

A Review on the Effectiveness of Virtual Reality-Based Exercise Programs for Vestibular Dysfunction

Bahareh Khavarghazalani¹ , Mansoureh Adel Ghahraman*² 

1. PhD Candidate, Department of Audiology, School of Rehabilitation, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Audiology, School of Rehabilitation, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 2020.September.09 **Revised:** 2020.October.03 **Accepted:** 2020.October.05 **Published Online:** 2020.October.13

ABSTRACT

Background and Aims: Virtual reality technology creates the sensory complexity of the physical world in a controlled laboratory environment. Today, this technology has been considered in the vestibular rehabilitation program. In virtual reality vestibular rehabilitation, various stimuli with different levels of complexity are presented to the individual in a safe environment that is not possible to provide in real conditions. Here, we introduced various virtual reality technologies used in vestibular rehabilitation programs along with their findings, advantages, and disadvantages.

Materials and Methods: We searched all articles in Medline (Pubmed), Google scholar, Science Direct, and Cochrane databases using the following keywords: “vestibular rehabilitation”, “vertigo rehabilitation”, “vestibular dysfunction rehabilitation”, and “virtual reality rehabilitation” without date limitation.

Conclusion: Virtual-based rehabilitation programs appear to not only decrease vestibular symptoms similar to the traditional vestibular programs, but because of their interesting features, they develop more active participation and satisfaction in patients. Moreover, virtual programs with increased immersion create extensive sensory conflicts between vestibular and visual system that eventually results in faster, better, and longer-lasting compensation in central vestibular system.

Keywords: Vestibular system; vestibular disorder; vestibular-virtual rehabilitation; vestibular compensation

How to cite this article: Bahareh Khavarghazalani, Mansoureh Adel Ghahraman. A review on the effectiveness of virtual reality-based exercise programs for vestibular dysfunction. *J Rehab Med.* 2020; 9(3):317-327.

*Corresponding Author: Mansoureh Adel Ghahraman. Department of Audiology, School of Rehabilitation, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Email: madel@tums.ac.ir

مروری بر کارایی توانبخشی مبتنی بر واقعیت مجازی در درمان اختلال دهلیزی

بهاره خاورغزلانی^۱، منصوره عادل قهرمان^{۲*}

۱. دانشجوی دکترا، گروه شنوایی شناسی، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
 ۲. استادیار، گروه شنوایی شناسی، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

پذیرش مقاله ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

بازنگری مقاله ۱۳۹۹/۰۷/۱۲

دریافت مقاله ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

چکیده

مقدمه و اهداف: تکنولوژی واقعیت مجازی پیچیدگی حسی جهان فیزیکی را در محیط کنترل شده آزمایشگاه ایجاد می کند. امروزه این تکنولوژی در برنامه توانبخشی دهلیزی مورد توجه قرار گرفته است. در توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی تحریکات متنوع با سطوح مختلف پیچیدگی در محیط ایمن برای فرد ارائه می گردد که در شرایط واقعی ارائه این تحریکات امکان پذیر نیست. هدف مقاله حاضر، مرور تکنولوژی های مختلف واقعیت مجازی در زمینه توانبخشی دهلیزی، یافته های بالینی حاصل از کاربرد آنها به همراه مزایا و معایب هر یک است.

مواد و روش ها: جستجو در پایگاه های اطلاعاتی (PubMed)، Medline، Google scholar، Science Direct و Cochrane با کلیدواژه های Vestibular Rehabilitation، Vestibular Rehabilitation، Vertigo Rehabilitation، Vestibular Dysfunction Rehabilitation و Virtual Reality Rehabilitation بدون محدودیت سال انجام شد.

نتیجه گیری: به نظر می رسد استفاده از واقعیت مجازی علاوه بر ایجاد نتایج مشابه با برنامه های مرسوم در کاهش علائم دهلیزی، به دلیل جذابیت سبب مشارکت فعال تر و رضایتمندی بیشتر بیماران می شود. همچنین، این تکنولوژی ها با افزایش غوطه وری، تعارض حسی زیادی بین دستگاه دهلیزی و سیستم بینایی ایجاد می کنند که در نهایت باعث رخداد سریع تر، بهتر و پایدارتر جبران دستگاه دهلیزی مرکزی می گردد.

واژه های کلیدی: دستگاه دهلیزی؛ اختلال دهلیزی؛ توانبخشی مبتنی بر واقعیت مجازی؛ جبران دهلیزی

نویسنده مسئول: منصوره عادل قهرمان، استادیار، گروه شنوایی شناسی، دانشکده توانبخشی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
 آدرس ایمیل: madel@tums.ac.ir

مقدمه و اهداف

بنیایی مورد توجه قرار می‌گیرد زیرا ورودی‌های بینایی در پردازش اطلاعات تقدم دارند.^[۶، ۱۲] همچنین در این مکانیسم، می‌توان به جانشینی ورودی دیگری در حس دهلیزی برای فعال کردن همان پاسخ حرکتی اشاره کرد، به‌طور مثال، جانشین کردن پاسخ اتولیتی سالم به‌جای پاسخ از دست‌رفته مجاری نیم‌دایره یا جانشین کردن رفلکس گردنی-چشمی در غیاب رفلکس دهلیزی چشمی زاویه‌ای.^[۶] ^[۱۳، ۹] جانشینی حرکتی کمتر شناخته شده است؛ با این حال، مواردی را می‌توان مطرح کرد. پیش‌رمزگذاری (*pre-coding*) خودکار نگاه خیره، ساکاد پنهان نیز نامیده می‌شود و به عبارت دیگر، عاملی است که به جبران فاز کند نیستاگموس کمک می‌نماید. تمرینات عادت‌پذیری از طریق تکرار حرکات خاصی که باعث سرگیجه می‌شود، سبب کاهش علائم می‌شود. به نظر می‌رسد علت آن کاهش دامنه پتانسیل‌های پس‌سیناپسی تحریکی است که نورون‌های حسی در اینترنورون‌ها و نورون‌های حرکتی ایجاد می‌کنند.^[۱۴] عادت‌پذیری به هفته‌ها تا ماه‌ها نیاز دارد تا تغییرات ساختاری در نورون‌های حسی ایجاد کند تا فرد بتواند به کاهش دائمی سرگیجه خود دست یابد.^[۱۵، ۱۴، ۹]

برای تسریع فرآیند طبیعی جبران دهلیزی، می‌توان از برنامه‌های توانبخشی دهلیزی بهره برد.^[۹] مفهوم توانبخشی دهلیزی اولین بار در طول جنگ جهانی دوم توسط دو پزشک انگلیسی *Harold Cooksey* و *Sir Terence Cawthorne* در سال ۱۹۴۰ مطرح شد.^[۱۶] برنامه ورزشی مطرح‌شده توسط این دو پزشک شامل تمرینات ترکیبی سر/چشم برای تحریک مجاری نیم‌دایره و اندام‌های اتولیتی می‌باشد. امروزه در برنامه‌های توانبخشی دهلیزی، بیشتر ایده‌های اصلی در برنامه تمرینی *Cooksey* و *Cawthorne* مورد استفاده قرار می‌گیرد و از همان اصول اساسی و کلی تمرین‌های این دو استفاده شده است.^[۱۶] توانبخشی دهلیزی یک اقدام موثر و غیرتهاجمی در درمان اختلالات دهلیزی محیطی می‌باشد و به‌طور معمول شامل یک برنامه تمرینی اختصاصی است که با توجه به نیازهای خاص بیمار طراحی می‌گردد.^[۱۲] در این رویکرد با استفاده از مکانیسم‌های ترمیم‌پذیری مرکزی ثبات پاسچرال دینامیک و استاتیک افزایش و تعاملات دهلیزی-چشمی در موقعیت‌هایی که حاوی اطلاعات حسی متضاد هستند، بهبود می‌یابد.^[۱، ۱۵] در نهایت استفاده مؤثر از توانبخشی دهلیزی باعث تعادل دینامیک و استاتیک و گام برداشتن، افزایش ثبات نگاه خیره، کاهش علائم گیجی، افسردگی و اضطراب همراه با آن و در نهایت افزایش اعتمادبه‌نفس و کیفیت زندگی می‌شود.^[۲، ۱۷] مدت زمانی که طول می‌کشد تا جبران دهلیزی رخ دهد، در افراد مختلف متفاوت است، درحالی‌که خیلی از بیماران به‌صورت خودبخودی سریع بهبود پیدا می‌کنند، در تعداد دیگری جبران ناقصی رخ می‌دهد. این دسته دوم کاندید مناسبی برای انجام توانبخشی دهلیزی هستند.^[۷، ۱۸] همچنین انجام توانبخشی دهلیزی در فاز حاد بسیاری از بیماری‌های دستگاه

