

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

چکیده

سیستم‌های تهویه در کلین‌روم‌ها سال‌هاست که مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما هنوز لازم است مزایا و محدودیت‌های روش‌های موجود بررسی و شفاف‌سازی شوند. این مطالعه ابتدا نگاهی به تاریخچه سیستم‌های تهویه کلین‌روم دارد تا زمینه‌ای برای درک استانداردهای نرخ تهویه، اصطلاحات مرتبط با کارایی تهویه، و مطالعات علمی که ارتباط میان اثربخشی تهویه و نرخ تعویض هوا را بررسی کرده‌اند فراهم کند.

این مرور سیستماتیک شامل یک جمع‌بندی جامع از داده‌های تاریخی و شواهد علمی است که می‌توانند برای تعیین نیازهای تهویه در کلین‌روم‌ها استفاده شوند. مقالات علمی شناسایی شده در سه گروه آزمایشگاهی، شبیه‌سازی/تحلیل عددی، و مطالعات ترکیبی طبقه‌بندی شدند. طراحان و متخصصان HVAC می‌توانند با درک صحیح اصطلاحات و انتخاب راهکارهای قابل اجرا، از استانداردها و آیین‌نامه‌های منتشر شده کارآمدتر استفاده کنند.

هدف این مطالعه ارائه بینش عمیق درباره نقش تهویه در سازوکار انتقال ذرات ناخواسته در کلین‌روم‌هاست. از لحاظ تاریخی، نرخ تهویه معمولاً بیش از حد و با اتکا به تجربه طراح انتخاب می‌شد تا کیفیت هوای داخل و عملکرد حرارتی تضمین شود؛ اما این افزایش بیش از حد، مصرف انرژی سیستم را به‌طور چشمگیری بالا می‌برد. بنابراین ضروری است که توصیه‌های موجود بررسی شوند تا مشخص شود آیا بر پایه شواهد علمی هستند یا صرفاً تجربی، و آیا باید پیش از استفاده گسترده مورد بازبینی قرار گیرند.

افزون‌براین، لازم است خطرات احتمالی و پیامدهای وابسته به روش‌های سنتی تهویه ارزیابی شوند تا عملکرد، پایداری و بهره‌وری انرژی یک کلین‌روم تضمین شود.

کلیدواژه‌ها: کلین‌روم، تهویه، الزامات تهویه، نرخ تعویض هوا

مقدمه (INTRODUCTION)

طی تقریباً ۷۰ سال تاریخ توسعه کلین‌روم‌ها، بسیاری از مفاهیم مربوط به سیستم‌های تهویه این فضاها تغییر کرده‌اند. کلین‌روم‌های اولیه که با هدف جلوگیری از ورود گردوغبار به محیط‌های حساس تولید طراحی شده بودند، از فیلترهای بسیار کارآمد با راندمان بالای ۹۹٫۹۵٪ و ایجاد فشار مثبت استفاده می‌کردند (Whyte, 2010). الگوهای توزیع هوا - به‌ویژه جریان یک‌سویه (Unidirectional Airflow) - نخستین بار توسط Whitfield در سال ۱۹۶۲ مطرح شدند و به‌سرعت مورد توجه طراحان کلین‌روم قرار گرفتند.

هدف این مقاله بررسی تاریخی کلین‌روم‌ها نیست؛ برای این منظور می‌توان به مطالعات دیگر مراجعه کرد (Naughton, 2019). در این پژوهش تمرکز بر بررسی مقالات علمی مرتبط با سیستم‌های تهویه کلین‌روم و تحلیل سیر تحول شواهد و تحقیقات انجام شده

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

در این حوزه است. به همین منظور، تمامی مقالات مرتبط که در مرحله جست‌وجو شناسایی شدند، بر اساس سال انتشار مرتب شدند.

روند تاریخی تحقیقات

تحقیقات پیش از سال ۱۹۹۱ عمدتاً بر پایه مبانی نظری و آزمایش‌های محدود بود و معمولاً به کلین‌روم‌های صنعتی و نیمه‌رسانا (Semiconductor) می‌پرداخت، چرا که نیاز صنعت این حوزه را تعیین می‌کرد. برای مثال، یک مطالعه در اوایل دهه ۲۰۰۰ نشان داد که ۵۸٪ کلین‌روم‌های ایالت کالیفرنیا مربوط به صنعت نیمه‌رسانا بودند.

در دهه ۱۹۹۰ تلاش زیادی برای یافتن مقدار بهینه سرعت هوا، نرخ تهویه و میزان فشار مثبت انجام شد. با رواج استفاده از کامپیوتر، استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی رشد چشمگیری یافت. در اوایل دهه ۲۰۰۰ جهت‌گیری پژوهش‌ها به سمت مطالعه رفتار آلاینده‌ها و ذرات، و نحوه حذف یا محصورسازی آن‌ها از طریق سیستم تهویه تغییر کرد.

هرچند مفهوم «کارایی تهویه» از دهه ۱۹۸۰ مطرح شده بود، اما حدود دو دهه طول کشید تا جایگاه مهمی در طراحی و بهره‌برداری کلین‌روم‌ها پیدا کند. پژوهش‌های جدیدتر به‌طور فزاینده‌ای بر بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌ها، هم از منظر پاکیزگی هوا و هم از نظر مصرف انرژی بسیار زیاد کلین‌روم‌ها تمرکز کرده‌اند.

این مطالعه نیز بر همین اساس ساختاربندی شده و سه محور را بررسی می‌کند:

۱. الزامات هوا و تهویه در کلین‌روم‌ها
۲. کنترل و حذف ذرات
۳. بهینه‌سازی سیستم تهویه

افزون بر این، مقاله توانمندی رویکردهای عددی و تجربی را برای پیشبرد فهم ما از نیازهای تهویه‌ای در کلین‌روم بررسی می‌کند؛ نیازهایی که می‌توانند طراحی، ساخت، مصرف انرژی و نگهداری سیستم‌های تهویه را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهند. این مقاله یک رویکرد نظام‌مند برای تحلیل ادبیات علمی موجود ارائه می‌دهد تا راهکارهایی برای طراحی، بهره‌برداری و نگهداری بهینه سیستم‌های تهویه در کلین‌روم‌ها فراهم شود.

روش (METHOD)

تیم پژوهش برای جمع‌آوری مقالات مرتبط با سیستم‌های تهویه در کلین‌روم‌ها، یک فرآیند منظم طراحی کرد. این فرآیند طی جلسات هفتگی و بررسی‌های ماهانه اجرا شد تا اطمینان حاصل شود که جست‌وجوی انجام‌شده کامل و قابل‌اعتماد است.

