Occupational Medicine Quarterly Journal
Vol. 17, No. 2, Summer 2025
Pages: 12-26

فصلنامه علمی تخصصی طب کار
دوره ۱۷ ، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴
صفحه: ۲۶-۱۲

ارزیابی عملکرد لباس خنک‌کننده مایع مبتنی بر تبرید ترموالکتریک تحت دماهای محیطی مختلف

محمدجواد افشاری[۱]، آتنا رفیعی‌پور[۱]، ایرج علی‌محمدی[۱*]

چکیده

مقدمه: استرس حرارتی یکی از مهم‌ترین مخاطرات فیزیکی در محیط‌های کاری گرم محسوب می‌شود. استفاده از لباس‌های خنک‌کننده یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش آثار نامطلوب این شرایط و بهبود ایمنی و عملکرد افراد در اینگونه محیط‌ها می‌باشد. در میان انواع مختلف این لباس‌ها، لباس‌های خنک‌کننده مایع (LCG) به‌عنوان یکی از کارآمدترین گزینه‌ها برای مدیریت استرس حرارتی شناخته می‌شوند. با این حال، نمونه‌های موجود LCG با چالش‌هایی در طراحی و کارایی مواجه‌اند که نیازمند بهبود می‌باشند.

روش بررسی: در این مطالعه یک لباس خنک‌کننده مایع قابل‌حمل مبتنی بر تبرید ترموالکتریک طراحی و توسعه داده شد. اثربخشی لباس خنک‌کننده بر کنترل دما و رطوبت میکرو اقلیم (فضای بین سطح پوست و لباس) تحت شرایط دمایی مختلف، ارزیابی شد.

نتایج: نتایج نشان داد که لباس خنک‌کننده قادر به ارائه سرمایش یکنواخت روی سطح بدن است و می‌تواند به طور قابل‌توجهی دمای میکرو اقلیم را کاهش دهد. در دماهای محیطی ۳۱ ، ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی‌گراد، دمای میکرو اقلیم به ترتیب ۲۷/۲ ، ۳۰/۱ و ۳۲/۴ درجه سانتی‌گراد بود. علاوه بر این، سیستم خنک‌کننده رطوبت میکرو اقلیم را تا ۷ درصد نسبت به حالت غیرفعال کاهش داد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که لباس خنک‌کننده مایع مبتنی بر تبرید ترموالکتریک می‌تواند به‌طور مؤثر شرایط حرارتی بدن را در محیط‌های گرم بهبود بخشد. به‌کارگیری این نوع لباس در محیط‌های کاری گرم، می‌تواند به کاهش قابل توجه استرس حرارتی کمک کند و زمینه‌ساز بهبود آسایش حرارتی کاربران باشد. با این حال، انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری است.

واژه‌های کلیدی: لباس خنک‌کننده مایع، استرس حرارتی، تبرید ترموالکتریک

[۱] مرکز تحقیقات سلامت کار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
*(نویسنده مسئول)؛ تلفن تماس: ۰۲۱۸۶۷۷۴۷۴۹ ، پست الکترونیک: Irajrastin1@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

CC BY- NC 4.0

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

مقدمه

عوامل فیزیکی مختلفی نظیر رطوبت هوا، دمای محیط، صدا و نور می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر بهره‌وری، راحتی و سلامت شاغلان در محیط کار تأثیر بگذارند (۱, ۲). از دیدگاه بهداشت حرفه‌ای، دما یکی از مهم‌ترین عوامل فیزیکی محسوب می‌شود که مستقیماً بر آسایش و سلامت فرد اثر گذاشته و پیامدهای گسترده‌ای به‌دنبال دارد. فعالیت در محیط‌های با دمای بالا نظیر ریخته‌گری‌ها، کارخانه‌های آجر و سرامیک، کارگاه‌های تولید شیشه، نیروگاه‌ها (به‌ویژه در مجاورت دیگ های بخار)، نانوایی‌ها، آشپزخانه‌های صنعتی، معادن، واحدهای ذوب فلزات و تونل‌های بخار می‌تواند منجر به بروز تنش حرارتی شود. فعالیت‌هایی که در فضای باز و در فصل‌های گرم سال، به‌ویژه تحت تابش مستقیم نور خورشید انجام می‌شوند، مانند تعمیر خطوط گاز و آب، فعالیت‌های ساختمانی، دفع پسماندهای خطرناک و عملیات امداد و نجات، به‌شدت مستعد ایجاد تنش حرارتی هستند. شغل‌هایی مانند آتش‌نشانی نیز با چالش‌های حرارتی خاصی مواجه‌اند؛ چرا که استفاده از تجهیزات حفاظتی و ایمنی موجب کاهش توان بدن در دفع گرما شده و در نتیجه، خطر بروز تنش حرارتی ناشی از شرایط محیطی و بار فیزیکی فعالیت را افزایش می‌دهد (۳-۶).

زمانی که دما و رطوبت محیط کار بالا باشد، مکانیسم‌های تنظیم دمای بدن با چالش‌های قابل‌توجهی مواجه می‌شوند. در چنین شرایطی، فرآیند تعریق اثربخشی خود را تا حد زیادی از دست می‌دهد و بدن در دفع مؤثر گرما دچار مشکل می‌شود. علاوه بر این، انتقال حرارت از طریق جریان خون به سطح پوست نیز به دلیل کاهش اختلاف دمای بین بدن و محیط مختل می‌شود (۷-۹). از سوی دیگر، فعالیت بدنی با تولید حرارت بیشتر، این وضعیت را تشدید کرده و منجر به افزایش سریع دمای بدن می‌شود. ناتوانی در تنظیم دمای بدن می‌تواند با عوارض جدی سلامت مانند گرفتگی عضلات، اختلالات گوارشی، بیماری‌های پوستی، اضطراب، سرگیجه و آریتمی قلبی همراه باشد. افزون بر این، نتایج مطالعات حاکی از آن است که قرارگیری در محیط‌های گرم و مرطوب موجب کاهش تمرکز افراد شده و این امر می‌تواند احتمال بروز حوادث شغلی را افزایش دهد (۱۰-۱۴). بر اساس گزارش انجمن ملی حفاظت از آتش (NFPA)، تنها در سال ۲۰۲۲ بیش از ۳۰۰۰ مورد آسیب ناشی از استرس حرارتی و گرمازدگی در میان آتش‌نشانان ایالات متحده آمریکا به ثبت رسیده است (۱۵). همچنین برآوردهای سازمان بین‌المللی کار (ILO) نشان می‌دهد که سالانه حدود ۲۳ میلیون آسیب شغلی و نزدیک به ۱۹ هزار مورد مرگ مرتبط با کار، به شرایط گرمای بیش از حد محیط کار نسبت داده می‌شود (۱۶).

نصب تجهیزات تهویه مطبوع، فن‌های خنک‌کننده، و سایر وسایل خنک‌کننده در محیط کار از جمله رایج ترین راهکار ها برای حفظ دمای مناسب در مشاغل مختلف است؛ اما بدیهی است که در مشاغلی مانند صنایع ذوب فلزات استفاده از روش های رایج خنک سازی مانند سیستم های تهویه راندمان بالایی ندارد، همچنین برای مشاغلی مانند کشاورزی، راهسازی، ساختمان سازی و معدنکاری که کارکنان در آن ها ایستگاه کاری ثابتی ندارند؛ امکان استفاده از این نوع سیستم ها وجود ندارد (۱۷-۲۰). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از پوشاک خنک‌کننده می‌تواند راهکاری مؤثر و عملی برای این‌گونه مشاغل باشد. به طور کلی لباس های خنک‌کننده به دو دسته فعال و غیر فعال تقسیم میشوند. پوشاک خنک کننده فعال شامل لباس های خنک‌کننده مایع، لباس های خنک‌کننده هوا، و لباس های خنک‌کننده مبتنی بر چرخه تراکم بخار می باشد. از جمله پوشاک خنک‌کننده غیر فعال نیز به لباس های مبتنی بر کیسه های حاوی مواد تغییر فاز و لباس‌های خنک‌کننده تبخیری اشاره کرد (۲۱, ۲۲).

Młynarczyk و همکاران (۲۳) مطالعه‌ای را با هدف ارزیابی قابلیت‌های سرمایشی تی‌شرت‌های جدید طراحی‌شده با استفاده از بسته‌های مواد تغییر فازدهنده (PCM) انجام دادند. این ارزیابی با استفاده از آدمک حرارتی در شرایط کنترل‌شده صورت گرفت. نتایج نشان داد که میانگین چگالی شار حرارتی دریافتی از آدمک توسط تی‌شرت‌های مجهز به PCM، معادل ۱۵ وات بر متر مربع بود. زمانی که پوشاک بیرونی بر روی این تی‌شرت‌ها پوشیده می‌شد، میزان شار حرارتی دریافتی به ۳۱,۵ وات بر متر مربع افزایش می‌یافت. با این حال، مدت‌زمان اثر سرمایشی حاصل از مواد تغییر فازدهنده نسبتاً کوتاه بود که یکی از محدودیت‌های این نوع پوشاک محسوب می‌شود. دسته‌ای دیگر از سامانه‌های سرمایشی غیرفعال شامل پوشاک خنک‌کننده تبخیری هستند که سبک، منعطف و قابل‌حمل بوده، اما عملکرد ضعیفی در شرایط محیطی گرم و مرطوب از

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

خود نشان می‌دهند (۲۲, ۲۴, ۲۵). در مطالعه‌ای دیگر، Lou و همکاران (۲۶) لباسی را طراحی کردند که از یک سیستم تهویه مبتنی بر المان خنک کننده ترموالکتریک و شبکه‌ای از لوله‌های منشعب برای توزیع هوا بهره می‌برد. این پوشاک به قابلیت‌های سرمایشی و گرمایشی مجهز بود. نتایج آزمایش‌ها با آدمک حرارتی و آزمودنی انسانی نشان داد که این سامانه قادر است حداکثر توان خنک‌کنندگی شخصی معادل ۱۵/۵ وات و توان گرمایشی ۱۸/۱ وات را فراهم نماید. با این حال توان خنک‌کنندگی این نوع لباس ها نسبت به برخی دیگر از پوشاک خنک کننده مانند لباس های مبتنی بر چرخه تراکم بخار و لباس های خنک کننده مایع پایین تر است و همچنین برای شرایط محیطی گرم و مرطوب مناسب نخواهند بود. از سوی دیگر، مطالعات نشان می‌دهند که اگرچه لباس‌های خنک‌کننده مبتنی بر چرخه تراکم بخار از توان سرمایشی مناسبی برخوردارند، اما به‌دلیل وزن بالا و ساختار حجیم، حمل و استفاده از آن‌ها با محدودیت‌هایی همراه است (۲۲, ۲۷-۲۹).

