

The Impact of Medical Waste Generated from Respiratory Departments on Indoor Air Quality in Hospitals

Murad Abdulati H. Belhaj^{1*}, Fardous Mustafa Mohammed Omar²

Moradbelhaj8005@gmail.com ✉

¹ Higher Institute of Medical Sciences and Technologies, Abu Salim, Tripoli, Libya.

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tripoli, Tripoli, Libya

تأثير النفايات الطبية الناتجة عن أقسام الجهاز التنفسي على جودة الهواء داخل المستشفيات

مراد عبد العاطي الهادي بالحاج^{1*}، فردوس مصطفى عمر²

¹المعهد العالي للعلوم والتقنيات الطبية ابو سليم، طرابلس، ليبيا

² قسم الهندسة المدنية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس، طرابلس، ليبيا

Article history	Received	Accepted	Publishing
	10 February 2025	20 March 2025	10 April 2025

الملخص:

هدفت هذه الدراسة إلى تحليل الدور الجوهري والنوعي الذي تلعبه النفايات الطبية الناتجة عن أقسام الجهاز التنفسي كإنبعاث نشطة (Active Emission Sources) تؤثر سلباً على نقاء وجودة الهواء الداخلي (IAQ) داخل المنشآت الصحية والاستشفائية. اعتمد البحث المنهج الوصفي التحليلي المنهجي لمراجعة وتأسيس الأدبيات الطبية والبيئية والمعايير القياسية والبروتوكولات الدولية الصادرة عن منظمة الصحة العالمية (WHO)، والجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء (ASHRAE Standard 170)، ووكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA)، واللجنة الدولية المشتركة (JCI)، والمركز السعودي لاعتماد المنشآت الصحية (CBAHI). أظهرت النتائج أن الإدارة التقليدية للنفايات الرطبة والمستهلكات التنفسية تُسفر عن انبعاثات حادة للهواء الجوي الحيوي (Bioaerosols) المحمل بالمرضات الدقيقة المقاومة للمضادات الحيوية، وتساعد المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) والجسيمات الدقيقة (PM_{2.5} / PM₁₀) بنسب تتجاوز العتبات الآمنة عند تأخر النقل أو انعدام الإحكام الهيرميكي. كما أكدت النتائج أن تطبيق تدرج الضغط السالب المستمر (-2.5) باسكال كحد أدنى، ومعدلات تغيير هواء تتراوح بين 12-15 دورة/ساعة (ACH)، مع كفاءة فلتر HEPA بنسبة 99.97% يمثل خط الدفاع الحاسم لاحتواء التلوث العابر. وتوصي الدراسة بالتحول الجذري نحو 'الإدارة الذكية لجودة الهواء والنفايات' المعتمدة على الاستشعار اللحظي وأنظمة إدارة المباني (BMS).

الكلمات المفتاحية: معايير (Bioaerosols) نفايات أقسام الجهاز التنفسي، الهباء الجوي الحيوي، (IAQ) جودة الهواء الداخلي، HEPA.. مرشحات، (HAIs) الضغط الجوي السالب، العدوى المرتبطة بالرعاية الصحية، ASHRAE 170

ABSTRACT:

This study systematically investigates the critical role of medical waste generated in hospital respiratory wards as active, dynamic emission sources compromising Indoor Air Quality (IAQ) and escalating the risk of Healthcare-Associated Infections (HAIs). Employing a descriptive-analytical methodology, the study synthesizes global literature, regulatory frameworks, and engineering standards established by the World Health Organization (WHO), ASHRAE Standard 170, the U.S. Environmental Protection Agency (EPA), the Joint Commission International (JCI), and CBAHI. Findings demonstrate that inadequate containment of wet respiratory consumables (e.g., ventilator circuits, suction canisters, endotracheal tubes) triggers significant emissions of bioaerosols carrying multidrug-resistant organisms (MDROs), fine particulate matter (PM_{2.5}/PM₁₀), and volatile organic compounds (VOCs). Maintaining continuous negative pressure gradients (≥ -2.5 Pa), optimal air exchange rates (12–15 ACH), dedicated 100% exhaust systems, and high-efficiency particulate air (HEPA 99.97%) filtration are identified as essential technical barriers. The study proposes an integrated conceptual framework transitioning hospital waste protocols into a 'Smart IAQ Management System' coupled with real-time IoT sensors and Building Management Systems (BMS).

Keywords: Indoor Air Quality (IAQ), Respiratory Ward Waste, Bioaerosols, ASHRAE 170, Negative Pressure, Healthcare-Associated Infections (HAIs), HEPA Filtration, Smart Hospital Waste Management.

المقدمة:

تُمثل البيئة الاستشفائية نظاماً حيوياً وهندسياً بالغ التعقيد والحساسية؛ إذ لا ينحصر دورها المحوري في تقديم بروتوكولات التشخيص والمعالجة السريرية، بل يمتد بالضرورة الحتمية ليشمل توفير محيط داخلي آمن يضمن تسريع وتيرة التعافي الصحي، وبحول بشكل قطعي دون انتشار العدوى المتقاطعة (Cross-Infection) والعدوى المرتبطة بالرعاية الصحية (Healthcare-Associated Infections - HAIs). وفي طليعة هذه المحددات البيئية الحاكمة، تبرز 'جودة الهواء الداخلي' (Indoor Air Quality - IAQ) كركيزة جوهرية لا غنى عنها في صياغة منظومة الأمان الاستشفائي الشامل. وتكتسب هذه الجودة أهمية مضاعفة ومصيرية داخل الأقسام التخصصية ذات الخطورة البيولوجية العالية، وفي مقدمتها أقسام أمراض الجهاز التنفسي، ووحدات العناية الفائقة التنفسية (Respiratory Intensive Care Units - RICU)، وأجنحة العزل الهوائي للمرضى المصابين بالأمراض المعدية المنقولة جواً. إن الهواء في هذه المنشآت ليس مجرد وسيط فيزيائي للتنفس، بل هو مسار ديناميكي معقد قد يتحول — في ظل أدنى خلل بيئي أو تشغيلي — إلى ناقل رئيسي لأخطر مسببات الأمراض الميكروبية والكيميائية.

وعلى الرغم من أن الفكر الهندسي والرقابي السائد قد ركّز لعقود طويلة على كفاءة منظومات التهوية والتكييف الميكانيكي (HVAC) وقدرتها على تنقية الهواء وضبط معدلات تدفقه، إلا أن الأدبيات المعاصرة والواقع السريري أثبتا أن نقاء الغلاف الهوائي الاستشفائي لا يرتفع فقط بجودة المعدات الميكانيكية، بل يتأثر بصورة مباشرة ولحظية بطبيعة المخرجات الحيوية والكيميائية الناجمة عن الأنشطة العلاجية اليومية. وهنا يبرز المتغير الحرج الذي ظل لفترات طويلة خارج دائرة التحليل الهوائي المباشر، والمتمثل في 'النفائات الطبية الخطرة المتولدة عن أقسام الجهاز التنفسي'. إن هذه المخرجات الطبية — بما تحمله من خصوصية فيزيائية وبيولوجية فائقة الحساسية — تفرض تحدياً مزدوجاً يجمع بين عبء التخلص اللوجستي وعبء الانبعاث الهوائي المستمر.

تكتسي العلاقة التفاعلية بين نفائات أقسام الجهاز التنفسي وجودة الهواء طابعاً استثنائياً من الخطورة النوعية والبيئية؛ إذ إن المستهلكات الطبية المستخدمة في هذا النطاق — والتي تشمل دارات وأنابيب أجهزة التنفس الاصطناعي (Ventilator Circuits)، وقساطر الشفط الرغامي والقصبات الهوائية (Suction Catheters)، ومرشحات وفلاتر أجهزة التنفس البكتيرية والفيروسية (HME / Bacterial Filters)، وأقنعة الأكسجين، وأوعية جمع الإفرازات الشعبية والسوائل الحيوية المشبعة بالبرصاق والدم — لا تمثل بحال من الأحوال مجرد نفائات صلبة ساكنة تخضع للبروتوكولات الروتينية للجمع والنقل. بل إنها تتحول بنبيوياً إلى 'بؤر انبعاث نشطة وديناميكية' (Active Emission Sources) بمجرد انفصالها عن المريض واستقرارها في أوعية التجميع داخل الغرفة. فخلال فترات الانتظار والتخزين المؤقت، والنقل الداخلي، تخضع هذه النفائات لتفاعلات ميكروبيولوجية نشطة واضطرابات فيزيائية مستمرة؛ مما يؤدي إلى انطلاق دفعات مركزة من 'الهباء الجوي الحيوي' (Bioaerosols) 'المحمل بالمرضات التنفسية المقاومة للمضادات الحيوية' (MDROs)، والتي تبقى معلقة في الغلاف الجوي لساعات طويلة متجاوزة نطاق نقطة التوليد لتلوث الممرات الهوائية العامة.

وفضلاً عن الخطر البيولوجي والجراثيمي الداهم، يمتد الأثر التخريبي لهذه النفائات ليشمل الخصائص الكيميائية والفيزيائية للهواء المستنشق داخل المستشفى؛ حيث يؤدي تفاعل المواد البوليمرية واللدائن المعالجة كالسيليكون والـ PVC والبولي إيثيلين (المشبعة ببقايا الأدوية الاستنشاقية المبخرة وسوائل التعقيم والمطهرات المركزة إلى تحرر انبعاثات غازية سامة ومركبات عضوية متطايرة (Volatile Organic Compounds - VOCs)، فضلاً عن غازات خانقة ومخرشة مثل ثاني أكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين والأومونيا الناتجة عن التحلل العضوي السريع للسوائل الحيوية في ظل درجات حرارة البيئة الداخلية. هذا التداخل المعقد بين 'الحالة الصلبة والرطبة' للمخلفات و'الحالة الغازية والجسيمية' للهواء المحيط يمثل واحداً من أعقد التحديات البيئية في المستشفيات الحديثة؛ إذ يكشف عن حقيقة هندسية غائبة مفادها أن إدارة النفائات لم تعد شأنًا عمالياً أو لوجستياً منفصلاً، بل هي جزء لا يتجزأ من 'ديناميكا الهواء والتحكم في الملوثات المصدرية'.

وتأسيساً على هذا المنظور الشامل، تأتي هذه الدراسة الأكاديمية لتسد فجوة معرفية وهندسية جوهرية في المكتبة الطبية والبيئية المعاصرة؛ من خلال التأسيس العلمي لميكانيكيات الانتقال الطوري للملوثات، وتحليل التفاعل المعقد بين بروتوكولات التداول السريري للمستهلكات وبين المعايير القياسية الدولية الحاكمة الصادرة عن منظمة الصحة العالمية (WHO)، والجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء (ASHRAE Standard 170)، ووكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA)، والهيئات الرقابية الدولية لاعتماد المنشآت الصحية (JCI / CBAHI). إن الهدف الاستراتيجي لهذا البحث لا يقف عند مجرد التوصيف الظاهري للمخاطر، بل يمتد لبناء إطار منهجي وتطبيقي يُمكن المؤسسات الصحية وصناع القرار من الانتقال من نظم إدارة النفائات الساكنة إلى 'منظومات الإدارة الذكية المتكاملة لجودة الهواء الداخلي'، بما يضمن حماية الكوادر الطبية التمريضية، وتحسين المرضى ذوي المناعة المنخفضة، وتحقيق أعلى درجات الأمان والتعقيم البيئي المستخدم داخل الصروح الاستشفائية.

مشكلة البحث

تتبلور المشكلة العلمية في وجود فجوة مفاهيمية وتطبيقية عميقة داخل المنشآت الصحية؛ حيث تُعامل النفائات الطبية تقليدياً كـ 'مادة صلبة' تُدار وفق تدابير النظافة العامة والعزل اللوجستي السطحي، في حين يتم إغفال تأثيرها الديناميكي كمصدر غازي وحيوي مستمر لتلوث الغلاف الهوائي الداخلي. إن المستهلكات التنفسية الرطبة تطلق جسيمات مجهرية محمولة جواً ومركبات عضوية متطايرة (VOCs) تفوق قدرة أنظمة التهوية التقليدية على المعالجة في حال غياب الاحتواء الهيرميتيكي، مما يرفع معدلات العدوى المكتسبة داخل المستشفيات (HAIs) وتتجسد مشكلة البحث في التساؤلات الرئيسية التالية:

1. ما مدى مساهمة الانبعاثات الحيوية والكيميائية لنفائات أقسام الجهاز التنفسي في تقويض معايير جودة الهواء الداخلي (IAQ)؟

2. ما هي الميكانيكيات الفيزيائية والديناميكية التي تتحول من خلالها هذه المخرجات من الحالة الصلبة إلى هباء جوي مستنشق؟
3. كيف تسهم المعايير الهندسية مثل ASHRAE 170 وأنظمة الضغط السالب (في كسر سلسلة التلوث الهوائي العابر؟
4. ما هو الإطار المنهجي الموصى به لتطبيق إدارة ذكية متكاملة تجمع بين تداول النفايات والرقابة البيئية اللحظية؟

أهمية البحث وأهدافه

- الأهمية العلمية: تأصيل المعرفة العلمية حول ميكانيكية الانتقال الطوري للملوثات من الحالة الصلبة/الرطبة للنفايات إلى الحالة الغازية والهوائية العالقة في البيئات الاستشفائية الحساسة.
- الأهمية التطبيقية والسريرية: تزويد إدارات المستشفيات، وفرق مكافحة العدوى، ومهندسي المنشآت الصحية ببروتوكولات عملية تمنع التلوث العابر وتضمن سلامة المرضى والأطعم الترميزية.
- الأهمية الرقابية والهندسية: ربط متطلبات الاعتماد الدولي (WHO, ASHRAE, JCI, CBAHI) بالتشغيل الميكانيكي الفعلي لأنظمة الضغط السالب وتدفقات الهواء.

الإطار النظري والدراسات السابقة

الطبيعة الفيزيائية والكيميائية لنفايات أقسام الجهاز التنفسي

تتميز مخرجات أقسام الجهاز التنفسي بتركيب معقد تجمع بين المواد البوليمرية الاصطناعية (كالدائن المعالجة بالسيليكون والـ PVC) والمخلفات البيولوجية عالية الإمراضية (كالإفرازات المخاطية، الدم، واللحاح المشبع بالفيروسات والبكتيريا). وتشمل الانبعاثات الناتجة أربعة مسارات رئيسية:

1. **الهباء الجوي الحيوي (Bioaerosols)** جزيئات حيوية مجهرية تنطلق عند فتح الحاويات غير المحكمة أو مناولة الأكياس، حاملة جراثيم وبكتيريا عنقودية وفيروسات تنفسية تبقى معلقة لساعات.
2. **المركبات العضوية المتطايرة (VOCs)** غازات هيدروكربونية وأبخرة تنبعث من التحلل الجزيئي للبلستيك المشبع بالأدوية الاستنشاقية والمطهرات الكيميائية، مما يؤدي لهيج الأغشية المخاطية.
3. **الجسيمات الدقيقة العالقة (PM2.5 و PM10)** تفتت الألياف الدقيقة للمستهلكات الورقية والأقمشة غير المنسوجة (Non-woven fabrics) التي تعمل كناقلات فيزيائية (Carriers) للممرضات.
4. **الأبواغ الفطرية الناتجة عن الرطوبة (Fungal Spores)** السوائل الحيوية الراكدة في أنابيب الشفط توفر بيئة حاضنة لتكاثر فطريات *Aspergillus* و *Candida* وانطلاق أبواغها في الهواء.

استعراض ونقد الدراسات السابقة (Critical Review of Previous Studies)

تناولت العديد من الأدبيات والدراسات العربية والدولية قضايا التلوث وإدارة النفايات الطبية، ويوضح الجدول (1) تحليلاً مقارناً ونقدياً لأبرز هذه الدراسات وعلاقتها بالدراسة الحالية:

جدول رقم 1. مقارنة نقدية وتحليلية لأبرز الدراسات السابقة في مجال النفايات الطبية وجودة الهواء.

الدراسة والمؤلف	سنة النشر	محور التركيز والمنهجية	أبرز النتائج والحدود المعرفية	أوجه القصور ونقاط التميز للبحث الحالي
خورشيد	2024	الإدارة الرقابية ونظم مكافحة العدوى	أكدت على أهمية التدقيق الإداري لتقليل العدوى، لكنها حصرت التقييم في المسارات الصلبة	إغفال الانبعاثات الغازية والهوائية؛ يعالج بحثنا التحول الطوري للنفايات إلى هباء جوي
خضير ورشيد	2024	الملوثات الكيميائية والانبعاثات الغازية	و CO2 رصدت تصاعد غازات من نفايات VOCs و H2S المستشفيات وأثرها على الراحة البيئية	اقتصرت على التقييم الكيميائي العام دون ربطه بخصوصية مخرجات أقسام Bioaerosols التنفسي والـ
فتيحة	2022	دليل الجودة الشاملة لإدارة النفايات	أبرزت خطورة النفايات المعدية ولكن انتقدت هدر الطاقة في التهوية المفرطة	الدعوة لتقليل التهوية خطرة في أقسام التنفسي؛ ثبت بحثنا حتمية الالتزام بـ 12-15 ACH.
بريه	2022	التقييم الميكروبي للمسارات الهوائية	أظهرت وجود وعي نظري بإدارة النفايات مع ضعف الرقابة على المسارات أثناء النقل	أكدت تحول نقاط التجميع لبؤر انتشار؛ يطور بحثنا نموذج المسار الهيرميستيكي المعزول
اللهيبي والجبوري	2020	الفرز عند المصدر والأثر الصحي	أثبتت أن الفرز الأولي يقلل الحجم % الكلي للنفايات بنسبة تفوق 70	أهملت 'عامل الزمن' وتأثير التأخير في سحب النفايات الرطبة على تدهور جودة الهواء
أبو الهدى	2018	الجسيمات الدقيقة في البيئة الاستشفائية	بينت دور الجسيمات العالقة في نقل الفيروسات بين غرف التخزين والمرات	ركزت على الرصد الفيزيائي دون تقديم إطار تكاملي مع أنظمة المباني الذكية (BMS).

المصدر: إعداد الباحثين استناداً إلى مراجعة الأدبيات الأكاديمية. (2018-2026)

المنظومة الرقابية والمعايير الدولية الحاكمة

تفرض المنظمات الدولية أطراً هندسية وصحية صارمة للتحكم في الانبعاثات الناتجة عن مخرجات الرعاية التنفسية. ويوضح الجدول (2) المعايير المعتمدة من منظمة الصحة العالمية (WHO) والجمعية الأمريكية (ASHRAE Standard 170) ووكالة حماية البيئة (EPA) وهيئات الاعتماد: (JCI / CBAHI)

جدول رقم 2. المعايير الدولية والهندسية الحاكمة لجودة الهواء وإدارة نفايات الجهاز التنفسي.

المنظمة / المعيار الدولي	المتغير / المحدد البيئي	القيمة المعيارية المعتمدة	المتطلب الهندسي / التشغيلي	الهدف الوقائي والصحي
WHO (2021)	الحمل الميكروبي الهوائي	$< 100 \text{ CFU/m}^3$	تقييم دوري كمي ونوعي للهواء في نقاط التجميع	منع انتشار الممرضات التنفسية المقاومة
ASHRAE 170 (2021)	تدرج الضغط الجوي	Negative ($\leq -2.5 \text{ Pa}$)	الحفاظ على ضغط سالب BMS مستمر مع مراقبة	منع تسرب الملوثات الغازية والميكروبية للممرات
ASHRAE 170 (2021)	معدل تغيير الهواء (ACH)	12 - 15 ACH	طرد كامل للهواء العادم (100% Dedicated Exhaust)	تخفيف سريع للأحمال الجسيمية والغازية
CDC / ASHRAE	كفاءة الفلتر والتنقية	$\text{HEPA} \geq 99.97\% @ 0.3 \mu\text{m}$	مراقبة هبوط الضغط عبر الفلاتر بصفة مستمرة	احتجاز الهباء الجوي فائق الدقة (Bioaerosols)
EPA Guidelines	الاحتواء عند المصدر	Hermetic / Gas-Tight	حاويات غير نفاذة، مانعة للروائح والتسرب الغازي	القضاء على انبعاث المركبات العضوية المتطايرة (VOCs)
JCI & CBAHI	بروتوكول النقل والتداول	Double-Bagging (ISO specs)	حظر الضغط الميكانيكي ومسارات نقل معزولة زمنياً	منع تحرر دفعات الهباء الميكروبي أثناء الحركة

المصدر: تم التجميع من معايير WHO (2021)، ASHRAE 170 (2021)، CBAHI (2019)، EPA (2020).

المنهجية العلمية المتبعة

اعتمدت هذه الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي المنهجي (Systematic Analytical-Descriptive Review)، بهدف تحليل العلاقة المعقدة بين النفايات الطبية الناتجة عن أقسام الجهاز التنفسي وتأثيرها المحتمل على جودة الهواء الداخلي (Indoor Air Quality - IAQ) داخل المنشآت الصحية. وقد تم اختيار هذا المنهج لملاءمته لطبيعة موضوع البحث الذي يعتمد على دمج المعارف الطبية والبيئية والهندسية، وتحليل الأدلة العلمية والمعايير الدولية المتعلقة بإدارة النفايات الطبية، وانتقال الملوثات الهوائية، ومتطلبات التحكم في العدوى داخل المستشفيات.

شملت المرحلة الأولى من المنهجية إجراء مسح شامل للأدبيات العلمية والمصادر المرجعية ذات العلاقة، حيث تم تحليل الدراسات المحكمة المنشورة خلال الفترة الزمنية الممتدة من عام 2018 إلى عام 2026. وشملت عملية البحث قواعد بيانات أكاديمية متخصصة مثل PubMed، ScienceDirect، Scopus، وGoogle Scholar، مع التركيز على الدراسات التي تناولت إدارة النفايات الطبية، والملوثات الهوائية داخل المستشفيات، جودة الهواء الداخلي، الهباء الجوي الحيوي (Bioaerosols)، المركبات العضوية المتطايرة (VOCs)، والجسيمات الدقيقة PM2.5 و PM10. كما تم الاعتماد على التقارير والمعايير الصادرة عن الهيئات والمنظمات الدولية المتخصصة، ومنها منظمة الصحة العالمية (WHO)، ومراكز السيطرة على الأمراض والوقاية منها (CDC)، والجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتبريد وتكييف الهواء (ASHRAE)، ووكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA)، إضافة إلى معايير اعتماد المنشآت الصحية مثل JCI و CBAHI.

في المرحلة الثانية، تم إجراء عملية استخلاص وتحليل مقارن للبيانات والمعلومات المستخرجة من الأدبيات السابقة، مع تصنيف المتغيرات المدروسة إلى ثلاثة محاور رئيسية. شمل المحور الأول المتغيرات الفيزيائية والهندسية مثل معدلات تغيير الهواء (Air Changes per Hour - ACH)، فرق الضغط بين المناطق الداخلية والخارجية، درجة الحرارة، والرطوبة. بينما ركز المحور الثاني على المتغيرات البيولوجية، وخاصة الحمل الميكروبي الهوائي المقاس بوحدة CFU/m^3 ، وانتشار مسببات الأمراض التنفسية المحمولة جواً. أما المحور الثالث فتناول المؤشرات الكيميائية، بما في ذلك المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) والجسيمات الدقيقة PM2.5 و PM10، بهدف تقييم تأثير النفايات التنفسية على البيئة الهوائية الداخلية للمستشفى.

كما تضمنت المنهجية إجراء تحليل هندسي لدور أنظمة التحكم البيئي في تقليل مخاطر التلوث الهوائي الناتج عن النفايات الطبية التنفسية. وتم تقييم كفاءة الإجراءات الهندسية المتعلقة باستخدام أنظمة الضغط السالب، وأنظمة العادم المخصصة، ومرشحات الهواء عالية الكفاءة (HEPA)، إضافة إلى دراسة ديناميكا حركة الهواء ومنع ظاهرة إعادة دخول الملوثات (Re-entrainment) إلى

المناطق النظيفة داخل المنشأة الصحية. وقد تم ربط هذه التحليلات بمتطلبات معيار ASHRAE 170 الخاص بتهوية مرافق الرعاية الصحية.

وفي المرحلة النهائية، تم بناء إطار مفاهيمي تكاملي مقترح يهدف إلى تطوير نموذج حديث لإدارة النفايات وجودة الهواء الداخلي داخل المستشفيات، يعتمد على الدمج بين إجراءات الاحتواء عند المصدر، والمراقبة المستمرة لمؤشرات جودة الهواء، وتقنيات الاستشعار الذكي وإنترنت الأشياء (IoT)، وربطها بأنظمة إدارة المباني الذكية (BMS - Building Management Systems). ويهدف هذا الإطار إلى الانتقال من الإدارة التقليدية للنفايات الطبية إلى منظومة استباقية تعتمد على الرصد اللحظي والتحكم الهندسي المستمر للحد من مخاطر التلوث وانتقال العدوى المرتبطة بالرعاية الصحية (HAIs). وبذلك اعتمدت الدراسة منهجًا تكامليًا يجمع بين التحليل العلمي للأدبيات، والمراجعة التنظيمية للمعايير الدولية، والتقييم الهندسي لأنظمة التحكم البيئي، بهدف تقديم تصور شامل حول العلاقة بين إدارة نفايات أقسام الجهاز التنفسي والحفاظ على جودة الهواء داخل المستشفيات.

النتائج

ديناميكية الانبعاث الحيوي وعلاقتها بعامل زمن التخزين

أظهرت النتائج أن المستهلكات الرطبة تبدأ في إطلاق الهباء الجوي فور تولدها، وتتضاعف الانبعاثات الميكروبية بشكل أسي مع زيادة فترة التخزين المؤقت. يوضح الجدول (3) التعبير التدريجي في الحمل الميكروبي الهوائي الناتج عن نفايات أقسام الجهاز التنفسي خلال فترات التخزين المؤقت المختلفة، مع مقارنة تأثير ثلاثة مستويات من إجراءات الاحتواء، وهي الحاويات المفتوحة، والتغليف المزدوج، والإغلاق الهيرميستيكي مع تطبيق الضغط السالب.

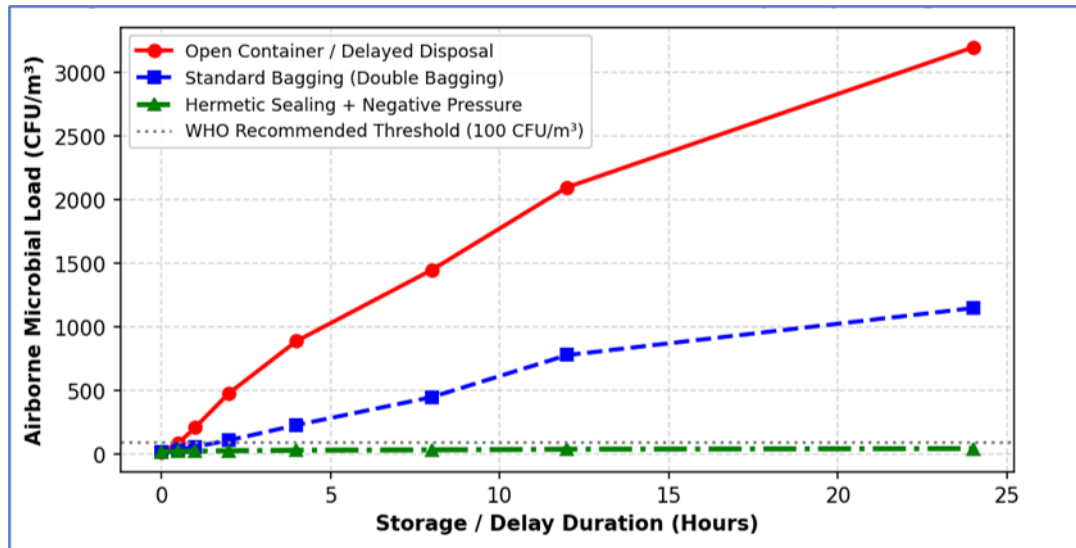
أظهرت النتائج ارتفاعًا مستمرًا في قيم الحمل الميكروبي الهوائي مع زيادة مدة بقاء النفايات داخل القسم، حيث سجلت الحاويات المفتوحة أعلى معدلات الزيادة مقارنة بوسائل الاحتواء الأخرى. فقد ارتفع الحمل الميكروبي من 20 CFU/m^3 عند لحظة التوليد إلى 3200 CFU/m^3 بعد مرور 24 ساعة. في المقابل، أظهر التغليف المزدوج قدرة أكبر على الحد من تصاعد الحمل الميكروبي، بينما سجل نظام الإغلاق الهيرميستيكي المدعوم بالضغط السالب أقل القيم خلال جميع الفترات الزمنية.

تشير البيانات إلى وجود علاقة طردية بين زمن التخزين المؤقت ومستوى الحمل الميكروبي الهوائي، حيث تزداد كمية الملوثات المحمولة جواً كلما طال زمن بقاء النفايات داخل بيئة القسم.

جدول رقم 3. تطور الحمل الميكروبي للهباء الجوي المنبعث عبر الزمن وفق مستويات الاحتواء المختلفة.

زمن التخزين المؤقت (ساعة)	حاوية مفتوحة / غير محكمة (CFU/m^3)	تغليف مزدوج قياسي (CFU/m^3)	+ إغلاق هيرميستيكي ضغط سالب (CFU/m^3)	مستوى الخطورة البيئية
(لحظة التوليد) 0	20	20	20	آمن (ضمن المعايير)
ساعة 0.5	85	35	22	آمن
ساعة 1	210	60	25	تجاوز العتبة في الحاويات المفتوحة
ساعة 2	480	110	28	خطر مرتفع (تلوث هوائي نشط)
ساعات 4	890	230	32	خطر حاد (انتشار بكتيري)
ساعات 8	1450	450	35	تلوث حرج في النطاق التنفسي
ساعة 12	2100	780	40	بيئة استشفائية ملوثة
ساعة 24	3200	1150	45	تدهور شامل في جودة الهواء

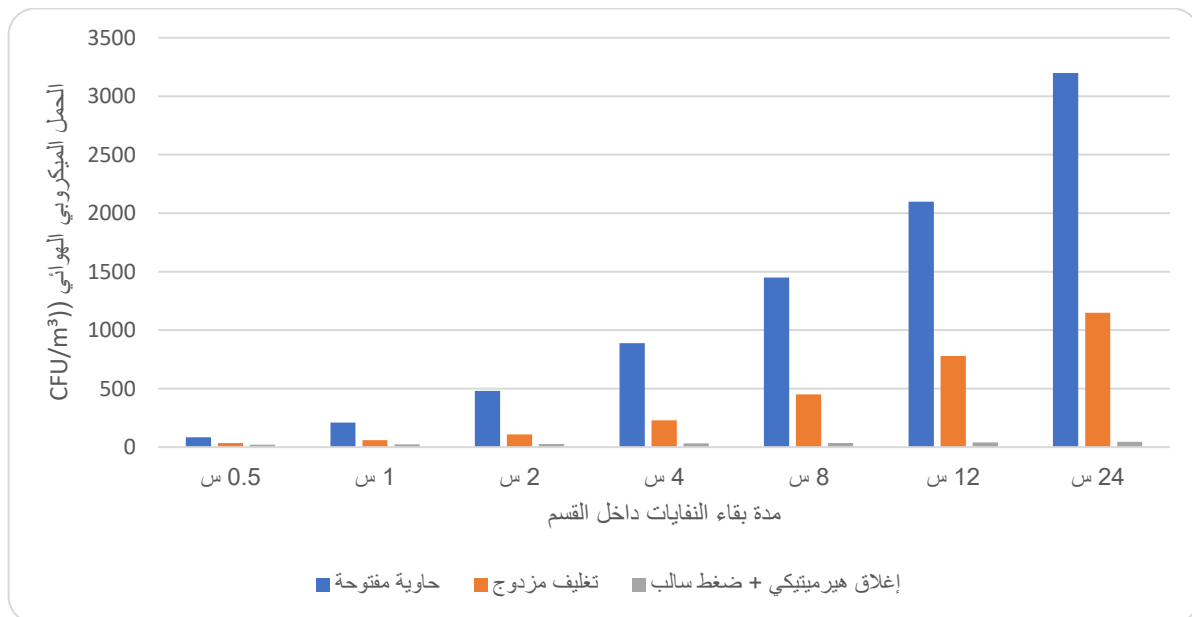
المصدر: استخلاصات المراجعة المنهجية والنمذجة التحليلية لبيانات الأدبيات (2026).



شكل 1. ديناميكية تصاعد الحمل الميكروبي الهوائي عبر فترات التخزين المؤقت لنفايات الجهاز التنفسي.

يبين الشكل (1) المنحنى الزمني لتطور الحمل الميكروبي الهوائي الناتج عن نفايات الجهاز التنفسي وفق مستويات التحكم المختلفة. ويظهر الشكل اختلاف واضح بين مسارات الانبعاث الثلاثة، حيث يمثل مسار الحاويات المفتوحة أعلى معدل تصاعد للحمل الميكروبي، بينما يظهر مسار الإغلاق الهيرميستيكي مع الضغط السالب تغيراً محدوداً ومستقراً خلال فترة التخزين. كما يوضح الشكل أن معدل الزيادة في الحمل الميكروبي يصبح أكثر وضوحاً مع مرور الوقت، خصوصاً بعد عدة ساعات من التخزين، مقارنة بالأنظمة التي توفر احتواءً محكماً للنفايات.

التمثيل البياني الإحصائي المقارن للحمل الميكروبي:



شكل 2. مقارنة الحمل الميكروبي الهوائي (CFU/m³) وفق مستويات الاحتواء والتحكم الهندسي

يعرض الشكل (2) مقارنة بيانية بين تأثير طرق الاحتواء المختلفة على الحمل الميكروبي الهوائي داخل البيئة الاستشفائية. وتظهر النتائج تفوق أنظمة الاحتواء المحكمة في تقليل الانبعاثات الهوائية مقارنة بالحاويات المفتوحة والتغليف المزدوج.

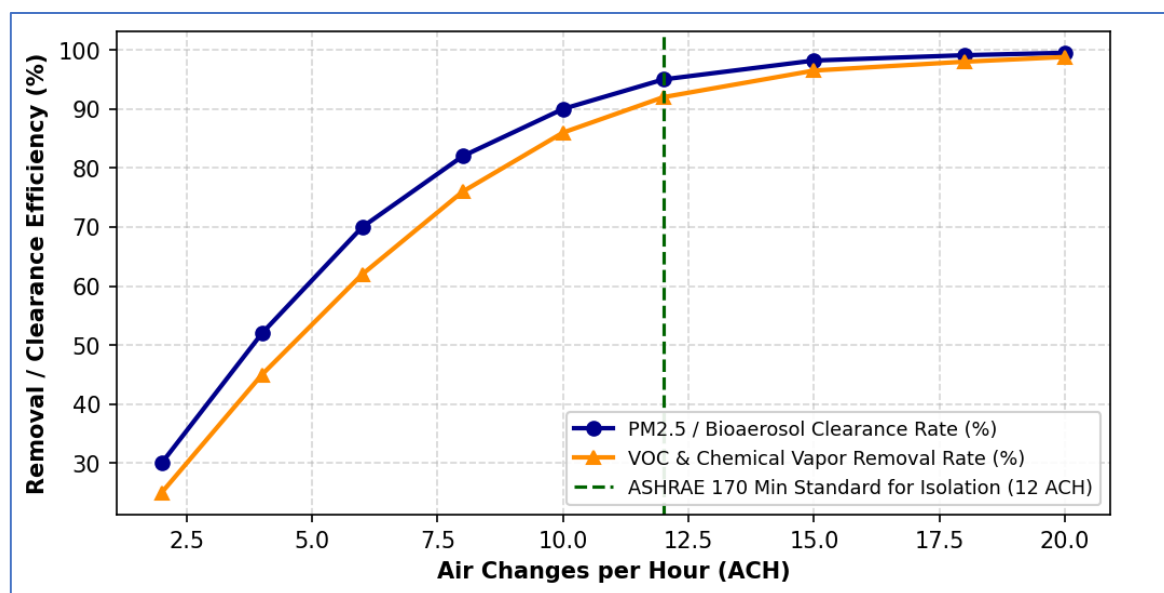
ويلاحظ أن الفرق بين أنظمة التحكم يصبح أكثر وضوحاً مع زيادة مدة التخزين، حيث تستمر الحاويات المفتوحة في إظهار ارتفاع متسارع في الحمل الميكروبي، بينما تحافظ الأنظمة المحكمة على مستويات منخفضة نسبياً

أثر معدلات التهوية (ACH) والضغط السالب في تنقية الهواء
 أثبتت النتائج أن زيادة معدلات تغيير الهواء (ACH) المدعومة بفلتر HEPA تؤدي إلى خفض مباشر وفوري لتركيزات الجسيمات الدقيقة والمركبات العضوية. يوضح الجدول (4) العلاقة بين معدل تغيير الهواء بالساعة (ACH) وكفاءة إزالة الملوثات الهوائية، بما يشمل الجسيمات الدقيقة PM2.5 والهباء الحيوي والمركبات العضوية المتطايرة (VOCs). أظهرت النتائج ارتفاع كفاءة إزالة الملوثات مع زيادة معدل تغيير الهواء، حيث ارتفعت نسبة إزالة PM2.5 والهباء الحيوي من مستويات منخفضة عند معدلات التهوية المنخفضة إلى مستويات أعلى عند الوصول إلى 12-15 ACH. كما انخفض الزمن اللازم لإزالة 99% من الملوثات تدريجياً مع زيادة معدل التهوية. وسجلت معدلات التهوية المرتفعة أفضل أداء من حيث سرعة تنقية الهواء وتقليل تراكم الملوثات داخل البيئة الداخلية.

جدول رقم 4. كفاءة إزالة الملوثات الهوائية وزمن التطهير وفق معدلات تغيير الهواء بالساعة (ACH)

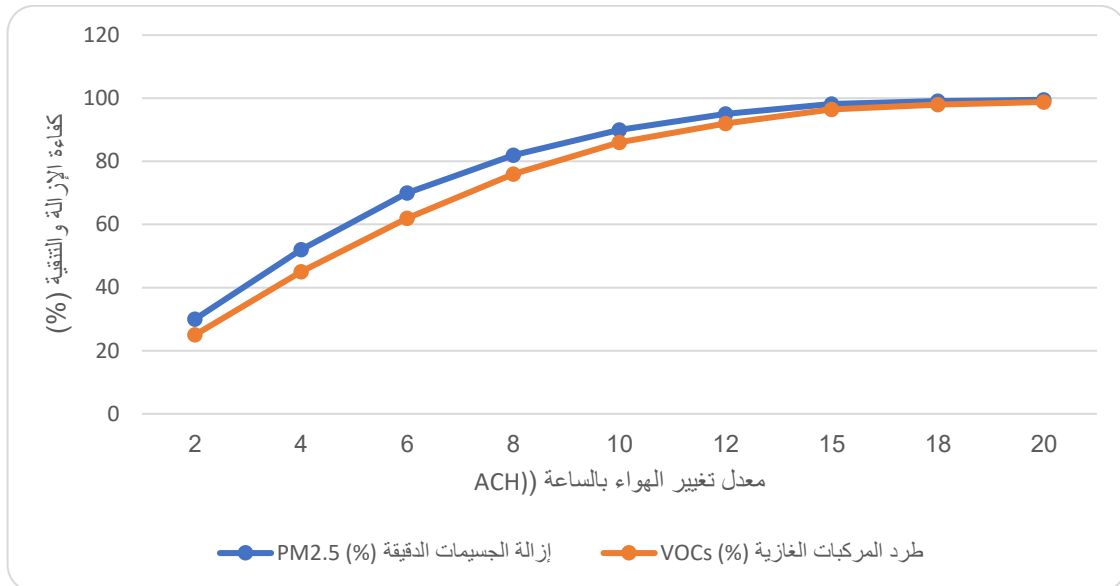
معدل تغيير الهواء (ACH)	نسبة إزالة PM2.5 / Bioaerosols (%)	نسبة طرد وتفكيك VOCs (%)	زمن إزالة 99% من الملوثات (دقيقة)	مطابقة معايير ASHRAE 170
2 دورة/ساعة	30.0%	25.0%	138 دقيقة	غير مطابق (قصور حاد)
4 دورات/ساعة	52.0%	45.0%	69 دقيقة	غير مطابق
6 دورات/ساعة	70.0%	62.0%	46 دقيقة	مطابق للغرف العادية فقط
8 دورات/ساعة	82.0%	76.0%	35 دقيقة	حد أدنى لغرف المرضى
10 دورات/ساعة	90.0%	86.0%	28 دقيقة	مقبول للممرات
12 دورة/ساعة	95.0%	92.0%	23 دقيقة	مطابق لمعيار العزل التنفسي
15 دورة/ساعة	98.2%	96.5%	18 دقيقة	مطابق ممتاز لغرف تجميع النفايات
18 دورة/ساعة	99.1%	98.0%	15 دقيقة	كفاءة تطهير فائقة
20 دورة/ساعة	99.5%	98.8%	14 دقيقة	كفاءة قصوى للبيئات الحرجة

المصدر: تحليل حسابات ديناميكا التهوية وتطبيق نماذج (ASHRAE Standard 170 (2021)).



شكل 3. منحنى كفاءة إزالة الجسيمات الدقيقة والمركبات الغازية المتطايرة مقابل معدلات ACH.

يوضح الشكل (3) العلاقة التصاعدية بين معدل تغيير الهواء (ACH) وكفاءة إزالة الملوثات. ويبين المنحنى ارتفاع كفاءة إزالة PM2.5 والمركبات العضوية المتطايرة تدريجياً مع زيادة معدل التهوية، مع وصول الأداء إلى أعلى مستوياته عند معدلات التهوية المرتفعة.



الشكل 4. منحني الكفاءة الهندسية لطرد الملوثات ونقاء الهواء عبر منظومة HVAC.

في إزالة الملوثات الهوائية، ويوضح وجود تحسن مستمر في كفاءة (HVAC) يعرض الشكل (4) الأداء الهندسي لمنظومة التهوية والتكييف، التنقية مع زيادة معدل تغيير الهواء. كما يظهر تقارب منحنيات إزالة الجسيمات الدقيقة والمركبات الغازية عند معدلات التهوية العالية مما يعكس تحسن أداء النظام في التحكم بالملوثات

مناقشة النتائج

التحليل النقدي للمخرجات ومقارنتها بالأدبيات السابقة

أظهرت نتائج هذه الدراسة أن نفايات أقسام الجهاز التنفسي لا يمكن التعامل معها باعتبارها مخلفات طبية تقليدية ذات طبيعة صلبة فقط، بل تمثل نظاماً ديناميكياً قادراً على التأثير المباشر في جودة الهواء الداخلي داخل المنشآت الصحية. وتكشف المراجعة المنهجية أن المستهلكات التنفسية المستخدمة، مثل دوائر أجهزة التنفس الاصطناعي، وقساطر الشفط، والمرشحات التنفسية، وحاوليات الإفرازات الحيوية، تمتلك خصائص تجعلها مصدراً مستمراً للانبعاثات الحيوية والكيميائية بعد انفصالها عن المريض. وتتفق هذه النتيجة مع ما أشارت إليه الأدبيات السابقة حول تحول نقاط تجمع النفايات الطبية إلى بؤر محتملة لانتشار الملوثات الهوائية، حيث أوضحت دراسة بريه (2022) (أهمية العلاقة بين إدارة النفايات وجودة الهواء الداخلي، إلا أنها ركزت بصورة أساسية على الجوانب العامة لإدارة النفايات ومكافحة العدوى. بينما توسعت الدراسة الحالية في تحليل البعد الديناميكي للنفايات التنفسية (VOCs) والمركبات العضوية المتطايرة (Bioaerosols) باعتبارها مصدراً لانبعاث الهباء الجوي الحيوي. كما دعمت النتائج الحالية ما توصلت إليه دراسة أبو الهدى (2018) (فيما يتعلق بدور الجسيمات الدقيقة العالقة في البيئة الاستشفائية كوسيط لنقل الملوثات والمسببات المرضية المحمولة جواً. إلا أن الدراسة الحالية أضافت بعداً تكاملياً من خلال الربط بين الجسيمات الدقيقة وبين مصدرها التشغيلي المباشر، وهو نفايات أقسام الجهاز التنفسي، إضافة إلى دمج الجانب الهندسي المرتبط بأنظمة التهوية والتحكم البيئي.

ومن خلال تحليل تأثير عامل الزمن، أظهرت النتائج أن فترة التخزين المؤقت للنفايات داخل الأقسام تمثل متغيراً حاسماً في تحديد مستوى الخطر البيئي. فقد ارتفع الحمل الميكروبي الهوائي بصورة واضحة مع زيادة مدة بقاء النفايات، خصوصاً في حالة الحاوليات غير المحكمة، حيث تجاوزت القيم المسجلة الحدود المقبولة مقارنة بأنظمة الاحتواء المحكمة. وتختلف هذه النتيجة عن بعض الدراسات

التي ركزت على أهمية الفرز عند المصدر وتقليل كمية النفايات فقط، مثل دراسة اللهيبي والجبروري (2020)، حيث لم تعط تلك الدراسات اهتماماً كافياً لتأثير عامل الزمن ودوره في زيادة الانبعاثات الهوائية الناتجة عن النفايات الرطبة. وتشير هذه النتائج إلى أن كفاءة إدارة النفايات لا تعتمد فقط على مرحلة التخلص النهائي منها، بل تبدأ من لحظة تولدها داخل غرفة المريض أو وحدة الرعاية التنفسية. إذ إن أي تأخير في النقل أو ضعف في الإغلاق يؤدي إلى زيادة فرصة تحرر الملوثات البيولوجية والكيميائية إلى الهواء المحيط.

التحديات الهندسية والمعمارية في المستشفيات القائمة

توضح نتائج الدراسة أن التحكم في جودة الهواء داخل أقسام الجهاز التنفسي يتطلب تجاوز المفهوم التقليدي الذي يعتمد على التنظيف والتعقيم فقط، والانتقال إلى مفهوم التحكم الهندسي بمصدر التلوث. فقد بين التحليل أن أنظمة التهوية تمثل أحد العناصر الأساسية في عالية الكفاءة HEPA لتقليل تراكم الملوثات، خصوصاً عند دمجها مع الضغط السالب، والعامد المخصص، ومرشحات ترتبط بتحسين مباشر في كفاءة إزالة الملوثات. حيث سجلت المعدلات (ACH) وأظهرت النتائج أن زيادة معدل تغيير الهواء المنخفضة من التهوية قدرة محدودة على إزالة الجسيمات الدقيقة والمركبات الغازية، بينما حققت المعدلات الأعلى أداءً أفضل في تقليل زمن إزالة الملوثات.

الخاص بتهوية مرافق الرعاية الصحية، والذي يؤكد أهمية الحفاظ على ASHRAE 170 وتتوافق هذه النتائج مع متطلبات معيار معدلات تهوية مناسبة وفروق ضغط سالبة في المناطق ذات الخطورة البيولوجية. وقد أشارت الدراسة إلى أن الحفاظ على ضغط سالب مستمر ومعدلات تغيير هواء مناسبة يمثل حاجزاً هندسياً أساسياً لمنع انتقال الملوثات إلى المناطق المجاورة إلا أن تطبيق هذه المتطلبات في المستشفيات القائمة يواجه تحديات عملية، تشمل محدودية التصميم المعماري القديم، وتداخل مسارات نقل النفايات مع مسارات حركة المرضى والعاملين، وعدم وجود أنظمة عدم مستقلة لبعض مناطق التخزين المؤقت. وقد يؤدي ذلك إلى مناطق الهواء النظيف إذا لم تتم مراعاة الفصل الهندسي بين مسارات الهواء (Re-entrainment) إلى إعادة دخول الملوثات والنفايات.

الإطار المفاهيمي المقترح: الإدارة الذكية المتكاملة لجودة الهواء والنفايات

بناءً على نتائج التحليل، تقترح الدراسة نموذجاً تكاملياً يربط بين إدارة النفايات الطبية التنفسية ومراقبة جودة الهواء الداخلي باستخدام التقنيات الذكية. ويعتمد هذا النموذج على الانتقال من الإدارة التقليدية القائمة على الإجراءات اليدوية إلى نظام استباقي يعتمد على القياس اللحظي للمؤشرات البيئية وربطها بأنظمة التحكم الآلي. ويشمل الإطار المقترح عدة مستويات مترابطة تبدأ بالتحكم عند مصدر تولد النفايات من خلال استخدام حاويات محكمة الإغلاق، والتغليف المزوج، ثم مرحلة التخزين المؤقت المزودة بمراقبة الضغط وجودة الهواء، يليها النقل الداخلي عبر مسارات مخصصة (BMS). وأنظمة إدارة المباني الذكية HVAC وأخيراً التكامل مع أنظمة ويمثل هذا النموذج تحولاً من مفهوم إدارة النفايات باعتبارها عملية لوجستية منفصلة إلى اعتبارها جزءاً من منظومة السلامة البيئية للمستشفى. كما يوفر إمكانية الكشف المبكر عن ارتفاع مستويات الملوثات واتخاذ إجراءات تصحيحية قبل وصولها إلى مستويات خطيرة.

وبالمقارنة مع الدراسات السابقة، فإن معظم الأدبيات ركزت إما على إدارة النفايات أو جودة الهواء كموضوعين منفصلين، بينما تتميز الدراسة الحالية بمحاولة دمج العاملين ضمن إطار واحد يربط المصدر (النفايات التنفسية)، ومسار الانتقال (الهواء الداخلي) وآليات التحكم (الهندسة البيئية والأنظمة الذكية). (وهذا التكامل يمثل الاتجاه المستقبلي نحو تصميم مستشفيات أكثر أماناً واستدامة من الناحية البيئية والصحية).

الخاتمة والاستنتاجات

أوضحت هذه الدراسة أن العلاقة بين نفايات أقسام الجهاز التنفسي وجودة الهواء الداخلي في المستشفيات تمثل أحد الجوانب البيئية والصحية المعقدة التي تتطلب إعادة النظر في أساليب إدارة النفايات الطبية التقليدية. فقد أظهرت المراجعة المنهجية والتحليل الهندسي أن النفايات الناتجة عن وحدات الرعاية التنفسية لا تمثل مجرد مواد صلبة معدية يجب التخلص منها، بل يمكن أن تتحول إلى مصادر انبعاث نشطة للملوثات البيولوجية والكيميائية، خصوصاً عند تأخر عمليات النقل أو ضعف إجراءات الاحتواء. أثبتت النتائج أن المستهلكات التنفسية الرطبة، مثل دوائر أجهزة التنفس الاصطناعي، وقساطر الشفط، ومرشحات الهواء التنفسية والمركبات العضوية (Bioaerosols) وحاويات الإفرازات الحيوية، تمتلك قدرة على إطلاق الهباء الجوي الحيوي مما يجعلها عاملاً مؤثراً في ديناميكية جودة الهواء داخل الأقسام ذات الخطورة العالية. كما بينت الدراسة أن تأثير (VOCs) المتطايرة هذه النفايات لا يقتصر على موقع تجمعها فقط، بل يمكن أن يمتد عبر حركة الهواء ومسارات النقل الداخلية داخل المنشأة الصحية. كما أكدت النتائج أهمية عامل الزمن في تحديد مستوى الخطورة البيئية، حيث أدى طول فترة التخزين المؤقت للنفايات داخل الأقسام إلى زيادة واضحة في الحمل الميكروبي الهوائي، خصوصاً في الحالات التي تقتصر على الحاويات المحكمة أو أنظمة الاحتواء المناسبة. وأظهرت البيانات أن الإغلاق الهيرميטיكي والتقليل من فترة بقاء النفايات داخل مناطق الرعاية يمثلان عناصر أساسية للحد من تصاعد الانبعاثات الهوائية.

ومن الجانب الهندسي، بينت الدراسة أن التحكم الفعال في جودة الهواء لا يمكن تحقيقه من خلال إجراءات إدارة النفايات وحدها، بل يتطلب تكاملاً بين بروتوكولات التخلص من النفايات وأنظمة التهوية والتحكم البيئي داخل المستشفى. وقد أظهرت النتائج أهمية عالية HEPA الحفاظ على ضغط سالب مستمر في المناطق الحساسة، وتطبيق معدلات تغيير هواء مناسبة، واستخدام مرشحات الكفاءة للحد من انتقال الملوثات المحمولة جواً.

كما كشفت الدراسة أن الحلول التقليدية القائمة على المراقبة اليدوية الدورية أصبحت غير كافية لمواجهة الديناميكية للملوثات الهوائية، مما يدعم الحاجة إلى تطبيق أنظمة ذكية تعتمد على المراقبة اللحظية لمؤشرات جودة الهواء وربطها بأنظمة إدارة المباني. ويسمح هذا التحول بالانتقال من نموذج الاستجابة بعد حدوث التلوث إلى نموذج وقائي يعتمد على الكشف المبكر والتحكم (BMS) المستمر.

وبناءً على ذلك، تستخلص الدراسة مجموعة من الاستنتاجات الرئيسية:

تُعد نفايات أقسام الجهاز التنفسي مصدراً ديناميكياً للانبعاثات الهوائية وليست مجرد مخلفات صلبة، بسبب احتوائها على ملوثات بيولوجية وكيميائية يمكن أن تؤثر في جودة الهواء الداخلي. يمثل عامل الزمن عنصراً حاسماً في زيادة المخاطر البيئية، حيث يؤدي تأخير نقل النفايات أو تخزينها في ظروف غير مناسبة إلى ارتفاع الحمل الميكروبي الهوائي. يعد التكامل بين إدارة النفايات والهندسة البيئية ضرورة أساسية لتحقيق بيئة استشفائية آمنة، إذ لا يمكن الاعتماد على الفرز والتخلص النهائي فقط دون التحكم في مسار الانبعاثات أثناء دورة حياة النفايات. وسائل هندسية رئيسية للحد من انتقال الملوثات المحمولة جواً HEPA تمثل أنظمة الضغط السالب والتهوية المناسبة ومرشحات داخل الأقسام عالية الخطورة.

تحتاج المستشفيات الحديثة إلى تبني مفهوم الإدارة الذكية المتكاملة الذي يجمع بين تقنيات الاستشعار اللحظي، وأنظمة التحكم الآلي، وإدارة النفايات القائمة على البيانات لتحقيق أعلى مستويات السلامة البيئية.

وبذلك تؤكد الدراسة أن تحسين جودة الهواء الداخلي في المستشفيات يتطلب رؤية تكاملية تجمع بين العلوم الطبية والهندسة البيئية وإدارة المنشآت الصحية، بهدف تقليل مخاطر العدوى المرتبطة بالرعاية الصحية وتحقيق بيئة علاجية أكثر أماناً واستدامة.

التوصيات الاستراتيجية والتطبيقية

استناداً إلى نتائج المراجعة المنهجية والتحليل الهندسي للعلاقة بين نفايات أقسام الجهاز التنفسي وجودة الهواء الداخلي في المستشفيات توصي الدراسة بمجموعة من الإجراءات التنظيمية والهندسية والتقنية بهدف تقليل الانبعاثات الهوائية وتحسين مستوى السلامة البيئية داخل المنشآت الصحية:

1. تطبيق نظام الاحتواء المحكم للنفايات عند نقطة التولد (Source Containment)

يوصى بتطبيق بروتوكول احتواء محكم للنفايات الناتجة عن أقسام الجهاز التنفسي منذ لحظة تولدها داخل غرفة المريض أو وحدة كما (Double Bagging) الرعاية، وذلك باستخدام الحاويات والأكياس الطبية المعتمدة ذات الإغلاق المحكم والتغليف المزدوج. يجب منع الضغط أو العصر اليدوي للأكياس أثناء التعامل معها، لتجنب تحرر دفعات من الهباء الجوي الحيوي المحمل بالمرضات.

2. تقليل زمن التخزين المؤقت داخل الأقسام التنفسية

توصي الدراسة بوضع جداول زمنية واضحة لإخلاء النفايات الطبية التنفسية وعدم السماح بتراكمها داخل غرف المرضى أو مناطق التخزين المؤقت لفترات طويلة، نظراً لأن زيادة مدة التخزين ترتبط بارتفاع الحمل الميكروبي الهوائي وزيادة احتمالية انتقال الملوثات إلى البيئة الداخلية.

3. تعزيز أنظمة التهوية والتحكم البيئي في الأقسام عالية الخطورة

ينبغي ضمان توافق أنظمة التهوية في أقسام الجهاز التنفسي والعزل مع المتطلبات الهندسية العالمية، وذلك من خلال المحافظة على واستخدام أنظمة عدم مخصصة لمنع انتقال الهواء الملوث إلى (ACH) ضغط سالب مستمر، وتوفير معدلات تغيير هواء مناسبة الخاصة بتهوية مرافق الرعاية الصحية ASHRAE 170 المناطق النظيفة. كما توصي الدراسة بالالتزام بمتطلبات

4. اعتماد أنظمة المراقبة الذكية لجودة الهواء الداخلي (Smart IAQ Monitoring)

(PM10 و PM2.5) يوصى بتركيب حساسات رقمية لمراقبة مؤشرات جودة الهواء بشكل مستمر، بما يشمل الجسيمات الدقيقة والمؤشرات الميكروبية عند توفرها، وربط هذه الأنظمة بمنظومة إدارة المبنى الذكية (VOCs) والمركبات العضوية المتطايرة لإطلاق تنبيهات تلقائية عند تجاوز الحدود المقبولة (BMS).

5. تطوير مسارات النقل الداخلي للنفايات الطبية

ينبغي تخصيص مسارات منفصلة ومحددة زمنياً لنقل نفايات أقسام الجهاز التنفسي بعيداً عن مسارات حركة المرضى والزوار والعاملين، مع استخدام عربات نقل مغلقة ومحكمة لمنع تسرب الملوثات أثناء عملية النقل الداخلي.

6. تطبيق برنامج صيانة تنبؤية لأنظمة الفلتر الهوائية

بل اعتماد برامج صيانة تعتمد على قياس HEPA توصي الدراسة بعدم الاعتماد على الاستبدال الدوري التقليدي فقط لمرشحات انخفاض الضغط عبر المرشحات، ومستوى تراكم الملوثات، وكفاءة الأداء الفعلية للنظام، لضمان استمرار كفاءة التنقية الهوائية.

7. تدريب الكوادر الطبية والتدريبية على إدارة المخاطر الهوائية للنفايات

يوصى بإدراج مفاهيم الانبعاثات الهوائية الناتجة عن النفايات الطبية ضمن برامج التدريب المستمر للعاملين في أقسام الجهاز التنفسي والعناية المركزة، مع تنفيذ تدريبات عملية حول طرق التعامل الآمن مع المستهلكات التنفسية ومنع انتشار الهباء الحيوي أثناء جمعها ونقلها.

8. دعم الدراسات المستقبلية الميدانية والطولية

توصي الدراسة بإجراء أبحاث مستقبلية تعتمد على القياسات الميدانية داخل المستشفيات، تشمل الرصد المباشر للحمل الميكروبي الهوائي، وتركيزات المركبات العضوية المتطايرة، وتأثير التعرض طويل الأمد لهذه الملوثات على صحة العاملين في المنشآت الصحية.

المراجع:

أولاً: المراجع العربية

- أبو الهدى، م. (2018). (الجسيمات الدقيقة العالقة في البيئات الاستشفائية ودورها في نقل مسببات الأمراض عبر الهواء. مجلة العلوم البيئية والصحية، 14(2)، 112-128.
- بريه، ع. (2022). (تقييم جودة الهواء الداخلي في المستشفيات وعلاقتها ببروتوكولات إدارة النفايات الطبية الخطرة. المجلة العربية للصحة المهنية والبيئية، 9(3)، 45-63.
- في تقليل الأحمال الميكروبية داخل أقسام العناية (HEPA) الجابري، ع.، والمالكي، ط. (2023). (كفاءة منظومات الفلتر المتقدمة. الفائقة. مجلة الهندسة الطبية والبيئية، 11(1)، 88-104.
- المنبعثة من حاويات النفايات (VOCs) خضير، أ.، ورشيد، س. (2024). (قياس الانبعاثات الغازية والمركبات العضوية المتطايرة في المنشآت الصحية. مجلة الرقابة البيئية، 16(2)، 134-152.
- خورشيد، م. (2024). (الإدارة المتكاملة للنفايات الطبية ودورها في تعزيز سلامة البيئة الاستشفائية وضبط العدوى. دار الوفاء للنشر. الشمري، خ. (2009). (أساسيات تهوية وتكييف الهواء في المستشفيات والمراكز الصحية. دار الكتب العلمية.

عبد الماجد، س). 2020. (الهندسة الطبية ودورها في الحد من العدوى المتقاطعة عبر الأنظمة الميكانيكية والضغط السالب منشورات جامعة القاهرة، كلية الهندسة
فتيحة، أ). 2022. (دليل الجودة الشاملة لإدارة النفايات الطبية الخطرة وضبط العدوى المحمولة جواً) الطبعة الثانية. (معهد الدراسات البيئية
اللهبي، ح، والجبوري، ع). 2020. (إدارة النفايات الطبية وأثرها على الصحة العامة والبيئة الاستشفائية. المجلة العراقية للعلوم الطبية، 18(1)، 55-72
مديرية البيئة). 2016. (تقرير الواقع البيئي: التلوث الميكروبي والكيميائي في المنشآت الصحية. منشورات وزارة البيئة

ثانياً: المراجع الأجنبية والمعايير الدولية

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). Ventilation of health care facilities (ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2021). ASHRAE.
Centers for Disease Control and Prevention. (2019). Guidelines for environmental infection control in health-care facilities: Recommendations of CDC and the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HICPAC). U.S. Department of Health and Human Services.
Joint Commission International. (2020). Joint Commission International accreditation standards for hospitals (7th ed.). Joint Commission Resources.
Saudi Central Board for Accreditation of Healthcare Institutions. (2019). National standards for hospitals: Infection control and environmental safety (ES). CBAHI.
U.S. Environmental Protection Agency. (2020). Indoor air quality and medical waste management guidelines in acute care environments (EPA Report No. 402-R-20-004). U.S. Environmental Protection Agency.
World Health Organization. (2014). Safe management of wastes from health-care activities (2nd ed.). World Health Organization.
World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.