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

۲,۱ استخراج واژه‌های کلیدی

پژوهش با استخراج واژه‌ها و مفاهیم پایه‌ای مرتبط با تهویه آغاز شد. این کلمات در دو گروه دسته‌بندی شدند:

گروه اول (مربوط به تهویه):

- ventilation تهویه
- ventilation effectiveness کارایی تهویه
- ventilation rate نرخ تهویه
- ventilation requirements نیازهای تهویه
- ventilation air هوای تهویه
- air change rate نرخ تعویض هوا (ACH –
- ventilation effectiveness factor ضریب کارایی تهویه)

گروه دوم (مرتبط با کلین‌روم):

- cleanroom
- clean room

در هر جست‌وجو، یک واژه از گروه اول و یک واژه از گروه دوم ترکیب شد؛ بنابراین ۱۴ ترکیب مختلف برای جست‌وجوی علمی ایجاد شد.

۲,۲ پایگاه‌های داده مورد استفاده

این ترکیبات در موتورهای جست‌وجوی علمی زیر وارد شدند:

- Engineering Village
- Compendex (Elsevier)
- PubMed
- Google Scholar
- Scopus

هدف این بود که گسترده‌ترین مجموعه از پژوهش‌های مرتبط با تهویه کلین‌روم‌ها استخراج شود.

۲,۳ غربالگری اولیه

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

در مرحله نخست:

- عنوان‌ها و چکیده‌ها بررسی شدند.
- اگر فقط عنوان برای تصمیم‌گیری کافی نبود، چکیده یا بخش‌های دیگر بررسی شدند.

در نتیجه ۲۳۶ مقاله در یک فایل صفحه‌گسترده وارد شد.
از این تعداد:

- ۱۷ مقاله انگلیسی نبودند،
- ۱۷ مقاله یافت نشدند.

بنابراین تعداد نهایی مقالات قابل بررسی به ۲۰۲ مقاله کاهش یافت.

۲,۴ دسته‌بندی روش‌شناسی مقالات

پس از تکمیل پایگاه داده:

هر مقاله بر اساس نوع روش پژوهش طبقه‌بندی شد:

- Experimental (تجربی)
 - شامل آزمایش‌های میدانی یا آزمایشگاهی (اتاق تست)
- Numerical (عددی / شبیه‌سازی)
- Hybrid (ترکیبی)
- Review (مروری / نظری)

وضعیت کل مقالات به شکل زیر بود:

- ۷۳ مقاله تجربی
 - ۴۰ مورد آزمایش اتاق تست
 - ۳۳ مورد ارزیابی میدانی
- ۴۹ مقاله عددی
- ۲۵ مقاله ترکیبی
- ۵۰ مقاله مروری / نظری
- ۵ مقاله غیرمرتبط

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

۲,۵ تحلیل محتوای مقالات

سپس اعضای تیم پژوهشی:

۱. مقالات را بین خود تقسیم کردند.
۲. هر مقاله به‌دقت خوانده شد.
۳. برای هر مقاله موارد زیر ثبت شد:
 - روش پژوهش
 - نتیجه‌گیری‌های اصلی
 - توصیه‌های کاربردی نویسندگان
 - خلاصه‌ی پژوهش

این اطلاعات در یک فایل جامع جمع‌آوری شد تا امکان تحلیل مقایسه‌ای فراهم شود.

الزامات تهویه در کلین‌روم‌ها

تحقیقات گردآوری‌شده در این مطالعه، به مشکلات رایج کلین‌روم‌ها مانند انتشار آلودگی، رفتار جریان هوا، ایجاد تلاطم، و مصرف بیش‌ازحد انرژی پرداخته‌اند. نتایج این مطالعات در شکل‌گیری استانداردهای جدید و توصیه‌های طراحی کلین‌روم نقش مهمی داشته‌اند. در این بخش، مهم‌ترین یافته‌ها درباره نیازهای تهویه بررسی می‌شود؛ از جمله:

۱. دمای هوا و رطوبت نسبی (RH)
۲. فشار مثبت و نرخ تعویض هوا (ACH)
۳. نوع و طراحی سیستم توزیع هوا

۳,۱,۱ آسایش حرارتی (Thermal Comfort)

پژوهش‌های مرتبط با آسایش حرارتی به بررسی رطوبت نسبی و دمای هوا پرداخته‌اند و این‌که چگونه این عوامل تحت‌تأثیر نیازهای انسانی و فرآیندهای صنعتی قرار می‌گیرند.

تأثیر سیستم‌های مختلف تهویه بر دما و رطوبت

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

(1996) Davison چهار مدل مختلف سیستم تهویه و کنترل شرایط محیطی در مینی/نورونمنت‌ها (محفظه‌های کوچک در صنایع حساس مانند لیتوگرافی) را بررسی کرد:

۱. سیستم هوای داغ/هوای سرد (Hot-deck / Cold-deck)
۲. سیستم هوای تازه صددرصد (100% Makeup Air)
۳. سیستم بازگردش هوا (Basic Recirculation)
۴. سیستم بازگردش مزرعه‌ای (Recirculation Farm System)

نتایج نشان داد:

- سیستم‌های اول و دوم قادر به کنترل دما در محدوده $\pm 17.6^{\circ}\text{C}$ و کنترل رطوبت در محدوده بسیار دقیق $\pm 0.05\% \text{ RH}$ بودند.
- سیستم بازگردش ساده، دقت کمتر و دامنه $33\% - 41\% \text{ RH}$ داشت.
- سیستم ترکیبی (بازگردش + هوای تازه) بهترین کنترل همزمان دما و رطوبت را فراهم کرد.

سختگیرانه‌تر شدن استانداردهای آسایش

(1992) Naughton اشاره کرد که استانداردهای کلین‌روم‌ها، به‌ویژه در صنایع الکترونیک، سختگیرانه‌تر شده‌اند و نیازمند فرآیند راه‌اندازی و تنظیم دقیق‌تر (Commissioning) هستند.

کاهش مصرف انرژی با روش‌های جدید رطوبت‌رسانی

(2017) Jo et al. نشان دادند:

- استفاده از اتومایزر آب پرفشار در مسیر هوای برگشتی
- به‌جای مرطوب‌کننده بخار در واحد هوای تازه

می‌تواند تا ۲۳٪ صرفه‌جویی انرژی ایجاد کند.

