



آلاینده‌های تنفسی در جوشکاری و برشکاری فلزات

رضا کلاتریان^۱ | آذین قارون پور^۲ | فروغ پورمختاری^۳

چکیده

آلاینده‌های تنفسی متصاعد شده حین جوشکاری و فرایندهای وابسته به آن، ترکیبی از دود، بخار و گازهایی است که ممکن است برای سلامت افراد خطرناک باشد. برخی از این آلاینده‌ها می‌توانند به اعماق سیستم تنفسی وارد و باعث بروز بیماری شوند. در حالی که دود بعضی مواد مصرفی جوش، سرطان‌زا معرفی شده است در حضور کوتاه در معرض آنها، اغلب تاثیرات حاد، موقتی و دارای علائمی از قبیل تحریک سیستم تنفسی، تب فلزی، و سرگیجه است. در این مقاله با بررسی و مطالعه استانداردها و مقالات معتبر سعی شده است اجزای تشکیل دهنده دود و گازهای حاصل از جوشکاری معرفی شوند و همچنین خطرات مواجهه با آن و راههای محافظت از کارکنان بیان شود.

واژه‌های کلیدی: ایمنی، دود، آلاینده‌های جوشکاری

شدن بخار لایم کاری) است. این ذرات بسیار ریز به همراه بخارهای آلی و گازهای متصاعد شده در فرایندهای جوشکاری و برشکاری، برای مدت طولانی در هوا معلق می‌مانند و از طریق تنفس به راحتی وارد داخلی‌ترین قسمتهای ریه می‌شوند و می‌توانند برای سلامت انسان بسیار خطرناک باشند^[۱،۲].

دود گرمای زیاد جوشکاری می‌تواند باعث تبخیر فلز پایه، مواد مصرفی جوشکاری، پوشش، و با آلودگیهای موجود روی سطح قطعه شود، سرد شدن و واکنش این بخارها در محیط، ذرات ریز معلق دود را تولید می‌کند^[۴]. بررسیهای انجام شده برود حاصل از جوشکاری با الکترودهای رویه سختی (Hardfacing) پرمگنز در فرایند جوشکاری قوسی با الکتروود روکش‌دار (SMAW) و فرایند جوشکاری قوسی با سیم توپودری

مقدمه

درجه حرارت زیاد، تابش شدید حرارت و پرتوهای فرابنفش، وجود آلاینده‌های تنفسی، سرو صدا، خطر جریان برق و ولتاژ، کار سخت و موقعیتهای نامناسب فیزیکی بدن، از جمله ویژگیهای جوشکاری و فرایندهای وابسته به آن (Welding and Allied Processes) هستند که می‌تواند سلامت جوشکار، برشکار، یا اپراتور را تهدید کند^[۱]. درمورد خطرات ناشی از این ویژگیها بسیار نوشته شده است اما در این میان شاید بیشترین موضوعی که به آن پرداخته ولی کمتر درک شده است خطر ناشی از غبار (Dust)، دود (Fume)، بخار و گازهای متصاعد شده است. غبار، ذراتی است که به وسیله فرایندهای مکانیکی مانند سنگزنی، خرد کردن و شن پاشی تولید می‌شود، ولی دود، ذرات معلق حاصل از سرد شدن بخارهای فلزی (مانند سرد

مخلوط شوند. در فرایندهای SMAW و FCAW از واکنش حرارت و ترکیبات فلاکسهای جوشکاری (کربناتها و سلولز) دی اکسید کربن و مونو اکسید کربن تولید می شود^{۱۵}.

در بسیاری از فرایندهای جوشکاری و برشکاری از واکنش بین نیتروژن و اکسیژن موجود در هوا، اکسیدهای متفاوتی از نیتروژن (NOX) با نسبتهای متغیر، وابسته به دمای قوس، شکل می گیرند. اوزون در مدت زمان برقراری قوس الکتریکی، به دلیل اثر تابش فرابنفش بر محیط اطراف قوس جوشکاری و برشکاری، تولید می شود. جوشکاری و برشکاری سطوح دارای رنگ و پوشش، بسته به جنس پوشش، مخلوط مرکبی از بخارهای آلی تولید می کنند. همچنین تجزیه حلال های مورد استفاده در فرایند چربی زدایی باعث بروز خطر مواجهه با بخارهای آلی مانند گاز سمی فوسوژن (CoCl₂) می شود^{۱۶}.

