

مدلسازی ریاضی تعامل انسان-ماشین در شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان با استفاده از تئوری اطلاعات

محمدرضا مرتضوی^۱، کامران رئیسی^۲، سیدحامد هاشمی مهنه^۳

۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر و پژوهشگاه هوافضا، تهران

۲ استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، k_raissi@aut.ac.ir

۳ استادیار، پژوهشگاه هوافضا، تهران

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۲۰

چکیده

در این مقاله تعامل میان انسان و ماشین در شبیه‌ساز استاندارد وظایف خلبان، با بهره‌گیری از مفاهیم موجود در تئوری اطلاعات مدلسازی می‌گردد. برای این منظور، نرخ تبادل داده در هر یک از زیرسیستم‌های شبیه‌ساز استخراج می‌شود و با برآیند گرفتن از آن‌ها، مقدار نرخ تبادل داده کلی ایجاد شده در شبیه‌ساز بدست می‌آید. در مرحله بعد، نرخ تبادل داده خروجی تولید شده توسط انسان در تعامل با شبیه‌ساز محاسبه گشته و از تلفیق آن با نرخ اطلاعات ورودی، یک معیار واحد جهت ارزیابی عملکرد وی ارائه می‌گردد. در نهایت کارایی این شاخص در محیط شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان با در نظر گرفتن سه سطح مختلف بارکاری (کم، متوسط و زیاد)، از طریق انجام یک آزمون عملی توسط تعدادی سوژه انسانی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که سوژه‌ها با بالا رفتن سطح بارکاری، تلاش مضاعفی را در قالب زیاد کردن نرخ تبادل داده خروجی ایجاد شده توسط خود بروز می‌دهند. اما با این وجود بر اساس تحلیل آماری صورت گرفته، کیفیت کارکرد سوژه‌ها بین سطوح کم، متوسط و زیاد از بارکاری دارای اختلاف معنادار بوده و بالا رفتن شدید بارکاری، موجب افت قابل توجه معیار عملکرد بدست آمده می‌شود.

واژگان کلیدی

مدلسازی، تعامل انسان-ماشین، شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان، تئوری اطلاعات، معیار عملکرد.

۱. مقدمه

انسانی، کم کردن خطاهای او و همچنین افزایش ایمنی سیستم انجام شده است [۱-۲]. با این وجود، نقش غیرقابل انکار انسان در تصمیم‌گیری‌های حیاتی و انجام وظایف چندگانه موجود در سیستم‌های پیچیده فعلی، همچنان پابرجاست [۳] و مطالعات

امروزه در بخش‌های مختلفی نظیر هوانوردی، فضاوردی، صنایع فرآیندی و کارخانجات، میزان بکارگیری خودکارسازی^۱ به شکل چشمگیری بالا رفته که این مسئله با هدف کاهش بارکاری کاربر

کمی پیرامون کارکرد انسان در شرایط عمکرد چند وظیفه‌ای^۲ انجام شده است. در واقع با افزایش کارهای تخصیص داده شده به ماشین، امکان مدیریت تکالیف بیشتری برای انسان مهیا شده و از این رو مسئله عملکرد چند وظیفه‌ای اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. این نکته به اثبات رسیده است که توجه توزیع شده^۳ که در حین سرپرستی همزمان چند فعالیت با آن مواجه هستیم، در مقایسه با توجه ماندگار^۴ لازم برای انجام یک فعالیت، بارکاری بیشتری را به همراه دارد [۴].

علاوه بر بارکاری، کارایی انسان نیز در شرایط عملکرد چند وظیفه‌ای دستخوش تغییر خواهد شد [۵]. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان گفت که ویژگی‌های فردی، ماهیت تکالیف محوله و سطح دشواری آن‌ها سه عامل عمده‌ای هستند که عملکرد انسان را در انجام وظایف موجود در یک سیستم تحت اثر قرار می‌دهند [۶]. به عنوان مثال، نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که فعالیت طولانی مدت با بارکاری خیلی کم، موجب تنزل آگاهی موقعیتی^۵ فرد و متعاقباً افت عملکرد او خواهد شد. در نقطه مقابل، تلاش مداوم در سطح بالا نیز که ناشی از وجود بارکاری زیاد باشد، پس از مدتی به پایین آمدن کیفیت عملکرد انسان منتهی می‌گردد [۷].

مدلسازی رفتار کاربر در محیط‌های دربردارنده عملکرد چندوظیفه‌ای که در آن‌ها شرایط موسوم به کنترل نظارتی انسان^۶ برقرار می‌باشد، در سال‌های اخیر همواره مورد توجه بوده است [۸]. چنین مدل‌هایی به شرط تنظیم مناسب پارامترهای موجود در ساختار خود، قادر خواهند بود تا الگوهای مورد انتظار در عملکرد انسان را که قبلاً در مرحله آموزش با آن‌ها مواجه شده‌اند، از الگوهای نامتعارف و نامطلوب تشخیص دهند. به عنوان نمونه در [۹] بر اساس همین رویکرد و با استفاده از مدل مخفی مارکوف^۷، رفتار کاربر انسانی هنگام مدیریت همزمان چند وسیله پرنده و زیرآبی بدون سرنشین مدلسازی شده است، تا از این راه بتوان حالت‌های شناختی پنهان فرد را از روی تعامل قابل مشاهده او با واسط کاربری سیستم تعیین نمود.

اندازه‌گیری‌های مرتبط با شرایط فیزیولوژیکی فرد به خصوص سیگنال فعالیت الکتریکی مغز^۸ نیز یکی دیگر از نشانه‌هایی هستند که با تفسیر آن‌ها، می‌توان به اطلاعات جالبی در خصوص وضعیت عملکردی کاربر^۹ دست یافت [۱۰-۱۱]. در حال حاضر بر اساس شواهد علمی محکم، این یقین وجود دارد که متغیرهایی

همچون بارکاری ذهنی، خستگی ذهنی و خواب آلودگی خلبانان با تغییرات رخ داده در محدوده‌های فرکانسی خاص از سیگنال فعالیت الکتریکی مغز در ارتباط تنگاتنگ هستند [۱۲].

به پشتوانه این یافته‌ها، ایده بکارگیری شکل جدیدی از خودکارسازی در سامانه‌های پیچیده امروزی، تحت عنوان خودکارسازی تطبیقی^{۱۰} و رفع چالش‌ها و موانع موجود در راه تحقق آن، به موضوعی مورد توجه بدل گردیده است [۱۳]. در حالت کلی در سیستمی که در آن خودکارسازی تطبیقی پیاده‌سازی شده باشد، تقسیم وظایف میان انسان و ماشین حالت ایستا ندارد و بر اساس یکسری معیارهای از پیش تعیین شده نظیر وضعیت فیزیولوژیکی انسان، به صورت پویا انجام می‌شود [۳]. بدین ترتیب، می‌توان امیدوار بود که کیفیت عملکرد و میزان آگاهی موقعیتی کاربر در تعامل با سیستم، در شرایط مختلف کاری تا حد ممکن پایدار باقی بماند. این ایده در [۱۴]، در مأموریت هدایت یک تیم از پهبادها برای انجام عملیات بمباران اهداف زمینی و در [۱۵]، برای کنترل سیستم پشتیبان حیات^{۱۱} یک کپسول فضایی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

هوایما یک نمونه جالب از سیستمی پیچیده است که در آن انسان با سرپرستی همزمان زیرسیستم‌های مختلف سروکار دارد و در حقیقت، وضعیت عملکرد چند وظیفه‌ای در آن به شکل کامل متبلور است. کابین‌های شیشه‌ای^{۱۲} هوایماهای مدرن امروزی، در عین زیبایی از بخش‌های گوناگونی تشکیل شده‌اند و خلبان‌ها برای مدیریت کامل سیستم‌های نمایشگر و کنترل وسیله پرنده، نیاز به صرف توجه و تلاش ذهنی قابل توجهی از سوی خود دارند [۱۶]. بر این اساس، دستیابی به درک صحیح از نحوه عملکرد خلبان در شرایط مختلف کاری و ایجاد مدل‌های مناسب از تعامل میان انسان و ماشین در این حوزه، امری ضروری به نظر می‌رسد. از نقطه نظر تاریخی، در مورد هوایما شروع تحقیقات راجع به حوزه مهندسی عوامل انسانی (ارگونومی)^{۱۳} در فاصله بین دو جنگ جهانی اول و دوم اتفاق افتاد که در آن دوره، بیشتر تلاش‌های صورت گرفته به نحوه انتخاب و آموزش خلبانان و همچنین پزشکی و فیزیولوژی هوایی معطوف بود. از اواخر دهه ۳۰ میلادی تا پایان دهه ۶۰ میلادی، با پیشرفت‌های قابل توجهی که در زمینه خودکارسازی داخل کابین هوایما به وقوع پیوست، دو شاخه ارگونومی فیزیکی و روانشناسی هوانوردی رونق گرفتند که پیامد آن، بهبود پیکره‌بندی و ظاهر ابزارهای کنترلی و نمایشگرهای

واکنش متناسب را در قالب بسته‌ای از اطلاعات خروجی تولید می‌کند. بنابراین اگر بتوان به نحوی از یک سو اطلاعات ایجاد شده در سیستم و از سوی دیگر اطلاعات تولید شده توسط انسان را در تعامل میان آن‌ها تخمین زد، از مقایسه میان این دو مقدار می‌توان به نحوه عملکرد انسان در قبال وظایف موجود پی برد. چنین رویکردی در پژوهش حاضر، در خصوص این شبیه‌ساز اتخاذ شده است تا از این طریق، یک معیار واحد جهت ارزیابی عملکرد کلی کاربر هنگام اجرای سناریوی تعریف شده در شبیه‌ساز بدست آید.

