ISSN: 2538-2594; Naqshejahan - Basic studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2022;12(4):51-69

Bauchemie: Environmental Perspective to Well-Building and Occupant Health

ARTICLE INFO

Article Type
Analytic Study

Authors

Ghazaleh Shams[1]
Maryam Rasoolzadeh*[2]

How to cite this article

Shams GH, Rasoolzadeh M., Bauchemie: Environmental Perspective to Well-Building and Occupant Health. 2023 Jan 1;12(4):51-69.
https://dorl.net/dor/

1. Faculty of Architecture and Urbanism, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

2. Faculty of Basic Sciences, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

**Correspondence*

Address: Faculty of Basic Sciences, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Email:rasoolzadeh@ntbiau.ac.ir
Phone: 02177009836

Article History
Received:
Accepted:
ePublished:

ABSTRACT

Aims: In the indoor environment, the temperature and relative humidity (RH) are often controlled and even without the use of heating and cooling systems, the temperature and relative humidity (RH) changes in the indoor environment are less than in the outdoor environment.Buildings are relatively protected against outdoor environmental pollutants. The main problem of the research is to analyze and investigate the environmental effects of exposure to particles and gases that are released or produced inside the house; And especially the effect of these pollutants on residents' health.

Materials & Methods: The research method of this study is based on logical reasoning. The scientific foundations of the subject are analyzed with a quasi-experimental approach, and the results are presented with the combined modeling method. In terms of methodology, in this research, chemical reactions carried out in indoor environments will be studied. In this regard, the mechanisms and kinetics of reactions, the characteristics of different surfaces, and the effect of factors such as light and temperature are investigated.

Findings: A healthy environment is a prerequisite for a healthy life for residents; This is as important in closed spaces as in open and semi-open spaces. Research findings emphasize the vital importance of micropollutants and their impact on residents' health.

Conclusion: Clarifying the importance and role of building materials in indoor air quality is one of the most important achievements of this research. An achievement that above all emphasizes the importance of environmental education in promoting healthy buildings, bio-computing, and the use of environmentally friendly materials.

Keywords: Environmental Quality, Healthy buildings, deep learning in green chemistry, Eco-friendly materials, Indoor Air Quality, Bio-computation, Building chemistry.

CITATIONLINKS

[1] Klepeis NE … [2] Fang Y, Lakey…[3] Fang Y, Riahi S… [4] Singer BC, Hodgson AT …[5]Manuja A, Ritchie J … [6] Piscitelli P, Miani A …[7] Van Doremalen N, … [8] Rasoolzadeh M …[9] Liu Y, Bé AG, Or VW... [10] Weschler CJ, Carslaw N … [11] Nazaroff WW, Goldstein AH… [12] Breen MS, Burke JM …[13]Carslaw N. A new… [14]Wang H, Morrison GC … [15]Wolkoff P, Wilkins CK … [16] Liu Y, Misztal PK … [17]Zhou S, Forbes MW … [18]Kelly FJ, Fussell JC … [19]Zhang M, Xiong J … [20] Weschler CJ… [21]Nazaroff WW, Weschler CJ …[22] Morrison GC, Nazaroff WW …[23] Wisthaler A, Weschler CJ … [24]Schwartz-Narbonne H, Jones SH … [25] Gligorovski S. Nitrous acid …[26] Finlayson-Pitts BJ, Wingen LM… [27] Kowal SF, Allen SR, Kahan TF … [28] Ault AP, Grassian VH …[29] Rubasinghege G, Grassian VH …[30] Won Y, Waring M … [31] Gen M, Liang Z, Zhang R …[32] Wong JP, Carslaw N, Zhao R …[33] Mattila JM, Lakey PS, Shiraiwa M … [34] Schwartz-Narbonne H, Wang C …[35] Wang C, Collins DB, Abbatt JP …[36] Duncan SM, Sexton KG, Turpin BJ …[37] Alves MR, Fang Y, [38] DeCarlo PF, Avery AM … [39] Cancelada L, Sleiman M, Tang X,… [40] Ampollini L, Katz EF, Bourne S …[41] Or VW, Estillore AD, Tivanski AV …[42] Mihut C, Captain DK, Gadala-Maria F …[43] Hameury S, Lundström T. Contribution …[44] Stemmler K, Ammann M, Donders C …[45] Wang C, Collins DB, Arata C …[46] Or VW, Alves MR, Wade M, Schwab S …[47] Schwartz-Narbonne H, Donaldson DJ …[48] Weschler CJ, Nazaroff WW …[49] Jaeger RJ, Rubin RJ. Plasticizers …[50] Rindelaub JD, Craig RL, Nandy L …[51] Wei Z, Li Y, Cooks RG, Yan X. …[52] Abbatt JP, Wang C. The atmospheric …[53] Kruza M, Lewis AC, Morrison GC, Carslaw N …[54] Gandolfo A, Marque S, Temime-Roussel B,…[55] Liang Y, Xu Y. Emission of phthalates …[56] O'Brien RE, Ridley KJ, Canagaratna MR …[57] Zhou S, Forbes MW, Abbatt JP …[58] Wang H, Chen W, Wagner JC …[59] Bondy AL, Kirpes RM, Merzel RL, Pratt KA …[60] Craig RL, Nandy L, Axson JL, Dutcher CS …[61] Farmer DK, Vance ME, Abbatt JP, Abeleira A …[62] Rasoolzadeh M, Moshari M …[63] Mohtashami N, Mahdavinejad M, Bemanian M …[64] Pakdehi, S. G., Rasoolzadeh, M …[65] Pakdehi, S. G., Rasoolzadeh, M …[66] Pakdehi, S. G., Salimi, M …[67] Rasoolzadeh, M., & Islampour, R …[68] Mahdavinejad M. Designerly …[69] Saadatjoo P, Mahdavinejad M …[70] Saadatjoo P, Mahdavinejad M, Zhang G …[71] Javanroodi K, Nik VM, Mahdavinejad M…[72] Torabi M, Mahdavinejad M. …[73] Ahmadi J, Mahdavinejad M …[74] Talaei M, Mahdavinejad M …[75] Aliabadi M, Zarkesh A …[76] Talaei M, Mahdavinejad M. Probable …[77] Mahdavinejad M, Hosseini SA. …[78] Aliabadi M, Zarkesh A, Siampour H …

Copyright© 2021, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0International License whichpermits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

شیمی ساختمان: رویکردی زیست‌محیطی به ساختمان سالم و سلامت ساکنان

غزاله شمس[۱] ، مریم رسول‌زاده[۲*]

۱-دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، قزوین، ایران

۲-دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران.(نویسنده مسئول)

چکیده:

اهداف: در فضای داخلی، دما و رطوبت نسبی اغلب کنترل می‌شود و حتی بدون استفاده از سیستم‌های گرمایش و سرمایش، تغییرات دما و رطوبت نسبی فضای داخلی کمتر از فضای باز خارجی است. ساختمان‌ها در برابر آلاینده‌هایی که منشأ بیرونی دارند، به صورت نسبی محافظت می‌شوند. مسئله اصلی پژوهش تحلیل و بررسی اثرات زیست‌محیطی حاصل از قرار گرفتن در معرض ذرات و گازهایی که در داخل خانه منتشر یا تولید می‌شوند؛ و به‌خصوص تأثیر این آلاینده‌ها بر سلامت ساکنان می‌باشد.

ابزار و روش‌ها: روش تحقیق این پژوهش بر اساس استدلال منطقی استوارشده است. مبانی علمی موضوع با رویکرد شبه تجربی تحلیل شده، نتایج با روش مدل‌سازی ترکیبی ارائه می‌شود. از نظر روش شناختی، در این پژوهش، واکنش‌های شیمیایی انجام شده در فضاهای داخلی مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این راستا، مکانیسم‌ها و سینیتیک واکنش‌ها، ویژگی‌های سطوح مختلف و اثر عواملی چون نور و دما مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

یافته‌ها: محیطزیست سالم پیش نیاز زندگی سالم برای ساکنان است؛ این مهم در فضاهای بسته به اندازه فضاهای باز و نیمه‌باز دارای اهمیت است. یافته‌های پژوهش بر اهمیت ویژه ریزآلاینده‌ها و تأثیر آن‌ها بر سلامت ساکنان تأکید دارد.

نتیجه‌گیری: تبیین اهمیت و نقش مصالح ساختمانی در سلامت هوای داخل، یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش است. دستاوری که بیش از بر اهمیت آموزش محیطزیست در ترویج ساختمان سالم، رایانش زیستی و کاربرد مصالح دوستدار محیطزیست تأکید دارد.

