

УДК 624.15,624.19

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-47>

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РІВНЕМ КОМФОРТУ ПРИМІЩЕНЬ ТИПУ OPEN SPACE ПІДЗЕМНОГО РОЗТАШУВАННЯ

Негрій Тетяна Олександрівна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри технологій захисту

навколишнього середовища та охорони праці

Київського національного університету будівництва і архітектури

ORCID ID: 0000-0002-4239-3178

Бубон Сергій Леонідович,

аспірант кафедри технологій захисту

навколишнього середовища та охорони праці

Київського національного університету будівництва і архітектури

ORCID ID: 0009-0009-6916-8374

Приміщення типу Open Space підземного розташування, переобладнані з існуючих підземних споруд іншого за проєктом і функціоналом призначення, мають низку особливостей, що суттєво відрізняють їх від аналогічних офісів і коворкінг центрів наземного розташування. Зокрема, такі споруди мають підвищену відносну вологість внутрішнього повітря, що зумовлено особливостями планування та недостатністю вентиляції, знижені та некомфортні температурні показники внутрішнього середовища, завищені й небезпечні рівні радону і показників мікробного забруднення поверхонь бактеріями, грибами та вірусами. Дослідження показників мікроклімату та комфорту в приміщеннях підземних споруд із високою вологістю і зниженою температурою внутрішнього повітря, у яких не було передбачено умов для постійного перебування великої кількості людей, аналіз показників комфорту, фізіологічних та психологічних наслідків перебування у підземних приміщеннях, такі як психологічна депресія, нудьга і почуття страху, дають змогу розробити систему управління унормованими показниками повітряного середовища та рівня комфорту для безпечної і продуктивної роботи людей у приміщеннях типу Open Space підземного розташування. Запропоновано підтримання мікрокліматичних показників на основі комбінованих систем припливно-витяжної вентиляції з рекуперативними осушувачами повітря, можливістю температурного зонування простору з орієнтуванням на найбільше скупчення людей та можливістю корекції температурної стратифікації, регулювання рівнів радону, а також підтримки аероіонного та мікробіологічного складу повітря підземного простору для підвищення продуктивності роботи та безпеки довготривалого перебування людей у такого типу приміщеннях.

Ключові слова: мікрокліматичні показники, підземні споруди, тепловологісний режим, приміщення відкритого планування, комфортне середовище.

Negriy Tetyana, Bubon Serhiy. Development of a comfort level management system for underground Open Space premises

Underground Open Space facilities, converted from existing underground structures of a different design and functional purpose, have a number of features that significantly distinguish them from similar offices and coworking centers located above ground in buildings. In particular, such facilities have increased relative humidity of indoor air, which is due to planning features and insufficient ventilation, low and uncomfortable temperature indicators of the indoor environment, high and dangerous levels of radon and indicators of microbial contamination of surfaces by bacteria, fungi and viruses. Research of microclimate and comfort indicators in underground structures with high humidity and low indoor air temperature, in which conditions for the constant stay of a large number of people were not provided, analysis of comfort indicators, physiological and psychological consequences of staying in underground spaces, such as psychological depression, boredom and fear, allow developing a system for managing normalized air environment indicators and comfort levels for safe and productive work of people in underground Open Space-type premises. It is proposed to maintain microclimate indicators based on combined supply and exhaust ventilation systems with recuperative air dehumidifiers, the possibility of temperature zoning of the space with orientation to the largest concentration of people and the possibility of correcting temperature stratification, regulating radon levels, as well as maintaining the aeroionic and microbiological composition of the air in the underground space to increase work productivity and safety of long-term stay in such premises.

Keywords: microclimatic indicators, underground structures, thermal and humidity regime, open-plan premises, comfortable environment.

Вступ. Через військову агресію, постійні обстріли, знищення та пошкодження об'єктів цивільної інфраструктури, усе більш актуальним є розміщення персоналу організацій і підприємств у підземні приміщення для безпечної та безперервної роботи. Сучасне будівництво передбачає наявність підземних приміщень типу Open Space для постійного перебування людей та можливості організації офісних приміщень та коворкінг-центрів, але сьогодні більшість таких приміщень переобладнано з уже існуючих підземних споруд типу підвалів, паркінгів, складів, тобто таких, що не пристосовані для постійного перебування людей [1]. Такий підхід суттєво відображається на мікрокліматичних показниках середовища та комфортності перебування, що безпосередньо впливає на продуктивність та загальний стан людей, що перебувають у приміщеннях відкритого планування підземного розташування.