این مقاله به تریبی که در ادامه آمده، سازمان‌دهی شده است. بخش ۲ از مقاله، به آشنایی با شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان و زیرسیستم‌های مختلف آن می‌پردازد. در بخش ۳، تئوری اطلاعات و مفاهیم مرتبط با آن شامل تابع محتوای اطلاعات فضایی، نرخ تبادل داده^{۱۷} ورودی و خروجی و نیز قوانین فیتس^{۱۸} و هیک-هایمن^{۱۹} ارائه شده‌اند و در قسمت انتهایی، یک معیار مناسب برای ارزیابی عملکرد انسان در کار با شبیه‌ساز وظایف خلبان بدست آمده است. بر اساس مطالب مطرح شده در دو بخش قبلی، در بخش ۴ نرخ تبادل داده موجود در زیرسیستم‌های مختلف شبیه‌ساز به تفکیک محاسبه شده است. پس از آن با طراحی یک آزمون تجربی در محیط شبیه‌ساز، روند طی شده به صورت عملی مورد سنجش قرار می‌گیرد که نحوه اجرای این آزمون و تحلیل خروجی آن در بخش ۵ آورده شده است. نهایتاً بخش ۶ به جمع‌بندی نتایج حاصل از انجام پژوهش اختصاص دارد.

۲. معرفی شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان

شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای یک ابزار استاندارد جهت بررسی عملکرد و بارکاری خلبان در مواجهه با شرایطی است که در آن، تقسیم کردن منابع توجه او بین تکالیف مختلف از ضروریات می‌باشد. آنچنان که در شکل ۱ دیده می‌شود، شبیه‌ساز مهارت‌های عمده لازم برای یک خلبان شامل رهگیری^{۲۰}، پایش^{۲۱}، برقراری ارتباط^{۲۲} و مدیریت منابع^{۲۳} را دربر دارد که هر کدام از آن‌ها، بخشی از پنجره اصلی برنامه را به خود اختصاص می‌دهد.

پاسخ‌های سریع و دقیق از طرف انسان نسبت به تحریک‌های رخ داده در سه زیرسیستم پایش، برقراری ارتباط و مدیریت منابع

ارائه دهنده اطلاعات بود. در دهه ۷۰ میلادی نیز مفهوم مدیریت منابع خدمه^{۱۴} در حوزه ارگونومی هوانوردی مطرح شد که هدف آن، کاهش خطاهای انسانی و ارتقای کیفیت عملکرد خدمه پرواز بود. با تمام این اوصاف، دهه ۸۰ میلادی به خاطر ظهور فناوری کابین شیشه‌ای در آن، از سایر دوره‌ها متمایز است. ورود این فناوری به صحنه، باعث تمرکز یافتن پژوهش‌ها روی شاخه‌ای از علم ارگونومی تحت عنوان ارگونومی شناختی شد که در آن مکانیزم‌های شناختی دخیل در فرآیندهایی همچون پردازش اطلاعات، تصمیم‌گیری و مدیریت خودکارسازی مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱۷].

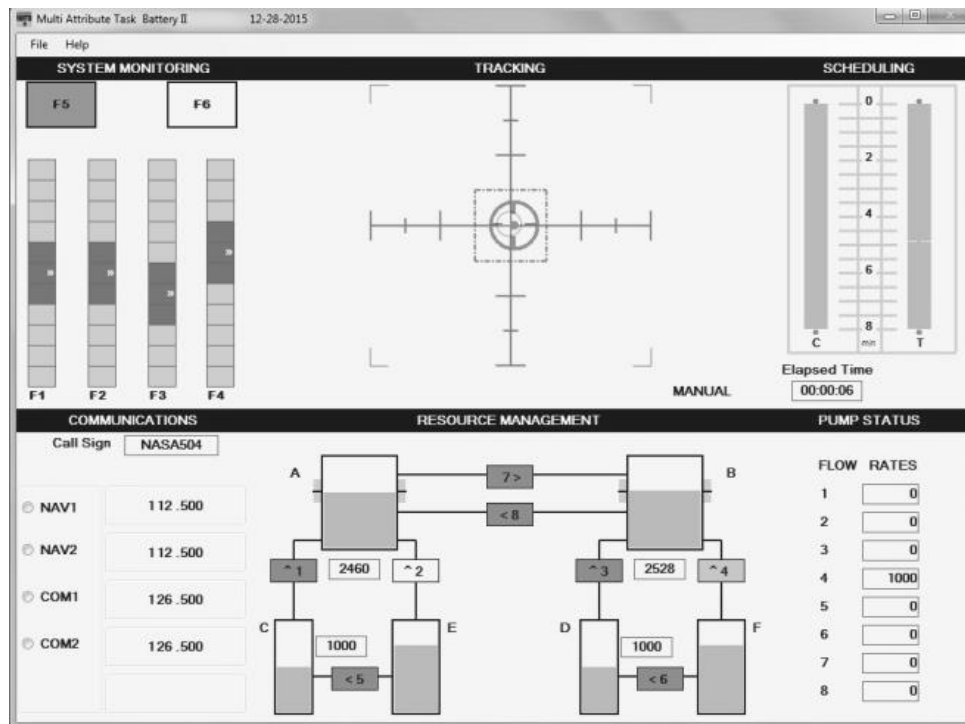
در پژوهش انجام شده در این مقاله از شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان^{۱۵} بهره‌گیری می‌شود که یک ابزار استاندارد توسعه یافته در سازمان ناسا جهت بررسی عملکرد و بارکاری انسان در مدیریت همزمان وظایف مختلف است. این شبیه‌ساز، وظایف عمده‌ای که یک خلبان در خصوص آن‌ها مسئول است را در زیرسیستم‌های مختلف خود دارد و کار با آن، پس از طی یک دوره آموزش برای افراد امکان‌پذیر خواهد بود [۱۸].

به طور متداول برای ارزیابی عملکرد انسان در تعامل با شبیه‌ساز ناسا، نرخ خطا و زمان واکنش شخص نسبت به وقایع رخ داده در هر زیرسیستم، به صورت مجزا از زیرسیستم‌های دیگر بکار گرفته می‌شود که نمونه‌های آن در مراجع موجود است [۱۹-۲۲]. همانطور که پیداست در این رویکرد، علیرغم چند وظیفه‌ای بودن ماهیت سناریوی موجود در شبیه‌ساز، بررسی عملکرد فرد عملاً با شرایط تک وظیفه‌ای بودن فعالیت انجام شده تفاوتی ندارد. برای حل این مشکل، در مقاله حاضر با اتخاذ رویکردی استوار بر تئوری اطلاعات، یک معیار کارایی واحد استخراج خواهد شد که می‌توان از آن برای چک کردن کیفیت عملکرد کلی فرد در برآورده کردن انتظارات موجود از وی در محیط شبیه‌ساز بهره گرفت.

تئوری اطلاعات نخستین بار به وسیله شانون^{۱۶}، برای تخمین میزان اطلاعات اخذ شده از مشاهده یک سیگنال مطرح گردید [۲۳]. اگرچه خاستگاه اولیه این تئوری در علم مخابرات بود، اما امروزه در زمینه‌های مختلف علمی و مهندسی ارزش خود را نمایان ساخته است [۲۴-۲۷]. در حالت کلی در شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای، سوژه به طور مداوم اطلاعات را از منابع مختلف به عنوان ورودی دریافت نموده و بر مبنای آگاهی موقعیتی خود،

شد. توضیحات تکمیلی پیرامون زیرسیستم‌های موجود در شبیه‌ساز در ادامه آمده است [۱۸].

و همین‌طور انجام صحیح عملیات رهگیری، موجب افزایش امتیاز دریافتی فرد به عنوان ملاکی جهت ارزیابی عملکرد وی خواهد



شکل ۱. شمای کلی شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان

می‌باشد و در این وضعیت لازم است که کاربر در کمترین زمان ممکن، با فشردن کلید F5 از صفحه‌کلید، شرایط را به وضعیت عادی بازگرداند. از سوی دیگر چراغ سمت راست در حالت عادی خاموش است؛ مگر آنکه به شکل نمادین و به عنوان نشانه‌ای از وقوع یک شرایط اضطراری، به رنگ قرمز درآید. خلبان به محض مشاهده روشن شدن چراغ قرمز، یک مدت زمان مشخص فرصت دارد تا با فشردن کلید F6 از صفحه‌کلید، مطلع بودن خود را از وضعیت رخ داده نشان داده و چراغ را به حالت خاموش بازگرداند.

