

مدلسازی مواجهه تنفسی



مدلسازی مواجهه تنفسی

مقدمه

مدلسازی مواجهه جوهره‌ی علم ارزیابی مواجهه است و توصیه می‌شود بعنوان سرمایه اصلی بهداشت حرفه‌ای مورد توجه قرار گیرد. پیش از عمیق شدن در بحث معنی و چگونگی مدلسازی مواجهه، لازم است زمینه آن را در ارزشیابی کلی اثرات بالقوه بر سلامت کارگر درک شود.

کارکرد عمده کارشناسان بهداشت حرفه‌ای ارزشیابی ریسک بالقوه مواجهه بر سلامت کارگر است. این را ارزیابی ریسک بهداشتی می‌نامند. برای روشن شدن موضوع لازم است حقایق زیر درمورد این فرآیند بیان شوند:

- ریسک بهداشتی حاصل از مواجهه و اثرات بهداشتی به ازای هر واحد مواجهه است.
- جوهره‌ی ارزیابی ریسک در بهداشت صنعتی، شغلی، مقایسه مواجهه برآورد شده با حد مجاز مواجهه مربوطه است.
- به هنگام روبرو شده با عدم قطعیت علمی، معمولاً رویکردی محافظه کارانه در پیش گرفته می‌شود که فرد را به سوگیری به سمت ایمنی سوق می‌دهد و لذا ریسک را بیش از حد برآورد می‌کند یا برای کاهش عدم قطعیت، اطلاعات بیشتری را بدست آورد.
- ریسک برآوردی است (معمولاً بیش برآوردی) از ریسک واقعی، و ریسک واقعی هرگز شناخته نمی‌شود. ارزیابی ریسک رویکردی چندلایه است که از ارزشیابی‌هایی شروع می‌شود که عموماً ریسک را بیش برآورد می‌کنند اما کم‌هزینه هستند و به سمت ابزارهای تحلیلی گران‌تر اما دقیق‌تر پیش می‌رود.

از اطلاعات فوق بطور منطقی می‌بایست مشهود باشد که کارشناسان بهداشت حرفه‌ای مواجهه کارگر را اندازه‌گیری یا به نحو دیگری برآورد می‌کنند. این اندازه‌گیری بدون وجود محدوده مجاز مواجهه جهت مقایسه، بی‌معنی است. مطالبی که در ادامه درمورد مدلسازی مواجهه ارائه می‌شود با هدف برآورد میزان مواجهه و مقایسه آن با حد مجاز مواجهه مربوطه است.

این راهنما با هدف معرفی کلی موضوع مدلسازی مواجهه است. سرخط کلی فرآیند و اهمیت آن به‌مراه تعدادی ابزار عملیاتی ارائه می‌شود.

چرا مدلسازی مواجهه انجام می‌شود؟

در واقع، چرا فردی بخواهد مدل‌های مواجهه را بداند و بکار گیرد؟ پاسخ ساده این است که کارشناسان بهداشت حرفه‌ای نمی‌توانند همه چیز را همه جا پیش کنند. همچنین، بعنوان کارشناس خبره، کارشناس بهداشت حرفه‌ای می‌بایست برخی شواهد و منطقی قابل دفاع برای عدم پایش طیف وسیعی از سناریوهای مواجهه را داشته باشد.

یک کارخانه مدرن را در نظر بگیرید که صدها کارگر هزاران وظیفه را در آن انجام می‌دهند. به لحاظ منطقی بخوبی تثبیت شده است که اغلب این وظایف هرگز پایش نمی‌شوند زیرا کارشناس بهداشت حرفه‌ای آنها را بی‌خطر قضاوت کرده است. به عبارت دیگر، وی وضعیت را مشاهده کرده و نتیجه گرفته است که حد مجاز مواجهه رعایت می‌شود. هنگامی که سوال می‌شود چگونه به این نتیجه رسیده است پاسخ می‌دهد « قضاوت کارشناسی » را بکار گرفته است. کارشناس بهداشت حرفه‌ای از تجربه خود به این

منظور استفاده می‌کند. در صورتی که برای پاسخ دقیق‌تر تحت فشار قرار گیرد بیان می‌کند که چون سیستم یا سناریوی مورد نظر نسبتاً بسته است، که چون فشار بخار آن پایین است، که چون حد مجاز مواجهه آن بالاست و غیره. این فاکتورها با هم تلفیق می‌شوند تا به کارشناس بهداشت حرفه‌ای بگویند مواجهه بیش از حد مجاز رخ نمی‌دهد. وقتی شرایط به نحوی است که غلظت‌ها و مواجهات پیش‌بینی شده به حد مجاز نزدیک می‌شوند یا از آن فراتر می‌روند برخی آستانه‌ها باید برای این برآوردهای کارشناسی وجود داشته باشند. در این نقطه، کارشناس بهداشت صنعتی معمولاً به سمت اقدام و وضعیت را پایش می‌کند. نتایج این پایش‌ها تعیین می‌کند که آیا کنترل‌ها اجرا شده‌اند یا خیر.

در حوزه بهداشت صنعتی، این حالت و روش کار بطور کلی بسیاری از کارکنان را از مواجهه بیش از حد و اثرات سوء بهداشتی متعاقب آن محافظت می‌کند. با این وجود این روش نقص‌های جدی دارد که عبارتند از:

- (۱) بیان عینی آن دشوار یا غیرممکن است.
- (۲) معمولاً با واقعیت کمی صریح و روشن که علت و اثر را ارتباط دهد، پشتیبانی نمی‌شود.
- (۳) تابع انتقال تکنولوژی نیست (به عبارت دیگر کسانی که تازه به فیلد وارد می‌شوند یادگیری آن دشوار است)
- (۴) اغلب به عنوان شواهد قانع‌کننده جهت ارائه به کارکنان متاثر یا قابل دفاع در دعاوی قضایی یا سایر چالش‌های قانونی کافی نیست.

بنابراین واضح است که روش استاندارد اندازه‌گیری مستقیم سناریوهای انتخابی بهترین روش اجرایی نیست. در واقع برخی مواقع اندازه‌گیری امکان‌پذیر نیست.

موارد زیر را در نظر بگیرید:

- شما می‌خواهید مواجهات را پایش کنید، اما روش اندازه‌گیری وجود ندارد.
- شما نمی‌توانید مواجهات را همین الان که مواجهه در حال رخ دادن است اندازه‌گیری کنید.
- شما نمی‌توانید مواجهات را اندازه‌گیری کنید زیرا نمی‌توانید آنجا حاضر باشید نظیر هنگامی که مواجهه در محلی دیگر رخ می‌دهد، یا مواجهه قبلاً رخ داده است (مطالعه گذشته نگر)، یا هنوز مواجهه رخ نداده است (مطالعه آینده نگر).
- حجم نمونه (تعداد نمونه) کم از مواجهه منجر به سوگیری زیاد به سمت این نتیجه که مواجهه غیرقابل قبول، قابل قبول فرض شود.
- بار مالی مرتبط با هزینه جمع‌آوری نمونه و آنالیز یکی از موانع جدی فرآیند پایش مواجهه است.

