

مقاله پژوهشی

بررسی اثر غلظت هوا (CO₂) معماری فضاهای درمانی بر احساس خستگی و سازگاری حرارتی کارکنان

کارن فتاحی*^۱، مریم بیگی^۲، علی عمرانی پور^۳

۱- گروه معماری، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران. (نویسنده مسئول)

karenfatahi@yahoo.com

۲- گروه معماری، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران.

Beigimaryam35@gmail.com

۳- دانشیار، دانشکده معماری، دانشگاه هنرهای زیبا، دانشگاه تهران و دانشگاه کاشان، ایران.

a.omrani@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۴/۳/۲۸]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۴/۱/۳]

چکیده

کیفیت پایین هوا و سطوح بالای CO₂ در فضاهای درمانی به دلیل تهویه ناکافی و شرایط نامناسب، آسایش حرارتی و سلامت کارکنان را تهدید می‌کند. معماری مناسب این فضاها با طراحی بهینه تهویه، نورگیری و چیدمان، می‌تواند از تجمع CO₂ جلوگیری کرده و خستگی و کاهش عملکرد کارکنان را کاهش دهد. از این‌رو هدف پژوهش حاضر بررسی نقش غلظت بالای CO₂ بر احساس خستگی و سازگاری حرارتی کارکنان فضاهای درمانی است. مطالعه حاضر به روش آزمایشگاهی در یک درمانگاه تخصصی در شهر ایلام انجام گرفت. جامعه آماری این پژوهش شامل ۲۰ نفر از کارکنان فضاهای درمانی است که در یک آزمایشگاه در زیرزمین فعالیت داشتند. گروه‌های شرکت‌کننده پس از تقسیم به صورت تصادفی در معرض دو سطح CO₂ با مقادیر ۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی قرار گرفتند، هم‌زمان مقادیر ضربان قلب، وضعیت آسایش حرارتی (بر اساس پرسشنامه استانداردهای ASHRAE آمریکا)، احساس خستگی (بر اساس پرسشنامه استاندارد MFI) ثبت گردید. سپس داده‌ها از طریق تحلیل کوواریانس چند متغیره، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد غلظت بالای CO₂ (۱۸۰۰ PPM بدون تهویه در مقابل ۱۱۰۰ PPM با تهویه) بر احساس خستگی عمومی، جسمی و ذهنی و کاهش فعالیت و انگیزه کارکنان تأثیر معنی‌داری دارد (p<۰/۰۵). همچنین عدم سازگاری حرارتی کارکنان حین فعالیت کاری، بر بروز خستگی عمومی، جسمی و ذهنی تأثیری معنی‌داری دارد (p<۰/۰۵). افزایش میزان ضربان قلب کارکنان بر خستگی عمومی کاهش فعالیت و انگیزه تأثیر معنی‌داری دارد (p<۰/۰۵). همچنین اثر متقابل این فاکتورها معنادار نیست (p>۰/۰۵)؛ بنابراین مهم‌ترین عامل بین سطوح خستگی متغیر خستگی عمومی است و پس از آن خستگی جسمی و ذهنی هستند. با استناد به مقادیر CO₂ در استاندارد اشری آمریکا و نتایج حاصل از این پژوهش، غلظت بالای CO₂ (۱۸۰۰ PPM در مقابل ۱۱۰۰ PPM) در محیط‌های درمانی می‌تواند بر احساس خستگی و سازگاری حرارتی افراد اثرگذار باشد و در بلند مدت سبب بروز آسیب جدی به سلامت افراد در فضاهای درمانی گردد. همچنین نتایج نشان داد غلظت بالای CO₂ سبب عدم سازگاری حرارتی، افزایش ضربان قلب و بروز خستگی عمومی، جسمی و ذهنی است و باعث کاهش فعالیت و انگیزه کارکنان می‌شود. ایجاد تهویه مطبوع و کنترل مداوم کیفیت هوا در محل کار افراد جهت ارتقاء عملکرد افراد و حفظ سلامت کارکنان فضاهای درمانی ضروری است.

واژگان کلیدی: CO₂، غلظت هوا، سازگاری حرارتی، ضربان قلب، معماری فضاهای درمانی.

۱- مقدمه

آسایش حرارتی به‌عنوان شرایطی از ذهن تعریف می‌شود که در آن رضایت از محیط حرارتی ابراز می‌شود که به عوامل متعددی بستگی دارد. این عوامل شامل دمای هوا، رطوبت، سرعت باد، میانگین دمای تابشی، گرمای متابولیک و نرخ لباس می‌شوند (Karimi, Bayat, Mohammadzadeh, Mohajerani & Yeganeh, 2023). تلاش‌ها برای کاهش مصرف انرژی برای گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع در محیط‌های مختلف داخلی ارتباط نزدیکی با آسایش حرارتی انسان دارد (Liu, Zhang & Lai, 2023). وضعیت انرژی عمیقاً با تغییرات اقلیمی مرتبط است و نقش مهمی در توسعه پایدار انسانی دارد. مصرف انرژی ساختمان، به‌ویژه برای اهداف گرمایش و سرمایش، بخش قابل توجهی از تقاضای کلی انرژی را تشکیل می‌دهد (Energy Information Administration, 2016; Building Energy Research Center, Tsinghua University, 2020). بنابراین، ایجاد پارامترهای محیطی حرارتی داخلی مناسب، برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها بسیار مهم است. با این حال، اغلب تفاوت‌های قابل توجهی در نحوه واکنش افراد به یک محیط داخلی وجود دارد (Wu et al., 2020; Yang et al., 2014). محیط‌های داخلی راحت می‌تواند بر سلامت، رفاه و پایداری تأثیر بگذارد که از عناصر کلیدی اهداف توسعه پایدار هستند (Zhou et al., 2023). برای تسهیل تحقیقات بین‌المللی آسایش حرارتی، ایجاد مجموعه داده‌های جامع و دقیق در تحقیقات میدانی آسایش حرارتی ضروری است (Yang et al., 2023).

ایجاد محیطی با آسایش حرارتی مطلوب در محیط داخلی تأثیر مثبتی بر شادی، رضایت و راندمان کاری کاربران دارد، بهبود رضایت حرارتی در میان کارکنان، بهره‌وری، هوشیاری، توجه و کارایی آن‌ها را افزایش می‌دهد و درعین حال شکایات و غیبت را کاهش می‌دهد (Zheng et al., 2024). سیستم مراقبت‌های بهداشتی یک صنعت حیاتی و پویا است که بخش‌های مختلفی را در کشورهای مختلف در بر می‌گیرد. بیمارستان‌ها نقش محوری در این صنعت ایفا می‌کنند. هدف بیمارستان‌ها ارائه خدمات پزشکی ایمن و مؤثر به بیماران است. با این وجود، گاهی اوقات برخی از بیمارستان‌ها منشأ آسیب هستند و با وجود پیشرفت تکنولوژی و مراقبت، خطاهای پزشکی عوارض و مرگومیر را به دنبال دارد و هزینه‌های زیادی را بر بیماران و جامعه تحمیل می‌کند. با توجه به این واقعیت، در دنیای امروز، تضمین ایمنی بیماران و جلوگیری از وقوع خطاهای پزشکی و حوادث نامطلوب در مراکز بیمارستانی یک موضوع جهانی است (Cohen, 2017; Garroute-Orgeas et al., 2012). آسایش حرارتی برای کارکنان مراقبت‌های بهداشتی ضروری است تا محیط کاری مساعد را حفظ کنند (Yuan et al., 2022). کارکنان مراقبت‌های بهداشتی، برای مراقبت از بیماران معمولاً شبانه‌روز کار می‌کنند (Mirmohammadi et al., 2011). ساختمان‌های بیمارستان باید انواع محیط‌های داخلی مناسب را برای پاسخگویی به نیازهای متنوع بیماران و کارکنان فراهم کنند. در این میان، آسایش حرارتی یک معیار طراحی حیاتی برای تضمین کیفیت بالای محیط داخلی است که به‌طور قابل توجهی بر روند بهبودی بیماران و رفاه کادر پزشکی تأثیر می‌گذارد (Chen et al., 2020).

حجم کار که به‌عنوان یک عامل استرس‌زای اصلی در کارکنان مراقبت‌های بهداشتی شناخته می‌شود، موضوعی چندوجهی است که از تأثیر متقابل عناصر مختلف ناشی می‌شود (Wickens, 2008). حجم کار دارای ابعاد مختلفی مانند خواسته‌های ذهنی، خواسته‌های فیزیکی، خواسته‌های زمانی، پیچیدگی کار است (Carswell et al., 2005; Wilson et al., 2011). بنابراین حجم کاری یک عامل کلیدی تعیین‌کننده سطوح استرس و خستگی در میان کارکنان است (MacDonald, 2003). خستگی می‌تواند منجر به چندین پیامد نامطلوب در مشاغل مختلف شود. برخی از مهم‌ترین پیامدهای خستگی شامل کاهش عملکردهای شناختی مانند توجه، تمرکز و زمان واکنش، تغییرات خلقی منفی، کاهش فعالیت‌های بدنی، کاهش عملکرد و خطاها و آسیب‌های انسانی است (Ulises et al., 2016; Bazazan et al., 2019). در محیط‌های بیمارستانی، خستگی می‌تواند باعث افزایش خطای انسانی در پرسنل مراقبت‌های بهداشتی شود و در نتیجه سلامت و ایمنی آن‌ها و بیمارانشان را به خطر بیندازد، یکی از عواملی که خستگی را در محیط کار افزایش می‌دهد، بار کاری ذهنی کارکنان است (Alsayed et al., 2022). یکی دیگر از عواملی که باعث افزایش خستگی می‌شود می‌توان به دمای بالای هوا اشاره کرد

(Fujii et al., 2015). لینگ و همکاران در پژوهش به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین عامل مؤثر بر عملکرد کاری آسایش حرارتی (۰/۶۴۸) و پس از آن خستگی (۰/۵۱۱) است (Liang et al., 2024). همین‌طور، فن و همکاران در پژوهشی به بررسی روابط بین عملکرد کار، دمای داخل ساختمان، احساس حرارتی و پارامترهای فیزیولوژیکی پرداختند و نتایج نشان داد دمای داخل ساختمان به‌طور قابل توجهی بر عملکرد کار تأثیر می‌گذارد بنابراین عملکرد بهینه در شرایط کمی خنک و رضایت حرارتی بالاتر به دست می‌آید (Fan et al., 2023).