سرگیجه و عدم تعادل از شکایات اصلی بسیاری از بیماران مراجعه‌کننده به مراکز درمانی است.^[۱۱] ۳۳ درصد افراد دچار سرگیجه اظهار می‌کنند که فعالیت حرفه‌ای آنها تحت تأثیر قرار گرفته است و مجبور به تغییر شغل یا بازنشستگی شده‌اند. این موارد باعث می‌شود هزینه زیادی به جامعه تحمیل شود.^[۱۲] اگرچه سرگیجه علت‌های مختلفی می‌تواند داشته باشد، اما در ۴۵ درصد موارد، علت آن اختلال دهلیزی محیطی است. اختلال دهلیزی محیطی یک‌طرفه باعث سرگیجه، گیجی، استرس و عدم ثبات نگاه خیره در حین حرکت سر می‌شود. افراد مبتلا به سرگیجه دچار ترس و اضطراب در طول حملات و بین حملات سرگیجه می‌شوند.^[۳] ^[۴] درمان‌های دارویی غالباً تنها در فاز حاد بیماری که مدت کوتاهی به طول می‌انجامد، مفید واقع می‌شود. در اغلب مواقع، علائم ناشی از ضایعات دهلیزی محیطی در پی فرآیند خودبخودی جبران دهلیزی که از دستگاه دهلیزی مرکزی منشأ می‌گیرد، بهبود پیدا می‌کند.^[۱، ۱۵] فرآیند جبران دهلیزی بر اثر تغییرات عصبی فعال در سطح مخچه و ساقه مغز در پاسخ به تعارضات حسی و توسط مسیرهای دهلیزی ایجاد می‌شود. جبران استاتیک در سطح هسته‌های دهلیزی و تحت نظارت مخچه انجام می‌شود. در این دستگاه، جبرانی‌مهارى از سمت مخچه اعمال می‌گردد که باعث فایرینگ تونیک متقارن نورون‌های رده دوم در هسته‌های دهلیزی می‌شود. جبران مرکزی طی سه مکانیسم اصلی سازگاری (*Adaptation*)، جانشینی (*Substitution*) و عادت‌پذیری (*Habituation*) ایجاد می‌گردد.^[۶-۸] سازگاری در اثر منظم شدن فعالیت عصبی ایجاد می‌شود که عمدتاً در رفلکس دهلیزی-چشمی رخ می‌دهد. حرکت تصویر یا لغزش تصویر بر شبکه در طول حرکات سر مهمترین سیگنال برای ایجاد سازگاری است. فیزیولوژی رفلکس دهلیزی-چشمی به نحوی است که تصویر هدف بینایی را روی لکه زرد چشم قرار می‌دهد و این امر به‌واسطه حرکت کره چشم با سرعت و شتابی برابر با حرکت سر و در جهت مخالف آن شکل می‌گیرد.^[۹، ۱۰] بهره این حرکت برابر با یک است. در پی افت عملکرد دهلیزی، این بهره کاهش می‌یابد و بیمار دچار نوسان دید (اسیلوپسیا) می‌شود.^[۶، ۹] لغزش تصاویر روی شبکه منجر به تولید سیگنال خطا می‌گردد و مغز تلاش می‌کند تا آن را با افزایش بهره رفلکس دهلیزی-چشمی کاهش دهد. سازگاری موجب افزایش بهره رفلکس دهلیزی-چشمی شده و به ثبات بینایی کمک می‌نماید. برخی تمرینات در توانبخشی دهلیزی مبتنی بر این مکانیسم طراحی شده‌اند.^[۹] ^[۱۱] جانشینی شامل استراتژی‌هایی برای جایگزین کردن عملکرد از دست‌رفته دستگاه دهلیزی است. مکانیسم‌های متعددی در آن درگیر می‌شود که از قسمت‌های مختلف سیستم اعصاب مرکزی منشأ می‌گیرند و در سه سطح حسی، رفتاری و شناختی دیده می‌شوند. جانشینی حسی با تغییر اهمیت ورودی‌های حس عمقی و بینایی در حفظ تعادل شکل می‌گیرد.^[۱۷] در توانبخشی دهلیزی، جانشینی حس

بیمار ارائه می‌کند. همچنین، نسبت به برنامه‌های توانبخشی مرسوم تحریکات بیشتری اعمال می‌نماید. در مقاله مروری حاضر، ضمن معرفی تکنولوژی‌های واقعیت مجازی که تاکنون در زمینه توانبخشی دهلیزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، یافته‌های بالینی حاصل از کاربرد آنها به همراه مزایا و معایب هر یک مورد بحث قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

جستجوی مقالات در پایگاه داده‌های *Medline (PubMed)*، *Science Direct*، *Google Scholar* و *Cochrane* بدون محدودیت سال به صورت نظام‌مند صورت گرفت. برای جستجو از کلیدواژه‌های *Vestibular Rehabilitation*، *Vertigo Rehabilitation*، *Vestibular Dysfunction* و *Rehabilitation Virtual Reality Rehabilitation* استفاده شد. منابع تمامی مقالات انتخاب‌شده نیز بررسی شد تا اطمینان حاصل شود تمام مطالعات مرتبط انتخاب شده‌اند. تمامی مقالات موجود در پایگاه داده‌های مذکور بررسی شده و بر اساس معیارهای ورود مقالات شامل ۱- در دسترس بودن چکیده یا متن کامل ۲- مرتبط بودن با توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی و ۳- نگارش به زبان انگلیسی انتخاب شدند. در مرحله اول ۸۰ مقاله مرتبط با موضوع انتخاب گردید؛ از این میان، ۲۵ مقاله که بیشترین ارتباط را با توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی داشتند و با توجه به معیارهای ورود به شیوه‌گزینی هدفمند، برگزیده شدند. از این تعداد، ۲۴ مقاله پژوهشی و ۱ مقاله مروری بودند که در مقاله مروری حاضر مورد استفاده قرار گرفتند.

