

הקשר בין איכות סביבה פנים-מבנית לבין בריאות, שלומות וביצועי עובדים – סקירת ספרות

ניצן רייס-חבלין, רנא דלאשה, חיים בן-ארי, ד"ר לליב אגוזי, ד"ר אשר פרדו

תקציר

מודעות ציבור ועובדים, לרבות מודעות קובעי מדיניות, לאיכות הסביבה הפנים מבנית גוברת בשנים האחרונות בשל בנייה ירוקה, מודעות גוברת לחסכון אנרגטי לשמירת האקלים ובשנתיים האחרונות בשל מגיפת הקורונה. אלה הגבירו את חשיבות הסביבה הפנים מבנית, מיזוג, אוורור, רעש, תאורה, וגורמי סיכון כימיים וביולוגיים לבריאות העובדים ולביצועים הארגוניים.

בסקירה המוצגת כאן נבחנו הקשרים העולים ממחקרים שנערכו ב-15 השנים האחרונות בין גורמים ומרכיבים באיכות הסביבה הפנים מבנית לבין בריאות העובדים וביצועיהם. הסקירה העלתה 249 מאמרים העוסקים לפחות בגורם איכות סביבה אחד וגורם של תסמיני בריאות או ביצועים אחד.

גורמי איכות סביבה פנים מבנית שנסקרו כללו: טמפרטורה ונוחות תרמית, רעש, תאורה, אוורור וריכוזי פחמן דו-חמצני ותרכובות אורגניות נדיפות באוויר, ביוארוסולים וגורמים מיקרוביולוגיים במעטפת המבנה ותכולתו וכן ניקיון וצמחייה בבניין. תסמינים בריאותיים שנסקרו כוללים: תגובות מערכת הנשימה, יובש וגירוי בגרון, גירוי ריריות באף ובדרכי הנשימה, גירוי ויובש בעיניים ובעור, עייפות וכאבי ראש. לעניין תסמינים אלה יש מקום נכבד לתופעה המכונה "תסמונת הבניין החולה" (Sick Building Syndrome - SBS).

ממצאי הסקירה מעלים תוצאות לא אחידות וקושי בהשוואה בין סוגי המחקרים ואופני המדידה, בין מדינות ומאפייני מזג האוויר וזיהום האוויר, עונות השנה, סגנון לבוש וגורמים רבים נוספים הקשורים לתחושת הנוחות של השוהים בחללי עבודה סגורים כדוגמת משרדים. יחד עם השונות הרבה, הסקירה מעלה כי לסביבה הפנים-מבנית הפיזית והנחויות יש השפעה על בריאות העובדים, היעדרויות מהעבודה ועל הביצועים שלהם. גורמי סביבה מסוימים כגון טמפרטורה או אוויר מזוהם יכולים להיות מורגשים היטב על ידי אנשים ולעומתם ישנם גורמי סביבה כגון ביוארוסולים, קרינה, וחלק מהחומרים הנדיפים באוויר אשר אינם מזוהים בקלות על ידי השוהים בחדר. אלה גם אלה בעלי פוטנציאל להשפיע על מצבם הבריאותי והרגשי של העובדים ונחוץ ניטור ומעקב אחריהם במשרדים.

מבוא

מגיפת הקורונה העלתה את המודעות הציבורית להיבטים פנים מבניים הקשורים לבריאות העובדים. נושאים אלה אינם חדשים ומטופלים בפקודת הבטיחות בעבודה תש"ל - 1970 אשר מפרטת תקנות לגבי אוורור, תאורה, חום, ניקיון וניקוז, חדרי נוחיות, צביעה וצפיפות, אולם תקנות אלה מתייחסות למבני תעשייה ולא למבנים משרדיים, חנויות ומבנים אחרים בהם עובדים מרבית העובדים בישראל.

מטרת סקירה זו לבחון ולנתח את ממצאי המחקרים שבחנו ב-15 השנים האחרונות (2005-2021) את הקשר בין איכות הסביבה התוך מבנית לבין בריאות העובדים, ביצועי העובדים והיעדרויות מהעבודה. הסקירה מתמקדת בגורמים אלה במשרדים, במוסדות חינוך ומרכזי לימוד (אוניברסיטאות), מוסדות רפואה, מבני ציבור וכדומה ולא בסביבת עבודה תעשייתית, או עבודה בשטח פתוח.

לאיכות הסביבה הפנים-מבנית (indoor environmental quality – IEQ) הכוללת את איכות האוויר (Indoor air quality – IAQ), נוחות תרמית, תאורה, רעש וגורמים נוספים יש השפעה על מצבו הפיזיולוגי והריגשי של העובד. בסקירה נבחנו גורמים המשפיעים על איכות האוויר (IAQ) כגון חומרים נדיפים, גזים וחלקיקים, תחלופת אוויר, טמפרטורה ולחות כמרכיבי נוחות תרמית, מיקרואורגניזמים ותוצריהם; גורמים בסביבת העבודה: רעש, תאורה, רמת הניקיון ונוכחות צמחייה במשרד. הסקירה עוסקת ברמה התיאורטית וברמה האמפירית בקשרים שבין גורמי הסביבה הפנים-מבנית לבין בריאות ושלומות (well being) העובדים וכן הקשר לביצועים. יש מחקרים רבים המכילים גם את הסביבה הפסיכו-סוציאלית כחלק מהותי בסביבת העבודה המראה קשר הדוק לביצועים של העובדים, השלומות שלהם ומצבם הבריאותי. אנו בחרנו בסקירה זו להתמקד בגורמים הכימיים, פיזיקליים וביולוגיים בלבד ולא בגורמים הפסיכו-סוציאליים או ארגונומיים.

בסקירה נבחנו הקשרים בין איכות הסביבה פנים מבנית לבין הבריאות והביצועים של עובדים. תסמינים בריאותיים שנסקרו כוללים: תגובות באזורים שונים של דרכי הנשימה וכוללות יובש וגירוי ריריות, גירוי ויובש בעיניים ובעור, עייפות וכאבי ראש. לעניין תסמינים אלה יש מקום נכבד לתופעה המכונה "תסמונת הבניין החולה" (Sick Building Syndrome - SBS). התופעה מדווחת ע"י אנשים השוהים במבנים וחשים סימפטומים בריאותיים קליניים ואי נוחות, המפריעים לתיפקוד נורמלי במבנה ומגלים קורלציה עם זמני השהות במבנה, ולרוב חולפים בעת עזיבת המאכלסים את המבנה. בנוסף לתסמינים המוזכרים לעיל יצוינו גם תסמינים נוספים הנקשרים ל"תסמונת הבניין החולה" ובהם שיעול יבש, בחילה וסחרחורת, קשיי ריכוז, עייפות ורגישות לריחות. על פי רוב לא ניתן יהיה לזהות מהו הגורם הספציפי אשר מביא לסימפטומים אלו או לאבחן מחלה מסוימת אצל המתלונן.

לעיתים יתרחשו התסמינים רק אצל השוהים בחדר אחד בתוך המבנה או בעונה מסוימת בשנה. יש להבחין בין תסמונת הבניין החולה לבין חולי הקשור בבניין (Building Related Illness – BRI), שהוא מצב בו קיים אבחון קליני של מחלה מוגדרת וגורם המחלה א שלרוב יהיה גורם מזהם בבניין או שילוב גורמים. במקרים של BRI יהיו תלונות כגון: שיעול, לחץ בחזה, חום, צמרמורת וכאבי שרירים (EPA, 1991; Hedge et al., 1996). לאיכות הסביבה הפנים מבנית יש השפעה גם על מידת הריכוז של העובדים, על יכולתם לבצע את עבודתם ועל מצבם הרגשי, לדוגמה, אי שקט ועצבנות. כלל הגורמים (פיזיולוגים ונפשיים) קשורים לירידה באפקטיביות של העבודה, לעליה בימי היעדרויות ולפגיעה כלכלית.

ביצועי העובדים נבחנים במחקרים בשתי שיטות עיקריות. בשיטה האחת נמדדים ביצועים בפועל, ביניהם הספקים בעבודה, דיוק או מספר טעויות בין אם במקום העבודה בפועל או בניסויים בביצוע מטלות שונות. השיטה השנייה לבחינת ביצועים היא הערכה סובייקטיבית של העובדת לגבי הביצועים שלו/שלה, טיב הביצועים וההספקים. ההערכה הסובייקטיבית מוטה מתחושות כלליות של המשיב בתחומים נוספים לדוגמה, עובד שחם לו והוא מרגיש לא מרוכז או עצבני יעריך בסבירות גבוהה את ביצועיו כפחותים בעת מתן תשובותיו בשאלון. לכן לרוב, הערכה סובייקטיבית לביצועים מראה קשר לתנאי איכות הסביבה הפנים-מבנית הנתפסים. הערכת ביצועים אובייקטיבית היא מורכבת וקשה להשוואה בין משתתפים ולכן לרוב נעשית על תחום צר של ביצועים כמו לדוגמה בעבודה חד-גונית הנמדדת על הספקים או על איכות, או בניסויים באמצעות הצלחה במשימות קוגניטיביות כמו סודקו או זיהוי תבניות שאינן קשורות לביצועי עבודה בפועל.

הסקירה נסמכה על ספרות שפורסמה בשנים 2005-2021, אך תכני המאמרים דנים גם בשנים מוקדמות יותר. לצורך הסקירה נעשה חיפוש במנוע google scholar ובאתרים כגון pubmed ומנועי חיפוש של מוסדות אקדמיים בישראל. מילות החיפוש הוכנסו לכותרת בלבד כדי להתמקד במחקרים שזה היה נושא המחקר העיקרי שלהם (טבלה 1). יחד עם זאת, בכתיבת רקע תיאורטי לקשרים וכן בבחינת תמונת ממצאים רחבה נעשה שימוש גם במאמרים מחקרניים, או סקירות משנים מוקדמות יותר, או מאמרים שסיפקו רקע תיאורטי חיוני.

בטבלה 1 ניתן לראות את מילות החיפוש השונות וכל צירופי המילים, את מספר המאמרים שעלו בחיפוש ואת מספר המאמרים שנדלו לאחר מיון ראשוני. הקריטריונים למיון היו נוכחות של משתנה סביבה אחד לפחות ומשתנה תוצאה אחד לפחות (בריאות, שלומות או ביצועים).