حفظ کیفیت مطلوب هوای داخلی در مراکز بهداشتی برای سلامت و ایمنی بیماران و کارکنان مراقبت‌های بهداشتی ضروری است. نظارت و مدیریت منظم کیفیت هوا، از جمله سطوح CO₂، گام‌های حیاتی برای اطمینان از محیطی سالم برای بهبودی و درمان مؤثر است (Farhadi et al., 2024). افزایش سطح CO₂ داخلی باعث ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی، از جمله افزایش CO₂ خون، تغییر تغییرات ضربان قلب و جریان خون محیطی می‌شود. این اثرات با گزارش‌های ذهنی کاهش هوشیاری و ناراحتی مرتبط است (Vehviläinen et al., 2016). ژنگ و همکاران در پژوهش خود به این نتیجه دست یافتند که افزایش CO₂ با افزایش دامنه تنفس، تغییرپذیری ضربان قلب در طول انجام وظایف مرتبط است (Zhang et al., 2021)؛ بنابراین به نظر می‌رسد که تغییر در غلظت CO₂ منجر به تغییر تنفسی شده و غلظت بالای CO₂ باعث افزایش تنفس و دمای بدن می‌شود (Kim et al., 2018). از آنجایی که CO₂ بالا می‌تواند سیستم تنفسی را تحریک کند، بنابراین منجر به افزایش سرعت متابولیسم و افزایش تبادل حرارت با محیط می‌شود و در نتیجه بر آسایش حرارتی تأثیر می‌گذارد (Gauthier et al., 2015). ماولا و همکاران در پژوهش خود به این نتیجه دست یافتند که نرخ تهویه پایین‌تر و سطوح CO₂ بالاتر (سطح CO₂ 2260 ppm) تأثیر منفی جزئی بر وظایف شناختی خاص دارد و بار کاری و خستگی درک شده را افزایش می‌دهد (Maula et al., 2017). عدم توجه به استانداردهای بهداشتی در اماکن درمانی، تغییر کاربری ساختمان‌ها از سایر کارکردها به فضاهای درمانی به دلیل ازدحام شهرها و مراجعین سبب استفاده غیرمطلوب از فضاهایی شلوغ، فاقد تهویه کافی، استفاده از زیرزمین‌های فاقد نورگیری شده است که منجر به عدم احساس آسایش حرارتی و سلامت کارکنان می‌شود. را به خطر می‌اندازد. بسیاری از فضاهای درمانی ایلام به دلیل شلوغی، تغییر کاربری ساختمان‌ها، تغییر عملکرد فضاها، تهویه ناکافی و حضور در زیرزمین‌های فاقد نورگیری، آسایش حرارتی و سلامت کارکنان این اماکن در خطر است. از این‌رو هدف مطالعه حاضر بررسی نقش غلظت بالای CO₂ موجود در هوا بر بروز احساس خستگی و عدم سازگاری حرارتی کارکنان در این فضاهای درمانی است.

۲- مرور مبانی نظری و پیشینه

۲-۱- غلظت بالای CO₂ و احساس خستگی کارکنان فضاهای درمانی

خستگی یک وضعیت رایج در بین جمعیت شاغل است. این بیماری به‌طور گسترده به‌عنوان پیامد اجتناب‌ناپذیر کار حرفه‌ای در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که نیازهای جسمی یا روانی کار از ظرفیت سازگاری بدن فراتر می‌رود و زمان کافی برای بهبودی وجود ندارد کارمندان ممکن است روز بعد با وجود خستگی به وظایف خود بازگردند (Kulczycka et al., 2016; Ho et al., 2013). گرچه خستگی پدیده‌ای شایع است، ارائه یک تعریف جهان‌شمول از آن در متون علمی دشوار است. این دشواری عمدتاً ناشی از ماهیت چندبعدی و پیچیده خستگی است. از دیدگاه فیزیولوژیکی و روانی، خستگی را می‌توان نوعی مکانیسم دفاعی-تنظیمی در فعالیت‌های انسانی دانست. این نقش دفاعی زمانی آشکار می‌شود که تداوم فعالیت از ظرفیت روان‌تنی (سایکوفیزیک) فرد فراتر رود. به‌طور کلی، خستگی به حالت درونی اطلاق می‌شود که با کاهش موقتی توانایی انجام کار یا فعالیت‌های دیگر در پی تلاش قبلی همراه است (Ramdan, 2019; Chen et al., 2014). عوامل تعیین‌کننده‌ی میزان بروز و شدت خستگی به ظرفیت بدن (سلامتی، سطح فعالیت، خواب)، محیط (سطح سر و صدا، رطوبت، دما) و زمینه‌های روانی مانند میزان علاقه به فعالیت انجام شده، استرس، ناامیدی‌ها مربوط

می‌شود (Eldevik et al., 2013). کار در حرفه‌های پزشکی به‌ویژه مستعد ایجاد خستگی است. این حوزه به دلیل ماهیت سازمانی و ساختاری خود، مملو از عوامل استرس‌زای گوناگون است. علاوه بر این، تعامل مداوم با افراد نیازمند، دردمند یا بحران‌زده، فشار روانی و جسمی مضاعفی بر کارکنان این بخش وارد می‌کند (Kulczycka et al., 2016)؛ بنابراین یکی از عواملی که بر خستگی تأثیر بسزایی دارد غلظت CO₂ است (Liu et al., 2017).

۲-۲- غلظت بالای CO₂ و سازگاری حرارتی کارکنان فضاهای درمانی

ساختمان‌های بیمارستانی عمدتاً با هدف اسکان بیماران طراحی می‌شوند که شرایط سلامت متفاوت و نیازهای محیطی ویژه‌ای دارند. این ملاحظات، الزامات خاصی را در طراحی فضاهای داخلی ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، تأمین محیطی ایمن و کارآمد برای کادر درمان نیز از ضروریات طراحی این ساختمان‌ها محسوب می‌شود. همین ویژگی‌های منحصر به فرد، بیمارستان‌ها را به یکی از پرمصرف‌ترین انواع ساختمان‌ها در مقایسه با سازه‌های تجاری و مسکونی تبدیل کرده است (Yuan et al., 2022). بر اساس استانداردهای منتشر شده توسط انجمن مهندسان گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا (ASHRAE, 2019) فضاهای داخلی بیمارستان‌ها به بخش‌های عملکردی متعددی از جمله اتاق‌های جراحی و مراقبت‌های ویژه، بخش‌های پرستاری، واحدهای تشخیصی و درمانی، بخش‌های استریلیزاسیون و تأمین تجهیزات، فضاهای اداری و خدماتی تقسیم می‌شود. هر یک از این بخش‌ها دارای الزامات خاصی در زمینه شرایط محیطی هستند که این امر منجر به پیچیدگی‌های منحصر به فرد در طراحی بیمارستان‌ها می‌گردد. با توجه به ماهیت حساس جمعیت تحت پوشش بیمارستان‌ها، ایجاد محیطی سالم و مطلوب از دو جنبه حائز اهمیت است: نقش حیاتی در آرامش روانی بیماران، افزایش کارایی و اثربخشی کارکنان درمانی. مطالعات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی شرایط محیطی در بیمارستان‌ها می‌تواند هزینه‌های مرتبط با بیماری‌های منتقله از طریق هوا را بین ۹ تا ۲۰ درصد کاهش دهد (Singer, 2009). این یافته‌ها اهمیت توجه ویژه به کیفیت محیط داخلی در مراکز درمانی را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

جدول ۱: پیشینه‌شناسی

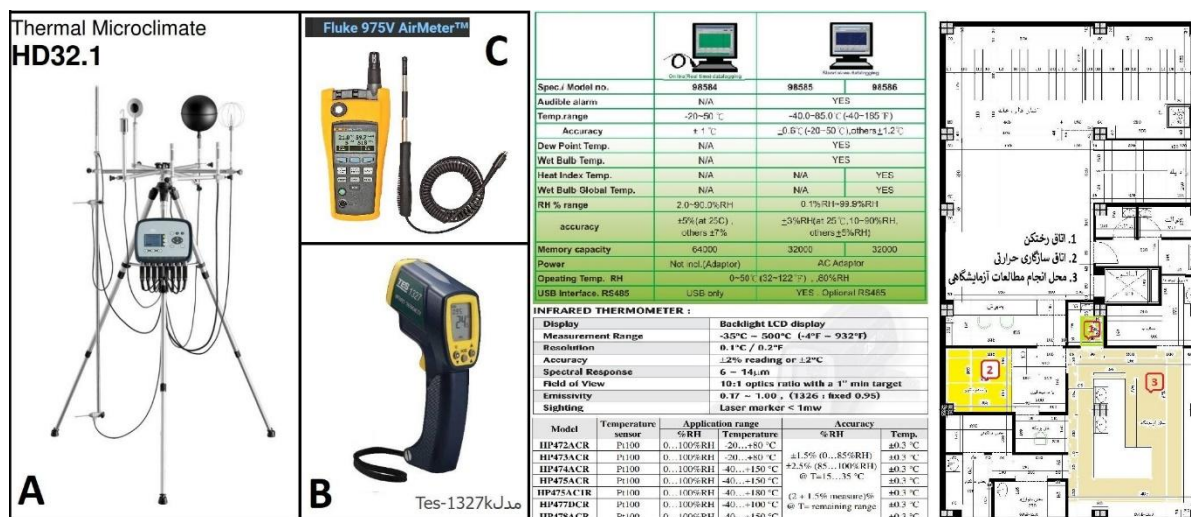
نویسنده	عنوان	نتایج
Zhanget al., 2021	Physiological responses to elevated carbon dioxide concentration and mental workload during performing MATB tasks	در مواجهه با CO ₂ بالا و حجم کار ذهنی، برای انجام وظیفه به تلاش بیشتری نیاز است.
Zhang et al., 2020	The effects of elevated carbon dioxide concentration and mental workload on task performance in an enclosed environmental chamber	عملکرد وظیفه با افزایش غلظت CO ₂ از ۱۵۰۰ ppm به ۳۵۰۰ ppm کاهش می‌یابد. به‌طور کلی خستگی را افزایش می‌دهد.
Tu et al, 2021	Human responses to high levels of carbon dioxide and air temperature	قرار گرفتن در معرض ۳۰ درجه سانتی‌گراد در تمام سطوح CO ₂ باعث می‌شود که آزمودنی‌ها احساس گرمای ناخوشایندی داشته باشند و شدت بوی قوی‌تری را تجربه کنند، درحالی‌که افزایش تلاش ذهنی و شدت بیشتر علائم حاد سلامتی گزارش شد. همچنین افزایش CO ₂ از ۸۰۰۰ به ۱۲۰۰۰ ppm در تمام دماها باعث شد که افراد میزان بیشتری از سردرد، خستگی، آشفته‌گی و احساس افسردگی را گزارش کنند
GAUTHIER et al., 2015	Investigating the effect of CO ₂ concentration on reported thermal comfort	ارتباط بالقوه‌ای بین سطح CO ₂ در فضای داخلی و درک حرارتی ساکنین را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که غلظت بالای CO ₂