کارشناس بهداشت حرفه‌ای با تجربه که متخصص در تعیین سناریوهایی است که نیاز به پایش ندارند احتمالاً قادر است مدل‌های مواجهه را بصورت ناخودآگاه در ذهن خود اجرا و با حدود مجاز مقایسه نماید.

این راهنما بر آن است که نشان دهد این فرآیند چطور می‌تواند شفاف‌تر، هشیارانه‌تر، عینی‌تر، و از همه مهمتر قابل انتقال به دیگران باشد.

این راهنما در تلاش است به کارشناس این حوزه منطق، ابزارهای علمی و روش‌های مربوط به ارزیابی مواجهه از طریق مدلسازی ارائه نماید.

کارشناسان بهداشت حرفه‌ای با تجربه خود مدلساز هستند

واقعیت این است که هر کارشناس بهداشت حرفه‌ای خود مدلساز است. این موضوع تثبیت شده است که اغلب مواجهات شغلی محیط کار هرگز پایش نمی‌شوند زیرا قضاوت کارشناس بهداشت حرفه‌ای حاکی از ایمن بودن آنها است. چطور وی به این نتیجه می‌رسد؟ همانطور که در بالا اشاره شد، اغلب کارشناسان بهداشت حرفه‌ای این کار را با مدل ناخودآگاه انجام می‌دهند. این کار با استفاده از روش‌های پایه علمی انجام می‌شود. برای توضیح بیشتر این موضوع، عناصر اولیه این روش علمی را در نظر بگیرید:

۱. مسئله را بیان کن
۲. یک فرضیه بساز
۳. آزمایش و مشاهده کن
۴. داده‌ها را تفسیر کن
۵. نتیجه‌گیری نموده و پیش‌بینی کن

در حوزه ارزیابی ریسک مواجهه برای کارکنان، کارشناس بهداشت حرفه‌ای فرضیه‌ی یا «مدل» آنچیزی که فکر می‌کند در دنیای واقعی علت و معلول رخ می‌دهد را در پیش می‌گیرد. مشاهدات و استنتاج‌ها در مورد اغلب علل (یا از طریق تجربه در این مثال) این فرضیه را پشتیبانی می‌کند که مواجهه کم‌تر از میزان خطرناک است و نتیجه می‌گیرند که وضعیت ایمن است.

همانطور که قبلاً اشاره شد، زمانی که پرسیده می‌شوند چطور در اغلب سناریوها به این نتیجه رسیدند جواب معمولاً «قضاوت تخصصی» است که تعریف آن به این شرح است:

«بکارگیری و استفاده مناسب از دانش بدست آمده از تحصیلات رسمی، مشاهدات، تجربه، استنباط، و قیاس»

واضح است که کارشناس بهداشت حرفه‌ای بهنگام ایجاد فرضیه، مدلی در ذهن خود دارد. یک ارتباط ریاضی ناخودآگاه یا الگوریتمی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا این فرضیه که «با مشخص بودن ویژگی‌های تمام علل مواجهه در این وضعیت، میزان مواجهه ناشی از آن کمتر از حد مجاز خواهد بود».

در برخی سناریوها، با استفاده از مدل ناخودآگاه، کارشناس بهداشت حرفه‌ای نتیجه می‌گیرد که احتمال مواجهه بیش از حد وجود دارد. پس وی مجبور است که فرضیه خود را بیازماید. بنابراین پس از مشاهده، کارشناس بهداشت حرفه‌ای ممکن است آزمایش انجام دهد: برخی افراد غلظت را اندازه‌گیری کرده و مواجهه را محاسبه می‌کنند. این داده‌های پایش سپس شواهد مستقیم و عینی بدست می‌دهد و بر اساس آن فرضیه خود را قبول یا رد می‌کند و در مورد ریسک این مواجهه نتیجه‌گیری می‌کند.

مهمتر اینکه شاید این فرآیند به پایگاه داده داخلی بهداشت صنعتی اطلاعات بیشتری اضافه می‌کند (به عبارت دیگر تجربه وی را افزایش می‌دهد) و امکان بهبود در برآوردها و پیش‌بینی در مورد مواجهات مشابه در آینده را فراهم می‌کند.

یعنی استفاده از داده‌ها برای ارزشیابی فرضیه‌ی مواجهه در واقع قضاوت تخصصی را توسعه می‌دهد.

عنصر اولیه یک مدل ریاضی یک الگوریتم است. الگوریتم در این حوزه معادله‌ای است که مواجهه را پیش‌بینی می‌کند. در این معادله مواجهه در سمت چپ و ورودی‌ها در سمت راست.

$$\text{Predicted State} = f(\text{inputs}) \quad (1)$$

سمت چپ معادله (predicted state) متغیر وابسته است. سمت راست معادله (inputs) متغیرهای مستقل یا پیش‌بینی کننده هستند. منطق معادله این است که ورودی‌ها (inputs) منجر به پیش‌بینی (predicted state) می‌شوند. در مدلسازی مواجهه مقدار پیش‌بینی معمولاً مقدار مواجهه یا غلظتی است که منجر به مواجهه فرد می‌شود.

زمانی که مواجهه مستقیماً اندازه‌گیری می‌شود، ورودی‌های حیاتی مواجهه یا عوامل موثر بر مواجهه معمولاً تعیین مقدار نمی‌شوند. در واقع این فرضی است که از دست می‌رود زیرا دانستن و تعیین مقدار عوامل موثر بر مواجهه، می‌تواند فرد را قادر سازد میزان مواجهه در سناریوهای مختلف را با استفاده از مدل‌ها پیش‌بینی کند.

در ادامه برخی مدل‌های فیزیکی شیمیایی ارائه می‌شوند که همه آنها مبنایی مشابه آنچه در فوق بیان شد، دارند.

در ادامه مثالی جدی‌تر از مدل جبری ساده ارائه می‌شود که اغلب در مباحث ریاضی دیده می‌شود.

$$Y = (a)X_1 + (a)X_2 + (a)X_3 \dots \quad (2)$$

که:

Y = متغیر وابسته (غلظت هوابرد یا مواجهه ناحیه تنفسی)

X_1 = متغیر مستقل یا پیش‌بینی کننده ۱ (برای مثال فشار بخار)

X_2 = متغیر مستقل یا پیش‌بینی کننده ۲ (برای مثال مساحت سطح تبخیر)

X_3 = متغیر مستقل یا پیش‌بینی کننده ۳ (برای مثال میزان تهویه)

a, b, c = ضریب توان پیش‌بینی کننده (متغیرها)

در این مدل، ۳ ورودی وجود دارد (فشار بخار، مساحت سطح تبخیر و مینزان تهویه) که همه آنها با هم ترکیب می‌شوند تا غلظت هوابرد در ناحیه تنفسی فرد را باعث شوند.

