AG, Guclu MB, Nazliel B, Irkec C, Kaya D. Relationship between foot sensation and standing balance in patients with multiple sclerosis. *Gait Posture.* 2011;34(2):275-8.
 25. Frzovic D, Morris ME, Vowels L. Clinical tests of standing balance: performance of persons with multiple sclerosis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2000;81(2):215-21.
 26. Rougier P, Faucher M, Cantalloube S, Lamotte D, Vinti M, Thoumie P. How proprioceptive impairments affect quiet standing in patients with multiple sclerosis.

- Somatosens Mot Res. 2007;24(1-2):41-51.
27. Cameron MH, Lord S. Postural control in multiple sclerosis: implications for fall prevention. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2010;10(5):407-12.
28. Finlayson ML, Peterson EW, Cho CC. Risk factors for falling among people aged 45 to 90 years with multiple sclerosis. *Arch Phys Med Rehabil.* 2006;87(9):1274-9.
29. Kars HJ, Hijmans JM, Geertzen JH, Zijlstra W. The effect of reduced somatosensation on standing balance: a systematic review. *J Diabetes Sci Technol.* 2009;3(4):931-43.
30. Simoneau GG, Ulbrecht JS, Derr JA, Becker MB, Cavanagh PR. Postural instability in patients with diabetic sensory neuropathy. *Diabetes Care.* 1994;17(12):1411-21.
31. Nardone A, Tarantola J, Miscio G, Pisano F, Schenone A, Schieppati M. Loss of large-diameter spindle afferent fibres is not detrimental to the control of body sway during upright stance: evidence from neuropathy. *Exp Brain Res.* 2000;135(2):155-62.
32. Runge M, Rehfeld G, Resnicek E. Balance training and exercise in geriatric patients. *J Musculoskeletal Neuronal Interact.* 2000;1(1):61-5.
33. Carter ND, Kannus P, Khan KM. Exercise in the prevention of falls in older people: a systematic literature review examining the rationale and the evidence. *Sports Med.* 2001;31(6):427-38.
34. Perrin PP, Gauchard GC, Perrot C, Jeandel C. Effects of physical and sporting activities on balance control in elderly people. *Br J Sports Med.* 1997;33(2):121-6.
35. Lord SR, Clark RD, Webster IW. Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons. *J Gerontol.* 1991;46(3):M69-76.
36. Shumway-Cook A, Gruber W, Baldwin M, Liao S. The effect of multidimensional exercises on balance, mobility and fall risk in community-dwelling older adults. *Phys Ther.* 1997;77(1):46-57.
37. Hinman RS, Bennell KL, Metcalf BR, Crossley KM. Balance impairments in individuals with symptomatic knee osteoarthritis: a comparison with matched controls using clinical tests. *Rheumatology (Oxford).* 2002;41(12):1388-94.
38. Soriano TA, DeCherrie LV, Thomas DC. Falls in the community-dwelling older adult: a review for primary-care providers. *Clin Interv Aging.* 2007;2(4):545-53.
39. Shaffer SW, Harrison AL. Aging of the somatosensory system: a translational perspective. *Phys Ther.* 2007;87(2):193-207.