ممکن است مستقل از دمای محیط، بر آسایش حرارتی تأثیر بگذارد

علاوه بر این یک عامل مهم در افزایش کیفیت محیط داخلی در فضاهای درمانی می‌توان به آسایش حرارتی اشاره کرد (Fatahi et al., 2024). وقتی افراد از محیطی با دمای خاص به فضای دیگری با دمای متفاوت وارد می‌شوند، این تغییر دما به‌طور مستقیم بر احساس گرمایی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. تحقیقات نشان داده که دو پدیده مهم در این زمینه وجود دارد: شوک حرارتی: تغییر ناگهانی دما که باعث ناراحتی می‌شود و زمان تطبیق: مدت زمانی که بدن نیاز دارد تا با دمای جدید سازگار شود. این فرآیند تطبیق می‌تواند بر ترجیحات دمایی افراد اثر بگذارد. به‌عنوان مثال، وقتی بدن در حال سازگاری است، افراد ممکن است دمای پایین‌تری را درخواست کنند که این خود باعث افزایش مصرف انرژی می‌شود، به‌ویژه در روزهای گرم سال (de Souza et al., 2024). یک عامل تأثیرگذار بر سازگاری حرارتی میزان دی‌اکسید کربن (CO₂) است (Solano et al., 2021)؛ بنابراین حفظ استانداردهای کیفی هوای داخل فضاهای درمانی یکی از ارکان اساسی در تأمین سلامت بیماران و کادر پزشکی محسوب می‌شود. پایش مستمر پارامترهای کیفی هوا به‌ویژه میزان دی‌اکسید کربن (CO₂) از اقدامات ضروری برای ایجاد فضایی ایمن و مناسب جهت فرآیندهای درمانی و بهبود بیماران است (Farhadi et al., 2024).

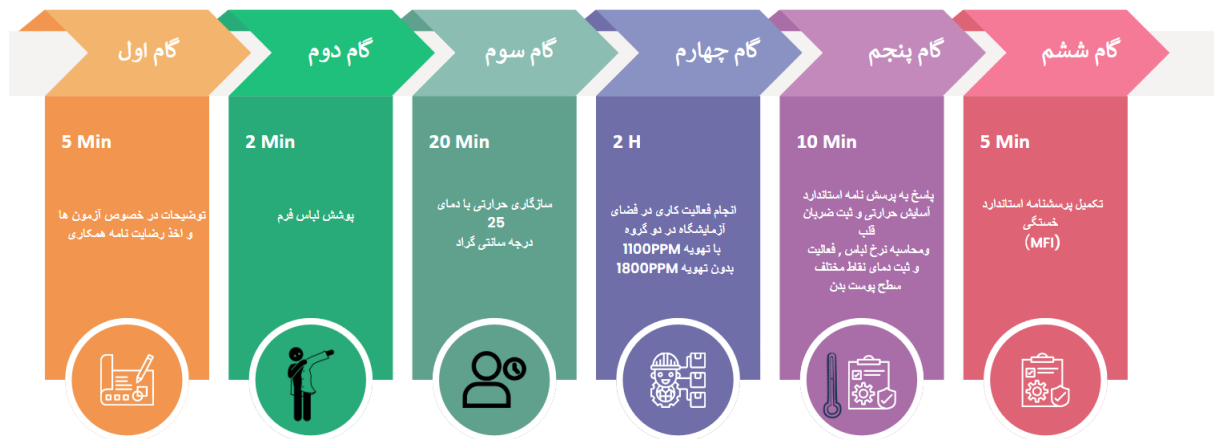
۳- روش شناسی

این مطالعه به‌صورت یک بررسی آزمایشگاهی با حضور ۲۰ نفر از کارکنان فضاهای درمانی در دو گروه ۱۰ نفری به‌صورت تصادفی با دو گروه شاهد و آزمایشی، در یک زیر زمین در یک درمانگاه تخصصی در شهر ایلام انجام گرفت. فضای آزمایشگاه این درمانگاه دارای تهویه طبیعی و مکانیکی بود، تهویه طبیعی این فضا از طریق بازشو پنجره‌ها و تهویه مکانیکی از طریق فن‌های مکانیکی انجام می‌گرفت. برای سنجش کیفیت هوا، فضای آزمایشگاه در دو حالت دارای تهویه و فاقد تهویه آماده‌سازی شد و گروه‌ها به دو صورت تصادفی در محیط قرار گرفتند. این پژوهش توسط کمیته اخلاق دانشگاه آزاد اسلامی واحد ایلام (ID IR.IAU.ILAM.REC.1403.091) تأیید شد. هم‌زمان با پاسخ پرسشنامه‌های استاندارد آسایش حرارتی ASHRAE آمریکا ۲۰۱۳ و پرسشنامه استاندارد خستگی کارکنان (MFI)، مقادیر محیطی دما، رطوبت نسبی، سرعت جریان و مقادیر غلظت CO₂ موجود در هوا ثبت گردید. با کنترل وضعیت غلظت CO₂ موجود در هوا با دو سطح ۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی، مطالعات آزمایشگاهی در یک فضای کنترل شده محیطی انجام گرفت (شکل - ۱). فرآیند جمع‌آوری داده‌ها از یک روش شش مرحله‌ای پیروی می‌کرد که در مجموع ۲ ساعت و ۴۲ دقیقه به طول انجامید (شکل - ۲).



شکل ۱: وضعیت محل انجام مطالعات آزمایشگاهی

این مطالعه بر اساس یک فرآیند شش مرحله‌ای ساختاریافته صورت گرفته است. ابتدا توضیحات لازم در خصوص آزمون به شرکت‌کنندگان داده شد سپس رضایت آگاهانه از آن‌ها اخذ گردید که حدود ۵ دقیقه طول کشید. سپس، مشارکت‌کنندگان ۲ دقیقه را صرف پوشیدن لباس‌های فرم استاندارد کردند. مرحله سوم شامل یک دوره ۲۰ دقیقه‌ای برای قرارگیری در شرایط سازگاری حرارتی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. مشارکت‌کنندگان به‌صورت تصادفی به دو گروه تقسیم شدند که هر کدام در معرض سطوح مختلف دی‌اکسید کربن بودند: یک گروه ۱۱۰۰ PPM را با تهویه مکانیکی تجربه کردند، درحالی‌که گروه دیگر با ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مواجه شدند. در مرحله چهارم، به مدت ۲ ساعت، شرکت‌کنندگان در یک محیط آزمایشگاهی به فعالیت‌های کاری متداول پرداختند. مرحله پنجم که ۱۰ دقیقه به طول انجامید، شرکت‌کنندگان پرسشنامه استاندارد آسایش حرارتی را تکمیل کردند. در این مدت، ضربان قلب ثبت شد، میزان عایق لباس و سطح فعالیت محاسبه شد و دمای سطوح مختلف پوست (مانند دست راست و چپ، گونه‌ها، پیشانی و دماغ) اندازه‌گیری شد. در ۵ دقیقه پایانی، شرکت‌کنندگان پرسشنامه استاندارد خستگی (MFI) را تکمیل کردند. سپس داده‌های جمع‌آوری‌شده وارد نرم‌افزار SPSS 27 گردید و در انتها با استفاده از تحلیل کوواریانس چند متغیره (MANCOVA) تجزیه و تحلیل داده‌ها صورت گرفت.



شکل ۲: مسیر انجام پژوهش در مطالعه حاضر

برداشت داده‌های اقلیمی شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت جریان هوا و دمای تابشی توسط دیتالاگر (delta log 10) ثبت شد (شکل - A, ۱) و اندازه‌گیری دمای سطح پوست بدن به‌وسیله‌ی دستگاه استاندارد تفنگ حرارتی لیزری (TCE1326/1327) اندازه‌گیری شد (شکل - B, ۱) هم‌زمان با استفاده از دستگاه تستر Fluke 975 Air Meter (Fluke) ایالات متحده آمریکا مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا ثبت لحظه‌ای گردید تا امکان تطابق پاسخ‌های کارکنان با اندازه‌گیری‌های محیطی مورد بررسی قرار گیرد (شکل - C, ۱).

۴- یافته‌ها

جدول ۱ شامل میانگین و انحراف معیار مربوط به متغیرهای مورد مطالعه احساس خستگی کارکنان فضاهای درمانی شامل: خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی در هر گروه است که بر اساس آن بالاترین میانگین برای متغیرهای احساس خستگی عمومی، خستگی جسمی و خستگی ذهنی مربوط به گروه افرادی است که احساس سازگاری حرارتی در

محیط اشتغال حین انجام فعالیت کاری ندارند با مقدار دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM به ترتیب با مقادیر ۱۶/۸۵۷، ۱۵/۷۱۴ و ۱۶/۷۱۴ است. همچنین بالاترین میانگین برای متغیرهای کاهش فعالیت و کاهش انگیزه مربوط به گروه افرادی است که احساس سازگاری حرارتی در محیط اشتغال حین انجام فعالیت کاری دارند با مقدار دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM به ترتیب با مقادیر ۱۲/۳۳۳، ۱۱/۶۶۶ است. از طرفی به‌طور کلی بالاترین میانگین در میان گروه‌های مورد مطالعه احساس خستگی کارکنان فضاهای درمانی مربوط به متغیر احساس خستگی عمومی برابر ۱۶/۸۵۷ برای گروه دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM و کمترین میانگین در میان گروه‌های مورد مطالعه مربوط به متغیر کاهش انگیزه کارکنان برابر ۴/۲۲۲ برای گروه دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM به دست آمد. همچنین یافته‌ها حاکی از تأثیر مقادیر دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM موجود در محیط بر روی سطوح مختلف احساس خستگی کارکنان فضاهای درمانی نسبت به مقدار دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM موجود در محیط اشتغال حین انجام فعالیت کاری است.