یافته‌ها

در جستجوی مقالاتی که انجام گرفت، به نظر می‌رسد *Alpini* و همکاران (۱۹۹۸) اولین کسانی بودند که از تکنولوژی واقعیت مجازی برای توانبخشی دهلیزی استفاده کردند.^[۲۱] در این مطالعه، استراتژی‌های دستگاه دهلیزی در انسان که برای کشف محیط مورد نیاز است توسط واقعیت مجازی با ویژگی غوطه‌وری (*Immersive*) مورد بررسی قرار گرفت.^[۲۱] همچنین *Viirre* [۴۳، ۴۲] و *Kramer* و همکاران [۴۴] جزء اولین کسانی محسوب می‌شوند که مبنای نظری کاربرد واقعیت مجازی را در افراد مبتلا به اختلالات دهلیزی توضیح داده و از این روش‌ها برای توانبخشی بهره‌جسته‌اند. در مطالعه *Viirre* و همکاران پیشنهاد شده است استفاده از واقعیت مجازی باعث افزایش سرعت سازگاری می‌شود. همچنین استفاده از تمرینات تقویت رفلکس دهلیزی-چشمی که به صورت واقعیت مجازی باشد، باعث افزایش بهره آن می‌گردد.^[۴۳] از آن زمان تا به حال مطالعات مختلفی با انواع مختلف دستگاه‌ها و پروتکل‌ها انجام شده است که نتایج این مطالعات نشان‌دهنده‌ی یکسان بودن تأثیر درمانی این روش‌ها با توانبخشی دهلیزی می‌باشد.

دهلیزی منجر به افزایش سرعت جبران و تاخیر در شروع توانبخشی منجر به تاخیر بهبودی و یا کاهش سرعت جبران در این بیماری‌ها می‌گردد.^[۱۸] توانبخشی دهلیزی با وجود مزایای فراوانی که ذکر شد، محدودیت‌هایی را به همراه دارد. این رویکرد، در صورتی مفید واقع می‌شود که برنامه تمرینی و حرکات مورد نظر به درستی و با دقت توسط بیماران اجرا گردد؛ بنابراین، نیازمند یادگیری حرکتی، تمرین و دریافت فیدبک مناسب می‌باشد. دریافت فیدبک از درمانگر به بیمار حین توانبخشی، این روند را خسته‌کننده و کسالت‌آور می‌کند. همچنین فاکتورهای دیگری نظیر انجام نادرست تمرینات، کاهش علاقه‌مندی برای همکاری و لزوم تلاش فعالانه بیمار می‌تواند اثر منفی بر پیامدهای توانبخشی دهلیزی داشته باشد.^[۱۷، ۹، ۲۰]

در سال‌های اخیر و با پیشرفت تکنولوژی، روش توانبخشی مبتنی بر واقعیت مجازی (*Virtual Reality*) مطرح شده است که از طریق آن می‌توان تمرین‌های توانبخشی دهلیزی را برای بیماران ارائه داد. مطالعاتی که اخیراً در این زمینه انجام شده است، نشان می‌دهد که این تکنولوژی می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد، به طوری که به جای اینکه آموزش‌ها و فیدبک به بیمار توسط درمانگر ارائه شود، به صورت مجازی انجام می‌شود. با پیشرفت فناوری، سیستم‌های مبتنی بر واقعیت مجازی به طور قابل توجهی در حوزه‌های متعددی توسعه یافته‌اند. محیط‌های مجازی، شبیه‌سازی‌هایی تعاملی از دنیای واقعی هستند که توسط کامپیوتر ساخته شده و از طریق رسانه‌هایی با سطوح مختلف پیچیدگی (مانند صفحه کامپیوتر، صفحه مدور ۳۶۰ درجه‌ای، صفحه نمایش‌های تعبیه‌شده روی سر و غیره) به کاربران ارائه می‌شود.^[۱۹-۲۱] تکنولوژی واقعیت مجازی پیچیدگی حسی جهان فیزیکی را در محیط کنترل-شده آزمایشگاه ایجاد می‌کند، به طوری که فرد حس می‌کند بخشی از صحنه است.^[۲۲] بنابراین، می‌توان محیط مصنوعی را با کنترل دقیق تعداد زیادی متغیر که رفتار را ضمن ثبت پاسخ‌های فیزیولوژیک و حین حرکت متأثر می‌کند، خلق کرد.^[۲۳] یکی دیگر از ویژگی‌های حائز اهمیت برنامه واقعیت مجازی در رابطه با توانبخشی این موضوع می‌باشد که شانس یادگیری تجربی در محیط پرچالش برای فرد و امکان ارزیابی عینی از رفتار وی ضمن کنترل تمامی محرکات ارائه‌شده در محیطی کاملاً ایمن فراهم می‌شود.^[۱]

[۲۲، ۱۷، ۹]

واقعیت مجازی جایگاه ویژه‌ای در علوم پزشکی پیدا کرده است و تاکنون در شاخه‌های مختلف علوم پزشکی نظیر حوزه روانپزشکی (درمان اضطراب، اسکیزوفرنی و اختلالات پزشکی)^[۲۴-۲۶]، توانبخشی فلج مغزی کودکان^[۲۷] و درمان همی‌پلژی پس از سکته مغزی^[۲۸] مورد استفاده قرار گرفته است. اخیراً کاربرد این تکنولوژی در توانبخشی دهلیزی با استفاده از انواع دستگاه‌ها و پروتکل‌های مختلف مورد توجه واقع شده است.^[۱، ۲، ۴، ۵، ۹، ۱۷، ۴۱-۲۹] واقعیت مجازی در حین تمرین‌های تعادلی فیدبک مناسب را برای

می‌شود.^[۴۵] بیماران تمرینات را در محیط بسیار غنی بینایی انجام می‌دهند و در برخی از آنها باید سر را هم حرکت دهند که باعث بهبود تحریک دستگاه دهلیزی و تسهیل حرکات چشمی برنامه‌ریزی شده در حرکاتی می‌گردد که نیاز به ثبات نگاه خیره دارند. از مزایای این سیستم می‌توان به این نکته اشاره کرد که تمرین‌های آن در غلبه بر اتکا بیش‌ازحد به یک مودالیتته حسی، حساسیت‌زدایی بیماران نسبت به محرکات بینایی و تعارضات بینایی-دهلیزی بسیار مفید است. در یک مطالعه اخیر، استفاده از این تکنولوژی در بیماران مبتلا به کاهش عملکرد دستگاه دهلیزی بهبودی قابل توجهی در بهره رفلکس دهلیزی-چشمی، پارامترهای پاسچروگرافی و ابزارهای ارزیابی ساجکتیو نظیر پرسشنامه معلولیت سرگیجه ایجاد کرده است.^[۳۷] سیستم HMD علاوه بر محدودیت حرکتی، دید محدودی (حدود ۳۰ تا ۶۰ درجه) برای فرد ایجاد می‌کند که به دلیل حذف محیط اطراف و همچنین تأخیر بین حرکت سر و به‌روز شدن تصویر، ممکن است علائم *Cybersickness* (حالت تهوع و سرگیجه، دوبینی و غیره ناشی از مواجهه با فضای مجازی به دلیل تعارض حسی) بروز کند.^[۹]، ۳۱، ۳۷، ۳۹] بررسی پدیده *Cybersickness* در بسیاری از دستگاه‌های پوشیدنی نشان می‌دهد تمرکز دینامیک بر میدان بینایی عامل اصلی بروز آن می‌باشد. به نظر می‌رسد حدود ۲۰ تا ۸۰ درصد از افراد در محیط‌های واقعیت مجازی دچار *Cybersickness* می‌شوند.^[۹]

