طراحی و ساخت جلیقه خنک‌کننده از مواد تغییر فاز دهنده و ارزیابی کارایی آن در کاهش استرین گرمایی تحت شرایط آزمایشگاهی

سعید یزدانی راد[۱]، حبیب الله دهقان[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۵ /۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۲۳

چکیده

مقدمه: پارافین و آب مواد تغییر فاز شناخته شده‌ای برای کاربرد در جلیقه‌های خنک‌کننده هستند. هدف از انجام این مطالعه طراحی و ساخت جلیقه خنک‌کننده با استفاده از ترکیبات پارافین تجاری و یخ و سپس تعیین تأثیر آن‌ها بر روی پارامترهای استرین گرمایی تحت شرایط آب و هوایی گرم در اتاقک شرایط جوی بود.

مواد و روش‌ها: ابتدا یک جلیقه خنک‌کننده از پارچه پلی‌استر با ۱۷ بسته آلومینیومی طراحی و ساخته شد. هر بسته آلومینیومی با ۷۲ گرم آب و ۶۵ گرم پارافین تهیه‌شده پر شد. سپس ۱۰ نفر از دانشجویان در اتاقک شرایط جوی تحت شرایط گرم (دمای خشک = $40^{O}C$ و رطوبت نسبی = ۴۰٪) آزمون را با جلیقه خنک‌کننده و بدون جلیقه خنک‌کننده در دو شدت فعالیت سبک (۲/۸ کیلومتر در ساعت) و متوسط (۴/۸ کیلومتر در ساعت) بر روی تردمیل انجام دادند. در هر مرحله از آزمون، مدت استراحت ۳۰ دقیقه و مدت فعالیت بر روی تردمیل نیز ۳۰ دقیقه بود. در طول انجام آزمون نیز ضربان قلب، دمای دهانی و دمای پوست اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: گرمای نهان پارافین تهیه‌شده ۱۰۸ kJ/kg و پیک نقطه ذوب ^{0}C ۳۰ بود. نتایج آنالیز آماری نشان داد که اختلاف میانگین پارامترهای ضربان قلب، دمای دهانی، دمای پوست، میزان تعریق افراد در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده در هر دو شدت فعالیت معنی‌دار بود ($p<0.05$).

نتیجه‌گیری: جلیقه خنک‌کننده محتوی پارافین و یخ می‌تواند استرین حرارتی را از طریق کاهش دادن ضربان قلب، دمای دهانی، دمای پوست و میزان تعریق کاهش دهد.

کلمات کلیدی: جلیقه خنک‌کننده، مواد تغییر فاز، استرین حرارتی، شرایط دمایی گرم

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان.ایران.
۲. * **(نویسنده مسئول)** استادیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان.ایران. پست الکترونیکی: ha_dehghan@hlth.mui.ac.ir

مقدمه

یکی از عوامل زیان‌آور در محیط‌های کاری گرما می‌باشد که ممکن است منشأ فرایندی داشته باشد و یا در اثر شرایط آب و هوایی منطقه ایجاد شود (۱ و۲). در صورت عدم کنترل، گرما باعث بروز بیماری‌هایی نظیر سنکوپ گرمایی، خستگی گرمایی، کرامپ گرمایی، شوک گرمایی، گیجی، کاهش تمرکز و خستگی می‌شود (۵-۳).

یکی از راهکارهای موجود برای رهایی از گرما و رسیدن به یک وضعیت راحتی گرمایی در محیط‌های گرم، استفاده از جلیقه‌های خنک کننده فردی است که گرمای اضافی را جذب می‌کند (۸-۶). جلیقه‌های خنک‌کننده خود به دو دسته تقسیم می‌شوند: جلیقه‌های مایع یا هوای خنک شده و جلیقه‌های مواد تغییر فاز (۹). مواد تغییر فاز ((Phase Change Materials (PCM می‌توانند مقدار زیادی انرژی را در شکل گرمای نهان در یک گستره دمایی باریک تعریف شده در طول تغییر فاز بین دو حالت ماده جذب ، ذخیره و یا رها کنند (۱۰). از بین مواد تغییر فاز مختلف شناخته‌شده‌ترین PCM آب است که در صفر درجه سلسیوس تبدیل به یخ می‌شود و یک ظرفیت انبارش گرمای نهان ۳۳۵ ژول بر گرم دارد. فواید جلیقه‌های یخ شامل: گرمای نهان ذوب بالا، در دسترس بودن و ارزان بودن، بی‌ضرر بودن و غیر محرک بودن برای پوست می‌باشد و اما یکی از مشکلات یخ این است که در تماس طولانی‌مدت با پوست می‌تواند سبب آسیب بافتی پوست شود که به همین دلیل استفاده از آن را محدود کرده است (۱۱). یکی دیگر از PCM های معروف پارافین‌ها هستند. پارافین‌ها یک خانواده از هیدروکربن‌ها با فرمول کلی C_nH_{2n+2} هستند (۱۲). پارافین‌ها نقطه‌جوش بالا و پایداری بالا تا ۲۵۰ درجه سلسیوس دارند. آن ها از لحاظ شیمیایی پایدارند و هیچ جداسازی فازی نشان نمی‌دهند. دارای حداقل فوق تبرید (Super Cooling) در طول تغییر فازهای تکراری، غیر سمی، غیر خورنده، بی‌بو و بی‌ضرر می‌باشند و به‌آسانی قابل‌دسترس‌اند (۱۳). به علت دمای تغییر فاز بالاتر نسبت به آب، قدرت انجماد کمتری برای انجماد پارافین‌ها موردنیاز است و ناراحتی کمتری را به علت تماس یک سطح سرد نزدیک بدن ایجاد می‌کنند (۱۳) و اما بعضی از معایب پارافین‌ها عبارت‌اند از: هدایت گرمایی پایین و دانسیته انبارش گرمایی پایین (۱۵ و۱۴). پارافین‌ها به‌طور خالص گران هستند ولی ترکیبات تجاری آن‌ها که دارای هیدروکربن‌های متفاوتی هستند، ارزان است و گرمای نهان ذوب کمتری نسبت به پارافین های خالص دارد. چون ترکیبات تجاری پارافین گرمای نهان ذوب پایینی دارند ولی ایجاد تحریک پوستی نمی کند و از سوی دیگر چون یخ گرمای نهان ذوب بالا دارد ولی ایجاد تحریک پوستی می کند فرض شد که ساخت بسته های محتوی یخ و پارافین در کنار هم بتواند معایب یخ و پارافین را پوشش دهد. به همین دلیل هدف از انجام این مطالعه طراحی و ساخت جلیقه خنک‌کننده فردی با استفاده از ترکیبات پارافین تجاری در دسترس و یخ و سپس تعیین تأثیر آن بر روی پارامترهای استرین گرمایی تحت شرایط آب و هوایی گرم در اتاقک شرایط جوی بود تا با استفاده از تهیه جلیقه‌های ارزان‌قیمت پارافین و همچنین کاهش وزن این جلیقه ها با افزایش گرمای نهان جلیقه بتوان استرین گرمایی را به نحو مطلوبی در محیط‌های گرم کنترل کرد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه شامل ۳ مرحله تعیین نسبت ترکیب مواد تغییر فاز، طراحی و ساخت جلیقه خنک‌کننده و ارزیابی اثربخشی جلیقه خنک‌کننده بود.