کلمات کلیدی: کیفیت محیطی، ساختمان‌های سالم، یادگیری عمیق در شیمی سبز، مصالح دوستدار محیط زیست، کیفیت هوای داخلی، رایانش زیستی، شیمی ساختمان

مقدمه

معماری و شهرسازی سالم یکی از اولویت‌های دوران پساکرونا محسوب می‌شود. بررسی شیمی هوای فضاهای داخلی، یک زمینه مطالعاتی نسبتاً جدید است. درک و پیش‌بینی کیفیت هوای داخلی برای سلامت و پایداری انسان ضروری است، زیرا مردم ۹۰٪ یا حتی بیشتر از زندگی خود را در داخل ساختمان می‌گذرانند [۱]. می‌توان گفت معمولاً مواجهه‌ی انسان با گازها و ذرات معلق در فضاهای داخلی بیش از فضاهای بیرونی است. بنابراین بررسی شیمی محیط‌های داخلی از دیدگاه مولکولی، امری ضروری به نظر می‌رسد. درعین‌حال پیچیدگی‌های زیادی نیز در این زمینه وجود دارد، مانند سطوح مختلف و انجام واکنش‌های شیمیایی چند فازی [۲،۳]، نسبت بالای سطح به حجم [۴،۵] و عواملی که در فضاهای بیرونی دیده نمی‌شود مثل تهویه، مصالح ساختمانی، لوازم و مبلمان. با توجه به حوادث اخیر مربوط به گسترش بیماری کرونا و توانایی انتقال این ویروس از طریق سطوح آلوده [۶]، روشن است که دانش سطوح و به‌ویژه شیمی سطح در داخل ساختمان دارای پتانسیلی جهت بهبود درک ما از فعالیت‌های بیولوژیکی بر روی سطوح و نقش آن‌ها در گسترش بیماری‌های عفونی می‌باشد [۷،۸]. مبانی نظری پژوهش نشان می‌دهد که معماری و شهرسازی سالم با نگاه همه جانبه به بیولوژی و شیمی ساختمان ممکن است. سلامت در معماری سبز (شکل ۱) از اولویت‌هایی است که در دوران پساکرونا مورد تأکید قرار گرفته، و معماری و شهرسازی پساپاندمی بر اساس آن هدف‌گذاری شده است.

شکل ۱. بوسکو ورتیکاله یا "جنگل عمودی" نام دو برج مسکونی به ارتفاع ۱۱۱ و ۸۰ متر توسط اسفانو بودری و همکاران طراحی شده؛ نمونه شاخص معماری سبز در شهر بزرگی مانند میلان به شمار می‌آید.

نسبت بسیار بالای سطح به حجم در فضاهای داخلی نسبت به فضاهای بیرونی (۳ متر مربع بر متر مکعب برای فضاهای داخلی در برابر ۰/۰۱ در فضاهای بیرونی) [۴، ۵ و ۹]، یکی از عوامل مهم در شیمی اتمسفر فضاهای داخلی است که اهمیت نسبی واکنش‌های سطحی را برای تعیین غلظت و ترکیب فاز گاز افزایش می‌دهد. این کمیت با در نظر گرفتن این نکته که بسیاری از سطوح، متخلخل و ناپایدار هستند، بسیار بالا خواهد بود. به‌عنوان نمونه، یک مولکول ازن در داخل خانه ۴۰٪ احتمال دارد پیش از اینکه واکنش دهد، با سطح برخورد کند در حالیکه این احتمال در فضای بیرونی تقریباً ۱٪ خواهد بود [۱۰]. یک مولکول گاز، با فرض عدم واکنش، پیش از خروج به کمک تبادل هوا تقریباً یک میلیون مرتبه با سطوح داخلی برخورد خواهد کرد. عامل مهم دیگر در فضاهای داخلی، غلظت‌های بالای ترکیبات آلی می‌باشد که بسیاری از آن‌ها فرار هستند [۱۱]. در نتیجه، سطوحی که با ترکیبات آلی فرار و نیمه فرار در تماس هستند مدام در حال تغییر خواهند بود. مانوزا و همکاران [۵]، پیچیدگی و تنوع سطوح گوناگون در فضاهای داخلی مختلف (اتاق خواب، آشپزخانه و دفتر کار) را مورد بررسی قرار داده‌اند.

بیان مسئله پژوهش (شکل ۲) بر نقش بیولوژی و شیمی ساختمان در معماری و شهرسازی سالم تأکید دارد. علاوه بر این‌ها، ماهیت دینامیکی اختلاط و تبادل هوا با هوای بیرون، هنگام در نظر گرفتن نرخ واکنش و مقیاس‌های زمانی برای شیمی سطح در داخل ساختمان بسیار مهم است. انباشت مواد روی سطوح، باعث انجام واکنش‌های شیمیایی و تولید مواد جدید خواهد شد [۱۲]. درک پدیده‌هایی چون هیدرولیز، جذب/واجذب، واکنش‌های آئروسل‌های آلی و معدنی در این میان بسیار حائز اهمیت است.

شکل ۲. چارچوب مفهومی پژوهش

مواد و روش‌ها

روش شناسی پژوهش، ساختاری ترکیبی دارد. پژوهش از نظر نوع «توسعه‌ای» است زیرا با استفاده از مفاهیم اساسی در شیمی سبز و رایانش زیستی، کاربردهایی را در محیط‌زیست سالم و حوزه‌های مختلف معماری و شهرسازی در دوران پساکرونا پیشنهاد می‌دهد. روش تحقیق، کیفی است. با استفاده از روش کیفی، داده‌های اولیه آنالیز شده، نتایج پژوهش استنتاج می‌شوند. معماری و شهرسازی سالم مفهومی فراگیر است که بر اساس نگاه توسعه¬ای به بیولوژی و شیمی ساختمان شکل می‌گیرد.

فضای داخلی و سلامت هوای فضای داخلی، موضوعی ترکیبی در روش‌شناسی پژوهش است. بر اساس تعریف روش شناختی موضوع، کیفیت هوای داخل ساختمان (IAQ) به کیفیت هوای داخل و اطراف ساختمان مربوط می‌شود که سلامت و راحتی ساکنان ساختمان را مورد بحث قرار می‌دهد. برای تحلیل کیفیت هوای داخل ساختمان (IAQ)درک و کنترل آلاینده‌های رایج در داخل خانه اهمیت دارند، مختصاتی که می‌تواند به بهبود و کنترل خطرات و نگرانی‌های بهداشتی داخل خانه کمک کند.

سلامت ساکنان در داخل و خارج ساختمان، موضوعی مهم در تحلیل‌های زیست‌محیطی است. اثرات سلامتی ناشی از آلاینده‌های هوای داخل ساختمان ممکن است بلافاصله پس از قرار گرفتن در معرض یا سال‌ها بعد تجربه شود. از این رو کیفیت هوای داخل ساختمان دو نوع تأثیر را نشان می‌دهد:

- اثرات فوری: مواردی که به سرعت درک می‌شود و یا قابلیت تأثیرگذاری سریع دارد
- اثرات بلند مدت: اثراتی که عامل تغییرات مخرب طولانی مدت هستند

بر اساس دسته‌بندی سازمانی «آژانس حفاظت زیست‌محیطی ایالات متحده امریکا (epa.gov) «کیفیت هوای داخل ساختمان موضوعی میان دانشی است. منابع آلاینده در کیفیت هوای داخل ساختمان می‌تواند بر اساس منابع زیادی برای آلودگی هوای داخل خانه وجود دارد، بررسی شود. به عنوان نمونه یک راه‌پله در واشنگتن دی سی، دفتر وکالت نیکسون پیبادی، پر از نور طبیعی و رو به دیواری از گیاهان، از کارکنان دعوت می‌کند تا از آن استفاده کنند و روند جدیدی را در طراحی نشان می‌دهد که می‌تواند هم روحی و هم جسمی را تقویت کند. این بنا از نمونه بناهای مناسب برای معماری پساپاندمی شناخته می‌شود.

بر اساس تعریف علمی موضوع، نشانگان ساختمان بیمار (SBS) وضعیتی است که در آن افراد علائمی را تجربه می‌کنند که به نظر می‌رسد مربوط به ماندن به مدت طولانی در یک ساختمان می‌باشد. طراحانی چون نورمن فاستر در معماری معاصر جهان، موضوع اهمیت معماری سالم را برای نزدیک شدن به نیازهای معماری پساپاندمی مطرح می‌کنند. (شکل ۳)

معماری سالم از نظر مبانی روش شناسی، این موارد می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- وسایل احتراق سوخت‌رسان
- محصولات تنباکو
- مصالح ساختمانی و اثاثیه به‌گونه‌ای متنوع:
  - خراب شدن عایق حاوی آزبست
  - کف‌پوش، اثاثه یا فرش تازه نصب شده
  - کابینت یا مبلمان ساخته شده از برخی محصولات چوبی فشرده
- محصولاتی برای تمیز کردن و نگهداری خانه، مراقبت شخصی یا سرگرمی‌ها
- سیستم‌های گرمایش و سرمایش مرکزی و دستگاه‌های مرطوب‌کننده
- رطوبت بیش‌ازحد
- منابع بیرونی مانند:
  - رادون
  - آفت‌کش‌ها
  - آلودگی هوای فضای باز

شکل ۳. ایده ساختمان سالم، مبنای اصلی تصویری است که یک نورمن فاستر با هنرمندی خاص خود از فضای داخلی ساختمان شماره ۴۲۵ بلوار پارک در نیویورک ارائه کرده است (insidestory.org.au)

