

نکات کلیدی پایش و ارزیابی استرس گرمایی شغلی (مبتنی بر شاخص WBGT)

ویژه کارشناسان بهداشت حرفه‌ای صنایع و بازرسان محیط کار

بر اساس کتابچه «حدود مجاز مواجهه شغلی» وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی - ویرایش ششم سال ۱۴۰۵

مرحله ۱ — تصمیم‌گیری و آماده‌سازی

۱. ضرورت پایش را احراز کنید

ارزیابی تنش (استرس) گرمایی شغلی و پایش شاخص دمای ترگویی‌سان (WBGT) در صورت وجود هر یک از این شرایط ضروری است: ارزیابی کیفی کارشناس بهداشت حرفه‌ای احتمال استرس گرمایی را نشان دهد؛ فعالیت در محیط روباز در فصل گرم انجام شود؛ فعالیت در محیط سرپوشیده دارای منابع گرمای قابل توجه (کوره، دیگ بخار، ذوب و ریخته‌گری، شیشه‌سازی) باشد؛ یا گزارشی از ناراحتی‌ها و بیماری‌های ناشی از استرس گرمایی وجود داشته باشد. اگر هیچ‌کدام برقرار نیست، پایش کامل WBGT الزامی نیست؛ ارزیابی کیفی کفایت می‌کند.

۲. تحلیل وظیفه شغلی (Job/Task Analysis) را پیش از هر چیز انجام دهید

این گام، شرط لازم برای همه محاسبات بعدی است، نه یک مرحله جانبی. باید مشخص شود: محل‌های حضور واقعی فرد، فعالیت‌های انجام‌شده در هر محل، مدت زمان هر فعالیت، شدت متابولیکی هر فعالیت، و الگوی دقیق کار-استراحت. بدون این تحلیل، تعیین تعداد نقاط و طول مدت پایش، و محاسبه میانگین وزنی-زمانی (TWA) متابولیسم کاری و WBGT امکان‌پذیر نیست.

۳. سازش‌یافتگی (Acclimatization) فرد را پیش از انتخاب حد مقایسه، مشخص کنید

- سازش‌نیافته: کارگر جدید/لاستخدام یا کسی که پس از قطع مواجهه (بیش از ۴ روز کاهش محسوس سطح سازش، ۳ تا ۴ هفته از بین‌رفتن کامل سازگاری) هنوز تطابق پیدا نکرده است ← ملاک مقایسه: حد اقدام/مراقبت (AL) در جدول ۵ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه.
- سازش‌یافته: کارگری با تطابق فیزیولوژیک کامل (معمولاً ۷ تا ۱۴ روز کار پیوسته در شرایط گرمایی مشابه؛ ۷۵٪ تطابق در ۵ روز اول رخ می‌دهد) ← ملاک مقایسه: حد مجاز مواجهه شغلی (OEL) در جدول ۵ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه.
- برنامه تدریجی الزامی: برای کارگر تازه‌وارد، مواجهه روز اول حداکثر ۲۰٪ نوبت کار و افزایش حداکثر ۲۰٪ در هر روز بعدی؛ برای کارگر با سابقه قبلی در مشاغل گرم، روز اول حداکثر ۵۰٪، روز دوم ۶۰٪، روز سوم ۸۰٪ و روز چهارم ۱۰۰٪.

⚠ سازش‌یافتگی مختص همان شرایط گرمایی است؛ تغییر شرایط محیط (مثلاً جابه‌جایی به فرایند گرم‌تر) یعنی سازگاری قبلی دیگر معتبر نیست.