مطالعات پیشین، لباس‌های خنک‌کننده مایع (LCGs) را به عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای کنترل استرس حرارتی در محیط‌های کاری با دمای بالا معرفی کرده‌اند (۲۲, ۳۰). با وجود عملکرد مؤثر، لباس های خنک‌کننده مایع با چالش‌هایی نظیر وزن نسبتاً بالا مواجه هستند (۳۱). برخی مطالعات اذعان دارند که استفاده از سیستم های تبرید مبتنی بر المان خنک‌کننده ترموالکتریک می‌تواند وزن لباس های خنک‌کننده مایع را نسبت به گذشته کاهش دهد؛ با این حال، اغلب نمونه‌های طراحی‌شده از این نوع لباس‌ها هنوز در مرحله‌ی آزمایشی قرار دارند و از نظر قابلیت حمل و کاربرد عملی ، به بلوغ کامل نرسیده‌اند (۳۲-۳۴). علاوه بر این، یافته‌های مطالعه‌ی Xu و همکاران (۳۵) نشان می‌دهد که جریان یکطرفه سیال در این نوع لباس های خنک‌کننده، موجب ایجاد اختلاف دمای قابل‌توجه بین آب ورودی و خروجی سیستم لوله کشی می‌شود. این مسئله باعث خنک‌سازی غیر یکنواخت سطح بدن شده و می‌تواند از میزان آسایش حرارتی کاربران بکاهد. در این پژوهش، با هدف رفع کاستی‌های موجود در طراحی‌های پیشین، مدلی بهبودیافته از یک لباس خنک‌کننده مایع قابل‌حمل ارائه شد. به‌منظور ارزیابی کارایی لباس خنک‌کننده طراحی شده، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در شرایط مختلف دمای محیط انجام گرفت.

روش بررسی

نواحی تحت پوشش لباس خنک‌کننده

طراحی مؤثر لباس‌های خنک‌کننده نیازمند درک جامع از ویژگی‌های حرارتی نواحی مختلف بدن است. بر اساس مطالعات پیشین، ناحیه قفسه سینه و شکم مسئول تقریباً ۳۰ تا ۴۰ درصد از تبادل حرارتی کل بدن با محیط می‌باشند. سر و گردن نیز به‌دلیل تراکم بالای عروق خونی و سطح تماس گسترده با محیط، سهمی معادل ۲۰ تا ۳۰ درصد در تبادل حرارتی دارند. اندام‌های فوقانی و تحتانی (دست‌ها و پاها) حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد در این فرآیند نقش دارند، در حالی‌که ناحیه پشتی بدن به‌واسطه دارا بودن عضلات بزرگ و سطح وسیع، تقریباً ۲۰ درصد از تبادل حرارتی را به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به اینکه نیم‌تنه بیش از ۵۰ درصد تبادل حرارتی را بر عهده دارد، منطقی است که همانند مطالعات قبلی، این ناحیه به‌عنوان اولویت اصلی برای خنک‌سازی انتخاب شود (۳۶-۳۸).

تأثیر دمای میکرو اقلیم بر آسایش حرارتی

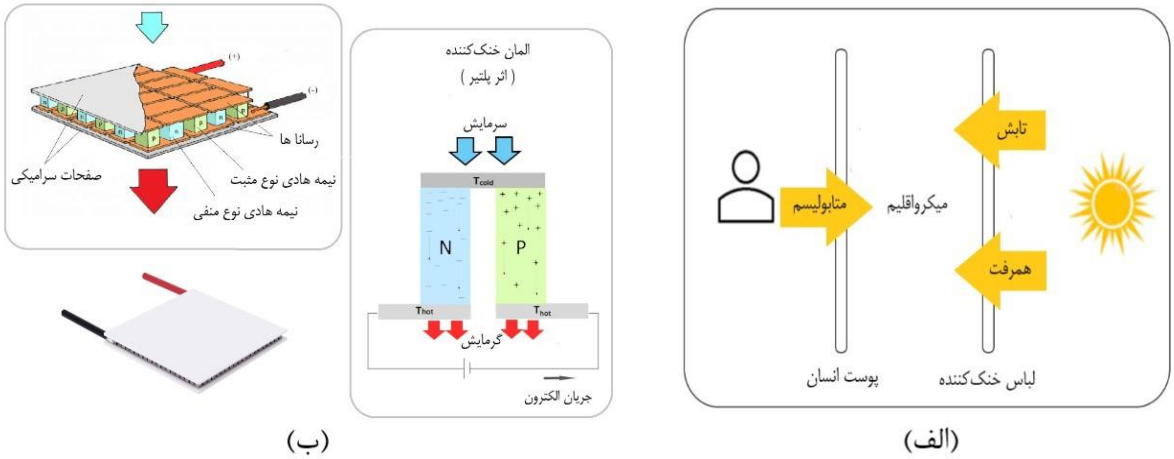
ناحیه بین آستر داخلی لباس و سطح پوست که به‌عنوان ناحیه میکرو اقلیم (Microclimate zone) شناخته می‌شود (شکل۱-الف)، نقش مهمی در تنظیم آسایش حرارتی، حفظ سلامت و عملکرد فیزیولوژیکی فرد دارد. حرارت تولیدشده توسط متابولیسم بدن و تعریق، منجر به افزایش بار حرارتی و تجمع بخار آب در این فضا می‌شود. شرایط محیطی نامساعد، به‌ویژه افزایش هم‌زمان دمای هوا و میزان رطوبت نسبی، این وضعیت را تشدید کرده و سبب بروز استرس حرارتی در فرد می‌گردد (۳۴, ۳۹). این پژوهش باهدف بهینه‌سازی شرایط نواحی میکرو اقلیم از طریق به‌کارگیری لباس خنک‌کننده، به‌منظور ارتقای آسایش فردی و حفظ تعادل حرارتی بدن انجام شده است.

طراحی لباس خنک‌کننده و سیستم تبرید

در این تحقیق، از المان‌های خنک‌کننده ترموالکتریک برای ساخت سیستم خنک‌کننده استفاده شد (شکل ۱-ب). ماژول‌های خنک‌کننده ترموالکتریک بر اساس اثر پلتیر عمل می‌کنند که یکی از سه پدیده تشکیل‌دهنده اثر ترموالکتریک است. یک المان خنک کننده ترموالکتریک از سه جزء اصلی تشکیل شده است: رساناها، پایه‌های نیمه‌هادی نوع مثبت (P: Positive) و نوع منفی (N: Negative)، و زیرلایه‌ها.

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]
CC BY- NC 4.0

پایه‌های نیمه‌هادی از لحاظ الکتریکی به صورت سری و از لحاظ حرارتی به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. زمانی که جریان مستقیم (DC) از دستگاه عبور می‌کند، گرما از یک سمت المان خنک کننده به سمت دیگر منتقل می‌شود و در نتیجه، یک سطح آن سرد و سطح مقابل گرم می‌شود(۴۰،۴۱).



