



Clinical Applications of Static Posturography for Balance Assessment and Rehabilitation: Introducing Best Balance™, a Novel Iranian Force Plate System

Mahdi Shojaei

Graduate in Electrical Engineering (Control Systems), University of Zanjan, Zanjan, Iran

Mohamadreza Shojaei

Undergraduate Student in Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Qazvin Branch, Qazvin, Iran

Zahra Reyhaninezhad

Specialized Corrective Exercise Clinic, Red Crescent society of the Islamic republic of Iran, Tehran, Iran

Majed Dehghani*

Department of Medical Sciences and Technologies, ST.C., Islamic Azad University, Red Crescent society of the Islamic republic of Iran, Tehran, Iran

Abstract

Static postural control arises from continuous interaction among the visual, vestibular, and proprioceptive sensory systems. Traditional clinical balance assessments have been limited by examiner-dependent judgment and low sensitivity to subtle changes, while existing commercial static posturography systems have largely relied on imported technology and foreign technical support. This study aimed to provide a technical description of the Best Balance static force plate system and to conduct a narrative-comparative review of its clinical applications across different patient populations. Following a descriptive-analytical approach, the study was conducted in two parts: first, the hardware architecture, signal-processing algorithm, and evaluation protocols of the Best Balance system (manufactured by Ariyana Mechatronic Researchers, 2021) were examined by administering a clinical sensory interaction balance test and a postural stability test to one healthy adult volunteer as a proof-of-concept demonstration; second, a narrative literature search was conducted using keywords related to posturography, center of pressure, and interactive rehabilitation, and technical specifications of comparable commercial systems were extracted. Data analysis involved extraction of kinematic indices from center-of-pressure time series. The Best Balance system reliably tracked center-of-pressure displacement across different sensory conditions, reflecting a progressive increase in postural sway consistent with reduced sensory input availability. The postural stability test revealed directional asymmetries in voluntary center-of-pressure control, and the system generated structured clinical reports. The Best Balance system was introduced as a domestically developed static posturography technology with quantitative assessment and interactive rehabilitation capabilities. Further clinical validation studies and establishment of normative data for the Iranian population are recommended.

Keywords: static posturography, force plate, center of pressure (CoP), postural control, postural control, balance assessment, rehabilitation

* Corresponding Author: majed.dehghani@iau.ir

کاربردهای بالینی پاسچروگرافی ایستا در ارزیابی و بازتوانی تعادل: معرفی سامانه صفحه نیروی «بست بالانس» ساخت ایران

مهدی شجاعی

دانش آموخته مهندسی برق گرایش کنترل، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

محمد رضا شجاعی

دانشجوی کارشناسی رشته مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران

زهرا ریحانی نژاد

کلینیک تخصصی حرکات اصلاحی، مرکز جامع توان بخشی، جمعیت هلال احمر جمهوری اسلامی ایران، تهران، ایران

ماجد دهقانی *

گروه علوم و فناوری‌های پزشکی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، جمعیت هلال احمر جمهوری اسلامی ایران، تهران، ایران

چکیده

کنترل قامت ایستا از تعامل پیوسته سیستم‌های حسی بینایی، دهلیزی و حس عمقی حاصل می‌شود و ارزیابی بالینی سنتی آن با محدودیت‌هایی نظیر وابستگی به قضاوت آزمونگر و حساسیت پایین در تشخیص تغییرات جزئی همراه بوده است؛ در مقابل، دستگاه‌های پاسچروگرافی ایستای تجاری موجود عمدتاً وارداتی و وابسته به پشتیبانی خارجی بوده‌اند. هدف این مطالعه، معرفی فنی سامانه صفحه نیروی ایستای «بست بالانس» و مرور روایی-مقایسه‌ای کاربردهای بالینی پاسچروگرافی ایستا بود. پژوهش توسعه‌ای-کاربردی با رویکرد توصیفی-تحلیلی در دو بخش انجام شد: نخست، معماری سخت‌افزاری، الگوریتم پردازش سیگنال و پروتکل‌های ارزیابی سامانه بست بالانس (ساخت شرکت دانش‌بنیان پژوهشگران مکترونیک آریانا، ۱۴۰۰) با اجرای آزمون تعامل حسی بالینی و آزمون پایداری قامتی بر داوطلب سالم بزرگ‌سال، انتخاب شده به شیوه نمونه‌گیری در دسترس، به عنوان اثبات مفهوم بررسی شد؛ دوم، جست‌وجوی روایی متون با کلیدواژگان مرتبط با پاسچروگرافی، مرکز فشار و توان بخشی تعاملی انجام و مشخصات فنی سامانه‌های تجاری مشابه استخراج گردید. تحلیل داده‌ها با استخراج شاخص‌های سینماتیک سری زمانی مرکز فشار انجام شد. یافته‌ها نشان داد سامانه بست بالانس قادر به ثبت پایدار جابه‌جایی مرکز فشار در شرایط مختلف حسی است و الگوی افزایش تدریجی نوسان قامتی متناسب با کاهش ورودی‌های حسی در دسترس را بازتاب می‌دهد؛ همچنین آزمون پایداری قامتی الگوهای عدم تقارن جهتی در کنترل ارادی مرکز فشار را آشکار ساخت و سامانه قادر به تولید گزارش‌های بالینی ساختارمند بود. سامانه بست بالانس به عنوان فناوری بومی پاسچروگرافی ایستا با قابلیت‌های ارزیابی کمی و توان بخشی تعاملی معرفی شد و انجام مطالعات اعتبارسنجی بالینی با جمعیت‌های بیمار برای تعمیم‌پذیری بیشتر یافته‌ها، پیشنهاد گردید.

کلیدواژه‌ها: پاسچروگرافی ایستا، صفحه نیرو، مرکز فشار، کنترل قامتی، ارزیابی تعادل، بازتوانی

مقدمه

کنترل قامت ایستا^۱ یکی از بنیادی‌ترین پیش‌نیازهای انجام فعالیت‌های روزمره زندگی از جمله ایستادن، راه رفتن و جابه‌جایی است و از هم‌کنشی پیوسته سه سامانه حسی بینایی، دهلیزی و حس عمقی^۲ با دستگاه عصبی-عضلانی حاصل می‌شود [۱]. حفظ تعادل در وضعیت ایستاده آرام، فرایندی فعال است که طی آن دستگاه عصبی مرکزی با پردازش پیوسته داده‌های حسی، جابه‌جایی مرکز فشار^۳ را در محدوده سطح اتکا تنظیم می‌کند تا مرکز جرم بدن در محدوده پایداری باقی بماند [۱۱]. اختلال در هر یک از این سامانه‌ها یا در یکپارچگی آن‌ها، با افزایش نوسان قامتی، کاهش پایداری و در نهایت افزایش خطر سقوط و کاهش استقلال فردی همراه است [۶].

ارزیابی بالینی تعادل به‌طور سنتی بر آزمون‌های مشاهده‌ای و مقیاس‌های عملکردی همچون مقیاس تعادل برگ^۴ و آزمون برخاستن و رفتن زمان‌دار^۵ استوار بوده است. این آزمون‌ها اگرچه ساده، کم‌هزینه و در دسترس‌اند، اما به قضاوت آزمونگر وابسته‌اند، از حساسیت کافی برای تشخیص تغییرات جزئی برخوردار نیستند و اغلب دچار اثر سقف^۶ می‌شوند [۴]. در مقابل، پاسچروگرافی ایستا^۷ با به‌کارگیری صفحه نیرو^۸، امکان ثبت کمی، عینی و تکرارپذیر جابه‌جایی مرکز فشار را در طول زمان فراهم می‌کند و از این طریق داده‌هایی مانند دامنه، مسافت طی‌شده، سرعت و شتاب نوسان در راستاهای قدامی-خلفی^۹ و میانی-جانبی^{۱۰}، سطح بیضی اطمینان^{۱۱} و توزیع وزن روی هر پا را به‌دست می‌دهد [۳].