۲-۲. زیرسیستم برقراری ارتباط

در فعالیت مربوط به این زیرسیستم، خلبان موظف است که بر مبنای پیام صوتی دریافت شده، رادیو و فرکانس فعلی را به رادیو و فرکانس درخواستی تغییر دهد. هر پیغام صوتی دریافتی، از سه بخش اصلی تشکیل شده است. در ابتدا، پیام با اعلام کد شناسایی وسیله پرنده آغاز می‌شود که این کد، در تمامی پیام‌ها ثابت بوده و برابر "ناسا ۵۰۴" می‌باشد. سپس در بخش دوم، رادیوی مورد نظر برای تنظیم، یعنی یکی از انتخاب‌های NAV1، NAV2،

۲-۱. زیرسیستم پایش

در این زیرسیستم که از دو بخش شاخص‌ها و چراغ‌ها تشکیل شده است، سوژه باید به طور دائم اجزای مختلف موجود را رصد نماید و به تحریک‌های ناپیوسته روی داده، واکنش مناسب را بروز دهد. بخش شاخص‌ها که در قسمت پایینی پنجره اختصاص داده شده به زیرسیستم پایش قرار دارد، شامل چهار ستون مدرج می‌باشد. در مرکز هر ستون یک شاخص وجود دارد که در شرایط عادی، حول مرکز ستون نوسانات کم دامنه‌ای را انجام می‌دهد. چنانچه یکی از شاخص‌ها از وضعیت طبیعی خارج شود، به بالا یا پایین ستون منتقل گشته و در آنجا به نوسانات خود ادامه می‌دهد. وظیفه خلبان آنست که بلافاصله بعد از دیدن این وضعیت در هر یک از ستون‌ها، با فشردن کلید مربوط به آن (یکی از کلیدهای F1، F2، F3 یا F4) نسبت به این اتفاق واکنش نشان دهد.

بخش چراغ‌ها نیز شامل دو چراغ نمادین با کارکرد متفاوت می‌باشد. در شرایط عادی چراغ سمت چپ با رنگ سبز، به عنوان نمادی از داشتن وضعیت طبیعی در سیستم، به طور پیوسته روشن است. خاموش شدن چراغ سبز، نشان‌دهنده خروج از حالت طبیعی

تحریک‌های اعمال شده رفتار تصادفی دارند، یعنی جهت و میزان حرکت نشانگر اتفاقی بوده و برای سوژه قابل پیش‌بینی نیست؛ ضمن اینکه شدت آن توسط طراح آزمون در سه درجه کم با سرعت متوسط تقریبی $\bar{V}_T = 4.50 \frac{\text{pixel}}{\text{sec}}$ ، متعادل با سرعت متوسط تقریبی $\bar{V}_T = 8.52 \frac{\text{pixel}}{\text{sec}}$ و زیاد با سرعت متوسط تقریبی $\bar{V}_T = 12.35 \frac{\text{pixel}}{\text{sec}}$ قابل تنظیم می‌باشد. در طول هر شبیه‌سازی، زیرسیستم رهگیری ممکن است در یکی از دو مود خودکار یا دستی قرار داشته باشد که در حالت دستی، این وظیفه از طریق یک دسته کنترل^{۲۴} و با اعمال ورودی توسط خلبان انجام می‌شود.

۳. آشنایی با تئوری اطلاعات

۳-۱. تابع محتوای اطلاعات فضایی

همانگونه که ذکر شد، تئوری اطلاعات به وسیله شانون در دهه پنجم از قرن بیستم میلادی مطرح شد. در این تئوری با بهره‌گیری از قوانین احتمالاتی، میزان اطلاعات اخذ شده از مشاهده یک سیگنال، اندازه‌گیری و در قالب یک معیار کمی ملموس بیان می‌گردد [۲۳]. برای بدست آوردن این معیار، به ازای متغیر اتفاقی گسسته X تابع $h(X)$ به عنوان ارائه دهنده محتوای اطلاعات فضایی^{۲۵} متناظر با X در نظر گرفته می‌شود که لازم است انتخاب مناسبی در مورد آن صورت پذیرد [۲۸].

بر مبنای اصول اولیه تئوری اطلاعات، دانستن مقدار X در هر بار مشاهده این متغیر اتفاقی، معادل با دریافت میزان مشخصی از اطلاعات $h(X)$ است که با احتمال تولید آن مقدار خاص برای X در تناسب است. به بیان بهتر، چنانچه مقداری با احتمال رخداد بالا بدست آید، میزان اطلاعات حاصل شده پایین خواهد بود و در نقطه مقابل، اگر یک مقدار با احتمال وقوع پایین ثبت گردد، حجم بیشتری از اطلاعات اخذ شده است. این بدان معناست که تابع $h(X)$ باید به شکلی تعریف شود که نتیجه، تابعی یکنوا^{۲۶} از توزیع احتمال $p(X)$ باشد.

از سوی دیگر، بدیهی است که انتظار می‌رود اطلاعات ناشی از مشاهده توأم دو متغیر اتفاقی گسسته و مستقل X و Y ، با جمع اطلاعات بدست آمده از مشاهده جداگانه آن‌ها برابر باشد. با توجه به دو قید مذکور، این طور نتیجه‌گیری می‌شود که تابع محتوای اطلاعات فضایی، دارای ضابطه زیر است:

$$h(X) = -\log_2 p(X) \quad (۱)$$

COM1 یا COM2 فرانت می‌شود که خلبان از طریق بکارگیری یکی از کلیدهای F9، F10، F11 یا F12 قادر خواهد بود تا رادیوی درخواست شده را برگزیند.

در بخش پایانی پیام نیز، فرکانس لازم اعلام می‌گردد که این فرکانس از دو بخش صحیح و اعشاری تشکیل شده است. برای تنظیم بخش صحیح از فرکانس، سوژه باید ضمن نگه داشتن کلید Ctrl، یکی از جهت‌های بالا یا پایین را بکار برد؛ در مورد بخش اعشاری نیز روند همین‌طور است با این تفاوت که بجای کلید Ctrl، باید کلید Alt فشار داده شده باشد. پس از اتمام این فرآیند، لازم است که خلبان با زدن کلید Enter مقادیر اعمال شده را ثبت نماید. لازم به ذکر است که در شبیه‌ساز، محدوده فرکانسی NAV1 و NAV2 از ۱۰۸/۰۰۰ تا ۱۱۷/۹۵۰ هرتز با نمو ۰/۰۵۰ و محدوده فرکانسی COM1 و COM2 از ۱۱۸/۰۰۰ تا ۱۳۵/۹۷۵ هرتز با نمو ۰/۰۲۵ می‌باشد.

۳-۲. زیرسیستم مدیریت منابع

وظیفه خلبان در قبال این زیرسیستم آنست که از طریق مدیریت دو پمپ ۲ و ۴، سطح سوخت باقیمانده در مخازن A و B را در محدوده مجاز حفظ نماید. روشن و خاموش نمودن این دو پمپ با فشردن کلیدهای ۲ و ۴ از صفحه کلید امکان‌پذیر است که با هر بار زدن این دو کلید، رنگ پمپ‌ها به رنگ سبز (حالت فعال) یا رنگ پس‌زمینه (حالت غیرفعال) تغییر خواهد کرد.

در آغاز آزمون، هر یک از دو مخزن A و B حاوی ۲۵۰۰ واحد سوخت با نرخ مصرف ثابت $\dot{V} = 500 \frac{\text{units}}{\text{min}}$ می‌باشد که بر اساس الزام قرارداد شده، نباید مقدار آن از بازه $2500 \pm \Delta V$ واحد با $\Delta V = 100 \text{ units}$ خارج گردد. همچنین دبی عبوری از پمپ‌های ۲ و ۴ برابر $2\dot{V}$ تنظیم می‌شود که در این صورت، صرفنظر از روشن یا خاموش بودن پمپ‌ها، نرخ خالص تغییر حجم سوخت در طول زمان همواره مقدار ثابت \dot{V} خواهد بود.

۳-۲. زیرسیستم رهگیری

زیرسیستم رهگیری تنها بخش از شبیه‌ساز است که یک وظیفه پیوسته را شبیه‌سازی می‌نماید. در این زیرسیستم هدف آنست که دایره متحرک به قطر D ، در هر لحظه از زمان در کمترین فاصله از مرکز پنجره قرار داشته باشد؛ به نحوی که هیچ‌گاه از داخل دایره ثابت موجود به قطر D' خارج نگردد.

