

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Investigation of Relationship Between EEG Theta Power and Mental Workload in Air Traffic Control Simulation

Marzieh Izadi laybidi<sup>1</sup>, Adel Mazloumi<sup>1\*</sup>, Jebraeil Nasl Saraji<sup>1</sup>, Faramarz Gharagozlou<sup>2</sup>, Amir Homayoun Jafari<sup>3</sup>, Zahra Shirzhiyan<sup>3</sup>, Kamal Azam<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran.

<sup>3</sup>Department of Medical Physics and Biomedical Engineering, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

<sup>4</sup>Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Received: 07-04-2016

Accepted: 24-06-2023

### ABSTRACT

**Introduction:** Air traffic control is a very complex process, including multiple human-machine interactions. Human mental workload plays an important role in this process. Nowadays, electroencephalography indexes are considered as new indicators in the field of assessment of mental workload. The purpose of the present study was to investigate the relationship between EEG theta power and mental workload in air traffic control simulation.

**Material and Methods:** Fourteen air traffic controllers participated in this study. Controllers carried out two scenarios, including low and high workload, based on task load factors in an air traffic control simulator. Mental workload was assessed in these two scenarios by the NASA-TLX questionnaire. EEG signals were continuously recorded during air traffic control tasks. Afterward, absolute theta power was extracted from participants' EEG using Fast Fourier Transform (FFT) by the MATLAB software and was compared with each other in terms of high and low workload.

**Results:** The results showed a significant relationship in absolute theta power during low and high workload scenarios in all regions of the brain ( $p < 0.05$ ). Absolute theta power increased primarily in the frontal region during the high workload scenario. Also, there was a significant increase in the relationship between work experience and absolute theta power at the F3 region during the high workload scenario ( $P=0.021$ ,  $r=0.607$ ).

**Conclusion:** Absolute theta power provides a good parameter to assess mental workload at different levels of air traffic control tasks. Therefore, it can be used as a tool for the design of human-machine complex systems.

**Keywords:** Mental workload, Electroencephalography (EEG), Physiological measures, Absolute theta power, Air traffic control

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Izadi laybidi M, Mazloumi A, Nasl Saraji J, Gharagozlou F, Jafari AH, Shirzhiyan Z, Azam K. Investigation of Relationship Between EEG Theta Power and Mental Workload in Air Traffic Control Simulation. *J Health Saf Work*. 2023; 13(3): 459-473.

\* Corresponding Author Email: [amazlomi@tums.ac.ir](mailto:amazlomi@tums.ac.ir)

## 1. INTRODUCTION

Air traffic control is a very complex process, including multiple human-machine interactions. Mental workload plays an important role in this process. Mental workload refers to the part of an operator's information processing capacity that is required for task performance at a given time. A perfect human-machine system would be informed about the current mental workload level of the operator to maintain the essential workload level at a desirable level. Hence, assessing mental workload is beneficial for predicting performance reduction, minimizing human error, and designing proper adaptive automation strategies.

Evaluation of the mental workload of air traffic controllers has been investigated using various subjective, behavioral, and physiological measures. Subjective and behavioral measures can provide accurate details regarding a controller's mental workload. Nevertheless, physiological evaluations are more appropriate for practical applications in this domain. Among the various physiological measurement tools, electroencephalography (EEG) has been recognized as a reliable method to assess cognitive processes such as air traffic control duties because it can directly measure the functions of the central nervous system and is not disruptive to primary task performance.

Given that no study has been done so far to examine the relationship between age and work experience with absolute theta power during high and low workload scenarios in the brain area, and considering the effect of the type of task and stimulus attributes on absolute theta power, the aim of this study was to measure controllers' mental workload using EEG signals based on task load factors similar to characteristics of the actual work environment.

## 2. MATERIAL AND METHODS

Fourteen certified radar controllers (all males, aged 33–46 years) voluntarily participated in this study. All subjects had a current medical certificate. Before the study, participants read and signed informed consent forms.

The simulator scenario for each controller took almost 3 hours. This included: (a) a 10-minute preparation stage, including EEG device setup and electrode connection; (b) a 10-minute simulator preparation (rest); (c) a 40-minute implementation of the high workload scenario; (d)

a 40-minute implementation of the low workload scenario; and (e) a 60-minute rest period between the two scenarios. Participants reported their subjective mental workload evaluation using the NASA Task Load Index (TLX) questionnaire at the end of each scenario. It is worth noting that to control the effect of task difficulty, the order of high and low workload scenarios was randomly set up between the fourteen subjects.

The subjective workload technique was the NASA TLX scales based on scores collected at the end of each scenario. The NASA-TLX contains six subscales (mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, frustration), and these subscales require the controller to provide a rating between 0 and 100 for each of the six subscales. The raw mean (RTLX) of these six subscales was computed.

The EEG signals recorded continuously using a USB biosignal amplifier, g.tec medical engineering GmbH, Austria, operating with MATLAB software. monopolar EEG was recorded with electrode cap in sites F3, F4, p3, p4, T7, T8, O1, O2, C3, C4 in terms of the international 10-20 system. EEG data were filtered online by a 0.5 Hz high-pass filter and a 30 Hz low-pass filter, sampled with 256 Hz and 24 quantization with ground at Fz and all electrodes were referenced to the left mastoid electrode. The dynamic ranges for  $\pm 100 \mu\text{V}$ .

EEG Data was visualized with EEGLAB toolbox and artifacts such as eye movements, eye blinks, heartbeats, muscle activity were eliminated. Afterwards, Five second data epochs were extracted the peak workload of each section. Then data processed using MATLAB (R2013). To account theta power, Fast Fourier Transform was implemented within each epoch.

All data were analyzed using SPSS software version 16. Wilcoxon test was performed for comparison absolute theta power between high and low workload scenarios in this study. Moreover, spearman correlation test was employed to analyze relationship between absolute theta power and age and working experience in controllers. The statistically significant criterion was considered at  $P < 0.05$ .

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The mean and standard deviation of age and work experience in controllers were  $38.93 \pm 4.63$  and  $16.14 \pm 4.45$  years, respectively.

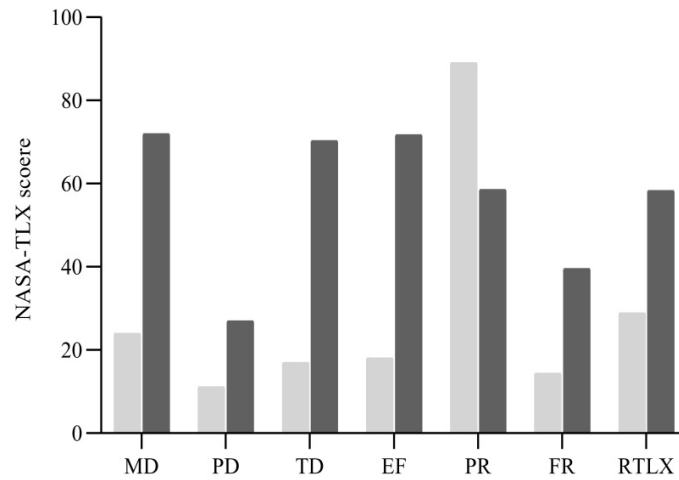


Fig. 1: Changes in NASA-TLX score during low and high workload scenarios (N=14) Mental demand (MD), Physical Demand (PD), Temporal Demand (TD), Effort, Performance (PR), Frustration (FR) and Raw Task Load Index (RTLX)