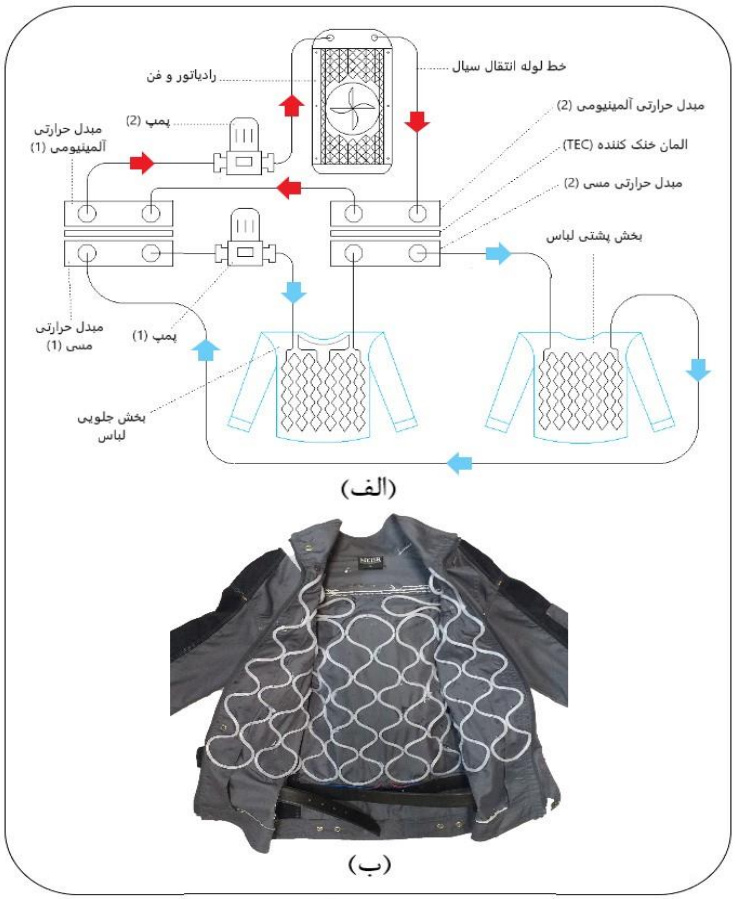
شکل ۱: (الف) شماتیک تبادل حرارت بین لباس خنک‌کننده، بدن انسان و محیط با دمای بالا
(ب) شماتیک ساختار داخلی المان خنک‌کننده ترموالکتریک و اثر پلتیر (۴۲, ۴۳)

به‌منظور دستیابی به سرمایش مؤثر درون لباس، از دو واحد تبرید مستقل استفاده شد. هر واحد تبرید شامل سه مؤلفه اصلی می‌باشد: یک المان خنک‌کننده ترموالکتریک، یک مبدل حرارتی مسی متصل به سمت سرد المان خنک‌کننده و یک مبدل حرارتی آلومینیومی که به سمت گرم آن متصل شده است (شکل ۲). به‌منظور ایجاد سرمایش یکنواخت در نواحی میکرو اقلیم، مبدل‌های حرارتی مسی نصب شده در سمت سرد واحد تبرید، به صورت سری به لوله‌های انعطاف‌پذیر تعبیه‌شده در سطح داخلی لباس متصل شدند. در ابتدا، سیال در اولین واحد تبرید خنک می‌شود و به لوله‌های تعبیه شده در قسمت جلویی لباس (بخش اولیه سیستم لوله‌کشی LCG) جریان می‌یابد. پس از انجام تبادل حرارتی با مناطق میکرو اقلیم شکم و قفسه سینه، مایع به واحد تبرید دوم منتقل می‌شود. در این مرحله سیال دوباره خنک می‌شود و وارد لوله‌های بخش پشتی لباس (بخش ثانویه سیستم لوله‌کشی LCG) می‌شود. پس از تبادل گرما با مناطق میکرو اقلیم در نواحی پشت بدن (dorsal region)، سیال به اولین واحد تبرید بازمی‌گردد و چرخه تکرار می‌شود. این پیکربندی یک حلقه بسته گردش سیال ایجاد کرد که تبادل حرارت بین بدن و سیال خنک‌کننده را تسهیل می‌کرد. جهت طراحی این سیستم گردش سیال از ۱۸ متر لوله PVC انعطاف‌پذیر با قطر داخلی ۴ میلی‌متر و قطر خارجی ۶ میلی‌متر استفاده شد. برای بهینه‌سازی تراکم لوله‌ها، سیستم لوله‌کشی به‌صورت الگوی زیگزاگ روی سطح لباس طراحی و نصب شد (شکل ۲). یک سیستم ثانویه گردش سیال (چرخه ۲) برای خنک‌سازی سمت گرم المان های خنک‌کننده ترموالکتریک در دو واحد تبرید به کار گرفته شد (شکل ۲). برای این منظور، مبدل‌های حرارتی آلومینیومی نصب شده در سمت گرم واحدهای تبرید به‌وسیله لوله‌های PVC و یک پمپ، به یک رادیاتور آلومینیومی به ابعاد ۲۷×۱۲×۳ سانتی‌متر متصل شدند. گرمای تولیدشده توسط المان‌های خنک کننده ترموالکتریک از طریق مبدل‌های حرارتی آلومینیومی به سیال منتقل شده و سپس سیال به رادیاتور پمپاژ می‌شود. پس از کاهش دمای سیال در رادیاتور، سیال خنک‌شده مجددا به مبدل‌های حرارتی بازمی‌گردد. به‌منظور بهبود دفع حرارت از رادیاتور به محیط بیرون، یک فن دمنده در بخش زیرین آن نصب شد. این سیستم گرمای اضافی واحدهای تبرید را به‌طور مؤثری دفع کرده و کارایی سیستم خنک‌کننده را بهبود می‌بخشد.

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0



شکل ۲: (الف) شماتیک ساده از پیکربندی سیستم لباس خنک‌کننده مایع (ب) لباس خنک‌کننده مایع و الگوی سیستم لوله‌کشی

قابلیت حمل

برای ساخت لباس خنک‌کننده مایع قابل‌حمل، ساختاری حمایتی طراحی شد که امکان نصب تجهیزات مورد نیاز را بر روی لباس اصلی فراهم کند. این ساختار با استفاده از یک صفحه پلاستیکی انعطاف‌پذیر ساخته شد و به‌گونه‌ای طراحی شد که وزن تجهیزات به‌صورت یکنواخت روی شانه‌ها و کمر توزیع شود. بخش شانه‌ها مانند یک کوله‌پشتی و بخش کمر شامل یک کمربند چرمی بود (شکل ۳-الف).

یکی از چالش‌های اصلی در طراحی لباس خنک‌کننده قابل‌حمل، گنجاندن منبع تغذیه در ساختار لباس بود. برای رفع این چالش، دو منبع تغذیه قابل‌حمل باتوجه‌به میزان مصرف انرژی دو واحد تبرید طراحی شد تا توان لازم برای حدود دو ساعت عملکرد مداوم را تأمین کنند. هر منبع تغذیه با وزنی معادل ۷۰۰ گرم طراحی شد و توانایی تأمین جریان پیوسته تا ۱۰ آمپر را دارا بود. دو کیف کمری-ران‌بند برای حمل منابع تغذیه ذکر شده طراحی شد. این کیف‌ها به کمربند لباس و دور ران متصل شده و حمل منابع تغذیه را تسهیل می‌کنند (شکل ۳-ب). همچنین یک منبع تغذیه قابل‌حمل دیگر، با دو خروجی مجزا طراحی گردید؛ که یکی از خروجی‌ها انرژی مورد نیاز فن و خروجی دیگر برای تامین انرژی مورد نیاز پمپ ها مورد استفاده قرار گرفت. این منبع تغذیه سوم در بخش زیرین رادیاتور و در مجاورت فن نصب شد. در طراحی این منابع تغذیه، از باتری‌های لیتیومی استفاده شد. این نوع باتری‌ها با محدوده دمای عملکردی نسبتاً وسیع (حدود ۲۰- تا ۶۰+ درجه سانتی گراد)، قابلیت عملکرد پایدار در طیف گسترده‌ای از شرایط دمایی محیطی را دارا هستند و از این‌رو گزینه‌ای مناسب برای به‌کارگیری در سامانه‌های پوشیدنی قابل‌حمل محسوب می‌شوند (۴۴, ۴۵). وزن لباس طراحی‌شده در حدود ۳ کیلوگرم و وزن کل منابع تغذیه نیز حدود ۲ کیلوگرم بود؛ بنابراین، وزن کلی سامانه لباس خنک‌کننده معادل ۵ کیلوگرم برآورد شد.

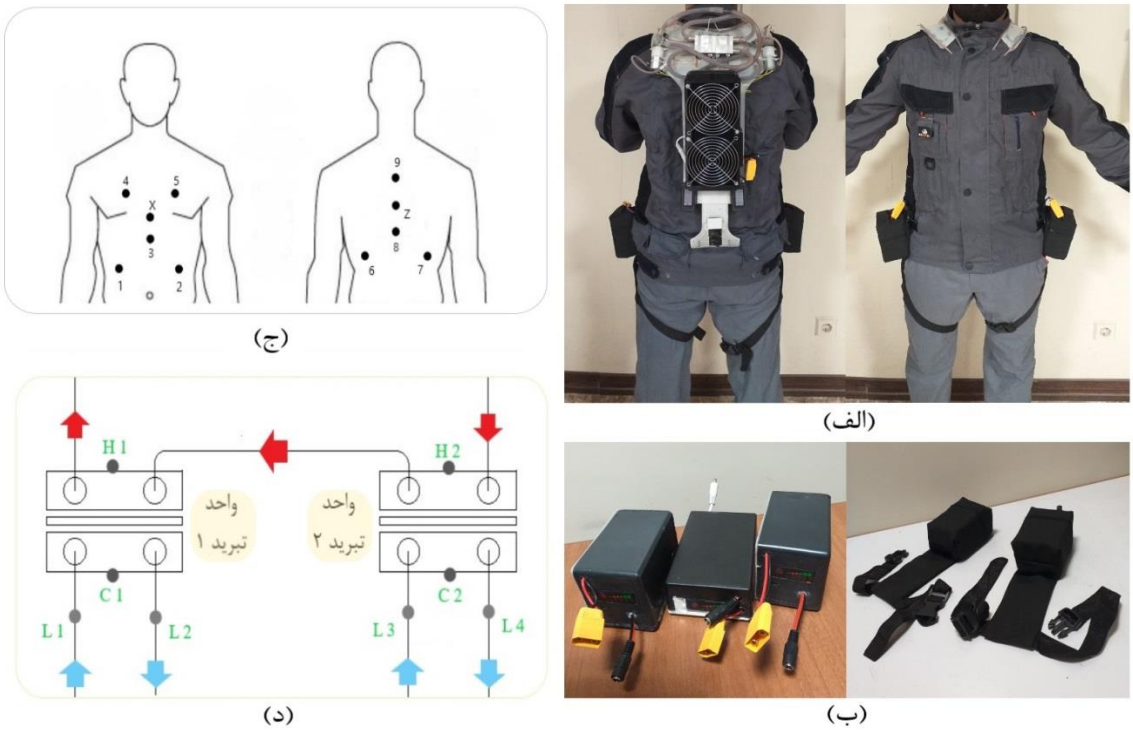
ارزیابی عملکرد لباس خنک‌کننده مایع

آزمایش‌های مربوط به ارزیابی عملکرد لباس خنک‌کننده در یک اتاقک با شرایط دمایی کنترل‌شده انجام گرفت. در این