یکی از پرکاربردترین روش‌ها در پاسچروگرافی ایستا، مقایسه نوسان قامتی^{۱۲} در دو شرایط چشمان‌باز و چشمان‌بسته و محاسبه نسبت رومبرگ^{۱۳} است. این نسبت میزان وابستگی فرد به ورودی بینایی برای حفظ تعادل را کمی می‌کند و شاخص حساس به‌منظور شناسایی نقص در سامانه‌های حسی جبرانی به‌شمار می‌رود [۲، ۷]. با وجود ارزش تشخیصی بالای این فناوری، دستگاه‌های صفحه نیروی تجاری موجود عمدتاً وارداتی، پرهزینه و وابسته به خدمات پشتیبانی خارجی هستند که دسترسی گسترده مراکز بالینی و پژوهشی کشور به آن‌ها را محدود کرده است [۱۳].

در همین راستا، دستگاه Best Balance Force Plate (شکل ۱) توسط شرکت دانش‌بنیان پژوهشگران مکاترونیک آریانا با هدف رفع این شکاف در زیرساخت ارزیابی بالینی کشور طراحی و ساخته شده است. هدف مطالعه حاضر، معرفی فنی این سامانه و مرور روایی و مقایسه‌ای کاربردهای بالینی پاسچروگرافی ایستا در گروه‌های مختلف بیماری است تا جایگاه این فناوری بومی در بافت بالینی و پژوهشی کشور تبیین گردد.

1. static postural control
2. visual, vestibular, proprioceptive
3. center of pressure
4. Berg balance scale (BBS)
5. Timed up and go test (TUG)
6. ceiling effect
7. static posturography
8. Force Plate
9. Anterior-Posterior (AP)
10. Medial-Lateral (ML)
11. 95% Confidence ellipse area (CEA)
12. postural sway comparison
13. Romberg quotient



شکل ۱. نمای کلی دستگاه Best Balance Force Plate، این سیستم شامل یک صفحه نیروی استاتیک و یک نمایشگر بزرگ جهت ارائه بازخورد زیستی^۱ دیداری به کاربر می‌باشد.

پیشینه پژوهش

۱- پاسچروگرافی ایستا به عنوان استاندارد طلایی

postural control حاصل هم‌افزایی پیچیده‌ای میان سیستم‌های بینایی، proprioceptive و vestibular است [۲]. اگرچه مقیاس‌های بالینی سنتی نظیر BBS و آزمون TUG به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، این ابزارها غالباً با محدودیت‌هایی نظیر ذهنی‌بودن ارزیابی، Ceiling Effect و حساسیت پایین در تشخیص اختلالات ظریف تعادلی مواجه‌اند [۴]. در نتیجه، پاسچروگرافی مبتنی بر Force Plate به عنوان «استاندارد طلایی» برای اندازه‌گیری کمی و عینی تعادل مطرح شده است [۹]. با اندازه‌گیری جابه‌جایی COP، پژوهشگران قادرند شاخص‌های زیستی حیاتی نظیر سرعت متوسط نوسان، مسافت طی شده توسط COP و مساحت بیضی اطمینان ۹۵ درصد را استخراج کنند که همگی از شاخص‌های بسیار حساس به منظور ارزیابی پایداری در سالمندان و جمعیت‌های دارای اختلالات عصبی محسوب می‌شوند [۱۰].

۲- الزامات فنی: فرکانس نمونه‌برداری و دقت اندازه‌گیری

دقت تحلیل‌های پوسچروگرافیک به شدت وابسته به مشخصات فنی دستگاه است. اگرچه بسیاری از مطالعات از فرکانس نمونه‌برداری بین ۲۰ تا ۴۰ هرتز بهره برده‌اند [۱۱، ۱۲]، مطالعات اخیر نشان می‌دهند که فرکانس‌های نمونه‌برداری بالاتر برای ثبت لرزش‌های ظریف^۲ و تعدیل‌های سریع پوسچرال، به‌ویژه در گروه‌های بیمار، ضروری است [۱۰]. دستگاه Best Balance با فرکانس نمونه‌برداری ۱۶۰ هرتز و دقت زیر ۵ میلی‌متر، هم‌سو با الزامات پژوهشی پیشرفته عمل می‌کند و بر مشکلات نوین موجود در دستگاه‌های سطح پایین‌تر غلبه می‌نماید [۱۳]. علاوه بر این، به کارگیری هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی برای بهبود داده‌های خام سنسورهای نیرو^۳، پیشرفتی چشمگیر

1. biofeedback
2. tremors
3. load cells

نسبت به روش‌های کالیراسیون خطی سنتی به‌شمار می‌رود که نایستایی^۱ ذاتی سیگنال‌های زیستی را نیز پوشش می‌دهد [۱۴].

۳- کاربرد بالینی در جمعیت‌های هدف

اندازه‌گیری‌های مبتنی بر Force Plate، پایایی آزمون-بازآزمون^۲ بالایی را در شرایط مختلف بالینی از جمله بیماری مزمن انسدادی ریه^۳، مولتیپل اسکلروزیس^۴ و فلج مغزی^۵ نشان داده‌اند [۴، ۱۵، ۱۶].

- سالمندان: افزایش نوسان و سرعت Medial-Lateral از پیش‌بینی‌کننده‌های معنادار خطر سقوط محسوب می‌شود [۱۷].

- ارتوپدی: در بیماران مبتلا به بی‌ثباتی مزمن مچ پا^۶، دامنه COP و شاخص زمان تا مرز^۷ برای ارزیابی بهبود عملکردی حائز اهمیت‌اند [۷].

- اختلالات عصبی: در MS و بیماری پارکینسون، پاسچوگرافی با ثبت افزایش مساحت نوسان و تغییرات چگالی طیفی توان^۸، پیشرفت بیماری را پایش می‌کند [۴].

۴- گذار از ارزیابی به آموزش تعاملی (بازی درمانی)

یکی از کاستی‌های اساسی توان‌بخشی سنتی، فقدان مشارکت فعال بیمار و آموزش وظیفه‌محور^۹ است [۵]. مطالعات اخیر نشان می‌دهند پلتفرم‌های بازی‌محور تعاملی که از visual biofeedback بهره می‌گیرند، انگیزه بیمار و کنترل عصبی-عضلانی را به‌طور معناداری ارتقا می‌بخشند [۱۸]. حالت‌های تمرینی که حد پایداری را از طریق انتقال وزن پویا به چالش می‌کشند، مشابه بازی‌های Car Runner و Flight Simulator موجب تسهیل نوروپلاستیسته^{۱۰} و انتقال اثرات تمرینی به فعالیت‌های روزمره می‌شوند [۵]. با ادغام آزمون‌های ارزیابی دقیق نظیر CTSIB با توان‌بخشی تعاملی، سامانه‌های نوین راه‌حلی جامع و همه‌کاره برای عملکرد بالینی ارائه می‌دهند [۱۷].

۵- سامانه‌های تجاری و چشم‌انداز بازار

بازار ارزیابی عینی تعادل در حال حاضر میان ابزارهای آزمایشگاهی گران‌قیمت و تجهیزات مصرفی ارزان‌قیمت دوبراره شده است، امری که خلأ چشمگیری برای دستگاه‌های قابل حمل با کیفیت بالینی ایجاد کرده است.

- سامانه‌های استاندارد طلایی: پلتفرم‌های نیروی AMTI به‌دلیل دقت بالا و توانایی ثبت نیروها و گشتاورهای چندمحوره، به‌طور گسترده به‌عنوان استاندارد طلایی آزمایشگاهی شناخته می‌شوند [۱۹]. با این حال، هزینه بالا و فقدان قابلیت حمل، استفاده از آن‌ها را عموماً به مراکز پژوهشی تخصصی محدود می‌کند [۲۰].