جدول ۲: میانگین و انحراف معیار سطوح مختلف متغیرهای احساس خستگی کارکنان فضاهای درمانی

متغیرهای وابسته	مقادیر دی‌اکسید کربن	وضعیت سازگاری حرارتی	میانگین	انحراف معیار	مجموع
خستگی عمومی	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۱۱/۰۰۰	۴/۳۵۸	۱۵/۶۵۰
		سازگاری حرارتی ندارد	۱۶/۸۵۷	۱/۲۱۴	
	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۶/۵۵۵	۱/۰۱۳	۶/۱۱۲
		سازگاری حرارتی ندارد	۱۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
خستگی جسمی	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۱۴/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱۵/۲۲۷
		سازگاری حرارتی ندارد	۱۵/۷۱۴	۱/۳۸۰	
	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۶/۲۲۲	۱/۲۰۱	۷/۶۴۶
		سازگاری حرارتی ندارد	۱۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	
کاهش فعالیت	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۱۲/۳۳۳	۲/۰۸۱	۱۳/۲۲۶
		سازگاری حرارتی ندارد	۱۱/۲۸۵	۲/۰۵۸	
	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۴/۷۷۷	۰/۸۳۳	۳/۱۰۷
		سازگاری حرارتی ندارد	۵/۰۰۰	۰/۰۰۰	
کاهش انگیزه	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۱۱/۶۶۶	۱/۵۲۷	۱۱/۹۹۷
		سازگاری حرارتی ندارد	۱۰/۱۴۲	۱/۹۵۱	
	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۴/۲۲۲	۰/۴۴۰	۳/۲۳۷
		سازگاری حرارتی ندارد	۵/۰۰۰	۰/۰۰۰	
خستگی ذهنی	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۱۲/۶۶۶	۰/۵۷۷	۱۴/۹۱۸
		سازگاری حرارتی ندارد	۱۶/۷۱۴	۲/۲۱۴	
	PPM ۱۸۰۰	سازگاری حرارتی دارد	۵/۲۲۲	۱/۳۰۱	۷/۳۲۵
		سازگاری حرارتی ندارد	۱۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	

برای انجام تحلیل کواریانس چند متغیره (مانکوا^۱)، ابتدا پیش‌فرض‌های آن بررسی شد. به این منظور، اولین مفروضه زیربنایی تحلیل کواریانس شامل فاصله‌ای و نسبی بودن سطوح متغیرهای وابسته خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و

خستگی ذهنی کارکنان فضاهای درمانی است. همان‌طور که در شیوه نمره‌گذاری تست‌ها آورده شد، مقیاس‌ها از نوع فاصله‌ای هستند. به همین جهت مفروضه‌ی اول تحلیل کواریانس حاصل شده است. جهت بررسی نرمال^۲ بودن گروه‌های مورد مطالعه به بررسی نرمال بودن توزیع‌ها با استفاده از آزمون کولموگوروف و اسمیرنوف^۳ پرداخته شد که با توجه به مقدارهای P در آزمون کولموگوروف و اسمیرنوف که از ۰/۰۵ بزرگ‌تر بودند، مفروضه‌ی دوم تحلیل کواریانس رعایت شد.

یکی از فروض انجام تحلیل کواریانس چند متغیره، یکنواختی کواریانس‌های مشاهده شده سطوح متغیرهای وابسته خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی کارکنان فضاهای درمانی در بین گروه‌های مورد مطالعه با مقدار دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM و ۱۱۰۰ PPM است که با توجه به مقدار آماره فیشرف آزمون ام باکس^۴ که برابر ۱/۴۰۹ به دست آمده در سطح خطای ۵ درصد دلیلی بر رد یکنواختی کواریانس‌های متغیرهای وابسته خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی کارکنان فضاهای درمانی در بین گروه‌ها وجود ندارد (P=0.137>0.05). همچنین نتایج آزمون لوین^۵ برای متغیرهای وابسته خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی کارکنان فضاهای درمانی به ترتیب با مقادیر (F(3,16)=1.273, P=0.317>0.05)، (F(3,16)=0.889, P=0.468>0.05)، (F(3,16)=1.113, P=0.373>0.05)، (F(3,16)=2.905, P=0.067>0.05) و (F(3,16)=1.42, P=0.271>0.05) بیانگر این واقعیت است که واریانس خطای متغیرهای وابسته خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی کارکنان فضاهای درمانی در بین گروه‌های مورد مطالعه با مقدار دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM و ۱۱۰۰ PPM یکسان است. بر این اساس، می‌توان اطمینان حاصل کرد که داده‌های این پژوهش مفروضه‌های زیربنایی تحلیل کواریانس را برآورد می‌کنند و می‌توان داده‌های پژوهش را توسط این روش آماری تجزیه و تحلیل کرد. از طرفی نتایج آزمون لامدای ویلکز^۶ با مقادیر (F(5,11)=16.029, P=0.001<0.05) و (F(5,11)=5.819, P=0.007<0.05) بیانگر تأثیرگذاری فاکتورهای سطوح دی‌اکسید کربن موجود در هوا با مقادیر (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) و وضعیت احساس سازگاری حرارتی کارکنان فضاهای درمانی حین انجام فعالیت کاری می‌باش. جدول ۲ نتایج تحلیل کواریانس چند متغیره مانکوا (MANCOVA) را نشان می‌دهد.

بر اساس جدول شماره ۲، با توجه به مقادیر آماره فیشرف و سطح معنی‌داری به دست آمده برای سطوح فاکتور ضربان قلب کارکنان فضاهای درمانی به ترتیب برابر (F(1,15)=10.245, p<0.05)، (F(1,15)=9.262, p<0.05) و (F(1,15)=6.717, p<0.05) برای متغیرهای خستگی عمومی، کاهش فعالیت و کاهش انگیزه به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که فاکتور ضربان قلب افراد یک فاکتور تأثیرگذار بر وضعیت خستگی عمومی، کاهش فعالیت و کاهش انگیزه در میان کارکنان فضاهای درمانی است. یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که فاکتور ضربان قلب کارکنان در محل کار بر وضعیت خستگی عمومی، کاهش فعالیت و کاهش انگیزه افراد تأثیر معنی‌داری را داشته است. همچنین با توجه به مقادیر آماره فیشرف و سطح معنی‌داری به دست آمده برای سطوح فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) در محل کار کارکنان فضاهای درمانی به ترتیب برابر (F(1,15)=38.865, p<0.05)، (F(1,15)=36.316, p<0.05)، (F(1,15)=58.410, p<0.05)، (F(1,15)=53.413, p<0.05) و (F(1,15)=18.637, p<0.05) برای متغیرهای وابسته خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) یک فاکتور تأثیرگذار بر وضعیت خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی در

2 - Normal

3 - Sample Kolmogorov – Smirnov Test

4 -Box's Test

5 -Levene's Test

6 -Wilks' Lambda

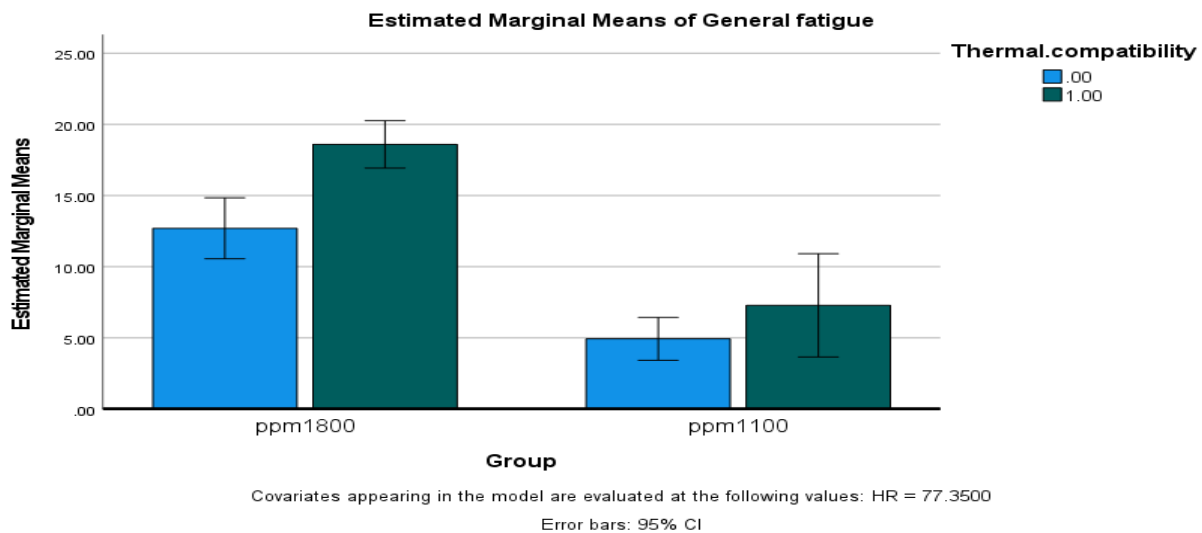
میان کارکنان فضاهای درمانی است. یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) بر وضعیت خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی در همه سطوح تأثیر معنی‌داری را داشته است؛ بنابراین فرضیه دارا بودن اثر مقادیر سطوح دی‌اکسید کربن موجود در هوا (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) بر همه سطوح احساس خستگی کارکنان فضاهای درمانی حین انجام کار، مورد تأیید و پذیرش قرار گرفت.