استفاده از مبنا ۲ در رابطه ۱ موجب می‌شود که $h(X)$ بر حسب عناصر دودویی یا همان بیت بیان گردد. همچنین مطابق با انتظار، علامت منفی در این عبارت تضمین می‌نماید که $h(X)$ همواره بزرگتر یا مساوی با صفر بدست آید. در شرایط خاص وقتی که X دارای K حالت با احتمال وقوع یکنواخت باشد، $h(X)$ به صورت رابطه ۲ قابل بازنویسی است:

$$h(X) = \log_2 K \quad (2)$$

۳-۲. نرخ تبادل داده ورودی ایجاد شده در یک ماشین

بر پایه مبانی ذکر شده در بخش قبل، حال می‌توانیم نرخ تبادل داده را برای سیگنال محرک^{۳۷} تولید شده توسط یک ماشین تعریف کنیم. نرخ تبادل داده ورودی که با B_{IN} نمایش داده می‌شود، از تقسیم محتوای اطلاعات فضایی سیگنال بر محتوای اطلاعات زمانی^{۳۸} آن بدست می‌آید؛ در جایی که محتوای اطلاعات زمانی که آن را با Δt نشان می‌دهیم، به صورت میانگین زمان موجود بین تغییر حالت در سیگنال یا همان وقوع رخدادها تعریف می‌شود [۳۹].

$$B_{IN} = \frac{h}{\Delta t} \quad (3)$$

اگر با سیستمی متشکل از مجموعه I زیرسیستم $i = \{i_1, \dots, i_l\}$ سروکار داشته باشیم که در هر کدام از آن‌ها اطلاعات ورودی با نرخ تبادل داده مستقل B_{IN_i} تولید شود، آنگاه نرخ تبادل داده کلی ایجاد شده در این سیستم حاصل جمع نرخ تبادل داده تک تک اجزای آن است؛ به عبارت دیگر:

$$B_{IN\text{Total}} = \sum_i B_{IN_i} = \sum_i \frac{h_i}{\Delta t_i} \quad (4)$$

۳-۳. قوانین فیتس و هیک-هایمن

دو قانون فیتس و هیک-هایمن به مدلسازی کمی ظرفیت انسان در پردازش اطلاعات اختصاص دارند. فیتس نشان داد که زمان لازم برای ایجاد حرکت با دامنه میانگین A توسط انسان، تابعی خطی از شاخص دشواری بیان شده در زیر است:

$$h(X) = \log_2 \frac{A}{W_s/2} \quad (5)$$

در رابطه ۵، W_s محدوده مجاز حرکت بوده که مطلوب است نتیجه جابجایی در آن قرار داشته باشد [۳۰]. پیش از فیتس نیز هیک و هایمن اثبات نمودند مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک کاربر نسبت به یک سیگنال محرک از خود واکنش بروز دهد، با مقدار اطلاعات موجود در آن سیگنال ارتباط خطی دارد [۳۱-۳۲].

۳-۴. نرخ تبادل داده خروجی تولید شده توسط انسان

در یک مجموعه مرکب از انسان و ماشین، از کاربر انتظار می‌رود که در عکس‌العمل به اطلاعات ایجاد شده در زیرسیستم‌های مختلف، فعالیت‌های مورد انتظار را انجام دهد. نرخ تبادل داده خروجی تولید شده توسط انسان برای زیرسیستم i (B_{OUT_i})، بخشی از نرخ تبادل داده ورودی ایجاد شده به وسیله این زیرسیستم (B_{IN_i}) است که واکنش درست و قابل قبول در قبال آن اعمال شده است. بدین ترتیب چنانچه نسبت میان B_{OUT_i} و B_{IN_i} را با ρ_i نمایش دهیم، خواهیم داشت:

$$B_{OUT_i} = \rho_i B_{IN_i} \quad (6)$$

همچنین در کار با مجموعه‌ای از زیرسیستم‌های $i = \{i_1, \dots, i_l\}$ ، کل نرخ تبادل داده خروجی انسان برابر است با:

$$B_{OUT\text{Total}} = \sum_i B_{OUT_i} = \sum_i \rho_i B_{IN_i} \quad (7)$$

لازم به ذکر است برای هر زیرسیستم، نسبت تعداد پاسخ‌های صحیح کاربر در تعامل با آن زیرسیستم در مدت زمان انجام سناریو به کل وقایع رخ داده، ρ_i را تشکیل می‌دهد.

۳-۵. معیار کارایی مبتنی بر تئوری اطلاعات

نرخ تبادل داده خروجی تولید شده توسط کاربر اگر چه اطلاعات جالبی را از تعامل میان انسان با ماشین در خود نهفته دارد، اما برای قضاوت پیرامون کیفیت کارکرد فرد کافی نیست. به عنوان مثال چنانچه نرخ تبادل داده تولید شده در یک سیستم کم باشد، به طور طبیعی نرخ تبادل داده تولید شده به وسیله انسان نیز در کار با آن پایین خواهد بود؛ لیکن این مسئله لزوماً به معنای عملکرد ضعیف فرد نمی‌باشد. بالعکس، بالا بودن نرخ تبادل داده خروجی ایجاد شده توسط انسان وقتی که تولید اطلاعات در سیستم با سرعت بالا صورت می‌گیرد، الزاماً نشان دهنده خوب عمل کردن او نیست.

راه حل مناسب‌تر برای ارزیابی عملکرد شخص در کار با یک سیستم، بررسی میزان تولید اطلاعات خروجی مناسب توسط او در مقایسه با میزان اطلاعات ایجاد شده در آن سیستم است. بر این اساس، معیار کارایی مبتنی بر تئوری اطلاعات به صورت نسبت نرخ تبادل داده کلی خروجی به نرخ تبادل داده کلی ورودی تعریف می‌شود:

$$\bar{B} = \frac{B_{OUT\text{Total}}}{B_{IN\text{Total}}} = \frac{\sum_i \rho_i B_{IN_i}}{\sum_i B_{IN_i}} \quad (8)$$

همچنین با در نظر داشتن محدوده و میزان نمو فرکانس مربوط به رادیوها، پس از انجام یک سری عملیات جبری مرحله به مرحله می‌توان نشان داد که میانگین تعداد کلیک لازم جهت تنظیم فرکانس عدد $14/63$ است. پس $K_{C_{Freq}} = 14.63$ و داریم:

$$h_{C_{Freq}} = \log_2 14.63 = 3.84 \text{ bits} \quad (12)$$

از جمع اعداد حاصل شده برای $h_{C_{Rad}}$ و $h_{C_{Freq}}$ اکنون می‌توان مقدار h_C را بدست آورد:

$$h_C = h_{C_{Rad}} + h_{C_{Freq}} = 2 + 3.84 = 5.84 \text{ bits} \quad (13)$$

لازم به ذکر است در زیرسیستم برقراری ارتباط Δt_C یعنی فاصله زمانی میانگین بین اعلام پیغام‌های صوتی، با توجه به مقاصد طراح و نرخ تبادل داده‌ای که در نظر دارد تعیین می‌شود. ρ_C نیز بر اساس تعداد پیغام‌های صوتی که فرامین موجود در آن‌ها به شکل کامل توسط خلبان اجرا شده، محاسبه می‌گردد.

۳-۴. زیرسیستم مدیریت منابع

در کار با پمپ‌های موجود در زیرسیستم مدیریت منابع $K_R = 2$ است. بنابراین:

$$h_R = \log_2 2 = 1 \text{ bit} \quad (14)$$

در این زیرسیستم Δt_R به عنوان زمان لازم برای رسیدن سطح سوخت از خط میانی مرجع به یکی از دو مرز مجاز بالا یا پایین قابل محاسبه است:

$$\Delta t_R = \frac{\Delta V}{V} \quad (15)$$

برای دستیابی به مقدار نرخ تبادل داده خروجی تولید شده توسط سوژه در تعامل با زیرسیستم مدیریت منابع، میزان سوخت موجود در مخازن A و B هر ۱۰ ثانیه یکبار چک می‌شود. در این شرایط ρ_R از تقسیم تعداد لحظاتی که در آن‌ها مقدار سوخت در محدوده مجاز قرار دارد بر کل نقاط زمانی موجود بدست می‌آید.

۴-۴. زیرسیستم رهگیری

در زیرسیستم رهگیری از شبیه‌ساز، قطر دایره متحرک $D' = 3l = 27 \text{ pixel}$ و قطر دایره ثابت $D = l = 9 \text{ pixel}$ است. بر اساس قانون فیتس، قید خارج نشدن دایره متحرک از داخل دایره ثابت ناحیه مجازی برابر با $W_S = D' - D = 2D$ را در پی خواهد داشت. اگر شرایطی را در نظر بگیریم که طی آن دایره متحرک در مدت زمان متوسط Δt_T به اندازه میانگین

\bar{B} عددی مثبت و بی‌بعد است که هر چه به یک نزدیکتر باشد، معنای آن این است که فرد در مدیریت همزمان وظایف مختلف و پاسخ به نیازمندی‌های موجود در سیستم، موفق‌تر عمل نموده است.

۴. محاسبه نرخ تبادل داده موجود در زیرسیستم‌های شبیه‌ساز

با توجه به آنچه گفته شد برای شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان، مجموعه i در رابطه ۴ به صورت $i = \{T, S, L, R, C\}$ قابل نمایش است که در آن T به زیرسیستم رهگیری، S و L به بخش‌های شاخص‌ها و چراغ‌ها از زیرسیستم پایش، R به زیرسیستم مدیریت منابع و C به زیرسیستم برقراری ارتباط اشاره دارد. حال نحوه محاسبه نرخ تبادل داده در هریک از زیرسیستم‌های شبیه‌ساز، به صورت جداگانه بررسی می‌شود.

۴-۱. زیرسیستم پایش

با اتفاق افتادن هر رفتار غیرعادی در بخش شاخص‌ها، سوژه با انتخاب یکی از چهار کلید ممکن مواجه است و لذا $K_S = 4$ می‌باشد. با جایگذاری این مقدار در رابطه ۲ داریم:

$$h_S = \log_2 4 = 2 \text{ bits} \quad (9)$$

از سوی دیگر به ازای هر واقعه در قسمت چراغ‌ها، امکان فشردن یکی از دو کلید اشاره شده وجود دارد که $K_L = 2$ را نتیجه می‌دهد. لذا:

$$h_L = \log_2 2 = 1 \text{ bit} \quad (10)$$

Δt_S و Δt_L در رابطه ۴، با توجه به نرخ تبادل داده مدنظر طراح آزمون در سناریو قابل تنظیم است. همچنین برای محاسبه نرخ تبادل داده خروجی انسان برای زیرسیستم پایش، در رابطه ۷ ρ_S و ρ_L با شمارش تعداد پاسخ‌های قابل قبول فرد در مقابل تحریک‌های ایجاد شده در این زیرسیستم بدست می‌آید.