На відміну від наземних просторів якість повітря в підземних приміщеннях є незадовільною. Основними небезпечними чинниками підземних просторів є підвищена вологість, низька температура, застій забруднюючих речовин, таких як CO_2 та дрібнодисперсний пил $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , наявність завищених показників радону (R_n) та його похідних, що характерні для приміщень, які за початковим проєктом і функціоналом не були призначені для довготривалого перебування великої кількості людей. Зазначені чинники як окремо, так і в комбінації можуть спричинити серйозні проблеми зі здоров'ям працівників у довготривалій перспективі.

Забруднення повітря частинками $\text{PM}_{2.5}$, вуглекислим газом (CO_2), неприємними запахами та радоном (R_n) зростає через відсутність належної вентиляції. Дрібнодисперсний пил респірабельної фракції за недостатнього вентилявання здатен глибоко проникати в альвеоли, викликаючи хронічний бронхіт та призвести до важких наслідків для здоров'я за тривалого впливу високих концентрацій [2; 3].

Через постійне розсіювання та розведення радону (R_n) природною вентиляцією офісних приміщень його рівень рідко досягає граничних або небезпечних рівнів, проте він вважається одним з основних забруднювачів повітря в підземних приміщеннях. Порівнюючи показники повітря в підземному приміщенні та наземній частині однієї і тієї ж будівлі, концентрація R_n виявляється значно вищою в підземному приміщенні, що є небезпечним для людей, які постійно там перебувають [4].

Підземні простори мають високу відносну вологість (RH), що сприяє легкому утворенню

цвілі та грибків через недостатній повітрообмін та брак природного освітлення, а також негативно впливає на загальний мікроклімат приміщення. Окрім того, існує потенційний вплив середовища підземних просторів на здоров'я людини. Такі простори є шумними, запиленими, не мають природного освітлення, вікон, доступу свіжого повітря. Тому працівники в умовах додаткової емоційної напруженості через безпекову ситуацію у країні можуть почуватися дуже неспокійно без належних умов комфорту у підземних просторах протягом робочого дня [5; 6].

Методи та методики дослідження. Приміщення відкритого планування підземного розташування негативно впливають на фізіологію, психологію та безпеку людини. Психологічні проблеми, спричинені підземними просторами, є складнішими. Результати досліджень показують, що навіть якщо внутрішнє середовище підземних будівель досягає такого ж рівня комфорту, як і в наземних будівлях, психологічні бар'єри все ще існують. Тривале перебування в підземних будівлях призводить до погіршення суб'єктивного сприйняття часу, погіршення зору та пам'яті, підвищення втоми, зниження працездатності та захисних функцій організму, а також до галюцинацій [5].

Із метою дослідження потреб відвідувачів підземних просторів проведено опитування працівників підземного коворкінг-центру, який розташований у переобладнаному підвальному приміщенні закладу вищої освіти Центрального регіону України. Анкета містила запитання щодо комфортності температурних показників, освітлення, якості повітря, ергономічності та загального рівня комфорту. До опитування було залучено 46 осіб, які щоденно протягом 56 днів працювали у приміщенні в підземному коворкінг-центрі навчального закладу об'ємом 270 м^3 . Розподіл опитаних за статтю становив 18 жінок і 28 чоловіків. Середній вік опитаних – 23 роки (від 17 до 49 років).

Для отримання показників динаміки змін відчуття комфортності середовища анкетування проводили на початку та наприкінці робочого дня. Загальний аркуш анкети містив поле, де опитувані могли зазначити пропозиції щодо поліпшення умов перебування у підземному приміщенні та зазначити особисті скарги на параметри, що не були у переліку, визначених анкетною.

За результатами опитування було виявлено, що визначена умовами інтерв'ювання аудиторія майже у повному складі виразила скарги на якість повітря наприкінці робочого дня, що

викликало надмірну втому і легкий головний біль, що, очевидно, зумовлено збільшенням концентрації CO_2 у повітрі приміщення, про що свідчили показники датчиків CO_2 в приміщенні. Дослідження комбінованого впливу підвищеної температури, відносної вологості та концентрації CO_2 на реакції людини у роботі виявили, що висока відносна вологість та підвищена концентрація CO_2 погіршують якість повітря і що комбінований вплив високої температури повітря, відносної вологості та концентрації CO_2 призводить до різноманітних негативних реакцій людини, таких як швидка втомлюваність, головний біль, втрата концентрації уваги тощо.