Table 1: Changes of absolute theta power during low and high workload scenarios at brain regions

Brain regions	Mean (SD)		P-value
	Low workload	High workload	
F3	4.34 (2.46)	4.93 (2.48)	<b>0.014</b>
F4	4.34 (2.06)	4.95 (2.60)	<b>0.001</b>
P7	1.29 (0.84)	1.47 (1.05)	<b>0.001</b>
P8	2.48 (1.26)	2.29 (1.39)	<b>0.001</b>
O1	2.02 (1.45)	2.57 (1.80)	<b>0.001</b>
O2	2.48 (1.46)	3.37 (2.63)	<b>0.001</b>
T7	1.12 (0.56)	0.20 (0.85)	<b>0.002</b>
T8	2.72 (1.64)	2.89 (1.34)	<b>0.001</b>
C3	2.73 (1.45)	3.27 (2.01)	<b>0.001</b>
C4	3.02 (1.44)	3.45 (1.65)	<b>0.001</b>

Table 2: Correlation matrix between absolute theta power and age at brain regions

Brain regions	P-value		R	
	Low workload	High workload	Low workload	High workload
F3	<b>0.316</b>	<b>0.039</b>	<b>0.289</b>	<b>0.556</b>
F4	<b>0.363</b>	<b>0.529</b>	<b>0.264</b>	<b>0.184</b>
P7	<b>0.266</b>	<b>0.419</b>	<b>0.319</b>	<b>0.235</b>
P8	<b>0.208</b>	<b>0.354</b>	<b>0.359</b>	<b>0.268</b>
O1	<b>0.080</b>	<b>0.656</b>	<b>0.483</b>	<b>0.131</b>
O2	<b>0.229</b>	<b>0.664</b>	<b>0.343</b>	<b>0.133</b>
T7	<b>0.678</b>	<b>0.645</b>	<b>0.122</b>	<b>0.135</b>
T8	<b>0.303</b>	<b>0.273</b>	<b>0.297</b>	<b>0.315</b>
C3	<b>0.052</b>	<b>0.176</b>	<b>0.529</b>	<b>0.384</b>
C4	<b>0/168</b>	<b>0.242</b>	<b>0.390</b>	<b>0.335</b>

Statistically significant values are shown in bold.

Table 3: Correlation matrix between absolute theta power and work experience at brain regions

Brain regions	P-value		R	
	Low workload	High workload	Low workload	High workload
F3	0.287	<b>0.021</b>	0.306	0.607
F4	0.425	0.952	0.232	<b>0.018</b>
P7	0.429	0.662	0.230	<b>0.128</b>
P8	0.140	0.420	0.415	<b>0.235</b>
O1	0.083	0.928	0.480	<b>0.027</b>
O2	0.289	0.900	0.305	<b>-0.039</b>
T7	0.810	0.863	0.071	<b>0.051</b>
T8	0.520	0.555	0.188	<b>0.173</b>
C3	0.084	0.285	0.477	<b>0.308</b>
C4	0.188	0.384	0.373	<b>0.252</b>

Statistically significant values are shown in bold.

The subjective workload ratings measured by NASA-TLX are reported in Fig. 1. The NASA-TLX index results showed that RTLX was higher during the high workload scenario than low-level conditions. This means that subjects could discriminate between different task levels.

The Wilcoxon test was performed to compare the absolute theta power during high and low workload scenarios. Significant differences were observed between absolute theta power and workload during high and low workload scenarios in all regions. In addition, changes in absolute theta power during low and high workload scenarios at brain regions are depicted in Table 1.

Spearman correlation of the absolute theta power, age, and work experience is presented in Tables 2 and 3. Correlation revealed significant positive relationships among absolute theta power, age, and work experience during the high workload scenario at the F3 region.

#### 4. CONCLUSIONS

In summary, activity of the theta band should provide useful information about the level of mental workload applied by different tasks of the ATC simulator. It would be helpful in future research to obtain measures of difficulty from individuals for each task during real ATC. The results of this study emphasize the importance of physiological assessments such as EEG, which provides a useful parameter to assess mental workload at different levels of tasks. This may be used as a tool for the design of human-machine complex systems.

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

This research was conducted as part of a master's thesis in Ergonomics to be presented in the Occupational Health Engineering group at Tehran University of Medical Sciences. The authors feel obliged to express their gratitude and appreciation to the esteemed personnel of Tehran Air Traffic Control Center.

## بررسی ارتباط بین شاخص تنای سیگنال‌های مغزی و بار کاری ذهنی در شبیه ساز کنترل ترافیک هوایی

مرضیه ایزدی لای بیدی<sup>۱</sup>، عادل مظلومی<sup>۱\*</sup>، جبرائیل نسل سراجی<sup>۱</sup>، فرامرز قره گوزلو<sup>۲</sup>، امیرهمايون جعفری<sup>۲</sup>، زهرا شیرزبان<sup>۳</sup>، کمال اعظم<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران  
<sup>۳</sup>گروه فیزیک و مهندسی پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۴</sup>گروه اپیدمیولوژی و آمار زیستی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۳

### مکیده

**مقدمه:** کنترل ترافیک هوایی یک فرایند بسیار پیچیده شامل تعامل چندگانه سیستم انسان-ماشین می‌باشد که بار کاری ذهنی انسان نقش مهمی در این فرایند ایفا می‌کند. امروزه شاخص‌های الکتروانسفالوگرافی به عنوان نشانگرهای جدید در حوزه ارزیابی بار کاری ذهنی مطرح می‌باشند. هدف از مطالعه حاضر بررسی ارتباط بین شاخص تنای سیگنال‌های مغزی و بار کاری ذهنی در کنترلرهای ترافیک هوایی می‌باشد.

**روش کار:** در این مطالعه چهارده نفر کنترلر ترافیک هوایی شرکت نمودند. کنترلرها دو سناریوی بار کاری کم و زیاد را بر اساس مؤلفه‌های بار وظیفه در شبیه ساز کنترل ترافیک هوایی انجام دادند. بار کاری ذهنی کنترلرها در این دو سناریو با استفاده از پرسشنامه NASA-TLX مورد ارزیابی قرار گرفت. امواج الکتروانسفالوگرافی افراد در طول انجام وظایف به طور مستمر ثبت شد. سپس، توان مطلق تتا با استفاده از تبدیل سریع فوری در نواحی مختلف مغزی با استفاده از نرم‌افزار متلب استخراج گردید و در شرایط بار کاری بالا و پایین با یکدیگر مقایسه شد. **یافته‌ها:** نتایج حاصل از مقیاس فردی NASA-TLX بیانگر این است که بین نمره خام بار کاری در شرایط بار کاری بالا و شرایط بار کاری پایین تفاوت معنی‌دار وجود دارد ( $P < 0/001$ ). اختلاف بین توان مطلق تتا در شرایط بار کاری بالا و بار کاری پایین در تمامی مناطق اندازه‌گیری شده از لحاظ آماری معنادار بود ( $P < 0/05$ ) و در درجه اول این شاخص در مناطق فرونتال در شرایط بار کاری بالا افزایش یافت. همچنین با افزایش سابقه کاری، توان مطلق تتا در سطح بار کاری بالا در سمت چپ فرونتال افزایش یافت ( $r = 0/607$ ,  $P = 0/021$ ).