در مطالعاتی که از HMD استفاده کرده بودند، بهبودی چشمگیر بیماران هم در ارزیابی‌های ساجکتیو و هم در ارزیابی‌های عملکردی مشهود بود.^[۲۹]، ۳۱، ۳۷، ۳۹] کاربرد این تکنولوژی‌ها باعث افزایش غوطه‌وری بیمار در محیط مجازی می‌شد و همچنین تعارض حسی زیادی بین سیستم‌های دهلیزی و بینایی ایجاد می‌کرد که نسبت به توانبخشی مرسوم باعث ایجاد سریع‌تر، بهتر و پایدارتر جبران مرکزی می‌گردید.^[۲۹]، ۳۱، ۳۷، ۳۹] همچنین در تعدادی از مطالعات به دلیل پدیده تعارض چندحسی در بیماران، پدیده *Cybersickness* رخ داد که باعث شده بود انگیزه برخی افراد برای انجام توانبخشی دهلیزی کاهش پیدا کند.^[۳۱، ۳۷، ۳۹، ۴۱] اما با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بیماران، به نظر می‌رسد این سیستم سازگاری طولانی مدتی در سیستم عصبی ایجاد می‌کند. هم‌چنین کاهش چشمگیر علائم بیماران مثل حالت تهوع، فشار وارده بر چشم و عدم موقعیت‌آگاهی (*Disorientation*) که با استفاده از پرسشنامه *Simulator Sickness* بررسی شده بود، حاکی از آن است بیماران بعد از مدتی نسبت به محرک‌های واقعیت مجازی عادت‌پذیری نشان می‌دهند.^[۳۱]، ۴۱] بنابراین به نظر نمی‌رسد *Cybercickness* مانعی جدی برای انجام برنامه‌های توانبخشی دهلیزی باشد. در تکنولوژی HMD تمرین‌هایی که نیازمند حرکت سر و چشم هستند باعث بهبود سازگاری رفلکس دهلیزی-چشمی و تسهیل دیگر حرکات

سیستم‌های واقعیت مجازی ویژه‌ی توانبخشی دهلیزی با در نظر گرفتن سه هدف (۱) کاهش علائم سرگیجه، گیجی یا احساس ناراحتی هنگام حرکت، (۲) سازگاری در سیستم رفلکس دهلیزی-چشمی و پاسخ‌های اپتوکینیتیک و (۳) بازآموزی مجدد ثبات پاسچرال طراحی شده‌اند.^[۹] نتایج مطالعات حاکی از آن است که سیستم‌های واقعیت مجازی مورد استفاده تا حد زیادی به این اهداف دسترسی پیدا کرده‌اند. همچنین نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افراد شرکت‌کننده از محیط واقعیت مجازی و انجام تمرین‌ها در این محیط بسیار لذت می‌برند و نیز استفاده از این تکنولوژی برای انجام توانبخشی دهلیزی به‌ویژه در منزل انگیزه‌ی بالایی در افراد شرکت‌کننده ایجاد می‌کند.^[۱]، ۱۲] در پژوهش‌های انجام‌شده میزان وقوع عوارض جانبی نظیر افتادن در حداقل میزان ممکن می‌باشد که نشان می‌دهد تکنولوژی‌های واقعیت مجازی می‌تواند به‌عنوان ابزار مطمئن و ایمن برای توانبخشی دهلیزی مورد استفاده قرار گیرد.

سیستم‌های واقعیت مجازی که تا به حال در توانبخشی دهلیزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در دو دسته‌ی *High End* و *Off the Shelf* قرار می‌گیرند. سیستم‌های *High End* شامل دو دسته کلی-*Head-mounted Display* و *Wide Field of Vision* و سیستم‌های *Off the Shelf* شامل *Nintendo Wii*، *Microsoft Kinect* و *Wii* می‌باشد.^[۹] هر یک از این سیستم‌ها معایب و مزایای مخصوص خود را دارند.

توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی با سیستم‌های *High End*

سیستم‌های *High End* دارای ویژگی غوطه‌وری می‌باشد. درمانگر می‌تواند ارائه محرکات به بیمار را کنترل کند و تغییر دهد. همچنین امکان ارزیابی دقیق حرکات و ثبات پاسچرال را فراهم می‌کند. از معایب آنها می‌توان به قیمت بالای آنها اشاره کرد. همچنین برای انجام توانبخشی دهلیزی چند متخصص باید در روند توانبخشی از آماده-سازی دستگاه واقعیت مجازی تا تفسیر داده‌های آن مشارکت داشته باشند. در کل، به نظر می‌رسد سیستم‌های *High End* به دلیل هزینه بالا در دسترس درمانگران نباشند و همچنان آزمایشی باقی بمانند. از دیگر معایب این سیستم‌ها، می‌توان به عدم امکان کاربرد آنها در برنامه‌های توانبخشی خانگی اشاره کرد. همچنین پرسنل آموزش‌دیده برای استفاده از این تکنولوژی‌ها مورد نیاز می‌باشد.^[۹] دو نمونه از این تکنولوژی‌ها در ادامه معرفی می‌شود.

در سیستم نمایشگر متصل به سر (*Head-mounted Display: HMD*)، به محض این که فرد عینک واقعیت مجازی را روی چشم می‌گذارد، دنیای خارجی دیگر قابل رؤیت نیست و دنیای مجازی جایگزین آن می‌شود. موقعیت سر ردیابی می‌شود و تصاویر روی صفحه نمایش که روی سر نصب شده است، در هر لحظه به‌روزرسانی

چشمی می‌شوند. این امر به نوبه خود منجر به ثبات نگاه خیره و در عین حال، رخداد تعارض حسی در سیستم عصبی مرکزی می‌گردد و سیستم مرکزی تلاش می‌کند تا بر این چالش غلبه یابد.^[۳۹، ۳۷، ۳۱] در توانبخشی دهلیزی با استفاده از *HMD* بهبودی قابل توجهی در پارامترهای مربوط به پاسچروگرافی به‌ویژه در محدوده‌ی فرکانس پایین (۰/۷-۰/۱ هرتز) دیده شد. در بیماران مبتلا به نقص دهلیزی، نوسان بدن در این محدوده فرکانسی که عمدتاً تحت کنترل دستگاه دهلیزی می‌باشد، افزایش می‌یابد.^[۳۹، ۳۷] کاهش نوسان بدن بیماران در محدوده فرکانس پایین بعد از درمان با استفاده از *HMD* نشان می‌دهد استفاده از این محرکات بینایی مجازی باعث افزایش تخلیه اعصاب دهلیزی می‌گردد که این امر موجب بهتر شدن اطلاعات فضایی/مکانی از منبع دهلیزی می‌شود. متعاقب آن، وزن‌دهی مجددی در سیستم عصبی مرکزی رخ می‌دهد که باعث بهبود ثبات پاسچرال بیمار در این محدوده فرکانسی می‌شود.^[۳۷] در پی انجام تمرین‌های توانبخشی *HMD* در شرایط پرچالش (به‌عنوان مثال با چشمان بسته) تقویت حداکثر ورودی دهلیزی در مراکز یکپارچه‌کننده و تلفیق سیگنال پاسچرال رخ می‌دهد. در مطالعه‌ای که نتایج حاصل از برنامه توانبخشی مرسوم و تکنولوژی *HMD* مقایسه شده بود، افزایش قابل توجه و پایداری در بهره رفلکس دهلیزی-چشمی ۱۲ ماه پس از پایان درمان در گروه *HMD* مشاهده شد.^[۳۹] نکته کلیدی در برنامه واقعیت مجازی میزان غوطه‌وری است. دسترسی به غوطه‌وری سطح بالا، به تحریکات چندحسی نیاز دارد. غیر از محرک‌های دهلیزی، محرک‌های بینایی هم بسیار مهم هستند و باید از گرافیک مشابه واقعیت، جزئیات و سطح بالایی برخوردار باشند. در سیستم‌های *HMD* این شرایط موجود است.^[۳۸]