یافته‌ها

مطالعه عمیق ادبیات موضوع نشان می‌دهد که سلامت ساکنان در تعامل با محیط مصنوع و محیط‌زیست طبیعی مطرح می‌شود. هنگام ارزیابی محصولات گازی و چند فازی، اکسیدکننده‌های موجود و واکنش‌های آن‌ها بسیار مهم هستند. در فضاهای بیرونی، بر خلاف فضاهای داخلی، رادیکال هیدروکسیل که نقش اکسیدکنندگی دارد، فراوان است. غلظت هیدروکسیل در داخل ساختمان حدوداً ۱۰ تا ۲۰ مرتبه کمتر از فضاهای خارجی است [۱۳]. تحقیقات زیادی بر روی طیف وسیعی از اکسیدان‌ها و چگونگی تشکیل آن‌ها در داخل ساختمان انجام شده است [۱۴-۱۶]. این اکسیدکننده‌ها یا به خودی خود بسیار مضر هستند (مانند ازن) و یا باعث تولید گونه‌های خطرناک می‌شوند. این مواد منجر به ایجاد ترکیبات آلی فرار و غیر فرار زیادی می‌شوند [۱۷-۱۹]. بنابر مطالعات انجام شده، اکسید کننده اصلی در فضاهای داخلی، ازن است که اغلب از فضاهای بیرونی به داخل وارد می‌شود هر چند که توسط برخی وسایل مانند پرینترها نیز تولید می‌شود [۲۰،۲۱]. در فاز گازی، ازن می‌تواند با بسیاری از ترکیبات آلی فرار موجود در فضاهای داخلی وارد واکنش شود. موریسون و نزارف، آلدهیدهایی را که از قرار گرفتن فرش در معرض ازن، منتشر می‌شوند را مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که آلدهیدهایی با تعداد یک تا ۱۳ کربن تولید می‌شوند [۲۲]. ویستالر و وشلر نیز نشان دادند که ازن با چربی پوست انسان واکنش می‌دهد[۲۳]. ازن در واکنش با سطح به شکل زیر تجزیه می‌شود:

معادله ۱:

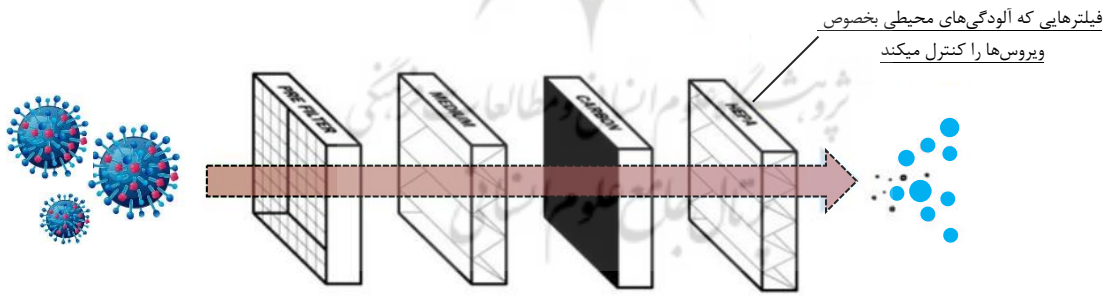
$$۲O_3\,(g) + \text{surface} \longrightarrow 3O_2\,(g)$$

با توجه به رابطه ۱، سطوح مختلف می‌توانند تحت اکسیداسیون قرار گیرند، اگر این سطوح، سایت‌های فعالی برای واکنش داشته باشند، مانند پیوند دوگانه، در حضور ازن به راحتی اکسید می‌شوند(معادله ۲)

معادله ۲:

$$R_1R_2C = CR_3R_4\,(a) + O_3\,(g) \longrightarrow R_1OR_2\,(a, g) + R_3O_2R_4\,(a, g)$$

، فاز گاز را نشان می‌دهند. g، جذب و a



شکل ۴. نقش فیلترهای هوای ساختمان در کنترل ویروس و عوامل بیماری زا (epa.gov)

شیمی سطح اکسیدهای نیتروژن در فضای داخلی

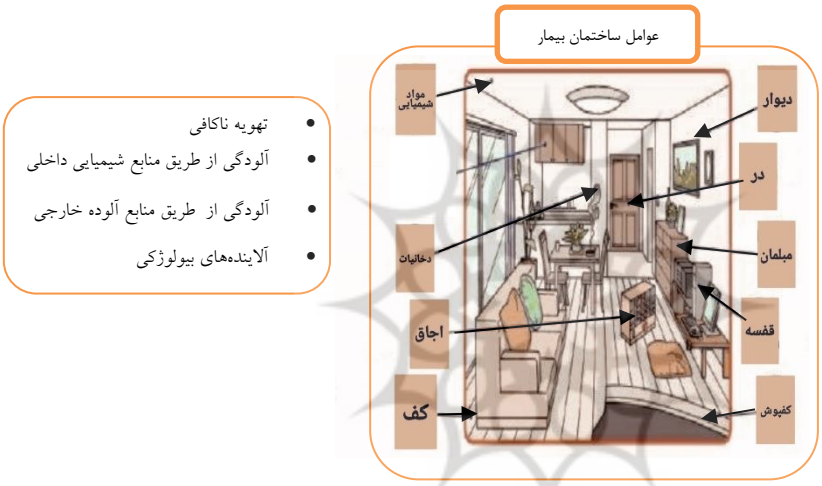
اکسیدهای نیتروژن نیز علاوه بر انتقال از محیط بیرونی، در اثر فعالیت‌هایی چون پخت‌وپز در فضاهای داخلی به وجود می‌آیند [۹]. تحقیقات نشان می‌دهند که سطوح رنگ شده می‌توانند منبعی برای تولید برخی اکسیدهای نیتروژن باشند[۲۴]. دی اکسید نیتروژن می‌تواند نیتروس اسید را تولید کند، ماده‌ای که در فضاهای داخلی در مقیاس‌های نسبتاً بالا مشاهده شده است[۲۵]. وجود نیتروس اسید به دلیل اینکه به‌راحتی و بدون نیاز به انرژی خیلی زیاد و با کمک نور

داخلی می‌تواند تجزیه گردد و هیدروکسیل تولید کند مهم می‌باشد[۲۶].کوال و همکاران نشان دادند که منابع نور زیادی در فضاهای داخلی وجود دارند که می‌توانند نیتروس اسید را به هیدروکسیل و مونوکسید نیتروژن تجزیه کنند [۲۷]. به دلیل واکنش‌پذیری بالا، طول عمر هیدروکسیل معمولاً در حدود میلی ثانیه است، به عبارت دیگر مسیری که ممکن است مولکول هیدروکسیل پیش از واکنش طی کند، کمتر از یک متر خواهد بود. بنابراین نمی‌توان گفت که ممکن است مولکول هیدروکسیل از فضاهای خارجی به داخل انتقال یابد و در صورت وجود این ماده در فضای داخلی، در همان محیط تولید شده است[۲۸]. فیلترهای هوای ساختمان اغلب کنترل‌کننده بسیار خوبی برای ذرات ریز معلق و عوامل بیماری‌زا هستند. (شکل ۴)

در تحقیقات زیادی، انواع واکنش‌های سطحی دی‌اکسید نیتروژن ، نیترات جذب شده و حساس کننده‌های نور به‌عنوان مکانیسم‌هایی برای تشکیل نیتروس اسید پیشنهاد شده‌اند[۲۹-۳۱]. واکنش هیدرولیز دی اکسید نیتروژن در معادله ۳ نشان داده شده است.

معادله۳ :

$$2NO_2\ (g) + H_2O\ (a) \longrightarrow HONO\ (g) \longrightarrow HNO_3\ (a)$$



شکل ۵. عوامل شکل دهنده بیماری در ساختمان (epa.gov)

شیمی سطح هالوژن

گروه دیگر از اکسیدکننده‌ها،گازهای حاوی کلر هستند. این مواد معمولاً در خانه حین استفاده از محصولات تمیز کننده مانند سفیدکننده‌ها که اغلب حاوی کلر به شکل هیپوکلریت سدیم هستند، تولید می‌شوند [۳۲،۳۳]. در این حالت، واکنش تعادلی ۴ به سمت تولید کلر پیش می‌رود.