Температурні показники цілком задовольнили 44 % опитаних, при цьому 56 % зазначили, що бажали би підвищити температуру повітря на 2–3 °C для більш комфортного перебування. Такі результати свідчать про необхідність температурного зонування приміщень для забезпечення найбільш комфортного перебування усіх працівників протягом робочого дня.

Значна кількість опитаних, майже 72 %, відзначила, що відчуває дискомфорт від температурної стратифікації (різниці між температурою підлоги та рівнем робочої зони), що зумовлено початковими особливостями проектування та функціональним призначенням приміщення. Виявлення такого недоліку потребує його врахування під час формування напрямку повітряного потоку підігрітого повітря на підлогу.

Рівень освітленості, ергономічності та зручності розташування робочих місць задовольнив майже 87 % опитаних. Найпопулярнішою пропозицією щодо покращення облаштування та рівня комфортності підземного Open Space приміщення стала можливість розміщення кімнатних рослин та декорування простору «зеленими куточкам», оскільки зв'язок між підземним простором та природним середовищем є важливим чинником, що впливає на психологію людини. Дослідження впливу кімнатних рослин та штучних вікон у підземній лабораторії довели, що рослини позитивно впливають на підземне середовище, тоді як штучні вікна мають менш значний вплив.

Підземні інженерні споруди мають проблему вологості через своє унікальне середовище, особливо влітку, коли використовується природна вентиляція, що зумовлено підвищенням вологості зовнішнього повітря, яке легко конденсується після проходження через підвальне приміщення з меншою температурою. Як результат, додаткова припливно-витяжна вентиляція може не лише ефективно запобігти конденсації, а й забезпечити задовільні показники

якості повітря в підземних інженерних спорудах, знижуючи при цьому концентрації CO_2 та R_p .

Звичайний процес переносу вологи в підземних просторах відбувається, коли парціальний тиск водяної пари всередині просторів нижчий, аніж зовні. Водяна пара ззовні оболонки дифундує усередину. Організація додаткової зональної припливно-витяжної вентиляції може знижувати коливання вологи, пов'язані з погодою та сезонністю, а вологообмін усередині стін може допомогти частково пом'якшити коливання температурних показників. З іншого боку, надмірний повітрообмін може збільшити відносну вологість. Улітку вентиляція та повітрообмін можуть переносити чисту вологу в підземні простори. Зазвичай температура поверхні стіни нижча або близька до температури точки роси повітря на входах у підземні тунелі або простори. Конденсація відбувається під час процесів охолодження та осушення, коли зовнішнє повітря потрапляє у приміщення. Надмірна конденсація у підземних приміщеннях є неминучою у тривалий спекотний і вологий сезон. У такі періоди температура стіни падає нижче температури точки роси, повітря охолоджується, не змінюючи своєї питомої вологості, і конденсується до лінії насичення, призводячи до процесу, відомого як насичена конденсація.

Надмірна вологість у підземних приміщеннях є основною причиною збільшення кількості мікроорганізмів. Ріст грибків зазвичай відбувається за потрапляння води або надмірної конденсації усередині приміщень [6]. Дослідження впливу параметрів кондиціонування повітря (температури, відносної вологості, швидкості припливного повітря) та осадженого пилу на ріст мікробів у повітропроводах припливного повітря довели, що оптимізація температурно-вологісних показників є основним чинником, що впливає на ріст грибків та цвілі. Контроль вологості на поверхні стіни нижче 84 % здатен запобігти швидкому росту цвілі. Такого ефекту можна досягти за допомогою оптимізації систем припливно-витяжної вентиляції, використання рекуперативних осушувачів повітря та спеціальних ультрафіолетових ламп для дезінфекції поверхонь приміщення, мінімізування розповсюдження мікроорганізмів у повітряному просторі та одночасній нормалізації аеріонного складу повітря, що сприяє швидкості осадження пилу і є ефективним методом контролю забруднення повітря мікроорганізмами в підземних просторах.