اثر اختلاف دما بر رفتار جریان هوا و ایجاد نواحی رکود

(2017) Rotheudt et al. در شبیه‌سازی‌های عددی برای کلین‌روم‌های جریان یک‌سویه عمودی یافتند:

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

- اختلاف دمای بین هوای وارد شده و دیوارها
- موجب جداسازی لایه مرزی و ایجاد منطقه چرخشی می‌شود
- این مناطق رکود، محل تجمع آلاینده‌ها هستند
- عایق کاری دیوارها ضخامت ناحیه جداسازی را کاهش می‌دهد

کارایی سرمایش تابشی در کلین‌روم‌ها

Al Beltagy et al. (2018):

- سیستم سرمایش تابشی را بررسی کردند
- نتیجه:
- دمای یکنواخت و آسایش حرارتی مطلوب
- عملکرد قابل قبول طبق شاخص‌های PMV و PPD

در مقابل، Choi et al. (2019) نشان دادند:

- در سیستم‌های تهویه جابه‌جایی (Displacement Ventilation)
- استفاده از سقف تابشی، موجب سرد کردن غیریکنواخت فضا می‌شود.

اهمیت دمای مناسب در جریان یک‌سویه

برای کلین‌روم‌های جریان یک‌سویه (LAF):

- هوای ورودی باید کمی گرم‌تر از ناحیه کاری باشد
- تا یکنواختی جریان هوا حفظ شود (Alhamid et al., 2018)

اثر تجهیزات حرارتی روی الگوی جریان

He et al. (2018):

- روشن کردن «فن گرم‌کننده» (Air warming blower)
- باعث ایجاد پلوم حرارتی قوی و افزایش ۶۰٪ شدت تلاطم می‌شود
- این امر باعث صعود ذرات به سمت میز عمل می‌شود
- در حالی که در حالت خاموش، چنین مشکلی مشاهده نمی‌شود.

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

✓ جمع‌بندی آسایش حرارتی

یافته کلی:

یکنواختی دما و حذف اختلاف دمایی، مهم‌ترین عامل ایجاد آسایش حرارتی و کاهش نقاط رکود آلاینده‌ها در کلین‌روم است.

۳,۱,۲ فشار مثبت و نرخ تعویض هوا (Pressurization & ACH)

ایجاد فشار مثبت مناسب یکی از عناصر کلیدی در طراحی تهویه کلین‌روم است، زیرا بسیاری از تجهیزات، الزامات ایمنی، و تنظیمات سیستم HVAC به دقت فشار وابسته‌اند. فشار مثبت باعث می‌شود هوا از داخل به بیرون نشت کند و نه برعکس، و به این ترتیب آلودگی‌های بیرونی وارد محیط حساس نشوند. (Bharath & Reddy, 2013)

فشار مناسب برای جلوگیری از نشت گازها

Campbell (1996) توصیه کرد:

- برای جلوگیری از انتشار گازهای خطرناک، فشار در خطوط لوله حداقل ۲۵ پاسکال کمتر از محیط نباشد. (یعنی فشار داخل کلین‌روم باید پایدار و بیشتر از محیط باشد).

استفاده از فشار برای پیش‌بینی رفتار جریان

Karimipناه (1998):

- از فشار به عنوان روشی برای پیش‌بینی تلاطم، جهت جریان و نقاط برخورد هوا استفاده کرد. این دیدگاه فشار را به ابزاری برای تحلیل ایمنی تبدیل می‌کند.

روش جدید شبیه‌سازی فشار

Yamaguchi et al. (2010):

- پیشنهاد داد از مدل شبکه الکتریکی برای شبیه‌سازی تغییرات فشار استفاده شود. در این مدل:

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

- حجم هوا = ظرفیت الکتریکی
- افت فشار = مقاومت
- تولید فشار = منبع ولتاژ

این روش باعث:

- محاسبه دقیق‌تر فشار
- بهره‌برداری بهتر از تجهیزات
- بهبود قابلیت تنظیم و بازسازی کلین‌روم‌های قدیمی می‌شود.

نقش فشار در تخلیه دود

Chien et al. (2009):

- نشان دادند خروج دود تنها زمانی مؤثر است که فشار داخل اتاق بیشتر از بیرون باشد.
- نسبت FFU ها (Fan Filter Units) و میزان بازبودن توری‌های کف نیز بر فشار توزیعی مؤثرند.

تأثیر فشار بر مصرف انرژی

Mathew et al. (2010):

- اشاره کردند که فشار نامناسب می‌تواند سبب مصرف انرژی بیش از حد شود.
- استفاده از فیلترهای HEPA با افت فشار کم مصرف انرژی واحدهای بازگردش هوا را به‌طور قابل توجه کاهش می‌دهد.

فشارهای استاندارد در کلین‌روم‌های دارویی

Lakshmana Prabu et al. (2017):

- فشار توصیه‌شده بین ۰٫۶۷ تا ۲٫۷ پاسکال بسته به کلاس پاکیزگی است.
- کلین‌روم‌های حساس‌تر → فشار مثبت بیشتر.

بهینه‌سازی نقطه تنظیم فشار در پمپ‌های چیلدواتر

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

(2013) Su & Yu بیان کردند:

- روش‌های قبلی تعیین فشار پمپ ناکافی بوده‌اند
- باید موارد زیر لحاظ شوند:
 - توپولوژی لوله‌ها
 - نوع مصالح
 - بار حرارتی
 - سن تجهیزات
- آن‌ها معادله‌ای معرفی کردند تا با محاسبه دقیق فشار، ۲۵٪-۳۰٪ صرفه‌جویی انرژی ایجاد شود.

نرخ تعویض هوا (ACH) و نقش آن در تهویه کلین‌روم

ACH نشان می‌دهد هوا در یک ساعت چند بار کاملاً تعویض می‌شود. اما مطالعات نشان می‌دهد افزایش بیش از حد ACH همیشه به معنای بهبود نیست و حتی می‌تواند باعث ایجاد تلاطم و بازگشت ذرات شود.

رابطه سرعت هوا و ACH

(1986) Bugaj & Przydrozny:

- برای یک کلین‌روم با ابعاد مشخص:
 - سرعت هوا $ACH = 0.45$ → m/s حدود ۱۹
 - سرعت هوا $ACH = 0.35$ → m/s حدود ۲۱.۵
- افزایش سرعت همیشه بهتر نیست؛ باید متناسب با ارتفاع و محل خروج هوا باشد.

کاهش سرعت برای یکنواختی جریان

(1991) Sadjadi & Liu:

- کاهش سرعت از ۰.۴۶ به ۰.۴۱ m/s
- ۳٪ یکنواختی بیشتر جریان
- یعنی سرعت زیاد باعث آشفتگی و افت عملکرد می‌شود.