مرحله ۲ — اجرای پایش در محل

۴. زمان اندازه‌گیری را طوری انتخاب کنید که نماینده بدترین/واقعی‌ترین شرایط مواجهه باشد

در محیط‌های روباز، به‌ویژه در ماه‌های تیر و مرداد، اندازه‌گیری و محاسبه میانگین وزنی زمانی WBGT باید در بازه ساعت ۱۰ الی ۱۶ انجام شود و تفسیر نتیجه فقط برای همان بازه زمانی معتبر است؛ به هیچ زمان یا ماه دیگری قابل تعمیم نیست. اگر در کنار تابش خورشید، منبع حرارتی مصنوعی هم وجود دارد (مثل آسفالت‌کاری)، پایش در سایر ماه‌های سال نیز ممکن است لازم باشد. سنجش در هوای بارانی، ابری، طوفانی یا در شب، هرگز صحیح نیست. در محیط‌های سرپوشیده با گرمای فرایندی، پایش محدود به فصل گرم نیست.

۵. محل و تعداد نقاط پایش را بر اساس نوسانات دمایی در طول نوبت کار تعیین کنید

ایستگاه اندازه‌گیری باید دقیقاً محل واقعی حضور و فعالیت کارگر باشد (نه هر جای در دسترس تر کارگاه).

برای جلوگیری از خطای رایج در محاسبه میانگین وزنی (TWA)، قبل از روشن کردن دستگاه WBGT متر، «آنالیز وظیفه» را روی کاغذ بیاورید و بر اساس الگوی کاری، یکی از دو مسیر زیر را انتخاب کنید:

● مسیر الف: محیط پایدار و یکنواخت (بدون نوسان دمایی محسوس)

شرایط: محیط سرپوشیده با تهویه مناسب که دما در طول شیفت تغییر چندانی ندارد و محل کار و استراحت از نظر دمایی تقریباً یکسان است.
 تعداد نمونه: ۱ یا ۲ نقطه اندازه‌گیری کافی است.
 مدت زمان: دستگاه در هر نقطه حداقل ۲۰ دقیقه بماند تا عدد ثابت شود.
 محاسبه: همان عدد خوانده‌شده به عنوان شاخص محیط در نظر گرفته می‌شود (نیازی به محاسبه TWA نیست).

● مسیر ب: محیط متغیر (دارای نوسان دمایی یا تغییر محل فعالیت)

در این حالت، شما باید بر اساس آنالیز وظیفه، بازه‌های کاری و استراحت را در یک «پنجره زمانی مشخص» جمع‌بندی کنید. قانون طلایی برای مخرج کسر این است:
 ۱. اگر الگوی کار «مستمر» است (چند ساعت کار پیوسته):
 پنجره محاسبه: ۱ ساعته (۶۰ دقیقه).
 تعداد نمونه: به تعداد دفعاتی که فرد در این ۶۰ دقیقه محل یا نوع فعالیت خود را تغییر می‌دهد (مثال: ۲۰ دقیقه کنار کوره + ۴۰ دقیقه در سالن اصلی = ۲ نمونه).
 مخرج کسر فرمول: عدد ۶۰ است.

$$WBGT_{TWA} = [(WBGT_1 \times t_1) + (WBGT_2 \times t_2)] / 60$$

۲. اگر الگوی کار «متناوب» است (چرخه‌های کوتاه و مکرر کار و استراحت):
 پنجره محاسبه: ۲ ساعته (۱۲۰ دقیقه).
 تعداد نمونه: به تعداد دفعاتی که فرد در این ۱۲۰ دقیقه محل یا نوع فعالیت خود را تغییر می‌دهد.
 مخرج کسر فرمول: عدد ۱۲۰ است.