معادله ۴:

$$2H_3O^+\ (aq) + ClO^-\ (aq) + Cl^-\ (aq) \longrightarrow Cl_2\ (g) + 3H_2O$$

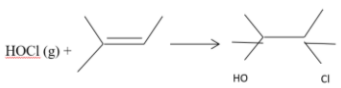
این گازها می‌توانند فتولیز شوند (معادله ۵)

معادله ۵:

$$HOCl + h\nu \longrightarrow OH + Cl$$

این اکسید کننده‌های هالوژنی در ادامه می‌توانند با ترکیبات آلی فرار واکنش دهند و آئروسل‌ها را تولید کنند [۳۴،۳۵]. برای مثال، در واکنش با مولکول‌های غیر اشباع، می‌تواند به صورت زیر عمل کند (معادله ۶) [۳۴]:

معادله۶:



شیمی سطح اسید و باز

اسیدهای آلی، آمونیاک و نیکوتین گونه‌هایی هستند که می‌توانند بر روی سطوح، تحت واکنش‌های اسید- باز قرار گیرند. بسیاری از اسیدهای آلی، مانند لاکتیک اسید، پیرورویک اسید و استیک اسید در فضاهای داخلی اندازه‌گیری شده‌اند [۳۶]. این اسیدهای آلی می‌توانند واکنش‌هایی را روی سطوح انجام دهند، برای مثال پیرورویک اسید با سطوح اکسید شده وارد واکنش می‌شود [۳۷]. مجموعه دیگری از گازهای آلی مهم در فضاهای داخلی که رفتار اسید-باز نشان می‌دهد، دود تنباکو (حاصل از سیگار و قلیان) می‌باشد [۳۸،۳۹]. غلظت آمونیاک نیز در فضاهای داخلی ۵ تا ۱۰ برابر بیش از فضاهای بیرونی است [۴۰]. آمونیاک می‌تواند با مواد معدنی و اسیدهای آلی وارد واکنش شود و آئروسل تولید کند[۲۸]

سطوح داخلی مربوطه برای بررسی‌های آزمایشگاهی

منظور از سطح ممکن است سطوحی از مواد انباشته مثل الیاف فرش و یا رنگ باشد و یا موادی که روی زمینه‌ای جمع شده‌اند و قابل حذف شدن می‌باشند مانند دوده. سطوح را می‌توان به سطوح معدنی، آلی و مخلوط (غیر آلی/آلی) گروه‌بندی کرد. مشخصات تعدادی از این سطوح در جدول ۱ بیان شده است. (جدول ۱)

جدول ۱- تعدادی از سطوح متداول در فضای داخلی ساختمان و مشخصات آن‌ها

ماده	گروه (آلی/معدنی/مخلوط)	فرمول شیمیایی
شیشه	معدنی	SiO_2
بتن	معدنی	CaO $CaCO_3$
دیوار خشک	معدنی	$CaSO_4.2H_2O$
پارچه	آلی	$[C_{10}H_8O_4]_n$
فرش	آلی	$[NH(CH_2)_5CO]_n$
چوب	آلی	$[C_6H_{10}O_5]_n$
دیوار رنگ شده	مخلوط	$[CH_3COOCH=CH_2]_n$ و $[CH_2CHCOO(CH_2)_3CH_3]_n$

هرچند سطوح غیرآلی زیادی در فضاهای داخلی وجود دارند ولی در اینجا به سه سطح متداول اشاره می‌شود. یکی از سطوح پرکاربرد معدنی در فضاهای داخلی، شیشه است. مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. برای مثال، اور و همکاران، شیشه را در مکان‌های مختلف (در فضای داخلی) قرار داده و ترکیب، ضخامت وذرات ته‌نشین شده روی آن را برای آشنایی با پوشش‌هایی که روی شیشه تشکیل می‌شوند مورد بررسی قرار دادند [۴۱]. سطح معدنی دیگری که در فضاهای داخلی زیاد استفاده می‌شود، دیوار خشک است. در مقایسه با شیشه، دیوار خشک ، سطحی با سختی کمتر و زبری بیشتر می‌باشد که می‌تواند آب را جذب کند. سومین سطح معدنی که در چگونگی هوای داخلی اثرگذار است، بتن می‌باشد [۲۸]. بتن ترکیبی از اکسید کلسیم و کربنات کلسیم است.

از نظر مساحت، سطوح آلی فراوانی زیادی در داخل ساختمان دارند [۵]، موادی مانند پارچه، فرش، رنگ و چوب. یکی از

ساختارهای متداول و اصلی پارچه، پلی اتیلن ترفتالات می‌باشد. این پلی استر علاوه بر منسوجات، در بسیاری از ظروف پلاستیکی نیز به کار رفته است [۲۸]. فرش‌ها نیز با ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی متنوع، سطح زیادی را به خود اختصاص داده‌اند. اشکال مختلف نایلون از رایج‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در فرش‌ها هستند (به‌عنوان مثال، نایلون ۶ و نایلون ۶۶) [۴۲]. وجود نیتروژن در این پلیمرها، شیمی کاملاً متفاوتی را در مقایسه با پلی اتیلن ترفتالات، باعث می‌شود. چوب نیز در بسیاری از محیط‌های داخلی، چه به صورت خام و چه با پوششی از پلیمر، به کار می‌رود [۴۳]. ساختار نشان‌دهنده چوب، سلولز است که شامل حلقه‌های شش کربنی با خواص منحصر به فرد می‌باشد. علاوه بر سه ماده‌ای که در اینجا عنوان شد (پلی اتیلن ترفتالات، نایلون و سلولز) بسیاری از مواد آلی دیگر نیز در داخل ساختمان به کار می‌روند مانند پلیمر فنیل اوره فرمالدئید و پلی وینیل کلراید.

شاید بتوان گفت بیشترین سطح در بسیاری از ساختمان‌ها، رنگ‌ها هستند (دیوارهای رنگ شده). مطالعه مانوژا و همکاران، این فرضیه را تائید کرده است [۵]. به دلیل اینکه رنگ می‌تواند فرمولاسیون‌های متعدد و خواص منحصر به فردی داشته باشد، نمی‌توان فرمول واحدی برای آن بیان کرد ولی لاتکس که از یک کوپلیمر وینیل استات و بوتیل آکریلات تشکیل شده، به عنوان یک نمونه پرکاربرد در نظر گرفته می‌شود[۲۸]

علاوه بر ترکیب سطوح که عنوان شد، شرایط مختلف نیز بر روی واکنش‌هایی که انجام می‌شوند تأثیرگذار خواهد بود. در شیمی ساختمان، این مهم بر اساس نیازهای بیولوژیک کاربران مدیریت می‌شود.

عوامل مؤثر بر واکنش‌پذیری سطح

عوامل و محرک‌های زیادی بر واکنش‌های سطحی اثر دارند. علاوه بر خصوصیات شیمیایی سطح، نور نیز می‌تواند باعث تغییرات شیمیایی سطح گردد (فوتوشیمی)، این نور هم می‌تواند از منبع نور طبیعی (مانند خورشید و عبور از پنجره‌ها و رسیدن به داخل ساختمان باشد) و هم می‌تواند از منبع نور مصنوعی (انواع چراغ‌های داخل ساختمان) باشد [۴۴]. دما نیز نقش بسیار مهمی در شیمی سطح دارد [۴۵]

ترکیب سطح و خواص آن

ترکیب سطح، ماهیت شیمیایی زیربنایی سطح، خصوصیات سطح مانند تخلخل، وجود آب جذب شده، وجود ترکیبات آلی جذب شده و اسیدیته سطح در چگونگی واکنش‌های سطوح در داخل ساختمان نقش دارند. علاوه بر آن، این سطوح، ناهمگن هستند، به این معنی که در بعضی قسمت‌ها تراکم و رسوب ذرات آئروسل‌های آلی وجود دارد و در برخی نقاط، تراکم کمتر مواد آلی دیده می‌شود و به جای آن غنی از آب هستند [۴۶،۴۷]. سطوح داخلی حالت دینامیک و پویا دارند و در طول زمان تغییر می‌کنند [۴۸]. با توجه به این پیچیدگی، ناهمگنی و تکامل زمانی، درک محدوده واکنش‌های شیمیایی و فرآیندهای مولکولی اساسی روی سطوح در داخل ساختمان ضروری است.

بسته به ماهیت شیمیایی سطح، آب بر روی سطوح می‌تواند باعث افزایش و یا مانع واکنش سطح با فاز گاز شود. برای مثال، گونه‌های آلی محلول در آب در سطوح داخلی، مانند فتالات‌ها، ممکن است به لایه‌های آلی منتقل شوند [۴۹]. بسیاری از فرآیندهای شیمیایی آبی چندفازی، وابسته به پی اچ (PH) هستند. بنابراین درک اینکه تحت چه شرایطی این لایه‌های نازک آبی، اسیدی و یا بازی خواهند بود در درک شیمی سطح بسیار مهم می‌باشد. ریندلاب و همکاران، میزان

اسیدیته سطح، به ویژه در مورد آئروسل‌های آبی نشسته روی سطوح، را با کمک میکرو طیف سنجی رامان اندازه‌گیری کرده‌اند [۵۰]. مطالعات اخیر وی و همکاران نیز نشان می‌دهد که سینیتیک واکنش به طور قابل ملاحظه‌ای در لایه‌های نازک و ریز قطرات تسریع می‌شود [۵۱].

لایه‌های آلی ثانویه که همه جا روی سطوح داخلی حضور دارند، منابع ترکیبات آلی فرار و نیمه فرار می‌باشند [۵۲]. مقاله اور و همکاران بیان می‌کند که سطوح شیشه‌ای در آشپزخانه پس از چند ماه نزدیک به ۹۰ درصد با فیلم‌های آلی پوشیده شده‌اند در حالیکه در مورد سایر سطوح داخلی ساختمان، این عدد زیر ۱۰ درصد بوده است [۴۶]. اکسیداسیون مواد آلی روی سطوحی مانند دیوارهای رنگ‌شده به عنوان منبع مهمی برای آلدهیدهای فاز گازی مثل نونانال می باشد[۵۳].