سرعت بهینه برای کنترل ذرات

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

Maxwell et al. (1994):

- سرعت مناسب: بین ۰٫۳۰ تا ۰٫۳۳ m/s
- توصیه: همیشه سرعت برای هر چیدمان تجهیزات جداگانه تست شود.

تأثیر نوع درب‌ها

Kalliomaäki et al. (2016):

- بهترین گزینه: درب کشویی تک‌لنگه
- کمترین برهم‌زدگی جریان هوا.

ACH بسیار بالا چه مشکلاتی ایجاد می‌کند؟

Nam (2000):

- در سرعت ۰٫۹۱ m/s تشخیص دود مشکل می‌شود.
- دود رقیق شده و حسگر به‌سختی تشخیص می‌دهد.

کاهش ACH برای جلوگیری از بازگردش ذرات

Wang et al. (2007):

- ACH زیاد → بازگشت ذرات
- بهترین روش: کاهش ACH تا حدی که جریان یکنواخت شود.

ACH لازم برای رسیدن به کلاس‌های مختلف

چند یافته مهم:

- ISO 6 حدود ۵۰ ACH (Wang et al., 2015) →
- کلین‌روم غیر یک‌سویه → ۷۰ تا ۱۳۹ ACH (Lin et al., 2010b)
- اتاق ایزوله یک‌سویه → ۳۶۰ ACH برای فرد ایستاده یا نشسته (Yang et al., 2015)
- شب‌ها می‌توان ACH را به ۲۸۸ کاهش داد (برای فرد خوابیده)

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

نقش کف مشبک (Raised Floor)

Khoo et al. (2012):

- افزایش + ACH افزایش درصد سطح مشبک
→ کاهش شدید ذرات
- در ACH پایین، کف مشبک تأثیر بیشتری دارد.

کاهش ACH در ساعات بدون فعالیت

Loomans et al. (2020):

- اگر شرایط بیرون پایدار باشد:
○ $ACH=0$ و $\Delta P=0$ کیفیت کلین‌روم حفظ می‌شود
- $\Delta P = 7.5 \text{ Pa}$ و $ACH = 4$
→ ایمنی بیشتر
- کاهش ACH تا ۵۰٪
→ ۳۰٪ تا ۷۰٪ صرفه‌جویی انرژی

حداقل ACH برای کلاس ۱۰۰,۰۰۰ (ISO 8)

Behrens et al. (2021):

- آزمایش ۱۰، ۱۲، ۱۵ و ۲۰ ACH
- ۱۰ ACH کافی است
- کاهش ۵۰٪ $ACH \rightarrow 25\%-30\%$ کاهش مصرف انرژی

رفتار FFU ها و تأثیر سرعت آن‌ها

Shao et al. (2021):

- با FFU های کمتر یا سرعت پایین‌تر:
→ ذرات بیشتر به طرفین پخش می‌شوند
- نتیجه:
در $FFU=50\%$ می‌توان مصرف هوا را ۴۰٪ کاهش داد بدون کاهش عملکرد

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

جمع‌بندی این بخش

فشار مثبت و ACH باید بهینه انتخاب شوند؛ نه زیاد و نه کم. افزایش بی‌رویه ACH لزوماً پاکیزگی را افزایش نمی‌دهد و حتی می‌تواند آلاینده‌گی را بدتر کند. بهترین عملکرد زمانی حاصل می‌شود که سرعت هوا، فشار، تعداد FFU ها و محل تجهیزات همگی هماهنگ شوند.

این بخش از مهم‌ترین بخش‌های مقاله است و مباحث بنیادین رفتار جریان هوا در کلین‌روم را توضیح می‌دهد.

۳,۱,۳ سیستم‌های توزیع هوا (Air Distribution Systems)

سیستم‌های توزیع هوا نقش بسیار مهمی در حذف ذرات، جلوگیری از ته‌نشینی آلاینده‌ها و حفظ یکنواختی جریان در کلین‌روم‌ها دارند. رفتار جریان هوا تعیین می‌کند که ذرات به کجا حرکت کنند، چگونه حذف شوند، و آیا نقاط رکود یا تلاطم ایجاد می‌شود یا نه.

در این بخش، مطالعات متعددی درباره انواع جریان هوا (یک‌سویه، غیر یک‌سویه، ترکیبی) مرور می‌شود.

۱ جریان هوا یک‌سویه – (Unidirectional Airflow – UAF / Laminar Flow)

جریان لامینار (UAF) از جمله رایج‌ترین و استانداردترین روش‌ها در کلین‌روم‌های حساس است. در این سیستم:

- هوا به‌صورت یکنواخت از سقف وارد می‌شود
- با سرعت ثابت و بدون تلاطم به سمت پایین حرکت می‌کند
- از طریق کف یا خروجی‌های پایین تخلیه می‌شود

این الگو، ستون هوای تمیزی ایجاد می‌کند که به‌سرعت ذرات را از منطقه کاری دور می‌کند.

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

یکنواختی جریان مهم‌تر از سرعت آن است

Rydock (2006) و Adams (1990):

- نشان دادند که یکنواختی جریان مهم‌تر از مقدار ACH است.
- سرعت بیش از حد باعث ایجاد تلاطم در اطراف تجهیزات می‌شود.
- سرعت پایین اما یکنواخت → کارایی حذف ذرات بالاتر.

تأثیر تجهیزات و موانع بر جریان

Huang & Tsao (2005):

- وجود تجهیزات (ماشین‌آلات، میزها، اپراتورها)
→ لایه جریان را برهم می‌زند
- باعث ایجاد:
 - نواحی رکود
 - مسیرهای برگشتی
 - نقاط تجمع ذرات

نتیجه:

چیدمان تجهیزات تقریباً به اندازه نرخ تهویه اهمیت دارد.

جریان لامینار افقی در اتاق‌های ایزوله

Xu (2007):

- جریان افقی → توزیع بهتر
- اما به موانع حساس است و در صورت وجود تجهیزات زیاد، مختل می‌شود.

جریان لامینار عمودی در کلین‌روم‌های صنعتی

Zhou et al. (2010):

- جریان عمودی (از سقف به کف):
 - پایدارتر

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

- کمتر از موانع تأثیر می‌گیرد
- برای صنایع نیمه‌رسانا بهترین گزینه است.

تأثیر مردم و حرکت اپراتورها

Nazmul & Chua (2018):

- حرکت افراد → ایجاد پلوم حرارتی
- این پلوم باعث بالا رفتن ذرات می‌شود
- و یکنواختی جریان را مختل می‌کند.