$$WBGT_{TWA} = [(WBGT_1 \times t_1) + (WBGT_2 \times t_2) + \dots] / 120$$

⚠ استرس گرمایی برخلاف بسیاری از عوامل شیمیایی که اثر تجمعی طولانی‌مدت (۸ ساعته) دارند، می‌تواند در بازه‌های زمانی کوتاه (پیک‌های حرارتی)، باعث به هم خوردن سریع تعادل حرارتی بدن، افزایش خطر گرم‌زدگی شدید و عوارض حاد فیزیولوژیک شود. بنابراین، استاندارد بر ارزیابی در بازه‌های کوتاه‌مدت (۱ یا ۲ ساعته) تأکید دارد تا از ایمنی کارگر در اوج فشار حرارتی اطمینان حاصل شود و پیک‌های خطرناک در میانگین‌گیری ۸ ساعته «پنهان» نشوند. بنابراین مخرج کسر محاسبه TWA، ۴۸۰ دقیقه (۸ ساعت) یا مجموع کل شیفت نیست. استاندارد WBGT فقط بر مبنای پنجره‌های ۶۰ یا ۱۲۰ دقیقه‌ای تعریف شده است تا پیک‌های خطرناک گرما پنهان نشوند.

⚠ سنسور دستگاه برای رسیدن به تعادل به حداقل ۲۰ دقیقه زمان در هر نقطه نیاز دارد. اگر فعالیتی در آنالیز وظیفه کمتر از ۲۰ دقیقه طول می‌کشد، باید از مدل‌های پیشرفته‌تر فیزیولوژیک مانند شاخص واکنش (استرس) گرمایی پیش‌بینی‌شده (PHS - Predicted Heat Strain) استفاده شود یا با احتیاط حداکثری و در نظر گرفتن «بدترین سناریوی ممکن» قضاوت کرد.

وقتی مواجهه کارگر بیش از ۸ ساعت در روز است، قواعد تغییر می‌کند:

۱. **پایش فیزیولوژیک الزامی است:** در شیفت‌های طولانی، اتکا به شاخص محیطی (WBGT) به تنهایی کافی نیست. ظرفیت تحمل بدن به دلیل خستگی تجمعی به شدت افت می‌کند. در این شرایط، پایش مداوم علائم حیاتی کارگر الزامی است (مطابق جدول ۶ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه):
 ضربان قلب: ضربان پایدار بالای ۱۸۰ ضربه در دقیقه، یا عدم بازگشت ضربان قلب به زیر ۱۲۰ ضربه در دقیقه پس از ۱ دقیقه استراحت، نشانه خطر فوری است.
 دمای بدن: دمای دهانی/گوشی نباید از ۳۸ درجه سانتی‌گراد فراتر رود.
 میزان تعریق: کاهش وزن بدن بیش از ۱/۵٪ در پایان شیفت، نشان‌دهنده کم‌آبی خطرناک است.

۲. **قانون سرانگشتی:** از آنجا که مکانیسم‌های دفع گرمای بدن در شیفت‌های کاری طولانی به طور مثال ۹ و ۱۰ ساعته، کارایی خود را از دست می‌دهند، یک قاعده سرانگشتی پذیرفته‌شده این است که به ازای هر ساعت کار اضافی، حداقل ۱۰٪ به زمان استراحت افزوده شود یا به بیان فنی‌تر، حد مجاز مواجهه (OEL) به طور خودکار به حد اقدام (AL) کاهش می‌یابد تا حاشیه ایمنی ایجاد شود.

۳. **قانون طلایی:** میانگین وزنی WBGT در پنجره زمانی محاسبه نباید از OEL برای سازش‌یافته یا AL برای سازش‌نیافته بالاتر برود. اگر بالاتر رفت، کار باید بلافاصله متوقف یا الگوی کار-استراحت اصلاح شود.

۶. طول مدت هر قرائت را رعایت کنید

- پایداری حسگر دماسنج تر طبیعی و دماسنج خشک: حداقل ۲۰ دقیقه در محل.
- پایداری دماسنج گویسان: حداقل ۲۵ دقیقه در محل، پیش از هر بار قرائت.