-
1. non-stationarity
 2. test-retest
 3. Chronic obstructive pulmonary disease (COPD)
 4. Multiple sclerosis (MS)
 5. Cerebral palsy (CP)
 6. Chronic ankle instability (CAI)
 7. Time-to-Boundary (TTB)
 8. power spectral density
 9. task-specific
 10. neuroplasticity

- معیارهای بالینی: سامانه NeuroCom EquiTest مدت‌هاست به‌عنوان معیار بالینی برای آزمون سازمان‌دهی حسی^۱ به‌کار می‌رود. با این حال، پیشینه پژوهشی نشان می‌دهد این دستگاه به‌دلیل محدودیت در حرکات صفحه ساجیتال^۲ و همچنین پایان پشتیبانی سازنده در سال ۲۰۲۶، نیازمند جایگزین‌های نوین است [۴].
- پلتفرم‌های رباتیک و یکپارچه: سامانه‌های نوآورانه‌ای نظیر پلتفرم رباتیک hunova آموزش چندوجهی پیشرفته (منفعل، فعال و کمکی) را ارائه می‌دهند و همبستگی قوی با استانداردهای طلایی سنتی نشان داده‌اند، درحالی‌که محیطی جذاب‌تر و بازتر برای بیماران فراهم می‌کنند [۴].
- راه‌حل‌های بالینی قابل‌حمل: دستگاه‌هایی نظیر BTrackS به‌عنوان جایگزین‌های ثبت‌شده در FDA و مقرون‌به‌صرفه برای Force Plate آزمایشگاهی مطرح شده‌اند. BTrackS با استفاده از اتصال USB، مشکلات پایداری بردهای مصرفی را برطرف کرده و برای ارزیابی خطر سقوط در سالمندان اعتبارسنجی شده است [۱۳].
- جایگزین‌های ارزان‌قیمت: صفحه تعادل Wii نینتندو^۳ اغلب در پژوهش‌ها به‌عنوان ابزاری کم‌هزینه ذکر می‌شود. با وجود محبوبیت، این دستگاه با محدودیت‌های فنی قابل توجهی ازجمله ناپایداری فرکانس نمونه‌برداری و افت سیگنال ناشی از اتصال بلوتوث مواجه است که می‌تواند یکپارچگی داده‌های بالینی را مخدوش کند [۱۳].

روش‌ها

مطالعه حاضر پژوهشی توسعه‌ای-کاربردی با رویکرد توصیفی-تحلیلی است که در دو بخش به‌هم پیوسته سازمان یافته است: نخست، معرفی جامع معماری سخت‌افزاری، پردازش سیگنال، پروتکل‌های ارزیابی و مازول‌های توان‌بخشی سامانه پلتفرم نیروی ایستای «بست بالانس»؛ و دوم، راهبرد جست‌وجوی روایی و مقایسه‌ای متون به‌منظور تبیین کاربردهای بالینی این ابزار در جمعیت‌های هدف.

معرفی سامانه و معماری سخت‌افزاری

دستگاه Best Balance یک Static Force Plate با ظرفیت تحمل وزن تا ۲۰۰ کیلوگرم است که با هدف ارزیابی کمی کنترل وضعیتی و توان‌بخشی مبتنی بر پس‌خوراند زیستی توسعه یافته است (شکل ۱). هسته اندازه‌گیری این دستگاه از load cell با چیدمان متقارن تشکیل شده است که نیروهای عمودی وارد بر صفحه را با نرخ نمونه‌برداری ۱۶۰ هرتز ثبت می‌کنند. این نرخ نمونه‌برداری براساس استانداردهای استابیلومتری برای ثبت کامل طیف فرکانسی نوسانات قامتی انسان (عمدتاً زیر ۱۰ هرتز) کاملاً کافی است و امکان تحلیل دقیق دینامیک مرکز فشار (CoP) را فراهم می‌آورد [۱۲].

دستگاه به‌گونه‌ای طراحی شده است که آزمون‌ها بر روی سطح سخت و نیز بر روی سطح نرم (با استفاده از بالش‌تک تعادلی تعبیه‌شده) قابل اجرا باشند تا شرایط استاندارد آزمون CTSIB تأمین گردد. به‌منظور تسهیل تعامل بیمار با سیستم در حین تمرینات، یک نمایشگر بزرگ در ساختار فیزیکی دستگاه یکپارچه شده است که داده‌های بصری را به‌صورت بدون وقفه^۴ ارائه می‌دهد.

1. sensory organization test
2. sagittal plane
3. WBB
4. real time

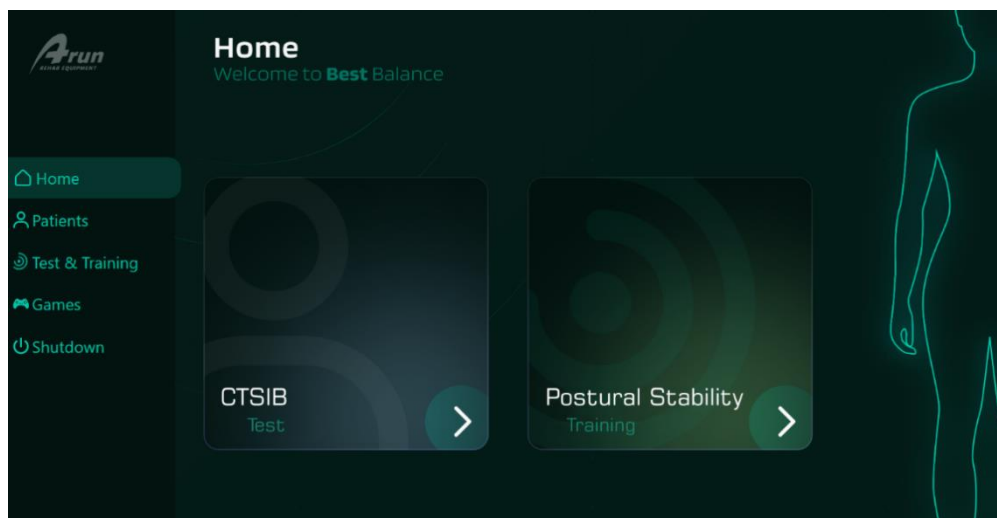
پردازش سیگنال و مدل‌سازی مرکز فشار با هوش مصنوعی

داده‌های خام آنالوگ حاصل از Load Cells پس از دیجیتال‌سازی در برد الکترونیکی اختصاصی دستگاه فیلتر شده و نویزهای محیطی حذف می‌گردند. نوآوری کلیدی این سامانه در تبدیل داده‌های خام حسگرها به مختصات فضایی دقیق، بهره‌گیری از یک شبکه عصبی عمیق^۱ است. این مدل با استفاده از مجموعه داده‌های حاصل از وزنه‌های کالیبراسیون دقیق در نقاط متعدد صفحه آموزش دیده است. رویکرد یادگیری ماشین در مقایسه با روش‌های کالیبراسیون خطی سنتی، خطاهای غیرخطی ذاتی سلول‌های بارسنج و ناپایداری^۲ سیگنال‌های زیستی را به‌طور مؤثرتری جبران می‌کند. این مدل مختصات مرکز فشار را با دقت کمتر از ۵ میلی‌متر محاسبه می‌نماید.