همه این ورودی‌ها مستقل از یکدیگر هستند و همه آنها در غلظت هوابرد نقش دارند. فشار بخار و مساحت سطح تبخیر عامل‌های منبع (انتشار) هستند در حالی که میزان تهویه عامل کنترل است که مواجهه را محدود می‌کنند.

ضرایب توان بصورت کمی وزن نسبی عوامل موثر در این مدل را نشان می‌دهند. اگر چنین مدلی توسعه یافته و اعتباربخشی شود، کمک ارزشمندی است به هر کسی که در پی افزایش دانش خود از آنچه بطور خاص ممکن است باعث ایجاد غلظت‌های هوابرد ناشی از منابع تبخیر می‌شود.

درواقع، مواجهه کارگر می‌تواند تنها تا حدی بطور کامل درک شود که دنیای فیزیکی و عوامل درون آن که باعث مواجهه می‌شوند (به عبارت دیگر متغیرهای مستقل یا پیش‌بینی کننده) شناخته شده و تفسیر شوند.

حتی با وجود پایگاه داده غنی از پایش غلظت‌های هواپرد (به عبارت دیگر متغیر وابسته)، فرد می‌بایست آن نتایج را با تعیین‌کننده‌هایی (یعنی پیش‌بینی‌کننده‌ها) ارتباط دهد که آن مواجهه‌ها را ایجاد کرده‌اند.

اطمینان از اعتبار مداوم مواجهات پیش‌بینی شده در آینده و امکان پیش‌بینی سناریوهای مختلف ضروری است.

ساخت و استفاده از این مدل‌ها اسرارآمیز نیست بلکه صرفاً مبتنی بر مبانی علمی است. در حوزه مدلسازی مواجهه تنفسی این تلاش می‌تواند بعنوان تحقیق و بررسی و جستجوی درک عوامل تعیین‌کننده تولید منابع آلاینده هواپرد و کنترل آن است. از آنجایی که متغیرهای حیاتی حاکم بر تولید و کنترل سموم هواپرد مشخص هستند، این ابزارها (مدل‌ها) ایجاد می‌شوند تا تجربه، دانش و اعتماد لازم برای پیش‌بینی غلظت‌های واقعی و مواجهات را در سناریوهای شبیه‌سازی شده فراهم کند. همانطور که در فوق ذکر شد، توسعه یک مدل شامل فرمولبندی فرضیه‌هایی درمورد پیش‌بینی‌کننده‌های مواجهه و سپس آزمودن آنها با داده‌هایی حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی جهت تعیین رابطه علت و معلول بین آنها است.

همانطور که درک درمورد چرایی و چگونگی توسعه مدل‌های فیزیکی شیمیایی افزایش می‌یابد، روشن می‌شود که مدل‌ها نشانگر اصول اساسی برای ارزیابی علمی مواجهه هستند. این مدل‌ها، به‌مراه مدلسازی آماری داده‌های پایش، بنیانی علمی برای تعیین مشخصه‌های مواجهه کارگر فراهم می‌کنند.

مدل‌های فیزیکی شیمیایی تنفسی محدود به پیش‌بینی مواجهات فعلی نیستند. از آنها می‌توان برای برآورد مواجهات قبلی که به آسانی امکان ایجاد مجدد آنها وجود ندارد و همچنین برای برآورد مواجهات احتمالی آینده در وضعیت‌ها یا سناریوهای فرضی استفاده کرد. با بکارگیری یک مدل، حتی اگر مدل دقت ایده‌آل نداشته باشد، بینش کارشناس بهداشت حرفه‌ای درمورد مواجهات بالقوه را ارتقاء می‌یابد.

یکی از متخصصان آمار بیان می‌کند که «همه مدل‌ها غلط هستند، اما برخی از آنها مفیداند». آنچه باید در ذهن داشت این است که همه مدل‌های علمی از جمله مدل‌های مواجهه شغلی، کم و بیش تعمیم داده می‌شوند و بنابراین برآورد نسبتاً خام از واقعیت هستند. لذا نتایج می‌بایست با احتیاط تفسیر شوند.

رویکرد لایه‌ای در مدلسازی مواجهه

این تمایل طبیعی در هر انسانی وجود دارد که دستیابی به هر هدف یا محصول نهایی را به صرفه و اثربخش به انجام برساند. نقطه ضعف آن این است که چنین مدل ساده‌ای می‌تواند به مقدار زیادی مواجهه بالقوه در سناریوی تحت بررسی را بیش از مقدار واقعی برآورد کند.

بنابراین، بسته به نتایج مقایسه مقدار پیش‌بینی شده با حد مجاز مواجهه، ممکن است بکارگیری ابزارهای مدلسازی پیشرفته‌تر مورد نیاز باشد. این مدل‌های پیچیده‌تر زمان، زحمت و هزینه بیشتری نیاز دارند اما برآوردهایی که انجام می‌دهند در مقایسه با مدل‌های ساده، به میزان کمتری بیش از مقدار واقعی است.

در حین فرآیند لایه‌ای غیرمعمول نیست که پیش از دستیابی به پاسخ مشخص، منابع مدلسازی به به اتمام برسند. در این صورت استفاده از مدلی بهتر (یا ورودی‌های مدل) لازم است ایجاد شوند یا پایش هوا بصورت نمونه انجام می‌شود.

متاسفانه، برای توسعه مدل‌های فیزیکی‌شیمیایی، راه کار دوم (پایش) تا به حال انتخاب گردیده است زیرا ارزان بوده و سریعاً پاسخ سوال مد نظر را فراهم می‌کند. لذا مدل‌های مواجهه بطور کلی بطور منطقی اعتباربخشی یا توسعه نیافته‌اند تا تجسم دقیق‌تری از واقعیت فراهم کنند. در حال حاضر این مدل‌ها برای برآورد غلظت هوابرد، مواجهه و ریسک به نوعی در حال توسعه هستند.

به این ترتیب، معمول است که با مدل‌های نسبتاً ساده که به منابع چندانی احتیاج ندارند و لذا ساده، آسان و سریع قابل اجرا هستند. ورودی‌های چنین مدل‌های ساده‌ای عمده‌اً طوری طراحی شده‌اند که دستیابی و استفاده از آنها نسبتاً ساده باشد. برای مثال می‌توان ایجاد بخار اشباع در هوا از یک منبع تبخیر را فرض نمود که صرفاً با دانستن فشار بخار، تعیین غلظت آن در هوا قابل انجام است.

سلسله مراتب تکنیک‌های برآورد مدلسازی

در ادامه تکنیک‌های مدلسازی مواجهه تنفسی ارائه می‌شوند. مدلسازی مواجهه می‌تواند به سرعت به لحاظ فنی پیچیده شود. در این راهنما هدف معرفی موضوع است و بنابراین تنها کمی از مدل‌های عمومی مورد استفاده و بحث قرار می‌گیرند که عبارتند از: مدل تهویه صفر، مدل جعبه، و مدل انتشار.