טבלה 1: מספר המאמרים לכל שילובי מילות החיפוש

מספר מאמרים שנותרו לאחר מיון ראשוני ¹	מספר מאמרים שעלו	מילות החיפוש בכותרת המאמר (חיפושים המתוארים עם האופרטור OR נערכו בנפרד. על כל שילוב מילים מוצג סך המאמרים)
73	259	[Indoor ² OR Temperature OR Ventilation OR Humidity] AND Productivity
46	76	[Indoor OR Temperature OR Ventilation OR Humidity] AND Work performance OR task performance
53	168	[Indoor OR Temperature OR Ventilation OR Humidity] AND SBS OR sick building syndrome OR symptoms
64	85	[Indoor OR Temperature OR Ventilation OR Humidity] AND Health AND Office OR Occupational Health
6	19	[indoor OR Temperature OR Ventilation OR Humidity] AND Absenteeism OR Illness absence
16	194	[Indoor OR Temperature OR Ventilation OR Humidity] AND Wellbeing OR Well-being OR Well being

מתוך 249 מאמרים שנסקרו והיו רלוונטיים אחרי ניפוי ראשוני והסרת כפולים, ב-61 מהם המשתנה המנובא נמדד אובייקטיבית, ב-102 משתני ביצוע או בריאות נמדדו סובייקטיבית בדיווח עצמי, 61 מאמרים בדקו שביעות רצון סובייקטיבית מסביבת העבודה, 14 מאמרים היו מאמרי סקירה, ו-11 מחקרים שונים: מקרה בוחן, מודלים או התייחסות תיאורטית לנושא הסביבה הפנים-מבנית.

בבחינת הגורם המנובא, ביצועים נמדדים - קוגניטיביים, דיוק או הספק - דווחו ב-50 מחקרים, 53 מחקרים בדקו שיעורי תסמינים גופניים (מרביתם מדיווח עצמי), 27 מחקרים בדקו היעדרות מהעבודה או מבית הספר ו-9 עסקו בשלומות רגשית. בטבלה 2 מוצג פירוט מספר המאמרים שעסקו בגורמי הסביבה ובתוצאות האישיות לעובד, או התוצאות הארגוניות לפי התפלגותם. מרבית המאמרים עסקו בגורמים רבים ויתכן כי שני גורמים נבחנו במחקר, אך לא נבדק או הוצג הקשר ביניהם.

¹ המספרים המופיעים בטבלה הם לפני ניפוי על בסיס איכות המחקר, אולם בסקירה נמנענו משימוש במחקרים שאיכותם הייתה נמוכה באופן בולט לפי עקרונות GRADE (משתתפים ונשירה, מהלך המחקר וביצועו, מדדים ואמינותם)

² מילת החיפוש INDOOR נבחרה משום שהיא מעלה את כל השילובים הקשורים כמו environment, air quality וכו' ולא נמצא בחיפוש תחום ידע נוסף שהמילה indoor עלתה בו בכותרות מאמרים.

טבלה 2: מספר המאמרים לכל השילובים של גורם סביבה עם תוצאות אישיות או ארגוניות

מס' מאמרים	סקירה	נתפס	מדיד	תוצאה לעובד.ת או לארגון	גורם בסביבה הפנים- מבנית
					סביבה פנים-מבנית
39	2	24	13	ביצועים	נתפסת
12	0	11	1	סימפטומים גופניים ³	
6	2	0	4	היעדרות	
6	0	6	0	שלומות	
38	2	21	15	ביצועים	איכות אוויר ואוורור
30	1	28	1	סימפטומים גופניים	
8	0	0	8	היעדרות	
4	0	4	0	שלומות	
					טמפרטורה, לחות ונחות
53	3	26	24	ביצועים	תרמית
27	1	62	0	סימפטומים גופניים	
15	0	0	15	היעדרות	
4	0	4	0	שלומות	
					נזקי רטיבות ועובש
3	0	3	0	ביצועים	
8	1	4	3	סימפטומים גופניים	
2	0	0	2	היעדרות	
2	0	2	0	שלומות	
					רעש
14	1	11	2	ביצועים	
9	0	8	1	סימפטומים גופניים	
5	0	0	5	היעדרות	
2	0	2	0	שלומות	
					תאורה, סינוור
27	1	15	11	ביצועים	
11	0	11	0	סימפטומים גופניים	
3	0	0	3	היעדרות	
4	0	4	0	שלומות	
					צמחיה ⁴
3	0	2	1	ביצועים	
2	0	2	0	סימפטומים גופניים	
1	0	0	1	היעדרות	
0	0	0	0	שלומות	

³ דיווח עצמי על היעדרות נרשם כמדיד.

⁴ צמחיה לא נסקרה באופן מתוכנן אך עלתה במאמרים שנדלו ולכן הוספה לסקירה.

סקירת הספרות

טמפרטורה, לחות ונוחות תרמית

שישה גורמים משפיעים על המידה בה אנשים יחוו בנוח בתנאי המיקרו-אקלים של הסביבה הפנים-מבנית: הטמפרטורה, אחוז הלחות היחסית באוויר, אחידות הטמפרטורה הסביבתית על פני גופם (הבדל בין גובה רגליים לגובה החזה-ראש), זרימת אוויר ומהירותה, הקצב המטבולי הנובע ממידת הפעילות (ישיבה, עמידה, פעילות גופנית או ריצה) וסוג הלבוש שלהם (Fanger, 1973). לפי הגדרות ASHRAE (ASHRAE standard 55-2020) תחום הטמפרטורות בהן אנשים יחוו 'נוחות תרמית' הוא התחום בו 80% מהשוהים בחדר ידווחו כי הטמפרטורה נוחה עבורם. תחום זה נע בטווח שבין 19-20 מעלות צלזיוס לבין 27-28 מעלות, גם כתלות בעונת השנה, במשרדים בהם האנשים יושבים ואינם פעילים גופנית. באופן כללי לטמפרטורה יש השפעה רבה על איכות סביבת העבודה המורגשת עליה מדווחים עובדים העובדים בתוך בניין (Sadick & Issa, 2017).

הלחות הנוחה לשהייה תלויה בטמפרטורה והיא מוגדרת במונחים של לחות יחסית, דהיינו, רמת הלחות בטמפרטורה נתונה בהשוואה ללחות המקסימלית האפשרית באותה טמפרטורה. לחות יחסית ברמה נוחה היא בסביבות הטווח של 40% עד 80%. אחוז לחות גבוה קשור להזעה וחום מורגש גבוה. באחוז לחות נמוך מהמומלץ אנשים מדווחים על תסמינים גופניים כגון יובש ועקצוצים בעור, בעיניים, חשמל סטטי ותסמינים נוספים (ASHRAE standard 55-2020, p. 49). השפעת הטמפרטורה על בריאות האנשים הינה בטווחים החורגים מטווח ה'נוחות התרמית'. תגובת הגוף בטמפרטורה נמוכה מאד או גבוהה, בה הוא אינו מצליח לשמור על חומו התקני - 36.5-37 מעלות - על ידי רעד שרירים (צמרמורת) או הזעה, אינה בתחום סקירה זו. מבחינת השפעות הטמפרטורה והלחות על הביצועים, עובדים מדווחים על טמפ' קרה מעט יותר מ- 19°-20° כתורמת לריכוז ולעוררות, ומשפרת ביצועים בתחומים מסוימים, אך לעומתם יש משימות שטמפרטורה ניטרלית (בטווח של 20°-25°) מציבה תנאים מיטביים לביצועים. הבעיה העיקרית היא שהטמפרטורה הניטרלית שונה מאדם לאדם וקשורה לגיל, מגדר, רמת לבוש, רמת הפעילות של האדם, עונת השנה ופרמטרים נוספים. טמפרטורה שאינה מיטבית משפיעה, בנוסף לביצועים, על מצב הרוח ורמת העצבנות של העובדים (Al Horr et al., 2016).

ניסויים מבוקרים שבהם בדקו השפעת טמפרטורה על ביצועים העלו כי בטמפרטורה גבוהה של 28 מעלות צלסיוס יורדים הביצועים של העובדים במשימות הדורשות חשיבה וכן בקצב הביצוע של פעולות כגון הקלדה (Maula et al., 2016; Kim et al., 2019; Seppanen et al., 2006). ניסויים שנערכו מצאו גם שחריגה מטמפרטורות נוחות של כ-21-22 מעלות, בנוסף לפגיעה בביצועים, פוגעת גם ברמת העצבנות של אנשים והם מדווחים על יותר רגשות שליליים מאשר אנשים שביצעו

אותן מטלות בטמפ' נוחות (Lan & Lian, 2009). Hong ושותפיו (2018) ערכו ניסוי במשרד עם 22 משתתפים בו שינו את תנאי הסביבה ובדקו מטלות ביצוע קוגניטיבי. הם מצאו כי המעבר מטמפרטורה קרה (18°C) לטמפרטורה ניטרלית (25°C) שיפר ביצועים, וכן שבתנאי טמפ' קרה הביצועים היו מעט טובים יותר מאשר בתנאי טמפ' חמה. גם בתנאי משרד אמיתיים עולה כי הטמפרטורה בתוך המבנה קשורה להערכת הפרודוקטיביות של אנשים. רעידת האדמה ביפן, הפגיעה בכור הגרעיני ומשבר האנרגיה שהתפתח בעקבותיהם הביאו לצמצום משמעותי בצריכת האנרגיה ולכן להגבלת השימוש בגורמים צורכי אנרגיה כגון מערכות מיזוג ואוורור ולפיכך גם להפחתת האוורור, היכולת לאיזון הטמפרטורות ולהפחתת תאורה. מחקר שבדק כיצד הערכו עובדים את מידת הפרודוקטיביות של עצמם לפני רעידת האדמה ביפן תחת טמפרטורות מומלצות ובקיץ אחריה תחת טמפרטורות גבוהות הראה ירידה של כ-6% בהערכתם את מידת הפרודוקטיביות שלהם בשנה לאחר המשבר ביחס לדירוג הפרודוקטיביות שדיווחו עליו שנה לפני המשבר (2012). יחד עם זאת, מחקר מטה-אנליזה שבחן 35 מחקרים על הקשר בין טמפרטורה לבין ביצועים בעבודה (קוגניטיביים או הספקיים) לא מצא קשר בין טמפרטורה לבין ביצועים גם בטווחי טמפרטורה החורגים מתחום הטמפרטורות הנוחות כלומר מתחת ל-18 מעלות ומעל 28 מעלות (Porras-Salaza et al., 2021).