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

آزمایش‌ها، یک مرد سالم با سن ۲۷ سال، وزن ۷۷ کیلوگرم و قد ۱۷۵ سانتی‌متر به‌عنوان آزمودنی حضور داشت. دمای هوای درون اتاقک با استفاده از سامانه گرمایشی آن تنظیم شد تا در طول انجام آزمایش‌ها به‌صورت یکنواخت و پایدار باقی بماند. آزمایش‌ها زمانی آغاز شدند که دمای اتاقک به سطح ازپیش‌تعیین‌شده رسید و تعادل حرارتی بین لباس خنک‌کننده و محیط برقرار شد. آزمایش‌های ارزیابی عملکرد لباس به دو مجموعه تقسیم شدند. در مجموعه اول، فرد آزمودنی لباس خنک‌کننده را برتن کرد و به‌صورت ثابت در اتاقک ایستاد. سپس سیستم خنک‌کننده شامل واحدهای خنک‌کننده ترموالکتریک، پمپ‌ها و فن‌ها فعال گردید. طی این آزمایش‌ها، دما و رطوبت نسبی در نواحی مختلف میکرو اقلیم بادقت اندازه‌گیری و ثبت شد. مجموعه دوم آزمایش‌ها نیز تحت شرایط مشابه انجام شد، با این تفاوت که اجزای الکتریکی سیستم خنک‌کننده غیرفعال بودند. این آزمایش‌ها در دماهای محیطی مختلف شامل؛۳۱، ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. شکل ۳-ج، نمایی شماتیک از بدن همراه با موقعیت‌های اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی را نمایش می‌دهد. برای ارزیابی اثر خنک‌کنندگی لباس، نه نقطه اندازه‌گیری دما (نقاط ۱ تا ۹) در نواحی مختلف میکرو اقلیم بدن انتخاب شدند. حسگرهای دما در این نقاط نصب شده و میانگین دمای این نواحی به‌عنوان دمای میکرو اقلیم گزارش شد. علاوه بر این، دو حسگر رطوبت نیز در نقاط X و Z برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی در فضای میکرو اقلیم به کار گرفته شدند. شکل ۳-د نقاط اندازه‌گیری دما بر روی سیستم خنک‌کننده را نشان می‌دهد. به‌منظور ارزیابی توان خنک‌کنندگی سیستم در طول انجام آزمایش‌ها، چهار حسگر دما در ورودی و خروجی واحدهای تبرید نصب شدند (نقاط L1، L2، L3 و L4). علاوه بر این، برای بررسی جامع‌تر عملکرد سیستم خنک‌کننده، دمای سطوح سرد و گرم هر یک از واحدهای تبرید نیز اندازه‌گیری شد (نقاط H1، C1، H2 و C2). مدت‌زمان هر آزمایش حدود ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد تا خطاهای احتمالی کاهش یافته و دقت اندازه‌گیری‌ها افزایش یابد.



شکل ۳:(الف) تصویری از لباس خنک‌کننده مایع (LCG) که توسط سوژه پوشیده شده است (ب) منابع تغذیه قابل‌حمل و کیف‌های کمری - ران‌بند (thigh-mounted bags) (ج) شماتیک نقاط اندازه گیری دما و رطوبت در نواحی میکرواقلیم (د) نقاط اندازه‌گیری دما بر روی سیستم خنک‌کننده

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

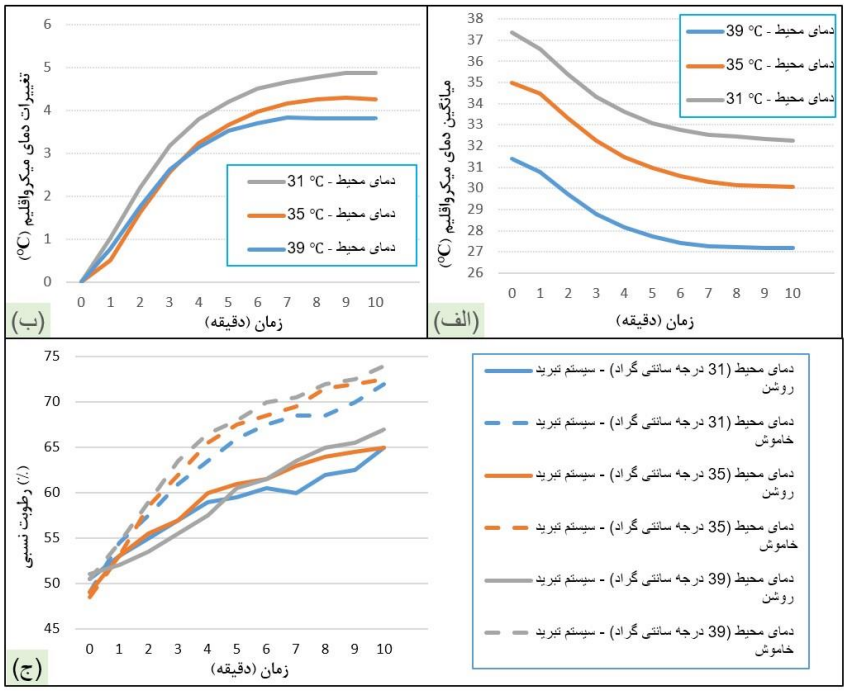
[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

نتایج

عملکرد لباس خنک‌کننده مایع (LCG) از طریق مجموعه‌ای از آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۴-الف تغییرات دمای متوسط ناحیه میکرو اقلیم را در شرایط مختلف دمای محیط نشان می‌دهد. بر اساس نمودار، دمای ناحیه میکرو اقلیم به‌تدریج با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در ۶۰ ثانیه ابتدایی پس از فعال‌سازی سیستم خنک‌کننده، کاهش دما با نرخ ملایمی آغاز می‌شود و پس از آن کاهش دما با شیب بیشتری ادامه می‌یابد. پس از حدود ۷ دقیقه از شروع آزمایش، دمای میکرو اقلیم به حالت پایدار رسیده و تقریباً ثابت باقی می‌ماند. زمانی که دمای محیط روی ۳۱، ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی گراد تنظیم شد؛ دمای میکرو اقلیم در حالت پایدار به ترتیب ۲۷/۲، ۳۰/۱ و ۳۲/۴ درجه سانتی گراد بود. شکل ۴-ب تفاوت دمای ناحیه میکرو اقلیم را حین آزمایش، در دو حالت روشن و خاموش سیستم خنک‌کننده نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، اختلاف دما به‌تدریج با گذشت زمان افزایش یافته و در نهایت در یک محدوده معین ثابت می‌شود. در پایین‌ترین دمای محیط (۳۱ درجه سانتی‌گراد)، بیشترین اختلاف دما درناحیه میکرواقلیم (بین حالت روشن و خاموش سیستم خنک‌کننده) ۴/۹ درجه سانتی‌گراد بوده است. در دماهای بالاتر، یعنی ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی‌گراد، این اختلاف کاهش یافته و به‌ترتیب به ۴/۳ و ۳/۸ درجه سانتی‌گراد رسیده است.

تأثیر لباس خنک‌کننده بر میزان رطوبت ناحیه میکرو اقلیم با اندازه‌گیری رطوبت نسبی در این نواحی ارزیابی شد. مطابق شکل ۴-ج، رطوبت نسبی در هر دو حالت فعال و غیرفعال بودن سیستم خنک‌کننده روند افزایشی دارد. با این حال، نرخ افزایش رطوبت در حالت غیرفعال به‌مراتب بیشتر است. در دماهای محیطی ۳۱، ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی در حالت غیرفعال سیستم پس از ۱۰ دقیقه به ترتیب حدود ۷۲٪، ۷۲/۵٪ و ۷۴٪ رسیده است، در حالی که این مقادیر در حالت فعال سیستم خنک کننده به ترتیب حدود ۶۵٪، ۶۵٪ و ۶۷٪ بوده‌اند. این تفاوت نشان‌دهنده اثربخشی سیستم خنک‌کننده در کاهش رطوبت ناحیه میکرو اقلیم است. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که کاهش رطوبت نسبی ناحیه میکرو اقلیم—که به‌صورت اختلاف رطوبت نسبی میکرواقلیم در دوحالت فعال و غیر فعال سیستم تبرید محاسبه شده—در شرایط دمایی مختلف نسبتاً ثابت بوده و به‌طور میانگین حدود ۷٪ کاهش را نشان می‌دهد.