جدول ۳: نتایج تحلیل مانکوا

منبع تغییرات	متغیرهای وابسته	مجموع مربعات	درجات آزادی	میانگین مجموع مربعات	مقدار آماره فیشر	سطح معنی‌داری (P)
فاکتور ضربان قلب	خستگی عمومی	۲۲/۳۵۲	۱	۲۲/۳۵۲	۱۰/۲۴۵	۰/۰۰۶
	خستگی جسمی	۱/۰۳۳	۱	۱/۰۳۳	۰/۷۰۶	۰/۴۱۴
	کاهش فعالیت	۱۵/۱۳۷	۱	۱۵/۱۳۷	۹/۲۶۲	۰/۰۰۸
	کاهش انگیزه	۸/۹۹۴	۱	۸/۹۹۴	۶/۷۱۷	۰/۰۲۰
	خستگی ذهنی	۰/۳۹۱	۱	۰/۳۹۱	۰/۱۳۵	۰/۷۱۸
سطوح فاکتور دی‌اکسید کربن موجود در هوا (1100PPM با تهویه مکانیکی و 1800PPM بدون تهویه مکانیکی)	خستگی عمومی	۸۴/۸۰۰	۱	۸۴/۸۰۰	۳۸/۸۶۷	۰/۰۰۱
	خستگی جسمی	۳۵/۵۸۴	۱	۳۵/۵۸۴	۳۶/۶۱۶	۰/۰۰۱
	کاهش فعالیت	۹۵/۴۵۷	۱	۹۵/۴۵۷	۵۸/۴۱۰	۰/۰۰۱
	کاهش انگیزه	۷۱/۵۵۲	۱	۷۱/۵۵۲	۵۳/۴۱۳	۰/۰۰۱
	خستگی ذهنی	۵۳/۷۴۸	۱	۵۳/۷۴۸	۱۸/۶۳۷	۰/۰۰۱
فاکتور احساس سازگاری حرارتی	خستگی عمومی	۴۱/۵۹۷	۱	۴۱/۵۹۷	۱۹/۰۶۵	۰/۰۰۱
	خستگی جسمی	۱۶/۹۴۵	۱	۱۶/۹۴۵	۱۱/۵۷۹	۰/۰۰۴
	کاهش فعالیت	۱/۷۴۵	۱	۱/۷۴۵	۱/۰۶۸	۰/۳۱۸
	کاهش انگیزه	۱/۲۱۹	۱	۱/۲۱۹	۰/۹۱۰	۰/۳۵۵
	خستگی ذهنی	۴۶/۱۰۳	۱	۴۶/۱۰۳	۱۵/۹۱۶	۰/۰۰۱
اثر متقابل سطوح فاکتور دی‌اکسید کربن موجود در هوا (1100PPM با تهویه مکانیکی و 1800PPM بدون تهویه مکانیکی) و فاکتور احساس سازگاری حرارتی	خستگی عمومی	۷/۶۳۹	۱	۷/۶۳۹	۳/۵۰۱	۰/۰۸۱
	خستگی جسمی	۲/۰۱۴	۱	۲/۰۱۴	۱/۳۷۷	۰/۲۵۹
	کاهش فعالیت	۰/۰۷۰	۱	۰/۰۷۰	۰/۰۴۳	۰/۸۳۹
	کاهش انگیزه	۱/۵۲۵	۱	۱/۵۲۵	۱/۱۳۹	۰/۳۰۳
	خستگی ذهنی	۰/۲۰۵	۱	۰/۲۰۵	۰/۰۷۱	۰/۷۹۳
خطا	خستگی عمومی	۳۲/۷۲۷	۱۵	۲/۱۸۲		
	خستگی جسمی	۲۱/۹۵۱	۱۵	۱/۴۶۳		
	کاهش فعالیت	۲۴/۵۱۴	۱۵	۱/۶۳۴		
	کاهش انگیزه	۲۰/۰۸۶	۱۵	۱/۳۳۹		
	خستگی ذهنی	۴۳/۲۶۰	۱۵	۲/۸۸۴		
مجموع	خستگی عمومی	۲۸۹۴/۰۰۰	۲۰			
	خستگی جسمی	۲۷۸۸/۰۰۰	۲۰			
	کاهش فعالیت	۱۶۱۸/۰۰۰	۲۰			
	کاهش انگیزه	۱۳۴۳/۰۰۰	۲۰			

با توجه به مقادیر آماره فیشر و سطح معنی‌داری به دست آمده برای سطوح فاکتور احساس سازگاری حرارتی به ترتیب برابر با $(F(1,15)=19.065, p<0.05)$ ، $(F(1,15)=11.579, p<0.05)$ و $(F(1,15)=15.986, p<0.05)$ برای سطوح متغیرهای خستگی عمومی، خستگی جسمی و خستگی ذهنی کارکنان فضاهای درمانی به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که فاکتور احساس سازگاری حرارتی افراد یک فاکتور مهم و تأثیرگذار بر میزان خستگی عمومی، خستگی جسمی و خستگی ذهنی کارکنان فضاهای درمانی است.

همچنین نتایج تحلیل مانکوا نشان داد که فاکتور ضربان قلب بر خستگی جسمی و ذهنی کارکنان فضاهای درمانی حین انجام کار اثر ندارند ($p>0.05$)؛ بنابراین فرضیه دارا بودن اثرگذاری ضربان قلب در همه سطوح احساس خستگی کارکنان فضاهای درمانی حین انجام کار، مورد تأیید و پذیرش قرار نگرفت. از طرفی اثر متقابل سطوح فاکتور دی‌اکسید کربن موجود در هوا (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) و فاکتور احساس سازگاری حرارتی نیز تأثیر معنی‌داری بر وضعیت خستگی عمومی، خستگی جسمی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و خستگی ذهنی کارکنان فضاهای درمانی در همه سطوح ندارد ($p>0.05$). همچنین فرضیه اثرگذاری متقابل این فاکتورها به صورت هم‌زمان بر یکدیگر مورد پذیرش قرار نمی‌گیرد. شکل‌های ۱ تا ۵، وضعیت اثرات متقابل فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) و فاکتور وضعیت سازگاری حرارتی کارکنان فضاهای درمانی را نشان می‌دهد.

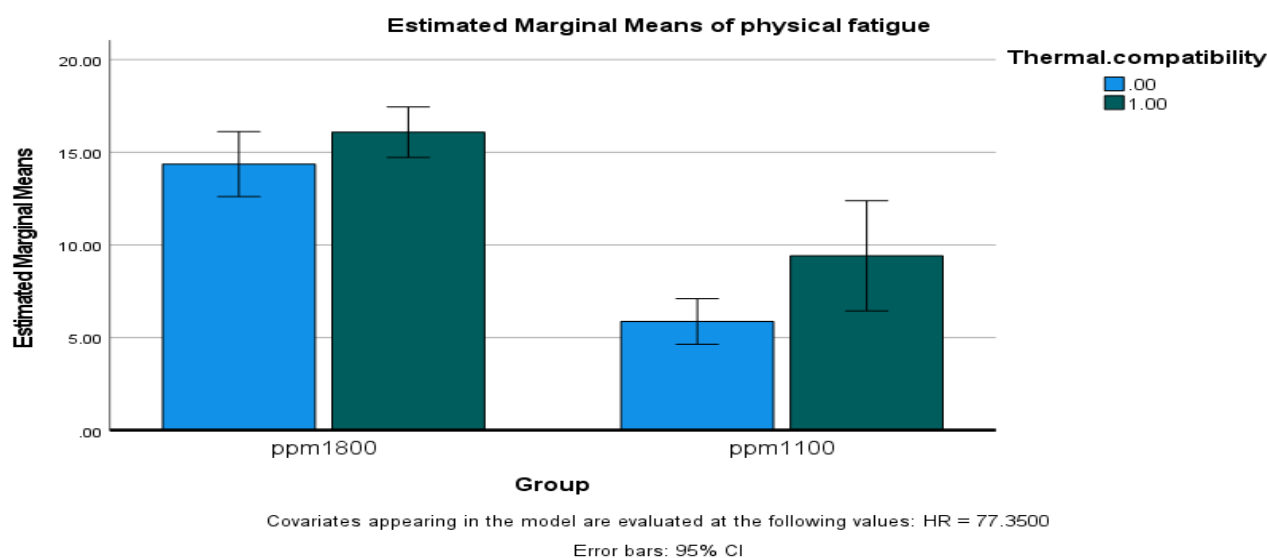


نمودار ۱: نمودار اثر متقابل بین فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا، فاکتور سازگاری حرارتی و فاکتور احساس خستگی عمومی کارکنان فضاهای درمانی.

در بین نمودار ۱ تا ۶ ارتباط متقابل بین فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا، فاکتور سازگاری حرارتی بر متغیرهای احساس خستگی عمومی، خستگی جسمی، خستگی ذهنی، کاهش فعالیت و کاهش انگیزه کارکنان فضای درمانی را نشان می‌دهند. این مطالعه تأثیر سطوح مختلف دی‌اکسید کربن (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) و وضعیت سازگاری حرارتی را بر روی این متغیرها بررسی کرد؛ بنابراین به‌طور ویژه مطابق نمودار ۱- نتایج مطالعه نشان داد که گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM قرار داشتند در مقایسه با گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM بودند، سطوح

بالاتری از خستگی عمومی را تجربه کردند. گروه افرادی که در محل کار آن‌ها غلظت دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM وجود داشت، احساس سازگاری حرارتی نداشتند و احساس خستگی عمومی بالاتری را نسبت به افرادی که احساس سازگاری نداشتند گزارش کردند. در مقابل، گروه افرادی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM قرار داشتند، وضعیت سازگاری حرارتی بهتر و سطوح پایین‌تری از میزان خستگی عمومی داشتند. تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد با انجام فعالیت افراد از زمان آغاز فعالیت کاری روزانه، در حد معمول احساس خستگی می‌کنند و این یک عامل طبیعی است اما افزایش غلظت دی‌اکسید کربن موجود در هوا فراتر از استاندارد گرمایش، سرمایش و تهویه طبیعی امریکا باعث تشدید خستگی، افت کارایی و عدم سازگاری حرارتی کارکنان فضاهای درمانی شده است.