רעש

רעש מזיק משפיע ישירות על איבר השמע ועלול לגרום לירידה בשמיעה. תופעות נוספות הנגרמות מרעש מזיק ומטריד ובהם הדהוד בראש, כאבי ראש ואוזניים, חוסר שיווי משקל, זמזומי אוזניים (טנטון) יכולות להוביל להפרעות בשינה. ירידה בשמיעה, כליקוי שמקורו בחשיפה לרעש, מתפתחת לאט ומעמיקה עם כל חשיפה נוספת, דבר הפוך מדעה רווחת שלפיה עם חלוף הרעש גם השפעותיו חולפות (Mujan et al., 2019).

במשרדים, לעומת מפעלים, מפלסי הרעש הם יותר נמוכים בדרך כלל ומוגדרים כרעש מטריד. למרות זאת, רעש ומטריד אקוסטיקה, גם ברמה שאינה מוגדרת כמזיקה על פי חוק, משפיעים לרעה על הבריאות ועל התפוקה של עובדי משרדים. הרעש גורם לתגובות לחץ, חרדה ולהפרעה בתקשורת. כמו כן נפגעת יכולת הריכוז, לכן יש פגיעה בקצב העבודה ובדיוק בביצוע המטלות. לאורך זמן מצב זה עלול להביא גם לפגיעה בריאותית. הרעש במשרד נובע הן ממקורות פנימיים כמו שיחות, טלפונים, מכונת צילום וקפה ועוד, והן ממקורות חיצוניים כמו שדה תעופה סמוך, קו מסילת רכבת, כביש סואן ועוד. מחקרים מראים כי כאשר עובדים מתלוננים על רעש, מספר ההיעדרויות עקב מחלה גדל ומשך ההחלמה מתארך (Mujan et al., 2019).

מחקרים רבים בדקו את ההשפעה של רעש על שביעות הרצון. מחקר של Bae ועמיתיו (2021), שבדק השפעת גורמים סביבתיים על שביעות הרצון מסביבת העבודה בקרב 2836 עובדים מאכלסי 41 בנייני עבודה שונים, הראה ששביעות הרצון של העובדים היתה נמוכה ביותר ממרחב העבודה שלהם והגורמים לכך היו התנאים האקוסטיים, הריהוט והפרטיות. הנוחות האקוסטית חולקה לשני חלקים: היכולת לשמוע צלילים רצויים והיכולת להגביל צלילים לא רצויים. לפי תוצאות המחקר, שיפור תנאי האקוסטיקה והפרטיות צפוי להשפיע ברמה הגבוהה ביותר על החוויה החיובית בסביבת העבודה. מחקרים נוספים מראים כי הנוחות האקוסטית היא בעלת ההשפעה הגדולה ביותר על שביעות הרצון והרווחה בסביבת העבודה וכי לרעש הנובע משיחות ופעילות של אנשים אחרים יש חלק מכריע במידת שביעות הרצון (Cheung et al., 2021; Kwon et al., 2019).

פתרונות מוצעים לטיפול בבעיית הרעש והפרטיות בחלל הפתוח הכילו מחיצות יותר גבוהות. הוצעו חדרים שקטים שהעובדים יכולים לשבת בהם בזמן של עבודה שמצריכה ריכוז גבוה, והתייחסות והנחיות לעובדים בנושא הרעש במקום העבודה בליווי של בידוד אקוסטי בקירות (Cheung et al., 2021).

תאורה וסינוור

אור ותאורה הינם גורמים המשפיעים על בריאותו ובטיחותו של האדם במספר היבטים שונים. אור טבעי ולעיתים גם תאורה מלאכותית משפיעים על השעון הביולוגי (השעון הצירקדי) המניע ומכוון את גוף האדם. זהו מנגנון הקשור בתהליכים המתרחשים בגוף במהלך היממה, בעת עירות ושינה (תגובות נוירואנדוקריניות וניירו-התנהגותיות) וכן מאפשר לאדם להתכוון ולהתאים את עצמו לשינויים בסביבה, למשל למעבר בין עונות השנה. המשפיע העיקרי על מנגנון זה הוא האור, אך גם גורמים כגון טמפרטורה יכולים להשפיע עליו. שיבוש במנגנון זה עלול לפגוע בבריאות האדם ולגרום לבעיות ומחלות שונות כגון השמנה וסרטן, כמו כן עלול להשפיע על כושר הריכוז ומצב הרוח (חיים, 2014; Houser & Esposito, 2021; Grimaldi et al., 2008). קשר מובהק בין תאורה לבין תסמינים כגון כאבי עיניים, יובש בעור וחולשה נמצאו במחקר אשר בחן פרמטרים שונים בסביבה ותסמינים גופנים בעזרת שאלונים ומדידות בשטח (Jafari et al., 2015).

היבט שונה של התאורה הוא ההיבט הבטיחותי ובו מחסור או עודף בתאורה נכונה (עוצמה ומיקום) עלולים להביא לתאונות, תקלות וטעויות של האדם בעת ביצוע משימות שונות, כמו גם לכאבי ראש, עיניים וסימפטומים נוספים המזכירים תופעות של הבניין החולה (ניסנבאום, 2006; Houser & Esposito, 2021; Jafari et al., 2015). עוצמת האור, הרכב האור (אורכי הגל השונים), כיוון האור וסוג האור (טבעי או מלאכותי) ישפיעו על איכות הסביבה הפנים-מבנית ועל בטיחות ובריאות

העובדים. ות בה. לבד מהשפעתה הישירה של התאורה על תסמינים, עלולה ההשפעה והתגובה הגופנית לתאורה להתעצם כאשר אנשים סובלים בו-זמנית גם מיובש או צריבה בעיניים או מעייפות. (Jafari et al., 2015; Kaushik, 2019; Vimalanathan & Babu, 2014)

לעניין התאורה נמצא גם קשר להבדלים במצב הרוח, במידת הערנות, הביצועים הקוגניטיביים ואיכות השינה בין עובדים ותלמידים שנחשפו לאור טבעי (נמצאו בקרבת חלונות) לבין כאלה שלא נחשפו לאור יום או עבדו בחדרים ללא חלונות (Heschong et al, 2002; Boubekri et al., 2014; Figueiro et al., 2017). מחקרים אחרים הראו קשר בין הרכב האור ואיכותו ליכולות קוגניטיביות, הביצועים והרווחה של עובדים ותלמידים בגילאים שונים (Barkmann et al, 2012; Mills, et al., 2008; Mott et al., 2012; Viola et al., 2008). ישנם פרמטרים רבים הקשורים לתאורה והשפעתה על בריאות, שלומות וביצועי העובדים. לדוגמה, מיקום האור, עוצמתו וסינוור השפיעו על הלחץ של העובדים, הפרודוקטיביות ושביעות הרצון מהסביבה (Fostervold & Nersveen, 2009; Xu an, 2018; De Simone & Fajilla, 2019 Shin & Kim, 2009). במחקרם של דה סימון ופאיילה (2019) נמצא כי נשים הושפעו יותר ממחסור בתאורה טבעית וגברים הגיבו יותר לסינוור מתאורה חזקה מדי או בובהק מהחלונות על מסכי המחשב. מחקר אחר מצא שעובדים במרכז מענה טלפוני מציינים פרמטרים של תאורה בהירה מדי, קרינה וסינוור ממסכי המחשב כגורמים אשר מפריעים להם בעת השהייה במקום העבודה, למרות שאלו היו בטוח התקן המותר (Wiegand, 2013).

טבעיות התאורה, רמת הסינוור, קרינת אור מחלונות ומחשבים, ועצמת התאורה משפיעים על השוהים בסביבה הפנים-מבנית, על בריאותם הגופנית והנפשית ועל בטיחותם. יש קושי לתכנן את התאורה באופן בו היא תתאים לכלל דרישות העובדים, אך רצוי לאפשר לעובדים. ות שליטה מסוימת על התאורה בסביבתם בכדי להתאימה לצרכים של כל אחד ואחת מהם.

אורור

אנשים והפעילות שלהם, רהיטים, מדפסות, חומרי הבניין, תהליכי בעירה ללא אורור, חימום וקירור וגורמים נוספים מייצרים מזהמים אשר נפלטים לאוויר. המזהמים הינם מגוונים ותלויים בגורמים אלו וכן אינם קבועים לאורך שעות היום, עונות השנה ומזג האוויר. אורור משנה את עוצמת החשיפה למזהמים אשר נמצאים בתוך חלל סגור על-ידי דילול וצמצום ריכוזם באוויר, אך הוא אינו מונע פליטת המזהמים. האוויר מחוץ למבנה עלול אף הוא להכיל מזהמים שונים (כגון פליטות מכלי רכב הנוסעים בקרבת מקום, מפעלים ומסעדות ברחוב) ומערכת האורור עלולה להכניס מזהמים אלו אל תוך החלל הפנים מבני. בחלל סגור עלולים להימצא מזהמים שונים ובהם גזים כגון אוזון

ופחמן דו חמצני (פד"ח), מיקרואורגניזמים כגון עובשים וחיידקים וכן חלקיקים מסוגים וגדלים שונים. תגובות כימיות ופיסיקאליות המתרחשות בחלל הסגור משנות את הרכב האוויר הפנימי ומשפיעות על איכות האוויר הנתפסת ועל בריאות העובדים (Wargocki, Ben-David et al., 2017; Wolkoff et al., 2021). מחקרים רבים משתמשים במדידת ריכוז הפד"ח כמדד לאיכות האוויר, אך גם מדידת חומרים אחרים באוויר כגון חלקיקים, תרכובות נדיפות אחרות, אוזון ועוד משמשת כמדד לבחינת איכות האוויר.

עוצמת האוורור יכולה להיות מושפעת משיקולים שונים, כגון היסכון אנרגטי (בניינים ירוקים) ונוחות תרמית. הקריטריונים לקביעת עוצמת האוורור הרצויה נסמכים על הפחתת רמת המזהמים המסכנים את העובדים (דרישות בריאותיות), על איכות אוויר נתפסת (ריחות שונים, לחות, טמפ. וכו.) ועל גורמים שניתן לעקוב אחריהם כגון פד"ח. האוורור יכול להיות טבעי או מכאני מאולץ וכן שילוב בין השניים. קיימים קריטריונים לקביעת רמת האוורור, אך לעיתים רמת אוורור החוסכת באנרגיה אינה מותאמת לתחושת העובדים במקום (Ben-David et al., 2017).