شکل ۴:(الف) میانگین دمای میکرو اقلیم در دماهای مختلف محیط (ب) تفاوت دمایی میکرواقلیم بین دو حالت فعال و غیرفعال سیستم تبرید تحت شرایط دمایی مختلف (ج)میانگین رطوبت نسبی در ناحیه میکروکلیم تحت شرایط دمایی مختلف (خطوط پیوسته: سیستم تبرید فعال؛ خطوط نقطه‌چین: سیستم تبرید غیرفعال)

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]
[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]
CC BY- NC 4.0

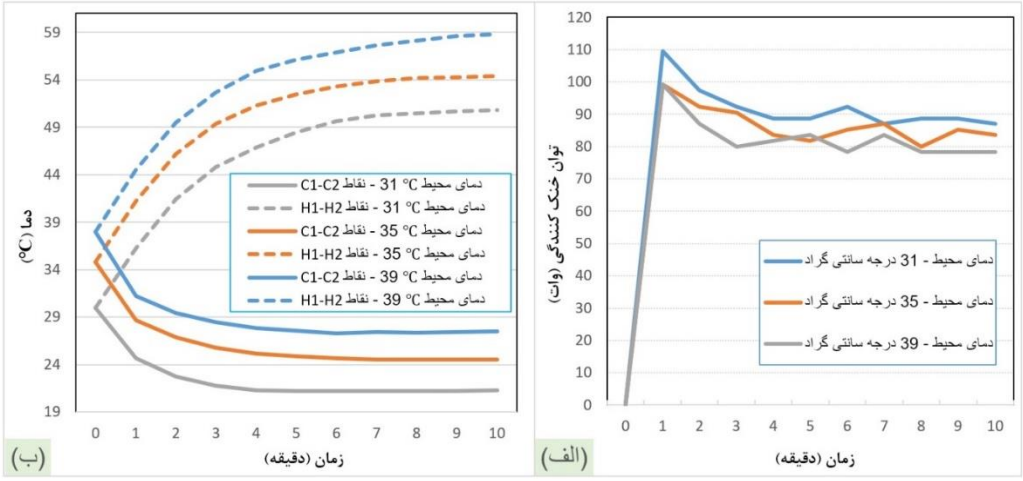
در این پژوهش، عملکرد سیستم خنک‌کننده با اندازه‌گیری دمای آب در ورودی و خروجی واحدهای تبرید، در حین انجام آزمایش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف دمای بین جریان ورودی و خروجی آب، در هر دو واحد تبرید تقریباً یکسان است. در حالت پایدار، این اختلاف دما برای هر واحد تبرید، در دماهای محیطی ۳۱، ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۱/۳، ۱/۲ و ۱/۱ درجه سانتی‌گراد بود. در نهایت توان خنک‌کنندگیLCG با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید. نتایج این محاسبات در شکل ۵-الف ارائه شده است.

$$Q = c\rho V(T_2 - T_1)$$

در فرمول ذکر شده، Q قدرت خنک‌کنندگی LCG (W)، cظرفیت گرمایی ویژه آب (J/(kg·°C))، ρ چگالی آب (kg/m3)، V جریان حجمی آب (m3/s) ، T_2 و T_1 نشان‌دهنده دمای آب در وروی و خروجی واحد تبرید (درجه سانتی‌گراد) می‌باشد.

مطابق نمودار (شکل ۵-الف)، پس از فعال‌سازی سیستم تبرید، توان خنک‌کنندگی مؤثر LCG در طی ۶۰ ثانیه اولیه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. سپس، این مقدار کاهش‌یافته و در محدوده‌ای مشخص نوسان می‌کند. در دمای محیطی ۳۱ درجه سانتی‌گراد، توان خنک‌کنندگی LCG، ابتدا به حدود ۱۰۹ وات می‌رسد و پس از افت اولیه، در محدوده ۸۷ تا ۹۲ وات ثابت می‌شود. در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد، مقدار اولیه توان سیستم به ۹۹ وات می‌رسد که پس از کاهش، در بازه ۸۰ تا ۸۷ وات تثبیت می‌شود. در دمای بالاتر(۳۹ درجه سانتی گراد) نیز، توان اولیه سیستم ۹۹ وات ثبت شد و پس از کاهش مقدار اولیه، در محدوده ۷۸ تا ۸۳ وات پایدار گردید. این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دمای محیط، توان خنک‌کنندگی LCGکاهش می‌یابد.

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر دمای محیط بر عملکرد سیستم تبرید، دمای بخش سرد (مبدل‌های حرارتی مسی) و بخش گرم (مبدل‌های حرارتی آلومینیومی) واحدهای تبرید در طول آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. شکل ۵-ب میانگین دمای این دو بخش را در گذر زمان نشان می‌دهد. در این نمودار، خطوط پیوسته نمایانگر دمای بخش سرد و خطوط نقطه‌چین نشان‌دهنده دمای بخش گرم هستند. بر اساس نمودار، پس از راه‌اندازی سیستم تبرید، دمای بخش سرد به‌سرعت کاهش یافته و پس از حدود ۴ دقیقه به حالت پایدار می‌رسد. در مقابل، دمای بخش گرم در ۴ دقیقه ابتدایی به سرعت افزایش یافته و سپس به‌تدریج به پایداری می‌رسد. در دماهای محیطی ۳۱، ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی‌گراد، دمای بخش سرد به ترتیب در ۲۱/۲، ۲۴/۵و ۲۷/۵ درجه سانتی‌گراد تثبیت شد. همچنین، دمای بخش گرم به‌ترتیب در ۵۰/۸، ۵۴/۴ و ۵۸/۸ درجه سانتی‌گراد پایدار گردید. بررسی نمودار نشان می‌دهد که افزایش دمای محیط تأثیر قابل‌توجهی بر اختلاف دمای بین بخش سرد و گرم در حالت پایدار ندارد و این اختلاف دما در تمامی شرایط دمایی بررسی‌شده تقریباً ثابت و در حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند.



شکل ۵: (الف) توان خنک‌کنندگی لباس خنک‌کننده مایع در دماهای محیطی مختلف (ب) میانگین دمای بخش سرد (نقاط C1 و C2) و سمت گرم (نقاط H1 و H2) واحدهای تبرید در دماهای محیطی مختلف

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

بحث

این مطالعه بر طراحی و توسعه یک لباس خنک‌کننده مایع (LCG)متمرکز بود. به‌منظور ارزیابی عملکرد این لباس در کاهش دما و رطوبت ناحیه میکرو اقلیم، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزایش دمای محیط در طول آزمون‌ها منجر به افزایش دمای آب درون سیستم لوله‌کشی LCG و همچنین افزایش دمای میکرو اقلیم می‌شود. دو عامل اصلی در ایجاد این وضعیت نقش داشتند:

۱-کاهش دفع حرارت در بخش گرم سامانه تبرید: دمای بالاتر محیطی، کارایی فرآیند دفع حرارت مبتنی بر رادیاتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه، دفع حرارت از بخش گرم سامانه تبرید کاهش یافته و دمای بخش سرد واحد تبرید افزایش میابد؛ و در نهایت منجر به کاهش اثر خنک‌کنندگی لباس میگردد.

۲-تأثیر مستقیم دمای محیط: افزایش دمای محیط منجر به افزایش گرادیان دمایی بین میکرواقلیم و محیط بیرونی می‌شود. این موضوع موجب افزایش انتقال حرارت تابشی و همرفتی به سمت میکرواقلیم و سیستم لوله‌کشی می‌گردد و در نهایت دمای میکرواقلیم را افزایش می‌دهد.

یافته‌های Zhang و همکاران (۴۶)، نشان می‌دهد که افزایش دمای محیط منجر به کاهش اختلاف دمای سیال بین ورودی و خروجی واحد تبرید می‌شود که نشان دهنده کاهش راندمان حذف حرارت سیستم تبرید است. در نتیجه دمای سیال درون لوله‌ها افزایش می‌یابد که متعاقباً دمای میکرواقلیم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مطالعه آنها نشان می‌دهد که در دمای ثابت محیط، کاهش اتلاف حرارت از سیستم خنک‌کننده منجر به افزایش دمای سمت سرد سیستم تبرید می‌شود. در نتیجه دمای آب در سیستم لوله‌کشی و متعاقبا دمای میکرواقلیم افزایش می‌یابد. این نتایج، اثرگذاری عامل اول (کاهش دفع حرارت از بخش گرم واحد تبرید) در افزایش دمای میکرواقلیم را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، مطالعات گذشت نشان می‌دهند که با افزایش دمای محیط، حتی در شرایطی که دمای ورودی آب به سامانه لوله‌کشی LCG ثابت نگه داشته شود، دمای میکرواقلیم افزایش می‌یابد. این مسئله، نقش عامل دوم (اثر مستقیم دمای محیط بر افزایش انتقال حرارت تابشی و همرفتی به ناحیه میکرواقلیم) را در افزایش دمای میکرواقلیم برجسته می‌سازد (۴۷).