برای مطالعه موردی، مواجهه بالقوه با تولوئن از محلولی حاوی (وزنی) ۱ ppm تولوئن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این مثال، مدل‌ها بر اساس میزان اطلاعات لازم و افزایش دقت، از ساده به پیچیده، مرتب شده‌اند. بنابراین اولین مدلی که فرد می‌بایست به استفاده از آن فکر کند مدل ساده‌ی اشباع است و پس از آن مدل جعبه‌ای و انتشار است. مدل‌های با پیچیدگی بیشتر تنها در صورتی که مواجهه بیش از حد در ارزشیابی ریسک غیرقابل قبول باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با داشتن حداقل اطلاعات در مورد سناریوی استفاده از ماده و خصوصیات فیزیکی ماده، می‌توان غلظت اشباع را بعنوان برآوردی از بدترین حالت مواجهه هوابرد با بخارات در اولین لایه از آنالیز در نظر گرفت.

لایه اول: مدل تهویه صفر یا اشباع

این مدل مواجهه تنفسی بسیار اولیه و نوعاً بسیار محافظه‌کارانه، حداکثر غلظت احتمالی بخار (به عبارت دیگر اشباع) در هوا را محاسبه می‌کند. بهترین استفاده از این مدل در مورد گازها و بخاراتی است که بدون تشکیل میست متساعد می‌شوند و اطلاعاتی در مورد تهویه یا جزئیات نحوه استفاده از ماده وجود ندارد.

برای هر نوع مایع، اشباع سرانجام در هوای بالای سطح مایع رخ می‌دهد اگر تهویه‌ای وجود نداشته باشد و مایع کافی برای اینکه بخار اشباع فضای موجود را پر کند، وجود داشته باشد. در این حالت، میزان تبخیر در نهایت هرگونه مکانیسم دفع بخار از هوا نظیر جذب، جذب سطحی، یا مکانیسم تبدیل ماده شیمیایی را نادیده می‌گیرد.

شکل ۱-۱۰ این پدیده را نشان می‌دهد.

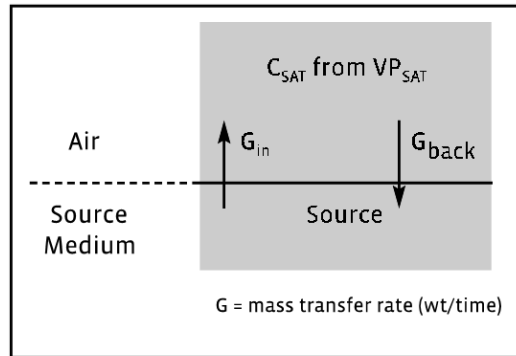


Figure 10.1 — Zero Ventilation or Saturation Model.

معادله غلظت اشباع (C_{sat}) بر حسب قسمت حجمی آلاینده به ازای یک میلیون قسمت از حجم فضای موجود را می‌توان به آسانی با استفاده از الگوریتم زیر محاسبه کرد.

$$C_{sat} = \frac{VP_{sat}}{760} (1,000,000) \quad (3)$$

C_{sat} = غلظت در هوا بر حسب ppm

VP_{sat} = فشار بخار اشباع بر حسب mmHg

فشار بخار (VP_{sat}) در هر دمای بیرونی کمیتهی است که با آزمایش تعیین می‌شود؛ با این وجود، می‌توان آن را از داده‌های نقطه جوش برای هر دسته از مایعات چه در هوای اتمسفری و چه در خلاء برآورد نمود. برآورد فشار بخار مواد درون مخلوط پیچیده‌تر است اما با روش‌های اجرایی ایجاد شده قابل برآورد هستند. مدل اشباع معمولاً برای پیش‌بینی غلظت‌های هوای اتاق کار، محافظه‌کارانه است. تجربه نشان داده است که این مدل غلظت‌های بخار (به عبارت دیگر غیر ذره‌ای) در هوا را در همه سناریوها بجز بدترین حالت (مثلاً پاشش زیاد در فضای داخل با تهویه ضعیف) را بیش از چهار برابر (۱۰ تا ۱۰۰۰۰ برابر) بیش از حد مجاز برآورد می‌کند. این موضوع با مقایسه غلظت‌های اندازه‌گیری شده در محیط‌های شغلی با غلظت‌های اشباع محاسبه شده بر اساس داده‌های فشار بخار یا نقطه جوش آشکار می‌شود. سناریوهای بدترین حالت شامل آنهایی است که مقدار قابل توجهی آئروسول‌ها می‌شود یا مساحت نسبتاً بزرگی (بیش از چند مترمربع) از مایع در حال تبخیر ایجاد می‌شود. در این وضعیت‌ها مدل اشباع اغلب برآورد بسیار بیش از حد مجاز صورت نمی‌دهد.

این مقدار حاصل از مدل، در عین سادگی بعنوان غربالی با ورودی‌های محدودی از خصوصیات پایه فیزیکوشیمیایی است. معمولاً به عنوان یک برآورد بسیار محافظه‌کارانه، نشان‌دهنده یک گام اول مناسب در ارزیابی ریسک چندمرحله‌ای است. در صورتی که میزان مواجهه برآورد شده توسط مدل کمتر از حد مجاز مواجهه است، سطح اطمینان بالایی وجود دارد که غلظت‌های واقعی بخار، ریسک غیرقابل قبول برای سلامت کارگر از طریق مواجهه تنفسی ایجاد نمی‌کنند. البته سایر مسیرهای بالقوه مواجهه (برای مثال پوستی یا دهانی) در نظر گرفته نمی‌شود.

اگر فردی دانش کمی درباره جزئیات سناریوی مواجهه واقعی داشته باشد، می‌توان گفت که وی درمورد میزان واقعی مواجهه بسیار نامطمئن است. با این وجود بسیار بعید است که غلظت هوابرد تولوئن در این مثال در بسیاری از سناریوهای منطقی بیش از غلظت اشباع (C_{sat}) پیش‌بینی شده باشد.

در این ارزش‌یابی، می‌توان فرض کرد که فرد معادل غلظت بخارات فضای اطراف سر در تمام طول روز استنشاق می‌کند. این فرد فرضی از تهویه عمومی بی‌بهره است؛ بنابراین این مدل را گاهی «مدل تهویه صفر» می‌نامند.

$$H_A = \frac{C_A(\text{air}), \text{ in } mg/m^3 \text{ air}}{C_A(\text{aq}), \text{ in } mg/m^3 \text{ water}} \quad (4)$$

که:

$C_A(\text{air})$ = غلظت تعادل آلاینده در هوای بالای مایع

$C_A(\text{aq})$ = غلظت آلاینده در مایع (معمولاً آب) بر حسب وزن/حجم مایع

به لحاظ فنی، H_A بدون واحد نیست؛ واحد آن «حجم آب به حجم هوا» است. بنابراین هوا m^3/m^3 آب است.