۴-۲. زیرسیستم برقراری ارتباط

با توجه به اینکه برقراری ارتباط در شبیه‌ساز از طریق چهار رادیو امکان‌پذیر است، از اینرو $K_{C_{Rad}} = 4$ و مقدار اطلاعات فضایی $h_{C_{Rad}}$ برابر خواهد بود با:

$$h_{C_{Rad}} = \log_2 4 = 2 \text{ bits} \quad (11)$$

$A_T = 3D$ جابجا شود، حذف پیوسته این اغتشاش و حفظ دایره متحرک در داخل دایره ثابت، با محتوای اطلاعات فضایی بدست آمده مبتنی بر قانون فیتس (رابطه ۵) معادل است:

$$h_T = \log_2 \frac{3D}{2D/2} = 1.59 \text{ bits} \quad (16)$$

در جایی که Δt_T از رابطه ۱۷ و به ازای سه سطح متفاوت سرعت متوسط قابل محاسبه می‌باشد:

$$\Delta t_T = \frac{A_T}{V_T} = \frac{27}{V_T} \quad (17)$$

برای تخمین ρ_T در روند محاسبه نرخ تبادل داده خروجی، وضعیت دایره متحرک نسبت به دایره ثابت یکبار در هر ثانیه چک می‌شود و در صورت برآورده شدن قید موجود در انجام صحیح تکلیف مربوط به این زیرسیستم، آن لحظه در محاسبه ρ_T لحاظ می‌گردد.

۵. آزمون بررسی عملکرد انسان

۵-۱. روند انجام آزمون

سیزده نفر از دانشجویان پسر دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر با میانگین سن $26/09 \pm 3/25$ برای انجام آزمون‌ها به صورت داوطلبانه اظهار آمادگی کردند. کوچک بودن واریانس سن افراد انتخاب شده آگاهانه و با هدف تأثیر نداشتن تغییرات شدید این عامل بر روی نتایج بوده است. همچنین با این شکل از گزینش، احتمال وجود اثر نامطلوب تغییر جنسیت سوژه‌ها بر روی عملکرد از میان رفت. لازم به ذکر است که شرکت‌کنندگان همگی از شرایط موردنیاز برای مشارکت در این کار تحقیقاتی، از جمله بینایی و شنوایی نرمال و نیز مهارت کافی در کار با شبیه‌سازهای پرواز، برخوردار بودند. کلیه داوطلبان با امضای فرم موافقت با شرکت در آزمون، به صورت رسمی رضایت خود را از همکاری در این فعالیت ابراز داشتند. لذا فرضیه غیر قابل اعتماد بودن داده‌های حاصل از عملکرد به دلیل نداشتن انگیزه یا عدم رضایت سوژه‌ها نسبت به مشارکت در این پژوهش، به طور کامل منتفی شد. پس از تکمیل فرم موافقت با شرکت در آزمون توسط سوژه‌ها، فاز آموزش آغاز گردید. در ابتدای این مرحله، با مطالعه فایل آشنایی با شبیه‌ساز و همینطور شرکت در جلسه حضوری معرفی، افراد با بخش‌های مختلف شبیه‌ساز و نحوه تعامل با آن آشنا شدند. در گام بعدی با اجرای سناریوهای آموزشی در نظر گرفته شده در محیط اصلی برنامه در هشت روز مختلف، داوطلبین به صورت عملی کار با شبیه‌ساز را تجربه کردند که این

روند برای هر یک از سوژه‌ها با قید دستیابی آن‌ها به عملکرد پایدار، به طور میانگین حدود دو ساعت به طول انجامید. با تکمیل فرآیند آموزش و حذف اثر یادگیری، مرحله ارزیابی نهایی شروع شد که در آن، سناریوهای اصلی مورد نظر به عنوان ملاک ارزیابی عملکرد سوژه‌ها در کار با شبیه‌ساز مورد استفاده قرار گرفت.

در این مرحله، هر یک از افراد شرکت‌کننده یک آزمون ۱۵ دقیقه‌ای شامل سه بخش پنج دقیقه‌ای را پشت سر گذاشتند که در هر کدام از این بخش‌ها، یکی از درجات در نظر گرفته شده برای بارکاری شامل کم، متوسط یا زیاد با دخیل کردن هر چهار زیرسیستم موجود در شبیه‌ساز پیاده‌سازی گردید. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که نرخ تبادل داده تقریبی 1 bits/sec، یک حد میانی برای توانایی پردازش اطلاعات توسط انسان است؛ به نحوی که نرخ‌های تبادل داده خیلی کمتر از این مقدار چالش عمده‌ای را برای فرد به همراه ندارد و در نقطه مقابل، رساندن این نرخ به نزدیک 2 bits/sec، او را به آستانه ظرفیت پردازشی خود می‌رساند [۳۳، ۶]. لذا با آگاهی از این نکته سطوح مختلف بارکاری در سه طبقه کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H) به ترتیب با تنظیم نرخ تبادل داده در حدود 0.5 bits/sec، 1 bits/sec و 1.5 bits/sec ایجاد شدند که اطلاعات مربوط به آن‌ها، در جدول ۱ قابل رؤیت است. همانطور که اشاره شد، مدت زمان آزمون نسبتاً کوتاه (۱۵ دقیقه) در نظر گرفته شد که دلیل آن جلوگیری از اثرگذاری عامل خستگی بر روی عملکرد سوژه‌ها بود. از سوی دیگر، قبل از انجام آزمون توسط هر فرد از او خواسته شد که در انجام وظایف موجود، میزان تلاش ذهنی خود را متناسب با بارکاری، همواره در حداکثر مقدار ممکن نگه دارد. بدین ترتیب بر اساس توضیحات ارائه شده و با توجه به یکسان بودن محیط انجام آزمایش و تجهیزات بکار رفته در آن، می‌توان نتیجه گرفت که آزمون‌های عملی به نحوی اجرا شده‌اند که تا حد امکان، عوامل غیر از بارکاری تأثیر قابل توجهی روی خروجی بدست آمده نداشته باشند.

جدول ۱. نرخ تبادل داده ورودی زیرسیستم‌های مختلف شبیه‌ساز در

آزمون ارزیابی نهایی

سطح	B_{IN_S}	B_{IN_L}	B_{IN_C}	B_{IN_R}	B_{IN_T}	$B_{IN_{Total}}$
L	۰/۰۳۶	۰/۰۲۲	۰/۰۹۰	۰/۰۸۳	۰/۲۶۴	۰/۴۹۶
M	۰/۲۰۰	۰/۰۶۷	۰/۲۹۴	۰/۰۸۳	۰/۵۰۰	۱/۱۴۴
H	۰/۴۰۰	۰/۱۰۰	۰/۳۹۱	۰/۰۸۳	۰/۷۲۵	۱/۶۹۹

فضای نمونه خواهد بود تا اثر عوامل اتفاقی و شانس به کلی از میان برود.

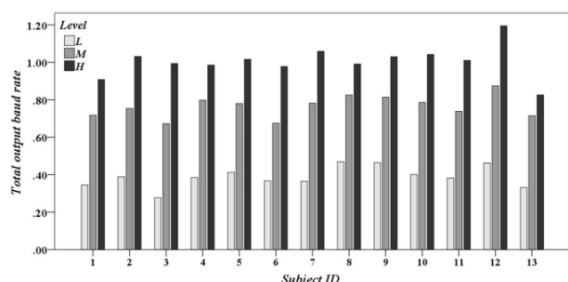
بر این اساس با استفاده از روش‌های موجود برای تحلیل آماری داده‌ها، نتایج حاصل از انجام آزمون ارزیابی نهایی را با به خدمت گرفتن نرم‌افزار SPSS مورد تحلیل قرار می‌دهیم. جدول ۲ نرخ تبادل داده خروجی ایجاد شده توسط هر کدام از سوژه‌ها را هنگام انجام سناریوی تعریف شده در شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان در خود جای داده است.