عوامل موثر

ترکیب و مقدار آلاینده های تنفسی تولید شده در جوشکاری و فرایندهای وابسته به آن، به نوع فرایند و پارامترهای آن، مواد مصرفی، جنس قطعه، جنس پوشش، آلودگیهای سطحی فلز پایه، نوع روکش الکتروود یا فلاکس جوشکاری، ترکیب گاز محافظ، و اتمسفر محیط کار بستگی دارد^{۱۷، ۱۸}.

جوشکاری قوس فلزی با گاز (GMAW) نشان می دهد جزء اصلی تشکیل دهنده، اکسید آهن است که کاتیون موجود در آن دارای حدود ۱۰ درصد منگنز است، در حالی که دود حاصل از الکتروود E71T-GS در فرایند FCAW ترکیبی از فلوراید های قلیایی خاکی (سدیم، پتاسیم، کلسیم، منگنز) و اسپیندل MnFe₂O₄ است که کسر کاتیون فلزی در آن دارای 27% Fe، 10% Mn، 28% S، 28% K، 25% Ca است^{۱۷}.

گازها

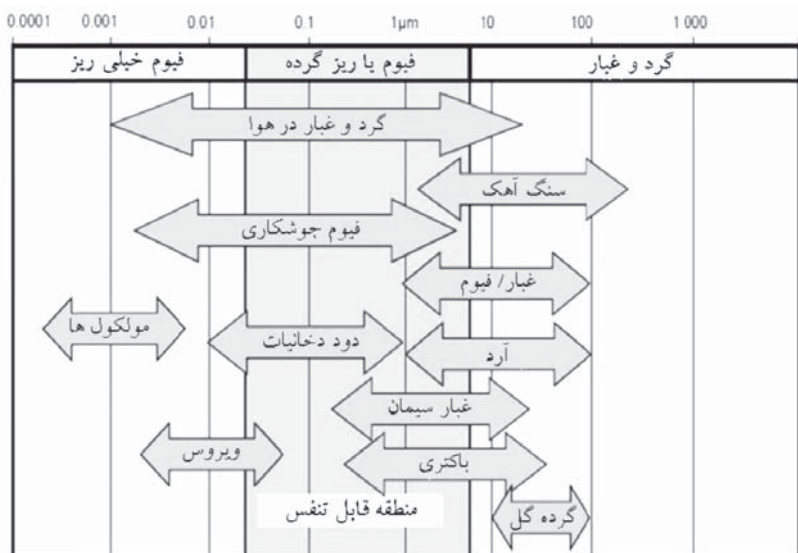
منشاء گازها به عنوان آلاینده تنفسی در جوشکاری و فرایندهای وابسته به آن، گازهای سوختی، گاز های محافظ، و گازهای محصول فرایند است^{۱۸}.

گازهای سوختی معمول، مانند استیلن و پروپان، علاوه بر این که دارای خطرات ایمنی خاص خود هستند، تشکیل دی اکسید کربن می دهند و اگر در فرایند جوشکاری با سوخت گازی (OFW)، شعله احیایی باشد، مونواکسید کربن نیز تشکیل می دهند. از گازهای آروگون، هلیوم، و دی اکسید کربن در محافظت از حوضچه جوش در برابر اتمسفر استفاده می شود. این گازها ممکن است به تنهایی استفاده شوند، با نسبت مشخصی با هم ترکیب شوند، و یا با مقادیر کمی از گازهای اکسیژن و هیدروژن

(FCAW) نشان می دهد بیش از ۹۵ درصد ذرات دود تولید شده دارای ابعاد ریز (۰/۱ تا ۲/۵ میکرون) و بسیار ریز (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) هستند و بیشترین کسر جرمی ذرات دود، متعلق به ذرات ریز است^{۱۵}.