پس: رفت‌وآمد زیاد = کاهش کارایی تهویه

۲ سیستم‌های غیر یک‌سویه (Turbulent / Mixing Systems)

در این سیستم‌ها:

- هوا به‌صورت مخلوط‌شونده وارد فضا می‌شود
- ذرات پراکنده شده و از طریق رقیق‌سازی حذف می‌شوند

این روش برای کلاس‌های پایین‌تر (ISO 7-8) رایج است.

کاهش یکنواختی با افزایش ACH

Wang et al. (2007):

- در سیستم‌های ترکیبی/آشفته‌گی، افزایش ACH → ذرات بیشتر در هوا پخش می‌شوند → حذف به‌جای بهبود، بدتر می‌شود

اهمیت محل خروجی هوا

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

Isa et al. (2008):

- خروجی نزدیک به کف → حذف بهتر ذرات سنگین
- خروجی نزدیک سقف → برای کنترل گازها بهتر است

الگوی جریان پیچیده‌تر از حالت لامینار است

Heidarinejad (2018):

- رفتار جریان غیر یک‌سویه بسیار غیرخطی است
- کوچک‌ترین تغییر در سرعت، دما یا تجهیزات → مسیر ذرات را به شدت تغییر می‌دهد

نتیجه:

برای فضاهای حساس، این سیستم قابل اعتماد نیست.

۳ سیستم‌های ترکیبی (Hybrid Airflow Systems)

بسیاری از کلین‌روم‌های جدید از سیستم ترکیبی استفاده می‌کنند:

- بخش‌های حساس → جریان لامینار
- بخش‌های دیگر → جریان مخلوط‌شونده یا جابه‌جایی

ترکیب جریان لامینار + خروجی کف مشبک

Khoo et al. (2012):

- ترکیب UAF + کف مشبک
- بهترین حذف ذرات
- به‌ویژه وقتی ACH پایین باشد

ترکیب جریان یک‌سویه با کانال‌های هوای جانبی

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

Alhamid et al. (2018):

- اگر بخشی از هوا از دیوارها نیز خارج شود
→ نواحی رکود حذف می‌شود
→ توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود

بهترین عملکرد سیستم ترکیبی در اتاق عمل

Nazmul & Chua (2018):

- ترکیب جریان عمودی + کمک‌کننده‌های افقی
→ ۶۰٪ کاهش ذرات
• برای مناطق نزدیک به بیمار بهترین نتیجه را داشت

۴ عوامل کلیدی مؤثر بر عملکرد سیستم توزیع هوا

مطالعات به چند عامل مشترک اشاره دارند:

۱. یکنواختی جریان

مهم‌ترین عامل حذف ذرات، یکنواختی سرعت در سطح مقطع است.
سرعت کم + یکنواخت → بهتر از سرعت زیاد و آشفته.

۲. محل قرارگیری تجهیزات

هر مانع، جریان را می‌شکند و باعث ایجاد:

- گردابه
- نقاط رکود
- مسیرهای برگشتی

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

می‌شود.

چیدمان مناسب می‌تواند کارخانه را از «ISO 7» به «ISO 5» ارتقا دهد بدون افزایش ACH.

۳. حرکت افراد

بزرگ‌ترین عامل برهم‌زننده جریان در مطالعات مشاهده شد:

- حتی حرکت آرام دست
- یا راه‌رفتن آهسته

می‌تواند ناحیه لامینار را مختل کند.

۴. دما و اختلاف دمای سطوح

اختلاف بیشتر دما → رفتار غیرقابل‌پیش‌بینی جریان.

جمع‌بندی بخش ۳,۱,۳

سیستم‌های توزیع هوا تعیین می‌کنند که تهویه واقعاً چقدر کارایی داشته باشد. جریان لامینار مؤثرترین گزینه برای فضاهای حساس است، اما فقط زمانی که یکنواخت باشد، موانع کم باشند، و سرعت با دقت تنظیم شده باشد.

۳,۲ کنترل و حذف ذرات (Particle Control & Removal)

این بخش به اینکه «ذرات چگونه در کلین‌روم رفتار می‌کنند، چگونه جابه‌جا می‌شوند، چگونه معلق می‌مانند، و بهترین روش برای حذف آن‌ها چیست؟» می‌پردازد. تقریباً تمام طراحی کلین‌روم بر پایه‌ی همین بخش است.

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

۳,۲ کنترل و حذف ذرات

سیستم تهویه کلین‌روم تنها برای تنظیم دما و رطوبت نیست؛ مهم‌ترین نقش آن، به دام انداختن، جابه‌جایی و حذف ذرات معلق است.

پژوهش‌های بررسی‌شده در این بخش موارد زیر را روشن کرده‌اند:

- ذرات همیشه تابع جریان هوا نیستند
- حرکت افراد، تجهیزات و اختلاف دما رفتار جریان را تغییر می‌دهد
- حذف ذرات سنگین با حذف ذرات سبک متفاوت است
- چیدمان تجهیزات می‌تواند کارایی یا ناکارآمدی تهویه را تعیین کند

در ادامه یافته‌های کلیدی این تحقیقات آورده شده‌اند.

۱ رفتار ذرات در کلین‌روم و نقش تلاطم

ذرات بزرگ به‌سختی حذف می‌شوند

Bayareh et al. (2016):

- ذرات بزرگ‌تر از ۵ میکرون
→ بیشتر تمایل به ته‌نشینی دارند
→ در گوشه‌ها و زیر تجهیزات تجمع می‌کنند
- جریان لامینار اگر یکنواخت نباشد، این ذرات را به‌طور مؤثر حذف نمی‌کند.

تلاطم حتی کوچک → مسیر ذرات را تغییر می‌دهد

Chang & Liu (2013):

- وجود مانع کوچک
→ گردابه‌های محلی
→ تجمع ناگهانی ذرات

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

• نتیجه:

تلاطم، حتی بسیار کوچک، اثر غیرقابل پیش‌بینی بر ذرات دارد.

ذرات کوچک‌تر، رفتار پیچیده‌تری دارند

Tsai et al. (2008):

- ذرات ۰٫۱-۱ میکرون
→ به‌جای ته‌نشینی، دائماً در هوا شناور می‌مانند
- حذف آن‌ها تنها با افزایش یکنواختی جریان ممکن است، نه افزایش ACH.

۲ تأثیر افراد و حرکت آن‌ها

Nazmul & Chua (2018):

- یک نفر هنگام راه رفتن → حدود ۷,۰۰۰ ذره از لباس جدا می‌شود
- حرکت دست یا خم شدن → اختلال شدید در جریان لامینار

نتیجه:

رفت و آمد افراد یکی از مهم‌ترین منابع آلودگی و برهم‌زننده جریان لامینار است.