جدول ۲. نرخ تبادل داده خروجی کلی تولید شده توسط سوژه‌ها در

آزمون ارزیابی نهایی

شماره سوژه	$B_{OUT_{Total}}$		
	H	M	L
۱	۰/۹۰۸	۰/۷۱۸	۰/۳۴۵
۲	۱/۰۳۱	۰/۷۵۴	۰/۳۸۹
۳	۰/۹۹۴	۰/۶۷۲	۰/۲۷۷
۴	۰/۹۸۵	۰/۷۹۸	۰/۳۸۵
۵	۱/۰۱۶	۰/۷۸۰	۰/۴۱۲
۶	۰/۹۷۸	۰/۶۷۵	۰/۳۶۷
۷	۱/۰۵۹	۰/۷۸۲	۰/۳۶۵
۸	۰/۹۹۱	۰/۸۲۵	۰/۴۶۹
۹	۱/۰۳۰	۰/۸۱۴	۰/۴۶۴
۱۰	۱/۰۴۲	۰/۷۸۶	۰/۴۰۱
۱۱	۱/۰۱۰	۰/۷۳۸	۰/۳۸۲
۱۲	۱/۱۹۵	۰/۸۷۴	۰/۴۶۲
۱۳	۰/۸۲۶	۰/۷۱۵	۰/۳۳۲
Mean ± STD	۱/۰۰۵±۰/۰۸۴	۰/۷۶۴±۰/۰۵۹	۰/۳۸۹±۰/۰۵۶

همچنین نمودار میله‌ای این کمیت به ازای سه سطح بارکاری، به تفکیک هر فرد در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. نرخ تبادل داده خروجی کلی تولید شده توسط هر یک از سوژه‌ها به ازای سطوح L، M و H از بارکاری

شبیه‌ساز عملکرد چندوظیفه‌ای خلبان پس از اتمام هر آزمون، برای هر زیرسیستم یک فایل متنی مجزا ایجاد می‌کند که در این فایل، تاریخچه زمانی واکنش‌های فرد نسبت به تحریک‌های رخ داده در آن زیرسیستم ثبت شده است. با ایجاد کدهای مناسب جهت پردازش اطلاعات موجود در این فایل‌ها، می‌توان مقدار ρ_i را در رابطه ۷ برای زیرسیستم‌های مختلف محاسبه کرد و با استفاده از آن $B_{OUT_{Total}}$ و \bar{B} را برای هر سوژه بدست آورد. با در اختیار داشتن دو شاخص $B_{OUT_{Total}}$ و \bar{B} ، عملکرد کلی سوژه در مدیریت همزمان زیرسیستم‌های شبیه‌ساز قابل ارزیابی خواهد بود.

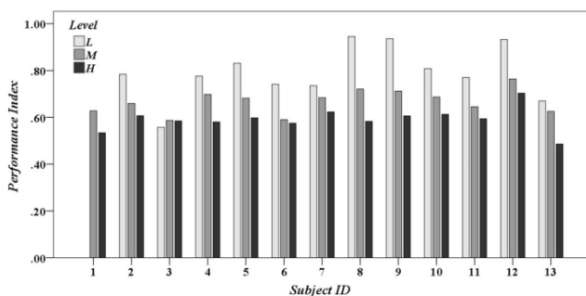
۵-۲. تحلیل نتایج

در [۳۴] یک تصویر کلی از ارتباط میان بارکاری و تلاش ذهنی با کیفیت عملکرد انسان ارائه شده است که با تکیه بر آن می‌توان راجع به حالت‌های ممکن برای نحوه عملکرد فرد در محیطی با شرایط کاری دینامیک و نیازمندی‌های متغیر اظهارنظر نمود. اگر فرض کنیم کاربر دخیل در یک سیستم متشکل از انسان و ماشین، از انگیزه کافی برای صرف تلاش ذهنی و تمرکز بر روی وظایف خود برخوردار باشد، با افزایش میزان بارکاری دو حالت برای سطح عملکرد انسان قابل تصور است. اگر بارکاری تا یک مقدار آستانه بالا رود، فرد همچنان قادر خواهد بود تا با صرف تلاش ذهنی بیشتر، سطح عملکرد خود را تقریباً ثابت نگه دارد؛ اما اگر بارکاری فراتر از این مقدار آستانه قرار گیرد، علیرغم اینکه تلاش ذهنی فرد معطوف به انجام وظایف خود است، اما با افت کیفیت عملکرد روبرو می‌شویم. به طور کلی، این مقدار آستانه از مشخصه‌های ذاتی هر فرد و ظرفیت‌های ذهنی موجود برای او جهت صرف تلاش مضاعف اثر می‌پذیرد و از یک فرد به فرد دیگر متفاوت است.

در آزمون عملی انجام شده به دلیل سناریوی مشترک، میزان تغییرات سطح بارکاری در طول آزمون برای همه سوژه‌ها یکسان است، اما تغییرات سطح عملکرد افراد هنگام عوض شدن میزان بارکاری لزوماً مشابه هم نخواهد بود. یعنی به عنوان مثال، ممکن است یک فرد خاص با تغییر بارکاری از سطح کم به سطح متوسط دچار افت عملکرد نشود؛ درحالی‌که فردی دیگر در همین شرایط، پایین آمدن قابل توجه کیفیت عملکرد خود را تجربه کند. در چنین وضعیتی ملاک قضاوت، میانگین کمیت مورد مطالعه روی کل

جدول ۳. معیار کارایی سوژه‌ها در آزمون ارزیابی نهایی

شماره سوژه	\bar{B}		
	H	M	L
۱	۰/۵۳۴	۰/۶۲۸	۰/۶۹۶
۲	۰/۶۰۷	۰/۶۵۹	۰/۷۸۴
۳	۰/۵۸۵	۰/۵۸۷	۰/۵۵۷
۴	۰/۵۸۰	۰/۶۹۸	۰/۷۷۶
۵	۰/۵۹۸	۰/۶۸۲	۰/۸۳۱
۶	۰/۵۷۵	۰/۵۹۰	۰/۷۴۱
۷	۰/۶۲۳	۰/۶۸۴	۰/۷۳۵
۸	۰/۵۸۳	۰/۷۲۱	۰/۹۴۵
۹	۰/۶۰۶	۰/۷۱۲	۰/۹۳۶
۱۰	۰/۶۱۳	۰/۶۸۷	۰/۸۰۸
۱۱	۰/۵۹۴	۰/۶۴۵	۰/۷۷۰
۱۲	۰/۷۰۳	۰/۷۶۴	۰/۹۳۲
۱۳	۰/۴۸۶	۰/۶۲۵	۰/۶۷۰
Mean ± STD	۰/۵۹۱±۰/۰۵۰	۰/۶۶۸±۰/۰۵۲	۰/۷۸۳±۰/۱۱۲



شکل ۳. معیار کارایی هر یک از سوژه‌ها به ازای سطوح L، M و H از بارکاری

خروجی اجرای آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بر روی داده‌ها، طبیعی بودن توزیع کمیت معیار کارایی را برای سه طبقه بارکاری تأیید می‌نماید ($p\text{-value} > 0.05$)؛ بدین ترتیب در این مورد نیز، تحلیل واریانس یک طرفه روش مناسب برای تحلیل نتایج می‌باشد. از سوی دیگر چون تحلیل واریانس یک طرفه از وجود اختلاف معنادار بین میانگین معیار کارایی در میان سه سطح بارکاری حکایت دارد ($p\text{-value} \ll 0.001$)، باید پس از انتخاب آزمون تعقیبی مناسب، سه گروه موجود را به صورت دو به دو با هم مقایسه کرد. این بار بر خلاف مرتبه قبلی، انجام آزمون لون بیانگر آن است که واریانس کمیت معیار کارایی بر روی سه گروه

حال با فرض مقدار 5% برای سطح خطای قابل تحمل در تحلیل، میانگین مقدار $B_{OUT\ Total}$ را در میان سه سطح L، M و H از بارکاری با هم مقایسه می‌کنیم. در ابتدا جهت انتخاب تکنیک مناسب، لازم است طبیعی بودن توزیع متغیر وابسته $B_{OUT\ Total}$ برای این سه کلاس از بارکاری چک شود. خروجی آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^{۳۰} بر آن دلالت دارد که رد فرض توزیع طبیعی، به دلیل وجود خطای بالا غیرممکن است ($p\text{-value} > 0.05$)؛ لذا با توجه به وجود سه طبقه مجزا در داده‌ها، این مجوز وجود دارد تا از روش پارامتریک تحلیل واریانس یک طرفه^{۳۱} برای کار با داده‌ها بهره جست.

تحلیل واریانس یک طرفه در سه سطح تعریف شده برای بارکاری، وجود اختلاف معنادار بین میانگین $B_{OUT\ Total}$ را اثبات می‌نماید ($p\text{-value} \ll 0.001$). در گام بعدی با در نظر داشتن اینکه بر اساس آزمون لون^{۳۲} واریانس میان گروه‌های آزمایشی از همگونی برخوردار است ($p\text{-value} = 0.782$)، مقایسه دو به دو معنادار^{۳۳} صورت می‌پذیرد. اجرای کمینه اختلاف معنادار، وجود تفاوت قابل توجه بین میانگین نرخ تبادل داده خروجی ایجاد شده را در میان هر سه رده از بارکاری با احتمال خیلی بالا نشان می‌دهد ($p\text{-value} \ll 0.001$). بنابراین می‌توان بیان داشت که افزایش نرخ تبادل داده ورودی در شبیه‌ساز و بالا رفتن بارکاری از سطح کم به متوسط و از متوسط به زیاد، موجب افزایش چشمگیر در تولید نرخ تبادل داده کلی توسط انسان می‌شود. به عبارت بهتر، سخت‌تر شدن سناریوی تجربه شده توسط انسان در شرایط عملکرد چند وظیفه‌ای، افزایش حجم اطلاعات تولید شده به وسیله او را در پی دارد و این مسئله به وضوح، در نرخ تبادل داده خروجی کل قابل رصد است.