Для забезпечення належної якості навколишнього середовища в підземних приміщеннях слід упроваджувати комплексні заходи

контролю, такі як підтримка підземних приміщень у сухому та чистому стані, дезінфекція підземних приміщень дезінфікуючими засобами, використання вологонепроникного покриття/гігроскопічного матеріалу, належне проектування, експлуатація й обслуговування систем вентиляції та кондиціонування повітря, використання ультрафіолетових ламп для дезінфекції повітря тощо. Проте сьогодні немає жодних законодавчих обмежень щодо концентрацій і вмісту бактерій та грибків, здатних переноситися повітрям у підземних робочих просторах, включаючи підземні інтегровані труби, які необхідні для реалізації безпечного середовища для працівників, що працюють у підземних приміщеннях відкритого планування.

Результати. Із метою забезпечення найбільш задовільних умов перебування людей у приміщеннях відкритого планування підземного розташування запропоновано систему управління показниками комфортного і безпечного середовища (рис. 1), яка включає блок

управління показниками комфортного і безпечного середовища на основі порівняння отриманих даних із датчиків рівнів і концентрацій CO_2 , R_n , датчиків температури робочої зони t_{up} °C, датчиків температури підлоги t_{down} °C, датчиків вмісту дрібнодисперсних частинок пилу респірабельної фракції $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , датчиків вологості RH , концентрації аероіонів, фотодатчиків присутності людей та заданих нормативних показників параметрів середовища через перетворювачі частоти (ПЧ формує сигнал управління приводам систем припливно-витяжної вентиляції та кондиціонування кожної температурної зони (зона 1 – прохолодна, зона 2 – тепла)) для досягнення задовільних температурних показників, визначених відповідно вимогами зони.

Водночас формування потоку повітрообміну забезпечує задовільні та безпечні концентрації радону шляхом інтенсифікації руху повітряних мас та розбавлення його концентрацій зовнішнім повітрям. При цьому комфортний рівень