אין אחידות בתוצאות מחקרים על הקשר שבין אוורור לבין בריאות העובד, או הקשר של אוורור לאיכות אוויר נתפסת והסיבה לכך היא שהאוורור אינו הגורם הישיר בעל השפעה, אלא מתווך בין הגורם המשפיע (כגון טמפ', לחות, תרכובות אורגניות נדיפות (VOCs), חלקיקים, מיקרואורגניזמים) לבין תופעות אותן חשים האנשים (Wolkoff, Azuma & Carrer, 2021). איכות אוויר ירודה יכולה לגרום לבעיות רפואיות כגון אלרגיה, בעיות נשימה והחרפה של אסטמה וכמו כן לעליה בהיעדרויות מהמשרד וירידה בביצועים. מאמר סקירה אשר בחן 27 מחקרים מהשנים 1991-2005 הראה שמרבית המחקרים מראים את ההשפעה של קצב אוורור נמוך על ריבוי תסמיני הבניין החולה. הוצע שבקצב אספקת אוויר חיצוני טרי הנמוך מ- 25 l/s לאדם, יש עליה בסיכוי לחוות את תסמונת הבניין החולה. במאמר מציינים את המחסור במידע על הדרך, התנאים והאמצעים בהם מדדו במחקרים את קצב האוורור. בחלק מהמאמרים מוצגים גם נתונים המעידים על קשר לתופעות נוספות כגון אלרגיה וזיהומים בדרכי הנשימה וכן היעדרויות לטווח קצר מהמשרד, אם כי לא בכל המאמרים הודגם קשר מובהק (Sundell et al., 2011). מאמר סקירה אחר של Wolkoff ושותפיו, בחן מאמרים בין 2002 ל- 2020, בחלק מהמאמרים נמצאה השפעה של רמת אוורור נמוכה על תחלואה, אך באחרים לא נמצאה השפעה כלל, או שדווקא הייתה השפעה הפוכה בגלל הכנסה של זיהום חיצוני כגון חלקיקים וזיהום, בעיקר באזורים בהם האוויר מזוהם. מחקרי שטח הראו שאין השפעה מעל קצב אספקת אוויר חיצוני של $6-7 \text{ L/s}$ לאדם ואילו אחרים טוענים שמתחת לקצב של $25-40 \text{ L/s}$ לאדם גובר הסיכון לתלונות ובעיות בריאות. לא נמצא קשר בין אוורור למחלות כרוניות וסרטן. במחקרים אפידמיולוגיים נמצא קשר בין רמות הפד"ח לבין בריאות העובדים החל מ-

700ppm ומעלה (סימפטומים כגון גרון יבש, עייפות וסחרחורת וכן תפקוד קוגניטיבי). הקשר בין רמות פד"ח גבוהות לבין פגיעה בבריאות העובדים יתכן שהוא ישיר בשל הפד"ח, יחד עם זאת יתכן שגורמים מזהמים אחרים הם המשפיעים על הבריאות ברמת אוורור נמוכה וריכוז הפד"ח הינו רק סמן לכך שהאוורור אינו מספק (Carrer et al., 2015; Lu et al., 2015; Conson et al., 2014; Maula et al., 2017; Wolkoff et al., 2021).

האוורור הינו גורם חשוב ומשמעותי בקביעת איכות האוויר הפנים-מבנית. רמת האווורור משפיעה על התחושה של השוהים במקום ועל רמת הגורמים המזהמים המסכנים את השוהים בה. שיקולים אלה באים אל מול השיקולים האנרגטיים בתכנון, יישום והפעלת מערכת האווורור. המלצת האקדמיות הלאומיות למדעים, הנדסה ורפואה בארה"ב לנוכח שינויי האקלים, המגמות לחסכון אנרגטי וריבוי חומרי הבניה והריהוט החדשים היא לבחון מחדש את תקני האווורור לבניינים ה"ירוקים" החדשים בכדי לשמור על האיזון בין חסכון אנרגטי לבין פגיעה בבריאות השוהים בבניין (The national academies of Sciences, Engineering and Medicine).

פחמן דו-חמצני – CO₂

פד"ח הינו תוצר של תהליכי נשימה ושריפה. ריכוזו באטמוספירה במגמת עלייה ולפי נתוני נאס"א כיום נע סביב 420ppm - 380. במחקרים על איכות האוויר הפנים-מבני נזהגים לעקוב אחר ריכוזי הפד"ח בחלל המבנה כאינדיקציה לרמת האווורור (תקינה או לקויה), ולכן כאשר לא מודדים באופן ישיר את ריכוז ה-VOCs והחלקיקים (מזהמים באוויר) משערים שריכוז גבוה שלו יכול להעיד גם על עליה בגורמי זיהום האחרים. הפד"ח מהווה גם אינדיקטור תחושת עיבור אנשים לכך שהאוורור בסביבתם אינו באיכות גבוהה ואנשים חווים ריכוזי פד"ח גבוהים כאי נוחות ומחנק (Hou et al., 2021). מלבד היותו אינדיקטור למזהמים אחרים, הוא מהווה גורם סיכון בפני עצמו. מייחסים לריכוזי פד"ח גבוהים עליה בעייפות, ירידה בריכוז וביכולת הקוגניטיבית ותסמינים של תסמונת הבניין החולה. (Allen et al, 2016; Hou et al., 2021; Satish et al, 2012).

בניסוי מבוקר בו נחשפו משתתפים לריכוזי פד"ח שונים (600, 1000, 2500 חל"מ) ברמת אוורור וטמפ. קבועות ונדרשו לעבור מבחן המעיד על כושרם לקבל החלטות (SMS test), נמצא שכבר בחשיפה לריכוז 1000ppm התחילה ירידה בינונית אך משמעותית בשש מתוך תשע מיומנויות ביצוע בקבלת החלטות. ריכוז הפד"ח בניסוי זה הוא ריכוז מירבי מומלץ ע"י ASHRAE כריכוז המראה על רמת אוורור תקינה. ב- 2500 ppm נמצאה ירידה גדולה ומשמעותית בשבע מתוך תשע המיומנויות, אך עם זאת, כושר הריכוז עלה (Satish et al., 2012). ניסוי נוסף אשר בחן בתנאים מבוקרים את השפעת הפד"ח הראה ממצאים דומים, ירידה של 15% בביצועים הקוגניטיביים בחשיפה לריכוז פד"ח של כ- 945 ppm וירידה של 50% בביצועים בריכוז של 1,400 ppm (Allen et al., 2016).

מחקרים רבים נוספים מראים קשר בין עלייה בריכוז הפד"ח לירידה בביצועים, ליכולת קבלת החלטות ולתוצאות מבחנים (Gupta & Howard, 2015; Dorizas, et al., 2015; Azuma et al., 2018; Gupta, et al., 2020; Hong, et al., 2018; Maula et al., 2017).

מחקרים בחנו את הקשר בין אוורור ופד"ח לבין תסמינים של תסמונת הבניין החולה. המחקרים נערכו בבנייני משרדים, בתי ספר, בנייני מגורים ובניינים ציבוריים ובחלקם נמצא קשר בין ריכוזי הפד"ח לסימפטומים שונים. מחקר שבחן 111 עובדי משרדים באוגוסט ובנובמבר מצא קשר בין ריכוזי פד"ח הגבוהים מ- 800ppm לתחושת שריפה בעיניים ובעיות בדרכי הנשימה העליונות (Tsai et al., 2012) כך גם במחקרם של Hou ושותפיו (2021), שמדדו במשך שנה ריכוזי פד"ח בחדרי שינה בכל אזורי האקלים השונים בסין ומצאו קשר בין ריכוזי הפד"ח לתסמינים הקשורים לגירוי העור. בחלל העבודה מצטברים גזים מסוגים שונים מלבד הפד"ח (כגון סך תרכובות אורגניות נדיפות (TVOCs), אוזון ובנזן). מחקר שנערך ב- 16 משרדים בבניינים רבי קומות, עם 417 משתתפים (77.8% נשים) בחן את ההשפעה של כלל התרכובות האורגניות הנדיפות ושל הפד"ח על סימפטומים שונים, בהתחשב בהפרש הריכוזים בין הגזים והאדים השונים מחוץ למשרד ובתוכו. במחקר מראים שיש בתוך המשרד ריכוז גבוה פי 2.6 מהריכוז הממוצע בחוץ. כמו כן, מראה המחקר שהריכוז הממוצע של הפד"ח עולה כאשר מספר האנשים במשרד הינו גבוה יותר. לאחר כיוול הנתונים (המחושב לאחר הפחתה של הריכוז מחוץ למשרד) נמצא קשר מובהק בין עליה של ppm 100 בפד"ח לבין גרון יבש, עייפות, סחרחורת וסימפטומים אחרים (כגון: בעיות ריכוז ונרגנות). לאחר ניטרול הקשר של ה- TVOCs לסימפטומים, נשאר קשר מובהק בין פד"ח לתופעות של עייפות, סחרחורת וסימפטומים נוספים. ממחקר זה נראה שהקשר בין הפד"ח לבין הסימפטומים שחשו העובדים חזק יותר מאשר הקשר שבין ריכוזי הגזים האחרים שנבדקו במחקר לבין הסימפטומים (Lu et al., 2015). דוגמאות מחקריות נוספות התקבלו ממחקר אשר נערך בבית ספר הסמוך לכביש מרכזי, ובו נמצא קשר מובהק בין פגיעה במערכת העצבים המרכזית לריכוזים של פד"ח ו-TVOCs (Madureira et al., 2009). מחקר דומה אשר נערך בבתי ספר באתונה מצא קשר מובהק בין תופעות של אלרגיה, נזלת ועייפות לריכוז פד"ח וחלקיקים (Dorizas, Assimakopoulos & Santamouris, 2015). בניסוי שנערך לבחינת השפעת ריכוזי פד"ח גבוהים שנוצרו על ידי החוקרים (ריכוז 2260 ppm) נמצאה השפעה על ביצועי העובדים, אך לא נמצאה השפעה על סימפטומים (Maula et al., 2017). בחלק מהמחקרים אשר לא מצאו שריכוז הפד"ח היה קשור לסימפטומים, הסיבה לאי מציאתם נבעה מרמות תקינות של אוורור אשר גרמו לריכוזי פד"ח נמוכים יחסית (Myatt et al., 2002; Mendell et al., 2015).