نور

در شیمی اتمسفر در فضای باز، نور خورشید به عنوان محرک اصلی شناخته شده است. مه دود شایع در محیط‌های شهری در تابستان، نتیجه فرآیند فتوشیمیایی گازهای اتمسفر است که توسط نور خورشید هدایت می‌شود و می‌تواند منجر به عواقب مضری گردد. در داخل ساختمان، تابش نور خورشید بر روی پنجره‌های شیشه‌ای، وجود چراغ‌های رشته‌ای و سایر منابع نور، همگی پتانسیل ایجاد فرآیندهای شیمیایی روی سطوح را دارند. کوال و همکاران، شار فوتون‌های وابسته به طول موج را در انواع مختلف منابع نور در فضای داخلی ازجمله هالوژن، لامپ‌های رشته‌ای، فلورسنت فشرده، لوله‌های فلورسنت و نور خورشید انتقال یافته از طریق پنجره‌ها اندازه‌گیری کردند [۲۷]. آن‌ها اظهار داشتند که تجزیه نوری نیترو اسید به رادیکال‌های هیدروکسیل و اکسید نیتروژن، مهم‌ترین منبع وجود هیدروکسیل گازی در فضای داخل ساختمان است.

تغییرات فتوشیمیایی انجام شده توسط نور خورشید که از پنجره‌ها به داخل منتقل شده، باعث اکسید شدن مواد آلی می‌گردد. فوتوشیمی نیمه هادی شامل دی اکسید تیتانیوم که در رنگ‌ها و پوشش‌های خود تمیز شونده وجود دارد، بر ترکیب هوای داخل خانه تأثیر می‌گذارد. وجود حساس کننده‌های نوری در کنار فیلم‌های آلی می‌تواند منجر به انجام واکنش گردد [۴۴]. پژوهشگران، اسید هیومیک در معرض دی اکسید نیتروژن را تحت تابش قرار داده و دریافتند که کاهش دی اکسید نیتروژن روی اسیدهای هیومیک فعال شده با نور منبع مهم نیترو اسید گازی است [۴۴]. علاوه بر این، رطوبت نسبی و جذب آب نقش مهمی در تولید نیترو اسید از طریق انتقال پروتون دارد. سایر فرآیندهای فوتوشیمیایی روی سطوح رنگ شده، باعث انتشار ترکیبات آلی در هوا می‌شود [۵۴]. مطالعه وانگ و همکاران نشان داد که واکنش لیمونن (از خانواده ترپن‌ها)، یکی از رایج‌ترین ترکیبات آلی فرار داخلی ناشی از استفاده از محصولات تمیزکننده، عطر و خوشبوکننده‌های هوا در معرض نورهای داخلی می‌تواند منجر به تشکیل ذرات شود[۳۵].

دما

تغییرات دما در محیط‌های داخلی می‌تواند منجر به تغییرات شدید شود. نمونه‌ای از اثر دما، نرخ انتشار فتالات‌ها است که می‌تواند با افزایش ۱۰ درجه در دما، ۱۰ برابر شود [۵۵]. دما بر طول عمر گونه‌های جذب شده روی سطح نیز تأثیر می‌گذارد. برای واکنش‌های سطحی، دماهای بالا با افزایش انرژی واکنش و غلبه بر سد واکنش، باعث انجام واکنش‌ها می‌شوند. بنابراین، دما می‌تواند طول عمر شیمیایی انواع مولکول‌های کلیدی را در سطوح داخلی تعیین کند و نرخ واکنش را کنترل نماید[۲۸].

فرآیندهای مدل‌سازی در سطوح داخلی جهت بهبود کیفیت هوای داخلی

چالش‌ها و نیازهای تحقیقاتی زیادی برای ایجاد درک مولکولی از فرآیندهایی که در سطوح داخلی مربوط به شیمی فضای داخلی و کیفیت هوای داخل ساختمان اتفاق می‌افتد وجود دارد. برخی از تکنیک‌هایی که اخیراً برای مطالعه سطوح استفاده شده است در جدول ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برخی از این روش‌ها شامل آنالیز مستقیم سطح می‌باشد. روش‌های دیگر، ویژگی‌های شیمیایی را با استفاده از طیف سنجی جرمی به دست می‌آورند. ترکیب میکرو طیف‌سنجی و طیف‌سنجی جرمی در این پلتفرم‌های آزمایشی، بینش جدیدی در مورد فرآیندهای شیمیایی که در سطوح داخلی رخ می‌دهند را ارائه می‌کند. (جدول ۲)

جدول ۲- برخی از روش‌های جدید برای سنجش ترکیب شیمیایی سطوح داخلی

روش	نام اختصاری روش	هدف	خواص شیمیایی اندازه‌گیری شده	مرجع
استخراج سطح داخلی	ISE	فیلم‌های آلی قبل استخراج	گونه‌های آلی (غیر فرار و نیمه فرار)	اوبرین و همکاران [۵۶]
آنلیز مستقیم در زمان واقعی طیف سنجی جرمی	DART-MS	ترکیب آلی	گونه های آلی	ژوا و همکاران [۵۷]
تصویربرداری تولید فرکانس جمع	SFG imaging	نظم سطح و ساختار	ارتعاشات غیر متقارن	وانگ و همکاران [۵۸]
میکروسکوپ نیروی اتمی با طیف سنجی مادون قرمز فتوترمال	AFM-PTIR	ترکیب بندی فیلم (لایه) نازک	جذب مادون قرمز	اور و همکاران [۴۱] باندی و همکاران [۵۹]
سنجش میزان اسیدیته با طیف سنجی رامان	Raman pH	اسیدیته سطح	pH	کرایگ و همکاران [۶۰]

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

دستاوردهای پژوهش به نحوی تائید کننده مطالعات هوم کم است؛ مطالعاتی که در سال ۲۰۱۹ منتشر شده، نمونه‌ای است از یک تحقیق میدانی مشترک که برای بررسی چگونگی تأثیر فعالیت‌های روزمره بر انتشار، تغییرات شیمیایی و حذف گازها و ذرات در هوای داخلی، این سه مورد را به خوبی با هم ادغام کرده است [۶۱]. سایر مطالعات تائید کننده در این حوزه [۶۲–۷۸] نیز تائید کننده نتایج پژوهش است. فقط از طریق ادغام تجزیه‌وتحلیل میدانی، آزمایشگاهی و مدل‌سازی می‌توان اهمیت واکنش‌های سطحی در شیمی هوای داخل ساختمان را آشکار کرد. در نهایت، نکته بسیار مهم این است که باید سطوح مختلف داخل ساختمان را به عنوان شرکت‌کننده‌های فعال در تعیین کیفیت هوای داخلی و اثرگذار بر سلامت انسان در نظر گرفت. (شکل ۵)

برای پیش‌بینی ترکیب شیمیایی فضای داخلی، همانند فضاهای خارجی می‌توان از مدل‌سازی استفاده کرد، این مدل‌ها بر اساس درک مکانیسم‌های واکنش، سینتیک و

ترمودینامیک فرآیندها عمل می‌کنند و نقش مهمی در تحلیل کیفیت هوای فضاهای داخلی و تأثیر آن بر سلامتی انسان دارد. مدل‌سازی فرآیندهای مختلف در سطوح داخلی نیاز به طیف وسیعی از مدل‌های محاسباتی و نظری دارد. ادغام مدل‌های شیمیایی مربوط به فضاهای داخلی با آزمایش‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های میدانی می‌تواند تفسیر کمی را فراهم سازد. چنین مدل‌هایی برای برون‌یابی نتایج در شرایط مختلف و بررسی خواصی که در حال حاضر توسط اندازه‌گیری‌ها قابل دسترسی نیستند، نیز مفید خواهند بود.

بحث و نتیجه‌گیری

شیمی ساختمان مفهومی است که به خوبی رویکرد یکپارچه میدانی، آزمایشگاهی و مدل‌سازی را نشان می‌دهد. از این رو، شیمی ساختمان را برآیندی از بیولوژی ساختمان و فیزیک ساختمان دانسته‌اند؛ موضوعی که در معماری دوران پساکرونا اهمیت بالایی دارد. در حال حاضر مطالعه محیط‌های داخلی شامل سه رویکرد علمی است:

(۱) اندازه‌گیری در محیط‌های داخلی

(۲) مطالعات آزمایشگاهی شیمی محیط‌های داخلی و

(۳) تجزیه‌وتحلیل مدل‌سازی

شکل ۶. چارچوب شیمی ساختمان در توسعه مفهومی مدل معماری سالم

دستاوردهای پژوهش نشان می‌دهد که ساختمان‌های سالم مهم‌تر از همیشه، به‌عنوان راه‌حلی برای معماری آینده مطرح‌شده‌اند. تلاش برای دست‌یابی به کانسپت ساختمان سالم، همچنین ممکن است زمان خوبی برای بررسی انواع دیگر تأثیراتی باشد که ساختمان بر سلامت انسان باقی می‌گذارد. در دوران پساکرونا، راهی نیست، جز این که به طور جدی در مورد اثرات بهداشتی ساختمان‌ها نیز فکر کنیم. (شکل ۶)