تعیین نسبت ترکیب مواد تغییر فاز:

برای استفاده مناسب از مواد تغییر فاز باید نقطه ذوب این مواد نزدیک و پایین‌تر از دمای پوست باشد تا هم اتلاف گرمایی کافی و هم آسایش حرارتی مطلوبی را فراهم کند. به همین دلیل در این مرحله با استفاده از ترکیبات پارافین تجاری، یک ترکیب پارافین با نقطه ذوب مناسب در گستره ۱۵ تا ۳۵ درجه آماده شد (۱۶). برای تخمین نسبت ترکیب پارافین‌ها، پارافین‌های تجاری مختلف با نسبت‌های متفاوت با هم ترکیب شدند و سپس برای تعیین نقطه ذوب به‌طور تقریبی نیز ابتدا ترکیب پارافین آماده‌شده به‌وسیله گرم‌کن گرم شد و پس از قطع گرما، به‌وسیله دماسنج به‌طور چشمی دمایی که ترکیب شروع به جامد شدن کرد به‌عنوان نقطه ذوب در نظر گرفته شد. ۴۰ آزمایش برای تخمین این نسبت صورت گرفت. پس از تهیه چند نمونه پارافین با نقطه ذوب تقریبی مناسب، برای اندازه‌گیری ویژگی‌های گرمایی دقیق پارافین نظیر نقطه ذوب و گرمای ذوب از تکنیک کالری‌متری پویشی تفاضلی (Differential Scanning

((Calorimeter (DSC استفاده شد. آنالیز با استفاده از دستگاه DSC200F3Maia و ظروف آلومینیومی انجام شد. این آنالیز با میزان افزایش گرمایی ثابت (۱۰ C/min) در گستره دمایی ۲۰- تا ۹۰ درجه سلسیوس و تحت جریان حجمی ۵۰ میلی‌لیتر در دقیقه گاز نیتروژن بر اساس متد ASTM D314-12 انجام شد. اینیدیم نیز قبل از انجام آزمون برای کالیبراسیون دستگاه استفاده گردید (۱۲).

طراحی و ساخت جلیقه خنک‌کننده:

در این مرحله ابتدا بسته‌های پارافین و یخ تهیه شد. به علت پایین بودن هدایت گرمایی پارافین از بسته‌های آلومینیومی با ضخامت ۰/۱۲۵ میلی‌متر و ضریب هدایت حرارتی ۲۳۷ w/m.k استفاده شد. داخل بسته‌های آلومینیومی، یخ و پارافین کنار هم قرار داده شد که برای تهیه آن یک بسته آلومینیومی توسط تیغه آلومینیومی به دو قسمت تقسیم شد و یک قسمت با ۷۲ گرم آب و قسمت دیگر با ۶۵ گرم پارافین پر شد. سپس از طریق گرما درب بسته‌ها بسته شدند. تعداد بسته‌ها در هر جلیقه نیز ۱۷ عدد در نظرگرفته شد. وزن هر یک از بسته‌ها ۱۴۵ گرم و وزن کلی جلیقه ۲/۶ کیلوگرم بود. چون در تعدادی از مقالات جنس جلیقه از پلی‌استر انتخاب شده بود (۱۸ و۱۷ و۱۳)، جلیقه از پارچه پلی‌استر و با الگوی قابل تنظیم بر اساس سایز افراد طراحی و دوخته شد. در داخل جلیقه نیز تعداد ۱۷ جیب برای جاسازی بسته‌های خنک‌کننده تعبیه شد. تعداد جیب‌ها در جلوی بالاتنه ۸ عدد و در ناحیه پشت بالاتنه ۹ عدد بود.

ارزیابی اثربخشی جلیقه خنک‌کننده:

برای ارزیابی اثربخشی جلیقه خنک‌کننده یک پژوهش مداخله‌ای در اتاقک شرایط جوی بر روی ۱۰ نفر از دانشجویان پسر انجام شد. معیار ورود افراد به مطالعه شامل: عدم سوابق بیماری‌های قلبی- عروقی، ریوی، عصبی- عضلانی، اسکلتی- عضلانی، صرع، تشنج، دیابت، عدم مصرف داروهای فشارخون و داروهای تأثیرگذار بر ضربان قلب، عدم مصرف قهوه، کافئین و الکل ۱۲ ساعت قبل از انجام تست و معیارهای خروج از مطالعه نیز شامل افزایش ضربان قلب بیش از ۱۸۰ ضربه در دقیقه و خستگی مفرط بود (۱۹). داوطلبین جهت دارا بودن معیارهای ورود به مطالعه توسط پزشک معاینه شدند. سپس فرم رضایتمندی جهت شرکت در مطالعه به افراد داده شد و در مورد نحوه پر کردن پرسشنامه‌ها و معیارهای عدم ورود به مطالعه با آن‌ها صحبت شد. اطلاعات دموگرافیک افراد مثل سن نیز جمع‌آوری گردید. جهت جلوگیری از اثرات متفاوت لباس‌های داوطلبان بر روی استرین حرارتی و یکسان‌سازی شرایط استفاده از جلیقه‌ها نیز همه داوطلبان از یک نوع لباس کار مشابه استفاده کردند. برای شارژ کردن بسته‌های خنک‌کننده یک شب قبل از آزمایش، در فریزر نگه‌داری شد. در این مطالعه آزمایش‌ها بر روی افراد تحت شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک ۴۰c، رطوبت نسبی ۴۰٪ در اتاقک شرایط جوی انجام گردید. هر فرد ۴ مرتبه آزمون را انجام داد. حالت‌های انجام آزمون بدون جلیقه خنک‌کننده با شدت فعالیت سبک، با جلیقه خنک‌کننده پارافین و یخ با شدت فعالیت سبک، بدون جلیقه خنک‌کننده با شدت فعالیت متوسط و با جلیقه خنک‌کننده پارافین و یخ با شدت فعالیت متوسط بود. برای شدت فعالیت سبک بر روی تردمیل (مدل ketler) سرعت ۲/۸ کیلومتر در ساعت و شیب ۰٪ و برای شدت فعالیت متوسط نیز سرعت ۴/۸ کیلومتر در ساعت و شیب ۰٪ تنظیم شد (۲۰). نحوه انجام آزمون نیز بدین صورت بود که در هنگام انجام تست ابتدا شرکت‌کننده به مدت ۳۰ دقیقه استراحت کرد و سپس دمای بدن شامل دمای دهانی و ضربان قلب او گرفته شد. بعد از آن فرد به مدت ۳۰ دقیقه بر روی تردمیل فعالیت کرد (۲۱). جهت ارزیابی استرین گرمایی ضربان قلب، دمای دهانی و دمای پوست اندازه‌گیری شد. در طول انجام تست ضربان قلب به فاصله هر ۲ دقیقه (با استفاده از اسپورت تسترpolar) و دمای دهانی (با استفاده از دماسنج دهانی Beurer با دقت ۰/۱ درجه سلسیوس) و دمای پوست (با استفاده از دستگاه سنجش دمای پوست مدل Sina RT-923 با دقت ۰/۰۱ درجه سلسیوس) هم به فاصله هر ۴ دقیقه اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری میزان تعریق نیز وزن افراد (با استفاده از ترازوی دیجیتال مدل Hamilton با دقت ۰/۱ کیلوگرم) قبل و بعد از انجام هر مرحله از فعالیت اندازه‌گیری شد. در طول انجام آزمون نیز افراد هیچ‌گونه نوشیدنی مصرف نکردند. برای محاسبه درصد میزان تعریق کاهش یافته در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده نیز از فرمول زیر استفاده شد:

۱۰۰* (میزان تعریق فعالیت بدون جلیقه / (میزان تعریق فعالیت با جلیقه - میزان تعریق فعالیت بدون جلیقه))

نهایتاً تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 16 انجام گرفت. آزمون Kolmogrov–Smirnov برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها و آزمون Repeated Measurement ANOVA برای تعیین P- value استفاده گردید.

یافته‌ها

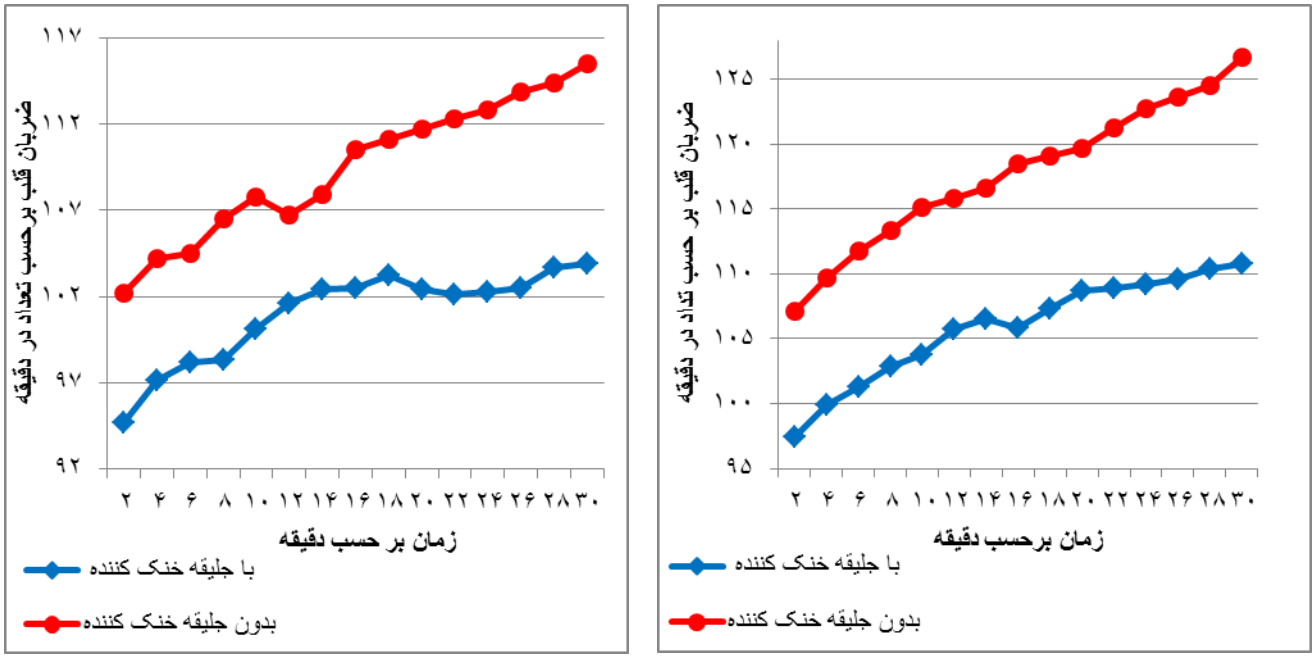
نتایج آنالیز گرمایی پارافین با استفاده از تکنیکDSC نشان داد که ترکیب پارافین تهیه شده دارای گرمای نهان ذوب ۱۰۸ kJ/kg، گستره دمایی تغییر فاز ۲۴ تا ۳۴ درجه سلسیوس و پیک نقطه ذوب ۳۰ درجه سلسیوس می‌باشد. گرمای نهان ذوب یخ مورد استفاده نیز ۳۳۵ kJ/kg بود و گرمای نهان بسته‌های آماده شده (محتوی ۷۲ گرم آب و ۶۵ گرم پارافین) ۲۲۷ kJ/kg بود.