این ذرات دارای مورفولوژی کروی یا خوشه ای حاصل از دماهای بالا هستند. ذرات کمتر از ۱۰ میکرون قابل تنفس هستند و می توانند وارد سیستم تنفسی بدن انسان شوند. هرچقدر این ذرات ریز تر و دارای سطوح تیز تر باشند احتمال ورود آنها به اعماق سیستم تنفسی و خون بیشتر است^{۱۶}. شکل ۱ اندازه ذرات دود را با اندازه ذرات شناخته شده مقایسه می کند.

اکثر ترکیبات موجود در دودهای مضر جوشکاری و فرایندهای وابسته به آن از ترکیبات اکسیدی است. بررسیهای انجام شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف سنج تفکیک انرژی (SEM+EDS)، میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)، پراش پرتو ایکس (XRD)، و شیمی تر نشان می دهد که در دود حاصل از یک الکتروود فولادی کم آلیاژ می توان ۳۹ گروه ترکیب و نیز در یک فیلتر آلومینیومی ۲۱ گروه ترکیب را یافت^{۱۶}. تحلیل XRD دود حاصل از جوشکاری فولاد ساده کربنی با الکتروود ER 70 S-3 در فرایند



شکل ۱- مقایسه اندازه ذرات.

مواد و فرایند

نسبت به سایر فرایندهای جوشکاری بیشتر است. جوشکاری با الکترودهای توپودری تحت گاز محافظ، دود کمتری تولید می کند و الکترودهای توپر نیز در این حالت دارای نسبت تولید دود کمتری هستند. در فرایند جوشکاری TIG چون مذاب سیم جوش از میان قوس الکتریکی عبور نمی کند حجم کمی از آلاینده های تنفسی تولید می شود^[۸،۳]. فرایند جوشکاری قوس زیرپودری (SAW) کمترین مقدار دود را تولید می کند زیرا دود، زیر پوشش فلاکس و سرباره حبس می شود^[۹، ۵].

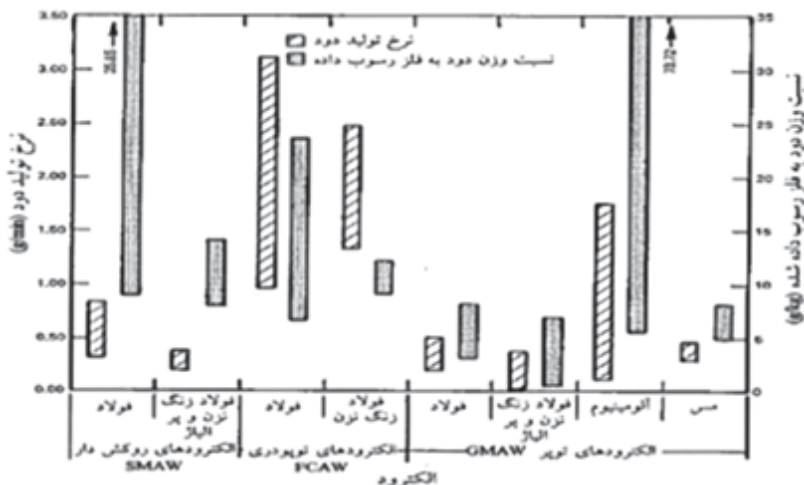
بررسیها نشان داده است استفاده از فرایند GMAW در جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم با سیم جوشکاری Al-Si بیشترین غلظت اوزون را تولید می کند. همچنین در جوشکاری فولادهای زنگ نزن با فرایند TIG ممکن است مقدار اوزون تولید شده بیش تر از مقدار مجاز شود^[۱].