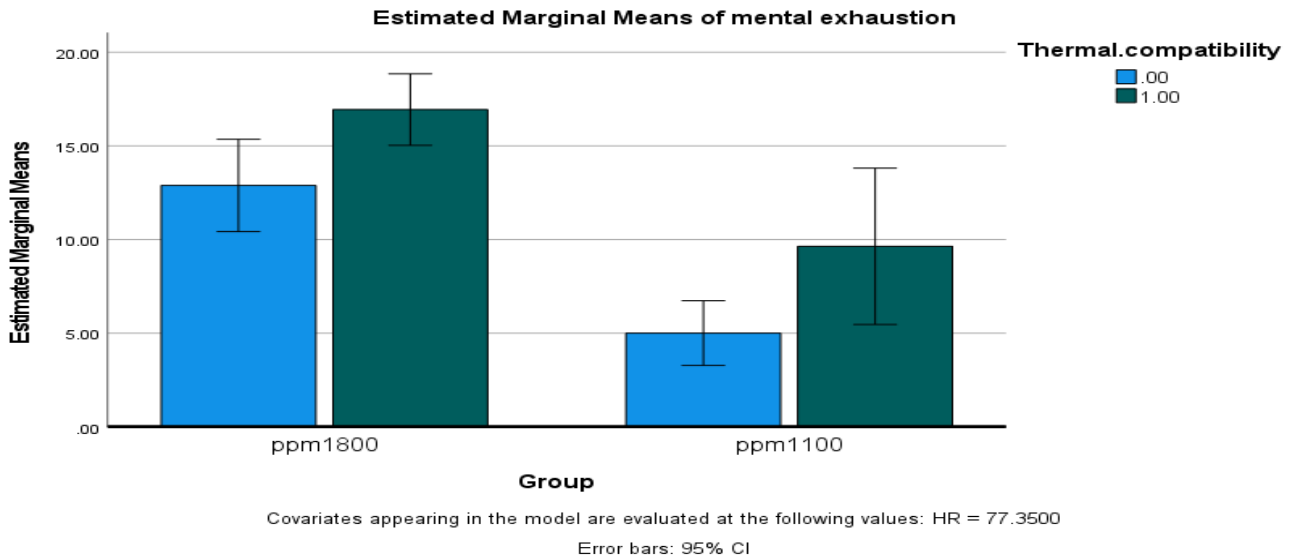
مطابق نمودار ۲- نتایج مطالعه نشان داد که گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM قرار داشتند در مقایسه با گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM بودند، سطوح بالاتری از خستگی جسمی را تجربه کردند. گروه افرادی که در محل کار آن‌ها غلظت دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM وجود داشت، احساس سازگاری حرارتی نداشتند و احساس خستگی جسمی بالاتری را نسبت به افرادی که احساس سازگاری نداشتند گزارش کردند. در مقابل، گروه افرادی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM قرار داشتند، وضعیت سازگاری حرارتی بهتر و سطوح پایین‌تری از میزان خستگی جسمی داشتند. تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد سطوح بالای دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM در فضاهای درمانی باعث خستگی جسمی بیشتر و کاهش سازگاری حرارتی در مقایسه با سطوح پایین‌تر دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM است.



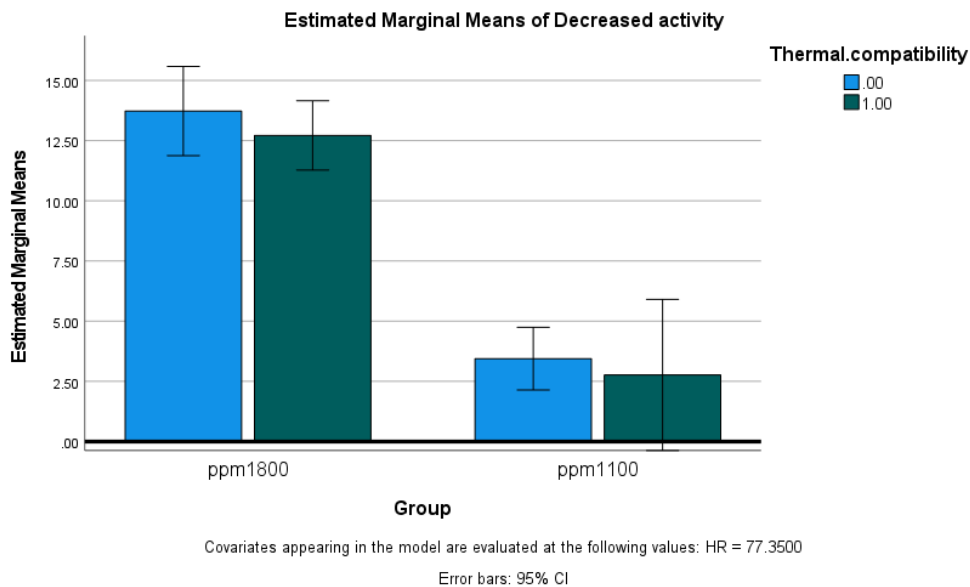
نمودار ۲: نمودار اثر متقابل بین فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا، فاکتور سازگاری حرارتی و فاکتور احساس خستگی جسمی کارکنان فضاهای درمانی.

مطابق نمودار ۳- نتایج مطالعه نشان داد که گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM قرار داشتند، در مقایسه با گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM بودند، سطوح بالاتری از خستگی ذهنی را تجربه کردند. گروه افرادی که در محل کار آن‌ها غلظت دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM وجود داشت، احساس سازگاری حرارتی نداشتند و احساس خستگی ذهنی بالاتری را نسبت به افرادی که احساس سازگاری نداشتند گزارش کردند. در مقابل، گروه افرادی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM قرار داشتند، وضعیت سازگاری حرارتی بهتر و سطوح پایین‌تری از میزان خستگی ذهنی داشتند. تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد سطوح

بالاتر دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی منجر به افزایش خستگی ذهنی در کارکنان می‌شود. سطوح پایین دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی منجر به سازگاری حرارتی بهتر و کاهش خستگی ذهنی می‌شود.



نمودار ۳: نمودار اثر متقابل بین فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا، فاکتور سازگاری حرارتی و فاکتور احساس خستگی ذهنی کارکنان فضاهاى درمانی.

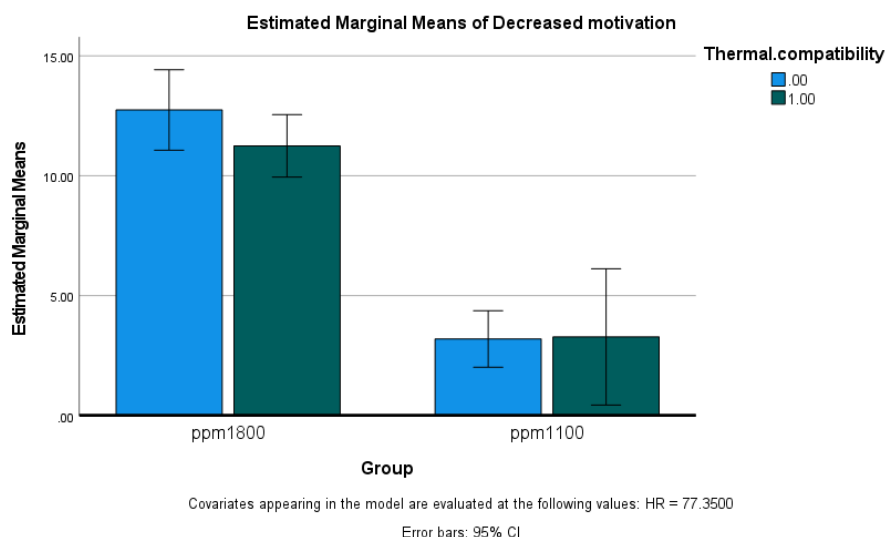


نمودار ۴: نمودار اثر متقابل بین فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا، فاکتور سازگاری حرارتی و فاکتور احساس کاهش فعالیت کارکنان فضاهاى درمانی.

مطابق نمودار ۴- نتایج مطالعه نشان داد که گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM قرار داشتند در مقایسه با گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM بودند، سطوح بالاتری از احساس کاهش فعالیت را تجربه کردند. گروه افرادی که در

محل کار آن‌ها غلظت دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM وجود داشت، احساس سازگاری حرارتی داشتند، احساس کاهش فعالیت بالاتری را نسبت به افرادی که احساس سازگاری نداشتند گزارش کردند. در مقابل، گروه افرادی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM قرار داشتند، وضعیت سازگاری حرارتی بهتر و سطوح پایین‌تری از میزان احساس کاهش فعالیت داشتند. تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد سطوح بالای دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی منجر به احساس بیشتر کاهش فعالیت در کارکنان می‌شود. سطوح پایین دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی منجر به سازگاری حرارتی بهتر و کاهش فعالیت کمتر می‌شود.

مطابق نمودار ۵- نتایج مطالعه نشان داد که گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM قرار داشتند در مقایسه با گروهی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM بودند، سطوح بالاتری از کاهش انگیزه را تجربه کردند. گروه افرادی که در محل کار آن‌ها غلظت دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM وجود داشت، احساس سازگاری حرارتی داشتند احساس کاهش انگیزه بالاتری را نسبت به افرادی که احساس سازگاری نداشتند گزارش کردند. در مقابل، گروه افرادی که در معرض سطح دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM قرار داشتند، هر دو گروه در شرایط یکسانی از نظر احساس کاهش انگیزه قرار داشتند. تحلیل یافته‌ها نشان می‌دهد کارکنانی که در معرض سطوح بالای دی‌اکسید کربن ۱۸۰۰ PPM قرار دارند، بدون توجه به سازگاری حرارتی، احساس انگیزه کاهش می‌یابند. در مقابل، سطوح پایین دی‌اکسید کربن ۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی تأثیر خنثی بر احساس انگیزه دارد.



نمودار ۵: نمودار اثر متقابل بین فاکتور مقادیر دی‌اکسید کربن موجود در هوا، فاکتور سازگاری حرارتی و فاکتور احساس کاهش انگیزه کارکنان فضاهای درمانی.

۴-۱- تحلیل یافته‌ها

نتایج این مطالعه نشان داد که فاکتور سطوح دی‌اکسید کربن موجود در هوا (۱۱۰۰ PPM با تهویه مکانیکی و ۱۸۰۰ PPM بدون تهویه مکانیکی) بر میزان خستگی عمومی، خستگی فیزیکی، کاهش فعالیت، کاهش انگیزه و سطوح خستگی ذهنی کارکنان تأثیر معناداری دارد ($p < 0.05$). این مطالعه نشان داد که فاکتور احساس سازگاری حرارتی کارکنان بر میزان خستگی عمومی، خستگی جسمانی و خستگی ذهنی آن‌ها تأثیر معناداری دارد ($p < 0.05$). همچنین فاکتور ضربان قلب کارکنان بر خستگی عمومی، کاهش فعالیت و کاهش سطح انگیزه آن‌ها تأثیر معناداری دارد ($p < 0.05$)؛ بنابراین با افزایش ضربان قلب افراد بیشتر احساس خستگی می‌کنند همچنین با کاهش میزان سطوح احساس سازگاری حرارتی میزان خستگی در افراد افزایش می‌یابد، بنابراین افزایش ضربان قلب و کاهش احساس سازگاری حرارتی به‌طور مشترک بر روی احساس خستگی عمومی کارکنان در فضاهای درمانی حین کار تأثیر دارد ($p < 0.05$).