**نتیجه‌گیری:** توان مطلق تتا شاخص خوبی به منظور ارزیابی بار کاری ذهنی در سطوح مختلف وظیفه کنترل ترافیک هوایی می‌باشد؛ بنابراین می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای طراحی سیستم‌های پیچیده انسان-ماشین استفاده شود.

**کلمات کلیدی:** بار کاری ذهنی، الکتروانسفالوگرافی، اندازه‌گیری‌های فیزیولوژیک، توان مطلق تتا، کنترل ترافیک هوایی

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [amazlomi@tums.ac.ir](mailto:amazlomi@tums.ac.ir)

## مقدمه

کنترل ترافیک هوایی با هدف معرفی حریم هوایی، ارائه پرواز ایمن، سریع و اقتصادی برای هواپیماهای تحت کنترل به فعالیت می‌پردازد. کنترل ترافیک هوایی یک فرایند بسیار پیچیده شامل تعامل چندگانه سیستم انسان-ماشین می‌باشد که بارکاری ذهنی انسان نقش مهمی در این فرایند ایفا می‌کند (۱). بارکاری ذهنی، میزان ظرفیت پردازش اطلاعات افراد می‌باشد که برای عملکرد یک وظیفه در یک زمان معین مورد نیاز می‌باشد (۲). مسئولیت اطمینان عملکرد سیستم در انجام وظایف، کنترلر را به شیوه‌ای منحصر به فرد تحت تأثیر عوامل استرس‌زا قرار می‌دهد (۳). بنابراین ارزیابی بارکاری ذهنی، به منظور پیش‌بینی کاهش عملکرد، جلوگیری از خطای انسانی و وقایع فاجعه انگیز می‌تواند مفید باشد (۴). در صنعت هوانوردی، کوچک‌ترین کاهش در عملکرد ممکن باعث ایجاد عواقب جدی برای امنیت انسان شود (۵).

در مطالعات متعددی ارزیابی بارکاری ذهنی با استفاده از روش‌های مستقیم و غیرمستقیم در چهار گروه اصلی مورد مطالعه قرار گرفته است. گروه اول ارزیابی خود گزارشی مانند مقیاس تصحیح‌شده کوپر-هارپر (۶)، تکنیک ارزیابی بارکاری ذهنی (SWAT) (۷)، شاخص بار وظیفه ناسا (NASA-TLX) (۸) را شامل می‌شود. دومین گروه از روش‌های ارزیابی بارکاری، عملکرد و رفتار افراد مانند دقت و سرعت پاسخ آن‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. گروه سوم از روش‌های ارزیابی بارکاری شناختی بر اساس اندازه‌گیری‌های فیزیولوژیک از قبیل حرکات چشم، درجه حرارت پوست، پاسخ گالوانیایی پوست، تعداد ضربان قلب، فشارخون و تعداد تنفس می‌باشد (۱). گروه چهارم به روش‌های ارزیابی فیزیولوژیک مستقیم، مانند ارزیابی فعالیت‌های شناختی مرتبط با مغز اشاره دارد (۹).

ارزیابی بارکاری ذهنی کنترلرهای ترافیک هوایی با روش‌های متنوع فردی، رفتاری و فیزیولوژیک مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۰-۱۲). اگرچه روش‌های ارزیابی‌های فردی و رفتاری جزئیات دقیقی در رابطه با بارکاری

ذهنی کنترلرها ارائه می‌دهد، اما ارزیابی‌های فیزیولوژیک برای کاربردهای عملی در این زمینه مناسب‌تر می‌باشند (۱۳). از روش‌های ارزیابی فیزیولوژیک، نوار مغز به دلیل اینکه عملکرد سیستم عصبی مرکزی را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کند و باعث ایجاد تداخل در عملکرد وظیفه اولیه نمی‌شود، به‌عنوان وسیله‌ای حساس و قابل اعتماد برای ارزیابی فرایندهای ذهنی از جمله وظایف کنترل ترافیک هوایی شناخته‌شده است (۱۴). همچنین الکتروانسفالوگرافی (EEG) به دلیل اینکه امکان جمع‌آوری داده‌ها به‌طور مستمر وجود دارد، یکی از قابل اعتمادترین روش‌های ارزیابی بارکاری ذهنی می‌باشد. اثر دشواری وظیفه سیگنال‌تتا خط میانی فرونتال قابلیت اعتماد خوبی با میانگین قابلیت اطمینان درون جلسه ۰/۷۷ و میانگین قابلیت اطمینان درونی بین جلسه ۰/۷۸ گزارش شده است (۱۵).

کنترل ترافیک هوایی مستلزم مجموعه پیچیده‌ای از وظایف که نیازمند سطح بالایی از دانش و تجربه، کاربرد مهارت‌های خاص مربوط به حوزه‌های شناختی مانند ادراک فضایی، پردازش اطلاعات، استدلال، منطق، تصمیم‌گیری، جنبه‌های ارتباطی و روابط انسانی می‌باشد (۱۶). در نتیجه با استفاده از سیگنال‌های EEG جنبه‌های مختلفی از بارکاری شناختی مربوط به کنترل ترافیک هوایی قابل ارزیابی است.

بسیاری از شاخص‌های EEG در باندهای فرکانسی مختلف و مناطق مغزی برای ارزیابی بارکاری ذهنی پیشنهاد شده است (۱۷). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که فعالیت تتا در رابطه با پردازش، رمزگذاری، بازیابی و انتقال اطلاعات از حافظه کوتاه‌مدت به حافظه بلندمدت می‌باشد (۱۸، ۱۹). فعالیت تتا در ناحیه فرونتال با افزایش تلاش ذهنی و بارکاری افزایش می‌یابد (۱۴). همچنین فعالیت تتا در انواع زیادی از وظایف ادراکی، شناختی و رفتاری به‌ویژه در وظایف مربوط به حافظه فعال، تلاش ذهنی و بار حافظه کوتاه‌مدت مشاهده شده است (۱۱). یامادا (۱۹۹۸) از فعالیت تتا فرونتال میانی به‌عنوان ابزاری در زمینه ارزیابی توجه تمرکز، بارکاری، خستگی و علاقه در

بودند و سابقه بیماری و آسیب مغزی نداشتند، به صورت داوطلبانه انجام گرفت. حجم نمونه با استفاده از مطالعات پیشین (۲۲،۲۱،۱۴) و فرمول  $n = \left[ \frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sigma}{d} \right]^2$  در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ۱۴ نفر تعیین شد. یک هفته پیش از انجام آزمون، از کنترلرهای واجد شرایط درخواست شد که فرم رضایت نامه را تکمیل و امضا نمایند. این فرم شامل ویژگی های دموگرافیک شامل سن، میزان تحصیلات، سابقه کاری و غیره بود.