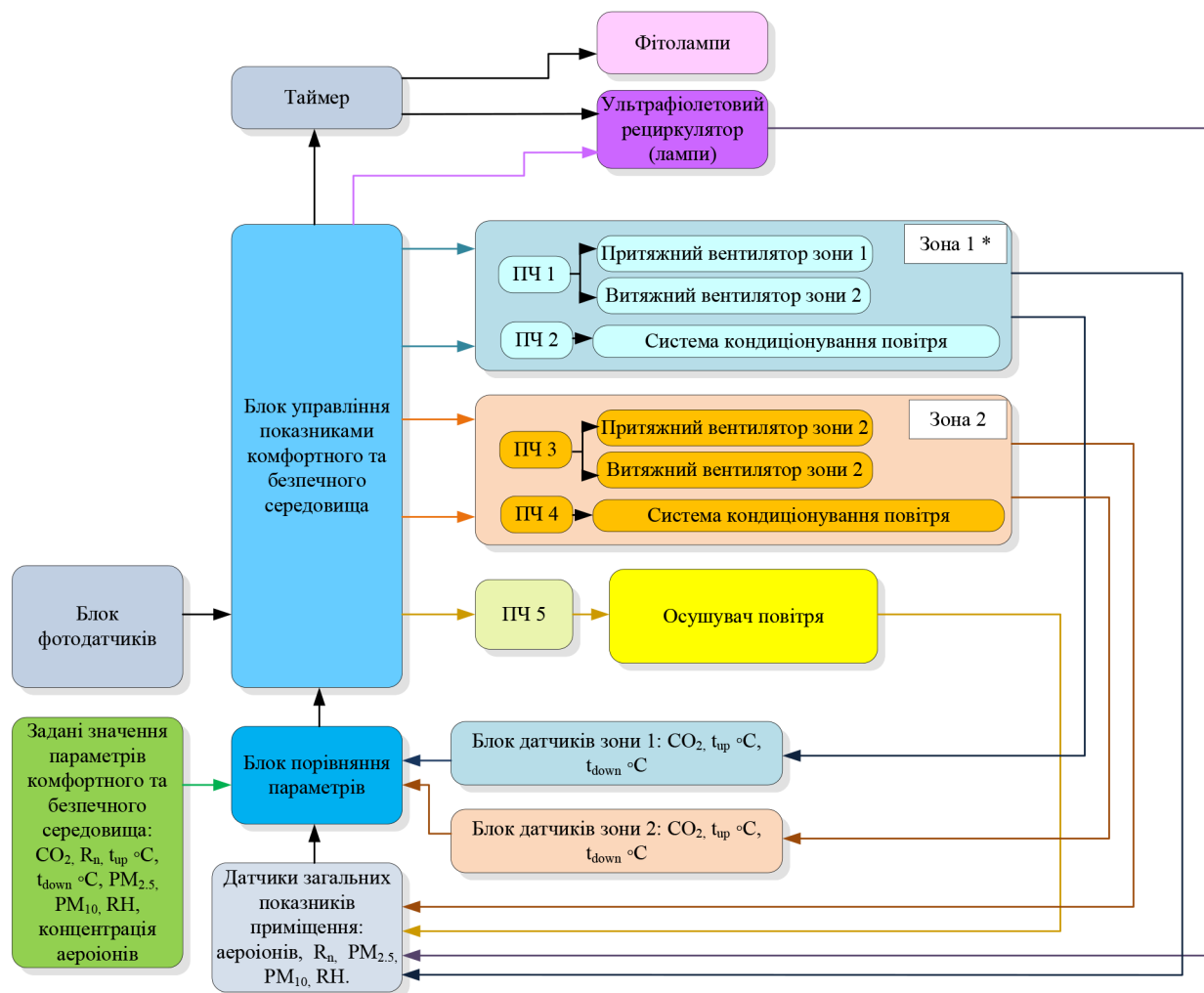


Рис. 1. Структурна схема системи управління показниками комфортного і безпечного середовища приміщень типу Open Space підземного розташування

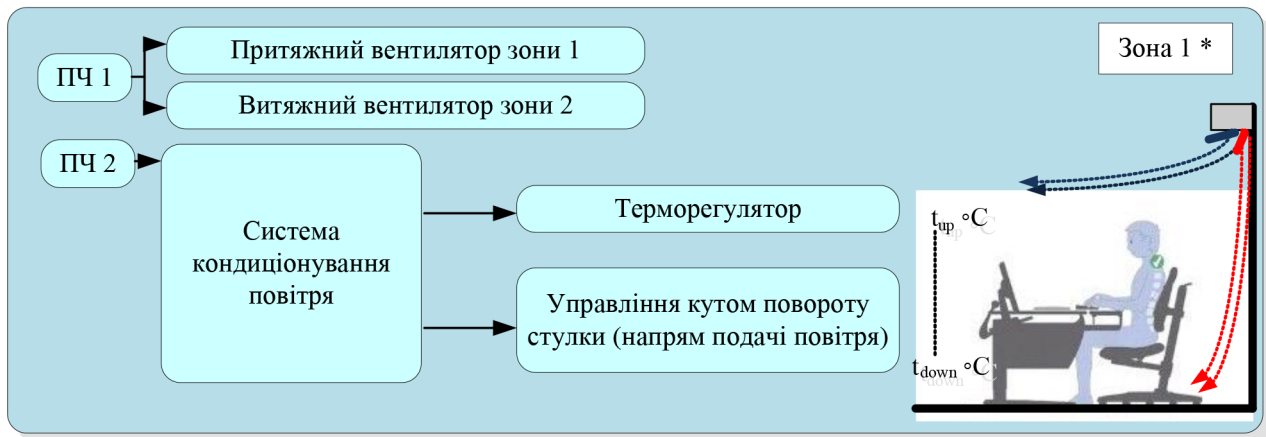


Рис. 2. Структурна схема блоку забезпечення показників комфортного і безпечного середовища температурної зони

температурної стратифікації (рис. 2) реалізується шляхом регулювання температури повітря (нагрів – охолодження) та керування кутом повороту ступки, яка формує напрям руху кондиціонованого повітря до приміщення. Регулювання вологості формується сигналом управління на осушувач повітря для зменшення показників відносної вологості повітряного простору приміщення до нормальних значень.

Ультрафіолетові рециркулятори і лампи для дезінфекції поверхонь приміщення, повітря, осадження пилу та нормалізації аероіонного складу повітря вмикаються блоком управління показниками комфортного і безпечного середовища у неробочий час за відсутності персоналу і керуються налаштуваннями таймеру. Додатково лампи можуть умикатися в робочий час за необхідності штучної іонізації приміщення та унормування аероіонного складу повітря підземного Open Space приміщення. Для підтримання фотосинтезу та життєдіяльності кімнатних рослин, які розміщено для підвищення рівня комфортності та зниження психологічного навантаження, вмикаються фітолампи у неробочий час (керується налаштуванням таймеру). Такий підхід зумовлений особливістю кольорового випромінювання таких ламп, що може заважати концентрації уваги та негативно впливати на загальний рівень освітленості в приміщенні.