در جوشکاری، به دلیل غلظت کم گازهای نیتروژن (NOX) تولید شده، مواجهه با این گازها مشکلی به وجود نمی آورد، بر عکس در فرایندهای برشکاری با دست، که فرد به منطقه انتشار گاز نزدیک تر است، خطر مواجهه بیشتر است. همچنین برشکاری و صافکاری با شعله گاز سوختی استیلین نسبت به پروپان، به دلیل تشکیل شعله گرمتر، غلظت بیشتری از اکسیدهای نیتروژن را تولید می کند، بنابراین دارای خطر مواجهه بیشتری است. هرچند برش با فرایندهای قوس الکتریکی مانند فرایند برش پلاسما سطح بیشتری از گازهای نیتروژن

منشاء حدود ۹۰ درصد از ترکیب دود حاصل از جوشکاری، از ماده مصرفی جوش و حدود ۱۰ درصد آن از فلز پایه است، اما مقدار و نرخ دود تولید شده کاملاً به ماده مصرفی جوش وابسته است و ارتباط چندانی با جنس فلز پایه ندارد. این دود حاوی تمام موادی است که در ماده مصرفی وجود دارد ولی نسبت آنها ممکن است خیلی متفاوت باشد. غلظت مواد فرار در دود بیشتر از ماده مصرفی است و این برای اجزای دیر گداز برعکس است^[۹، ۵].

بیشترین نرخ دود تولید شده از جوشکاری با الکتروود روکش دار (Shielded Electrode) فولادی E 6010 در فرایند SMAW، 0.83 (g/min) گزارش شده است در حالی که این مقدار برای الکتروود توپر (Solid Electrode) آلومینیومی ER 5053 در فرایند GMAW با انتقال پاششی مذاب، 1.75 (g/min) ، و برای الکتروود توپودری (Flux Cored Electrode) فولادی E70T-5 در فرایند FCAW، برابر 3.25 (g/min) است^[۹]. شکل ۲ میانگین نرخ تولید دود و نسبت وزن فلز رسوب داده شده برای الکترودهای پر کاربرد روکش دار، توپر، و توپودری نشان می دهد.

معمولاً نسبت وزن دود تولید شده به وزن فلز رسوب داده شده در الکترودهای خودمحافظ توپودری، به دلیل افزودن برخی ترکیبات به این نوع الکترودها به منظور تجزیه و محافظت قوس، زمان کارکرد (Duty Cycle) زیاد، و آمپر بالا،



شکل ۲- گستره نرخ تولید دود و نسبت وزن فلز رسوب داده شده برای الکترودهای روکش دار، توپر، و توپودری (۱۰)

احتیاط‌های لازم هنگام اجرای جوشکاری و فرایندهای وابسته به آن، در این زمینه صورت گیرد.^[۷، ۳]

خطرات گازها: محیطی که دارای کمتر از ۱۸ درصد اکسیژن باشد می‌تواند باعث خفگی شود. گازهای خنثی مورد استفاده در جوشکاری مانند آرگون و هلیوم سمی نیستند اما می‌توانند با اشغال هوای تنفسی به دلیل کاهش اکسیژن مورد نیاز مغز باعث سرگیجه، بیهوشی و حتی مرگ شوند. بنابراین در کاربرد باید به خصوصیات آنها توجه شود. برای مثال، گاز محافظ آرگون (برخلاف گاز محافظ هلیوم) از هوا سنگینتر است و به جمع شدن در مناطق پایین، مانند حفره‌ها، تمایل دارد.^[۱۱] گازهای مونواکسید کربن و دی‌اکسید کربن هر دو خفه کننده هستند. مونواکسید کربن خطرناکتر است و می‌تواند با کاهش ظرفیت حمل اکسیژن خون، سمی و کشنده‌تر باشد، اما در غلظت‌های کمتر باعث سردرد، سرگیجه، تهوع، و ضعف خواهد شد. نگرانی اصلی در مواجهه با اوزون، تحریک راه‌های هوایی فوقانی همراه با سرفه و فشردگی قفسه سینه است. اوزون می‌تواند با تاخیر باعث تحریک دستگاه تنفسی شود که ممکن است به بروز برونشیت و گاهی اوقات نومونیا منجر (Pneumonia) شود. دی‌اکسید نیتروژن گازی بسیار سمی و تحریک کننده است. مونواکسید نیتروژن تحریک کننده شدید چشم، پوست، و غشاء مخاطی است. اغلب علائم قرار گرفتن در معرض NOX پس از ۴ تا ۸ ساعت اتفاق می‌افتد که شامل سوزش چشمها، بینی، و نای، سرفه‌های شدید، تنگی نفس، سرگیجه، و احساس خستگی است. در شرایط حاد، ممکن است مرگ ناشی از ورم ریه (Pulmonary Edema) یا نومونیا را نیز در پی داشته باشد.^[۳]