#### پروتکل مطالعه

کنترلرهای مرکز کنترل ترافیک هوایی تهران در دو نوبت ۱۲ ساعته فعالیت می کنند. ساعت کار نوبت روز از ساعت ۷ الی ۱۹ و شب از ۱۹ الی ۷ انجام می شود؛ چرخش نوبت از روز به شب به صورت ساعت گرد است و در گروه به صورت ۱ روز کار/۲ استراحت/۱ شب کار (۲/۱) اس/۱ش) می باشد، یعنی زمان استراحت کنترلرها ۴۸-۱۲ است، بدین صورت که هر کنترلر به ازای ۱۲ ساعت کار ۴۸ ساعت استراحت می کند. در طول نوبت کاری، هر کنترلر به ازای هر سه ساعت کار، سه ساعت استراحت در هر دو نوبت صبح و بعدازظهر دارد. علاوه بر این، کنترلرهای ترافیک هوایی در دو گروه A و B فعالیت می کنند. به عنوان مثال، در یک نوبت کاری روز، هنگامی که گروه A، سه ساعت در صبح (۱۰:۰۰-۷:۰۰) کار می کند، سپس سه ساعت (۱۳:۰۰-۱۰:۰۰) به استراحت می پردازد. همچنین، در بعدازظهر آن ها سه ساعت کار می کنند (۱۶:۰۰-۱۳:۰۰)، سپس سه ساعت استراحت دارند (۱۹:۰۰-۱۶:۰۰). در زمان استراحت گروه A هم در صبح و هم در بعداز ظهر، گروه B در موقعیت کاری قرار می گیرند و بالعکس. در این مطالعه انجام آزمایش در شبیه ساز کنترل ترافیک هوایی در روز اول استراحت افراد ساعت ۱۰:۰۰-۱۳:۰۰ انجام شد.

انجام آزمایش در شبیه ساز برای هر فرد تقریباً ۳ ساعت صورت گرفت (شکل ۱)، شامل: (الف) ۱۰ دقیقه آماده سازی دستگاه EEG مانند اتصال الکترودها در نقاط مختلف سر، (ب) ۱۰ دقیقه آماده سازی برنامه شبیه ساز

هنگام کار با پایانه های تصویری دیداری به این نتایج رسید که بار حافظه تمامی ارزیابی ها را تحت تأثیر قرار می دهد و قدرت تنا در فرونتال میانی در وظایف جستجوی بصری افزایش می یابد (۲۰).

بروکینگز و همکاران (۱۹۹۶) تغییر در سیگنال های EEG کنترلر را در سه سناریوی بارکاری کم، متوسط و سنگین بر روی شبیه ساز کنترل ترافیک هوایی مورد بررسی قرار دادند. در هر سناریو یک متغیر مربوط به بارکاری شامل تعداد هواپیماها، پیچیدگی و فشار زمانی مورد ارزیابی قرار گرفت. سرانجام یک افزایش در قدرت نسبی تنا در مناطق مرکزی، آهیانه، سمت راست فرونتال و سمت راست گیجگاهی با افزایش سختی وظیفه در نتایج آن ها مشاهده گردید (۲۱). پستما و همکاران در سال ۲۰۰۵ ارزیابی بارکاری ذهنی با استفاده از شاخص های EEG را در کنترلرهای ترافیک هوایی بر اساس تعداد هواپیماها و تأثیر زمان روی وظیفه مورد بررسی قرار دادند (۲۲).

با توجه به موارد ذکر شده تاکنون در مطالعه ای رابطه بین سن و سابقه کار با مقادیر توان مطلق تنا در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین در مناطق مغزی انجام نشده است، همچنین با در نظر گرفتن این موضوع که نوع وظیفه و روش محرک اثر قابل توجهی روی پهنای باند تنا دارند (۲۳)، در این مطالعه بارکاری ذهنی کنترلر در شبیه ساز کنترل ترافیک هوایی مبتنی بر مؤلفه های کامل مربوط به فاکتورهای بار وظیفه شامل معرف پروازی، ارتفاع پرواز، سرعت پرواز، نوع هواپیما، کد شناسایی پرواز مشابه محیط کار واقعی با استفاده از آنالیز سیگنال های EEG ارزیابی شد. همچنین بارکاری ذهنی در شرایط کم و زیاد در دو سناریوی مجزا با خصوصیات مشابه محیط کار واقعی مورد مطالعه قرار گرفت.

### روش کار

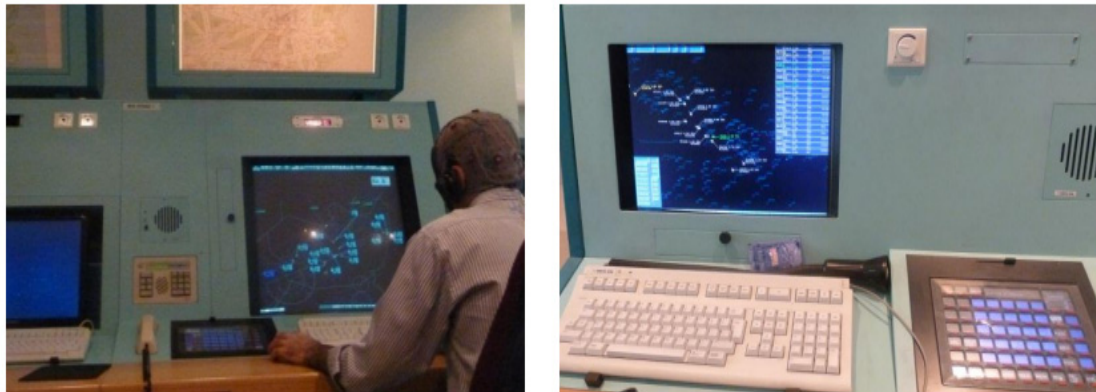
#### شرکت کنندگان

چهارده نفر کنترلر ترافیک هوایی مرد در این پژوهش شرکت کردند. انتخاب افراد از بین کنترلرهای شاغل که دارای مدرک رادار در مرکز کنترل ترافیک هوایی



تکمیل پرسشنامه NASA-TLX	ثبت EEG، حجم بارکاری پایین	استراحت	تکمیل پرسشنامه NASA-TLX	ثبت EEG، حجم بارکاری بالا	وضعیت آرامش	آماده سازی دستگاه
۱۰ دقیقه	۴۰ دقیقه	۶۰ دقیقه	۱۰ دقیقه	۴۰ دقیقه	۱۰ دقیقه	۱۰ دقیقه

شکل ۱: مراحل انجام آزمون‌ها در شبیه‌ساز کنترل ترافیک هوایی



شکل ۲: سمت راست: ایستگاه کاری خلبان، سمت چپ: ایستگاه کاری کنترلر ترافیک هوایی

کاری خود داده‌های موردنظر شامل مانور هواپیماها در هنگام کنترل ترافیک را انجام دادند (شکل ۲). دو سناریو شامل شرایط بارکاری کم و بارکاری زیاد در این شبیه‌ساز با توجه متغیرهای بار وظیفه کنترلرهای ترافیک هوایی شامل تعداد هواپیما، معرف پروازی، ارتفاع پرواز، سرعت پرواز، نوع هواپیما، کد شناسایی پرواز مشابه با شرایط محیط کار واقعی توسط گروه آموزش مرکز کنترل ترافیک هوایی طراحی گردید. به‌عنوان مثال، سناریوی اول شامل ۱۳ هواپیما و سناریوی دوم شامل ۲۶ هواپیما به ترتیب به‌عنوان سطح بارکاری کم و بارکاری زیاد هرکدام به مدت ۴۰ دقیقه به طول انجامید.