میانگین و انحراف معیار سن افراد شرکت‌کننده به ترتیب ۲۵/۱ و ۳/۶۶ بود. مقادیر دامنه، میانگین و انحراف معیار پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده در جدول ۱ آورده شده است. آزمون Kolmogrov – Smirnov نشان داد که توزیع داده‌ها نرمال می‌باشد ($P > 0.05$). نتایج تحلیل آماری نیز نشان داد که اختلاف دمای خشک و رطوبت نسبی در دو حالت فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده در هر دو شدت فعالیت سبک و متوسط اختلاف معنی‌داری ندارد و شرایط در دو حالت یکسان است. میانگین و انحراف معیار دمای خشک در طول فعالیت‌ها به ترتیب ۴۰/۰۴ و ۰/۳۸ و میانگین و انحراف معیار رطوبت نسبی در طول فعالیت‌ها به ترتیب ۴۱/۷۴ و ۰/۶۳ بود.

جدول ۱- مقادیر مربوط به زیرشاخه‌های پرسشنامه آزار صدا به تفکیک بیمارستان‌های مورد مطالعه (n=۳۰۰)

پارامترها	شدت فعالیت سبک			شدت فعالیت متوسط		
	دامنه	میانگین	انحراف معیار	دامنه	میانگین	انحراف معیار
ضربان قلب استراحت (تعداد در دقیقه)	۹۴- ۶۵	۸۱/۵۳	۱۰/۱۷	۹۶- ۶۷	۸۱/۷۱	۸/۳۴
ضربان قلب فعالیت با جلیقه خنک‌کننده (تعداد در دقیقه)	۱۲۱- ۸۲	۱۰۱/۰۸	۱۲/۱۹	۱۳۶- ۹۱	۱۰۵/۸۸	۱۲/۷۴
ضربان قلب فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده (تعداد در دقیقه)	۱۳۳- ۹۰	۱۰۹/۴۷	۱۳/۸۲	۱۵۲- ۱۰۲	۱۱۷/۷۱	۱۴/۷۶
دمای دهانی استراحت (درجه سلسیوس)	۳۶/۹- ۳۶/۱	۳۶/۴۹	۰/۳۰	۳۶/۸- ۳۶/۲	۳۶/۴۸	۰/۱۹
دمای دهانی فعالیت با جلیقه خنک‌کننده (درجه سلسیوس)	۳۷/۱- ۳۶/۱	۳۶/۶۴	۰/۳۱	۳۷/۰- ۳۶/۱	۳۶/۵۳	۰/۲۷
دمای دهانی فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده (درجه سلسیوس)	۳۷/۲- ۳۶/۵	۳۶/۸۷	۰/۲۸	۳۷/۴- ۳۶/۷	۳۶/۹۶	۰/۲۲
دمای پوست استراحت (درجه سلسیوس)	۳۵/۴۷- ۳۴/۶۱	۳۵/۰۷	۰/۲۶	۳۵/۳۷- ۳۴/۶۹	۳۵/۰۴	۰/۲۲
دمای پوست فعالیت با جلیقه خنک‌کننده (درجه سلسیوس)	۳۳/۲۲- ۲۴/۵۵	۲۹/۸۵	۳/۱۰	۳۱/۸۳- ۲۴/۷۵	۲۸/۵۰	۲/۳۵
دمای پوست فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده (درجه سلسیوس)	۳۶/۵۷- ۳۳/۴۴	۳۵/۶۰	۰/۹۸	۳۷/۱۷- ۳۳/۳۵	۳۵/۶۴	۱/۳۷
میزان تعریق فعالیت با جلیقه خنک‌کننده (کیلوگرم)	۰/۳- ۰/۱	۰/۱۵	۰/۰۷	۰/۳- ۰/۱	۰/۱۷	۰/۰۶۷
میزان تعریق فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده (کیلوگرم)	۰/۳- ۰/۱	۰/۲۶	۰,۰۷	۰/۷- ۰/۲	۰/۳۶	۰/۱۵

مقادیر میانگین ضربان قلب افراد در دقیقه ۲ تا دقیقه ۳۰ به‌صورت هر دو دقیقه یک‌بار در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده برای شدت فعالیت سبک و متوسط در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج آنالیز آماری نشان داد که مقادیر میانگین ضربان قلب در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده در هر دو شدت فعالیت سبک ($P<0.001$) و متوسط ($P<0.001$) دارای اختلاف معنی‌داری است.



A B

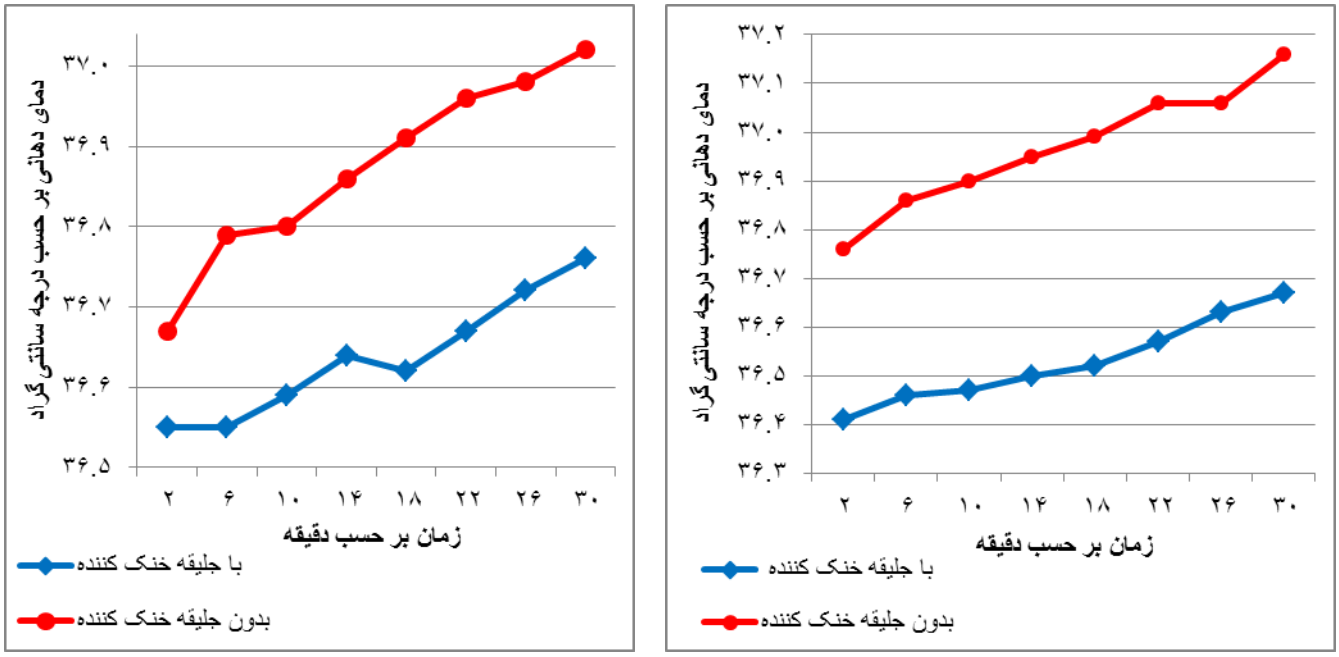
شکل ۱: مقادیر میانگین ضربان قلب در دقیقه ۲ تا دقیقه ۳۰ به‌صورت هر دو دقیقه یک‌بار در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده: A: در شدت فعالیت سبک، B: در شدت فعالیت متوسط