ارزیابی ریسک

درجه ریسک سلامت فرد، به علت مواجهه با آلاینده‌های تنفسی در جوشکاری و برشکاری فلزات، به ترکیب، غلظت، و مدت زمان مواجهه بستگی دارد.^[۳] تولید کنندگان مواد مصرفی جوش باید اطلاعات کافی برای امکان ارزیابی خطرات ناشی از دود جوشکاری را در اختیار قرار دهند.^[۱۲] در کشور آمریکا این اطلاعات به شکل MSDS ارائه می‌شود. طبق استاندارد انگلستان نیز ترکیب دود جوشکاری تولید شده از ماده مصرفی باید در MSDS ذکر شود تا

اکسید آهن در ریه و ظهور بیماری خوش خیم سیدروزیس (Siderosis) شود. مطالعات بافت شناسی و ارزیابی ماکروفاژهای موشهای صحرایی که در معرض دود مختلف جوشکاری قرار گرفته بودند نشان داد که دود الکتروود جوشکاری فولاد زنگ نزن (E308-16) به دلیل وجود عناصر نیکل و کروم در ترکیب آن، علاوه بر این که به سادگی و به مقدار زیاد در عمق ریه نفوذ می‌کند می‌تواند بسیار سمی و خطرناک نیز باشد.^[۱۱، ۳]

استنشاق اکسید فلزات روی و مس، موجب یک بیماری حاد شبیه آنفولانزا (تب دود فلز) می‌شود که معمولاً در جوشکاری فولادهای گالوانیزه اتفاق می‌افتد. علائم آن ممکن است چندین ساعت پس از مواجهه به شکل تشنگی، سرفه، تعریق، سردرد، درد و تب، ظاهر شود. اغلب بهبود کامل، بدون آثار مزمن، یک یا دو روز پس از مواجهه حاصل می‌شود. مواد دیگری را نیز در دود می‌توان یافت که منشأ فلزی ندارند مانند باریم و فلوراید‌ها که معمولاً ناشی از تجزیه پوششها یا فلاکسهای جوشکاری هستند.^[۳]

شواهدی وجود دارد که جوشکاران در ریسکهای بالاتری از سرطان، نسبت به مردم عادی، قرار دارند. در ترکیب مواد مصرفی جوشکاری و لحیم کاری و یا در ترکیب جنس و یا پوشش سطوح قطعات صنعتی ممکن است عناصری وجود داشته باشند که مواجهه طولانی مدت و حتی در برخی موارد کوتاه مدت با آنها می‌تواند آثار مزمن، سرطان، و حتی مرگ در پی داشته باشد.^[۱۲] برای مثال دود نیکل، کروم شش ظرفیتی، آرسنیک، و برلیم سرطان زا هستند. دود آنتیموان می‌تواند باعث مسمومیت‌های مزمن، آسیبهای پیشرونده قلبی-ریوی، رفتن به کما، و مرگ شود. مواجهه با دود کادمیم پس از حدود ۲۰ دقیقه با علائمی شبیه تب دود فلز، پس از پنج روز باعث مرگ می‌شود.^[۱۱] دود کبالت موجب ایجاد نارساییهای ریوی و قلبی است.