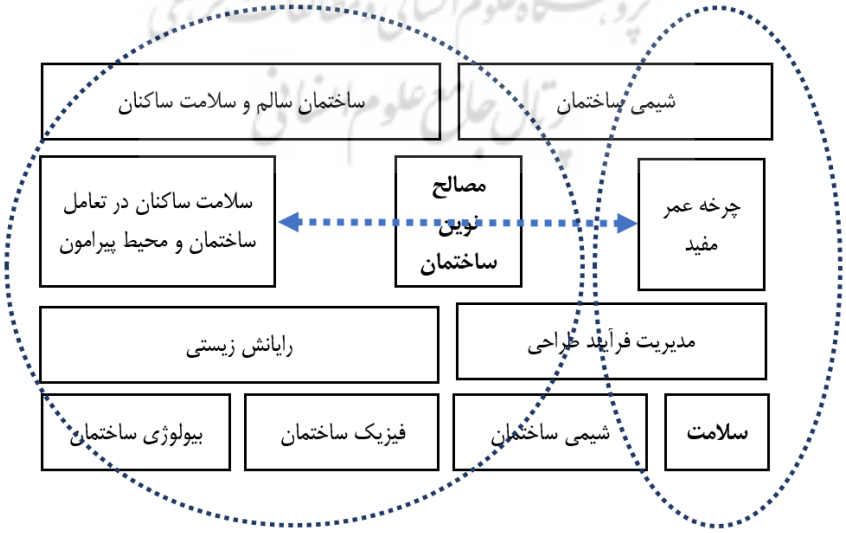
نشانه‌ها و علائم سندروم ساختمان بیمار شامل سوزش گلو، مشکلات تنفسی، آبریزش بینی، علائم آلرژی مانند عطسه، احساس سوزش در بینی، خارش پوست، سردرد، سرگیجه، فراموشی، خستگی، تحریک‌پذیری، حالت تهوع، درد بدن، تب و لرز؛ ریشه‌های از جنس شیمی ساختمان دارند. علیرغم دستاوردهای «طراحی انسان محور»، «تجربه در محل کار» و «سلامت و ایمنی محل کار»؛ کیفیت مورد نیاز در دوران پساکرونا چیزی فراتر از این هاست؛ موضوعی که لازم است در طراحی محل کار در اولویت قرار گیرد. (شکل ۷)

شواهد به دست آمده در مطالعه نشان می‌دهد که کیفیت هوای داخل خانه تأثیر چشمگیری بر بهره‌وری و سلامت کارکنان دارد. همچنین شواهد دیگر نشان می‌دهد که مواد و فرآیندهای ساختمانی خاص می‌توانند کیفیت هوا را کاهش دهند. برای دست‌یابی به کانسپت ساختمان سالم باید علاوه بر این موارد، موضوعاتی مانند سیستم‌های تأمین مالی ساخت‌وساز و مدیریت بخش املاک بازنگری شوند. همان‌طور که در پیشینه پژوهش هم تأکید شده بود که «افرادی

که ساختمان شما را مدیریت می‌کنند، تأثیر بیشتری بر سلامت شما نسبت به پزشکتان دارند».

کانسپت مفهومی ساختمان سالم بنابر این ترکیبی از مفاهیم متنوع است. «ساختمان‌های سالم» بیشتر از گذشته به سلامت فضای داخلی ساختمان اهمیت می‌دهند؛ فضایی که افراد بیشتر عمر خود را در آن می‌گذرانند. این تغییر پیامدهای شدیدی برای بخش ساختمان تجاری و آینده "طراحی محل کار" خواهد داشت. دستاوردهای پژوهش نشان دهنده آن است که مفهوم "محل کار" در آینده در حال تغییر است. با این حال، همه‌گیری کووید ۱۹ نشان داده است که این ملاحظات سلامتی دیگر تنها یک ارزش افزوده برای یک ساختمان نیستند، بلکه عنصری ضروری محسوب می‌شوند. هر ساختمان با کمک تیم‌های عملیاتی باید طرح‌های یکپارچه‌سازی سلامتی را به اجرا بگذارد.

ساختمان‌هایی که قبلاً مطابق با الزامات LEED، WELL یا Fitwel طراحی شده‌اند، در این زمینه پیشرفت دارند. طراحی برای سلامت محیط‌زیست و اثرات کربنِ کمتر مدت‌هاست که از نکات کلیدی فروش این سیستم‌های رتبه‌بندی بوده است، اما معیارهای هر یک از ویژگی‌ها برای کاهش شیوع کووید ۱۹ و کمک به ساکنان کمک می‌کند تا با خیال راحت با شرایط عادی جدید سازگار شوند. دستاوردهای پژوهش نشان دهنده آن است که یکی از راه‌های آسان برای محدود کردن تجمع ویروس‌ها و باکتری‌ها در هوای داخل ساختمان، استفاده از تهویه صحیح است. سیستم‌های جابجایی هوای مکانیکی به منظور تأمین هوای تازه اکسیژن به فضاهای داخلی و خروج دی اکسید کربن، ذرات معلق، فرمالدئید، مونوکسید کربن و مجموعه‌ای از ترکیبات مضر مانند ترکیبات آلی فرار (VOCs) از هوا هستند. در این فرآیند، ذرات ویروس نیز تخلیه می‌شوند، اما اگر میزان تهویه و تغییر هوای ساختمان کافی نباشد، ممکن است غلظت بیشتری از ذرات ویروس در فضای تنفس باقی بماند. ویروس زمانی پخش می‌شود که یک فرد آلوده با عطسه یا سرفه قطرات حاوی میلیون‌ها میکروب کوچک را بیرون می‌زند. سپس می‌توانند در فضای تنفسی آئروسل شوند یا روی سطوح قابل لمس فرود آیند. به عبارت دیگر، شیمی ساختمان با در نظر گرفتن عناصر آلوده کننده، برای هر ساختمان نسخه‌ای کارا و منحصر به فرد ارائه می‌دهد، نسخه‌ای که با بیولوژی ساختمان و فیزیک ساختمان هماهنگ باشد. (شکل ۵)



شکل ۷. مدل عملیاتی رویکردی زیست‌محیطی به ساختمان سالم و سلامت ساکنان

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه‌های اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان در مقاله: نویسنده اول: نگارنده اصلی مقاله، پژوهشگر اصلی، توسعه ساختار تحقیق، مدل‌سازی و ترسیم **اجزا (۵۰٪) نویسنده دوم:** پژوهشگر اصلی مقاله، توسعه ایده پژوهش و کنترل فرآیند، ایده پردازی و ساختار تحقیق (۵۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

منابع

1. Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, Behar JV, Hern SC, Engelmann WH. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology. 2001 Jul; 11(3):231-52.
2. Fang Y, Lakey PS, Riahi S, McDonald AT, Shrestha M, Tobias DJ, Shiraiwa M, Grassian VH. A molecular picture of surface interactions of organic compounds on prevalent indoor surfaces: limonene adsorption on SiO 2. Chemical science. 2019;10(10):2906-14.
3. Fang Y, Riahi S, McDonald AT, Shrestha M, Tobias DJ, Grassian VH. What is the driving force behind the adsorption of hydrophobic molecules on hydrophilic surfaces?. The Journal of Physical Chemistry Letters. 2019 Jan 2;10(3):468-73.
4. Singer BC, Hodgson AT, Hotchi T, Ming KY, Sextro RG, Wood EE, Brown NJ. Sorption of organic gases in residential rooms. Atmospheric Environment. 2007 May 1;41(15):3251-65.
5. Manuja A, Ritchie J, Buch K, Wu Y, Eichler CM, Little JC, Marr LC. Total surface area in indoor environments. Environmental Science: Processes & Impacts. 2019;21(8):1384-92. 10.1039/C9EM00157C
6. Piscitelli P, Miani A, Setti L, De Gennaro G, Rodo X, Artinano B, Vara E, Rancan L, Arias J, Passarini F, Barbieri P. The role of outdoor and indoor air quality in the spread of SARS-CoV-2: Overview and recommendations by the research group on COVID-19 and particulate matter (RESCOP commission). Environmental Research. 2022 Aug 1;211:113038. 10.1016/j.envres.2022.113038
7. Van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, Holbrook MG, Gamble A, Williamson BN, Tamin A, Harcourt JL, Thornburg NJ, Gerber SI, Lloyd-Smith JO. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. New England journal of medicine. 2020 Apr 16;382(16):1564-7. 10.1056/NEJMc2004973
8. Rasoolzadeh M, Moshari M. Prioritizing for Healthy Urban Planning: Interaction of Modern Chemistry and Green Material-based Computation. Naqshejahan-Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2021 May 10;11(1):94-105.
9. Liu Y, Bé AG, Or VW, Alves MR, Grassian VH, Geiger FM. Challenges and opportunities in molecular-level indoor surface chemistry and physics. Cell Reports Physical Science. 2020 Nov 18;1(11):100256. 10.1016/j.xcrp.2020.100256
10. Weschler CJ, Carslaw N. Indoor chemistry. Environmental Science & Technology. 2018 Feb 5;52(5):2419-28. 10.1021/acs.est.7b06387