مقادیر میانگین دمای دهانی افراد نیز در دقیقه ۲ تا دقیقه ۳۰ به‌صورت هر چهار دقیقه یک‌بار در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده برای شدت فعالیت سبک و متوسط به ترتیب در شکل۲ نشان داده شده است. نتایج آنالیز آماری نیز نشان داد که مقادیر میانگین دمای دهانی در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده در هر دو شدت فعالیت سبک ($P=0.004$) و متوسط ($P<0.001$) اختلاف معنی‌داری داشت.

مقادیر میانگین دمای پوست افراد در دقیقه ۲ تا دقیقه ۳۰ به‌صورت هر چهار دقیقه یک‌بار در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده برای شدت فعالیت سبک و متوسط به ترتیب در شکل ۳ نمایش داده شده است.

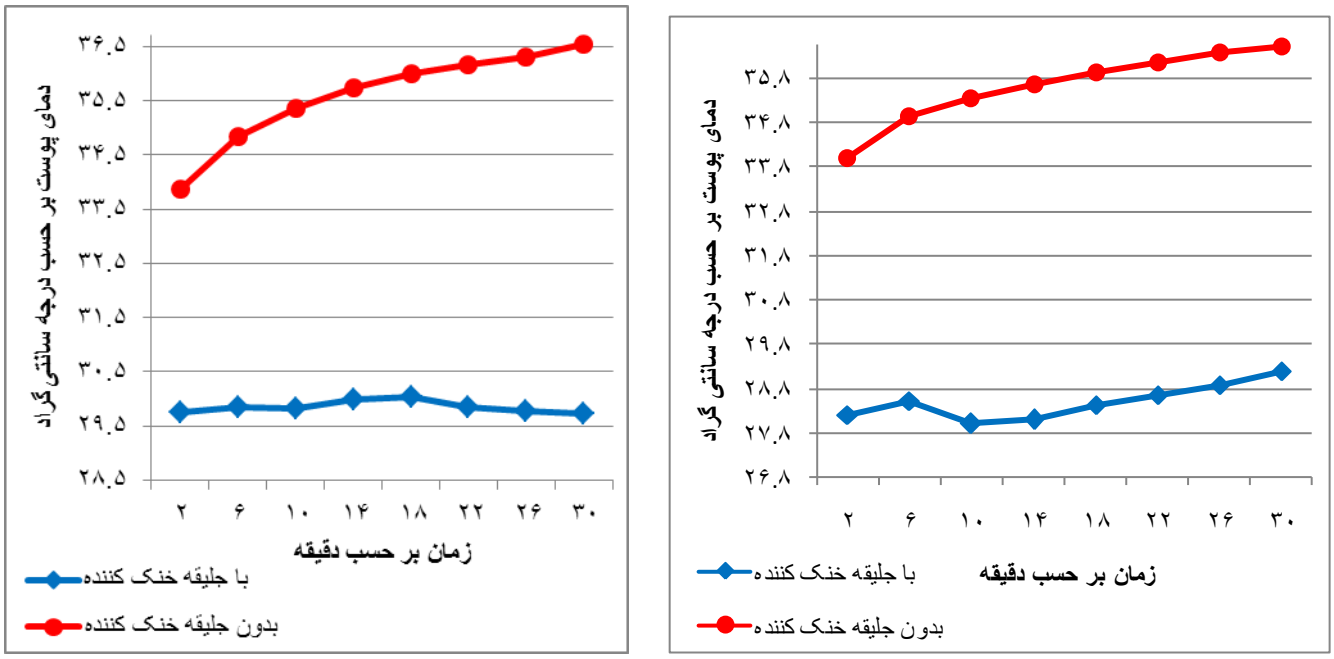
مقادیر میانگین دمای پوست در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده در هر دو شدت فعالیت سبک ($P<0.001$) و متوسط ($P<0.001$) نیز اختلاف معنی‌داری داشت.

همچنین اختلاف میانگین تغییرات ضربان قلب، دمای دهانی و دمای پوست در زمان فعالیت نسبت به استراحت نیز در هنگام استفاده از جلیقه‌های خنک‌کننده و بدون استفاده از جلیقه خنک‌کننده در هر دو شدت فعالیت سبک و متوسط معنی‌دار بود ($P<0.05$). مقادیر میانگین میزان تعریق نیز در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک در هر دو شدت فعالیت سبک ($P=0.01$) و متوسط ($P<0.001$) اختلاف معنی‌داری داشت. درصد میزان تعریق کاهش یافته در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده برای شدت فعالیت سبک ۴۲ درصد و برای شدت فعالیت متوسط ۵۲ درصد بود.