הממצאים במחקרים מראים כי ריכוז הפד"ח קשור לביצועי העובדים ובריאותם, אך אינם אחידים לגבי ריכוז הפד"ח המשמעותי לתסמיני בריאות ולביצועים. כמו כן, השפעות הפד"ח יכולות להיות ישירות כתוצאה מהריכוז שלו, או שההשפעה באה בשילוב של גורמים אחרים המצטברים בחלל האוויר ומשפיעים על ביצועי העבודה (Maddalena et al., 2015; Wolkoff et al., 2021).

כימיה של סביבה פנימית

תרכובות אורגניות נדיפות (VOCs)

תרכובות אורגניות נדיפות הינן חומרים המכילים פחמן אורגני, במצב גז או אדים בטמפרטורת החדר. חומרים אלו נמצאים במוצרים רבים כגון דבקים וצבעים, כמו כן הם יכולים להיפלט ממקורות שונים כגון מקורות טבעיים (צמחיה), כלי רכב וציוד חשמלי. בסביבה הפנים-מבנית יכולה להתקיים פליטה גבוהה של VOCs מרהיטים (בעיקר חדשים), חומרי הבניה, ציוד ומכשירים כגון מדפסות ודבקים, חומרי ניקיון ותכשירי בישום, כמו גם ממוצרי קוסמטיקה וניקיון (מקור חלק מהם בעובדים). ל – VOCs תרומה משמעותית לזיהום האוויר בתוך המבנה. נהוג לחלק אותם לשתי קבוצות: גז המתאן (פוגע באוזון) וחומרים שאינם מתאן אשר יכולים להזיק לבני האדם ולסביבה כגון: פורמאלדהיד, טולואן, בנזן, כלורופורם ואתיל בנזן. ההשפעה של מרבית הכימיקלים המרכיבים את הסביבה הפנים-מבנית על בריאות האדם ועל איכות האוויר הפנים-מבנית (הנתפסת והאמיתית) כמעט ואינה ידועה בעיקר במצבים של חשיפה כרונית לכמויות קטנות לאורך זמן. הדבר נובע מפער ביכולת לאתר ולמדוד את החומרים הללו. פער זה עולה ממחקרים השומרים דגימות שתן ישנות ומעת לעת, עם התפתחות יכולת הבדיקה, מוצאים בהן שאריות חומרים שבעבר לא אותרו. כמו כן, קצב פיתוח החומרים מהיר והמעקב אחרי מידת רעילותם ארוך (Salthammer, 2020). כתוצאה מכך יש מחסור בידע על מידת רעילות החומרים. עם זאת, חלק מהם ידועים כחומרים מסרטנים (למשל בנזן ו 1-3 בוטידאן) וישנן השפעות בריאותיות נוספות כגון צריבה בעיניים, כאבי ראש, בחילות ואלרגיה.

הנזק שיגרם מהחשיפה יהיה תלוי במידת רעילותו של החומר, ריכוזו באוויר, משך החשיפה וכן ריאקציות עם חומרים נוספים. ארגון הבריאות העולמי (WHO) קבע שאלו הם החומרים אשר נמצאים בשכיחת גבוהה בסביבה הפנים-מבנית: בנזן, טולואן, Trichloroethylene, Styrene ו-Tetrachloroethylene. באירופה החומרים בנזן, פורמאלדהיד ו-Naphthalene נמצאים במרבית הדגימות, אשר נלקחות בסביבות פנים מבניות (Kotzias et al., 2005; Chin et al., 2014; Adamová, et al., 2020; Senthilnathan et al., 2018). ריכוזי VOCs יהיו לרוב

גבוהים יותר בסביבה הפנים-מבנית יחסית לסביבה החיצונית, אך הרכבם בסביבה החיצונית ישפיע על הרכבם בסביבה הפנימית. במשרדים מודרניים אשר ממוקמים בבניינים חדשים הפליטה גבוהה יחסית בשל החומרים בהם השתמשו להקמת המשרד ואיבזורו. בשנים האחרונות קיימת מגמה של התייעלות וחיסכון בניצול אנרגיה (בניינים ירוקים) והדבר מתבטא בשימוש בתאורה, אמצעי קירור וחימום חדשניים אשר עלולים לפלוט ו/או להשפיע על ה-VOCs וכן בהפחתת האורור ובכך הפחתת המיהול של ה-VOCs בתוך הסביבה הפנימית של המבנה (Kotzias et al., 2005; Chin et al., 2014; Allen et al., 2016).

כימיקלים באוויר מהווים גורם אשר חשוד כמשפיע על תסמיני בריאות, ריחות, פגיעה בביצועים והיעדרויות מהמשרד, לכן ההשפעה של VOCs על בריאות השהים בסביבה הפנים-מבנית והקשר ביניהם לבין תסמינים שונים נבחנו במחקרים רבים. למרות הקשר ההגיוני בין ה-VOCs לבריאות האדם, קשר בין תסמינים ל-VOCs הוכח רק בחלק קטן יחסית מהמחקרים על איכות אוויר במבני מגורים (Langer et al., 2017; Madureira et al., 2009; Pose-Juan et al., 2016; Sahlberg et al., 2020; Veenaas et al., 2020; Takigawa et al., 2010; et al., 2013). ההסברים לכך רבים, ביניהם: היכולת לאתר את החומרים הנדיפים באוויר, השילוב של סוגים שונים של כימיקלים כמו גם נוכחות של פד"ח וגורמים נוספים באוויר, מקורות הפצה מגוונים בסביבה, לרבות חומרים נדיפים הנפלטים מבני אדם השהים בחלל וכן ציוד שאינו רגיש מספיק, כל אלה מקשים על החוקרים להוכיח קשר מובהק להשפעתם של החומרים הנדיפים על הבריאות של השהים בחלל (Veenaas et al., 2020). שימוש בכלים סטטיסטיים בשילוב עם טכנולוגיה מתקדמת לזיהוי וכימות VOCs יכולים לשפר את ניתוח הנתונים והסקת מסקנות מהם. במחקר שיישם כלים אלה נערכה השוואה בין חדרים בהם חוו אנשים בעיות בריאות אשר יכולות להיות קשורות לסביבה הפנים-מבנית לבין חדרים בהם לא נחו בעיות כאלה. הממצאים הראו שבחדרים בהם חוו סימפטומים היו הרבה כימיקלים ופטרוכימיקלים כגון טולואן ובנזן, שמקורם ככל הנראה ברכבים מחוץ למשרד, 2-butoxyethanol שמגיע ממכשירים אלקטרוניים וחומרי ניקוי ו-Cyclohexane שקיים בחומרים רבים, בעוד שבחדרים ללא הסימפטומים נמצאו הרבה תרכובות המשמשות כתוספי טעם וריח כגון לימון. עם זאת הייתה שונות גדולה בריכוזי החומרים בחדרים השונים (Veenaas et al., 2020).

ריאקציות כימיות בסביבה פנים-מבנית

ריאקציות כימיות בסביבה הפנים-מבנית מושפעות מגורמים רבים כגון טמפרטורה, אורור וחומרי ניקיון. אחד המרכיבים באוויר הגורם לריאקציות כימיות הוא אוזון (O_3) המשחרר רדיקל אטומי של חמצן ויוצר הידרוקסיד רדיקל (OH^*) או רדיקלים חופשיים אחרים בריאקציות עם חומרים שונים, כגון פחמימנים אלקנים אשר מגיעים מתרכובות אורגניות מהסביבה החיצונית או מגורמים בתוך

חלל המבנה (Kruza, 2017; Senthilnathan et al., 2018; Weschler, 2000). ריכוז האוזון בסביבה הפנים-מבנית מגיע ל- 20%-70% מריכוזו בסביבה החיצונית כך שכאשר האוויר החיצוני הוא המקור היחיד לאוזון בתוך מבנה לא מדובר על ריכוזים משמעותיים. אולם, ריכוז האוזון יכול לעלות אם נוכחים בתוך המבנה מכשירים אלקטרוניים כגון מדפסות, מכונות צילום ומתקנים המיועדים לטיהור האוויר. מבין אלה האחרונים, הפועלים ע"י שחרור אוזון, הם המשמעותיים יותר ועלולים להביא לריכוז אוזון בתוך מבנה הגבוה מתקני חשיפה מרביים מותרים לציבור הרחב. אוזון ואלדהידים שונים יכולים להקלט ולהאגר על שטח הפנים של רהיטים במשרד, שטיחים וצבע על הקירות וגם על פני גוף האדם שם הם מגיבים עם גליצרולים, אסטרים וחומצות שומן ויוצרים תוצרים משניים שעלולים להיות רעילים יותר מתרכובות האם (Kruza, 2017). (אפקט ה"כור"). מחקרים שנערכו בתנאי מעבדה, במשרדים ריקים ובתי מגורים בכדי לבחון את האינטראקציות של אוזון עם מרכיבים של חומרי ניקוי ומטהרי אוויר איששו את ההשערה שמוצרי ניקוי המכילים טרפנואידים מגיבים עם אוזון ויוצרים פורמאלדהיד וחלקיקים עדינים (fine particulate matter) (Singer et al., 2006).

ביאורוסולים - מיקרואורגניזמים

ביו-אירוסולים מורכבים מכלל החלקיקים הנישאים באוויר ממקור ביולוגי כגון: חיידקים, פטריות, נבגי פטריות, וירוסים ואבקנים וכן תוצרים של מיקרואורגניזמים כגון אנדוטוקסינים ואפלאטוקסינים. גודל החלקיקים יכול לנוע בטווח של $0.5-100 \mu m$ וכאשר הם קיימים בסביבה הפנים-מבנית הם יכולים להשפיע על הנמצאים בה. מקורות לביאורוסולים הינם האנשים השוהים בחלל הפנים-מבני, מערכות האוורור והקירור, אבק אורגני וחומרים המאוחסנים במקום (Kalogerakis et al., 2005; Andualem et al., 2019). חיידקים ופטריות הם גורם משמעותי בסביבה הפנים-מבנית. המקור העיקרי לחיידקים הינם בני האדם, בעיקר פעולות כגון: דיבור, התעטשות ושיעול, הדחת השירותים והליכה. המקורות לפטריות הינם גורמים כגון: מזון, שטיחים, רהיטים, צמחי בית וחיות מחמד. לכאורה הסביבה הפנים-מבנית נחשבת לסביבה בעלת אמצעי בקרה וסינון יחסית לסביבה החיצונית, אך לעיתים דווקא בסביבה זו עלולים להימצא גורמים ביולוגיים המזיקים לאנשים השוהים בה. ריכוזי הביאורוסולים בסביבה הפנים מבנית יהיו תלויים ומושפעים מגורמים סביבתיים אחרים כגון טמפרטורה, לחות, רטיבות ואוורור, זאת מפני שמיקרואורגניזמים זקוקים לתנאי לחות וחום המתאימים להם בכדי להתרבות. מיקרואורגניזמים אשר חולקים סביבת גידול מקיימים יחסי גומלין מסוגים שונים כגון תחרות או סינרגיזם, למשל בסביבה בה הרטיבות גבוהה קיים יתרון לעובש על פני חיידקים. כך, לסוג והרכב המיקרואורגניזמים בסביבה הפנים-מבנית השפעה על ריכוזם בסביבה ועל בני האדם בה. קיים קשר בין ריכוזי

הביוארוסולים הנמצאים בסביבה הפנים-מבנית ואלו הנמצאים בסביבה החיצונית, אך מחקרים מראים שבמקרים רבים ריכוזם בסביבה הפנים-מבנית יהיה גדול יותר מפני שבסביבה זו קיימים מקורות אשר מעלים את ריכוזם (Mentese et al., 2006; Mille-Lindblom et al., 2017; Heo et al., 2009).