#### ارزیابی بارکاری ذهنی

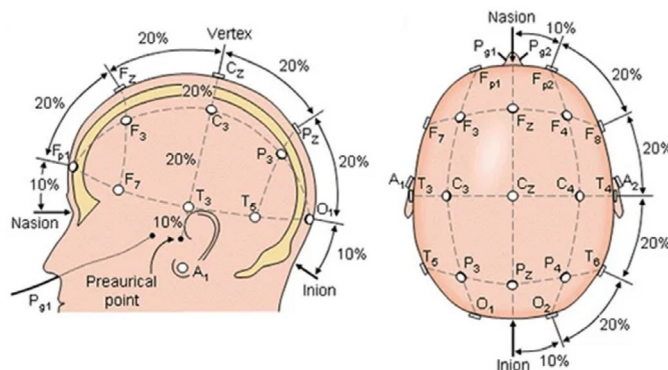
ارزیابی بارکاری ذهنی با استفاده از پرسشنامه NASA-TLX انجام شد. این پرسشنامه یک ابزار چندوجهی برای ارزیابی بارکاری ذهنی به‌صورت فردی می‌باشد که یک امتیاز کلی از بارکاری بر اساس میانگین وزنی از شش مقیاس بارفکری و ذهنی، بار فیزیکی، فشار زمانی، میزان تلاش و کوشش، عملکرد و کارایی و احساس

(ج) ۴۰ دقیقه انجام سناریو با حجم بارکاری زیاد (د) ۴۰ دقیقه انجام سناریو با حجم بارکاری پایین، (ه) ۶۰ دقیقه استراحت بین دو سناریو به‌منظور از بین بردن اثر خستگی افراد بین این دو سناریو. شرکت‌کنندگان بعد از اتمام هر سناریو با استفاده از مقیاس، NASA-TLX بارکاری ذهنی را با توجه به وظیفه انجام‌شده برای اطمینان از اینکه سناریو مربوطه باعث ایجاد سطوح مختلف بارکاری (بارکاری بالا و پایین) می‌شود، ارزیابی کردند. همچنین، ترتیب ارائه دو سناریو (شرایط بالا و پایین بارکاری ذهنی) بین شرکت‌کنندگان تصادفی انتخاب شد.

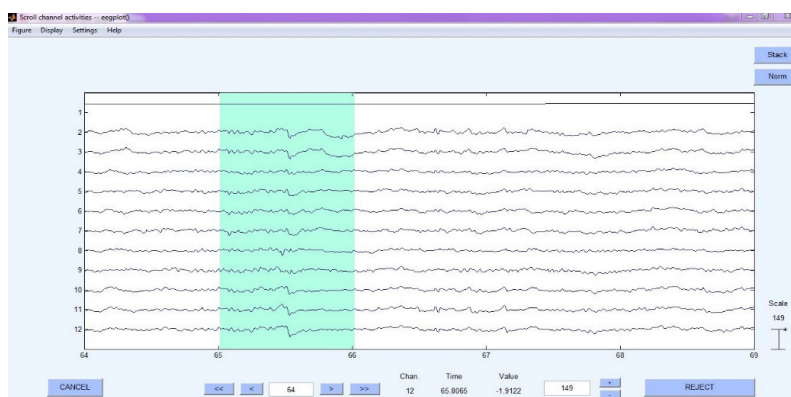
#### وظایف تعریف‌شده

در این مطالعه به‌منظور ارزیابی بارکاری ذهنی از شبیه‌ساز مرکز کنترل ترافیک هوایی مدل EUROCAT Thomson French ۲۰۰۰، با نرم‌افزار UNIX-ADA استفاده شد. کنترلرها دو سناریو را در ایستگاه کاری دارای صفحه نمایش با وضوح بالا (۲۰۴۸ × ۲۰۴۸ در اندازه ۲۹ اینچ)، اسکوپ رادار، صفحه کلید و موس به انجام رسانیدند. همچنین چهار خلبان در ایستگاه‌های





شکل ۳: فاصله گذاری نصب الکترودها در سیستم ۱۰-۲۰



شکل ۴: حذف آرتیفکت چشمی از سیگنال ها

EEG به صورت آنلاین با استفاده از فیلتر عبور باند با فرکانس های ۰/۵ هرتز و ۳۰ هرتز فیلتر شدند. همچنین فرکانس نمونه برداری ۲۵۶ هرتز و به صورت ۲۴ بیتی بود (۲۸). هنگام نمونه برداری الکتروده مرجع A1 و الکتروده زمین FZ در نظر گرفته شد.

#### پردازش داده ها

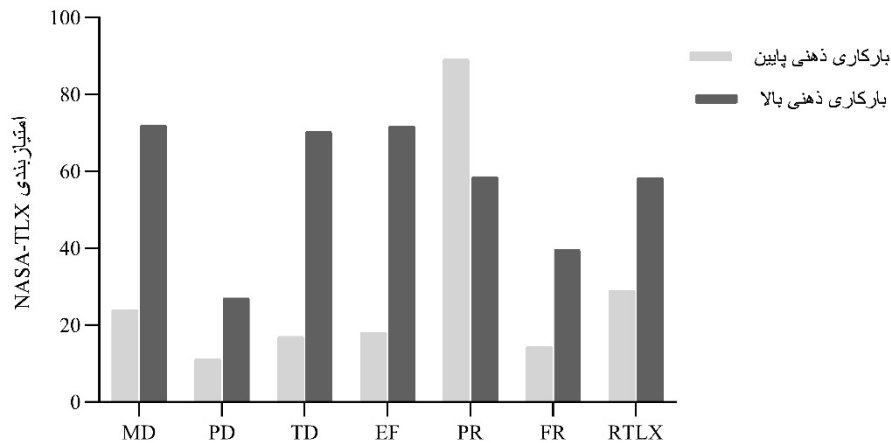
مرحله اول پیش پردازش داده های EEG، شامل خواندن داده ها در محیط نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۳ بود. سپس آرتیفکت های عضلانی و چشمی با استفاده از نرم افزار EEGLab (نسخه ۱۰-۲-۵-a6) به طور چشمی حذف شدند (شکل ۴).

در مرحله بعد، همه سیگنال ها به epoch های ۵ ثانیه ای تقسیم شدند. سپس قطعات زمانی بر اساس اوج بارکاری در هر سناریو جدا شدند. پس از مشخص

دلسردی و ناکامی فراهم می کند. در این پرسشنامه هر مقیاس توسط یک خط ده سانتی متری مشخص شده است و توصیف دو قطبی (زیاد/کم) در دو انتهای خط بیان شده است. در این مطالعه به منظور ارزیابی نهایی بارکاری امتیاز خام (Raw-TLX) را محاسبه نمودیم. اعتبار این روش محاسبه توسط میاکی و کوماشیرو تأیید شده است (۲۴). همچنین، اعتبار صوری این تکنیک در مطالعات قبلی مورد ارزیابی قرار گرفته است (۲۵).