همانطور که در قبل ذکر شد، نرخ تبادل داده خروجی اگرچه در خصوص عملکرد کاربر اطلاعاتی را در خود دارد، اما در عین حال با استفاده از آن نمی‌توان به طور قطعی پیرامون کیفیت تعامل انسان با ماشین اظهارنظر نمود. برای ارزیابی بهتر این تعامل، با بهره‌گیری از تئوری اطلاعات یک معیار کارایی تعریف شد که در بخش دوم از بررسی نتایج، وضعیت این شاخص در داده‌های ثبت شده از آزمون مدنظر قرار می‌گیرد. جدول ۳ و شکل ۳ معیار کارایی بدست آمده برای هر فرد را به ازای سه سطح در نظر گرفته شده برای بارکاری نشان می‌دهند.

سطح عملکرد کاملاً پایدار در کار با آن رسیده بودند. بنابراین می‌توان اطمینان داشت که افراد حاضر در آزمون‌های عملی، از الزامات مورد نیاز برای مشارکت در چنین مطالعه‌ای برخوردار بوده‌اند؛ ضمن آنکه نباید فراموش کرد که بکارگیری دانشجویان داوطلب در مراحل ابتدایی تحقیقاتی از این دست، در همه جای دنیا امری متداول است و نمونه‌های فراوانی از آن در مراجع معتبر علمی به چشم می‌خورد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل ریاضی تعامل انسان-ماشین در کار با شبیه‌ساز استاندارد وظایف خلبان ناسا با استفاده از تئوری اطلاعات ایجاد شد که بر اساس آن، کنش و واکنش میان ماشین (شبیه‌ساز) و انسان در قالب نرخ تبادل داده ورودی ایجاد شده توسط ماشین و نرخ تبادل داده خروجی تولید شده توسط انسان کمی‌سازی گردید. با بهره‌گیری از معیار عددی نرخ تبادل داده ورودی و با در نظر داشتن محدوده توانایی انسان در پردازش اطلاعات، طراح قادر خواهد بود تا به سادگی و بر اساس یک رویه مدون، سطوح مختلف بارکاری را تولید کند که این یکی از دستاوردهای مهم مقاله حاضر بشمار می‌رود. در چنین شرایطی می‌توان اثر تغییر میزان بارکاری را روی مواردی همچون وضعیت فیزیولوژیک انسان، بارکاری ادراک شده توسط انسان، عملکرد انسان و ... مطالعه نمود که مورد آخر در این تحقیق انجام شده است.

اما دستاورد اصلی مقاله، استخراج دو شاخص کاربردی جهت سنجش کمی عملکرد کلی فرد در حالت چندوظیفه‌ای است. شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان در بردارنده چهار زیرسیستم پایش، برقراری ارتباط، مدیریت منابع و رهگیری است که فعالیت‌های مربوط به آن‌ها، در واقع تکالیف عمده دخیل در کنترل نظارتی یک وسیله پرنده هستند. در این شبیه‌ساز کمیت‌های ابتدایی موجود برای ارزیابی عملکرد شخص، مدت زمان واکنش و نرخ خطا هستند که برای هر کدام از زیرسیستم‌های چهارگانه به شکل جدا ارائه می‌شوند. از آنجا که شرایط حاکم بر سناریوی شبیه‌ساز ذاتاً چندوظیفه‌ای است، اگر تنها این کمیت‌ها را ملاک قضاوت خود قرار دهیم، نحوه ارزیابی ما عملاً با حالت تک‌وظیفه‌ای فرق چندانی نخواهد داشت و بررسی اثرات متقابل زیرسیستم‌های مختلف بر یکدیگر، عملکرد کلی فرد و نحوه تقسیم منابع توجه او میان وظایف گوناگون ممکن نیست. در

بارکاری همگون نیست ($p\text{-value}=0.029$) و بر مبنای آن، لازم است از آزمون‌های متناسب با این شرایط نظیر دانت^{۳۵} برای مقایسه کردن بهره برد. نتیجه بدست آمده از آزمون دانت مؤید آن است که افزایش بارکاری در سناریوی شبیه‌ساز، موجب افت محسوس عملکرد خلبان در تعامل با سیستم می‌شود؛ به نحوی که میانگین معیار کارایی بین سطح کم و متوسط با $p\text{-value}=0.011$ ، بین سطح متوسط و زیاد با $p\text{-value}=0.002$ و بین سطح کم و زیاد با $p\text{-value}\ll 0.001$ دچار افت شدید می‌شود.

بنابراین می‌توان گفت اگرچه با افزایش بارکاری، سوژه‌ها با بالا بردن نرخ کلی اطلاعات تولیدی توسط خود، نسبت به آن واکنش نشان می‌دهند؛ اما در این وضعیت، عملکرد کلی شخص به دلیل نیاز به مدیریت همزمان زیرسیستم‌های مختلف دچار افتی نامطلوب می‌شود. چنین پدیده‌ای در هر سیستم مرکب از انسان و ماشین که در آن با تقسیم منابع توجه فرد میان وظایف متفاوت مواجه هستیم، امکان بروز دارد و در چنین شرایطی، ایده خودکارسازی تطبیقی که امروزه در میان متخصصین حوزه مهندسی عوامل انسانی از محبوبیت بالایی برخوردار است، ارزش خود را نمایان می‌سازد. با پیاده‌سازی صحیح خودکارسازی تطبیقی در یک سیستم، جلوگیری از افت عملکرد کاربر در شرایط مختلف عملیاتی آسانتر بوده و تعامل میان انسان و ماشین، به نحو مؤثری در بهترین شکل ممکن تنظیم می‌شود.

ابزارهای ریاضی توسعه یافته در این مقاله برای تحلیل کیفیت کلی کارکرد انسان در حین عملکرد چندوظیفه‌ای مناسب هستند و هدف اصلی آن‌ها، کمک به طراح آزمون برای دستیابی به درک صحیح از نحوه تعامل انسان با شبیه‌ساز می‌باشد. قطعاً لازمه اعتماد به چنین ابزارهایی تطابق خروجی حاصل از آن‌ها با نتایج معقول است که خوشبختانه آزمون عملی انجام شده، تأیید کننده برقراری این الزام برای شاخص‌های پیشنهادی است. از سوی دیگر، یکی از ویژگی‌های مثبت شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان سهولت کار با آن می‌باشد؛ به نحوی که افراد پس از طی یک دوره کوتاه آموزش، در اجرای تکالیف موجود در آن به سطح قابل قبولی از مهارت می‌رسند. آزمون‌های طراحی شده، همگی توسط دانشجویان داوطلب از رشته مهندسی هوافضا انجام شد که کلیه آن‌ها از پیش زمینه و مهارت کافی در کار با این شبیه‌ساز برخوردار بوده و پس از طی یک دوره آموزشی منظم، به خبرگی و

رویکرد پیشنهاد شده می‌توان با بهره‌گیری از تئوری اطلاعات، برای زیرسیستم‌های مختلف شبیه‌ساز که دارای تکالیفی با ماهیت متفاوت هستند، یک کمیت واحد تحت عنوان نرخ تبادل داده خروجی را در پاسخ به محرک‌های موجود اندازه گرفت و پس از آن، با برآیند گرفتن از این عنصر مشترک میان همه اجزای سیستم، به یک شاخص گویا از عملکرد کلی فرد در تعامل با همه زیرسیستم‌های شبیه‌ساز دست یافت. همچنین، سهمی از اطلاعات ورودی که توسط سوژه به شکل مؤثر مورد پردازش قرار گرفته یک معیار مناسب جهت بررسی کیفیت عملکرد کلی او در قبال وظایف مختلف محول شده است.

ابزارهای ریاضی توسعه داده شده در این مقاله از طریق طراحی یک آزمون عملی با سطوح مختلف بارکاری در محیط شبیه‌ساز و انجام آن توسط تعدادی شرکت‌کننده داوطلب، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده بیانگر آن است که در شرایط افزایش سطح دشواری وظایف، انسان با صرف تلاش بیشتر و افزایش نرخ تبادل داده خروجی تولید شده توسط خود، در قبال این وضعیت واکنش نشان می‌دهد؛ اما این عکس‌العمل در حالت افزایش شدید بارکاری، مانع از پایین آمدن قابل توجه کارایی او نمی‌شود. بر اساس تحلیل آماری صورت گرفته، این روند در مقدار شاخص استخراج شده از تئوری اطلاعات به وضوح قابل مشاهده است.

قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند تا سپاسگزاری خود را از طراحان شبیه‌ساز عملکرد چند وظیفه‌ای خلبان در سازمان ناسا، به ویژه سرکار خانم یامیرا سانتیاگو-اسپادا^{۳۶} به دلیل فراهم نمودن این نرم‌افزار برای تیم تحقیق، ابراز نمایند. همچنین همکاری ارزشمند دانشجویان داوطلب از دانشکده مهندسی هوافضای دانشگاه صنعتی امیرکبیر در انجام منظم و دقیق آزمون‌های طراحی شده، در خور ستایش است.