دود سرب مسمومیت کلیوی، اثرات خونی پیش رونده و آثار عصبی در پی دارد. دود منگنز (که در همه فولادها وجود دارد) پارکینسون و آلزایمر و دود وانادیوم آسیبهای حاد و مزمن در ریه‌ها ایجاد می‌کند.^[۳] هرچند وجود عناصر مذکور در دود به شکل ترکیبات ناخالصی است، که خطر سمی بودن آنها به اندازه نوع خالص آنها نیست و اغلب این آثار شدید تنها در فرایندهایی غیر از جوشکاری به اثبات رسیده است، اما لازم است

را تولید می‌کند، اما بالاترین سطح تولید این گازها در سوختن آزاد شعله مانند فرایندهای گرم کردن، لحیم کاری و پاشش حرارتی است.^[۳، ۴] **جریان و ولتاژ:** نرخ تولید دود با افزایش جریان جوشکاری افزایش می‌یابد، اما در مواد مصرفی مختلف این نرخ وابستگیهای مختلفی با مقدار جریان دارد. برای مثال نرخ تولید دود در الکتروود جوشکاری E6010 با توان ۲/۲۴ جریان، و در الکتروود جوشکاری E7018 با توان ۱/۵۴ جریان متناسب است. ولتاژ به نوع الکتروود، فرایند جوشکاری و منبع تغذیه جوشکاری وابسته است. عموماً در فرایندهای جوشکاری با قوس باز، افزایش ولتاژ (طول قوس) نیز مانند جریان، نرخ تولید دود را افزایش می‌دهد. نرخ تولید دود در الکتروودهای توپودری رابطه پیچیده تری با جریان الکتریکی قوس دارد، در فرایند حالت انتقال مذاب از الکتروود به حوضچه جوش به جریان و ولتاژ وابسته است. به دلیل وجود آشفستگی در قوس نرخ تولید دود در حالت انتقال مدار کوتاه نسبتاً زیاد است. وقتی سطح جریان به حالت انتقالی در حضور گاز محافظ غنی از آرگون می‌رسد از نرخ تولید دود کاسته می‌شود و با رسیدن به انتقال پاششی دوباره افزایش می‌یابد.^[۹]

گاز محافظ: جوشکاری با گاز محافظ دی اکسید کربن نرخ دود بیشتری نسبت به جوشکاری با گاز محافظ غنی از آرگون تولید می‌نماید. نرخ تشکیل دود با حضور گازهای محافظ مخلوط آرگون-اکسیژن یا آرگون-دی اکسید کربن با افزایش پتانسیل اکسیدکنندگی مخلوط افزایش می‌یابد.^[۸] از میان گازهای خنثی، گازی مانند هلیوم که انرژی یونیزاسیون بالاتر دارد، دود بیشتری تولید می‌نماید. علاوه بر این هرچه انرژی یونیزاسیون گاز محافظ بیشتر باشد، گاز ازن بیشتری نیز تولید می‌شود.^[۹، ۳]

خطرات مواجهه

خطرات دود: در زمانهای مواجهه کم اغلب تاثیرات حاد ناشی از مواجهه با دود و گازها موقتی و دارای علائمی از قبیل تحریک سیستم تنفسی، پوست، چشمها، و در برخی موارد تب دود فلز (Metal Fume Fever) و سرگیجه است.^[۱] ذرات ریز دود باعث خشکی گلو، خارش، سرفه، فشردگی قفسه سینه، و دشواری تنفس می‌شود. استنشاق پیوسته دود جوشکاری در مدت زمان طولانی می‌تواند باعث رسوب ذرات