۷. کالیبراسیون و آماده‌سازی دستگاه

- فتیله دماسنج تر طبیعی باید حداقل نیم ساعت پیش از قرائت با آب مقطر (با سرنگ) کاملاً مرطوب و پاکیزه باشد و مخزن را کاملاً بپوشاند.
- پایه باید طوری باشد که جریان طبیعی هوا در اطراف هر سه دماسنج برقرار بماند و گوی‌سان در سایه پایه قرار نگیرد.
- بهترین روش تأیید کالیبراسیون: مقایسه با وسایل استاندارد اولیه در شرایط دمایی کنترل شده است.

۸. فرمول صحیح WBGT را بر اساس نوع فضا انتخاب کنید

نوع فضا	فرمول
فضای باز، تابش مستقیم آفتاب	$WBGT = 0.7 \times T_{nw} + 0.2 \times T_g + 0.1 \times T_a$
فضای سرپوشیده، یا فضای باز سایه/آبری	$WBGT = 0.7 \times T_{nw} + 0.3 \times T_g$

T_{nw} دمای تر طبیعی، T_g دمای گویسان، T_a دمای خشک هوا

⚠ اشتباه رایج، به کاربردن فرمول فضای بسته در محیط آفتابی یا برعکس است؛ این خطا می‌تواند نتیجه را چند درجه جابه‌جا می‌کند و تصمیم نهایی را تغییر دهد.

۹. پارامترهای خام (T_{nw} ، T_g ، T_a) را به درستی و همزمان پایش کنید

عدد نهایی WBGT به‌تنهایی کافی نیست؛ اگر هر کدام از سه پارامتر خام غلط اندازه‌گیری شود، کل نتیجه مخدوش می‌شود. چون دقت WBGT در رطوبت بالا و سرعت جریان هوای کم (نامحسوس) پایین است، توصیه می‌شود رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا نیز جداگانه اندازه‌گیری و در گزارش ثبت شود.

۱۰. همگنی/ناهمگنی دما در ارتفاع را بررسی و در صورت نیاز در سه ارتفاع اندازه بگیرید

اگر اختلاف پارامترهای اندازه‌گیری شده در سه ارتفاع بیش از ۰.۵٪ باشد، محیط «نامتجانس» تلقی می‌شود و اندازه‌گیری در هر سه ارتفاع الزامی است:

نقطه اندازه‌گیری	حالت نشسته (m)	حالت ایستاده (m)
سر	۱/۱	۱/۷
شکم/تنه	۰/۶	۱/۱
مچ پا	۰/۱	۰/۱

در محیط همگن، اندازه‌گیری تنها در ارتفاع شکم/تنه کفایت می‌کند. در محیط ناهمگن، میانگین‌گیری با ضریب دو برای تنه، انجام می‌شود:

$$WBGT = WBGT_{سر} \times 2 + WBGT_{شکم} + WBGT_{مچ پا} \div 4$$

مرحله ۳ — پردازش داده‌ها و محاسبات

۱۱. تصحیح اثر لباس (CAV) و محاسبه WBGT مؤثر را فراموش نکنید

$$WBGT = WBGT_{eff} + CAV \quad (\text{محاسبه/اندازه‌گیری شده}) \quad (\text{مطابق جدول ۱ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه})$$

- مقادیر CAV مربوط به لایه‌های مختلف لباس را با هم جمع نکنید — هر لباس یک عدد CAV دارد، نه هر لایه.
- برای لباس کار یکسره (کاوآرال)، فرض بر این است که فقط یک لایه لباس زیر معمولی زیر آن پوشیده شده، نه لایه دوم لباس.
- هیچ شواهدی وجود ندارد که ماسک یا پوشش صورت به‌تنهایی بار تنش گرمایی را افزایش دهد؛ برای آن CAV جداگانه لحاظ نکنید.
- این جدول CAV برای لباس‌های کاملاً ایزوله کاربرد ندارد؛ آن‌ها نیازمند ارزیابی تخصصی‌تر (مثلاً PHS) هستند.