یکی دیگر از سیستم‌های *High End* سیستم میدان دید گسترده (*Wide Field of View: FOV*) می‌باشد که نمایشگر غوطه‌ور فضایی هم نامیده می‌شود زیرا از صفحه نمایش‌های بزرگ تشکیل شده است. این صفحه‌ها طوری کنار هم قرار گرفته‌اند که فضای وسیعی از واقعیت مجازی را تشکیل می‌دهند.^[۹] در زمینه توانبخشی دهلیزی تا به امروز سه نوع *FOV* در مطالعات مختلف استفاده شده است؛ نمونه اولیه و اصلی این تکنولوژی *Cave Automatic Virtual Environment* (*CAVE*) می‌باشد که در دانشگاه ایلینوی شیکاگو تولید شده است. *CAVE* در اصل یک اتاق کوچک است که هر دیوار آن را یک صفحه نمایش تشکیل داده است.^[۴۶، ۹] تکنولوژی دیگر، *Balance Near Automatic Virtual Environment* (*BNAVE*) در دانشگاه پیتسبورگ و جورجیانک تولید و طراحی شده است. گستردگی *FOV* آن مشابه میدان دید طبیعی (۱۸۰ درجه افقی و ۹۵ درجه عمودی) است؛ بنابراین سطح بالایی از غوطه‌وری در فرد ایجاد می‌کند.^[۳۵، ۳۰، ۹] با این سیستم، درجات مختلفی از تعارض حسی را می‌توان متناسب با شرایط فرد مبتلا به اختلال دهلیزی فراهم و تنظیم نمود. صحنه‌هایی که در

BNAVE تولید می‌شود، کل میدان دید بیننده را پوشش می‌دهد. نشانه‌های بینایی که فرد در نمایشگرهای طرفی دریافت می‌کند، متفاوت از آن چیزی است که در صفحه نمایش مرکزی مقابل دیده می‌شود. درمانگر باید ترکیب محرکات مرکزی و طرفی را کنترل و تنظیم کند. سیستم *BNAVE* می‌تواند الکترومیوگرافی و حرکت سر را ثبت کند. فروشگاه‌های مجازی یکی از انواع محیط‌های *BNAVE* است. طول و عرض راهروهای مجازی فروشگاه و محتویات آنها برای تنظیم پیچیدگی محیط بصری قابل دستکاری است. مسیریابی فرد درون محیط فروشگاه به طرق مختلف انجام می‌شود، به‌عنوان مثال از طریق فشار آوردن به دسته سید حساس به نیرو هنگام حرکت فرد روی تردمیل.^[۹] یکی دیگر از سیستم‌های *FOV* که در توانبخشی دهلیزی مورد استفاده قرار گرفته است، *Cave Automatic Virtual Environment* (*CAVE*) می‌باشد که از یک پلتفرم حرکتی با ۶ درجه آزادی تشکیل شده است و صفحه نمایش‌های ۱۸۰ درجه‌ای دورتادور فرد را دربرمی‌گیرد. این تکنولوژی قابلیت ردیابی حرکات سه‌بعدی بخش‌های مختلف بدن را دارا می‌باشد و می‌توان یک تردمیل درون محیط واقعیت مجازی قرار داد که به این ترتیب امکان ارزیابی دقیق اجزای کینماتیک حرکات فرد در طول راه رفتن فراهم می‌شود.^[۹] در تکنولوژی *FOV* محرکات اپتوکینتیک (نظیر نواری یا مربعی) نیز برای بیماران دچار اختلالات دهلیزی با امکان تنظیم کنتراست، جهت، سرعت و فرکانس محرک قابل ارائه است. یکی از مزیت‌های اساسی سیستم *FOV* نسبت به سیستم‌های *HMD* این است که به دلیل میدان دید وسیع امکان تغییر نشانه‌های بینایی در محیط برای کاربر فراهم است. این مورد برای کنترل پاسچرال بسیار مهم می‌باشد.^[۹] مزیت دیگر این سیستم آن است که فرد می‌تواند موقعیت اعضای بدن خود را نسبت به محیط مجازی مشاهده کند. در این تکنولوژی‌ها پدیده‌ی *Cybersickness* که در تکنولوژی *HMD* متداول می‌باشد، مشاهده نمی‌شود. نتایج یک مطالعه در سال ۲۰۱۴ نشان داد که بعد از شش هفته توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی با استفاده از این تکنولوژی، علائم بیماران در پرسشنامه‌های مورد استفاده نسبت به برنامه توانبخشی دهلیزی مرسوم کاهش چشمگیر نشان داد، اما هیچ تفاوتی بین ارزیابی‌های عملکردی بین دو گروه یافت نشد.^[۴۱] مشابه این نتایج در یک پژوهش توانبخشی دهلیزی با استفاده از تکنولوژی *FOV* در افراد مبتلا به آسیب مغزی ملایم مشاهده شد.^[۴۷] در این مطالعه بیماران مبتلا به آسیب مغزی ملایم دو بار در هفته به مدت شش هفته متوالی تحت توانبخشی دهلیزی با استفاده از تکنولوژی *CAREN* قرار گرفتند. بعد از اتمام دوره توانبخشی تمامی بیماران بهبودی قابل توجهی در توانایی راه رفتن و تعادل خود پیدا کردند.^[۴۷]

سیستم‌هایی از این قبیل هزینه‌بر و گران هستند. این مسئله باعث می‌شود که کاربرد کلینیکی پیدا نکرده و به صورت آزمایشی باقی بمانند.^[۹]

فصلنامه علمی-پژوهشی طب توانبخشی، پاییز ۹۹، دوره ۹، شماره ۳، صفحات ۳۲۷-۳۱۷

توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی با

استفاده از سیستم‌های *Off the Shelf*

صنعت بازی در طی سال‌های اخیر تکنولوژی‌های پیشرفته‌ای که در برخی از سیستم‌های واقعیت مجازی *High End* وجود دارد را با هزینه کم در اختیار درمانگران قرار داده است.^[۲۰] این تکنولوژی‌های *Off the Shelf* ارزان‌قیمت این توانایی را دارند که حرکات سه‌بعدی یا مرکز فشار (*Center of Pressure*) را ارزیابی کنند.^[۹] این دستگاه‌ها به تلویزیون یا مانیتور کامپیوتر متصل می‌شوند و کاملاً غیرعوطه‌ور می‌باشند. این توانایی را دارند که فیدبک شنوایی و بینایی را در هر لحظه برای کاربر ایجاد کنند و محیط پیچیده مجازی فراهم سازند. سیستم‌های تجاری موجود دارای بازی‌ها و تمرین‌های زیادی هستند که می‌توانند برای توانبخشی دهلیزی مورد استفاده قرار گیرند. از معایب این سیستم‌ها، می‌توان به میدان بینایی کوچک و عدم توانایی در کنترل جریان‌های بینایی و محرکات اپتوکینتیک برای توانبخشی دهلیزی و کنترل پاسچرال اشاره کرد.^[۹، ۱۱] در این تکنولوژی‌ها پدیده *Cybersickness* که در تکنولوژی *HMD* متداول می‌باشد، مشاهده نمی‌شود. در مطالعاتی که از تکنولوژی‌های غیر از *HMD* استفاده شده است، هیچ‌کدام از بیماران این علامت را گزارش نکردند چون بیماران می‌بایست ورودی‌های بینایی مورد نظر را از نقاط مرجع خارجی پیدا می‌کردند.^[۱، ۲، ۴، ۵، ۳۳، ۴۸]