پارامترهای کمی استخراج‌شده از سری زمانی CoP عبارت‌اند از:

- مختصات لحظه‌ای CoP در محورهای AP و ML
- سرعت و شتاب حرکت CoP در هر دو محور
- مسافت کل طی‌شده توسط CoP در طول آزمون
- Confidence Ellipse Area ۹۵٪
- OSI
- RMS نوسانات
- توزیع وزن روی هر پا^۳
- Romberg Quotient

معماری نرم‌افزاری و مدیریت پرونده بیمار



شکل ۲. نمای کلی رابط کاربری سامانه Best Balance با نمایش منوهای اصلی

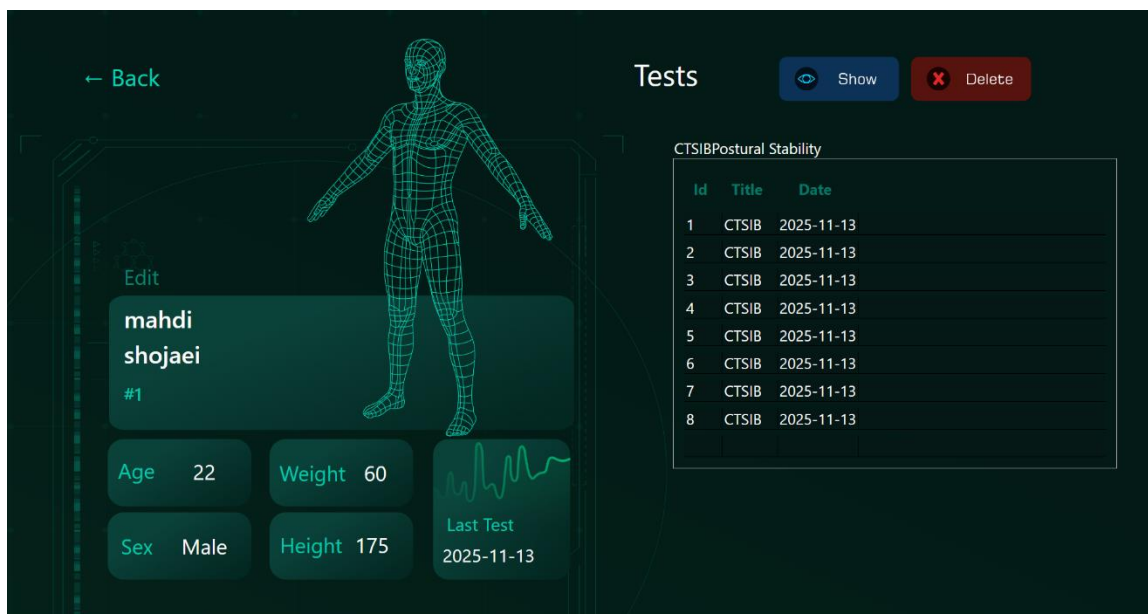
نرم‌افزار Best Balance دارای رابط کاربری یکپارچه است (شکل ۲) که شامل ماژول‌های مدیریت پرونده، ارزیابی و توان‌بخشی می‌باشد.

ماژول پروفایل بیمار (شکل ۳): این ماژول امکان ثبت اطلاعات دموگرافیک و بالینی بیمار یا ورزشکار را فراهم می‌آورد. با انتخاب پروفایل هر بیمار، تمامی لاگ‌ها، نتایج آزمون‌ها و تمرینات به‌صورت طولی در پرونده وی ذخیره

1. deep neural network
2. non-stationarity
3. weight distribution

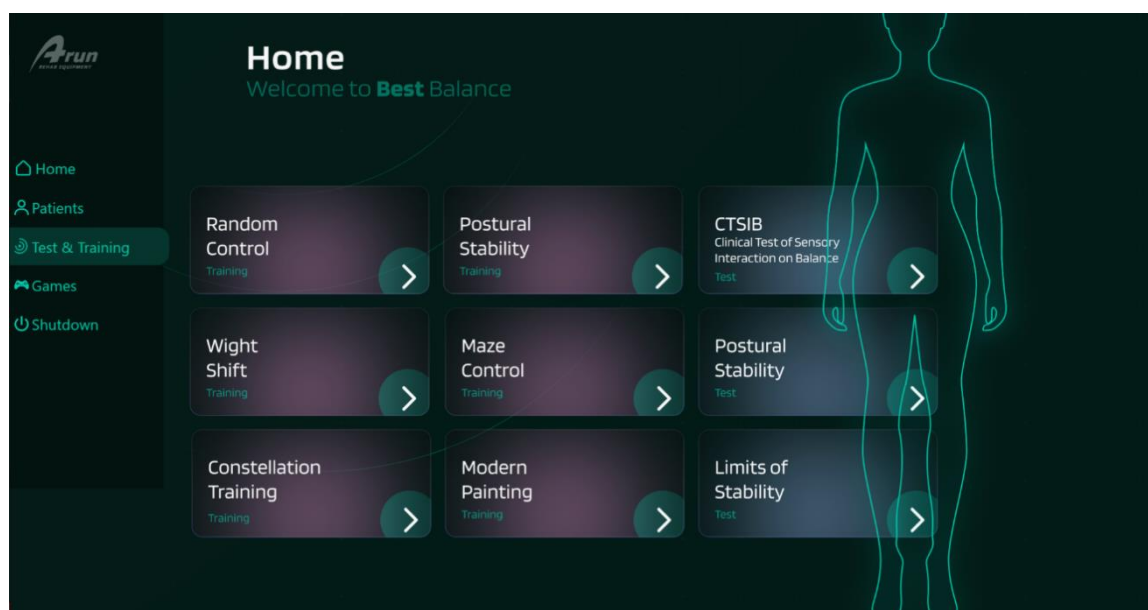
۵۷ | شجاعی و همکاران، کاربردهای بالینی پاسچروگرافی ایستا در ارزیابی و بازتوانی تعادل: معرفی سامانه صفحه نیروی «بست بالانس»

می‌گردند و امکان پایش روند درمان در طول زمان را فراهم می‌سازند. دسترسی به تاریخچه کامل نتایج و مقایسه جلسات مختلف از طریق همین منو میسر است.



شکل ۳. صفحه مدیریت پرونده بیمار و دسترسی به تاریخچه نتایج

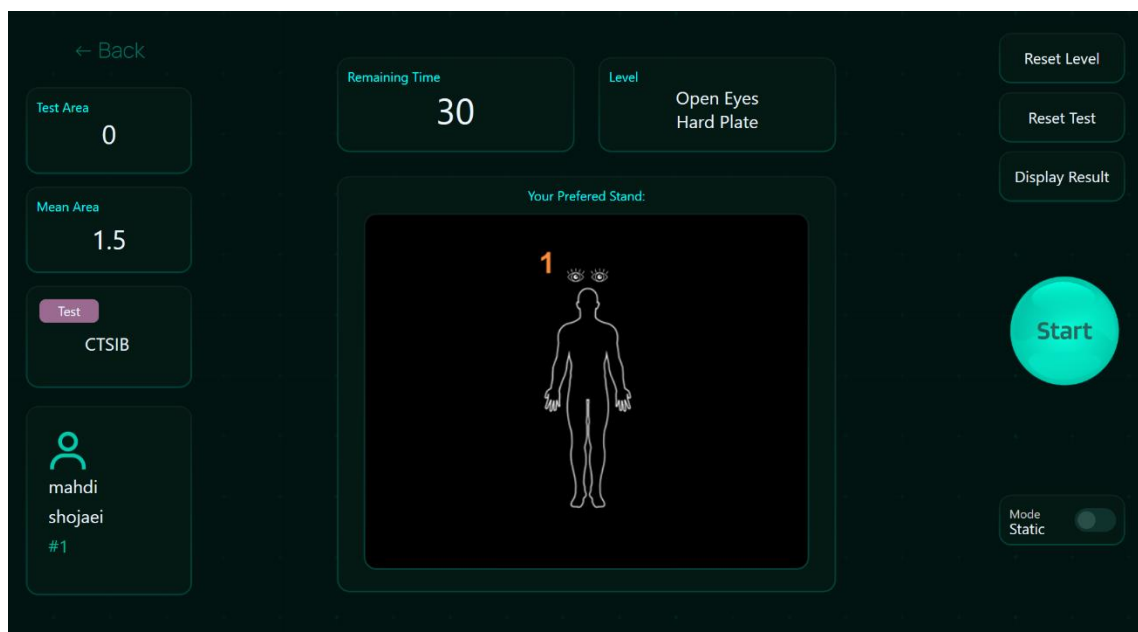
نمای کلی بخش آزمون‌ها و تمرینات در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمای کلی بخش انتخاب آزمون‌ها و تمرینات