همچنین در بین ضربان قلب و سطوح فاکتور دی‌اکسید کربن اثر متغیرهای خستگی عمومی، کاهش فعالیت و کاهش انگیزه مشترک بوده که مقادیر این‌ها معنادار است ($p < 0.05$). عامل مشترک بین سطوح فاکتور دی‌اکسید کربن و سازگاری حرارتی اثر متغیرهای خستگی عمومی، خستگی جسمی و خستگی ذهنی است. این مطالعه هیچ اثر متقابل معنی‌داری بین فاکتور سطوح دی‌اکسید کربن و فاکتور احساس سازگاری حرارتی بر سطح خستگی کارکنان پیدا نکرد ($p > 0.05$)؛ بنابراین مهم‌ترین عامل بین سطوح خستگی متغیر خستگی عمومی است و پس از آن خستگی جسمی و ذهنی هستند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که سطوح دی‌اکسید کربن بالاتر (۱۸۰۰ PPM)، احساس سازگاری حرارتی و افزایش ضربان قلب بر خستگی کارکنان فضای درمانی حین کار تأثیر دارد. خستگی عمومی به‌عنوان بحرانی‌ترین عامل و پس از آن خستگی جسمی و روانی شناخته می‌شود؛ بنابراین درک اینکه چگونه غلظت بالای CO₂ بر خستگی کارکنان و سازگاری حرارتی در فضاها پزشکی تأثیر می‌گذارد برای شناسایی خطرات بالقوه سلامتی، بهبود کیفیت هوای داخل ساختمان و افزایش رفاه و بهره‌وری کارکنان پزشکی ضروری است. بنابراین این موضوع توجه قابل توجهی را از بسیاری از محققین به خود جلب کرده است. مقایسه نتایج این پژوهش با تحقیقات (Epstein et al., 2001) قبلی که تأثیر CO₂ را بر خستگی برجسته می‌کرد، همسو می‌شود. نتایج به دست آمده یک مطالعه نشان داد که غلظت بالای دی‌اکسید کربن (CO₂) در هوای داخلی تأثیر بسزایی بر احساس خستگی دارد (Vehviläinen et al., 2016). نتایج این پژوهش با تحقیقات قبلی که تأثیر احساس سازگاری حرارتی را بر خستگی برجسته می‌کرد، همسو می‌شود، نتایج پژوهشی نشان داد یک عامل تأثیرگذار بر سازگاری حرارتی میزان دی‌اکسید کربن (CO₂) است (Solano et al., 2021). همچنین مطالعات قبلی ثابت کردند، که سازگار نشدن با دمای محیط تأثیر قابل توجهی بر خستگی دارد، به‌طوری که آزمودنی‌ها احساس گرمای ناخوشایند، افزایش خواب‌آلودگی و شدت بالاتر علائم حاد سلامتی را گزارش کردند. پاسخ‌های فیزیولوژیکی مانند ضربان قلب به‌طور قابل توجهی افزایش یافت (Liu et al., 2017). همچنین پژوهشی نشان داد که دمای بالاتر به‌طور قابل توجهی احساس خستگی ذهنی را افزایش می‌دهد و به تلاش ذهنی بیشتری برای حفظ همان سطح عملکرد نیاز دارد (Tanabe et al., 2007). در پژوهشی به بررسی نقش دما بر خستگی جسمانی پرداخت و به این نتیجه رسید دما نقش مهمی در خستگی جسمانی دارد، خستگی جسمانی به‌طور قابل توجهی زمانی رخ می‌دهد که دمای داخل خانه به کمتر از ۱۹ درجه سانتی‌گراد یا بیش از ۲۸ درجه سانتی‌گراد برسد (Mahdavi et al., 2020). نتایج همسوی این پژوهش با مطالعات قبل نشان می‌دهد، افزایش ضربان قلب با افزایش احساس خستگی ذهنی در طول انجام وظایف شناختی مرتبط است (Matuz et al., 2023). همچنین ثابت شده با افزایش میزان ضربان قلب میزان فعالیت کاهش می‌یابد (Epstein et al., 2001). یافته‌های تحقیق می‌تواند به مدیریت مراقبت‌های بهداشتی در توسعه استراتژی‌هایی برای به حداقل رساندن خستگی کارکنان کمک کند، که یک نگرانی مهم در محیط‌های مراقبت بهداشتی پرخطر است. با درک تأثیر سطوح دی‌اکسید کربن، سازگاری حرارتی و ضربان قلب بر خستگی، مدیریت می‌تواند اقدامات پیشگیرانه‌ای را برای ایجاد یک محیط کار سالم‌تر انجام دهد. این ممکن است شامل ارتقاء سیستم‌های تهویه، تنظیم کنترل‌های دما و اجرای برنامه‌های سلامتی کارکنان برای کاهش خستگی عمومی، فیزیکی و ذهنی باشد. با اولویت دادن به رفاه کارکنان، مدیریت مراقبت‌های بهداشتی می‌تواند رضایت شغلی را بهبود بخشد، فرسودگی شغلی را کاهش دهد و در نهایت مراقبت از بیمار را افزایش دهد. مدیریت مؤثر خستگی کارکنان همچنین می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری، کاهش غیبت و بهبود عملکرد کلی شود که در نهایت به نفع کارکنان و بیماران است.

۶- منابع

- 1- Alsayed, S. A., Abou Hashish, E. A., & Alshammari, F. (2022). Occupational fatigue and associated factors among Saudi nurses working 8-hour shifts at public hospitals. *SAGE open nursing*, 8, 23779608221078158. doi:10.1177/23779608221078158
- 2- ASHRAE, ASHRAE Handbook-HVAC applications (SI). 2019: Atlanta
- 3- Bazazan, A., Dianat, I., Mombeini, Z., Aynehchi, A., & Jafarabadi, M. A. (2019). Fatigue as a mediator of the relationship between quality of life and mental health problems in hospital nurses. *Accident Analysis & Prevention*, 126, 31-36. doi:10.1016/j.aap.2018.01.042
- 4- Building Energy Research Center, Tsinghua University. 2020 report Annual Report on China Building Energy Efficiency (in Chinese) (China Architecture & Building Press, Beijing, 2020).
- 5- Carswell, C. M., Clarke, D., & Seales, W. B. (2005). Assessing mental workload during laparoscopic surgery. *Surgical innovation*, 12(1), 80-90. doi:10.1177/155335060501200112
- 6- Chen, J., Davis, K. G., Daraiseh, N. M., Pan, W., & Davis, L. S. (2014). Fatigue and recovery in 12-hour dayshift hospital nurses. *Journal of nursing management*, 22(5), 593-603. doi:10.1111/jonm.12062
- 7- Chen, Y., Tao, M., & Liu, W. (2020). High temperature impairs cognitive performance during a moderate intensity activity. *Building and Environment*, 186, 107372. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107372
- 8- Cohen, T. N. (2017). A human factors approach for identifying latent failures in healthcare settings. <https://commons.erau.edu/edt/290>
- 9- de Souza, L. P., Bracht, M. K., Bavaresco, M., Geraldi, M. S., Gapski, N., Boudier, K., Melo, A. P., & Hoffmann, S. (2024). Thermal sensation and adaptation after spatial transition: a review and meta-analysis. *Building and Environment*, 111585. doi:10.1016/j.buildenv.2024.111585
- 10- Eldevik, M. F., Flo, E., Moen, B. E., Pallesen, S., & Bjorvatn, B. (2013). Insomnia, excessive sleepiness, excessive fatigue, anxiety, depression and shift work disorder in nurses having less than 11 hours in-between shifts. *PloS one*, 8(8), e70882. doi:10.1371/journal.pone.0070882
- 11- Energy Information Administration. International Energy Outlook 2016. Washington D.C.: EIA (2016)
- 12- Epstein, L. H., Paluch, R. A., Kalakanis, L. E., Goldfield, G. S., Cerny, F. J., & Roemmich, J. N. (2001). How much activity do youth get? A quantitative review of heart-rate measured activity. *Pediatrics*, 108(3), e44-e44. doi:10.1542/peds.108.3.e44
- 13- Fan, X., & Zhu, Y. (2024). Effects of indoor temperature on office workers' performance: an experimental study based on subjective assessments, neurobehavioral tests, and physiological measurements. *Ergonomics*, 67(4), 526-540. doi:10.1080/00140139.2023.2231181
- 14- Farhadi, F. Khakzand, M. Barzegar, Z.etal.(2024) Investigating parameters affecting indoor air quality in healthcare spaces. *Sadra Medical Sciences Journal*. 12(2): 151.
- 15- Fatahi K, Beigi M. Assessing the state of cognitive performance of employees and determining the range of thermal comfort of different genders in Ilam hospitals. *tj* 2024; 16 (3) :27-41
- 16- Fujii, H., Fukuda, S., Narumi, D., Ihara, T., & Watanabe, Y. (2015). Fatigue and sleep under large summer temperature differences. *Environmental Research*, 138, 17-21. doi:10.1016/j.envres.2015.02.006
- 17- Garrouste-Orgeas, M., Philippart, F., Bruel, C., Max, A., Lau, N., & Misset, B. (2012). Overview of medical errors and adverse events. *Annals of intensive care*, 2, 1-9. doi:10.1186/2110-5820-2-2
- 18- GAUTHIER, S., LIU, B., HUEBNER, G., & SHIPWORTH, D. (2015). Investigating the effect of CO2 concentration on reported thermal comfort. Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale,
- 19- Ho, J.-C., Lee, M.-B., Chen, R.-Y., Chen, C.-J., Chang, W. P., Yeh, C.-Y., & Lyu, S.-Y. (2013). Work-related fatigue among medical personnel in Taiwan. *Journal of the Formosan Medical Association*, 112(10), 608-615. doi:10.1016/j.jfma.2013.05.009
- 20- Karimi, A., Bayat, A., Mohammadzadeh, N., Mohajerani, M., & Yeganeh, M. (2023). Microclimatic analysis of outdoor thermal comfort of high-rise buildings with different configurations in Tehran: Insights from field surveys and thermal comfort indices. *Building and Environment*, 240, 110445. doi:10.1016/j.buildenv.2023.110445
- 21- Kim, J., Kong, M., Hong, T., Jeong, K., & Lee, M. (2018). Physiological response of building occupants based on their activity and the indoor environmental quality condition changes. *Building and Environment*, 145, 96-103. doi:10.1016/j.buildenv.2018.09.018
- 22- Kulczycka, K., Grzegorzczak-Puzio, E., Stychno, E., Piasecki, J., & Strach, K. (2016). Wpływ pracy na samopoczucie ratowników medycznych. *Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu*, 22(1).
- 23- Liang, Y., Yu, J., Xu, R., Zhang, J., Zhou, X., & Luo, M. (2024). Correlating working performance with thermal comfort, emotion, and fatigue evaluations through on-site study in office buildings. *Building and Environment*, 265, 111960. doi:10.1016/j.buildenv.2024.111960
- 24- Liu, W., Zhang, T. T., & Lai, D. (2023). Inverse design of a thermally comfortable indoor environment with a coupled CFD and multi-segment human thermoregulation model. *Building and Environment*, 227, 109769. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109769