۷. مأخذ

فهرست نمادها و نشانه‌ها	
A	دامنه میانگین حرکت (pixel)
B	نرخ تبادل داده (bits/sec)
\bar{B}	معیار کارایی مبتنی بر تئوری اطلاعات
COM	رادیوی ارتباط
D	قطر دایره متحرک (pixel)
D'	قطر دایره ثابت (pixel)
h	محتوای اطلاعات فضایی (bit)
i	مجموعه زیرسیستم‌های موجود در یک سیستم
I	تعداد زیرسیستم‌های موجود در یک سیستم
K	تعداد حالت‌های ممکن برای یک متغیر اتفاقی گسسته
NAV	رادیوی ناوبری
p	تابع چگالی توزیع احتمال
\dot{V}	نرخ مصرف سوخت (units/min)
\bar{V}	سرعت متوسط جابجایی دایره متحرک (pixel/sec)
W_s	محدوده مجاز حرکت (pixel)
X	متغیر اتفاقی گسسته

علائم یونانی

Δt	محتوای اطلاعات زمانی (sec)
ΔV	میزان تغییرات مجاز برای سوخت داخل مخازن (units)
ρ	نسبت نرخ تبادل داده خروجی به نرخ تبادل داده ورودی

زیرنویس‌ها

C	زیرسیستم برقراری ارتباط
Freq	بخش فرکانس از زیرسیستم برقراری ارتباط
L	بخش چراغ‌ها از زیرسیستم پایش
R	زیرسیستم مدیریت منابع
Rad	بخش رادیو از زیرسیستم برقراری ارتباط
S	بخش شاخص‌ها از زیرسیستم پایش
T	زیرسیستم رهگیری

[1] R. Parasuraman, C. D. Wickens, Humans: Still vital after all these years of automation, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 50, No. 3, pp. 511-520, 2008.

[2] T. B. Sheridan, R. Parasuraman, Human-Automation Interaction, *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, Vol. 1, No. 1, pp. 89-129, 2005.

- [3] S. Yang, J. Zhang, An adaptive human-machine control system based on multiple fuzzy predictive models of operator functional state, *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 302-310, 2013.
- [4] A. Mazloumi, M. Kumashiro, H. Izumi, Y. Higuchi, Examining the influence of different attentional demands and individuals' cognitive failure on workload assessment and psychological functioning, *International Journal of Occupational Hygiene*, Vol. 2, No. 1, pp. 17-24, 2010.
- [5] C. Rosen, The myth of multitasking, *The New Atlantis*, Vol. 20, No. 1, pp. 105-110, 2008.
- [6] A. N. Camden, *Theoretical Throughput Capacity: Capabilities of Human Information Processing during Multitasking*, PhD Thesis, Wright State University, Dayton, USA, 2015.
- [7] R. F. Adler, R. Benbunan-Fich, Juggling on a high wire: Multitasking effects on performance, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 70, No. 2, pp. 156-168, 2012.
- [8] A. S. Clare, *Modeling Real-time Human-Automation Collaborative Scheduling of Unmanned Vehicles*, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2013.
- [9] Y. Boussemart, J. L. Fargeas, M. L. Cummings, N. Roy, Comparing Learning Techniques for Hidden Markov Models of Human Supervisory Control Behavior, *AIAA Infotech@Aerospace Conference*, Seattle, USA, April 6-9, 2009.
- [10] C. Berka, D. J. Levendowski, M. N. Lumicao, A. Yau, G. Davis, V. T. Zivkovic, R. E. Olmstead, P. D. Tremoulet, P. L. Craven, EEG Correlates of Task Engagement and Mental Workload in Vigilance, Learning, and Memory Tasks, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, Vol. 78, No. 5, pp. 231-244, 2007.
- [11] R. Wang, J. Zhang, Y. Zhang, X. Wang, Assessment of human operator functional state using a novel differential evolution optimization based adaptive fuzzy model, *Biomedical Signal Processing and Control*, Vol. 7, No. 5, pp. 490-498, 2012.
- [12] G. Borghini, L. Astolfi, G. Vecchiato, D. Mattia, F. Babiloni, Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Vol. 44, No. 1, pp. 58-75, 2014.
- [13] D. B. Kaber, L. J. Prinzel III, *Adaptive and Adaptable Automation Design: A Critical Review of the Literature and Recommendations for Future Research*, NASA-TM-2006-214504, Virginia: Langley Research Center, 2006.
- [14] G. F. Wilson, C. A. Russell, Performance enhancement in an uninhabited air vehicle task using psychophysiological determined adaptive aiding, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 49, No. 6, pp. 1005-1018, 2007.
- [15] C. H. Ting, M. Mahfouf, A. Nassef, D. A. Linkens, G. Panoutsos, P. Nickel, A. C. Roberts, G. R. J. Hockey, Real-Time Adaptive Automation System Based on Identification of Operator Functional State in Simulated Process Control Operations, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part A: Systems and Humans*, Vol. 40, No. 2, pp. 251-262, 2010.
- [16] G. Borghini, R. Isabella, G. Vecchiato, J. Toppi, L. Astolfi, C. Caltagirone, F. Babiloni, Brainshield: HREEG study of perceived pilot mental workload, *Italian journal of aerospace medicine*, Vol. 5, No. 1, pp. 34-47, 2011.
- [17] Y. Lim, A. Gardi, R. Sabitini, S. Ramasamy, T. Kistan, N. Ezer, J. Vince, R. Bolia, Avionics Human-Machine Interfaces and Interactions for Manned and Unmanned Aircraft, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 102, No. 1, pp. 1-46, 2018.
- [18] Y. Santiago-Espada, R. R. Myer, K. A. Latorella, J. R. Comstock Jr, *The Multi-Attribute Task Battery II (MATB-II) Software for Human Performance and Workload Research: A User's Guide*, pp. 1-269, Virginia: Langley Research Center, 2011.
- [19] R. Molloy, R. Parasuraman, Monitoring an automated system for a single failure: Vigilance and task complexity effects, *Human Factors*, Vol. 38, No. 2, pp. 311-322, 1996.
- [20] K. Gilliland, R. E. Schlegel, T. E. Nesthus, *Workshift and Antihistamine Effects on Task Performance*, pp. 1-100, Washington, D.C.: Office of Aviation Medicine, 1997.
- [21] P. J. Valk, D. B. Van Roon, R. M. Simons, G. Rikken, Desloratadine shows no effect on performance during 6 h at 8,000 ft simulated cabin altitude, *Aviation, space, and environmental medicine*, Vol. 75, No. 5, pp. 433-438, 2004.
- [22] J. A. Caldwell, S. Ramspott, Effects of task duration on sensitivity to sleep deprivation using the multi-attribute task battery, *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, Vol. 30, No. 4, pp. 651-660, 1998.
- [23] C. E. Shannon, A mathematical theory of communication, *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, No. 3, pp. 379-423, 2001.
- [24] Z. Wang, A. Alahmadi, D. C. Zhu, T. Li, Causality Analysis of fMRI Data Based on the Directed Information Theory Framework, *IEEE*

- Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 63, No. 5, pp. 1002-1015, 2016.
- [25] A. N. Ravari, H. D. Taghirad, Loop closure detection by algorithmic information theory: Implemented on range and camera image data, *IEEE transactions on cybernetics*, Vol. 44, No. 10, pp. 1938-1949, 2014.
- [26] H. Jänicke, G. Scheuermann, Visual analysis of flow features using information theory, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 30, No. 1, pp. 40-49, 2010.
- [27] F. Talantzis, An acoustic source localization and tracking framework using particle filtering and information theory, *IEEE transactions on audio, speech, and language processing*, Vol. 18, No. 7, pp. 1806-1817, 2010.
- [28] C. M. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*, 1st ed., New York: Springer, 2006.
- [29] C. A. Phillips, D. W. Repperger, R. Kinsler, G. Bharwani, D. Kender, A quantitative model of the human-machine interaction and multi-task performance: A strategy function and the unity model paradigm, *Computers in biology and medicine*, Vol. 37, No. 9, pp. 1259-1271, 2007.
- [30] P. M. Fitts, The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of experimental psychology*, Vol. 47, No. 6, pp. 381, 1954.
- [31] W. E. Hick, On the rate of gain of information, *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Vol. 4, No. 1, pp. 11-26, 1952.
- [32] R. Hyman, Stimulus information as a determinant of reaction time, *Journal of experimental psychology*, Vol. 45, No. 3, pp. 188, 1953.
- [33] C. M. Walters, *Application of the human-machine interaction model to Multiple Attribute Task Battery (MATB): Task component interaction and the strategy paradigm*, MSc Thesis, Wright State University, Dayton, USA, 2012.
- [34] *Operator Functional State Assessment*, RTO-TR-HFM-104, North Atlantic Treaty Organization, 2004.

پی‌نوشت

-
1. Automation
 2. Multitasking performance
 3. Divided attention
 4. Sustained attention
 5. Situation awareness
 6. Human Supervisory Control (HSC)
 7. Hidden Markov Model (HMM)
 8. Electroencephalography (EEG)
 9. Operator Functional State (OFS)
 10. Adaptive Automation (AA)
 11. Life support system
 12. Glass cockpit
 13. Human factors engineering (ergonomics)
 14. Crew Resource Management (CRM)
 15. Multi-Attribute Task Battery (MATB)
 16. Shannon
 17. Baud rate
 18. Fitts
 19. Hick-Hyman
 20. Tracking
 21. Monitoring
 22. Communications
 23. Resource Management
 24. Joystick
 25. Spatial information content
 26. Monotonic
 27. Stimulus signal
 28. Temporal information content
 29. Normal
 30. Kolmogorov-Smirnov
 31. One-way ANOVA
 32. Levene
 33. Post-hoc

-
34. Least Significant Difference (LSD)
 35. Dunnett
 36. Yamira Santiago-Espada