רטיבות במבנה יכולה לגרום במקרים רבים להופעה של עובשים אשר עלולים לגרום לאלרגיות ובעיות בנשימה. רטיבות יכולה להעיד גם על נוכחות של קרדית הבית, אנדוטוקסינים ו- β -(1,3) d-glucan וכן על אוורור לקוי (Dales et al., 2008). במאמר סקירה של Mendell ושותפיו (2011) נמצא שיש ראיות רבות על הקשר בין רטיבות במבנה למגוון בעיות נשימה ואלרגיות כגון: אסתמה והחמרה של אסתמה, זיהומים בדרכי הנשימה ונזלת אלרגית (Mendell et al., 2011). במחקר אחר אשר ערך מטא-אנליזה נמצא שרטיבות ועובש קשורים לעלייה ב- 30% עד 80% בבעיות נשימה ואסתמה (Fisk et al., 2007). קשר מובהק נמצא גם בין עובשים (כגון *Curvularia spp* ו- *Cladosporium spp*) לסימפטומים הקשורים בריריות ובעור (Nitmetawong et al., 2020; Sahlberg et al., 2013). β -d-glucan (1,3) הינו מרכיב בדפנות של פטריות, חיידקים גרם חיוביים ועוד, אשר עלול לגרום לדלקות בדרכי הנשימה, עייפות וכאבי ראש ויכול לשמש כאינדיקטור להימצאות עובש בסביבה הפנים-מבנית (Douwes, J, 2005).

קיים קושי להוכיח קשר בין חיידקים לתסמונת הבניין החולה (SBS). שיטות המחקר בהן השתמשו לאורך השנים בכדי לבצע ניטור של הריכוזים וסוגי המיקרואורגניזמים בסביבה היו מוגבלות. תחילה ניתן היה למצוא ולבחון רק את הסוגים אשר גדלו במצע במעבדה. שימוש בשיטות איבחון מתחום הביולוגיה המולקולרית הרחיבו את יכולות הבדיקה למינים נוספים אותם בחנו באמצעות בדיקות PCR, אשר יכולות לזהות מיקרואורגניזמים על ידי DNA גם מדגימות קטנות מאד. בטכניקה זו ניתן היה לזהות טווח מצומצם של מיקרואורגניזמים. הטכנולוגיה השתפרה בהמשך ואיפשרה לבחון בשיטת ריצוף הדור הבא (NGC) ולסרוק טווח רחב של מיקרואורגניזמים בו-זמנית (Massive Parallel Sequencing) ולהצליח להביא את תמונת המיקרואורגניזמים הקרובה ביותר למצוי בשטח. במחקרים שנערכו במלדיה, נאסף אבק מהרצפה ומשטחים של כיתות לימוד ונבחן בשיטות של High throughput amplicon sequencing ו- quantitative PCR. במחקרים אלו זוהו כמה מאות של חיידקים ופטריות מתוכם מספר מינים אשר קשורים להופעת תסמינים שונים כגון יובש בעיניים ובגרון, אסתמה וכאבי ראש ועייפות (ווכטל, 2021; Fu et al., 2020; 2021a; 2021b). תסמינים יכולים להיגרם גם ע"י אנדוטוקסינים שהינם מרכיבים בדופן חיידקים גרם שלילים, שחשיפה להם יכולה לגרום לתסמונת האבק האורגני הרעיל, ברונכיט כרונית וסימפטומים המזכירים אסתמה (Radon, 2006).

כנגד ההשפעות הבריאותיות השליליות, למיקרואורגניזמים קיימת גם השפעה של יכולת הגנה והפחתת תסמינים בבני אדם. היכולת של מיקרואורגניזמים "להגן" מפני תסמינים שונים בחלל הפנים-מבני היא תוצאה של הפרשת חומרים כגון אנדוטוקסינים על ידי חיידקים. מחקרים מראים שלכלל האנדוטוקסינים (ליפו-פוליסכרידים -LPS) יש השפעה מגינה על תסמינים הקשורים באף ובנשימה ואילו אנדוטוקסינים עם שרשרות פחמן קצרות ישפיעו לטובה על תסמינים של הגרון. במחקר שנערך בגרמניה והולנד נמצא בגרמניה שנוכחות גבוהה של אנדוטוקסינים נמצאת ביחס הפוך לסיכון לחלות באסתמה. באופן דומה נמצא בפטריות ש- $(1,3)\text{-}\beta\text{-d-glucan}$ יהווה הגנה במקרי אלרגיה. ממצא מעניין הוא שמרכיבים השייכים למיקרואורגניזמים ימצאו כמגנים מסימפטומים הקשורים בעור ובאף ואילו כלל המיקרואורגניזם יגנו מסימפטומים של עייפות ועיניים (Tischer et al., 2011a; Tischer et al., 2011b; Fu et al., 2020; 2021a; Norbäck et al., 2014; Norbäck et al., 2016).

הקשר בין ביוארוסולים (ובתוכם המיקרואורגניזמים) לתסמינים הקשורים בעבודה בחלל הפנים-מבני מוכר מזה שנים רבות. קשר זה תלוי בגורמים נוספים אשר מרכיבים את איכות הסביבה הפנים מבנית כגון טמפרטורה, אוויר ולחות יחסית. כמו כן, הגורם האנושי משפיע רבות על ריכוזי החיידקים. בעבר, היכולת להוכיח קשר ישיר הייתה נמוכה יחסית, אך כיום עם השיפור באמצעים הטכנולוגיים הוכחו קשרים שליליים וחיוביים בין חיידקים ופטריות ותוצריהם לבין סימפטומים אשר יכולים להיגרם מהסביבה הפנים מבנית (Carrer et al., 2015; Lu et al., 2015; Maula et al., 2017).

צמחייה בבניין

לצמחייה בתוך מבנה יכולה להיות השפעה על איכות סביבת העבודה בכמה אופנים. צמחים ספציפיים הם בעלי פוטנציאל לניקוי האוויר מגורמים מזהמים כדוגמת בנזן או פורמלדהיד בשל התהליכים הביולוגיים השונים שמתרחשים בעת צמיחתם. שורשי צמחים והמערכת המיקרוביאלית המתפתחת סביבם במצעי גידול מסוימים הם בעלי פוטנציאל להפחתת תרכובות אורגניות נדיפות באוויר (Armijos-Moya et al., 2019). מזהם האוויר הנפוץ ביותר במשרדים, ה- CO_2 הנפלט על ידי אנשים המאכלסים את המשרדים, מומר על ידי צמחים במהלך היום בתהליך הפוטוסינתזה לחמצן. לכן צמחים מסוימים ומצעי גידול מסוימים נמצאו יעילים בספיחת גורמים מזהמים ושינוי תרכובות מזהמות לתרכובות שאינן מזהמות וכבעלי פוטנציאל לשיפור איכות האוויר הפנים מבנית.

תרומה נוספת של צמחייה בבניין יכולה להיות בליחלוח האוויר. סביבת עבודה ממוזגת או מחוממת היא גם יבשה יותר ופעמים רבות קשורה ליובש בעיניים וזהו אחד הסימפטומים הנפוצים של עובדי

משרדים בסקרים על איכות סביבת העבודה. מאותה סקירה (Armijos-Moya et al., 2019) עולה גם הפוטנציאל של תרומת צמחייה לרווחת העובדים, הפחתת לחץ, עמדות חיוביות יותר כלפי הארגון והעבודה ופרודוקטיביות גבוהה יותר בסביבת עבודה עם צמחים. ממחקרם של Kim ושות' (2020) עולה כי בכיתות בהם הוצבו צמחים הייתה ירידה משמעותית במזהמים כגון בנזן, אתיל-בנזן וטולואן לאחר 12 שבועות לעומת כיתות בהן לא הוצבו צמחים. כמו כן נמצא כי התלמידים שלמדו בכיתות בהם הוצבו צמחים הראו שיפור בקשב.

ניקיון

ניקיון משפיע על הנוחות של עובדים במרחב העבודה שלהם וכן על נוכחות מזהמים באוויר ובסביבת העבודה כגון אבק או עובשים וחיידקים. כמו כן, ניקיון יכול להשפיע על תפיסת העובדים את מקום העבודה ואת מידת ההשקעה והאיכפתיות של המעסיק כלפיהם. ניקיון לרוב אינו נחקר כגורם נפרד בפני עצמו אלא כחלק מתפיסת איכות הסביבה הפנים-מבנית הכוללת. מחקר שערכו Horrevorts ושותפיה (2018) בדק, בין גורמים נוספים של איכות סביבה פנים-מבנית, את רמת הניקיון (ניקיון משטחים וכמות חלקיקים באוויר) של משרדים של ארגונים ללא כוונת רוח בהולנד. המחקר מצא כי רמת הניקיון במשרד הייתה קשורה חיובית לתפיסת העובדים את מידת הפרודוקטיביות שלהם ולשביעות הרצון שלהם.