- 25- Liu, W., Zhong, W., & Wargocki, P. (2017). Performance, acute health symptoms and physiological responses during exposure to high air temperature and carbon dioxide concentration. *Building and Environment*, 114, 96-105. doi:10.1016/j.buildenv.2016.12.020
- 26- MacDonald, W. (2003). The impact of job demands and workload on stress and fatigue. *Australian psychologist*, 38(2), 102-117. doi:10.1080/00050060310001707107
- 27- Mahdavi, N., Dianat, I., Heidarimoghadam, R., Khotanlou, H., & Faradmali, J. (2020). A review of work environment risk factors influencing muscle fatigue. *International journal of industrial ergonomics*, 80, 103028. doi:10.1016/j.ergon.2020.103028
- 28- Martins, L. A., Soebarto, V., & Williamson, T. (2022). A systematic review of personal thermal comfort models. *Building and Environment*, 207, 108502.
- 29- Matuz, A., van der Linden, D., Kisander, Z., Hernadi, I., Kazmer, K., & Csatho, A. (2021). Enhanced cardiac vagal tone in mental fatigue: Analysis of heart rate variability in Time-on-Task, recovery, and reactivity. *PLoS one*, 16(3), e0238670. doi:10.1371/journal.pone.0238670
- 30- Maula, H., Hongisto, V., Naatula, V., Haapakangas, A., & Koskela, H. (2017). The effect of low ventilation rate with elevated bioeffluent concentration on work performance, perceived indoor air quality, and health symptoms. *Indoor air*, 27(6), 1141-1153. doi:10.1111/ina.12387
- 31- Mirmohammadi, S., Mehrparvar, A., Kamali, Z., & Mostaghaci, M. (2011). Evaluation of the relationship between shift work and sleepiness in nurses. *Occupational Medicine Quarterly Journal*, 3(2), 31-38.
- 32- Ramdan, I. M. (2019). Measuring work fatigue on nurses: a comparison between Indonesian version of Fatigue Assessment Scale (FAS) and Japanese Industrial Fatigue Research Committee (JIFRC) Fatigue Questionnaire. *Jurnal Keperawatan Padjadjaran*, 7(2), 143-153. doi:10.24198/jkp.v7i2.1092
- 33- Singer, B. C. (2009). Hospital Energy Benchmarking Guidance-Version 1.0.
- 34- Solano, J. C., Caamaño-Martín, E., Olivieri, L., & Almeida-Galárraga, D. (2021). HVAC systems and thermal comfort in buildings climate control: An experimental case study. *Energy Reports*, 7, 269-277. doi:10.1016/j.egyr.2021.06.045
- 35- Tanabe, S.-i., Nishihara, N., & Haneda, M. (2007). Indoor temperature, productivity, and fatigue in office tasks. *Hvac&R Research*, 13(4), 623-633.
- 36- Techera, U., Hallowell, M., Stambaugh, N., & Littlejohn, R. (2016). Causes and consequences of occupational fatigue: meta-analysis and systems model. *Journal of occupational and environmental medicine*, 58(10), 961-973.
- 37- Tu, Z., Li, Y., Geng, S., Zhou, K., Wang, R., & Dong, X. (2021). Human responses to high levels of carbon dioxide and air temperature. *Indoor air*, 31(3), 872-886. doi:10.1111/ina.12769
- 38- Vehviläinen, T., Lindholm, H., Rintamäki, H., Pääkkönen, R., Hirvonen, A., Niemi, O., & Vinha, J. (2016). High indoor CO2 concentrations in an office environment increases the transcutaneous CO2 level and sleepiness during cognitive work. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 13(1), 19-29.
- 39- Wickens, C. D. (2008). Multiple resources and mental workload. *Human factors*, 50(3), 449-455.
- 40- Wilson, M. R., Poolton, J. M., Malhotra, N., Ngo, K., Bright, E., & Masters, R. S. (2011). Development and validation of a surgical workload measure: the surgery task load index (SURG-TLX). *World journal of surgery*, 35, 1961-1969.
- 41- Wu, J., Lian, Z., Zheng, Z., & Zhang, H. (2020). A method to evaluate building energy consumption based on energy use index of different functional sectors. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101893. doi:10.1016/j.scs.2019.101893
- 42- Yang, L., Yan, H., & Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications—a review. *Applied energy*, 115, 164-173.
- 43- Yang, L., Zhao, S., Zhai, Y., Gao, S., Wang, F., Lian, Z., Duanmu, L., Zhang, Y., Zhou, X., & Cao, B. (2023). The Chinese thermal comfort dataset. *Scientific Data*, 10(1), 662. doi:10.1038/s41597-023-02568-3
- 44- Yuan, F., Yao, R., Sadrizadeh, S., Li, B., Cao, G., Zhang, S., Zhou, S., Liu, H., Bogdan, A., & Croitoru, C. (2022). Thermal comfort in hospital buildings—A literature review. *Journal of Building Engineering*, 45, 103463. doi:10.1016/j.jobe.2021.103463
- 45- Zhang, J., Cao, X., Wang, X., Pang, L., Liang, J., & Zhang, L. (2021). Physiological responses to elevated carbon dioxide concentration and mental workload during performing MATB tasks. *Building and Environment*, 195, 107752. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107752
- 46- Zhang, J., Pang, L., Cao, X., Wanyan, X., Wang, X., Liang, J., & Zhang, L. (2020). The effects of elevated carbon dioxide concentration and mental workload on task performance in an enclosed environmental chamber. *Building and Environment*, 178, 106938. doi:10.1016/j.buildenv.2020.106938
- 47- Zheng, P., Liu, Y., Wu, H., & Wang, H. (2024). Non-invasive infrared thermography technology for thermal comfort: A review. *Building and Environment*, 248, 111079. doi:10.1016/j.buildenv.2023.111079
- 48- Zhou, S., Li, B., Du, C., Liu, H., Wu, Y., Hodder, S., Chen, M., Kosonen, R., Ming, R., & Ouyang, L. (2023). Opportunities and challenges of using thermal comfort models for building design and operation for the elderly: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113504. doi:10.1016/j.rser.2023.113504

Investigating the Impact of (CO₂) Concentration and Healthcare Architecture on Staff Fatigue and Thermal Comfort

Karen Fatahi^{1*}, Maryam Beigi², Ali Omranipour³

1- Department of Architecture, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran. (Corresponding Author)
karenfatahi@yahoo.com

2- Department of Architecture, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran.
Beigimaryam35@gmail.com

3- Associate Professor, Faculty of Architecture, University of Fine Arts, University of Tehran and University of Kashan, Iran.

a.omrani@ut.ac.ir

Abstract

Poor indoor air quality and elevated CO₂ levels in healthcare environments—due to inadequate ventilation and unfavorable environmental conditions—can compromise thermal comfort and endanger staff health. Appropriate architectural design, including optimized ventilation, daylighting, and spatial organization, can help prevent CO₂ buildup, reduce fatigue, and enhance staff performance. The aim of this study was to examine the effect of elevated CO₂ concentrations on staff fatigue and thermal comfort in healthcare facilities. An experimental study was conducted in a specialized clinic in Ilam, Iran. The study population consisted of 20 healthcare staff members working in a basement-level laboratory. Participants were randomly assigned to exposure to two different CO₂ concentrations: 1100 ppm with mechanical ventilation and 1800 ppm without mechanical ventilation. During exposure, heart rate measurements, thermal comfort assessments (using the ASHRAE standard questionnaire), and fatigue evaluations (using the standardized Multidimensional Fatigue Inventory, MFI) were recorded. Data were analyzed using Multivariate Analysis of Covariance (MANCOVA). Findings revealed that higher CO₂ concentrations (1800 ppm without ventilation compared to 1100 ppm with ventilation) had a significant impact on general, physical, and mental fatigue, as well as a decrease in staff activity and motivation ($p < 0.05$). Furthermore, thermal discomfort during work activities significantly contributed to general, physical, and mental fatigue ($p < 0.05$). Increased heart rate was also significantly associated with general fatigue and reduced activity and motivation ($p < 0.05$). However, the interaction effects between these factors were not statistically significant ($p > 0.05$). Among the various dimensions of fatigue, general fatigue emerged as the most influential factor, followed by physical and mental fatigue. According to ASHRAE standards and the results of this study, elevated CO₂ concentrations (1800 ppm vs. 1100 ppm) in healthcare environments can adversely affect fatigue levels and thermal comfort, potentially leading to serious long-term health issues for staff. The findings also demonstrated that higher CO₂ levels cause thermal discomfort, elevated heart rates, and increased general, physical, and mental fatigue, ultimately reducing staff activity and motivation. Thus, implementing effective ventilation systems and continuous monitoring of indoor air quality are essential strategies for enhancing staff performance and safeguarding the health of employees in healthcare environments.

Keywords: Carbon Dioxide (CO₂) Air Concentration, Thermal Comfort, Heart Rate, Healthcare Architecture.



This Journal is an open access Journal Licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License

(CC BY 4.0)