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر توان خنک‌کنندگی لباس، شدت فعالیت فیزیکی فرد است (۳۴)؛ با این حال، به‌دلیل گستردگی الزامات تجربی برای بازسازی دقیق شرایط متنوع فعالیت بدنی در کنار سایر متغیرهای محیطی، بررسی این عامل در چارچوب مطالعه حاضر گنجانده نشد. Li و همکاران (۳۴)، در مطالعه‌ای نشان دادند که با افزایش سطح فعالیت فیزیکی، توان خنک‌کنندگی LCG نیز افزایش می‌یابد. علت اصلی این پدیده آن است که شدت بالاتر فعالیت بدنی منجر به افزایش تولید حرارت در بدن می‌شود که در نتیجه، دمای آب درون سامانه لوله‌کشی افزایش می‌یابد. این افزایش دما موجب بالا رفتن دمای سطح سرد المان خنک کننده ترموالکتریک شده و با افزایش دمای سطح سرد، اختلاف دمای بین دو سمت سرد و گرم المان خنک کننده کاهش می‌یابد. کاهش این اختلاف دما، به دلیل ویژگی های کاری ویژه المان خنک‌کننده ترموالکتریک، موجب بهبود راندمان انتقال حرارت و در نتیجه افزایش کارایی خنک‌کنندگی سیستم تبرید می‌گردد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دما در بخش گرم سیستم تبرید (یعنی سیستم دفع حرارت مبتنی بر رادیاتور) منجر به کاهش توان خنک کنندگی سیستم و در نهایت افزایش دمای میکرواقلیم می‌شود. در مقابل، افزایش دما در بخش سرد سیستم تبرید (یعنی سیستم لوله‌کشی تعبیه‌شده در سطح لباس) می‌تواند باعث بهبود توان خنک‌کنندگی سیستم شود. با این حال، در مطالعه حاضر، افزایش دمای محیطی منجر به کاهش توان خنک‌کنندگی سیستم تبرید شد. این موضوع نشان می‌دهد که تأثیر دمای محیط بر عملکرد بخش گرم سیستم خنک‌کننده بیشتر از اثر آن بر بخش سرد بوده است. این یافته‌ها بر اهمیت بهینه‌سازی اتلاف حرارت در سیستم تبرید لباس خنک‌کننده برای اطمینان از عملکرد موثر در محیط‌های با دمای بالا تاکید می‌کند.

نتایج حاکی از آن بود که لباس خنک‌کننده قادر به ارائه خنک‌کنندگی یکنواخت در سطح بدن می‌باشد. در پژوهش حاظر، بر خلاف مطالعات قبلی(۳۵, ۴۶)، از دو سیستم تبرید به صورت سری در مسیر سیستم لوله‌کشی استفاده شد. به همین دلیل در طول مسیر جریان سیال (قبل از اینکه دما بیش از حد افزایش یابد)، واحد تبرید دوم در سیستم لوله‌کشی، مجددا دمای سیال را کاهش میدهد. نتایج به دست آمده نشان

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

می‌دهد که اختلاف دمای ورودی و خروجی در هر دو واحد تبرید تقریبا برابر بوده و میانگین این اختلاف در دماهای محیطی ۳۱، ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب در حدود ۱,۳، ۱,۲ و ۱,۱ درجه سانتی‌گراد بوده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییرات دمای سیال در مسیر لوله‌کشی LCG بسیار اندک بوده و سامانه توانسته است سرمایش یکنواختی در سطح بدن ایجاد کند. این امر کارایی بالای طراحی دو مرحله‌ای سامانه تبرید را در حفظ یکنواختی سرمایش تأیید می‌کند. این در حالی است که در مطالعات پیشین، تنها از یک واحد تبرید در لباس خنک‌کننده استفاده شده بود که این امر منجر به اختلاف دمای بیش از ۴ درجه سانتی‌گراد بین سیال ورودی و خروجی سیستم لوله‌کشی می‌شد (۳۵, ۴۶)؛ اختلاف دمایی که باعث توزیع ناهمگون سرمایش در سطح بدن شده و در نتیجه، کاهش آسایش حرارتی را به‌دنبال داشت.

یافته‌های مطالعه حاضر نشان می‌دهد که لباس خنک‌کننده طراحی‌شده می‌تواند به‌طور مؤثری رطوبت در نواحی میکرو اقلیم را کاهش دهد. در دماهای محیطی ۳۱، ۳۵ و ۳۹ درجه سانتی‌گراد، رطوبت میکرو اقلیم در انتهای آزمایش به‌ترتیب در حدود ۶۵٪، ۶۵٪ و ۶۷٪ اندازه‌گیری شد. با این حال، میزان کاهش رطوبت در دماهای مختلف تقریباً ثابت و در حدود ۷٪ بود. در مطالعه ای مشابه، Li و همکاران (۳۴) به بررسی تأثیر لباس‌های خنک‌کننده بر کاهش رطوبت در ناحیه میکرو اقلیم پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان کاهش رطوبت در دماهای محیطی ۳۴، ۳۸ و ۴۲ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب برابر با ۶٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بوده است که بیانگر وجود یک همبستگی مثبت میان اثر کاهش رطوبت لباس خنک‌کننده و افزایش دمای محیط می‌باشد. همچنین در این مطالعه، رطوبت نسبی میکرو اقلیم در حالت پایدار برای دماهای ۳۴، ۳۸ و ۴۲ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب حدود ۴۴٪، ۵۱٪ و ۶۱٪ گزارش شده است. تفاوت تأثیر لباس خنک‌کننده بر کاهش رطوبت میکرو اقلیم در این دو مطالعه می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط و روش‌های آزمایش باشد. در مطالعه مذکور (۳۴)، نرخ دفع حرارت سیستم تبرید به‌گونه‌ای تنظیم شده بود که دمای سیال ورودی به سامانه لوله‌کشی LCG در تمامی دماهای محیطی ثابت و برابر با ۲۰ درجه سانتی‌گراد باقی بماند. در مقابل، در مطالعه حاضر، توان فن در تمامی آزمون‌ها ثابت نگه داشته شد؛ بنابراین، با افزایش دمای محیط، نرخ دفع حرارت سامانه تبرید کاهش یافته و در نتیجه دمای سیال درون سامانه لوله‌کشی افزایش یافت. این افزایش دمای سیال می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در میزان کاهش رطوبت میکرو اقلیم باشد. از سوی دیگر، نوع پوشش و جنس پارچه مورد استفاده می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر سطح رطوبت در ناحیه میکرو اقلیم داشته باشد. در مطالعات پیشین (۳۴, ۴۷)، از یک جلیقه در طراحی لباس خنک‌کننده استفاده شده است. این نوع جلیقه‌های سبک‌وزن دارای بخش‌هایی باز در اطراف حلقه آستین و یقه هستند که امکان تبادل آزادانه هوا میان محیط بیرونی و میکرو اقلیم را فراهم می‌سازند. این جریان طبیعی هوا باعث انتقال رطوبت به محیط اطراف شده و در نهایت به کاهش رطوبت نسبی در میکرو اقلیم کمک می‌کند. در مقابل، در مطالعه حاضر از لباس کار آستین‌بلند با ترکیب پارچه‌ای شامل ۷۰٪ پنبه و ۳۰٪ پلی‌استر استفاده شد که دارای سرآستین‌ها و پایین‌تنه کش‌بافت بود. این طراحی باعث محدود شدن جریان آزاد هوا بر روی سطح پوست شده و در نتیجه، رطوبت درون ناحیه میکرو اقلیم حبس شده و به‌مرور زمان افزایش میابد. علاوه بر این، یافته‌های مطالعه Özkan و همکاران (۴۸)، نشان داد که پارچه‌های پنبه-پلی‌استر با درصد بالاتر پنبه، بیشترین مقاومت حرارتی و مقاومت در برابر عبور بخار آب را دارند. ازاین‌رو، لباس‌هایی که درصد بالاتری از پنبه را در ترکیب خود دارند، با دمای بالاتر و رطوبت نسبی بیشتر در میکرو اقلیم همراه هستند.

یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی لباس‌های خنک‌کننده وزن آنهاست. در مطالعه‌ای که توسط Bartkowiak و همکاران انجام شد (۳۱)، یک لباس خنک‌کننده مبتنی بر گردش سیال ایجاد شد. وزن کل پوشاک و سیستم تبرید آن بیش از ۱۰ کیلوگرم گزارش شد و واحد تبرید با استفاده از یک سیستم چرخدار حمل میشد. با این حال، چنین وزنی برای یک لباس خنک‌کننده بیش از حد بالا می‌باشد. در مطالعه دیگری، ارنست و همکاران (۴۹)، یک لباس خنک‌کننده مبتنی بر تبرید تراکم-بخار ایجاد کردند. وزن این لباس خنک‌کننده ۳,۷۴ کیلوگرم بود و یک منبع تغذیه ۱,۵۷ کیلوگرمی برای آن طراحی شده بود. این واحد شامل یک موتور کوچک سوختی بود که انرژی الکتریکی لازم را برای سیستم تامین می‌کرد. علاوه بر این، مقدار سوخت مصرفی این سیستم برای یک دوره کاری دو ساعته، حدود

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

۶۰۰ تا ۷۰۰ گرم تخمین زده شد، که در مجموع وزن این لباس را به محدوده ۶ کیلوگرم می‌رساند. علاوه بر این، لباس‌های خنک‌کننده مبتنی بر این فناوری معمولاً ساختار پیچیده‌تر و هزینه‌های بالاتری در مقایسه با لباس‌های خنک‌کننده ترموالکتریک دارند. لباس خنک‌کننده مایع (LCG) طراحی شده در مطالعه حاضر دارای وزن تقریبی ۳ کیلوگرم است. علاوه بر این، سه منبع تغذیه با وزن کلی تقریباً ۲ کیلوگرم طراحی و توسعه داده شد تا انرژی مورد نیاز سیستم خنک‌کننده را تأمین کنند. بر اساس تجزیه و تحلیل انجام شده توسط محقق، لباس خنک‌کننده طراحی شده در مطالعه حاضر، در مقایسه با سایر لباس های خنک‌کننده مایع قابل حمل که تاکنون توسعه یافته‌اند، در محدوده وزنی بهینه قرار دارد.