שילוב גורמי סביבה והקשרים ביניהם

בסקירה פרטנו את הגורמים הכימיים, הפיזיקאליים והביולוגיים בסביבה הפנים-מבנית כפי שעלו מסקירת הספרות. האדם בסביבה הפנים-מבנית חש בתנאים הנוצרים מן השילוב בין הגורמים כאשר חלק מהם יעצימו את האחרים, למשל שילוב בין טמפרטורה ולחות יחסית גבוהות, ואילו שילובים אחרים יקלו, למשל שילוב של טמפרטורה גבוהה עם תחלופת אוויר גבוהה. ממחקרים שבחנו מספר גורמים שונים הקשורים לאיכות הסביבה ולאיכות הסביבה הנתפסת עולה כי הגורמים קשורים ביניהם. לפי (Bourikas, 2021), תפיסת הרעש לא רק משפיעה על שביעות הרצון הכללית אלא גם הייתה קשורה לנוחות התרמית. Cheung ושותפיו (Cheung et al., 2021) מצאו כי הטמפרטורה המוגדרת כנוחה תלויה בריכוז הפד"ח באוויר. שילוב של פד"ח גבוה עם לחות יחסית נמוכה היו קשורים לתסמינים בעיניים ולירידה בביצועים לטווח קצר (Shan et al., 2016). מחקר אחר מציין את החשיבות בשילוב בין טמפרטורה, לחות ורמת האוורור כמשפיעות על ביצועי העבודה (Veenaas et al., 2020), או השילוב בין טמפרטורה לבין תאורה בהקשר לשביעות רצון מהסביבה (Vimalanathan & Babu, 2014). מחקר נוסף שבחן שביעות רצון מאיכות הסביבה במשרדים מצא כי קושי בהבנת דיבור בשיחה בין אנשים היה קשור לטמפרטורה וכי נוחות תרמית הייתה קשורה

לריכוזי הפד"ח. אחת ההשערות שמעלים החוקרים היא כי גורם אחר כגון מידת הצפיפות של השהים בחלל המבנה משפיע על הטמפרטורה, האוורור, הנוחות האקוסטית ומידת שביעות הרצון מהסביבה (Crosby & Rysanek, 2021). מובן שבמשרד צפוף שבו שוהים אנשים רבים צפוי להיות רעש רב יותר, ריחות לא נעימים ומחנק אם מערכת האוורור לא מספקת רמת אוורור נאותה, וקושי גדול יותר להתאים תנאי תאורה, מיזוג או גישה לחלון לכל אחד ואחת מהעובדים על פי צרכיהם. כך גם סוג הריהוט במשרד קשור לרמות החומרים הנדיפים, ריכוזי האוזון והתגובות הכימיות שנוצרות בין החומרים השונים (Singer et al., 2006). חלק מהקושי המחקרי בתחום נובע מריבוי האינטראקציות האלה בין הגורמים. יחד עם זאת, המחקר מראה כי לסביבה פנים-מבנית ירודה השפעה לרעה על עובדי המשרד, על בריאותם ועל הביצועים שלהם.

חוקים, תקנות ורגולציה במדינת ישראל ובמדינות בעולם

במדינת ישראל אין רגולציה מקיפה להסדרת נושא איכות הסביבה הפנים מבנית בהרחבה, אך ישנם תקנים לחלק מהנושאים השונים בתחום, כגון דרישות אוורור וחשיפה לראדון. "חוק אוויר נקי" נחקק בשנת 2008 ואיתו נרשמו תקנות אוויר נקי (ערכי סביבה לאיכות אוויר). חוק זה אינו מיושם בתוך מבנים. בישראל אין חקיקה ייעודית למניעת "תסמונת הבניין החולה" ולשיפור איכות הסביבה בבניינים בכלל ובמשרדים בפרט. משרדים ממשלתיים לרוב נוגעים בנושא של איכות האוויר הפנימי בצורה עקיפה, הן באמצעות תקנים של איכות האוויר החיצוני הנכנס לתוך המבנה והן באמצעות ועדה לתקינות מוצרי צריכה וריהוט וועדות לבנייה ירוקה. תקנים שונים מפורטים בתקנות התכנון ובנייה, אך חלק מהם לא נאכפים. בתקנות התכנון והבנייה 1970 (בקשה להיתר, תנאיו ואגרות) מצויינת מערכת אוורור מלאכותי, ותקנה 62.2 מפרטת את מספר החלפות אוויר בשעה הדרוש בחדרי מבנים שונים, כאשר לחדרי משרדים, לדוגמה, נקבע מספר מינימלי של שלוש החלפות אוויר בשעה. מפרט מכון התקנים 396 (1993): "אוורור במקומות תעסוקה" מתייחס לשיעורי אספקת האוויר באיכות קבילה במקומות תעסוקה ולדרישה לכניסת אוויר חיצוני למשרדים בקצב של 10 ליטר/שנייה לאדם. בשנת 2011 השיקו המשרד להגנת הסביבה ומכון התקנים גירסה מחודשת לתקן 5281 הדן בבנייה בת קיימא (בנייה ירוקה). מדובר בסדרת תקנים המגדירים מהי בנייה ירוקה בישראל ונכללים בה תשעה תחומים: אנרגיה, קרקע, מים, חומרים, בריאות ורווחה, פסולת, תחבורה, ניהול אתר הבנייה וחדשנות, בהתייחס לסוגים שונים של מבנים: מגורים, משרדים, מוסדות חינוך, תיירות, מוסדות בריאות, מסחר ומבני התקהלות ציבורית. במשך השנים הבאות פורסמו מספר תיקונים לתקן ובשנת 2021 הפך התקן למחייב בכל תוכניות בניין עיר (המשרד להגנת הסביבה, 2021). ביוני 2011 פרסם מכון התקנים הישראלי לביקורת ציבורית את טיוטת תקן

6210 : "אוורור לשמירת איכות אוויר נאותה בתוך מבנים". התקן הישראלי הוא למעשה אימוץ, בשינויים ותוספות, של התקן האמריקני ASHRAE/ANSI 62.1 מהדורה 2010.

לא בכל המדינות המפותחות קיימים תקנים לאיכות סביבה פנים-מבנית, המעוגנים בחוק. הבדלים בין המדינות קשורים גם לתנאי האקלים ולסגנון ורמת החיים בכל מדינה. בארצות הברית אין תקנות פדרליות לעניין איכות האוויר הפנים מבני במגזר הלא תעשייתי, אך יש מספר קטן של מדינות שכללו בתחיקה שלהן הנחיות להבטחת איכות האוויר וטיפול בתסמונת הבניין החולה במבנים שונים כגון בתי ספר ובנייני משרדים, ובהן קליפורניה וניו ג'רסי (N.J.A.C, 2007). קנדה פרסמה נהלים לאיכות הסביבה התוך-מבנית בבנייני משרדים בספח הנקרא Air Indoor Quality in Office Buildings (Technical Guide (Revised 1995), בו נבחנו הגורמים שיש לקחת בחשבון בעת ביצוע מדידה, הציוד והשיטות המשמשים והליכי החקירה. יש צורך בדגימת אוויר של המזהמים הפנימיים השונים כדי לטפל בבעיה של SBS. במקרה של פטריות נימות באוויר הפנימי, הוסכם כי יהיו מדדים מספריים המושפעים מרגישות של אנשים שנחשפו, מכיוון שקשה לקבוע כי הסיכונים הספציפיים והיחסיים הכרוכים, כמו גם הרגישות של אנשים שנחשפו, משתנים. ההנחיות והתקנות המחייבות בפינלנד בנושא אוורור ואקלים תוך-מבני מגדירות את התנאים התרמיים הרצויים בחדרים ששוהים בהם בני-אדם, את קצב זרימת האוויר ואת קצב כניסתו של אוויר צח, על-פי סוג החדר. בנוסף, בשנת 2001 פורסם בפינלנד מסמך הנחיות לשמירה על איכות הסביבה התוך-מבנית, שכותרתו Classification of Indoor Climate 2000-Target Values, Design Guidance and Product Requirement, אך ההנחיות במסמך הן בגדר המלצות ומטרתן לסייע למתכנני המבנים להגדיר יעדים לאיכות הסביבה התוך-מבנית. (ספקטור, 2011).

סיכום

הסקירה מעלה כי לסביבה הפנים-מבנית הפיזית והנחווית יש השפעה על בריאות העובדים, היעדרויות מהעבודה ועל הביצועים שלהם. גורמי סביבה מסוימים כגון טמפרטורה או אוויר מזוהם יכולים להיות מורגשים היטב על ידי אנשים ולעומתם ישנם גורמי סביבה כגון ביוארוסולים, קרינה, וחלק מהחומרים הנדיפים באוויר אשר אינם מזוהים בקלות על ידי השוהים בחדר. אלה גם אלה בעלי פוטנציאל להשפיע על מצבם הבריאותי והרגשי של העובדים ונחוץ ניטור ומעקב אחריהם במשרדים. בסקר אשר נערך ע"י מחלקת המחקר של המוסד"ל נמצא כי שביעות הרצון מאיכות סביבה פנים-מבנית גבוהה בקרב מרבית העובדים במשרדים וחנויות. יחד עם זאת, כשליש מהמדגם דווח על איכות סביבה פנים-מבנית שאינה מיטבית וכמחציתם דיווחו על תסמינים שקשורים לאיכות סביבה פנים-מבנית (דלאשה ושותפיה, 2021). נושא איכות הסביבה הפנים-מבנית והשפעותיה על

העובד אינו נחקר מספיק בישראל ויש להגביר את המודעות אליו ולבצע מחקר על בסיס נתונים שיאספו ממרחבי העבודה הרלוונטיים בישראל.

מקורות

דלאשה, ר. רייס-חבלין, נ., בן-ארי, ח., אגוזי, ל., פרדו, א. (2021). סקר איכות סביבה פנים-מבנית במקומות עבודה. המוסד לבטיחות ולגיהות.
[https://www.osh.org.il/UploadFiles/02_2022/Structural Environment Survey 2021.pdf](https://www.osh.org.il/UploadFiles/02_2022/Structural_Environment_Survey_2021.pdf)

המשרד להגנת הסביבה, (2021). ת"י 5281: התקן הישראלי לבנייה ירוקה.

https://www.gov.il/he/departments/guides/standards_in_israel

<https://www.hylabs.co.il/blog/ngs/> נדלה ב 29.11.21
חוק אוויר נקי, רשומות ספר החוקים 2174, כ"ח בתמוז התשס"ח, 31 ביולי 2008.

https://main.knesset.gov.il/Activity/Legislation/Laws/Pages/LawPrimary.aspx?t=law_laws&st=lawlaws&lawitemid=2000055

[https://www.gov.il/he/departments/legalInfo/clean air law 2008](https://www.gov.il/he/departments/legalInfo/clean_air_law_2008)

חוק התכנון והבנייה (נוסח מלא ומעודכן), תשכ"ה 1965.

https://www.nevo.co.il/law_html/law01/044_001.htm

חיים, א. (2014). השלכותיה של התאורה המלאכותית בלילה על בריאות האדם. בטאון בטיחות 352. המוסד לבטיחות וגיהות, 8-12.