Висновки. Складні проблеми організації та забезпечення показників комфортного і безпечного середовища приміщень типу Open Space підземного розташування зумовлені особливостями їх проєктування, розміщення і початкового

функціонального призначення. Поліпшення параметрів середовища підземного простору нерозривно пов'язане з контролем вологості, що впливає на здоров'я людини, ріст мікробів, теплообмін та роботу обладнання. Дослідження показників мікроклімату та рівня комфорту в приміщеннях підземних споруд із високою вологістю і зниженою температурою внутрішнього повітря, не пристосованих до довготривалого перебування людей, аналіз показників комфорту за результатами анкетування, фізіологічних та психологічних наслідків перебування у підземних приміщеннях дали змогу запропонувати систему управління унормованими показниками повітряного середовища та рівня комфорту для безпечної і продуктивної роботи людей у приміщеннях типу Open Space підземного розташування, яка ґрунтується на постійному моніторингу показників датчиків, порівнянні отриманих даних з унормованими показниками і формуванні керуючих сигналів для підтримання мікрокліматичних показників на основі комбінованих систем припливно-витяжної вентиляції з рекуперативними осушувачами повітря, можливістю температурного зонування простору з орієнтуванням на найбільше скупчення людей та можливістю корекції температурної стратифікації, регулювання концентрації радону та його прохідних, а також підтримки аероіонного та мікробіологічного складу повітря підземного простору для підвищення продуктивності роботи та безпеки довготривалого перебування людей у такого типу приміщеннях.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hong Yuan, Yuan He, Yuanyuan Wu. A comparative study on urban underground space planning system between China and Japan. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Volume 48. 101541. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101541>
2. Kim K., Kim J., Lee Y.G. et al. Revitalizing subterranean spaces: a comprehensive study on enhancing air quality in underground shopping malls for sustainable urban living. *Sustain Environ Res*. 2024. № 34. P. 25. <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00231-z>
3. Nicola Carslaw. A new detailed chemical model for indoor air pollution. *Atmospheric Environment*. 2007. Volume 41. Issue 6. P. 1164–1179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.09.038>
4. Yang B., Yao H., Wang F. A Review of Ventilation and Environmental Control of Underground Spaces. *Energies*. 2022. Volume 15. Issue 2. 409. <https://doi.org/10.3390/en15020409>
5. Yang X., Xiahou X., Li K., Li Q. Assessing Construction Safety Performance in Urban Underground Space Development Projects from a Resilience Enhancement Perspective. *Buildings*. 2025. № 15(5). P. 726. <https://doi.org/10.3390/buildings15050726>
6. Yap H. S., Roberts A. C., Luo C., et al. The importance of air quality for underground spaces: An international survey of public attitudes. *Indoor Air*. 2021. Volume 31. P. 2239–2251. <https://doi.org/10.1111/ina.12863>

REFERENCES:

1. Hong Yuan, Yuan He, Yuanyuan Wu. (2019). A comparative study on urban underground space planning system between China and Japan. *Sustainable Cities and Society*. 48. 101541. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101541>
2. Kim, K., Kim, J., Lee, Y.G. et al. (2024). Revitalizing subterranean spaces: a comprehensive study on enhancing air quality in underground shopping malls for sustainable urban living. *Sustain Environ Res*. 34. 25. <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00231-z>
3. Nicola Carslaw. (2007). A new detailed chemical model for indoor air pollution. *Atmospheric Environment*. 41(6) 1164–1179. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.09.038>
4. Yang, B., Yao, H., & Wang, F. (2022). A Review of Ventilation and Environmental Control of Underground Spaces. *Energies*, 15(2), 409. <https://doi.org/10.3390/en15020409>
5. Yang, X., Xiahou, X., Li, K., & Li, Q. (2025). Assessing Construction Safety Performance in Urban Underground Space Development Projects from a Resilience Enhancement Perspective. *Buildings*, 15(5), 726. <https://doi.org/10.3390/buildings15050726>
6. Yap, H. S., Roberts, A. C., Luo, C., et al. (2021). The importance of air quality for underground spaces: An international survey of public attitudes. *Indoor Air*. 31. 2239–2251. <https://doi.org/10.1111/ina.12863>