پلوم حرارتی بدن

Harish (2015):

- بدن انسان ستون هوای گرم تولید می‌کند که ذرات را بالا می‌کشد
- این جریان عمودی می‌تواند جریان لامینار را تضعیف کند

راهکار پیشنهادی:

- محدود کردن حرکت
- استفاده از لباس‌های کم‌ریز آلاینده

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

- تنظیم دمای مناسب برای کاهش پلوم حرارتی

۳ نقش تجهیزات و چیدمان

Huang & Tsao (2005):

- تجهیزات → ایجاد موانع → تغییر مسیر جریان
- زیر میزها و بین ماشین‌آلات
- مناطق رکود شکل می‌گیرد
- ذرات در آنجا گیر می‌کنند

چرا این مهم است؟

چیدمان غلط می‌تواند کلاس اتاق را دو سطح پایین بیاورد!
مثلاً یک اتاق ISO 5 اگر چیدمان بد داشته باشد → رفتاری مثل ISO 7 خواهد داشت.

۴ (نقش دما و شناوری حرارتی) (Buoyancy)

Lin et al. (2010c):

- اختلاف دما بین:
 - هوای ورودی
 - تجهیزات
 - دیوارها

باعث ایجاد صعود یا نزول غیرمنتظره جریان‌ها می‌شود.

مثال مهم

اگر سطح تجهیزات گرم باشد:

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

- هوا از اطراف آن بالا می‌رود
- جریان لامینار را مختل می‌کند
- ذرات در اطراف وسیله معلق می‌مانند

این پدیده در اتاق‌های تولید دارو و نیمه‌رسانا بسیار رایج است.

۵ بهترین روش حذف ذرات

پژوهش‌ها نشان می‌دهند:

✓ ۱. حذف از کف یا خروجی‌های پایین

برای ذرات سنگین: بهترین حالت
برای گازها: بهتر است خروجی نزدیک سقف باشد.

✓ ۲. استفاده از کف‌های مشبک (Raised Floor)

Khoo et al. (2012):

- اگر ۲۰٪ کف مشبک باشد
→ ۵۰٪-۷۰٪ کاهش ذرات
- اگر ۴۰٪ مشبک باشد
→ عملکرد تقریباً ایده‌آل می‌شود

✓ ۳. جریان لامینار یکنواخت + سرعت کم

Gusain et al. (2012):

- سرعت حدود $0.35-0.30 \text{ m/s}$ بهترین نتیجه را دارد
- سرعت زیاد → تلاطم → بازگشت ذرات

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

۴۷. کاهش موانع و فاصله‌دهی تجهیزات

هر مانع کوچک → گردابه بزرگ.

۵۷. کنترل حرکت اپراتورها

حرکت فقط در مسیرهای تعیین شده.

نتیجه کلیدی بخش ۳,۲

بزرگ‌ترین دشمن عملکرد کلین‌روم: تلاطم است.

نه نرخ تهویه، نه تعداد فیلترها، هیچ‌کدام به اندازه یکنواختی جریان مهم نیستند.

ذرات تنها زمانی حذف می‌شوند که جریان یکنواخت، مانع کم، دما ثابت و حرکت افراد محدود باشد.

این بخش خلاصهٔ چند ده مطالعه است که هدف مشترک آن‌ها «افزایش کارایی و کاهش مصرف انرژی کلین‌روم‌ها» است. یکی از کاربردی‌ترین بخش‌هاست—به‌ویژه برای طراحان و بهره‌برداران.

۳,۳ بهینه‌سازی سیستم تهویه (Optimization of Cleanroom Ventilation)

سیستم‌های تهویه در کلین‌روم‌ها معمولاً یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در ساختمان هستند.

در بسیاری از موارد، بین ۳۰ تا ۶۵ درصد کل مصرف انرژی یک کلین‌روم مربوط به سیستم هوارسانی و تأمین هوای تمیز است.

به همین دلیل، بخش زیادی از پژوهش‌ها بر یافتن راه‌هایی برای افزایش کارایی، کاهش مصرف انرژی، و بهینه‌سازی عملکرد متمرکز شده‌اند.

در ادامه، نتایج مهم‌ترین تحقیقات این حوزه مرور می‌شود.

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

۱ کاهش نرخ تهویه بدون کاهش کیفیت

کاهش = ACH = بیشترین صرفه‌جویی انرژی

Rainer & Brandemuehl (1995):

- نشان دادند که کاهش هوای تمیز (CFA) و کاهش سرعت FFU ها
→ بیشترین تأثیر را در کاهش مصرف انرژی دارد
- بدون آن که کیفیت هوا کاهش یابد.

کاهش ACH شبانه

Loomans et al. (2020):

- در ساعات بدون فعالیت
→ می‌توان ACH را ۳۰٪-۵۰٪ کاهش داد
→ ۳۰٪-۷۰٪ صرفه‌جویی انرژی

کاهش ۵۰٪ هوای تازه

Behrens et al. (2021):

- کلین‌روم کلاس ۱۰۰,۰۰۰ (ISO 8)
- در آزمایش‌های واقعی:
 - کاهش ACH از ۲۰ به ۱۰
 - هیچ افتی در کیفیت هوا
 - ۲۵٪-۳۰٪ صرفه‌جویی در انرژی

۲ کنترل هوشمند جریان هوا و FFU ها

تنظیم سرعت FFU ها براساس نیاز واقعی

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

Riley & Arora (2019):

- FFU ها اغلب با سرعت ثابت کار می‌کنند
- اما با کنترل هوشمند:
 - سرعت فقط زمانی افزایش یابد که ذرات زیاد شود
- صرفه‌جویی چشمگیر در برق بدون کاهش کلاس پاکیزگی.

مدل‌سازی توزیع ذرات و کنترل فن‌ها

Shao et al. (2021):

- با کاهش تعداد FFU ها به ۵۰٪
 - ۴۰٪ صرفه‌جویی هوای مصرفی
 - بدون افت عملکرد
- کلید کار: قرارگیری درست FFU های فعال

۳ بهینه‌سازی الگوی جریان هوا

استفاده از سقف لامینار + خروجی دیواری

Alhamid et al. (2018):

- ترکیب جریان یک‌سویه عمودی + خروجی از دیوار
 - کاهش نقاط رکود
 - توزیع دمای یکنواخت‌تر
 - حذف بهتر ذرات

استفاده از کف مشبک (Raised Floor)

Khoo et al. (2012):

- اگر حداقل ۲۰٪ کف مشبک باشد
 - حذف ذرات تا ۶۰٪ بهتر

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

- اگر ۴۰٪ کف مشبک باشد
→ تقریباً حذف ایده‌آل

۴ اهمیت افت فشار و نوع فیلتر

فیلترهای HEPA با افت فشار کمتر

Mathew et al. (2010):

- افت فشار کمتر =
↓ مصرف برق فن
↓ بار سرمایش
↑ طول عمر FFU ها

نتیجه:

تغییر نوع فیلتر، یکی از سریع‌ترین روش‌های کاهش مصرف انرژی است.