در این مثال، مقدار H_A معادل ۰/۲۳ برآورد می‌شود.

محصول مورد استفاده در مثال مایعی با میزان تولوئن $1 \text{ ppm } (W/W)$ ، که معادل 1000 mg تولوئن در هر مترمکعب آب است. برای تبدیل mg/m^3 به ppm از معادله ۶ استفاده شود.

$$\left[\frac{1}{10^6} \right] \left[\frac{10^9 \text{ mgH}_2\text{O}}{1 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}} \right] = \frac{1000 \text{ mg}}{\text{m}^3} \quad (5)$$

بر اساس فرمول ۵ غلظت پیش‌بینی شده هوای اشباع از تولوئن در بالای محلول حاصل ضرب H_A (۰/۲۳) در 1000 mg/m^3 یا برابر با 230 mg/m^3 (معادل 61 ppm) است.

بنابراین، برآورد مواجهه با تولوئن با استفاده از این مدل نسبتاً ساده برابر با 61 ppm است که بیش از حد مجاز مواجهه اعلام شده از سوی ACGIH (50 ppm) است. در این مثال مواجهه تعیین شده در سطح اول فراتر از حد مجاز مواجهه بود و نیاز است به سطح بعدی برآورد مواجهه مراجعه کرد. با این وجود باید توجه داشت که اگر محصول حاوی $0/1 \text{ ppm } (w/w)$ تولوئن بود، برآورد مواجهه با تولوئن در سطح اول معادل $6/1 \text{ ppm } (v/v)$ می‌بود و با درجه اطمینان مناسبی مواجهه از حد مجاز $50 \text{ ppm } (v/v)$ فراتر نمی‌رفت.

فشار بخار، فشار جزئی، و غلظت

در این نقطه، رابطه بین فشار بخار و غلظت هوابرد گازها و بخارات می‌بایست مورد بحث قرار گیرد. طبق قانون اول گاز ایده‌آل که بیان می‌کند حجم هر گاز ایده‌آل در هر دما و فشار معین با تعداد مولکول‌های گاز تعیین می‌شود. بنابراین، یک مول ($10^{23} \times 6/02$ مولکول) هیدروژن (H_2) در دما و فشار نرمال حجمی ($24/4$ لیتر) برابر با یک مول گاز بوتن (C_6H_{10}) دارد. قانون گاز ایده‌آل به این امکان را می‌دهد که غلظت گاز یا بخار را بصورت قسمت در میلیون حجم ($ppm \text{ v/v}$) بیان کنیم. تبدیل $ppm \text{ v/v}$ به mg/m^3 بر استفاده از معادله زیر انجام می‌شود.

$$\frac{mg}{m^3} = ppm \times \frac{MW}{24.4} \quad (6)$$

MW = وزن مولکولی گاز برحسب g/gmole

24.4 = حجم مولی هر گاز در دمای 25 درجه و فشار اتمسفری 760 mmHg (برحسب لیتر)

توسعه قانون گاز ایده‌آل به قانون دالتون معروف است که می‌گوید در مخلوطی از گازها، فشار کل برابر با مجموع فشارهای جزئی اجزاء آن مخلوط است. به این معنی که در فشار اتمسفری نرمال (فشار 1 اتمسفر) همه گازها به 1 ppm میلیون می‌رسند. در هوای نرمال معمولاً به این معنی است که تقریباً 780.840 ppm v/v نیتروژن؛ 20.9476 ppm v/v اکسیژن؛ 9340 ppm v/v آرگون؛ 314 ppm v/v دی‌اکسید کربن؛ $8/7 \text{ ppm v/v}$ نون؛ $5/24 \text{ ppm v/v}$ هلیوم؛ 2 ppm v/v متان؛ $1/14 \text{ ppm v/v}$ کریپتون؛ و $0/5 \text{ ppm v/v}$ هیدروژن وجود دارد.

اگر هر گاز (از جمله O_2) یا بخار به این جرم معمول هوا با غلظت‌های فوق‌اضافه شود، فشار جزئی همه ترکیبات فوق‌مقداری کاهش می‌یابد به نحوی که همه آنها با هم همچنان فشار یک اتمسفر و حجم 1 میلیون قسمت حجمی به ازای 1 میلیون قسمت اشغال می‌کنند. برای مثال، اگر 61 ppm v/v تولوئن به این جرم هوا اضافه شود، همه مقادیر فوق‌به نسبت، مقداری به سمت کمتر تعدیل می‌شوند تا فضا برای این میزان فشار جزئی تولوئن ایجاد کنند. با این وجود فشار کل همچنان 1 اتمسفر باقی می‌ماند.

یکی از معانی قانون دالتون این است که می‌توان مستقیماً غلظت هوابرد گاز یا بخار و فشار جزئی آن را به هم تبدیل کرد. این موضوع در معادله شماره 3 به راحتی قابل مشاهده است. درمورد مثال تولوئن، 61 ppm فشار جزئی معادل $\frac{61}{1000000}$ اتمسفر (5 -) 61×10^{-6} اتمسفر) ایجاد خواهد کرد. چون 1 اتمسفر معادل 760 mmHg است، فشار جزئی 61 ppm v/v برابر با $4/6 \times 10^{-5}$ اتمسفر است.

سطح دوم: مدل جعبه تهویه عمومی

یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین مدل‌ها در بهداشت حرفه‌ای مدل جعبه‌ای یا تهویه عمومی است. این مدل متکی به مفهوم بقای جرم است. این مدل بر اساس یک جعبه سیاه هوا است که کسی قادر به ورود یا حتی دیدن درون آن نیست. اما همانطور که آلاینده هوابرد به درون جعبه وارد می‌شود، هرگونه آلاینده پس از آن از جعبه خارج شود را می‌توان بصورت ثابت اندازه‌گیری کرد. غلظت

متوسط درون جعبه را می‌توان بعنوان مقداری که وارد جعبه می‌شود منهای مقداری که از جعبه خارج می‌شود تقسیم بر حجم جعبه بیان کرد. این را با معادله زیر می‌توان بیان کرد:

$$\text{غلظت} = \frac{A_{in} - A_{out}}{V}$$

$$A_{in} = \text{مقداری که به جعبه وارد می‌شود (wt)}$$

$$A_{out} = \text{مقداری که از جعبه خارج می‌شود (wt)}$$

$$V = \text{حجم جعبه}$$

اگر آلاینده به میزان ثابتی وارد جعبه شود و به میزان مشابهی به همراه هوای خروجی از جعبه خارج شود، سیستم در حالت پایدار و یکنواخت قرار دارد و متوسط غلظت در جعبه ثابت است.