پاک برای او است. برای حذف یا کاهش دود تولید شده توجه به انتخاب مناسب فرایند، مواد مصرفی، موقعیت جوشکاری، حذف پوشش و آلودگیهای سطح فلز پایه قبل از جوشکاری باید مورد توجه قرار گیرد. پس از اجرای تمهیدات مهندسی استفاده از تهویه کامل محیط کار، تهویه موضعی (Fume Extraction) (شکل ۲) و استفاده از تجهیزات دارای مسیر تهویه، راهکار بسیار مفیدی برای تکمیل محافظت افراد است. انتخاب نوع تهویه علاوه بر تعیین حدود مواجهه مجاز، به نوع فرایند و متغیرهای آن، جنس فلز پایه و پوشش، مواد مصرفی، ابعاد فضای انجام کار، تعداد جوشکاران، میزان تهویه، و جا به جایی هوای محیط کار وابسته است.^[۷،۴،۱] به طور کلی فضاهای بسته، اتاقهای با سقف کمتر از ۵ متر و فضاهای کمتر از (m³) ۲۸۴ به تهویه هوای محیط کار نیاز دارند. در صورتی که نیاز به استفاده از تهویه موضعی باشد کمترین نرخ تهویه لازم برای خروج دود از منطقه تنفس فرد (m³/min) ۵۷ و کمترین سرعت خطی لازم (m/min) ۳۰ است.^[۱۳]

سطح کنترل برای هر جزء در ترکیب دود قابل محاسبه باشد. غلظت آلاینده های تنفسی را نیز می توان اندازه گیری و با حدود مجاز مواجهه شغلی مقایسه کرد. در آمریکا اداره کل سلامت و ایمنی شغلی (OSHA) معیار قانونی حد مواجهه مجاز (PEL) را ارائه می کند. کنفرانس متخصصین بهداشت صنعتی آمریکا (ACGIH) نیز دو معیار TLV و OEL را ارائه کرده است. در انگلستان WEL معیار حد مواجهه محیط کار است. معمولاً معیارهای حدود مواجهه براساس میانگین وزن- زمان (TWA)، برای ۸ ساعت مواجهه در روز، مواجهه کوتاه مدت (STEL)، برای حداکثر ۱۵ دقیقه در روز، و برای حداکثر زمان مواجهه لحظه ای (Ceiling Limit) ارائه می شود.^[۱۲،۳،۱] جدول ۱ و ۲ حدود مواجهه مجاز برای برخی آلاینده های تنفسی را در جوشکاری و برشکاری نشان می دهد.

محافظت از افراد

راه محافظت از جوشکار، برشکار، یا اپراتور، جداکردن منطقه تنفس از منطقه خطر از طریق کاهش یا حذف دود و یا تامین هوای

جدول ۲- حدود مواجهه مجاز برای برخی گازهای متصاعد شده در جوشکاری، برای ۸ ساعت (۱۴ و ۱۵) TWA

گاز	PEL (ppm)	WEL (ppm)
اکسید نیتروژن	-	1
دی اکسید کربن	5000	5000
مونو اکسید کربن	50	30
اوزون	1/0	-

جدول ۱- حدود مواجهه مجاز برای برخی آلاینده های تنفسی در جوشکاری برای ۸ ساعت TWA (۱۴ و ۱۵)

دود	PEL (mg/m ³)	WEL (mg/m ³)
برلیوم	-	002/0
کادمیم	1/0	025/0
کبالت	1/0	1/0
مس	1/0	2/0
نیکل	-	5/0
کروم VI	-	05/0
فلورید	-	5/2
باریم	-	5/0
اکسید آهن	10	5
منگنز	-	5/0
روی	5	4



شکل ۴- ماسک تنفسی جوشکاری (۱۶).



شکل ۳- تهویه موضعی و روش صحیح استقرار آن. هود موضعی در حالت افقی دارای بیشترین راندمان است.