پروتکل‌های ارزیابی بالینی

۱. آزمون تعامل حسی و تعادل^۱



شکل ۵. نمای آزمون CTSIB

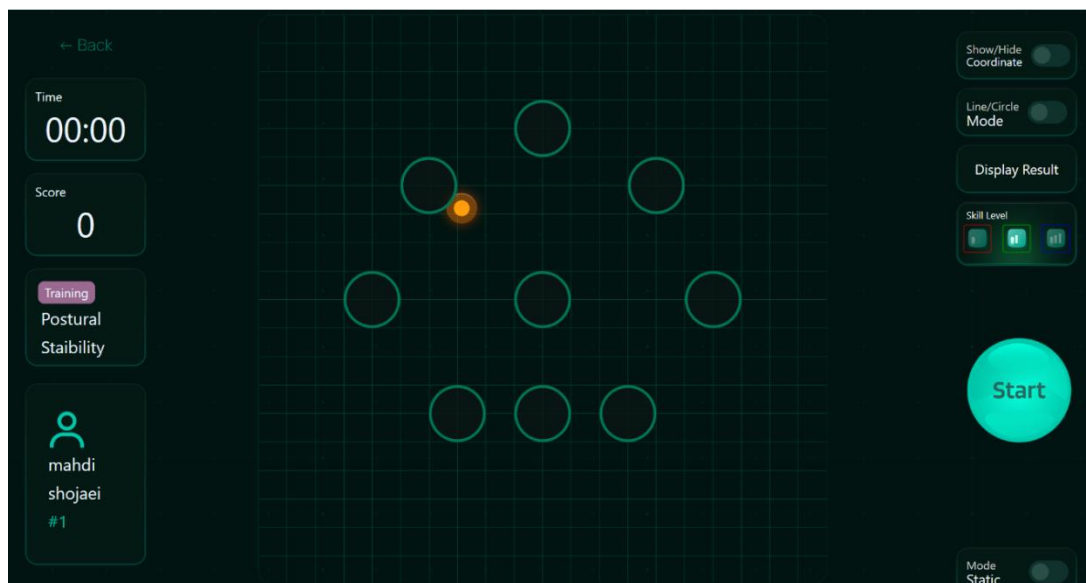
آزمون CTSIB (شکل ۵) یکی از جامع‌ترین پروتکل‌های ارزیابی تعادل در این سامانه است که در چهار شرط حسی استاندارد اجرا می‌شود:

جدول ۱. پروتکل ارزیابی تست CTSIB

مرحله	سطح فورس	وضعیت بینایی
۱	سخت	چشمان باز
۲	سخت	چشمان بسته
۳	نرم (بالشتک)	چشمان باز
۴	نرم (بالشتک)	چشمان بسته

مدت هر مرحله ۳۰ ثانیه است. این پروتکل با دستکاری ورودی‌های بینایی و حس عمقی، توانایی سیستم عصبی مرکزی در یکپارچه‌سازی اطلاعات حسی را ارزیابی می‌کند و شاخص‌های کمی دقیقی برای غربالگری خطر سقوط فراهم می‌آورد.

۲. آزمون ثبات قامتی^۱

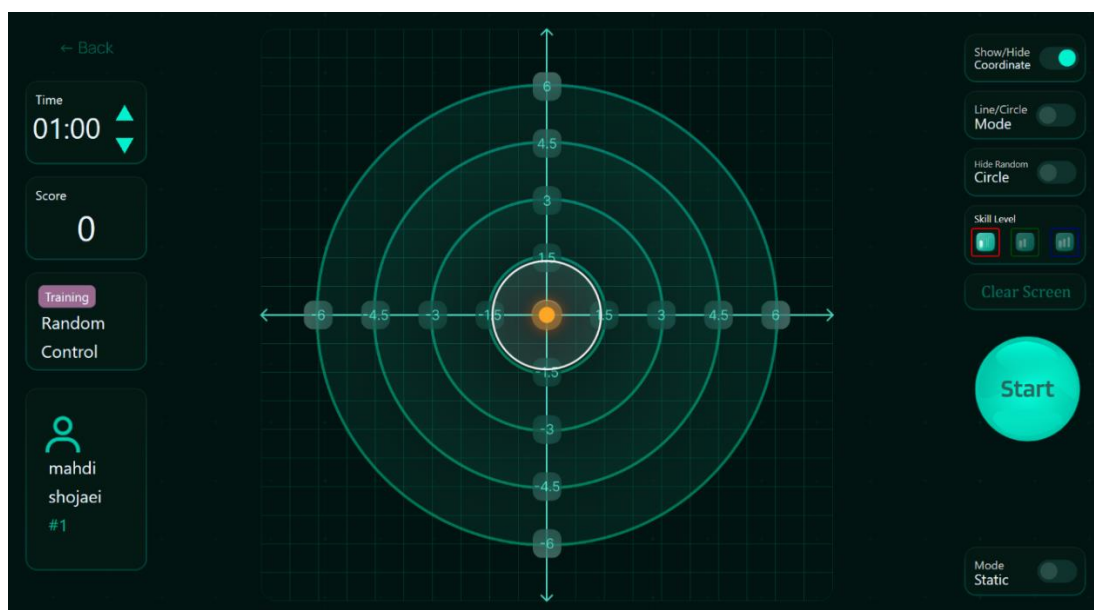


شکل ۶. نمای آزمون Postural Stability و نمایش هشت ناحیه هدف

در این آزمون (شکل ۶)، هشت ناحیه هدف مستقل دایره‌ای در اطراف مرکز صفحه تعریف شده‌اند: مرکز، راست، چپ، بالا، پایین، بالا-راست، بالا-چپ، پایین-راست و پایین-چپ. در شروع آزمون، CoP بیمار در ناحیه مرکزی قرار دارد. پس از گذشت زمانی کوتاه، یکی از نواحی به صورت تصادفی چشمک می‌زند و بیمار باید CoP خود را از مرکز به سمت ناحیه هدف منتقل کند. این پروتکل ضعف عضلانی، کسری کنترل عصبی-عضلانی و محدودیت‌های حدود پایداری را در جهات مختلف آشکار می‌سازد.

ماژول‌های تمرینی مبتنی بر biofeedback

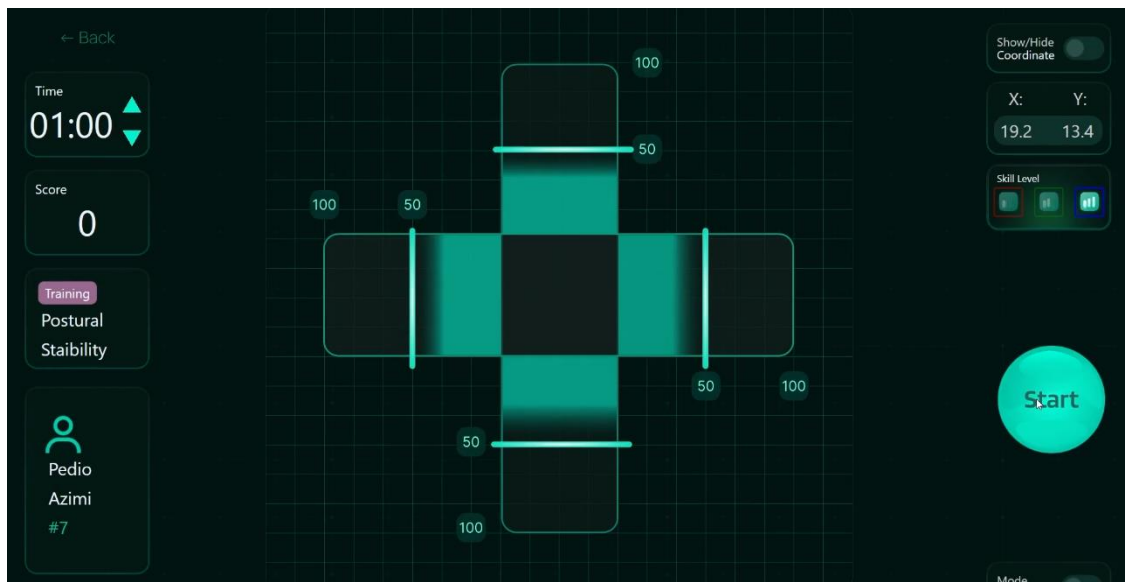
۱. تمرین کنترل تصادفی^۱



شکل ۷. نمایش رابط بصری تمرین Random Control و دایره متحرک CoP

در این تمرین (شکل ۷)، بیمار از Biofeedback بصری تلاش می‌کند CoP خود را در درون دایره‌ای متحرک با مسیر تصادفی نگه دارد. سرعت حرکت دایره و سطح دشواری در سه درجه قابل تنظیم است. این تمرین به‌طور خاص زمان واکنش، تمرکز و توانایی تطبیق سریع با تغییرات غیرقابل پیش‌بینی را بهبود می‌بخشد.