اگر غلظت در جعبه در سراسر حجم آن مشابه یا همگن باشد، پس مفروضات زیر مورد نیاز هستند: (۱) آلاینده هوا برد باقی می‌ماند (جذب سطوح نمی‌شود)، (۲) آلاینده درون جعبه به لحاظ شیمیایی تغییر نمی‌کند، و (۳) آلاینده بلافاصله پس از ورود و بطور کامل با هوای جعبه مخلوط می‌شود. استفاده از این مدل حالت یکنواخت^۱ ساده و مفروضات آن، معادله تهویه عمومی برای این وضعیت بصورت زیر است:

$$C_{eq} = \frac{G}{Q} \quad (8)$$

$$C_{eq} = \text{غلظت حالت یکنواخت, } mg/m^3$$

$$G = \text{میزانی که وارد جعبه می‌شود, } mg/hr$$

$$Q = \text{میزان تهویه هوایی که جعبه را ترک می‌کند, } m^3/hr$$

البته، در واقعیت پیچیدگی‌های بسیار بیشتری وجود دارد. اختلاط آلاینده هوا برد اغلب کامل و بلافاصله نیست و برخی از مواد با مکانیسم‌های غیر تهویه‌ای نظیر جذب سطحی، ته‌نشینی یا واکنش شیمیایی دفع می‌شوند. همچنین وضعیت حالت-غیر یکنواخت بسیار پیچیده‌تر از آن است که به صورت ریاضی توصیف شود. معادلات دیفرانسیلی که تلاش دارند همه این عوامل را لحاظ نمایند را می‌توان برای غلظت آلاینده درون جعبه در هر زمان نوشت.

$$VdC = Gdt - (C)(Q)(M)dt - (C)(K)dt \quad (9)$$

$$V = \text{حجم فرضی جعبه, } m^3$$

$$t = \text{متغیر زمان, } hr$$

^۱ . Steady-state model

مدلسازی مواجهه تنفسی

C = غلظت در جعبه در هر زمان، mg/m^3

G = میزان تولید آلاینده درون جعبه، mg/hr

Q = میزان دبی حجمی هوای تعویضی در جعبه، m^3/hr

m = راندمان اختلاط تهویه درون جعبه، بدون واحد (دیمانسیون)

K = میزان دفع از طریق مکانیسم‌های غیر از تهویه و فیلتراسیون، m^3/hr

معمولاً اطلاعات خاصی در مورد میزان افت غیر تهویه‌ای^۲ (K) (دفع آلاینده از طرق غیر تهویه‌ای) و راندمان اختلاط (m)، یا مدت زمان مواجهه در دست نیست. بنابراین مقادیر این فاکتورها و میزان تهویه (Q) و میزان تولید (G) به نحوی فرض می‌شود که حد بالای برآورد غلظت را باعث می‌شوند. در واقع، شرایط حالت-یکنواخت اغلب پیش‌فرض آنالیز است. مفروضات مدل حد بالای فیزیکی‌شیمیایی زیر معمولاً برای برآورد غلظت هوابرد (C) ناشی از منابع تبخیر استفاده می‌شود.

شرایط تعادل (زمان به میزان کافی طولانی است که $dC=0$). با وجود یک منبع ثابت، حداکثر غلظت هوابرد در حالت تعادل رخ می‌دهد. برای اطلاعات بیشتر به مبحث عنصر زمان در مواجهه مراجعه شود.

متغیر G = الگوریتم ارائه شده از سوی آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) است.

این الگوریتم با جزئیات بیشتر در مثال زیر ارائه شده است. با این وجود این الگوریتم اساساً مبتنی بر ضریب انتقال جرم (K_t) است که خود با معادله نسبتاً ساده برآورد می‌شود. در نمونه‌هایی که این الگوریتم با سایر تکنیک‌ها و اندازه‌گیری‌ها مقایسه شده، به میزان قابل توجهی میزان تبخیر را بیش از مقدار واقعی برآورد کرده بود. برآورد پیچیده‌تر از G ناشی از منابع تبخیر (مدل HBF) نیز در ادامه توضیح داده شده است.

متغیر $Q = 0.1$

تعویض هوا بر ساعت. بسیاری از ساکنان تمهیدات خاصی برای گردش هوای خراجی ندارند. تهویه عمومی اغلب از طریق نفوذ هوای بیرونی به درون ساختمان از طریق شکاف‌ها و درزها است. به تجربه مشخص شده است که میزان تعویض هوا در صنعت بیش از 0.3 تعویض هوا در ساعت است. بنابراین در نبود اطلاعات مشخص در این رابطه، فرضیه 0.1 تعویض هوا در ساعت نشان‌دهنده برآورد بیش از حد برای بدترین حالت (*worst case*) است.

متغیر $m = 0.3$.

این مقدار بر اساس مطالعات قبلی در مورد کار در فضای داخل بدون فن‌ها که مقدار m بین 0.3 تا 0.4 گزارش شد. مفهوم m و استفاده از آن محدودیت‌هایی دارد. این مورد برای برآورد مواجهه مفید بوده و حتی ضروری است. اگرچه از فرضیه‌ی اولیه بقای

² . Non-ventilatory loss rate

جرم تخطی می‌کند و بنابراین بر کیفیت برآورد تاثیر زیادی دارد. ممکن است بهتر باشد آن را بعنوان فاکتور ایمنی یا فاکتور عدم قطعیت مربوط به غلظت کانون‌های خطر به دلیل اختلاط ضعیف در اطراف منبع لحاظ کرد.

متغیر $K = 0$ (عدم دفع از طرق غیرتهویه‌ای)

تعداد کمی از مواد در هوا نسبتاً به سرعت استحاله می‌شوند به نحوی که بر غلظت هوابرد آنها در هوا تاثیرگذار است. ترکیبات فرار و نیمه فرار ممکن است در سطوح محیط ته‌نشین شوند که می‌تواند روی هم انباشته شده استحاله گشته یا مجدداً به هوا انتشار یابند. منابع آلاینده کوتاه مدت ممکن است غلظت‌های پیکی داشته باشند که به میزان بارزی از طریق این اثرات فوق کاهش می‌یابد. برای منابع پیوسته و بلندمدت آلاینده، غلظت تعادل در نهایت مشابه است اما برای سیستم‌هایی که سطح ته‌نشینی قابل توجهی دارند، با تاخیر صورت می‌گیرد.

همچنین در سیستم‌هایی که استحاله پس از جذب سطحی روی سطوح محیط رخ می‌دهد، غلظت هوابرد حالت یکنواخت می‌تواند به میزان بارزی کاهش یابد.

فرضیات زیر در ارتباط با الگوهای فعالیت انسان برآورد مواجهه (حاصل ضرب غلظت هوابرد با زمان) را حدتث خواهد نمود: کارگر در کل شیفت کاری در این محل مواجهه حضور دارد، و مصرف کننده در محل مواجهه فرضی به مدت ۲۴ ساعت در روز حضور دارد. با استفاده از این فرضیات، مدل تهویه عمومی که فاکتور اختلاط را مشارکت داده و از K صرف نظر (مقدار آن را برابر صفر) می‌کند، به صورت زیر خواهد بود:

$$C_{eq} = \frac{G}{(Q)(m) + K} = \frac{G}{(Q)(m)} \quad (10)$$

سطح دوم

مثال مدلسازی مواجهه با تولوئن موجود در محصول مایع

محاسبات این مثال با مدل تهویه صفر در سطح اول آغاز شد. در آن محاسبات غلظت بالای سطح مایع و غلظت مواجهه بالقوه در بدترین حالت مرتبط با آن برآورد شد. در سطح اول برآورد مواجهه تنها بر اساس اطلاعات مربوط به غلظت تولوئن در محصول و ثابت قانون هانری^۳ بدست آمد.