۱۲. میانگین وزنی زمانی متابولیسم (TWA-M) را برای همه اجزای شیفت، از جمله استراحت، محاسبه کنید

متابولیسم زمان استراحت صفر نیست؛ مقدار معیار آن ۱۱۵ وات (۶۵ وات بر مترمربع) برای مرد استاندارد است (مطابق جدول ۲ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه) و باید در کنار متابولیسم کار/فعالیت (مطابق جدول ۳ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه) در محاسبه میانگین وزنی زمانی وارد شود؛ حذف آن، متابولیسم واقعی را کمتر از حد برآورد می‌کند. اگر سطح بدن فرد (بر مبنای قد و وزن، فرمول $Du\ Bois: BSA=0.007184 \times W^{0.425} \times H^{0.725}$) با فرد استاندارد (۱/۸ مترمربع، قد ۱۷۰ سانتی‌متر، وزن ۷۰ کیلوگرم) تفاوت معنادار داشته باشد، نرخ متابولیسم تخمینی را متناسب با نسبت وزن واقعی به ۷۰ کیلوگرم اصلاح کنید.

$$M_{adj} = M_{est} \times \frac{W_{actual}}{70}$$

۱۳. بر اساس مقدار میانگین وزنی زمانی متابولیسم، سطح فعالیت فیزیکی کار را تعیین کنید

طبقه بندی بارکاری برای هر شغل (مطابق جدول ۲ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه) تعیین و حد مجاز گرمایی متناسب با بارکاری شغل موردنظر را (بر اساس جدول ۵ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه) مشخص کنید.

۱۴. الگوی کار-استراحت را برحسب درصد کار در هر ساعت ثبت کنید

درصد کار-استراحت است که سطر صحیح جدول حد مجاز/حد مراقبت را تعیین می‌کند (مطابق جدول ۵ بخش تنش‌های گرمایی کتابچه)؛ بدون آنالیز دقیق وظیفه این درصد به‌دست نمی‌آید.

مرحله ۴ — ارزیابی نهایی، مقایسه با حدود مجاز

۱۵. با حد صحیح مقایسه کنید: سازش یافته $\rightarrow OEL$ ، سازش نیافته $\rightarrow AL$

پس از تعیین $WBGT_{eff}$ (با اصلاح لباس) و درجه بارکاری (سبک/متوسط/سنگین/خیلی سنگین از جداول متابولیسم)، عدد را در جدول ۵ کتابچه (یا شکل ۱ حاصل از فرمول $WBGT_{eff} [^{\circ}C] = 56.7 - 11.5 \log_{10} M$ و $AL [^{\circ}C] = 60.0 - 14.1 \log_{10} M$) بیابید. اگر $WBGT_{eff}$ زیر حد مراقبت است، ریسک پایین است؛ بین حد مراقبت و حد مجاز، اقدامات کنترلی عمومی لازم است؛ بالاتر از حد مجاز، پایش فیزیولوژیک ضروری می‌شود.

۱۶. برای کار سنگین و خیلی سنگین با الگوی کار ۷۵ تا ۱۰۰٪، به‌خلاف جدول توجه کنید

جدول حدود مجاز، برای کار سنگین/خیلی سنگین با کمتر از ۲۵٪ استراحت در ساعت، هیچ مقدار مجازی ارائه نمی‌دهد (نه اینکه صفر باشد — عملاً معیار غربالگری ساده در این خانه‌ها وجود ندارد). در این حالت‌ها باید به‌جای جدول فعلی، از تحلیل TWA دقیق‌تر و/یا پایش فیزیولوژیک مستقیم استفاده کرد.