- منابع
- [1] Loos, "health and safety", SLV DUISBURG, 2006.
 - [2] Nederman Group, "Welding fumes risks and solutions", Helsingborg, 2010.
 - [3] D. McKeown, "Welding Fume - Do you know your WEL?", Health and safety international, July 2006.
 - [4] TWI, "Air products focus on fume", Air Product Ltd, 2002.
 - [5] M.J. Gonser, "Characterization of welding fume generated by high-Mn consumables", Welding journal, VOL.89, 2010, pp. 25s-33s.
 - [6] E.J. Fiska et al., "Characterization of arc welding fume", American welding society, 1997.
 - [7] N.T. Jenkins, T.W. Eagar, "Chemical analysis for welding fume particles", Welding Journal, JUN 2005, pp. 87s-93s.
 - [8] I. Pires et al., "Fume emissions during gas metal arc welding", Toxicological & Environmental Chemistry, 88(3), 2006, pp. 385-394.
 - [9] Welding Handbook, VOL.1, Welding Technology, American Welding Society, 1998, pp. 519-550.
 - [10] American Welding Society, "Fumes and Gases in the Welding Environment", AWS FGW PT2 79, 1997.
 - [11] W.B. Coate, "Toxicity of welding fume in Rats", American welding society, 1997.
 - [12] Occupational Safety and Health Administration, "OSHA CSI", 2010.
 - [13] Occupational Safety and Health Administration, "Welding, Cutting, and Brazing", OSHA 1910 subpart Q, 2010.
 - [14] Health and Safety Executive, "Workplace exposure limits", EH40, 2005.
 - [15] Occupational Safety and Health Administration, "Toxic and Hazardous Substances", OSHA 1910 Subpart Z, 2010.
 - [16] 3M Speedglas, "Respiratory Protection", 2007.
- Abbreviations: MSDS, Material Safety Data Sheet; SMAW, Shielded Metal Arc Welding; FCAW, Flux Cored Metal Arc Welding; GMAW, Gas Metal Arc Welding; GTAW, Gas Tungsten Arc Welding; PAW, Plasma Arc Welding; SAW, Submerged Arc Welding; TIG, Tungsten Inert Gas; MIG, Metal Inert Gas; MAG, Metal Active Gas; OFW, Oxyfuel Gas Welding; SEM+EDS, Scanning Electron Microscopy + Energy Dispersive Spectroscopy; TEM, Transmission Electron Microscopy; XRD, X-Ray Diffraction; OSHA, Occupational Safety And Health Administration; PEL, Permissible Exposure Limit; ACGIH, American Conference Of Governmental Industrial Hygienists; TLV, Threshold Limit Value; OEL, Occupational Exposure Limit; WEL, Workplace Exposure Limit; TWA, Time-Weighted Average

اگر نتوان دودهای مضر را به شکل مناسب کنترل کرد باید از تجهیزات محافظت تنفسی (Respiratory Protection Equipment) به عنوان راهکار تکمیلی استفاده شود^[۱۶]. این تجهیزات شامل دو گروه تجهیزات تنفسی و تجهیزات تامین هوا هستند. در فضاهای بسته، در صورت وجود دود، مواد خطرناکی از قبیل روی، سرب، کادمیم، جیوه، و برلیوم، علاوه بر استفاده از تهویه موضعی، باید از ماسک دارای مسیر هوای تازه (Fresh Air Line) نیز استفاده شود. در فضاهای باز، در صورت وجود دود برلیوم به استفاده همزمان از هود موضعی و ماسک دارای مسیر هوای تازه نیاز است، در حالی که در صورت وجود دود روی، سرب، کادمیم، و جیوه استفاده از ماسک تنفسی کافی است^[۱۸]. شکل ۳ یک نمونه ماسک تنفسی جوشکاری را که شامل فیلتر هوا و مجهز به شیشه جوشکاری اتوماتیک است، نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

دود و گازهای حاصل از جوشکاری و فرایندهای وابسته به آن به سادگی می‌توانند وارد سیستم تنفسی شوند. اثرات این آلاینده‌ها بر انسان، مختلف است و بعضی از آنها ممکن است بسیار خطرناک باشد، از این رو مواجهه با آنها باید در محدوده مجاز فرا گیرد. این کار پس از مهندسی روشهای انجام کار از طریق استفاده از تجهیزات تهویه عمومی کارگاهی، تهویه موضعی، و تجهیزات محافظت تنفسی انجام می‌شود.