برای آنالیز بیشتر (مدل جعبه سطح دوم) در این مثال، اطلاعات بیشتری در مورد سناریوی مواجهه واقعی لازم است. این محصول مایع معمولاً در صنایع سبک استفاده می‌شود که انتشار اصلی و مواجهه ناشی از ظروف باز محصول است. مساحت سطح باز ظرف 100 cm^2 است و دمای اتاق در ۲۵ درجه سانتی گراد حفظ می‌شود. همچنین مشخص شده است که کارگر اغلب در اتاق است امام به ندرت کاملاً به ظرف در باز محصول نزدیک می‌شود. یعنی متوسط غلظت‌های اتاق حائز اهمیت است نه غلظت‌های نزدیک به

³ . Henry's law constant

منبع یا مواجهات بسیار نزدیک به ظرف دربار. میزان دقیق تهویه عمومی تعیین نشده است و بطور معمول تهویه موضعی وجود دارد.

یک مدل فیزیکی شیمیایی برای برآورد توان منبع آلاینده برای تبخیر مایع توسط *Fleischer* ارائه شده و توسط EPA مورد استفاده قرار گرفته است:

$$G = (10^3) \frac{(K_t)(MW)(AREA)(VP_P - VP_B)}{(R)(TL)} \quad (11)$$

G = میزان تولید بخار، mg/hr

K_t = میزان انتقال جرم، m/hr

MW = وزن مولکولی، $g/mole$

$m^2 = AREA$

VP_P = فشار بخار ماده، اتمسفر (atm)

VP_B = فشار جزئی آلاینده در اتاق، اتمسفر (atm)

R = ثابت گاز (8.2×10^{-5})

TL = دمای مایع در حال تبخیر، کلوین (K)

در این تمرین، ضریب انتقال جرم (K_t) با استفاده از معادله زیر برآورد می شود.

$$K_t = \sqrt[3]{\frac{18}{MW}} \quad (12)$$

استفاده از الگوریتم معادله ۱۲ تنها برای ساده سازی این مثال ارائه شده است چراکه نسبتاً معادله‌ای آسان است؛ اگرچه روش‌های پیچیده‌تری برای تعیین آن وجود دارد.

در این مثال مقادیر ورودی که در جدول زیر ارائه شده‌اند مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۱ مقادیر مورد استفاده در مثال تولوئن

منبع	مقدار
$K_t = 17.4 \text{ m/hr}$	معادله ۱۲
$MW = 92.1 \text{ g/mole}$	کتاب‌های مرجع
$AREA = 0.01 \text{ m}^2$	۱۰۰ سانتی متر مربع به متر مربع تبدیل شد
$VP_P = 61 / 1,000,000$	ppm ۶۱ حجمی از محاسبه قبلی قانون هانری که به اتمسفر تبدیل شده

مدلسازی مواجهه تنفسی

فرضیه محافظه کارانه	$VP_B = 0$
ثابت جهانی گاز	$R = (8.205 \times 10^{-5} \text{ atm m}^3 / ((\text{mole})(\text{deg K})))$
۲۵ درجه سانتی گراد به کلوین تبدیل شده است	$T = 298 \text{ K}$
حجم اتاق (فرض محافظه کارانه)	$V = 50 \text{ m}^3 \text{ (room volume)}$
رجوع شود به مرجع شماره ۱۴	$m = 0.3$
فرضیه محافظه کارانه	$\text{Air change/hr} = 0.1$
استفاده از بدترین حالت (worst case)	$G = 40 \text{ mg/hour}$

یکی از فرضیه‌ها در مدل بالا این است که فشار جزئی آلاینده در هوای جعبه (VP_B) نسبت به فشار بخار ماده مورد نظر (VP_B) قابل توجه نیست. این ساده‌سازی میزان تولید بخار و متعاقب آن غلظت حاصل از آن را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کند. این ساده‌سازی برای منابع کوچک ایجاد بخار مفید است (نظیر مثال حاضر) اما برای منابع تبخیر بزرگ مناسب نیست. استفاده از این مقادیر در معادله ۱۱، میزان انتشار بخار به فضای اتاق را 40 mg/hr برآورد می‌کند. حجم اتاق ضربدر میزان تعویض هوا در هر ساعت، میزان تهویه (Q) را نشان می‌دهد:

$$Q = (V)(\text{air change/hr})$$

$$Q = (50)(0.1) = 5 \text{ m}^3/\text{hr}$$

با فرض ضریب اختلاط $m = 0.3$ ، معادله ۱۰ متوسط میزان غلظت تولوئن در هوای اتاق کار را برابر با 27 mg/m^3 (7 ppm v/v) پیش‌بینی می‌کند. این مقدار کمتر از حد مجاز مواجهه فعلی تولوئن 188 mg/m^3 (50 ppm v/v) است. می‌باید یادآوری کرد که اغلب پیش‌بینی‌کننده‌ها (متغیرهای مستقل) در مدل، دارای اثر خطی بر غلظت پیش‌بینی شده دارند و مساحت سطحی کمتر از سه برابر و فشار بخار (ناشی از غلظت بیشتر تولوئن در محلول یا دماهای بالاتر) میزان مواجهه را بیش از حد مجاز مواجهه پیش‌بینی می‌کند. بنابراین مدل‌سازی منبعی بزرگتر، گرم‌تر یا حاوی محلولی با غلظت تولوئن بیشتر، حد بالای برآورد ریسک را غیرقابل قبول پیش‌بینی می‌کند. در مدل جعبه، می‌توان برای برآورد میزان تولید از مدل پیچیده‌تری استفاده کرد. این مدل توسط EPA برای برآورد میزان مواجهه تنفسی با مواد شیمیایی جدید استفاده می‌شود. مدل HBF ^۴ بصورت زیر برآورد می‌شود:

$$G = \frac{(7.2 \times 10^4)(MW)(VP_p)(AREA)}{(R)(TL)} \sqrt{\frac{(V_x)(D_{ab})}{(\pi)(\Delta X)}} \quad (13)$$

$$D_{ab} = \text{ضریب انتشار، cm}^2/\text{sec}$$

$$\Delta X = \text{طول مخزن در راستای جریان هوا، cm}$$

$$V_x = \text{سرعت هوا در جهت محور x، cm/sec}$$

⁴ . Hummel-Braun-Fehrenbacher (HBF)

ضریب انتشار با جزئیات بیشتر بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_{ab} = \frac{4.09 \times 10^{-5} (TL)^{1.9} \left(\frac{1}{29} + \frac{1}{MW} \right) (MW)^{-0.333}}{P_t} \quad (14)$$

P_t = فشار اتمسفری، atm

این مدل مشخصه‌های سرعت هوا (V_x) در بالای مخزن و طول مخزن در راستای حرکت هوا (ΔX) اضافه کرده است. اگر فرض شود که اساساً فضای بالای مخزن ایزومتریک (فشار یکسان در قسمت‌های مختلف) باشد، پس طول فضای بالای مخزن بطور منطقی بصورت جذر مساحت تخمین زده می‌شود.