۲. تمرین انتقال وزن^۱



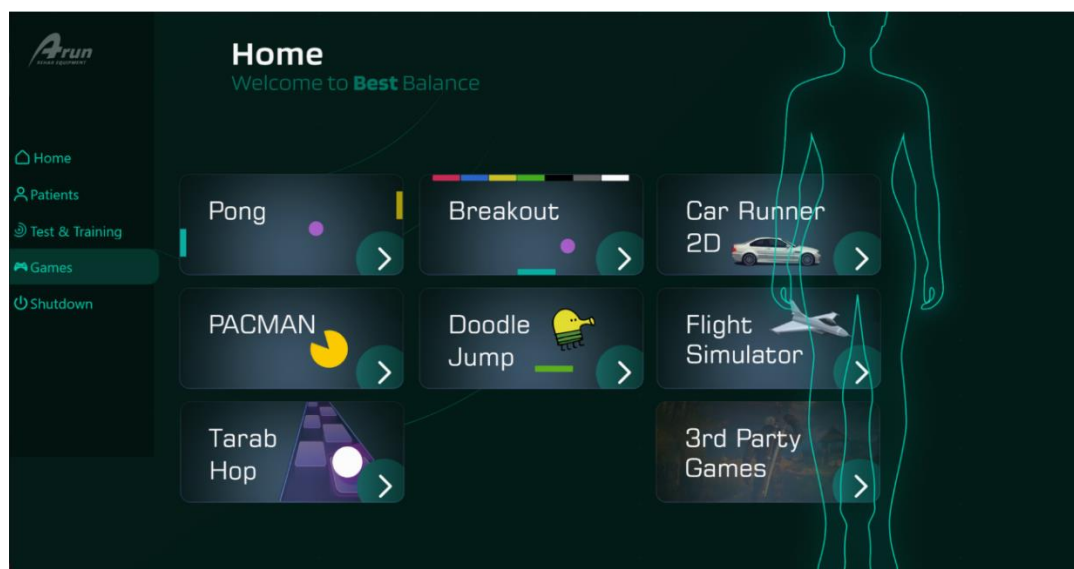
شکل ۸. رابط کاربری تمرین Weight Shift با نمایش نواحی هدف

در این تمرین (شکل ۸)، بیمار باید CoP خود را در درون ناحیه‌ای محدود مشخص نگه دارد و از برخورد آن با مرز ناحیه جلوگیری کند؛ مادامی که موفق به این کار شود، امتیازش افزایش می‌یابد. سه نوع ناحیه برای اهداف درمانی متفاوت تعریف شده است:

- مستطیل عمودی: کنترل حرکات ناگهانی ML
- مستطیل افقی: کنترل حرکات ناگهانی AP
- مربع: کنترل هم‌زمان هر دو محور

بازی درمانی

به‌منظور افزایش انگیزه بیمار و ارتقای پایداری به پروتکل‌های توان‌بخشی، دستگاه Best Balance به ماژول‌های بازی‌های گرافیکی مجهز است (شکل ۹) که task-specific training را در قالبی جذاب ارائه می‌دهند:



شکل ۹. نمای کلی ماژولهای Gamification

بازی Flight Simulator (شکل ۹): بیمار با انتقال وزن بدن، یک هواپیما را در مسیرهای پویا هدایت می‌کند. این بازی به‌طور خاص هماهنگی، سرعت واکنش و کنترل دقیق حرکات تعادلی را به چالش می‌کشد.



شکل ۱۰. نمای کلی بازی Flight Simulator

Track Racer: بیمار با کنترل CoP، یک خودرو را در مسیر مشخص هدایت می‌کند و تمرکز، کنترل دقیق حرکت و پایداری کلی بدن را تقویت می‌نماید. این رویکرد بازی‌درمانی با ارائه چالش‌های غیرقابل پیش‌بینی و پس‌خوراند زیستی بصری درنگر، نوروپلاستیسته را تسهیل کرده و انتقال اثرات تمرینی به فعالیت‌های روزمره را ارتقا می‌دهد.

راهبرد جست‌وجوی روایی و مقایسه‌ای متون

به‌منظور تبیین جایگاه علمی و فنی دستگاه Best Balance، جست‌وجوی روایی^۱ در پایگاه‌های PubMed، Scopus و Google Scholar با ترکیب کلیدواژه‌های «force-plate posturography»، «CoP»، «postural control»، «balance training»، «gamification» و نام بیماری‌های هدف (سالمندی، بی‌ثباتی مچ پا، مولتیپل اسکلروزیس، پارکینسون، فلج مغزی) انجام شد. برخلاف مرورهای نظام‌مند، این جست‌وجو فاقد فلوچارت PRISMA، داوری دوگانه و ارزیابی رسمی کیفیت مطالعات بوده و صرفاً هدف آن، فراهم آوردن زمینه علمی برای معرفی کاربردهای بالینی دستگاه است. علاوه بر این، مشخصات فنی سامانه‌های تجاری موجود (از جمله AMTI، NeuroCom EquiTest، hunova، BTrackS و Nintendo Wii Balance Board) از منابع سازنده، اسناد ثبت نظارتی (مانند FDA) و مطالعات اعتبارسنجی مرتبط استخراج شد تا مبنایی برای مقایسه فنی سامانه Best Balance با راه‌حل‌های موجود در بخش بحث فراهم گردد.

یافته‌ها

اعتبارسنجی عملکرد فنی دستگاه

دستگاه Best Balance دقت اندازه‌گیری مرکز فشار زیر ۵ میلی‌متر در سطح فعال پلتفرم و نرخ نمونه‌برداری پایدار ۱۶۰ هرتز را در تمامی شرایط آزمون حفظ کرد. مدل کالیبراسیون مبتنی بر شبکه عصبی با استفاده از تعداد قابل توجه‌ای نقطه کالیبراسیون آموزش دیده است که دقت و پایداری اندازه‌گیری را در سراسر سطح پلتفرم تضمین می‌کند.