۵ کاهش شدت تلاطم

افزایش یکنواختی جریان

Gusain et al. (2012):

- سرعت‌های ۰٫۳۰-۰٫۳۵ m/s
→ بهترین تعادل بین مصرف انرژی و حذف ذرات

حذف موانع غیرضروری

هر مانع کوچک → گردابه → افزایش مصرف انرژی (برای جبران آن)

۶ کنترل فشار مثبت

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

فشار بیش از حد = انرژی اضافه

Karimipناه (1998); Campbell (1996)

- فشار زیاد باعث نیاز به هوای بیشتر و انرژی بیشتر می‌شود
- بهترین حالت: فقط تا حدی بیشتر از بیرون
→ جلوگیری از نشت آلودگی
→ حداقل مصرف انرژی

جمع‌بندی نهایی بخش ۳,۳

بهینه‌سازی کلین‌روم فقط با افزایش ACH انجام نمی‌شود.
بهترین نتایج زمانی حاصل می‌شود که سرعت FFU ها کاهش یابد، یکنواختی جریان افزایش یابد، فشار مثبت کنترل شود و از فیلترهای کم‌افت‌فشار استفاده شود.
نتیجه: رسیدن به کیفیت بهتر هوا با مصرف انرژی کمتر.

۳,۳ بهینه‌سازی سیستم تهویه (Optimization of Cleanroom Ventilation)

سیستم‌های تهویه در کلین‌روم‌ها معمولاً یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در ساختمان هستند.
در بسیاری از موارد، بین ۳۰ تا ۶۵ درصد کل مصرف انرژی یک کلین‌روم مربوط به سیستم هوارسانی و تأمین هوای تمیز است.
به همین دلیل، بخش زیادی از پژوهش‌ها بر یافتن راه‌هایی برای افزایش کارایی، کاهش مصرف انرژی، و بهینه‌سازی عملکرد متمرکز شده‌اند.

در ادامه، نتایج مهم‌ترین تحقیقات این حوزه مرور می‌شود.

۱ کاهش نرخ تهویه بدون کاهش کیفیت

کاهش = ACH بیشترین صرفه‌جویی انرژی

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

Rainer & Brandemuehl (1995):

- نشان دادند که کاهش هوای تمیز (CFA) و کاهش سرعت FFU ها
→ بیشترین تأثیر را در کاهش مصرف انرژی دارد
- بدون آن که کیفیت هوا کاهش یابد.

کاهش ACH شبانه

Loomans et al. (2020):

- در ساعات بدون فعالیت
→ می‌توان ACH را ۳۰-۵۰٪ کاهش داد
→ ۳۰-۷۰٪ صرفه‌جویی انرژی

کاهش ۵۰٪ هوای تازه

Behrens et al. (2021):

- کلین‌روم کلاس ۱۰۰,۰۰۰ (ISO 8)
- در آزمایش‌های واقعی:
 - کاهش ACH از ۲۰ به ۱۰
→ هیچ افتی در کیفیت هوا
→ ۲۵-۳۰٪ صرفه‌جویی در انرژی

۲ کنترل هوشمند جریان هوا و FFU ها

تنظیم سرعت FFU ها براساس نیاز واقعی

Riley & Arora (2019):

- FFU ها اغلب با سرعت ثابت کار می‌کنند
- اما با کنترل هوشمند:
 - سرعت فقط زمانی افزایش یابد که ذرات زیاد شود
→ صرفه‌جویی چشمگیر در برق بدون کاهش کلاس پاکیزگی.

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

مدل‌سازی توزیع ذرات و کنترل فن‌ها

Shao et al. (2021):

- با کاهش تعداد FFU ها به ۵۰٪
→ صرفه‌جویی هوای مصرفی
→ بدون افت عملکرد
- کلید کار: قرارگیری درست FFU های فعال

۳ بهینه‌سازی الگوی جریان هوا

استفاده از سقف لامینار + خروجی دیواری

Alhamid et al. (2018):

- ترکیب جریان یک‌سویه عمودی + خروجی از دیوار
→ کاهش نقاط رکود
→ توزیع دمای یکنواخت‌تر
→ حذف بهتر ذرات

استفاده از کف مشبک (Raised Floor)

Khoo et al. (2012):

- اگر حداقل ۲۰٪ کف مشبک باشد
→ حذف ذرات تا ۶۰٪ بهتر
- اگر ۴۰٪ کف مشبک باشد
→ تقریباً حذف ایده‌آل

۴ اهمیت افت فشار و نوع فیلتر

فیلترهای HEPA با افت فشار کمتر

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

Mathew et al. (2010):

- افت فشار کمتر =
↓ مصرف برق فن
↓ بار سرمایش
↑ طول عمر FFU ها

نتیجه:

تغییر نوع فیلتر، یکی از سریع‌ترین روش‌های کاهش مصرف انرژی است.

۵ کاهش شدت تلاطم

افزایش یکنواختی جریان

Gusain et al. (2012):

- سرعت‌های ۰٫۳۰-۰٫۳۵ m/s
→ بهترین تعادل بین مصرف انرژی و حذف ذرات

حذف موانع غیرضروری

هر مانع کوچک → گردابه → افزایش مصرف انرژی (برای جبران آن)

۶ کنترل فشار مثبت

فشار بیش از حد = انرژی اضافه

Karimipناه (1998) و Campbell (1996)

- فشار زیاد باعث نیاز به هوای بیشتر و انرژی بیشتر می‌شود
- بهترین حالت: فقط تا حدی بیشتر از بیرون
→ جلوگیری از نشست آلودگی
→ حداقل مصرف انرژی

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

جمع‌بندی نهایی بخش ۳,۳

بهینه‌سازی کلین‌روم فقط با افزایش ACH انجام نمی‌شود. بهترین نتایج زمانی حاصل می‌شود که سرعت FFU ها کاهش یابد، یکنواختی جریان افزایش یابد، فشار مثبت کنترل شود و از فیلترهای کم‌افت‌فشار استفاده شود. نتیجه: رسیدن به کیفیت بهتر هوا با مصرف انرژی کمتر.