#### ثبت سیگنال های EEG

سیگنال های EEG به طور پیوسته با استفاده از دستگاه ۱۶ کانال و نرم افزار متلب نسخه ۲۰۱۳ ثبت شد. طبق شکل ۳، الکترودها در مناطق F۳، F۴، P۷، P۸، O۱، O۲، T۷، T۸، C۳ و C۴ بر اساس استاندارد بین المللی ۱۰-۲۰ نصب گردید (۲۷). داده های



شکل ۵: نتایج مربوط به مقایسه متغیرهای NASA-TLX در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین در کنترلرها (n = ۱۴). بار ذهنی و فکری (MD)، بار فیزیکی (PD)، فشار زمانی (TD)، میزان تلاش و کوشش (۲۱)، عملکرد و کارایی (PR)، احساس دلسردی و ناکامی (FR) و نمره خام بارکاری (RTLX)

اسمیرنوف مورد ارزیابی قرار گرفت. سطح معنی‌داری در تحلیل داده‌ها کمتر از ۰/۰۵ در نظر گرفته شد و تجزیه و تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS۱۶ انجام گردید.

### یافته‌ها

میانگین سنی افراد شرکت‌کننده در این مطالعه ۴/۶۳ ± ۳۸/۹۳ سال و میانگین سابقه کاری افراد ۴/۴۵ ± ۱۶/۱۴ سال بود. نتایج حاصل از مقیاس فردی NASA-TLX بیانگر این است که بین نمره خام بارکاری در شرایط بارکاری بالا و شرایط بارکاری پایین تفاوت معنی‌دار وجود دارد (P < ۰/۰۰۱). بدین ترتیب که کنترلرها در شرایط بارکاری بالا سطح بالاتری از بارکاری در مقایسه با شرایط بارکاری پایین درک کردند (شکل ۵).

به منظور بررسی مقایسه میانگین توان مطلق تتای اندازه‌گیری شده در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین برای افراد مورد مطالعه از آزمون ویلکاکسون استفاده گردید. بین توان مطلق تتا در تمامی مناطق اندازه‌گیری شده در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین اختلاف معناداری وجود دارد (P < ۰/۰۵) (جدول ۱).

شدن قطعات زمانی قابل استفاده با حداقل میزان نویز، برنامه‌هایی تحت نرم‌افزار متلب نسخه ۲۰۱۳ نوشته شد. از طریق این برنامه‌ها بر روی داده‌های زمانی فاصله مزبور، آنالیز تبدیل سریع فوریه انجام گرفت و شاخص توان مطلق تتای سیگنال‌های EEG (۴-۸ هرتز) استخراج شد.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از SPSS نسخه ۱۶ و آمار توصیفی مانند شاخص‌های مرکزی میانگین توان مطلق تتای اندازه‌گیری شده در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین برای افراد مورد مطالعه از آزمون ویلکاکسون استفاده گردید. ارتباط بین توان مطلق تتا با سن و سابقه کاری نیز با استفاده از ضرایب همبستگی اسپیرمن بررسی شد.

با استفاده از شاخص‌های میانگین و انحراف معیار به توصیف داده‌های جمع‌آوری شده در هر اندازه‌گیری پرداخته شد. به منظور بررسی مقایسه میانگین توان مطلق تتای اندازه‌گیری شده در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین برای افراد مورد مطالعه از آزمون ویلکاکسون استفاده گردید. ارتباط بین توان مطلق تتا با سن و سابقه کاری نیز با استفاده از ضرایب همبستگی اسپیرمن بررسی شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-

جدول ۱: میانگین مقادیر توان مطلق تتا در مناطق مغزی در کنترلرها و مقایسه این شاخص در شرایط بارکاری بالا و پایین

P-value	انحراف معیار $\pm$ میانگین		ناحیه مغزی
	بارکاری پایین	بارکاری بالا	
۰/۰۱۴	۴/۳۴ $\pm$ ۲/۴۶	۴/۹۳ $\pm$ ۲/۴۸	F۳
۰/۰۰۱	۴/۳۴ $\pm$ ۲/۰۶	۴/۹۵ $\pm$ ۲/۶۰	F۴
۰/۰۰۱	۱/۲۹ $\pm$ ۰/۸۴	۱/۴۷ $\pm$ ۱/۰۵	P۷
۰/۰۰۱	۲/۴۸ $\pm$ ۱/۲۶	۲/۲۹ $\pm$ ۱/۳۹	P۸
۰/۰۰۱	۲/۰۲ $\pm$ ۱/۴۵	۲/۵۷ $\pm$ ۱/۸۰	O۱
۰/۰۰۱	۲/۴۸ $\pm$ ۱/۴۶	۳/۳۷ $\pm$ ۲/۶۳	O۲
۰/۰۰۲	۱/۱۲ $\pm$ ۰/۵۶	۰/۲۰ $\pm$ ۰/۸۵	T۷
۰/۰۰۱	۲/۷۲ $\pm$ ۱/۶۴	۲/۸۹ $\pm$ ۱/۳۴	T۸
۰/۰۰۱	۲/۷۳ $\pm$ ۱/۴۵	۳/۲۷ $\pm$ ۲/۰۱	C۳
۰/۰۰۱	۳/۰۲ $\pm$ ۱/۴۴	۳/۴۵ $\pm$ ۱/۶۵	C۴

اختلاف در سطح  $P < ۰/۰۵$  معنی دار است.

جدول ۲: نتایج آزمون همبستگی بین سن با مقادیر توان مطلق تتا در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین در مناطق مغزی

P-value	r		ناحیه مغزی
	بارکاری پایین	بارکاری بالا	
۰/۳۱۶	۰/۰۳۹*	۰/۲۸۹	F۳
۰/۳۶۳	۰/۵۲۹	۰/۲۶۴	F۴
۰/۲۶۶	۰/۴۱۹	۰/۳۱۹	P۷
۰/۲۰۸	۰/۳۵۴	۰/۳۵۹	P۸
۰/۰۸۰	۰/۶۵۶	۰/۴۸۳	O۱
۰/۲۲۹	۰/۶۶۴	۰/۳۴۳	O۲
۰/۶۷۸	۰/۶۴۵	۰/۱۲۲	T۷
۰/۳۰۳	۰/۲۷۳	۰/۲۹۷	T۸
۰/۰۵۲	۰/۱۷۶	۰/۵۲۹	C۳
۰/۱۶۸	۰/۲۴۲	۰/۳۹۰	C۴

\*اختلاف در سطح  $P < ۰/۰۵$  معنی دار است

تتا در سایر مناطق اندازه‌گیری شده همبستگی آماری معناداری مشاهده نشد.

### بحث

در مطالعه حاضر ارزیابی بارکاری ذهنی در بین کنترلرهای مرکز کنترل ترافیک هوایی با استفاده از آنالیز سیگنال‌های EEG مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج

طبق جداول ۲ و ۳، آزمون اسپیرمن نشان داد که بین سن و توان مطلق تتا در سمت چپ فرونتال در شرایط بارکاری بالا همبستگی مثبتی از لحاظ آماری وجود دارد ( $r = ۰/۵۶۴$  و  $P < ۰/۰۵$ ). همچنین بین سابقه کار و توان مطلق تتا در ناحیه فوق در شرایط بارکاری بالا همبستگی مثبتی از لحاظ آماری وجود دارد ( $r = ۰/۵۷۵$  و  $P < ۰/۰۵$ ). لازم به ذکر است که بین سن و سابقه کار و توان مطلق

جدول ۳: نتایج آزمون همبستگی بین سابقه کار با مقادیر مطلق تنا در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین در مناطق مغزی