خروجی‌های ارزیابی بالینی

نتایج آزمون CTSIB

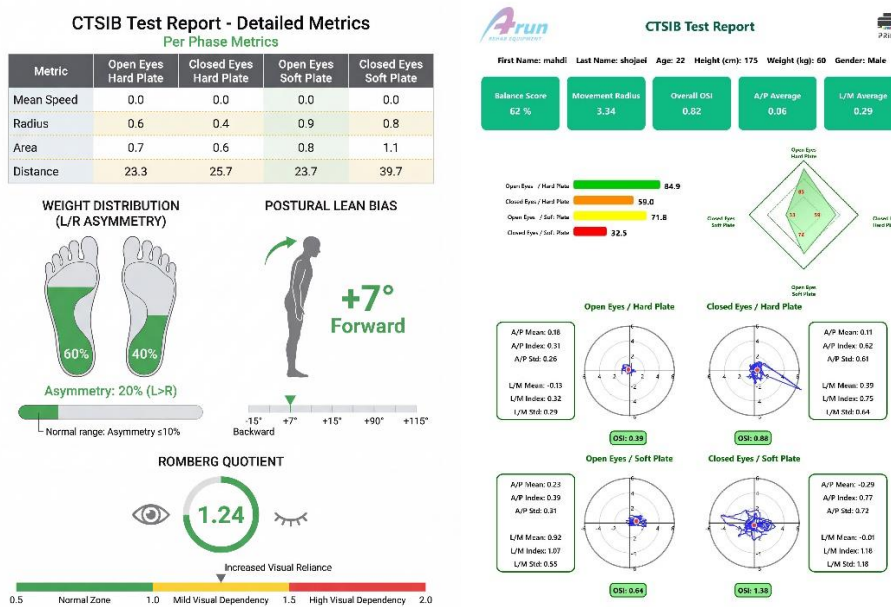
برای نمایش قابلیت‌های خروجی بالینی سیستم، پروتکل CTSIB بر روی یک فرد سالم بزرگسال (مرد، ۲۲ ساله، قد ۱۷۵ سانتی‌متر، وزن ۶۰ کیلوگرم) در چهار شرایط حسی اجرا شد: چشم باز روی سطح ثابت (شرایط ۱)، چشم بسته روی سطح ثابت (شرایط ۲)، چشم باز روی سطح ناپایدار (شرایط ۳)، و چشم بسته روی سطح ناپایدار (شرایط ۴). نتایج کمی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای سینماتیک مرکز فشار در چهار مرحله آزمون CTSIB

پارامتر	چشم باز/سطح ثابت	چشم بسته/سطح ثابت	چشم باز/سطح ناپایدار	چشم بسته/سطح ناپایدار
OSI	۰/۳۹	۰/۸۸	۰/۶۴	۱/۳۸
A/P Index	۰/۳۱	۰/۶۲	۰/۳۹	۰/۷۷
M/L Index	۰/۳۲	۰/۷۵	۱/۰۷	۱/۱۸
Radius (mm)	۰/۶	۰/۴	۰/۹	۰/۸
Area (mm ²)	۰/۷	۰/۶	۰/۸	۱/۱

همان‌طور که در یک فرد سالم انتظار می‌رود، مقادیر OSI از مرحله ۱ تا مرحله ۴ به‌صورت پیش‌رونده افزایش یافت (از ۰/۳۹ تا ۱/۳۸)، که بازتاب‌دهنده کاهش تدریجی ورودی‌های حسی در دسترس است. این الگو با یافته‌های مطالعات پیشین در حوزه پوسچروگرافی استاتیک هم‌خوانی دارد.

شاخص Romberg برابر با ۱/۲۴ به دست آمد که در محدوده «وابستگی بینایی خفیف» قرار می گیرد و نشان دهنده تکیه نسبی این فرد به ورودی بینایی برای حفظ تعادل است. تحلیل توزیع وزن نشان داد ۶۰٪ بار بدن روی پای چپ و ۴۰٪ روی پای راست قرار داشت که عدم تقارن ۲۰٪ ($R < L$) را نشان می دهد؛ این مقدار از محدوده طبیعی ($\geq ۱۰\%$) خارج است و می تواند در ارزیابی های بالینی به عنوان یافته ای قابل پیگیری مطرح شود. نمودارهای مسیر حرکت مرکز فشار در هر شرایط و پارامترهای کینماتیک تفصیلی در شکل ارائه شده اند.



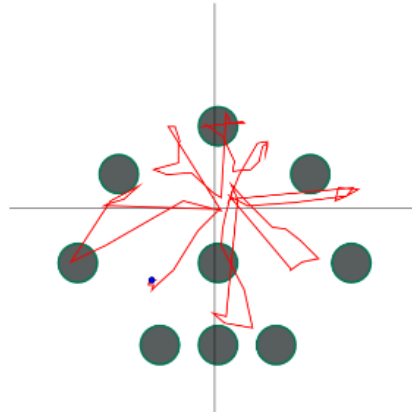
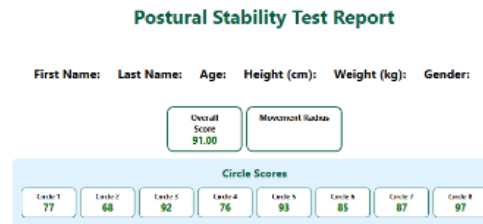
شکل ۱۱. نتایج تست CTSIB

نتایج آزمون پایداری پاسچرال

آزمون Postural Stability توانایی فرد را در جابه جایی ارادی مرکز فشار به سمت هشت هدف محیطی که به صورت شعاعی در اطراف مرکز پلتفرم چیده شده بودند، ارزیابی کرد. نمره کلی ۹۱ از ۱۰۰ به دست آمد که نشان دهنده هماهنگی عصبی-عضلانی مطلوب و دقت حرکتی بالا در هدایت ارادی مرکز فشار است.

تحلیل امتیازات دایره های منفرد الگوی عدم تقارن جهتی را آشکار کرد. پایین ترین امتیاز در دایره ۲ (نمره: ۶۸) مشاهده شد که موقعیت آن در ربع فوقانی-راست (جهت قدامی-جانبی راست) قرار دارد. این یافته نشان دهنده کاهش نسبی کنترل پاسچرال در جهت انتقال وزن به سمت قدامی-جانبی راست است که می تواند بازتاب دهنده ضعف در فعال سازی عضلات ابدکتور یا کنترل اکستریک در این جهت باشد. در مقابل، بالاترین امتیاز در دایره ۸ (نمره: ۹۷) ثبت شد.

نمودار مسیر حرکتی مرکز فشار (شکل ۱۲) مسیرهایی با کیفیت متغیر را نشان داد: حرکت به سمت اهداف جانبی و قدامی-جانبی راست با نوسانات بیشتر و انحراف مسیر همراه بود، در حالی که حرکت به سمت اهداف خلفی و جانبی چپ از روانی و دقت بیشتری برخوردار بود. این الگو با استراتژی جبرانی در جهت ضعیف تر سازگار است.



شکل ۱۲. نتایج تست Postural Stability

قابلیت‌های گزارش‌دهی سیستم

سیستم به صورت خودکار گزارش‌های بالینی ساختارمند برای هر دو پروتکل ارزیابی تولید کرد که شامل تصویرسازی مسیر مرکز فشار، پارامترهای کینماتیک جدول‌بندی‌شده، تحلیل توزیع وزن، نمودار انحراف پاسچرال و شاخص Romberg بود. تمامی خروجی‌ها برای مرور بالینی فوری، چاپ و مقایسه طولی بین جلسات در دسترس بودند.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، معرفی فنی و ارزیابی قابلیت‌های بالینی دستگاه پاسچروگرافی ایستای Best Balance به عنوان فناوری بومی در حوزه ارزیابی کمی کنترل قامتی و توان بخشی تعاملی بود. یافته‌های این گزارش فنی نشان می‌دهد که ادغام چهار سلول بار با نرخ نمونه‌برداری ۱۶۰ هرتز، دقت مکانی زیر ۵ میلی‌متر، و کالیبراسیون مبتنی بر شبکه عصبی، امکان ردیابی دقیق نوسانات مرکز فشار را در شرایط استاتیک فراهم می‌سازد. این دستاورد مستقیماً به هدف اصلی پژوهش - ارائه ابزار کمی، بومی، و جایگزین برای آزمون‌های ذهنی سنتی - پاسخ می‌دهد.

خروجی‌های بالینی سامانه در دو پروتکل اصلی مورد بررسی قرار گرفت. در آزمون CTSIB، پارامترهای استخراج‌شده شامل OSI، شاخص‌های جداگانه قدامی-خلفی و داخلی-خارجی، شعاع و مساحت مسیر CoP، الگوی تدریجی افزایش نوسان را از شرایط ۱ (چشم باز/سطح ثابت) تا شرایط ۴ (چشم بسته/سطح ناپایدار) نشان داد که با مدل سلسله‌مراتب حسی و یافته‌های پیشین در ادبیات پاسچروگرافی هم‌خوانی دارد. در آزمون پایداری قامتی، تحلیل مسیرهای هدایت‌شده به هشت هدف محیطی، تفاوت‌های جهتی در کیفیت کنترل ارادی CoP را آشکار ساخت که اطلاعات تکمیلی ارزشمندی فراتر از شاخص‌های کلی نوسان ارائه می‌دهد.