ترجمه بخش ۴: بحث و جمع‌بندی (Discussion & Conclusions)

این بخش، نتیجه نهایی تمام ۲۰۲ مقاله بررسی شده است و دید بسیار ارزشمندی ارائه می‌دهد.

اگر آماده‌اید، ادامه می‌دهم.

You said:

بله

ChatGPT said:

ادامه می‌دهم و بخش نهایی مقاله را—یعنی بحث، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی کلی—کاملاً روان، دقیق و یکپارچه ترجمه می‌کنم. این بخش، چکیده کل ۲۰۲ مقاله‌ای است که در مطالعه بررسی شده‌اند و در واقع روح اصلی مقاله همین قسمت است.

۴. بحث و جمع‌بندی (Discussion & Conclusions)

این مقاله با مرور نظام‌مند پژوهش‌های انجام‌شده طی چند دهه گذشته، نشان می‌دهد که بسیاری از روش‌های طراحی و بهره‌برداری کلین‌روم‌ها بر پایه‌ی تجربه‌های قدیمی یا استانداردهای محافظه‌کارانه بنا شده‌اند، نه بر اساس شواهد علمی جدید.

در ادامه، جمع‌بندی نتایج اصلی آورده شده است.

۱ نرخ تهویه (ACH) اغلب بیش از حد انتخاب می‌شود

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

بر اساس تحلیل مقالات:

- در بسیاری از کلین‌روم‌ها، نرخ تهویه به صورت بیش از حد محافظه کارانه و بدون توجه به نیاز واقعی انتخاب شده است.
- این مقدار بالا:
 - مصرف انرژی را بسیار زیاد می‌کند
 - تلاطم و گردابه ایجاد می‌کند → کاهش قدرت حذف ذرات
 - باعث هزینه‌های بالای نگهداری می‌شود

نتیجه:

افزایش ACH همیشه کیفیت هوا را بهتر نمی‌کند؛ گاهی بدتر هم می‌کند.

۲ یکنواختی جریان از همه چیز مهم‌تر است

مطالعات متعدد نشان می‌دهند:

- مهم‌ترین عامل حفظ پاکیزگی، یکنواختی و پایداری جریان هواست. not ACH —

اختلال در یکنواختی معمولاً ناشی از:

- چیدمان نامناسب تجهیزات
- موانع کوچک
- حرکت افراد
- اختلاف دما
- تنظیمات نادرست FFU ها

است.

جریان یکنواخت، حتی با ACH متوسط، بهتر از جریان پرسرعت و آشفته عمل می‌کند.

۳ نقش انسان و رفتارهای انسانی بسیار حیاتی است

پژوهش‌ها نشان می‌دهند:

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

- افراد بزرگ‌ترین تولیدکننده ذرات در کلین‌روم هستند.
- حرکت افراد (حتی بسیار آهسته) قادر است:
 - جریان لامینار را بشکند
 - ذرات را از کف به ارتفاع بالا منتقل کند
 - میانگین تعداد ذرات را چند برابر کند

نتیجه:

فرهنگ‌سازی رفتاری و طراحی مسیرهای حرکتی، برابر اهمیت طراحی تهویه است.

۴ تجهیزات و گرمای آن‌ها جریان را به‌طور جدی تغییر می‌دهد

سطوح گرم تجهیزات باعث تولید جریان شناوری (Buoyancy) می‌شوند که:

- مسیر جریان لامینار را منحرف می‌کند
- ذرات را معلق نگه می‌دارد
- باعث ایجاد نواحی رکود می‌شود

بنابراین:

- مدیریت حرارت
- انتخاب نوع تجهیزات
- توزیع درست منابع گرمایی

برای حفظ کلاس پاکیزگی حیاتی است.

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

۵ سیستم‌های هوشمند و کنترل مبتنی بر نیاز آینده کلین‌روم‌ها هستند

مطالعات جدید پیشنهاد می‌کنند:

- FFUها براساس تعداد ذرات و نیاز لحظه‌ای کار کنند
- نه همیشه با سرعت ثابت

این روش‌ها نتیجه می‌دهند:

- ۲۰-۵۰٪ کاهش مصرف انرژی
- حفظ کیفیت هوای مطلوب
- افزایش طول عمر تجهیزات

۶ ترکیب روش‌ها بهترین نتیجه را دارد—نه اتکا به یک روش

پژوهش‌ها نشان دادند که:

- ترکیب جریان لامینار + خروجی کف
- یا جریان عمودی + کمک‌کننده افقی
- یا جریان ترکیبی هوشمند

بهترین عملکرد را دارد.

هیچ سیستمی به تنهایی «ایده‌آل» نیست.
طراحی باید براساس:

- نوع فرآیند
- چیدمان تجهیزات

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار، تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده

- تعداد افراد
- و سطح کلاس مورد نیاز

انجام شود.

۷ استانداردهای موجود نیازمند بازنگری‌اند

یکی از نکات بسیار مهم مقاله:

بسیاری از استانداردهای پیشنهادی برای کلین‌روم‌ها
بر پایه شواهد قدیمی هستند
و لزوماً با تحقیقات جدید همخوانی ندارند.

نتیجه:

نیاز است استانداردهای مدرن براساس شواهد علمی جدید و مدل‌های عددی پیشرفته اصلاح شوند تا مصرف انرژی کاهش یافته و عملکرد واقعی بهبود یابد.

۸ توصیه‌های نهایی مقاله

ترکیبی از ۴ اصل زیر بهترین نتیجه را می‌دهد:

۱. یکنواختی جریان هوای ورودی
۲. بهینه‌سازی نرخ تهویه (نه افزایش بی‌هدف)
۳. کاهش تلاطم ناشی از انسان و تجهیزات
۴. طراحی هوشمند و مدیریت انرژی

جمع‌بندی بسیار کوتاه و کاربردی

کلین‌روم با جریان یکنواخت، موانع کم و سیستم تهویه هوشمند —
بسیار مؤثرتر و کم‌مصرف‌تر از کلین‌روم با ACH بالا و جریان آشفته است.

منبع:

https://link.springer.com/article/10.4209/aaqr.220407?utm_source=chatgpt.com

مروری سیستماتیک بر انواع سیستم‌های تهویه در «clean-room» ها؛

شامل تهویه لامینار. تاریخچه، مفاهیم، عملکرد، کارایی و تحلیل نتایج پژوهش‌های منتشر شده