ناحیه مغزی	R		P-value	
	بارکاری بالا	بارکاری پایین	بارکاری بالا	بارکاری پایین
F۳	۰/۶۰۷	۰/۳۰۶	۰/۰۲۱*	۰/۲۸۷
F۴	۰/۰۱۸	۰/۲۳۲	۰/۹۵۲	۰/۴۲۵
P۷	۰/۱۲۸	۰/۲۳۰	۰/۶۶۲	۰/۴۲۹
P۸	۰/۲۳۵	۰/۴۱۵	۰/۴۲۰	۰/۱۴۰
O۱	۰/۰۲۷	۰/۴۸۰	۰/۹۲۸	۰/۰۸۳
O۲	-۰/۰۳۹	۰/۳۰۵	۰/۹۰۰	۰/۲۸۹
T۷	۰/۰۵۱	۰/۰۷۱	۰/۸۶۳	۰/۸۱۰
T۸	۰/۱۷۳	۰/۱۸۸	۰/۵۵۵	۰/۵۲۰
C۳	۰/۳۰۸	۰/۴۷۷	۰/۲۸۵	۰/۰۸۴
C۴	۰/۲۵۲	۰/۳۷۳	۰/۳۸۴	۰/۱۸۸

\*اختلاف در سطح  $P < 0.05$  معنی دار است

شدت به مناطق فرونتال و شبکه فرونتال-پیشانی وابسته هستند و یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده بارکاری ذهنی فعال شدن نواحی فرونتال مغز می‌باشد. فعالیت تنا فرونتال با افزایش تلاش ذهنی، سختی وظایف و اثر زمان روی وظیفه افزایش قابل توجهی دارد (۲۶-۲۸). این نوع از فعالیت تنا در مناطق فرونتال در وظایفی که نیازمند توجه و تمرکز طولانی‌مدت می‌باشند، حاکی از فعالیت قشر کمربندی قدامی می‌باشد. این منطقه قشری به‌عنوان بخشی از شبکه قدامی مغز می‌باشد که به مکانیسم‌های کنترل توجه حساس می‌باشد و توسط عملکرد وظایف شناختی پیچیده فعال می‌شود، بنابراین عملکرد وظایف نیازمند تلاش ذهنی قابل توجه در وظایفی با نیازهای زیاد در شرایط بارکاری بالا، مناطق فرونتال را درگیر می‌نماید (۳۲). علاوه بر این افزایش فعالیت تنا در مناطق فرونتال در شرایط بارکاری بالا با توجه به اینکه شغل کنترلر دارای نیازهای چندوظیفه‌ای می‌باشد، قابل توجه می‌باشد (۵). مطالعات بسیاری افزایش فعالیت تنا فرونتال را با افزایش بارکاری حافظه فعال برای انواع زیادی از وظایف مرتبط با حافظه فعال گزارش نموده‌اند (۲۹). همچنین فعالیت تنا فرونتال با وظایفی که نیازمند افزایش توجه هستند، مرتبط می‌باشد (۳۰). افزایش فعالیت تنا در

نشان‌دهنده این است که توان مطلق تنا با در نظر گرفتن نواحی مختلف مغزی به تغییرات بارکاری در کنترل ترافیک هوایی دارای حساسیت می‌باشد، بدین ترتیب که توان مطلق تنا در تمامی مناطق اندازه‌گیری شده در شرایط بارکاری بالا و بارکاری پایین اختلاف معنی‌دار را نشان داد. همچنین، نتایج ارزیابی فردی به روش NASA-TLX میزان بارکاری بیشتر را در شرایط بارکاری بالا نسبت به شرایط بارکاری پایین نشان داد.

در خصوص ارزیابی بارکاری ذهنی به‌صورت فردی، در شرایط بارکاری بالا دو بعد بار ذهنی و فکری و میزان تلاش و کوشش مهم‌ترین ابعاد از دیدگاه کنترلرها بودند. با توجه به اینکه شغل کنترل ترافیک هوایی مستلزم مجموعه‌ای از وظایف شناختی پیچیده و نیازهای شغلی گوناگون می‌باشد، بعد بار ذهنی و فکری از دیدگاه کنترلرها دارای اهمیت بیشتری می‌باشد. به‌علاوه، از جمله عواملی که می‌تواند بار ذهنی و فکری بالا در کنترلرهای ترافیک هوایی را توجه نماید، افزایش توجه، تمرکز ذهنی و پردازش سریع اطلاعات در حین انجام وظایف می‌باشد. نتایج بیانگر افزایش فعالیت تنا به‌ویژه در مناطق فرونتال در شرایط بارکاری بالا نسبت به شرایط بارکاری پایین می‌باشد. کارکردهای اجرایی مانند حافظه فعال به

### نتیجه گیری

به طور کلی روش های ارزیابی های فیزیولوژیکی مانند EEG شاخص مفیدی از بارکاری ذهنی در سطوح مختلف بارکاری فراهم می آورند. بنابراین به عنوان راهنمایی برای پیشرفت استراتژی های مورد نیاز و ضروری برای طراحی تعامل سیستم های پیچیده انسان-ماشین می باشند و به ارزیابی معیارهای عملکرد انسان کمک می کنند.

لازم به ذکر است که در این مطالعه ارزیابی بارکاری ذهنی در شبیه ساز کنترل ترافیک هوایی مبتنی بر مؤلفه های کامل مربوط به فاکتورهای بار وظیفه در این شغل صورت گرفت. با توجه به اینکه مشارکت در فرایند هشدار، ارائه سرویس در شرایط بحرانی و اقدامات مواجهه ترافیک هوایی با وضعیت اضطراری نیز از وظایف کنترلر و عوامل مهم تأثیرگذار بر بارکاری آن ها می باشند، پیشنهاد می گردد که مطالعات بیشتری پیرامون ارزیابی بارکاری کنترلرها با تمرکز بر این عوامل نیز صورت بگیرد. دیگر محدودیت این مطالعه تعداد کم کنترلرهای ترافیک هوایی بود. مطالعات آینده با استفاده از حجم نمونه بزرگتر می تواند برای اهداف اعتبارسنجی و تعمیم پذیری استفاده شود. علاوه بر این، ارزیابی بارکاری ذهنی با استفاده از باندهای فرکانسی دیگر و روش های متنوع پردازش سیگنال های EEG مانند ویولت و آنتروپی شنون نیز در مطالعات آتی پیشنهاد می شود.

### تشکر و قدردانی

این پژوهش به عنوان بخشی از پایان نامه دانشجویی کارشناسی ارشد ارگونومی جهت ارائه در گروه مهندسی بهداشت حرفه ای دانشگاه علوم پزشکی تهران اجرا گردیده است. نویسندگان بر خود لازم می دانند از پرسنل محترم مرکز کنترل ترافیک هوایی تهران مراتب سپاس و تشکر خود را به جا آورند.

مناطق فرونتال با افزایش نیازهای وظیفه در بررسی های روی بار حافظه فعال، وظایف نیازمند جستجوی بصری و وظایفی که دارای ویژگی های متعدد می باشند، انجام گرفته است (۲۶). فیرکلاف و همکاران علاوه بر مناطق فرونتال، افزایش فعالیت تتا را در پاسخ به افزایش نیازهای وظیفه در مناطق آهیانه گزارش نموده اند (۲۸).