A B

شکل ۲: مقادیر میانگین دمای دهانی در دقیقه ۲ تا دقیقه ۳۰ به‌صورت هر چهار دقیقه یک‌بار در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کنندهA::
در شدت فعالیت سبک، B: در شدت فعالیت متوسط



A B

شکل ۳: مقادیر میانگین دمای پوست در دقیقه ۲ تا دقیقه ۳۰ به‌صورت هر چهار دقیقه یک‌بار در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده و فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده
A: در شدت فعالیت سبک، B: در شدت فعالیت متوسط

بحث

در این مطالعه تجربی مقادیر میانگین ضربان قلب، دمای دهانی، دمای پوست و میزان تعریق افراد در دو شدت فعالیت سبک و متوسط در مواجهه با شرایط گرم در هنگام استفاده از جلیقه خنک‌کننده به‌طور معنی‌داری کمتر از زمانی بود که افراد از جلیقه خنک‌کننده استفاده نکردند. این در شرایطی است که تمام پارامترهای شرایط جوی در تمام مراحل انجام آزمون اختلاف معنی‌داری نداشتند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف بین مقادیر میانگین ضربان قلب، دمای دهانی، دمای پوست و میزان تعریق افراد در این آزمون تحت تأثیر اثر خنک‌کنندگی جلیقه قرار گرفته اند. این نوع از سیستم‌های خنک‌کننده قادر به دفع گرمای بخشی از سطح بدن هستند و چون ناحیه بالاتنه بیشترین ظرفیت را برای دفع گرما نسبت به سطوح دیگر بدن دارا است خنک‌سازی از طریق این ناحیه می‌تواند نتایج مطلوبی را به همراه داشته باشد (۲۲).

در واقع مکانیسم عمل خنک‌سازی این جلیقه خنک‌کننده بدین صورت است که دمای پوست قسمت بالاتنه از طریق مکانیسم هدایتی بین پوست و بسته‌های خنک‌کننده کاهش می‌یابد. همچنین حرکت بر روی تردمیل باعث حرکت جلیقه و هوای بین جلیقه و پوست می‌شود که این اثر پمپینگ نیز می‌تواند باعث افزایش انتقال گرما از پوست و کاهش دمای پوست شود. این گرادیان دمایی بین دمای پوست و دمای عمقی بدن می‌تواند انتقال گرما را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد و از این طریق باعث کاهش دمای عمقی بدن و به دنبال آن کاهش دمای دهانی شود (۲۳).

با توجه به اینکه بین تغییرات دمایی بدن و ضربان قلب همبستگی خوبی وجود دارد و تغییرات دمای عمقی می‌تواند روی ضربان قلب مؤثر باشد این تغییر دمای عمقی باعث تغییر در ضربان قلب نیز می‌شود (۲۴). این فرض‌ها به‌وسیله یافته‌های ما که نشان می‌دهد در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده در هر دو شدت فعالیت سبک و متوسط دمای پوست بالاتنه، دمای دهانی و ضربان قلب نسبت به فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده کاهش قابل توجهی داشته است پشتیبانی می‌شود. همچنین نتایج مطالعه نشان داد که فعالیت با جلیقه خنک‌کننده باعث کاهش میزان تعریق می‌شود. تبخیر عرق، به‌عنوان یک مکانیسم برای دفع گرمای اضافی در اثر افزایش دمای پوست و دمای عمقی بدن، افزایش می‌یابد و زمانی که دمای پوست و دمای عمقی بدن پایین باشد مقدار آن کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از جلیقه خنک‌کننده می‌تواند در هنگام فعالیت سبک ۴۲ درصد از کل تعریق و در هنگام فعالیت متوسط ۵۲ درصد از کل تعریق را کاهش دهد که این عامل می‌تواند از بروز کم‌آبی افراد در محیط‌های گرم پیشگیری کند. در وضعیت کم‌آبی بدن، حجم خون در گردش کاهش می‌یابد و ضربان قلب برای جبران آن افزایش می‌یابد. کاهش حجم خون و افزایش هموتوکریت منجر به افزایش ویسکوزیته خون می‌شود و با افزایش ویسکوزیته خون، توزیع و جابه‌جایی حرارت ذخیره‌شده در بدن کاهش می‌یابد و دمای عمقی بدن نیز به دنبال آن افزایش می‌یابد که افزایش دمای دهانی را نیز به دنبال دارد (۲۵). همچنین نمودارهای موجود در قسمت یافته‌ها نشان می‌دهد که سرعت افزایش دمای پوست، دمای دهانی و ضربان قلب در هنگام فعالیت با جلیقه خنک‌کننده نسبت به فعالیت بدون جلیقه خنک‌کننده در هر دو شدت فعالیت سبک و متوسط کمتر است که می‌تواند به علت موارد مذکور باشد.

در کل نتایج نشان داد که از طریق کنترل پارامترهای ذکرشده با استفاده از این جلیقه خنک‌کننده می‌توان استرین گرمایی را کاهش داد. نتایج بعضی از مطالعات بر روی جلیقه‌های خنک‌کننده پارافین نیز اثر این جلیقه‌ها را بر روی کنترل استرین گرمایی نشان می‌دهد. در مطالعه جوانوویک و همکاران در سال ۲۰۱۳، از ماده پارافین ان هگزان خالص با گستره دمایی تغییر فاز ۱۳/۸ تا ۲۱/۲ و پیک نقطه ذوب ۱۸ درجه سلسیوس در ساخت جلیقه خنک‌کننده استفاده شد. گرمای نهان ذوب ان هگزان ۲۳۷ kJ/kg بود. در مطالعه مذکور ۱۰ سرباز مرد آموزش‌دیده در اتاقک شرایط جوی دو تست شامل یکی با جلیقه خنک‌کننده پارافین و دیگری بدون جلیقه خنک‌کننده انجام دادند. دمای هوای اتاقک ۴۰ درجه سلسیوس، سرعت تردمیل ۵/۵ کیلومتر در ساعت بود. نتایج نشان داد که این جلیقه قادر است استرین فیزیولوژیک را از طریق کاهش معنی‌دار دمای رکتال و دمای پوست کاهش دهد (۲۶). البته باید به این نکته توجه کرد که پارافین‌های خالص گران‌قیمت بوده و کاربرد صنعتی این نوع جلیقه‌ها را محدود می‌کند. نتایج مطالعه حاضر که بر روی پارافین‌های تجاری

ارزان‌قیمت و یخ انجام شد نشان داد کـه گرمـای نهـان ذوب ترکیـب پـارافین آمـاده شـده kJ/kg ۱۰۸ بـود و زمـانی کـه همـراه یـخ در بسته‌های آلومینیومی استفاده شد گرمای نهان ذوب آن درمجموع بـه kJ/kg ۲۲۷ افزایش یافت که این مقدار نزدیک به گرمای نهـان ذوب ان هگزان خالص در مطالعه جوانوویک و همکاران است. علاوه بر ایـن دامنه ذوب و نقطه ذوب بالاتر ترکیب پارافین آمـاده شـده در مطالعـه حاضر نسبت به ان هگزان باعث افزایش مدت زمان اثـر خنـک‌سـازی جهت استفاده در محیط‌های گرم و کاهش ایجـاد تحریـک پوسـت در اثر دمای پایین می‌شود. تعدادی از مطالعات نیز اثربخشی جلیقه‌هـای یخ را در کنترل استرین گرمایی نشان می‌دهد.