تجربه نشان داده است که اکثر محیط‌های داخلی ساختمان با حرکت آرام هوا، دامنه حرکت هوا بین ۵ تا ۲۰ فوت بر دقیقه است. اگر این مثال با ΔX برابر با جذر مساحت (و تبدیل آن cm^2) و V_x برابر با 5 ft/min (و تبدیل آن به cm/sec) باشد، میزان گاز یا بخار متصاعد شده به فضای اتاق 15 mg/hr برآورد می‌شود. مقادیر پیش‌بینی‌شده برای سرعت‌های هوای 10 ft/min و 20 ft/min ، به ترتیب با 21 mg/hr و 30 mg/hr برابر خواهد بود. بر اساس برآورد نسبتاً خام از میزان انتقال جرم با استفاده از معادله ۱۲، برآورد اولیه میزان انتشار برابر با 40 mg/hr می‌بود. پس استفاده از مدل پیچیده‌تر امکان برآورد دقیق‌تر را فراهم نمود. درواقع مدل HBF پیش‌بینی می‌کند که میزان انتشار بخار یا گاز تولوئن از مخزن در این مثال تا زمانی که جریان هوا به ۵۰ فوت بر دقیقه نزدیک شود، برابر با 40 mg/mg^3 است.

مدل‌های دیگری نیز برای برآورد مواجهه با عوامل شیمیایی وجود دارند که معادلات پیچیده‌تری دارند. برای استفاده از این مدل‌ها نرم افزارهایی تهیه شده‌اند که محاسبات را انجام می‌دهند. در ادامه لینک دانلود یکی از این نرم افزارها قرار داده شده است.

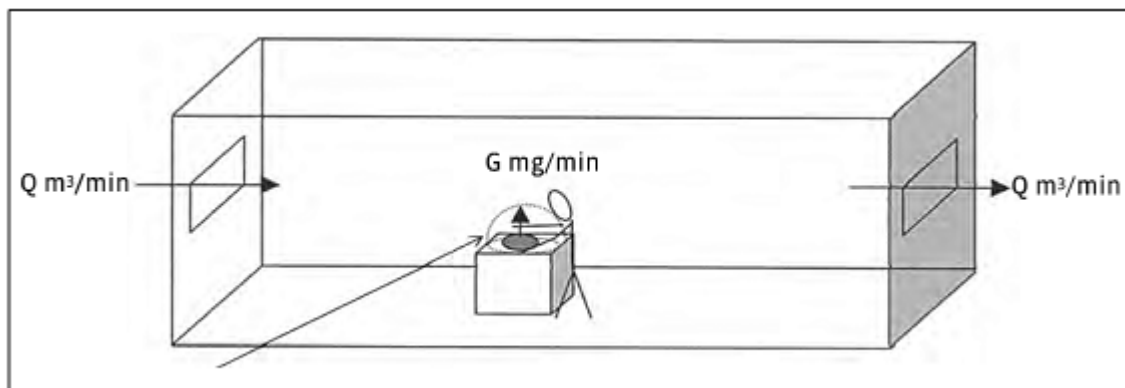


Figure 10.2 — Near field volume with the remaining room volume = far field.

$$C_N(t) = \frac{G}{\left[\frac{\beta}{\beta+Q}\right] Q} + G \left[\frac{\beta Q + \lambda_2 V_N (\beta + Q)}{\beta Q V_N (\lambda_1 + \lambda_2)}\right] e^{\lambda_1 t} \times G \left[\frac{\beta Q + \lambda_2 V_N (\beta + Q)}{\beta Q V_N (\lambda_1 + \lambda_2)}\right] e^{\lambda_2 t}$$

$$C_F(t) = \frac{G}{Q} + G \left[\frac{\lambda_1 V_N + \beta}{\beta}\right] \left[\frac{\beta Q + \lambda_2 V_N (\beta + Q)}{\beta Q V_N (\lambda_1 + \lambda_2)}\right] e^{\lambda_1 t} - G \left[\frac{\lambda_2 V_N + \beta}{\beta}\right] \left[\frac{\beta Q + \lambda_1 V_N (\beta + Q)}{\beta Q V_N (\lambda_1 + \lambda_2)}\right] e^{\lambda_2 t}$$

$$\lambda_1 = 0.5 \left[- \left[\frac{\beta V_F + V_N (\beta + Q)}{V_N V_F} \right] + \sqrt{\left[\frac{\beta V_F + V_N (\beta + Q)}{V_N V_F} \right]^2 - 4 \left[\frac{\beta Q}{V_N V_F} \right]} \right]$$

$$\lambda_2 = 0.5 \left[- \left[\frac{\beta V_F + V_N (\beta + Q)}{V_N V_F} \right] + \sqrt{\left[\frac{\beta V_F + V_N (\beta + Q)}{V_N V_F} \right]^2 - 4 \left[\frac{\beta Q}{V_N V_F} \right]} \right]$$

$$C_{F,SS} = \frac{G}{Q}$$

$$C_{N,SS} = \frac{G}{Q} + \frac{G}{\beta}$$

$$\beta = 1/2 \times FSA \times S$$

$$C_{N,SS} = C_{eq} = \frac{G}{\left[\frac{\beta}{\beta+Q}\right] Q}$$

$$C = \frac{G}{4(\pi)(D)(r)} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{r}{\sqrt{4(t)(D)}} \right]$$

$$C_{eq} = \frac{G}{2(\pi)(D)(r)}$$

$$G = \frac{C_{avg} Q^2}{Q + \frac{V}{t} (e^{-Qt/V} - 1)}$$

$$Y_{ppm} = \left(\frac{\%Y}{\%X} \right) \left(\frac{VP_y}{VP_x} \right) (X_{ppm})$$

$$t = \frac{-V}{(Q)(m) + k} \ln \left[G - \frac{(Q)(m) + k)(C)}{G} \right]$$

$$C = \frac{0.99 (G)}{(Q)(m) + k}$$

$$t(@90\% \text{ of equilibrium}) = 2.303 \frac{V}{(Q)(m) + k} \quad (29)$$

$$C = C_0 e^{-\frac{(Q)(m)(t)}{V}} \quad (30)$$

$$C = \frac{G}{(Q)(m)} + C_0 - \frac{G}{(Q)(m)} e^{-\frac{(Q)(m)(t)}{V}} \quad (31)$$