۱۷. برای شیفت‌های طولانی‌تر از ۸ ساعت یا مواجهه مستمر بدون استراحت ایمن، ضریب بریف-اسکالا استفاده نکنید

این ضریب تعدیل مختص عوامل شیمیایی است و برای استرس گرمایی معتبر نیست. در عوض: حد مجاز به‌طور خودکار به حد مراقبت (AL) کاهش می‌یابد و ادامه کار باید با کمک شاخص تنش گرمایی پیش‌بینی‌شده (PHS، مطابق ISO ۷۹۳۳) مدیریت شود — این شاخص زمانی که دمای عمقی بدن به ۳۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و همچنین میزان آب از دست‌رفته بدن را برآورد می‌کند تا فعالیت پیش از رسیدن به آن نقطه متوقف و جایگزینی آب/الکترولیت انجام شود.

۱۸. ساختار استراحت الزامی برای ۱۰۰٪ کار را رعایت کنید

برای ردیف «کار ۷۵ الی ۱۰۰٪» جدول حدود مجاز، فرض ساختاری شامل دو نوبت استراحت کوتاه ۱۵ دقیقه‌ای و یک نوبت استراحت ۳۰ دقیقه‌ای در طول نوبت کاری است. کار یکسره بدون این تناوب، حتی اگر مجموع دقایق استراحت برابر باشد، در این حد مجاز پذیرفته نیست.

مرحله ۵ — پایش فیزیولوژیک

۱۹. محدودیت‌های شاخص WBGT را بشناسید و به‌موقع سراغ شاخص‌های جایگزین بروید

- در رطوبت بالا و سرعت جریان هوای کم، دقت WBGT کاهش می‌یابد.
- برای شیفت مستمر یا بیش از ۸ ساعت، برای لباس‌های کاملاً ایزوله (سطح A)، یا زمانی که هدف برآورد دقیق دمای عمقی و کم‌آبی بدن است، WBGT به‌تنهایی کافی نیست.



- در این شرایط از شاخص‌های تکمیلی معتبر مانند بار گرمایی پیش‌بینی‌شده (ISO ۷۹۳۳، PHS) یا ابزار تصمیم‌گیری استرس گرمایی HSDA استفاده کنید.

۲۰. پارامترهای فیزیولوژیک قابل سنجش و حدود مجاز آنها

- پایش و تعیین مقدار پاسخ‌های فیزیولوژیک بر اساس استاندارد ISO ۹۸۸۶ انجام می‌شود. دمای عمقی رکتال و میزان تعریق دقیق‌ترین شاخص‌ها هستند؛ در محیط واقعی کار، دمای پرده صماخ یا دمای زیربانی (۵/۰ درجه کمتر از رکتال) به‌عنوان جایگزین قابل قبول به کار می‌روند.

مرحله پایانی — چک‌لیست سریع پایش از ترک محیط تحت پایش

- دستگاه کالیبره و فیلدها به درستی مرطوب است؟
- فرمول صحیح (فضای باز آفتابی / سرپوشیده-سایه) انتخاب شد؟
- زمان پایداری کافی (۲۰ دقیقه تر-طبیعی/خشک، ۲۵ دقیقه گویسان) رعایت شد؟
- در صورت ناهمگونی بیش از ۵٪، هر سه ارتفاع اندازه‌گیری و میانگین وزنی محاسبه شد؟
- CAV لباس اعمال و WBGT_{eff} محاسبه شد؟
- متابولیسم TWA با احتساب زمان استراحت و اصلاح وزن بدن محاسبه شد؟
- ارزیابی بر مبنای میانگین یک‌ساعته یا دوساعته انجام شد؟
- سازش‌یافتگی فرد مشخص و حد صحیح (AL یا OEL) انتخاب شد؟
- درجه بارکاری و الگوی درصد کار-استراحت از آنالیز وظیفه استخراج شد؟
- در شرایط ویژه (مانند کار سنگین ۷۵-۱۰۰٪، شیفت بیش از ۸ ساعت، لباس ایزوله) از PHS/پایش فیزیولوژیک به جای جدول ساده استفاده شد؟

پایان

دکتر سمیه فرهنگ دهقان

دانشیار گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار
دانشکده بهداشت و ایمنی
دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی
(تیرماه ۱۴۰۵)