به‌طور مثال در مطالعه لومـالا و همکـاران در سـال ۲۰۱۲ بـر روی ۷ دوچرخه‌سوار آموزش‌دیده، عملکرد جلیقه محتـوی یـخ بررسـی شـد. آزمون تحت شرایط ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسـبی ۴۰ درصـد انجام شد. نتایج نشان داد که جلیقه یخ به‌طور قابل تـوجهی اسـترین فیزیکـی و گرمـایی را کـاهش مـی‌دهـد و بـه دنبـال آن عملکـرد دوچرخه‌سواری را بهبود می‌بخشد به‌طوری که زمـان تمـرین بـه‌طـور قابل توجه از ۶۱ دقیقه به ۷۴ دقیقه افزایش یافت (۲۷).

همچنـین در مطالعـه barr و همکـاران در سـال ۲۰۰۹ بـر روی ۹ آتش‌نشان آموزش‌دیده نیز، عملکرد یک نوع جلیقه خنک‌کننده دارای دو بسته یخ در عقب و جلو بررسی شـد. افـراد در شـرایط ۵۰ درجـه سلسـیوس و رطوبـت نسـبی ۱۴ درصـد روی تردمیـل بـا سـرعت ۵ کیلومتر در ساعت و شیب ۷/۵ درصد راه رفتنـد. نتیجـه مطالعـه نیـز نشان داد که بکار بردن جلیقه‌های خنک‌کننده یخ در بهبـود وضـعیت قلبی عروقی و تنظیم گرمایی بـدن در آتـش‌نشـانان در طـول تمـرین مؤثر است (۲۸).

نتایج مطالعات مذکور در کنترل استرین گرمایی به علت گرمای نهـان ذوب بسیار خوب یخ (kJ/kg ۳۳۵) است که می‌توانـد مقـدار زیـادی گرما را از بدن افراد جذب کند ولی چون نقطه ذوب یـخ صـفر درجـه سلسیوس است باعث ایجاد تحریـک پوسـتی و احسـاس نـاراحتی در افراد می‌شود. به همین دلیل در مطالعه حاضر این مشکل بـا اسـتفاده از یک‌لایه پارافین که پیک نقطه ذوب آن نزدیک دمای پوست بود، بر روی یخ در بسته‌های آلومینیومی برطرف گردید تا هم از گرمای نهان ذوب بالای یخ استفاده شود و هم بـا اسـتفاده از پـارافین آمـاده شـده تحریک پوستی ایجاد نشود. به‌طوری که نتایج مطالعه حاضر نشان داد که دمای پوست در هنگام استفاده از این جلیقه خنک‌کننـده نزدیـک دمای طبیعی پوست می‌باشد و بسته‌های خنک‌کننده باعـث تحریـک پوستی از طریق ایجاد سرمای شدید نمی‌شوند. استفاده از یخ در کنار پارافین ظرفیت انبارش گرمای نهان بسته‌ها را نسـبت بـه بسـته‌هـای حاوی پارافین افزایش می‌دهد که این عامل باعث افزایش مدت زمـان استفاده از این جلیقه می‌شود.

در ایران نیز فقط یک نوع جلیقه خنک‌کننده از مواد تغییر فاز طراحی شده است و نتیجه مطالعه دهقان و همکاران نیز که در تابستان سـال ۲۰۱۴ بـر روی ۶ نفـر از دریـانوردان بخـش موتورخانـه یـک کشـتی نفت‌کش در شرایط آب و هوایی گرم و مرطـوب خلـیج فـارس انجـام گرفت، نشان داد که جلیقه‌های خنک‌کننده حـاوی بسـته‌هـای مـاده تغییر فاز ایرانی موجب کاهش استرین گرمایی (دمای دهانی و گرمای درک شده) می‌شود (۲۹)؛ که البته نوع ماده تغییر فـاز بـه کـار بـرده شده در این جلیقه مشخص نیست.

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که استفاده از ترکیب پارافین آماده شده از مواد تجاری ارزان‌قیمت همراه با یـخ در داخـل بسـته‌هـای جلیقـه خنک‌کننده می‌تواند گرمای نهان ذوب این بسته‌هـا را افـزایش داده و به مقدار گرمای نهان ذوب ترکیبات پارافین خالص گران‌قیمت برساند. به‌علاوه جلیقه طراحی شده با گستره نقطه ذوب مناسب و نزدیک بـه دمای طبیعی پوست بدن باعث ایجاد تحریک پوستی ناشـی از سـرما نمی‌شود.