از بین سیستم‌های ارزان‌قیمت *Off the Shelf* که امروزه در بازار موجود است، *Nintendo Wii* نسبت به دو دستگاه دیگر در مطالعات مختلف بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. نینتندو وی اولین بار در ۲۰۰۶ ارائه شد. مورد تعادلی آن دارای چهار مبدل نیرو است که مرکز جابه‌جایی فشار را در جهت داخلی-خارجی و قدامی-خلفی محاسبه می‌کند.^[۹] نوع *Wii Fit Plus* بازی‌های تمرینی و تعادلی زیادی دارد که هدف از انجام آنها به چالش کشیدن تعادل و ارائه فیدبک مناسب بینایی و شنوایی از مرکز فشار فرد است. دقت مورد تعادلی که در *Wii* مورد استفاده قرار می‌گیرد برابر با صفحه نیروی آزمایشگاهی است.^[۴۹] در مطالعه‌ای که از این تکنولوژی در توانبخشی دهلیزی استفاده شده بود، تقریباً ۹۰ درصد بیماران گزارش کردند ترجیح می‌دهند از *Wii* در درمان و توانبخشی دهلیزی خود در آینده استفاده کنند و ۷۰ درصد از بیماران نیز گزارش کردند که این تکنولوژی بسیار لذت‌بخش‌تر و انگیزه‌بخش‌تر از برنامه‌های توانبخشی دهلیزی مرسوم می‌باشد (سایت‌شده در ۲). عواملی نظیر ارائه فیدبک بینایی و شنوایی مناسب از مزایای این سیستم محسوب می‌شود. همچنین عوارض جانبی ضعیفی مثل تهوع، سردرد و افزایش سرگیجه فقط در تعداد کمی از بیماران گزارش شده است.^[۹] در برخی مطالعات نشان داده شده است که افراد سالمند در محدوده‌ی سنی ۶۲-۹۰ سال قادر هستند از مورد تعادلی و همچنین بازی‌های *Wii* استفاده کنند و این بازی‌ها را به خوبی یاد بگیرند.^[۵۰، ۵۱] یکی از اجزای اصلی در توانبخشی تعادل، یادگیری کنترل مرکز ثقل

بدن حین حرکات مختلف می‌باشد. مورد تعادلی *Wii* نیروهای عمودی که از طرف فرد به مورد تعادلی وارد می‌شود را شناسایی می‌کند و سپس مرکز فشار وی را محاسبه می‌کند. مورد این دستگاه آن قدری حساسیت دارد که حتی تغییرات کوچک و جزئی در مرکز فشار بیمار را طی انجام حرکات چشم و در حالت ایستاده کشف کند. فرد از طریق جابه‌جایی و تغییر مرکز فشار خود، بازی‌هایی که در این تکنولوژی قرار داده شده است را می‌تواند انجام دهد.^[۴۱-۴۴، ۴۹] سیستم *Nintendo Wii* در حال حاضر در کلینیک‌های توانبخشی دهلیزی مورد استفاده قرار می‌گیرد و کاربردهای توانبخشی مختلفی پیدا کرده است. میزان انگیزه و جذابیتی که این سیستم ایجاد می‌کند، باعث می‌شود افراد به روند درمان توانبخشی دهلیزی پای‌بندتر از برنامه‌های توانبخشی مرسوم باشند. تمامی این جنبه‌ها در کنار عواملی مانند هزینه‌ی پایین این وسیله و استفاده راحت از آن باعث شده است تا در توانبخشی دهلیزی جایگاه رو به رشدی داشته باشد، اگرچه در حال حاضر هنوز تعداد مطالعاتی که از این وسیله استفاده کرده‌اند زیاد نیست؛ بنابراین شواهد محدودی برای حمایت از اثربخشی آن وجود دارد.^[۱، ۳، ۲۴، ۴۹] در یک مطالعه پایلوت نیز پنج بیمار دچار اختلال دهلیزی از سیستم هیبرید به مدت ۵ هفته و ۲۰ جلسه توانبخشی استفاده کردند. بعد از مداخله در تمامی بیماران کاهش نوسان پاسچرال و بهبود عملکرد تعادلی مشاهده شد.^[۹] در تعدادی از مطالعات که از *Nintendo Wii* استفاده کرده‌اند، برتری سیستم توانبخشی واقعیت مجازی نسبت به برنامه توانبخشی مرسوم تنها از دیدگاه بیمار و در نتایج پرسشنامه‌ها مشاهده شده است و سایر ابزارها نظیر صفحه نیرو، سازماندهی حسی، شاخص راه رفتن دینامیک و سرعت راه رفتن تفاوت معنادار یا برتری را بین دو روش نشان نداده است.^[۴-۶] وجود تفاوت معنادار در نتایج پرسشنامه‌ها در افراد دچار اختلال دهلیزی در گروه توانبخشی دهلیزی با واقعیت مجازی در مقایسه با گروه توانبخشی مرسوم از آن نظر حائز اهمیت می‌باشد که احساس خود فرد از شدت سرگیجه و میزان ناتوانی که سرگیجه و اختلال دهلیزی در زندگی روزمره فرد ایجاد می‌کند، با این پرسشنامه‌ها مشخص می‌شود و از طرفی دیگر، مؤثر بودن برنامه توانبخشی دهلیزی در فرد نیز از طریق این پرسشنامه‌ها ارزیابی می‌گردد.

یکی دیگر از سیستم‌های *Off the Shelf* مورد استفاده در توانبخشی دهلیزی دستگاه *Microsoft Kinect* می‌باشد که محصول *Sony Xbox* می‌باشد و در ۲۰۱۰ به بازار عرضه شد. در این سیستم برای تشخیص حرکت فرد از یک وب‌کم مادون قرمز استفاده شده است؛ بنابراین هیچ کنترل‌گر دستی در آن وجود ندارد. در این تکنولوژی از الگوریتم *Decision Forest* تصادفی‌شده بهره گرفته شده که در لحظه نشانه‌های آناتومیک بدن مثل مرکز مفاصل را تعیین می‌کند.^[۵۲، ۵۳] دقت سیستم *Microsoft Kinect* در تشخیص حرکات بدن برابر با سیستم‌های آنالیز حرکت آزمایشگاهی است.^[۵۲] بازی‌های مختلفی در این تکنولوژی باعث تقویت و توانبخشی دستگاه دهلیزی می‌شود، هرچند تاکنون تعداد

حداقل ۱۲۰ تا ۱۵۰ دقیقه مدت مواجهه فرد در محیط واقعیت مجازی مورد نیاز است تا بهبودی قابل اندازه‌گیری در بیماران کشف و شناسایی شود؛ بنابراین تعداد جلسات بیشتر و مدت کوتاه‌تر هر جلسه می‌تواند نتایج مؤثرتر و بهتری در پی داشته باشد.^[۱۷]