11. Nazaroff WW, Goldstein AH. Indoor chemistry: research opportunities and challenges. Indoor air. 2015 Aug 1;25(4):357-61. 10.1111/ina.12219

12. Breen MS, Burke JM, Batterman SA, Vette AF, Godwin C, Croghan CW, Schultz BD, Long TC. Modeling spatial and temporal variability of residential air exchange rates for the Near-Road Exposures and Effects of Urban Air Pollutants Study (NEXUS). International journal of environmental research and public health. 2014 Nov;11(11):11481-504. 10.3390/ijerph111111481

13. Carslaw N. A new detailed chemical model for indoor air pollution. Atmospheric Environment. 2007 Feb 1;41(6):1164-79. 10.1016/j.atmosenv.2006.09.038

14. Wang H, Morrison GC. Ozone-initiated secondary emission rates of aldehydes from indoor surfaces in four homes. Environmental Science & Technology. 2006 Sep 1;40(17):5263-8. 10.1021/es060080s

15. Wolkoff P, Wilkins CK, Clausen PA, Nielsen GD. Organic compounds in office environments-sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry. Indoor air. 2006 Feb 1;16(1):7-19. 10.1111/j.1600-0668.2005.00393.x

16. Liu Y, Misztal PK, Arata C, Weschler CJ, Nazaroff WW, Goldstein AH. Observing ozone chemistry in an occupied residence. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2021 Feb 9;118(6):e2018140118. 10.1073/pnas.2018140118

17. Zhou S, Forbes MW, Abbatt JP. Kinetics and products from heterogeneous oxidation of squalene with ozone. Environmental Science & Technology. 2016 Nov 1;50(21):11688-97. 10.1021/acs.est.6b03270

18. Kelly FJ, Fussell JC. Improving indoor air quality, health and performance within environments where people live, travel, learn and work. Atmospheric Environment. 2019 Mar 1;200:90-109. 10.1016/j.atmosenv.2018.11.058

19. Zhang M, Xiong J, Liu Y, Misztal PK, Goldstein AH. Physical–chemical coupling model for characterizing the reaction of ozone with squalene in realistic indoor environments. Environmental Science & Technology. 2021 Jan 19;55(3):1690-8. 10.1021/acs.est.0c06216

20. Weschler CJ. Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. Indoor air. 2000 Dec 1;10(4):269-88. 10.1034/j.1600-0668.2000.010004269.x

21. Nazaroff WW, Weschler CJ. Indoor ozone: Concentrations and influencing factors. Indoor air. 2022 Jan;32(1):e12942.https://doi.org/10.1111/ina.12942

22. Morrison GC, Nazaroff WW. Ozone interactions with carpet: secondary emissions of aldehydes. Environmental Science & Technology. 2002 May 15;36(10):2185-92. 10.1021/es0113089

23. Wisthaler A, Weschler CJ. Reactions of ozone with human skin lipids: sources of carbonyls, dicarbonyls, and hydroxycarbonyls in indoor air. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2010 Apr 13;107(15):6568-75. 10.1073/pnas.0904498106

24. Schwartz-Narbonne H, Jones SH, Donaldson DJ. Indoor lighting releases gas phase nitrogen oxides from indoor painted surfaces. Environmental Science & Technology Letters. 2019 Jan

15;6(2):92-7. 10.1021/acs.estlett.8b00685

25. Gligorovski S. Nitrous acid (HONO): An emerging indoor pollutant. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2016 Jan 1;314:1-5. 10.1016/j.jphotochem.2015.06.008

26. Finlayson-Pitts BJ, Wingen LM, Sumner AL, Syomin D, Ramazan KA. The heterogeneous hydrolysis of NO 2 in laboratory systems and in outdoor and indoor atmospheres: An integrated mechanism. Physical Chemistry Chemical Physics. 2003;5(2):223-42. 10.1039/B208564J

27. Kowal SF, Allen SR, Kahan TF. Wavelength-resolved photon fluxes of indoor light sources: Implications for HOx production. Environmental science & technology. 2017 Sep 19;51(18):10423-30. 10.1021/acs.est.7b02015

28. Ault AP, Grassian VH, Carslaw N, Collins DB, Destaillats H, Donaldson DJ, Farmer DK, Jimenez JL, McNeill VF, Morrison GC, O'Brien RE. Indoor surface chemistry: developing a molecular picture of reactions on indoor interfaces. Chem. 2020 Dec 3;6(12):3203-18. 10.1016/j.chempr.2020.08.023

29. Rubasinghege G, Grassian VH. Photochemistry of adsorbed nitrate on aluminum oxide particle surfaces. The Journal of Physical Chemistry A. 2009 Jul 9;113(27):7818-25. 10.1021/jp902252s

30. Won Y, Waring M, Rim D. Understanding the spatial heterogeneity of indoor OH and HO2 due to photolysis of HONO using computational fluid dynamics simulation. Environmental Science & Technology. 2019 Nov 6;53(24):14470-8. 10.1021/acs.est.9b06315

31. Gen M, Liang Z, Zhang R, Mabato BR, Chan CK. Particulate nitrate photolysis in the atmosphere. Environmental Science: Atmospheres. 2022. 10.1039/D1EA00087J

32. Wong JP, Carslaw N, Zhao R, Zhou S, Abbatt JP. Observations and impacts of bleach washing on indoor chlorine chemistry. Indoor Air. 2017 Nov;27(6):1082-90. 10.1111/ina.12402

33. Mattila JM, Lakey PS, Shiraiwa M, Wang C, Abbatt JP, Arata C, Goldstein AH, Ampollini L, Katz EF, DeCarlo PF, Zhou S. Multiphase chemistry controls inorganic chlorinated and nitrogenated compounds in indoor air during bleach cleaning. Environmental Science & Technology. 2020 Jan 15;54(3):1730-9. 10.1021/acs.est.9b05767

34. Schwartz-Narbonne H, Wang C, Zhou S, Abbatt JP, Faust J. Heterogeneous chlorination of squalene and oleic acid. Environmental science & technology. 2018 Nov 2;53(3):1217-24. 10.1021/acs.est.8b04248

35. Wang C, Collins DB, Abbatt JP. Indoor illumination of terpenes and bleach emissions leads to particle formation and growth. Environmental Science & Technology. 2019 Oct 2;53(20):11792-800. 10.1021/acs.est.9b04261

36. Duncan SM, Sexton KG, Turpin BJ. Oxygenated VOC s, aqueous chemistry, and potential impacts on residential indoor air composition. Indoor Air. 2018 Jan;28(1):198-212. 10.1111/ina.12422

37. Alves MR, Fang Y, Wall KJ, Vaida V, Grassian VH. Chemistry and photochemistry of pyruvic acid adsorbed on oxide surfaces. The Journal of Physical Chemistry A. 2019 Aug 5;123(35):7661-71. 10.1021/acs.jpca.9b06563

38. DeCarlo PF, Avery AM, Waring MS. Thirdhand smoke uptake to aerosol

particles in the indoor environment. Science Advances. 2018 May 9;4(5):eaap8368. 10.1126/sciadv.aap8368

39. Cancelada L, Sleiman M, Tang X, Russell ML, Montesinos VN, Litter MI, Gundel LA, Destaillats H. Heated tobacco products: volatile emissions and their predicted impact on indoor air quality. Environmental science & technology. 2019 May 31;53(13):7866-76. 10.1021/acs.est.9b02544
40. Ampollini L, Katz EF, Bourne S, Tian Y, Novoselac A, Goldstein AH, Lucic G, Waring MS, DeCarlo PF. Observations and contributions of real-time indoor ammonia concentrations during HOMEChem. Environmental science & technology. 2019 Jun 24;53(15):8591-8. https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02157
41. Or VW, Estillore AD, Tivanski AV, Grassian VH. Lab on a tip: atomic force microscopy–photothermal infrared spectroscopy of atmospherically relevant organic/inorganic aerosol particles in the nanometer to micrometer size range. Analyst. 2018;143(12):2765-74. 10.1039/C8AN00171E
42. Mihut C, Captain DK, Gadala-Maria F, Amiridis MD. Recycling of nylon from carpet waste. Polymer Engineering & Science. 2001 Sep;41(9):1457-70. https://doi.org/10.1002/pen.10845
43. Hameury S, Lundström T. Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign. Energy and buildings. 2004 Mar 1;36(3):281-92. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.003
44. Stemmler K, Ammann M, Donders C, Kleffmann J, George C. Photosensitized reduction of nitrogen dioxide on humic acid as a source of nitrous acid. Nature. 2006 Mar;440(7081):195-8. https://doi.org/10.1038/nature04603
45. Wang C, Collins DB, Arata C, Goldstein AH, Mattila JM, Farmer DK, Ampollini L, DeCarlo PF, Novoselac A, Vance ME, Nazaroff WW. Surface reservoirs dominate dynamic gas-surface partitioning of many indoor air constituents. Science advances. 2020 Feb 19;6(8):eaay8973. doi: 10.1126/sciadv.aay8973
46. Or VW, Alves MR, Wade M, Schwab S, Corsi RL, Grassian VH. Crystal clear? Microspectroscopic imaging and physicochemical characterization of indoor depositions on window glass. Environmental Science & Technology Letters. 2018 Jul 17;5(8):514-9. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00355
47. Schwartz-Narbonne H, Donaldson DJ. Water uptake by indoor surface films. Scientific reports. 2019 Jul 31;9(1):1-0. https://doi.org/10.1038/s41598-019-47590-x
48. Weschler CJ, Nazaroff WW. Growth of organic films on indoor surfaces. Indoor Air. 2017 Nov;27(6):1101-12. https://doi.org/10.1111/ina.12396
49. Jaeger RJ, Rubin RJ. Plasticizers from plastic devices: extraction, metabolism, and accumulation by biological systems. Science. 1970 Oct 23;170(3956):460-2. doi: 10.1126/science.170.3956.460
50. Rindelaub JD, Craig RL, Nandy L, Bondy AL, Dutcher CS, Shepson PB, Ault AP. Direct measurement of pH in individual particles via Raman microspectroscopy and variation in acidity with relative humidity. The Journal of Physical Chemistry A. 2016 Feb 18;120(6):911-7. https://doi.org/10.1021/acs.jpca.5b12699
51. Wei Z, Li Y, Cooks RG, Yan X. Accelerated reaction kinetics in