بروکینز و همکاران (۱۹۹۶) در مطالعه خود در شبیه ساز کنترل ترافیک هوایی با افزایش سختی وظایف، افزایش فعالیت تتا را در مناطق مرکزی، آهیانه، سمت راست فرونتال و سمت راست آهیانه گزارش نمودند. همچنین افزایش بارکاری با افزایش فعالیت نسبی باند تتا در ارتباط بود (۲۱). در مطالعه ای دیگر، پستما و همکاران (۲۰۰۵) در شبیه ساز کنترل ترافیک هوایی شبیه سازی شده افزایش قدرت تتا در ناحیه فرونتال را در وظایف کنترل ترافیک هوایی مشاهده نمودند (۲۲).

در پژوهش حاضر نتایج آزمون همبستگی نیز نشان داد که با افزایش سن و سابقه کاری توان مطلق تتا در شرایط بارکاری بالا در ناحیه چپ فرونتال افزایش می یابد. متأسفانه مطالعات اندکی پیرامون نقش سن و سابقه کار روی فعالیت باندهای فرکانسی در نواحی مغزی انجام شده است. دوسالت و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه ای به مقایسه پارامترهای EEG مبتنی بر ارزیابی های فیزیولوژیکی بارکاری در دو گروه از خلبانان تازه کار و متخصص پرداختند. نتایج مطالعه آن ها نشان داد که بین فعالیت تتا در مناطق فرونتال با سابقه کاری تفاوت معنی دار وجود ندارد (۲۷). در مطالعه ای دیگر امسی ایوی و همکاران در سال (۲۰۰۱) به بررسی سیگنال های نوروفیزیولوژیک حافظه فعال در بزرگسالان با روش EEG پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که فعالیت تتا در خط وسط پیشانی با افزایش وظیفه مشکل در افراد جوان تر افزایش می یابد و به میزان کمتر در افراد میانسال افزایش می یابد، در حالی که افزایشی در افراد مسن تر یافت نشد (۳۱).

## REFERENCES

1. Ayaz, H., Willems, B., Bunce, S., Shewokis, P. A., Izzetoglu, K., Hah, S., Deshmukh, A., Onaral, B. (2010). Cognitive workload assessment of air traffic controllers using optical brain imaging sensors. In T. Marek, W. Karwowski & V. Rice (Eds.), *Advances in Understanding Human Performance: Neuroergonomics, Human Factors Design, and Special Populations* (pp. 21-32): FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
2. Gopher D, Donchin E. *Workload: An examination of the concept*. 1986.
3. Stein ES. *Air traffic controller workload: An examination of workload probe*. 1985.
4. Parasuraman R, Wilson GF. Putting the brain to work: neuroergonomics past, present, and future. *Hum Factors*. 2008;50(3):468-74.
5. Hsu B-W, Wang M-JJ, Chen C-Y, Chen F. Effective indices for monitoring mental workload while performing multiple tasks. *Percept Mot Skills*. 2015;121(1):94-117.
6. Cooper GE, Harper Jr RP. The use of pilot rating in the evaluation of aircraft handling qualities. DTIC Document; 1969.
7. Sheridan TB, Simpson R. *Toward the definition and measurement of the mental workload of transport pilots*. Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology; 1979.
8. Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in Psychology*. 1988;52:139-83.
9. Parasuraman R. *Neuroergonomics: Research and practice*. *Theor Issues Ergon Sci*. 2003;4(1-2):5-20.
10. Athènes S, Averty P, Puechmorel S, Delahaye D, Collet C. ATC complexity and controller workload: Trying to bridge the gap. *Proceedings of the International Conference on HCI in Aeronautics*. 2002:56-60.
11. Sammer G, Blecker C, Gebhardt H, Bischoff M, Stark R, Morgen K, et al. Relationship between regional hemodynamic activity and simultaneously recorded EEG-theta associated with mental arithmetic-induced workload. *Hum Brain Mapp*. 2007;28(8):793-803.
12. Averty P, Collet C, Dittmar A, Athènes S, Vernet-Maury E. Mental workload in air traffic control: an index constructed from field tests. *Aviat Space Environ Med*. 2004;75(4):333-41.
13. Gevins A, Smith ME. Neurophysiological measures of cognitive workload during human-computer interaction. *Theor Issues Ergon Sci*. 2003;4(1-2):113-31.
14. Shou G, Ding L, editors. *Frontal theta EEG dynamics in a real-world air traffic control task*. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE; 2013: IEEE.
15. McEvoy L, Smith M, Gevins A. Test-retest reliability of cognitive EEG. *Clin Neurophysiol*. 2000;111(3):457-63.
16. Costa G. *Occupational stress and stress prevention in air traffic control*: International Labour Office Geneva; 1996.
17. Kamzanova A, Matthews G, Kustubayeva A, Jakupov S. EEG indices to time-on-task effects and to a workload manipulation (cueing). *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2011;80:19-22.
18. Ward LM. Synchronous neural oscillations and cognitive processes. *Trends Cogn Sci*. 2003;7(12):553-9.
19. Sauseng P, Klimesch W, Freunberger R, Pecherstorfer T, Hanslmayr S, Doppelmayr M. Relevance of EEG alpha and theta oscillations during task switching. *Exp Brain Res*. 2006;170(3):295-301.
20. Yamada F. Frontal midline theta rhythm and eyeblinking activity during a VDT task and a video game: useful tools for psychophysiology in ergonomics. *Ergonomics*. 1998;41(5):678-88.
21. Brookings JB, Wilson GF, Swain CR. Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control. *Biological psychology*. 1996;42(3):361-77.
22. Postma MA, Schellekens J, Hanson EK, Hoogeboom PJ. Fz theta divided by Pz alpha as an index of task load during a PC-based air traffic control simulation. Shaker Publishing, Maastricht, The Netherlands; 2005. p. 1-5.
23. Scerbo MW, Freeman FG, Mikulka PJ, Parasuraman R, Di Nocero F, Prinzel III LJ. *The efficacy of psychophysiological measures for implementing adaptive technology*: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center; 2001.

24. Miyake S, Kumashiro M. Subjective mental workload assessment technique, an introduction to NASA-TLX and SWAT and a proposal of simple scoring methods. 1993.
25. Mohammadi M, Mazloumi A, Kazemi Z, Zeraati H. Evaluation of mental workload among ICU ward's nurses. *Health Promot Perspect*. 2015;5(4):280.
26. Holm A. Developing neurophysiological metrics for the assessment of mental workload and the functional state of the brain. 2010.
27. Dussault C, Jouanin J-C, Philippe M, Guezennec C-Y. EEG and ECG changes during simulator operation reflect mental workload and vigilance. *Aviat Space Environ Med*. 2005;76(4):344-51.
28. Fairclough SH, Venables L, Tattersall A. The influence of task demand and learning on the psychophysiological response. *Int J Psychophysiol*. 2005;56(2):171-84.
29. Michels L, Moazami-Goudarzi M, Jeanmonod D, Sarnthein J. EEG alpha distinguishes between cuneal and precuneal activation in working memory. *Neuroimage*. 2008;40(3):1296-310.
30. Doppelmayr M, Finkenzeller T, Sauseng P. Frontal midline theta in the pre-shot phase of rifle shooting: differences between experts and novices. *Neuropsychologia*. 2008;46(5):1463-7.
31. McEvoy LK, Pellouchoud E, Smith ME, Gevins A. Neurophysiological signals of working memory in normal aging. *Cogn Brain Res*. 2001;11(3):363-76.