محدودیت‌ها و پیشنهادات

اگرچه این مقاله تأیید می‌کند که لباس خنک‌کننده مایع می‌تواند به‌طور مؤثری دما و رطوبت در ناحیه میکرو اقلیم را در دماهای محیطی مختلف بهبود بخشد، اما شدت فعالیت بدنی آزمودنی در آزمایشات مختلف، نسبتاً یکنواخت بوده و این وضعیت تا حدودی با شرایط واقعی کاری افراد در محیط‌های گرم متفاوت است. از این‌رو، ضروری است که اثر خنک‌کنندگی لباس خنک‌کننده مایع (LCG) بر افراد در شدت‌های مختلف فعالیت بدنی به‌طور عمیق‌تری مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که تمرکز پژوهش بر بررسی عملکرد فنی و رفتار حرارتی سیستم خنک‌کننده در شرایط دمایی گوناگون بود، استفاده از یک آزمودنی جهت ایجاد شرایط کنترل‌شده و یکسان برای مقایسه عملکرد سیستم در دماهای مختلف صورت گرفت. لازم به تأکید است که هدف این پژوهش، ارزیابی تأثیر لباس بر کاهش استرس حرارتی در جمعیت‌های مختلف انسانی نبوده است. با این حال، برای تعمیم نتایج به کاربردهای انسانی گسترده‌تر، مطالعات آینده باید اثر متغیرهایی نظیر سن، جنس و ویژگی‌های جسمانی را نیز در طراحی آزمایش‌ها مدنظر قرار دهند، چرا که این عوامل می‌توانند بر پاسخ فیزیولوژیکی به گرما و میزان اثربخشی لباس تأثیرگذار باشند. همچنین در طراحی حاضر، وزن لباس خنک‌کننده نسبت به نسخه‌های پیشین کاهش یافته، اما وزن کلی سیستم (حدود ۵ کیلوگرم) هنوز ممکن است برای استفاده طولانی‌مدت در محیط‌های کاری با فعالیت بدنی بالا مناسب نباشد. بنابراین، انجام مطالعات بیشتر به منظور کاهش وزن این نوع لباس‌های خنک‌کننده ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه، آزمایش‌ها در محیطی کنترل‌شده و با دمای ثابت در هر مرحله انجام شد؛ به‌طوری‌که سه سطح مختلف دمای محیطی به صورت جداگانه و پایدار بررسی گردید. با این حال، نوسانات و تغییرات ناگهانی دما که در شرایط واقعی محیط‌های کاری وجود دارد، در این آزمایش‌ها مد نظر قرار نگرفت. بنابراین، برای بهبود دقت ارزیابی و کاربرد مؤثر لباس‌های خنک‌کننده در شرایط عملی، انجام تحقیقات بیشتر در محیط‌هایی با شرایط دمایی متغیر و واقع‌گرایانه ضروری است. این تحقیقات می‌تواند به تعیین دقیق‌تر عملکرد لباس در مواجهه با نوسانات دمایی کمک کرده و مبنای طراحی هوشمندتر و کاربردی‌تر این نوع لباس‌ها در آینده باشد. همچنین مطالعه هزینه-فایده این دسته از سیستم‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا ارزیابی دقیق صرفه اقتصادی در کنار عملکرد فنی می‌تواند نقش کلیدی در پذیرش و توسعه گسترده‌تر این فناوری‌ها ایفا کند. در مطالعات آینده، لازم است تحلیل‌های جامع هزینه-فایده شامل هزینه‌های تولید، نگهداری، مصرف انرژی و مزایای ناشی از کاهش استرس حرارتی به‌صورت دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان تصمیم‌گیری‌های بهینه‌تری در زمینه طراحی و کاربرد عملی این لباس‌های خنک‌کننده اتخاذ کرد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش بر طراحی یک لباس خنک‌کننده مایع قابل‌حمل (LCG) مبتنی بر تبرید ترموالکتریک متمرکز شده است. طراحی پیشنهادی به طور کامل قابل‌حمل بوده و هیچ‌گونه وابستگی به سیستم‌های جانبی خارج از لباس ندارد که آن را از سیستم‌های پیش‌تر توسعه‌یافته متمایز می‌کند؛ بنابراین، این مطالعه یک چارچوب سیستماتیک و روش گام‌به‌گام برای ارتقای قابلیت حمل لباس‌های خنک‌کننده مایع ترموالکتریک ارائه می‌دهد. طبق یافته‌ها، سیستم خنک‌کننده طراحی شده در این تحقیق، قادر به ارائه سرمایش یکنواخت در سطح بدن است و می‌تواند به طور مؤثری نیازهای سرمایشی کاربران در محیط‌های با دمای بالا را برآورده کند. لباس خنک‌کننده طراحی‌شده، بر پایه یک لباس کار از جنس ترکیبی پنبه-پلی‌استر ساخته شد که به دلیل استحکام مکانیکی مناسب، برای نصب اجزای پشتیبان و قطعات ترموالکتریک انتخاب گردید. بااین‌حال، به دلیل نفوذپذیری پایین بخار در

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

این نوع پارچه، کاهش رطوبت در ناحیه میکرو اقلیم تنها حدود ۷٪ بود. ازاین‌رو، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آتی از پارچه‌هایی بادوام مناسب و نفوذپذیری بخار بالاتر بهره گیرند تا آسایش حرارتی و عملکرد کلی سیستم بهبود یابد. توسعه لباس‌های خنک‌کننده مایع (LCG) شامل مباحث متعددی است و برای به‌دست‌آوردن نتایج دقیق‌تر، تلاش‌های بیشتری مورد نیاز است. یافته‌ها و روش‌شناسی ارائه‌شده در این مطالعه، بینش‌های ارزشمندی را برای پژوهش‌های آتی در راستای بهینه‌سازی لباس‌های خنک‌کننده قابل‌حمل جهت استفاده در محیط‌های با دمای بالا فراهم می‌سازد.

سپاس گزاری

این مطالعه مصوب دانشگاه علوم پزشکی ایران با کد طرح ۲۵۶۰۴ بوده است. نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از تمامی افرادی که در این پژوهش شرکت داشتند نهایت قدردانی و تشکر به عمل آورند.

حامی مالی

این مطالعه با حمایت مالی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی ایران انجام گرفته است.

تعارض در منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه منافع مالی یا شخصی، به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم که بتواند به‌عنوان تضاد منافع در ارتباط با این پژوهش تلقی شود، ندارند.

ملاحظات اخلاقی

پروپوزال این پژوهش، توسط کمیته اخلاق دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی ایران با کد اخلاق IR.IUMS.REC.1402.278 مورد تأیید قرار گرفته است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان مقاله به سهم خود در نگارش، تحلیل و تفسیر داده‌های مورد استفاده در این مقاله همکاری داشته‌اند.

References

1. Al Amin M, Chakraborty A. Impact of Physical Factors of Workplace Environment on Workers Performance in Industry. Journal of Engineering Science. 2022;12:57-66.
2. Park SJ, Jung M, Sung JH. Influence of Physical and Musculoskeletal Factors on Occupational Injuries and Accidents in Korean Workers Based on Gender and Company Size. Int J Environ Res Public Health. 2019;16(3).
3. Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Emergency preparedness and response: Heat stress [Internet]. Washington, D.C.: United States Department of Labor; 2023 [cited 2024 Jun 23]. Available from: https://www.osha.gov/emergency-preparedness/guides/heat-stress.
4. Venugopal V, Latha PK, Shanmugam R, Krishnamoorthy M, Srinivasan K, Perumal K, et al. Risk of kidney stone among workers exposed to high occupational heat stress - A case study from southern Indian steel industry. Science of The Total Environment. 2020;722:137619.
5. Masuda YJ, Parsons LA, Spector JT, Battisti DS, Castro B, Erbaugh JT, et al. Impacts of warming on outdoor worker well-being in the tropics and adaptation options. One Earth. 2024;7(3):382-400.
6. Logan PW, Bernard TE. Heat Stress and Strain in an Aluminum Smelter. American Industrial Hygiene Association Journal. 1999;60(5):659-65.
7. Gunga H-C. Chapter 5 - Desert and Tropical Environment. In: Gunga H-C, editor. Human Physiology in Extreme Environments. Boston: Academic Press; 2015. p. 161-213.
8. Cramer MN, Gagnon D, Laitano O, Crandall CG. Human temperature regulation under heat stress in health, disease, and injury. Physiol Rev. 2022;102(4):1907-89.
9. Lim CL. Fundamental Concepts of Human Thermoregulation and Adaptation to Heat: A Review in the Context of Global Warming. Int J Environ Res Public Health. 2020;17(21).
10. Hot Environments - Control Measures : OSH Answers. Available at:https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/heat_control.html.
11. Khan AA. Heat related illnesses. Review of an ongoing challenge. Saudi Med J. 2019;40(12):1195-201.
12. Mine Safety and Health Administration. Heat Stress [Internet]. Arlington (VA): United States Department of Labor; 2023 [cited 2024 Jun 24]. Available from: https://www.msha.gov/safety-and-health/safety-and-health-materials/heat-stress.
13. Ireland A, Johnston D, Knott R. Heat and worker health. Journal of Health Economics. 2023;91:102800.