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج مطالعات انجام‌شده در توانبخشی دهلیزی با استفاده از تکنیک واقعیت مجازی به نظر می‌رسد که این نوع توانبخشی می‌تواند جایگزین مناسبی برای برنامه‌های توانبخشی مرسوم باشد. در تمامی پژوهش‌هایی که از تکنیک واقعیت مجازی برای توانبخشی دهلیزی بهره برده‌اند، برتری این روش نسبت به برنامه‌های توانبخشی مرسوم به ویژه از دیدگاه بیمار گزارش شده است. استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته‌تر نظیر *HMD* و *FOV* در مطالعات باعث بهبودی چشمگیر بیماران هم در ارزیابی‌های پرسشنامه‌ای و هم در ارزیابی‌های عملکردی می‌گردد. کاربرد این تکنولوژی‌ها باعث افزایش غوطه‌وری و در نهایت تعارض حسی زیاد بین سیستم‌های دهلیزی، بینایی و ایجاد سریع‌تر، بهتر و پایدارتر جبران مرکزی نسبت به توانبخشی مرسوم می‌گردد. توانبخشی دهلیزی واقعیت مجازی محیط‌های چالش‌برانگیز و در عین حال کنترل‌شده و ایمن برای بیماران دچار اختلال دهلیزی ایجاد می‌کند. این نوع توانبخشی محدودیت‌های موجود در روش‌های توانبخشی مرسوم را ندارد، به طوری که بیماران با انگیزه بیشتری در برنامه توانبخشی دهلیزی واقعیت مجازی شرکت می‌کنند. انگیزه بیشتر باعث مشارکت و تعامل بیشتر آنها و در نهایت دستیابی به نتایج مؤثرتر حداقل از دیدگاه خود بیمار می‌گردد. نتایج مطالعات اخیر نشان‌دهنده‌ی پایداری طولانی‌مدت بهبودی افراد بعد از انجام تمرین‌های توانبخشی مجازی می‌باشد؛ بدین ترتیب، شواهد موجود از کاربرد واقعیت مجازی در برنامه‌های توانبخشی دهلیزی حمایت می‌کند، اما این تکنولوژی مشکلاتی نیز به همراه دارد. بسیاری از انواع آن در حال حاضر گران‌قیمت است و برای همه در دسترس نیست.

گزارشات کمی از کاربرد این تکنولوژی در زمینه توانبخشی وجود دارد.^[۹] سیستم هیبرید نیز برای توانبخشی دهلیزی در سال‌های اخیر ارائه شده است؛ یک سیستم ترکیبی می‌باشد که در آن از تکنولوژی *Kinect* به همراه بورد تعادلی نینتندو، یک پروژکتور سه‌بعدی و یک عینک شاتر جهت ایجاد بینایی استریو استفاده شده است. پنج تمرین بر اساس تمرین‌های اصلاح‌شده‌ی *Cawthorne* و *Cooksey* طراحی شده است.^{[۹]، [۳۴]} در مطالعه‌ای بعد از ده جلسه توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی با سیستم هیبرید بهبودی قابل توجه در پارامترهای مربوط به مرکز فشار و هر دو خرده‌مقیاس شدت سرگیجه و اضطراب مقیاس نشانه‌های سرگیجه مشاهده شد؛ از طرفی دیگر، بهبودی پارامترهای مربوط به مرکز فشار بین دو گروه توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی و برنامه توانبخشی دهلیزی مرسوم تفاوت معناداری نداشت، درحالی‌که بهبودی عملکرد تعادلی و کاهش استرس بیماران در گروه واقعیت مجازی نسبت به گروه دیگر تفاوت معناداری داشت. با آنکه تأثیر کاربرد این سیستم در کاهش نوسان پاسچرال و بهبود عملکرد تعادلی مشاهده شده است^[۳۴]، اما تحقیقات بیشتر در سال‌های آینده در مورد کارایی آن مورد نیاز می‌باشد.^[۹]

مدت زمان لازم جهت انجام توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی

در مطالعات انجام‌شده، افراد ۶ تا ۱۲ جلسه توانبخشی واقعیت مجازی را در طول ۱ تا ۸ هفته انجام داده‌اند، هر جلسه ۲۴ تا ۴۵ دقیقه طول کشیده است. در واقع می‌توان گفت هر فرد حداقل ۱۴۴ تا ۵۴۰ دقیقه در برنامه توانبخشی واقعیت مجازی صرف کرده است.^{[۱]، [۴]، [۵]، [۹]، [۱۷]، [۳۳]، [۳۷]، [۴۸]} مسئله‌ای که در روند توانبخشی واقعیت مجازی بسیار حائز اهمیت است، مدت‌زمانی می‌باشد که افراد به انجام برنامه توانبخشی اختصاص می‌دهند. بر اساس مطالعه‌ی متاآنالیز *Bergeron* و همکاران (۲۰۱۵)، زمانی که افراد در برنامه واقعیت مجازی سپری می‌کنند، بیشتر از تعداد جلسات آن در کارایی برنامه توانبخشی دهلیزی مبتنی بر واقعیت مجازی تأثیر دارد. هم‌چنین،

منابع

1. Meldrum D, Herdman S, Vance R, Murray D, Malone K, Duffy D, et al. Effectiveness of conventional versus virtual reality-based balance exercises in vestibular rehabilitation for unilateral peripheral vestibular loss: results of a randomized controlled trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*. 2015;96(7):1319-28. e1.
2. Meldrum D, Glennon A, Herdman S, Murray D, McConn-Walsh R. Virtual reality rehabilitation of balance: assessment of the usability of the Nintendo Wii® Fit Plus. *Disability and rehabilitation: assistive technology*. 2012;7(3):205-10.
3. Verdecchia DH, Mendoza M, Sanguineti F, Binetti AC. Outcomes after vestibular rehabilitation and Wii® therapy in patients with chronic unilateral vestibular hypofunction. *Acta Otorrinolaringologica (English Edition)*. 2014;65(6):339-45.
4. Phillips J, Fitzgerald J, Phillis D, Underwood A, Nunney I, Bath A. Vestibular rehabilitation using video gaming in adults with dizziness: a pilot study. *The Journal of Laryngology & Otology*. 2018;132(3):202-6.

5. Rosiak O, Krajewski K, Woszczak M, Jozefowicz-Korczyńska M. Evaluation of the effectiveness of a Virtual Reality-based exercise program for Unilateral Peripheral Vestibular Deficit. *Journal of Vestibular Research*. 2019(Preprint):1-7.
6. Deveze A, Bernard-Demanze L, Xavier F, Lavieille J-P, Elziere M. Vestibular compensation and vestibular rehabilitation. Current concepts and new trends. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. 2014;44(1):49-57.
7. Han BI, Song HS, Kim JS. Vestibular rehabilitation therapy: review of indications, mechanisms, and key exercises. *Journal of Clinical Neurology*. 2011;7(4):184-96.
8. Whitney SL, Alghadir AH, Anwer S. Recent evidence about the effectiveness of vestibular rehabilitation. *Current treatment options in neurology*. 2016;18(3):13.
9. Hall DC, Meldrum D, Withney SL. The role of emerging technologies in vestibular rehabilitation. In Herdman S, Clendaniel R, editors. *Vestibular Rehabilitation*. 4th ed. Philadelphia: FA Davis Co. 2014:537-54.
10. Eggers SD, PENNINGTON ND, Walker MF, Shelhamer M, Zee DS. Short-term adaptation of the VOR: non-retinal-slip error signals and saccade substitution. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2003;1004(1):94-110.
11. Jones GM, Mandl G. Effects of strobe light on adaptation of vestibulo-ocular reflex (VOR) to vision reversal. *Brain research*. 1979.
12. Horak FB. Postural compensation for vestibular loss. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2009;1164:76.
13. Bronstein AM, Hood JD. The cervico-ocular reflex in normal subjects and patients with absent vestibular function. *Brain research*. 1986;373(1-2):399-408.
14. Tee L, Chee N. Vestibular rehabilitation therapy for the dizzy patient. *Ann Acad Med Singapore*. 2005;34(4):289-94.
15. Herdman SJ. Role of vestibular adaptation in vestibular rehabilitation. *Otolaryngology—Head and Neck Surgery*. 1998;119(1):49-54.
16. Jacobson GP, Shephard NT. *Balance function assessment and management: plural publishing*; 2014.
17. Bergeron M, Lortie CL, Guitton MJ. Use of virtual reality tools for vestibular disorders rehabilitation: a comprehensive analysis. *Advances in medicine*. 2015;2015.
18. Jafarzadeh S, Pourbakht A, Bahrami E, Jalaie S, Bayat A. Effect of early vestibular rehabilitation on vertigo and unsteadiness in patients with acute and sub-acute head trauma. *Iranian journal of otorhinolaryngology*. 2018;30(97):85.
19. Earnshaw RA. *Virtual reality systems: Academic press*; 2014.
20. Weiss P, Katz N. The potential of virtual reality for rehabilitation. *J Rehabil Res Dev*. 2004;41(5):7-10.
21. Alpini D, Pugnetti L, Mendozzi L, Barbieri E, Monti B, Cesarani A, editors. *Virtual Reality in vestibular diagnosis and rehabilitation. Proc 2nd Euro Conf Disability, Virtual Reality & Tech, Skovde, Sweden*; 1998.
22. Biocca F. Virtual reality technology: A tutorial. *Journal of Communication*. 1992;42(4):23-72.
23. Schultheis MT, Rizzo AA. The application of virtual reality technology in rehabilitation. *Rehabilitation psychology*. 2001;46(3):296.
24. Freeman D. Studying and treating schizophrenia using virtual reality: a new paradigm. *Schizophrenia bulletin*. 2008;34(4):605-10.
25. Park K-M, Ku J, Choi S-H, Jang H-J, Park J-Y, Kim SI, et al. A virtual reality application in role-plays of social skills training for schizophrenia: a randomized, controlled trial. *Psychiatry research*. 2011;189(2):166-72.
26. Rizzo A, Buckwalter JG, van der Zaag C, Neumann U, Thiébaux M, Chua C, et al., editors. *Virtual environment applications in clinical neuropsychology. Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat No 00CB37048); 2000: IEEE*.
27. Rose FD, Brooks BM, Rizzo AA. Virtual reality in brain damage rehabilitation. *Cyberpsychology & behavior*. 2005;8(3):241-62.
28. Subramanian S, Knaut LA, Beaudoin C, McFadyen BJ, Feldman AG, Levin MF. Virtual reality environments for post-stroke arm rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*. 2007;4(1):20.
29. Hsu S-Y, Fang T-Y, Yeh S-C, Su M-C, Wang P-C, Wang VY. Three-dimensional, virtual reality vestibular rehabilitation for chronic imbalance problem caused by Meniere's disease: a pilot study. *Disability and rehabilitation*. 2017;39(16):1601-6.