در مقایسه با سامانه‌های تجاری معتبر نظیر Biodex Balance System SD و HUR Smart Balance، دستگاه Best Balance با تمرکز بر پاسچروگرافی ایستا و ادغام واحد بیوفیدبک تعاملی، نیازهای اساسی مراکز توان بخشی

را در زمینه غربالگری خطر سقوط، ارزیابی پایه کنترل قامتی و تمرین درمانی هدفمند با هزینه‌ای به مراتب کمتر و کاربری ساده‌تر برطرف می‌سازد. این موضوع اهمیت ویژه‌ای در زمینه توسعه زیرساخت توان‌بخشی بومی دارد. کاربردهای بالینی این یافته‌ها طیف گسترده‌ای از جمعیت‌های هدف را در بر می‌گیرد: پایش روند بهبودی پس از جراحی‌های اندام تحتانی، توان‌بخشی عصبی-عضلانی در بیماران مبتلا به سکته مغزی، مالتیپل اسکلروزیس و بیماری پارکینسون و پیشگیری از سقوط در سالمندان. واحد بیوفیدبک تعاملی دستگاه، با ارائه پس‌خوراند بصری بلادرنگ از موقعیت CoP، اصول یادگیری حرکتی را تسهیل کرده و مشارکت بیمار در فرایند درمان را ارتقا می‌بخشد. با این وجود، مطالعه حاضر با محدودیت‌های روش شناختی مشخصی همراه است. ماهیت این پژوهش به عنوان گزارش معرفی فنی، فاقد داده‌های مقایسه‌ای حاصل از کارآزمایی‌های بالینی کنترل‌شده روی گروه‌های بیماران است. همچنین، نبود داده‌های هنجار^۱ برای جمعیت ایرانی، تفسیر بالینی نتایج فردی را در حال حاضر محدود می‌سازد. تعمیم‌پذیری یافته‌های فنی به عملکرد بالینی واقعی مستلزم مطالعات اعتبارسنجی مستقل است. در نتیجه، سامانه بست بالانس به عنوان یک ابزار پاسچروگرافی ایستای بومی، قابلیت‌های فنی و بالینی لازم به منظور کاربرد در ارزیابی و توان‌بخشی کنترل قامتی را دارا می‌باشد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی بر استخراج داده‌های هنجار جمعیت ایرانی، اعتبارسنجی هم‌گرا با سامانه‌های مرجع و کارآزمایی‌های بالینی تصادفی‌سازی شده در گروه‌های هدف مشخص متمرکز شوند.

منابع

1. Ferdjallah M, Harris GF, Smith P, Wertsch JJ. Analysis of postural control synergies during quiet standing in healthy children and children with cerebral palsy. *Clin Biomech.* 2002;17:203-210.
2. Audiffren J, Bargiotas I, Vayatis N, Vidal P-P, Ricard D. A Non Linear Scoring Approach for Evaluating Balance: Classification of Elderly as Fallers and Non-Fallers. *PLoS One.* 2016;11(12):e0167456.
3. Esteves J, Dinis R, Fernandes O, Castro MA, Oliveira R, Pezarat-Correia P. Differences in postural control between healthy and subjects with chronic ankle instability. *Phys Ther Sport.* 2022;56:8-14.
4. Podda J, Marchesi G, Squeri V, De Luca A, Bellosta A, Pedullà L, et al. Standard versus innovative robotic balance assessment for people with multiple sclerosis: a correlational study. *Eur J Med Res.* 2023;28: 254.
5. Sun P-C, Kao C-Y, Kao C-L, Wei S-H. Interactive Game-Based Platform System for Assessing and Improving Posture Control in the Elderly. *Bioengineering.* 2023;10:1291.
6. Howcroft J, Lemaire ED, Kofman J, McIlroy WE. Elderly fall risk prediction using static posturography. *PLoS One.* 2017;12(2):e0172398.
7. Noamani A, Riahi N, Vette AH, Rouhani H. Clinical Static Balance Assessment: A Narrative Review of Traditional and IMU-Based Posturography in Older Adults and Individuals with Incomplete Spinal Cord Injury. *Sensors.* 2023;23:8881.
9. Hu X-x, Yang X-g, Wang X, Ma X, Geng X. The influence of diabetes and age-related degeneration on body balance control during static standing: a study based on plantar center-of-pressure trajectories and principal component analysis. *J Orthop Surg Res.* 2023;18:740.
10. Kalron A, Achiron A. Postural control, falls and fear of falling in people with multiple sclerosis without mobility aids. *J Neurol Sci.* 2013;335:186-190.
11. Błaszczyk JW. The use of force-plate posturography in the assessment of postural instability. *Gait Posture.* 2016;44:1-6.
12. Ferdjallah M, Harris GF, Smith P, Wertsch JJ. Analysis of postural control synergies during quiet standing in healthy children and children with cerebral palsy. *Clin Biomech.* 2002;17:203-210.
13. Levy SS, Thralls KJ, Kviatkovsky SA. Validity and Reliability of a Portable Balance Tracking System, BTrackS, in Older Adults. *J Geriatr Phys Ther.* 2016;00:1-6.

14. Yan X, Wilson N, Sun C, Zhang Y. Feasibility of a markerless motion capture system for balance function assessment in children with cerebral palsy. *Sensors*. 2025;25:5911.
15. Shim D, Park D, Yoo B, Choi J-o, Hong J, Choi TY, Park ES, Rha D-w. Evaluation of sitting and standing postural balance in cerebral palsy by center-of-pressure measurement using force plates: comparison with clinical measurements. *Gait Posture*. 2022;92:110-115.
16. Brito IL de, Sepúlveda-Loyola W, Castro LA de, Ordoñez-Mora LT, Silva Junior AJ da, Probst VS. Test-retest reliability of balance parameters obtained with a force platform in individuals with chronic obstructive pulmonary disease. *J Funct Morphol Kinesiol*. 2026;11(1):24.
17. Xue X, Wang Y, Xu X, Li H, Li H, Wang R, Hua Y. Postural Control Deficits During Static Single-leg Stance in Chronic Ankle Instability: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Health*. 2023;16(1):29-37.
18. Alhashimi G, Shadmehr A, Fereydounnia S, Attarbashi Moghadam B, Abdulgani FM. Comparison of Single Session Auditory Versus Visual Feedback on Performance and Postural Balance in Hemiplegic Children With Cerebral Palsy. *Cureus*. 2024;16(7):e64003.
19. Bickley C, Linton J, Sullivan E, Mitchell K, Slota G, Barnes D. Comparison of simultaneous static standing balance data on a pressure mat and force plate in typical children and in children with cerebral palsy. *Gait Posture*. 2019;68:91-98.
20. Levy SS, Thralls KJ, Kviatkovsky SA. Validity and Reliability of a Portable Balance Tracking System, BTrackS, in Older Adults. *J Geriatr Phys Ther*. 2016;00:1-6.

استناد به این مقاله: شجاعی، مهدی، شجاعی، محمد رضا، ریحانی نژاد، زهرا، و دهقانی، ماجد. (۱۴۰۵). کاربردهای بالینی پاسچروگرافی ایستا در ارزیابی و بازتوانی تعادل: معرفی سامانه صفحه نیروی «بست بالانس» ساخت ایران. *فصلنامه پیشرفت‌های مهندسی در حوزه‌ی پزشکی و مواد*، ۲(۲)، ۵۰-۶۶.



Journal of Recent Advancements in Material Science and Biomedical Engineering is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.