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

14. Cheung SS, Lee JK, Oksa J. Thermal stress, human performance, and physical employment standards. Appl Physiol Nutr Metab. 2016;41(6 Suppl 2):S148-64.
15. Karter MJ, Molis JL. Firefighter Injuries in the United States [Internet]. Quincy (MA): National Fire Protection Association; 2023 [cited 2024 Jun 24]. Available from: https://www.nfpa.org/education-and-research/research/nfpa-research/fire-statistical-reports/firefighter-injuries-in-the-united-states.
16. International Labour Organization. Safe and healthy working environments free from violence and harassment [Internet]. Geneva: International Labour Organization; 2023 [cited 2024 Jun 24]. Available from: https://webapps.ilo.org/wcmsp5/groups/public/@ed_protect/@protrav/@safework/documents/publ.
17. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Heat stress in construction: Keeping workers safe in the heat [Internet]. NIOSH Science Blog. 2020 May 21 [cited 2024 June 5]. Available from: https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2020/05/21/heat-stress-construction/.
18. Gubernot DM, Anderson GB, Hunting KL. The epidemiology of occupational heat exposure in the United States: a review of the literature and assessment of research needs in a changing climate. Int J Biometeorol. 2014;58(8):1779-88.
19. Tejero-González A, Franco-Salas A. Direct evaporative cooling from wetted surfaces: Challenges for a clean air conditioning solution. WIREs Energy and Environment. 2021;11.
20. Krishnamurthy M, Ramalingam P, Perumal K, Kamalakannan LP, Chinnadurai J, Shanmugam R, et al. Occupational Heat Stress Impacts on Health and Productivity in a Steel Industry in Southern India. Safety and Health at Work. 2017;8(1):99-104.
21. Mokhtari Yazdi M, Sheikhzadeh M. Personal cooling garments: a review. The Journal of The Textile Institute. 2014;105(12):1231-50.
22. Sajjad U, Hamid K, Tauseef ur R, Sultan M, Abbas N, Ali HM, et al. Personal thermal management - A review on strategies, progress, and prospects. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2022;130:105739.
23. Młynarczyk M, Bartkowiak G, Dąbrowska A. Cooling Effect of Phase Change Materials Applied in Undergarments of Mine Rescuers in Simulated Utility Conditions on Thermal Manikin. Materials (Basel). 2022;15(6).
24. Rothmaier M, Weder M, Meyer-Heim A, Kesselring J. Design and performance of personal cooling garments based on three-layer laminates. Med Biol Eng Comput. 2008;46(8):825-32.
25. Rykaczewski K. Rational Design of Sun and Wind Shaded Evaporative Cooling Vests for Enhanced Personal Cooling in Hot and Dry Climates. Applied Thermal Engineering. 2020;171:115122.
26. Lou L, Shou D, Park H, Zhao D, Wu YS, Hui X, et al. Thermoelectric air conditioning undergarment for personal thermal management and HVAC energy saving. Energy and Buildings. 2020;226:110374.
27. YANG Yufei, YUAN Weixing, YANG Bo, LIAO Yibing. Study of a Portable Microclimate Cooling System Based on Vapor Compression Refrigeration Cycle[J]. ACTA AERONAUTICAET ASTRONAUTICA SINICA, 2013, 34(11): 2500-2509.
28. Morriesen, André; Resende, Frederico E.; Ramos, Luciana W. S. L.; Couto, Paulo R. C.; and Ribeiro, Guilherme Borges, "Personal Cooling System Based on Vapor Compression Cycle for Stock Car Racing Drivers" (2012). International Refrigeration and Ai Conditioning Conference. Paper 1239. http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1239.
29. Ernst T, Garimella S. Wearable Engine-Driven Vapor-Compression Cooling System for Elevated Ambients. Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2009;1.
30. Zhou Y, Lou L, Fan J. Quantitative Comparison of Personal Cooling Garments in Performance and Design: A Review. Processes. 2023; 11(10):2976. https://doi.org/10.3390/pr11102976.
31. Bartkowiak G, Dabrowska A, Marszalek A. Assessment of an active liquid cooling garment intended for use in a hot environment. Applied Ergonomics. 2017;58:182-9.
32. Zhang M, Li Z, Wang Q, Yuan T, Xu Y. Research on refrigerant optimization and characteristic parameters based on thermoelectric refrigeration cooling garment. Applied Thermal Engineering. 2022;212:118606.
33. Zhang M, Li Z, Xu Y, Wang J. Design and research of liquid cooling garments in thermal environment. International Journal of Refrigeration. 2022;139:136-47.
34. Li Z, Zhang M, Yuan T, Wang Q, Hu P, Xu Y. New wearable thermoelectric cooling garment for relieving the thermal stress of body in high temperature environments. Energy and Buildings.

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

2023;278:112600.
35. Xu Y, Li Z, Wang J, Zhang M, Jia M, Wang Q. Man-portable cooling garment with cold liquid circulation based on thermoelectric refrigeration. Applied Thermal Engineering. 2022;200:117730.
36. Cross A, Collard M, Nelson A. Body segment differences in surface area, skin temperature and 3D displacement and the estimation of heat balance during locomotion in hominins. PLoS One. 2008;3(6):e2464.
37. Wang L, Yin H, Di Y, Liu Y, Liu J. Human local and total heat losses in different temperature. Physiology & Behavior. 2016;157:270-6.
38. Young AJ, Sawka MN, Epstein Y, Decristofano B, Pandolf KB. Cooling different body surfaces during upper and lower body exercise. J Appl Physiol (1985). 1987;63(3):1218-23.
39. Sobolewski A, Młynarczyk M, Konarska M, Bugajska J. The influence of air humidity on human heat stress in a hot environment. International journal of occupational safety and ergonomics. 2021;27(1):226-36.
40. Laird Thermal Systems. Thermoelectric Handbook [Internet]. 2022 [cited 2024 Nov 25]. Available from: https://lairdthermal.com/sites/default/files/fields/media.file.field_media_file/2022-12/Thermoelectric-Handbook-060222.pdf.
41. Ismail Y, AlAskalany A. Thermoelectric Devices: Cooling and Power Generation. 2014.
42. Thermoelectric Solutions. How Thermoelectric Cooling Works [Internet]. Thermoelectric Solutions; [cited 2025 May 11]. Available from: https://thermoelectricsolutions.com/how-thermoelectric-cooling-works/
43. C. Jangonda, K. Patil, A. Kinikar, R. Bhokare and M. D. Gavali, "Review of Various Application of Thermoelectric Module" International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 5, Issue 3, pp. 3393-3400, March 2016.
44. Orion Industrial Electronics GmbH. ORION 18650/26 2600 mAh Lithium□Ion Cell Data Sheet [Internet]. c2021. Available from: https://static.ticimax.cloud/37661/uploads/dosyalar/orion-18650-2600.pdf.
45. Melasta Energy Co., Ltd. Lithium□Ion Cell 18650□2600 mAh Data Sheet [Internet]. c2021. Available from: https://www.melasta.com/web/userfiles/download/Lithium-ion-Cell-18650-2600mAh.pdf.
46. Zhang M, Li Z, Wang Q, Xu Y, Hu P, Zhang X. Performance investigation of a portable liquid cooling garment using thermoelectric cooling. Applied Thermal Engineering. 2022;214:118830.
47. Li Z, Yuan T, Hu P, Jia Q, Wang Q, Xu Y. Performance research of portable thermoelectric cooling garment under different working conditions. International Journal of Refrigeration. 2023.
48. Özkan ET, Kaplangiray B, Şekir U, Şahin Ş. Effect of different garments on thermophysiological and psychological comfort properties of athletes in a wear trial test. Sci Rep. 2023;13(1):14883.
49. Ernst TC, Garimella S. Demonstration of a wearable cooling system for elevated ambient temperature duty personnel. Applied Thermal Engineering. 2013;60(1):316-24.

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]

CC BY- NC 4.0

Performance Evaluation of a Thermoelectric Refrigeration-Based Liquid Cooling Garment under Different Ambient Temperatures

Afshari MJ [1], Rafieepour A [1], Alimohammadi I [1*]

[1] Occupational Health Research Center, Department of Occupational Health, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Abstract

Introduction: Heat stress is regarded as one of the major physical hazards in high-temperature work settings. Wearingcooling garments is one of the effective methods to reduce the negative impacts of such situations and enhance safety and performance in the environment. Among the various types of cooling garments, liquid cooling garments (LCGs) are recognized as one of the most efficient options for managing heat stress. However, existing LCG designs encounter several challenges in terms of design and performance that require further improvement.

Material And Methods: In this study, a portable liquid cooling garment based on thermoelectric refrigeration technology was designed and developed. The cooling system's efficiency in regulating temperature and humidity within the microclimate—the space between the skin surface and the garment—was evaluated under various ambient temperature conditions.

Results: The results indicated that the cooling garment could deliver consistentcooling throughout the body surface and significantly lower microclimate temperature. At ambient temperatures of 31°C, 35°C, and 39°C, the microclimate temperatures recorded were 27.2°C, 30.1°C, and 32.4°C, respectively. Moreover, the cooling system reduced microclimate humidity by up to 7% compared to its inactive state.

Conclusion: The findings of this study show that the liquid cooling garment utilizing semiconductor refrigeration can effectively enhance the body's thermal conditions in high-tempreture settings. Utilizing this type of garment in work enviornments with heat stress can significantly contribute in lowering thermal strain and enhancing users' thermal comfort. However, further research in this field remains essential.

Key words: Liquid cooling garment, Heat stress, Thermoelectric cooling

This paper should be cited as:

Afshari MJ, Rafieepour A, Alimohammadi I. ***Performance Evaluation of a Thermoelectric Refrigeration-Based Liquid Cooling Garment under Different Ambient Temperatures***. Occupational Medicine Quarterly Journal. 2025:17(2): 12-26.

**** Corresponding Author***
Email: Irajrastin1@gmail.com
Tel: 021 86774749
Received: 2025.04.13 ***Accepted: 2025.06.30***

CC BY- NC 4.0

[Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-18]

[DOI: 10.18502/tkj.v17i2.19116]