30. Jacobson J, Redfern MS, Furman JM, Whitney SL, Sparto PJ, Wilson JB, et al., editors. Balance NAVE: a virtual reality facility for research and rehabilitation of balance disorders. Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology; 2001: ACM.
31. Micarelli A, Viziano A, Alessandrini M. Role of head-mounted displays in enhancing vestibular rehabilitation effects: Comment on "Evaluation of the effectiveness of a Virtual Reality-based exercise program for Unilateral Peripheral Vestibular Deficit". Journal of Vestibular Research. 2019 (Preprint).
32. Smaerup M, Grönvall E, Larsen SB, Laessoe U, Henriksen J-J, Damsgaard EM. Computer-assisted training as a complement in rehabilitation of patients with chronic vestibular dizziness—a randomized controlled trial. Archives of physical medicine and rehabilitation. 2015;96(3):395-401.
33. Sparrer I, Duong Dinh TA, Ilgner J, Westhofen M. Vestibular rehabilitation using the Nintendo® Wii Balance Board—a user-friendly alternative for central nervous compensation. Acta oto-laryngologica. 2013;133(3):239-45.
34. Wang P-C, Chang C-H, Su M-C, Yeh S-C, Fang T-Y. Virtual reality rehabilitation for vestibular dysfunction. Otolaryngology—Head and Neck Surgery. 2011;145(2_suppl):P158-P9.
35. Whitney SL, Sparto PJ, Brown KE, Furman JM, Jacobson JL, Redfern MS. The potential use of virtual reality in vestibular rehabilitation: preliminary findings with the BNAVE. Journal of Neurologic Physical Therapy. 2002;26(2):72-8.
36. Yeh S-C, Chen S, Wang P-C, Su M-C, Chang C-H, Tsai P-Y. Interactive 3-dimensional virtual reality rehabilitation for patients with chronic imbalance and vestibular dysfunction. Technology and Health Care. 2014;22(6):915-21.
37. Micarelli A, Viziano A, Augimeri I, Micarelli D, Alessandrini M. Three-dimensional head-mounted gaming task procedure maximizes effects of vestibular rehabilitation in unilateral vestibular hypofunction: a randomized controlled pilot trial. International Journal of Rehabilitation Research. 2017;40(4):325-32.
38. Rosiak O, Jozefowicz-Korczyńska M. Role of head-mounted displays in enhancing vestibular rehabilitation effects: Comment on "Evaluation of the effectiveness of a Virtual Reality-based exercise program for Unilateral Peripheral Vestibular Deficit". Journal of vestibular research: equilibrium & orientation. 2019.
39. Viziano A, Micarelli A, Augimeri I, Micarelli D, Alessandrini M. Long-term effects of vestibular rehabilitation and head-mounted gaming task procedure in unilateral vestibular hypofunction: a 12-month follow-up of a randomized controlled trial. Clinical rehabilitation. 2019;33(1):24-33.
- R, M J-K. - Role of head-mounted displays in enhancing vestibular rehabilitation effects. J Vestib Res. 2019;15(10):VES-180665.
40. Alahmari KA, Sparto PJ, Marchetti GF, Redfern MS, Furman JM, Whitney SL. Comparison of virtual reality based therapy with customized vestibular physical therapy for the treatment of vestibular disorders. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2013;22(2):389-99.
41. Viirre E. Vestibular telemedicine and rehabilitation. Applications for virtual reality. Studies in health technology and informatics. 1996;29:299-305.
42. Viirre E, Draper M, Gailey C, Miller D, Furness T. Adaptation of the VOR in patients with low VOR gains. Journal of Vestibular Research. 1998;8(4):331-4.
43. Kramer PD, Roberts DC, Shelhamer M, Zee DS. A versatile stereoscopic visual display system for vestibular and oculomotor research. Journal of Vestibular Research. 1998;8(5):363-79.
44. Nokuo, T. and Sumii, T. Head mounted display, December 23, 2014. US Patent App. 29/502,182.
45. Cruz-Neira C, Sandin DJ, DeFanti TA, editors. Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE. Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques; 1993: Citeseer.
46. Gottshall KR, Sessoms PH, Bartlett JL. Vestibular physical therapy intervention: utilizing a computer assisted rehabilitation environment in lieu of traditional physical therapy. 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.

47. Szturm T, Reimer KM, Hochman J. Home-based computer gaming in vestibular rehabilitation of gaze and balance impairment. *Games for health journal*. 2015;4(3):211-20.
48. Clark RA, Bryant AL, Pua Y, McCrory P, Bennell K, Hunt M. Validity and reliability of the Nintendo Wii Balance Board for assessment of standing balance. *Gait & posture*. 2010;31(3):307-10.
49. Bieryla KA, Dold NM. Feasibility of Wii Fit training to improve clinical measures of balance in older adults. *Clinical interventions in aging*. 2013;8:775.
50. Nicholson VP, McKean M, Lowe J, Fawcett C, Burkett B. Six weeks of unsupervised Nintendo Wii Fit gaming is effective at improving balance in independent older adults. *Journal of aging and physical activity*. 2015;23(1):153-8.
51. McCormick J. How does the Kinect work. *Presentert ved Dickinson College*. 2011;6.
52. Clark RA, Pua Y-H, Fortin K, Ritchie C, Webster KE, Denehy L, et al. Validity of the Microsoft Kinect for assessment of postural control. *Gait & posture*. 2012;36(3):372-7.