Analytical chemistry. 2015 May 5;87(9):4733-40. https://doi.org/10.1021/ac504722z

58. Wang H, Chen W, Wagner JC, Xiong W. Local ordering of lattice self-assembled SDS@ 2β-CD materials and adsorbed water revealed by vibrational sum frequency generation microscope. The Journal of Physical Chemistry B. 2019 Jun 27;123(29):6212-21. https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.9b04928
59. Bondy AL, Kirpes RM, Merzel RL, Pratt KA, Banaszak Holl MM, Ault AP. Atomic force microscopy-infrared spectroscopy of individual atmospheric aerosol particles: subdiffraction limit vibrational spectroscopy and morphological analysis. Analytical chemistry. 2017 Sep 5;89(17):8594-8. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b02381
60. Craig RL, Nandy L, Axson JL, Dutcher CS, Ault AP. Spectroscopic determination of aerosol pH from acid–base equilibria in inorganic, organic, and mixed systems. The Journal of Physical Chemistry A. 2017 Aug 3;121(30):5690-9. https://doi.org/10.1021/acs.jpca.7b05261
61. Farmer DK, Vance ME, Abbatt JP, Abeleira A, Alves MR, Arata C, Boedicker E, Bourne S, Cardoso-Saldaña F, Corsi R, DeCarlo PF. Overview of HOMEChem: House observations of microbial and environmental chemistry. Environmental Science: Processes & Impacts. 2019;21(8):1280-300. doi: 10.1039/C9EM00228F
62. Rasoolzadeh M, Moshari M. Prioritizing for Healthy Urban Planning: Interaction of Modern Chemistry and Green Material-based Computation. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2021 May 10;11(1):94-105.

microdroplets: Overview and recent developments. Annual Review of Physical Chemistry. 2020 Apr;71(1).

52. Abbatt JP, Wang C. The atmospheric chemistry of indoor environments. Environmental Science: Processes & Impacts. 2020;22(1):25-48. doi: 10.1039/C9EM00386J
53. Kruza M, Lewis AC, Morrison GC, Carslaw N. Impact of surface ozone interactions on indoor air chemistry: A modeling study. Indoor Air. 2017 Sep;27(5):1001-11. https://doi.org/10.1111/ina.12381
54. Gandolfo A, Marque S, Temime-Roussel B, Gemayel R, Wortham H, Truffier-Boutry D, Bartolomei V, Gligorovski S. Unexpectedly high levels of organic compounds released by indoor photocatalytic paints. Environmental science & technology. 2018 Sep 6;52(19):11328-37. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03865
55. Liang Y, Xu Y. Emission of phthalates and phthalate alternatives from vinyl flooring and crib mattress covers: the influence of temperature. Environmental science & technology. 2014 Dec 16;48(24):14228-37. https://doi.org/10.1021/es504801x
56. O'Brien RE, Ridley KJ, Canagaratna MR, Jayne JT, Croteau PL, Worsnop DR, Budisulistiorini SH, Surratt JD, Follett CL, Repeta DJ, Kroll JH. Ultrasonic nebulization for the elemental analysis of microgram-level samples with offline aerosol mass spectrometry. Atmospheric Measurement Techniques. 2019 Mar 14;12(3):1659-71. https://doi.org/10.5194/amt-12-1659-2019
57. Zhou S, Forbes MW, Abbatt JP. Application of direct analysis in real time-mass spectrometry (dart-ms) to the study of gas–surface heterogeneous reactions: Focus on ozone and pahs.

[Persian]
https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1400.11.1.7.0

63. Mohtashami N, Mahdavinejad M, Bemanian M. Contribution of city prosperity to decisions on healthy building design: A case study of Tehran. Frontiers of Architectural Research. 2016 Sep 1;5(3):319-31. https://doi.org/10.1016/j.foar.2016.06.001

64. Pakdehi, S. G., Rasoolzadeh, M., & Moghadam, A. S. (2016). Barium oxide as a modifier to stabilize the γ-Al2O3 structure. Polish Journal of Chemical Technology, 18(4), 1-4. https://doi.org/10.1515/pjct-2016-0062

65. Pakdehi, S. G., Rasoolzadeh, M., & Zolfaghari, R. (2014a). Synthesize and Investigation of the Catalytic Behavior of Ir/γ-Al2O3 Nanocatalyst. Advanced Materials Research (Vol. 829, pp. 163-167). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.829.163

66. Pakdehi, S. G., Salimi, M., & Rasoolzadeh, M. (2014c). Co-Ni Bimetallic Catalysts Coated on Cordierite Monoliths for Hydrazine Decomposition. Advanced Materials Research (Vol. 936, pp. 981-985). https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.936.981

67. Rasoolzadeh, M., & Islampour, R. (2011). Estimation of vibrational energy levels of diatomic molecules (CN, CO and CS) using Numerov algorithm and comparison with the empirical values. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(12), 2041-2047. Available from: https://www.researchgate.net/profile/R_Islampour/publication/266350087_Estimation_of_Vibrational_Energy_Levels_of_Diatomic_Molecules_CN_CO_and_CS_Using_Numerov_Algorithm_and_Comparison_with_the_Empirical_Values/links/55014f090cf2aee14b59199b.pdf

68. Mahdavinejad M. Designerly Approach to Energy Efficiency in High-Performance Architecture Theory. Naqshejahan - Basic Studies and New Technologies of Architecture and Planning. 2020 Sep 10;10(2):75-83. [Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.23224991.1399.10.2.7.5

69. Saadatjoo P, Mahdavinejad M, Zhang G, Vali K. Influence of permeability ratio on wind-driven ventilation and cooling load of mid-rise buildings. Sustainable Cities and Society. 2021 Jul 1;70:102894. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102894

70. Saadatjoo P, Mahdavinejad M, Zhang G. A study on terraced apartments and their natural ventilation performance in hot and humid regions. Building Simulation. 2018 Apr 1;11(2):359-372. Tsinghua University Press. https://doi.org/10.1007/s12273-017-0407-7

71. Javanroodi K, Nik VM, Mahdavinejad M. A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas. Sustainable Cities and Society. 2019; 49:101597. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101597

72. Torabi M, Mahdavinejad M. Past and Future Trends on the Effects of Occupant Behaviour on Building Energy Consumption. J. Sustain. Archit. Civ. Eng. 2021 Oct 27;29(2) 83-101. https://doi.org/10.5755/j01.sace.29.2.28576

73. Ahmadi J, Mahdavinejad M, Larsen OK, Zhang C, Zarkesh A, Asadi S. Evaluating the different boundary conditions to simulate airflow and heat transfer in Double-Skin Facade. Building Simulation. 2021 Sep 16:1-17. Tsinghua University Press. https://doi.org/10.1007/s12273-021-0824-5

74. Talaei M, Mahdavinejad M, Azari R. Thermal and energy performance of algae bioreactive façades: A review. Journal of Building Engineering. 2020 Mar 1;28:101011. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101011

75. Aliabadi M, Zarkesh A, Mahdavinejad M. Bioware fog collectors: the Texas horned lizard as a model for a biomimetic fog-harvesting. Materials Research Express. 2018 Sep 5;5(11):115502. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadab4

76. Talaei M, Mahdavinejad M. Probable cause of damage to the panel of microalgae bioreactor building façade: Hypothetical evaluation. Engineering Failure Analysis. 2019 Jul 1;101:9-21. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.060

77. Mahdavinejad M, Hosseini SA. Data mining and content analysis of the jury citations of the Pritzker Architecture prize (1977–2017). Journal of Architecture and Urbanism. 2019 Feb 1;43(1):71-90. https://doi.org/10.3846/jau.2019.5209

78. Aliabadi M, Zarkesh A, Siampour H, Abbasian S, Mahdavinejad M, Moshaii A. Bioinspired Azimuthally Varying Nanoscale Cu Columns on Acupuncture Needles for Fog Collection. ACS Applied Nano Materials. 2021 Sep 15. https://doi.org/10.1021/acsanm.1c01288

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی