

טיפול בקומפוסט ובטיחות העובדים - מגבלות המחקרים

מיון והפרדת הפסולת במתקני הקומפוסט כרוכים בתהליכים הגורמים לשחרור מרכיבים רעילים (ביאורוסולים) לאוויר. הביאורוסולים עלולים ליצור סיכון בריאותי לעובדי המתקן ולסביבה, אך במקרים רבים תוצאות המחקרים אינן חד-משמעיות. אז מה שיטת הדגימה הנכונה? איך קובעים רמה מרבית מותרת לחשיפה? אילו אמצעי הגנה נדרשים? התשובות בסקירה שלפניכם

מאת ניצן רייס-חבלין

מחלקת מחקר
המוסד לבטיחות ולגיהות

מסביב למתקן ולמבקריו במקום (Bonifait, 2017; Schlosser., 2019) על אף הרחבת המחקר בתחום הנדון, אין להתעלם מכך שיש תחומים שבהם המידע מוגבל או חסר. המגבלות והחסר מקשים על השוואת תוצאות של מחקרים שונים ונובעים מכמה גורמים וסיבות:

1. קושי באפיון אורגניזמים המשתחררים בתהליך הקומפוסטציה - בידוד, זיהוי וכימות שלהם.
2. הבדלים בשיטות הדגימה של ביאורוסולים במחקרים שונים.
3. גורמים הקשורים בגורם האנושי במתקני קומפוסט.

חוקרים מתבססים בעיקר על שיטות שבהן מגדלים דגימות אשר נלקחו מהאוויר על מצעי מזון מתאימים ובוחנים את האורגניזמים אשר התפתחו עליהם בשיטות שונות, כגון מיקרוסקופ אלקטרוני, עמידות/רגישות לאנטיביוטיקה ומבחנים כימוטוקסיים. בשיטות אלה קשה לאבחן זנים ומינים אשר אינם גדלים בתנאי מעבדה וזנים שנמצאים באוויר בכמות קטנה יחסית. כמו כן, יש קושי בזיהוי גורמים שאינם חיים ולא יבואו לידי ביטוי בעת גידול במעבדה, אך עלולים להיות משמעותיים לבריאות האדם. נוצר מצב שבו המחקר אינו משקף נכוחה את מגוון הביאורוסולים הקיימים בשטח, שעלולים לגרום לבעיות בריאות. במגמה לשפר את יכולת הזיהוי של המיקרואורגניזמים השונים בתערובת הביאורוסולים שנדגמה בשטח, נעשה שימוש בכלים רגשיים בתחום הביולוגיה המולקולרית (שיטות כגון qPCR ופענוח מתקדם של רצפי DNA). דוגמה לאבחון כזה היא הגברה וזיהוי של ה-rRNA מהגן 16S בתערובות של מיקרואורגניזמים אשר גדלו על מצע במעבדה. שיטה זו מגדילה את יכולת הזיהוי של פרטים בתערובת, אך לרוב לא "עוקפת" את הצורך בגידול המיקרואורגניזמים על מצע גידול ספציפי (Duquenne, 2017). שיפור יכולת הזיהוי וה"כימות" של הביאורוסולים השונים באתר הקומפוסט מאפשר פיתוח של אינדיקטורים לרמת החשיפה. אם רוצים לבדוק את פיזור הביאורוסולים באתר וסביבתו ניתן לבחון נוכחות של *Saccharopolyspora*. Sp ו-*Thermoactinomyces*, ואילו לבחינת השפעה על בריאות האוכלוסייה באתר וסביבתו

מערכות לטיפול בפסולת מסוגים שונים התרחבו והתפתחו בשנים האחרונות והשימוש בהן גובר והולך. בד בבד עם ההתפתחות, חלה התרחבות בחקיקה מתאימה ובמעריך ההסברתי לציבור על הגברת המודעות לטיפול ולמחזור פסולת. הצמיחה המואצת בענף זה מונעת בעיקר על ידי האיחוד האירופי, אשר הציב לו כיעד מחזור של 50% מהפסולת הביתית באירופה עד 2020 (עד 2018 מוחזרו כבר 42.5%). בשנת 2014 נאספו באיחוד האירופי 189 מיליון טון רטוב של פסולת עירונית ו-133 מיליון טון רטוב של פסולת תעשייתית ומסחרית. המחקר סוקר ספרות מדעית מהעולם.

בבריטניה מוערכת ההשקעה בענף המחזור בכ-12 מיליארד פאונד בשנה; הענף מעסיק 200 אלף עובדים והוא בצמיחה של 3%-4% בשנה (Douglas et al, 2017; Poole and Basu, 2017; Williams et al, 2018; Schlosser 2019). הפסולת, אשר מגיעה לאתרים השונים, עוברת מיון והפרדה של הפסולת המוצקה מהחומר האורגני, וזה האחרון עובר לטיפול במתקני קומפוסט.

תהליך הקומפוסטציה, שבו מתפרק החומר האורגני, כולל שלבים אירוביים ואנאירוביים בטמפרטורות גבוהות ובלחות מרובה. מצד אחד, התהליך מהווה מצע מצויץ להתפתחות מיקרואורגניזמים שונים, שחלקם פעילים בתהליך עצמו ותועלתיים, ומצד שני, התהליך משחרר אנדוטוקסינים ומרכיבים רעילים נוספים, לרבות תרכובות אורגניות נדיפות, שעלולות ליצור סיכון בריאותי. המיקרואורגניזמים הנישאים באוויר נקראים ביאורוסולים והם כוללים מיקרואורגניזמים חיים ומתים ותוצרים הקשורים בהם. במהלך שני העשורים האחרונים, גברה ההתעניינות והורחבו המחקרים בנושא הביאורוסולים, מתוך חשש למעורבותם במחלות תעסוקתיות שונות, כגון אלרגיות, בעיות נשימה ובעיות בעיכול. יצירת הקומפוסט גורמת להפצה נרחבת של ביאורוסולים ישירות לסביבה הקרובה. ההפצה מתרחשת בעיקר בשלבים שבהם משנעים ומניעים את הזבל או את הקומפוסט, כגון מיון, היפוך וסינון. מיקרואורגניזמים אלו ותוצריהם עלולים להיות מקור חשיפה וסיכון בריאותי לעובדי המתקן, לאוכלוסייה המתגוררת

כדאי לבחון את התפוצה של הביאורוסולים אשר ידועים כפוגעים בבריאות, כגון *Aspergillus fumigatus* (*A. fumigatus*). פיתוח שיטות מולקולריות רגישות ומדויקות אמנם משפר את יכולת הזיהוי, אך השיטות עלולות להוביל לעלייה בתוצאות רקע בגלל עודף רגישות. שיטות אלו טובות לבידוד ולזיהוי מיקרואורגניזמים ספציפיים בתוך הכלל ולמעקב אחריהם (Schlosser, 2019).

יצירת הקומפוסט גורמת להפצה נרחבת של ביאורוסולים ישירות לסביבה הקרובה. ההפצה מתרחשת בעיקר בשלבים שבהם משנעים ומניעים את הזבל או את הקומפוסט, כגון מיון, היפוך וסינון. מיקרואורגניזמים אלו ותוצריהם עלולים להיות מקור חשיפה וסיכון בריאותי לעובדי המתקן, לאוכלוסייה המתגוררת מסביב למתקן ולמבקרים במקום

תהליך הדגימה הוא גורם חשוב ובסיסי במחקר, אך קיים הבדל בשיטות הדגימה של ביאורוסולים בין מחקרים שונים. הבדל זה גורם לכך שבסיס הנתונים שנוצר אינו מותאם להשוואת ממצאים בין המחקרים ומקשה על יצירת מודל לפיזור והפצה של ביאורוסולים. בעיות נוספות אשר עלולות משיטות המחקר שבהן משתמשים במחקרים הן היעדר דגימת רקע (דגימה ללא נוכחות ביאורוסולים שמקורם בקומפוסטציה), מדגמים קטנים והיעדר מעקב ארוך טווח באתר. מסקנה מרכזית העולה לאחר בחינת מאמרים שונים היא הצורך ליצור פרוטוקול עבודה אחיד ומעודכן של שיטות הבדיקה החדשות, שעל פיו ייערכו מחקרים בעתיד. פרוטוקול זה יציג אינדיקטורים לזיהוי (על פי הנושא הנחקר), שיטה לאיסוף דגימות, דרך לשימור דגימות, שינוע וביצוע הבדיקות וכיצד לבצע דגימת רקע. כמו כן, יש לפתח אמצעי ניטור רציפים בזמן אמת, אשר יאפשרו מעקב לטווח ארוך. בשנים האחרונות השתפרו התשתיות באתרי קומפוסט ויש שיפור באמצעי הדגימה (Robertson et al, 2019; Mubareka, 2019; Schlosser, 2019). דוגמה ליישום מדדים מתקדמים, באה לביטוי במחקר נרחב, אשר בחן את תפוצת הפטרייה *A. fumigatus* בין השנים 2005 ל-2014 ב-217 אתרי קומפוסט בגודל בינוני, באנגליה. במחקר זה בנו מודל אשר בוחן את האתר וסביבתו (עד מרחק של 4 ק"מ) תוך התחשבות בתנאי מזג האוויר (כגון מהירות וכיוון הרוח והטמפרטורות). למודל התפוצה של ה-*A. fumigatus* הוכנסו הנתונים המטאורולוגיים ברצף הזמן של תבנית הפיזור, בהתחשב במרחק מהאתר. ה-*A. fumigatus* מהווה ביאורוסול נפוץ, הגורם להשפעות בריאותיות שליליות, לכן, השימוש בו להערכת חשיפה בעזרת מודל הפצה הוא חשוב ונכון. במחקר נמצא שריכוז הפטרייה באוויר יורד בצורה חדה ככל שמתרחקים מהאתר ומגיע לריכוזים שווי ערך לריכוז הרקע לאחר כשני קילומטרים. הריכוז הגבוה ביותר נמצא בחודש יולי, והנמוך ביותר בפברואר ובמרץ. ממצא חשוב נוסף היה קיומה של השפעה בתפוצת הביאורוסולים בין אתרים הסמוכים זה לזה, לכן, בעת שבוחנים את ההפצה של ביאורוסולים, יש לבדוק גם את האתרים הנוספים הקיימים בסביבה, כדי לאפיין את ההשפעה ההדדית ביניהם (Williams, 2019).

זיהוי הביאורוסולים ובחינת תפוצתם הם מרכיב עיקרי במחקרים

הבוחנים חשיפה תעסוקתית לביאורוסולים ואת מידת ההשפעה שלהם על בריאות העובדים באתר ועל הגרים בסביבתו.

מציאת היחס "חשיפה-תגובה", הקשור בביאורוסולים, הוא מורכב בכל הקשור לעובדים במתקני הקומפוסט, ובמרבית המחקרים התוצאות אינן חד-משמעיות. זאת, בניגוד לעובדים בחקלאות, שם נמצא קשר ברור. היעדר חד-משמעיות גורם גם להיעדר תקינה משמעותית בנושא זה. הקושי בהגדרת יחס "מנה-תגובה" נובע, בנוסף לגורם הזיהוי והתפוצה, גם ממאפיינים של הגורם האנושי באתרי קומפוסט. מאפיינים אלה קשורים בנתוני עובדים במתקני הקומפוסט, במאפייני תחלואת עובדים בעלת חשד לקשר סיבתי, ובפער הקיים בין ממצאי דגימות סביבתיות אישיות של עובדים לבין ממצאי דגימות שטח. לרוב, יועסקו במתקן עובדים-גברים בריאים, והדבר עלול ליצור הטיה בתוצאות (אפקט העובד הבריא). כמו כן, מחלות הקשורות בביאורוסולים מתפתחות לרוב לאט, ולא תמיד יש התאמה בין ציר הזמן של העבודה במתקן לבין ציר הזמן של התפתחות המחלה. עובדה נוספת שמקשה היא היות הסימפטומים בלתי ספציפיים לביאורוסולים, ולכן, לא תמיד ניתן לבסס קשר בינם לבין החשיפה. נוסף על כך, התגובה לביאורוסולים היא אינדיבידואלית, וקשה לעקוב בצורה שווה אחרי כל העובדים (מרבית המחקרים התמקדו בבעיות נשימה ופחות בבעיות של מערכת הדם והעיכול). בחלק מהמחקרים המדגמים קטנים מדי או המחקרים קצרים ואינם נותנים את הפרספקטיבה של חשיפה לטווח ארוך. מחקרים רבים מבוססים על דיווח אישי בלבד, ולכן, קשה להעריך את מצבם הבריאותי של העובדים ללא בדיקות בריאותיות (Robertson et al 2019; Schlosser et al, 2019). גורם משמעותי נוסף במשתני הגורם האנושי הוא קיומם של אפקטים בריאותיים, המושפעים משילוב של כמה גורמים, לדוגמה, ידוע היום ש-*A. fumigatus* הוא נשא לגורמים ביולוגיים מזיקים, ייתכן שאפקט משולב של ביאורוסולים, כגון אנדוטוקסינים, וחומרים אורגנים נדיפים. השפעתם של ביאורוסולים רבים עדיין אינה ברורה וגם בתחום זה יש להרחיב את המחקר (Bonifait, 2017; Schlosser, 2019).

כיצד אפשר לשפר את המחקרים ולהצליח לייצר מודל "חשיפה-תגובה" מהימן, וכן, לקבוע רמה מרבית מותרת לחשיפה?

יש להגדיל את המדגם, לגוון את האוכלוסייה הנבדקת, לבצע בדיקות בריאותיות כתוספת לתשאול העובדים, לערוך מחקרי מעקב ארוכי טווח ולשפר את יכולת הדיגום והאנליזה. כמו כן, יש לבצע כתימות של ה"רקע" מאזורים לא מושפעים, להוסיף נתונים דמוגרפיים ולבחון אם יש אפקט סינרגטי או אינטראקטיבי של חשיפה משולבת לביאורוסולים ולטמפרטורות שונות, כמו גם חומרים אורגניים נדיפים (Robertson et al, 2019; Schlosser, 2019). אחד המחקרים הבודדים, שנערך לאורך זמן, הוא מחקר עוקבה, שכלל 74 עובדים במתקני קומפוסט ו-37 עובדים בקבוצת ביקורת, לאורך 13 שנים. העובדים במחקר מילאו שאלון אישי בכל פרק זמן נבחר ונבדקו אצלם נוגדנים נגד עובש ותפקודי ריאות, תוך הקפדה על שימוש באותו מכשור לאורך השנים. כמו כן, נבנה מודל להערכת חשיפה. במחקר זה נמצא שוותק עבודה מעל חמש שנים מגדיל את הסיכון לשיעול ב-28% ולשיעול עם ליחה ב-32%. הוסק שהעבודה עלולה להגדיל את הסיכון לחלות בברונכיטי כרונית, אך בהשוואה לביקורת לא נמצאה ירידה בתפקודי הריאה. שיפור באמצעי המיגון לאורך השנים ולאפקט "העובד הבריא" כנראה השפיעו על תוצאות מחקר זה (Van Kampen, 2016).

- שיפור המחקרים הבוחנים את בריאות העובדים, בעזרת קבוצות של מתנדבים אשר יסכימו לקחת חלק במחקרים.
- פיתוח אינדיקטורים רלוונטיים למחקרים על חשיפה ומצב בריאותי וביצוע הערכה אמינה מפורטת של החשיפה האישית של העובדים במתקן.
- בחינת התרומה של אמצעי המגן למניעת החשיפה.
- תכנון מחקרים אפידמיולוגיים ארוכי טווח, שיתמקדו בסיכונים לבריאות.
- אימות המודלים אשר חוזים הפצה וריכוז הביוארוסולים סביב מתקני הקומפוסט.
- פיתוח מערך הסברתי, המתבסס על המידע שנאסף ויהיה מיועד לעובדים, למתגוררים בסביבת המתקן ולמבקרים בו, תוך הקפדה על העברת המידע לאוכלוסיות בסיכון גבוה לפגיעה (לדוגמה, אנשים בעלי מערכת חיסון מוחלשת) (Schlosser, 2019).
- תחום נוסף שיש להרחיב את הידע בו הוא הקשר בין ביוארוסולים למחלת הסרטן.

בישראל חסר מידע על חשיפה תעסוקתית בתעשיית הקומפוסט, והמוסד לבטיחות ולגיהות יזם ומבצע מחקר, כדי לבדוק סוגיה זו.

מקורות

- Bonifait, L., Marchand, G., Veillette, M., M'Bareche, H., Dubuis, M. E., Pépin, C., Duchaine, C. (2017). Workers' exposure to bioaerosols from three different types of composting facilities. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 14(10), 815-822.
- Duquenne, P. (2017). On the identification of culturable microorganisms for the assessment of biodiversity in bioaerosols. *Annals of work exposures and health*, 62(2), 139-146.
- Mubareka, S., Groulx, N., Savory, E., Cutts, T., Theriault, S., Scott, J. A., Kirychuk, S. (2019). Bioaerosols and transmission, a diverse and growing community of practice. *Frontiers in public health*, 7.
- Poole, C. J. M., & Basu, S. (2017). Systematic review: occupational illness in the waste and recycling sector. *Occupational Medicine*, 67(8), 626-636
- Robertson, S., Douglas, P., Jarvis, D., & Marczylo, E. (2019). Bioaerosol exposure from composting facilities and health outcomes in workers and in the community: A systematic review update. *International journal of hygiene and environmental health*.
- Schlosser, O. (2019). BIOAEROSOLS AND HEALTH: CURRENT KNOWLEDGE AND GAPS IN THE FIELD OF WASTE MANAGEMENT. *Detritus / Volume 05 - 2019 / pages 111-125*.
- Van Kampen, V., Hoffmeyer, F., Deckert, A., Kendzia, B., Casjens, S., Neumann, H. D., Brüning, T. (2016). Effects of bioaerosol exposure on respiratory health in compost workers: a 13-year follow-up study. *Occup Environ Med*, 73(12), 829-837.
- Williams, B., Douglas, P., Barcelo, A. R., Hansell, A. L., & Hayes, E. (2019). Estimating *Aspergillus fumigatus* exposure from outdoor composting activities in England between 2005 and 14. *Waste Management*, 84, 235-244. ■

התגובה לביוארוסולים היא אינדיבידואלית, וקשה לעקוב בצורה שווה אחרי כל העובדים. בחלק מהמחקרים המדגמים קטנים מדי או המחקרים קצרים ואינם נותנים את הפרספקטיבה של חשיפה לטווח ארוך. מחקרים רבים מבוססים על דיווח אישי בלבד, ולכן, קשה להעריך את מצבם הבריאותי של העובדים ללא בדיקות בריאותיות

נושא אמצעי ההגנה האישית לעובדים הוא חשוב ביותר, בסביבה שבה קיים חשש לחשיפה לביוארוסולים.

על אף שהממצאים בנוגע לסכנות הנובעות מחשיפה תעסוקתית בענף הקומפוסט אינם חד-משמעיים ולא בוצעו מחקרים אשר בוחנים את השפעת אמצעי המגן על הגנת העובדים במתקני קומפוסט, אפשר להסיק אילו אמצעי הגנה נדרשים על פי מחקרים בענפים אחרים, וכן, על פי ממצאי חשיפה בעת ביצוע מטלות שונות באתר. יש לתכנן את אתר הקומפוסט והפעילות בו בצורה נכונה, כדי לצמצם את מספר העובדים החשופים לתהליכים שבהם יש פיזור רחב יותר של ביוארוסולים. לדוגמה, יש למקם את הערמות אשר נמצאות בתהליכי הבשלה ועוברות היפוך בתדירות גבוהה, באזור מבודד יחסית, אשר רחוק מהמשרדים ואזורי האוכל והשירות. יש למגן את העובדים ואת כלי הרכב שבהם הם עובדים באמצעים המתאימים לחשיפה לאבק אורגני וביוארוסולים. כדוגמה לאמצעי מיגון לרכב, אפשר לציין התקנת מסננים מתאימים בתא הנהג בטרקטורים. יש להדריך את העובדים על הסיכונים בעבודה בקומפוסט ובשימוש נכון בציוד המגן (Schlosser, 2019).

יש לתכנן את אתר הקומפוסט והפעילות בו בצורה נכונה, כדי לצמצם את מספר העובדים החשופים לתהליכים שבהם יש פיזור רחב יותר של ביוארוסולים

- לסיכום:** כדי ליצור מערך בטוח של עבודה ובקרת חשיפה באתרי הקומפוסט ובסביבתם יש לבצע את הדברים הבאים:
- קביעת רמת החשיפה המרבית המותרת עבור הביוארוסולים השונים, תוך מציאת אינדיקטורים אשר יאפשרו זיהוי של רמת החשיפה וקביעת דרגות מותרות לסף עליון.
 - קביעת שיטות להערכה וסטנדרטיזציה להפצה כמותית, כדי לייצר מדריך אמין על השפעת הביוארוסולים על הבריאות.
 - ביצוע סטנדרטיזציה בשיטות הדיגום והמדידה בהתחשב גם ברקע ובתנאי מזג האוויר, וקביעת יחסי "חשיפה-השפעה" בהתאם לממצאים.
 - בחינה של האינטראקציה בין ביוארוסולים לכימיקלים מזהמים ותנאי סביבה אחרים והשפעתם על בריאות העובדים וכן, מציאת הגורמים המשפיעים על החשיפה במקום העבודה.