همچنین نتایج نشان داد که استفاده از جلیقه خنـک‌کننـده ترکیبـی آب و پارافین طراحی شده از طریق کاهش ضربان قلب، دمای دهـانی، دمای پوست و میزان تعریق می‌تواند در کنتـرل تـنش گرمـایی مـؤثر باشد؛ بنابراین این جلیقه با هزینه ساخت کم می‌توانـد در فراینـدهای گرم و شرایط اقلیمی گرم با ایجاد سرمای مطلوب بـرای پیشـگیری از تنش گرمایی و افـزایش پایـداری فیزیولـوژیکی در برابـر گرمـا مـورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1. Mohammadyan M, Sepehri P. Design of cool spot and assessment of its effect on WBGT index among furnace workers' position in Shimi Madani industry in Hamadan. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 2010;20(76):2-7. [Persian]
2. Dehghan H, Mortazavi S, Jafari M, Maracy M. Combination of wet bulb globe temperature and heart rate in hot climatic conditions: The practical guidance for a better estimation of the heat strain. International Journal of Environmental Health Engineering. 2012;1(1):18.
3. Wan M. Occupational exposure to hot environments: Florida workers need help. Florida Public Health Review. 2004;1:53-55.
4. Moran DS, Epstein Y. Evaluation of the environmental stress index (ESI) for hot/dry and hot/wet climates. Ind Health. 2006;44(3):399-403.
5. Holmér I, Kuklane K, Gao C. Test of firefighter's turnout gear in hot and humid air exposure. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2006;12(3):297-305.
6. Nishihara N, Tanabe S-I, Hayama H, Komatsu M. A cooling vest for working comfortably in a moderately hot environment. Journal of physiological anthropology and applied human science. 2002;21(1):75-82.
7. Jetté F-X, Dionne J-P, Rose J, Makris A. Effect of thermal manikin surface temperature on the performance of personal cooling systems. European Journal of Applied Physiology. 2004;92(6):669-672.
8. Reinertsen RE, Faerevik H, Holbo K, Nesbakken R, Reitan J, Royset A, et al. Optimizing the performance of phase-change materials in personal protective clothing systems. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics. 2008;14(1):43-53.
9. Bishop PA, Nunneley SA, Constable SH. Comparisons of air and liquid personal cooling for intermittent heavy work in moderate temperatures. The American Industrial Hygiene Association Journal. 1991;52(9):393-397.
10. Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering. 2003;23(3):251-283.
11. Konz S. Personal cooling garments: a review. ASHRAE transactions. 1984;90(1B):499-518.
12. Ukrainczyk N, Kurajica S, Šipušić J. Thermophysical comparison of five commercial paraffin waxes as latent heat storage materials. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly.2010;24(2):129-137.
13. Bendkowska W, Kopias K, Bogdan A. Thermal manikin evaluation of PCM cooling vests. Fibres & Textiles in Eastern Europe. 2010;18(1):78-86.
14. Sarı A, Karaipekli A. Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material. Applied Thermal Engineering. 2007;27(8):1271-1277.
15. White JF. Flammability characterization of fat and oil derived phase change materials. MSc Thesis presented at university of Missouri-Columbia. July 2005.
16. Mondal S. Phase change materials for smart textiles–An overview. Applied Thermal Engineering. 2008;28(11):1536-350.
17. Sari A, Kaygusuz K. Thermal energy storage characteristics of myristic and stearic acids eutectic mixture for low temperature heating applications. Chinese Journal of Chemical Engineering. 2006;14(2):270-275.
18. Gao C, Kuklane K, Holmér I, editors. Cooling effect of a PCM vest on a thermal manikin and on humans exposed to heat. 12th International Conference on Environmental Ergonomics; 2007: Biomed doo, Ljubljana, Slovenia.
19. Dehghan H, Parvari R, Habibi E, Maracy M. Effect of fabric stuff of work clothing on the physiological strain index at hot conditions in the climatic chamber. International Journal of Environmental Health Engineering. 2014;3(1):14.
20. Golbabaei F, Omidvari M. Man and thermal environment.2nd ed. Tehran: University of Tehran Publication; 2008. [Persian]
21. Bennett BL, Hagan RD, Huey K, Minson C, Cain D. Comparison of two cool vests on heat-strain reduction while wearing a firefighting ensemble. European Journal of Applied Physiology. 1995;70(4):322-328.
22. Jovanović D, Karkalić R, Zeba S, Pavlović M, Radaković SS. Physiological tolerance to uncompensated heat stress in soldiers: effects of various types of body cooling systems. Vojnosanitetski pregled. 2014;71(3):259-264.
23. McNab BK. The Physiological Ecology of Vertebrates: A View from Energetics (Cornell Univ Press, Ithaca, NY); 2002, p 525.
24. Griffin JC, Jutzy KR, Claude JP, Knutti JW. Central body temperature as a guide to optimal heart rate. Pacing and Clinical Electrophysiology. 1983;6(2):498-501.
25. Sawka MN, Francesconi RP, Young AJ, Pandolf KB. Influence of hydration level and body fluids on exercise performance in the heat. JAMA. 1984;252(9):1165-1169.
26. Jovanović DB, Karkalić RM, Tomić LD, Veličković ZS, Radaković SS. Efficacy of a novel phase change material for

microclimate body cooling. Thermal Science. 2014;18(2):657-665.
27. Luomala MJ, Oksa J, Salmi JA, Linnamo V, Holmér I, Smolander J, et al. Adding a cooling vest during cycling improves performance in warm and humid conditions. Journal of Thermal Biology. 2012;37(1):47-55.
28. Barr D, Gregson W, Sutton L, Reilly T. A practical cooling strategy for reducing the physiological strain associated with firefighting activity in the heat. Ergonomics. 2009;52(4):413-420.
29. Gharebaei S, Dehghan H, Mahaki B, Valipour F. Effect of Iranian cooling vests with phase change material packs on heat strain indices in hot/humid conditions in Persian Gulf. Journal of Ergonomics. 2014;2(2):57-66. [Persian]

The design and manufacturing of phase change material cooling vests and their effectiveness in reducing thermal strain under laboratory conditions

Saeed Yazdani Rad[1], Habibollah Dehghan[*2]

Received: 26/7/2015 Accepted: 14/9/2015

Abstract

Introduction: Water and paraffin are well-known phase change materials used in the manufacturing of cooling vests. The present study was conducted to design and make a cooling vest using commercial paraffin compounds and ice and to then examine their effect on thermal strain parameters in hot climate conditions in a climate chamber.

Materials and Methods: A cooling vest was first made with polyester fabric and containing 17 aluminum packs. Each aluminum pack was filled with 72 g of water and 65 g of prepared paraffin. A total of 10 male students then performed a treadmill exercise in hot climate conditions in a climate chamber (ambient temperature (TA) = 40 ^{0}C and relative humidity (RH) = 40%) once with and once without wearing the cooling vest and at two levels of exercise intensity, including a light intensity (2.8 kph) and a moderate intensity (4.8 kph) exercise. Each stage of the experiment involved 30 minutes of rest and 30 minutes of exercise on the treadmill. Participants' heart rate, oral and skin temperature and sweat rate were measured throughout the study.

Result: The latent heat of the prepared paraffin was 108 kJ/kg and the peak melting point was 30 °C. Significant differences were observed between participants' mean heart rate, oral and skin temperature and sweat rate at both exercise intensities and both with and without the cooling vest ($P<0.05$).

Conclusion: The use of a cooling vest containing paraffin and ice can reduce thermal strain through reducing the heart rate, oral and skin temperature and sweat rate.

Keywords: Cooling vest, phase change material, thermal strain, hot climate conditions

1. M.Sc. Student, Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences
2. ⁎ (**Corresponding Author**) Assistant Professor, Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Isfahan University of Medical Sciences Email: ha_dehghan@hlth.mui.ac.ir