ניסנבאום, א. (2006). תאורה במקומות העבודה היבטי בטיחות וגיהות. המוסד לבטיחות וגיהות.

ספקטור, ש.ב. (2011). איכות אוויר תוך-מבני ו"תסמונת הבניין החולה". הכנסת, מרכז המחקר והמידע.

Adamová, T., Hradecký, J., & Pánek, M. (2020). Volatile organic compounds (VOCs) from wood and wood-based panels: Methods for Evaluation, Potential Health Risks, and Mitigation. *Polymers*, 12(10), 2289.

Al Horr, Y., Arif, M., Kaushik, A., Mazroei, A., Katafygiotou, M., & Elsarrag, E. (2016). Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. *Building and environment*, 105, 369-389.

Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure

study of green and conventional office environments. *Environmental health perspectives*, 124(6), 805-812.

Andualem, Z., Gizaw, Z., Bogale, L., & Dagne, H. (2019). Indoor bacterial load and its correlation to physical indoor air quality parameters in public primary schools. *Multidisciplinary respiratory medicine*, 14(1), 1-7

ANSI/ASHRAE Standard 62-1, 2016. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_62.1_2016

Armijos-Moya, T. A., van den Dobbelsteen, A., Ottele, M., & Bluysen, P. M. (2019). A review of green systems within the indoor environment. *Indoor and built environment*, 28(3), 298-309. doi.org/10.1177/1420326X18783042

ASHRAE Standard 55. Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE Inc., Atlanta, GA.
https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_55_2020

Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U., & Osawa, H. (2018). Effects of low-level inhalation exposure to carbon dioxide in indoor environments: A short review on human health and psychomotor performance. *Environment international*, 121, 51-56.

Barkmann, C., Wessolowski, N., & Schulte-Markwort, M. (2012). Applicability and efficacy of variable light in schools. *Physiology & behavior*, 105(3), 621-627.

Ben-David, T., Rackes, A., & Waring, M. S. (2017). Alternative ventilation strategies in US offices: Saving energy while enhancing work performance, reducing absenteeism, and considering outdoor pollutant exposure tradeoffs. *Building and Environment*, 116, 140-157.

Boubekri, M., Cheung, I. N., Reid, K. J., Wang, C. H., & Zee, P. C. (2014). Impact of windows and daylight exposure on overall health and sleep quality of office workers: a case-control pilot study. *Journal of clinical sleep medicine*, 10(6), 603-611.

Bourikas, L., Gauthier, S., Khor Song En, N., & Xiong, P. (2021). Effect of Thermal, Acoustic and Air Quality Perception Interactions on the Comfort and Satisfaction of People in Office Buildings. *Energies*, 14(2), 333.

Carrer, P., Wargocki, P., Fanetti, A., Bischof, W., Fernandes, E. D. O., Hartmann, T., Kephelopoulos, S., Palkonen S., & Seppänen, O. (2015). What does the scientific literature tell us about the ventilation–health relationship in public and residential buildings?. *Building and Environment*, 94, 273-286.

Cheung, T., Schiavon, S., Graham, L. T., & Tham, K. W. (2021). Occupant satisfaction with the indoor environment in seven commercial buildings in Singapore. *Building and Environment*, 188, 107443.

- Chin, J. Y., Godwin, C., Parker, E., Robins, T., Lewis, T., Harbin, P., & Batterman, S. (2014). Levels and sources of volatile organic compounds in homes of children with asthma. *Indoor air*, 24(4), 403-415.
- Conson, K. H., Li, M., Chan, V., & Lai, A. C. (2014). Influence of mechanical ventilation system on indoor carbon dioxide and particulate matter concentration. *Building and environment*, 76, 73-80.
- Crosby, S., & Rysanek, A. (2021). Correlations between thermal satisfaction and non-thermal conditions of indoor environmental quality: Bayesian inference of a field study of offices. *Journal of Building Engineering*, 35, 102051.2
- Dales, R., Liu, L., Wheeler, A. J., & Gilbert, N. L. (2008). Quality of indoor residential air and health. *Cmaj*, 179(2), 147-152.
- De Simone, M., & Fajilla, G. (2019). Gender-related differences in perceived productivity and indoor environmental quality acceptance. Results of a questionnaire survey in university workplaces. *Journal of World Architecture*, 3(4).
- Douwes, J. (2005). (1--> 3)-Beta-D-glucans and respiratory health: a review of the scientific evidence. *Indoor air*, 15(3), 160-169.
- Dorizas, P. V., Assimakopoulos, M. N., & Santamouris, M. (2015). A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools. *Environmental monitoring and assessment*, 187(5), 1-18.
- EPA -Environmental Protection Agency, (1991). Indoor Air Facts No. 4 (revised) Sick Building Syndrome. *Air and Radiation (6609J)*. Research and Development (MD-1. 56), United States Environmental Protection Agency.
- Fanger, P. O. (1973). Assessment of man's thermal comfort in practice. *Occupational and Environmental Medicine*, 30(4), 313-324.
- Figueiro, M. G., Steverson, B., Heerwagen, J., Kampschroer, K., Hunter, C. M., Gonzales, K., Plitnick, B., & Rea, M. S. (2017). The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers. *Sleep Health*, 3(3), 204-215.
- Fisk, W. J., Lei-Gomez, Q., & Mendell, M. J. (2007). Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes. *Indoor air*, 17(4), 284-296
- Fostervold, K. I., & Nersveen, J. (2008). Proportions of direct and indirect indoor lighting—The effect on health, well-being and cognitive performance of office workers. *Lighting Research & Technology*, 40(3), 175-200.
- Fu, X., Norbäck, D., Yuan, Q., Li, Y., Zhu, X., Hashim, J. H., Hashim, Z., Ali, F., Zheng, Y.W., Lai X.X., Spangfort, M.D., Deng, Y., & Sun, Y. (2020). Indoor microbiome,

environmental characteristics and asthma among junior high school students in Johor Bahru, Malaysia. *Environment international*, 138, 105664.

Fu, X., Norbäck, D., Yuan, Q., Li, Y., Zhu, X., Hashim, J. H., Hashim, Z., Ali, F., Hu, Q., Deng, D., & Sun, Y. (2021a). Association between indoor microbiome exposure and sick building syndrome (SBS) in junior high schools of Johor Bahru, Malaysia. *Science of The Total Environment*, 753, 141904

Fu, X., Ou, Z., Zhang, M., Meng, Y., Li, Y., Chen, Q., Jiang, J., Zhang, X., Norbäck, D., Zhao, Z., & Sun, Y. (2021b). Classroom microbiome, functional pathways and sick-building syndrome (SBS) in urban and rural schools-Potential roles of indoor microbial amino acids and vitamin metabolites. *Science of the Total Environment*, 795, 148879

Gupta, R., & HOWARD, A. (2018). An empirical investigation of the link between indoor environment and workplace productivity in a UK office building. PLEA 2018 conference, Hong Kong.

Gupta, R., Howard, A., & Zahiri, S. (2020). Defining the link between indoor environment and workplace productivity in a modern UK office building. *Architectural Science Review*, 63(3-4), 248-261.

Grimaldi, S., Partonen, T., Saarni, S. I., Aromaa, A., & Lönnqvist, J. (2008). Indoors illumination and seasonal changes in mood and behavior are associated with the health-related quality of life. *Health and Quality of Life Outcomes*, 6(1), 1-8.

Hedge, A., Erickson, W. A., & Rubin, G. (1996). Predicting sick building syndrome at the individual and aggregate levels. *Environment international*, 22(1), 3-19.

Heo, K. J., Lim, C. E., Kim, H. B., & Lee, B. U. (2017). Effects of human activities on concentrations of culturable bioaerosols in indoor air environments. *Journal of Aerosol Science*, 104, 58-65

Heschong, L., Wright, R. L., & Okura, S. (2002). Daylighting impacts on human performance in school. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 31(2), 101-114.

Hong, T., Kim, J., & Lee, M. (2018). Integrated task performance score for the building occupants based on the CO₂ concentration and indoor climate factors changes. *Applied energy*, 228, 1707-1713.

Hou, J., Sun, Y., Dai, X., Liu, J., Shen, X., Tan, H., Yin, H., Huang, K., Gao, Y., Lai, D., Hong, W., Zhai, X., Norbäck, D., & Chen, Q. (2021). Associations of indoor carbon dioxide concentrations, air temperature, and humidity with perceived air quality and sick building syndrome symptoms in Chinese homes. *Indoor air*. 31:1018-1028.

Houser, K. W., & Esposito, T. (2021). Human-centric lighting: Foundational considerations and a five-step design process. *Frontiers in Neurology*, 12, 25.

Horrevorts, M., Van Ophem, J., & Terpstra, P. (2018). Impact of cleanliness on the productivity of employees. *Facilities*.442-459 .(9/10) 36 <https://doi.org/10.1108/F-02-2017-0018>

Jafari, M. J., Khajevandi, A. A., Najarkola, S. A. M., Yekaninejad, M. S., Pourhoseingholi, M. A., Omid, L., & Kalantary, S. (2015). Association of sick building syndrome with indoor air parameters. *Tanaffos*, 14(1), 55

Kaushik, A. (2019). Development of relationship model between occupant productivity and indoor environmental quality in office buildings in Qatar (Doctoral dissertation, University of Wolverhampton)

Kalogerakis, N., Paschali, D., Lekaditis, V., Pantidou, A., Eleftheriadis, K., & Lazaridis, M. (2005). Indoor air quality—bioaerosol measurements in domestic and office premises. *Journal of Aerosol Science*, 36(5-6), 751-761.

Kim, H., Kim, J., & Hong, T. (2019). A Study of Productivity Loss with the Korean Indoor Temperature Standard in Summer. *Proceedings International Conference on Applied Energy* 597

Kim, H. H., Yeo, I. Y., & Lee, J. Y. (2020). Higher attention capacity after improving indoor air quality by indoor plant placement in elementary school classrooms. *The Horticulture Journal*, UTD-110 p 1-9. doi.org/10.2503/hortj.UTD-110

Kotzias, D., Koistinen, K., Kephelopoulos, S., Schlitt, C., Carrer, P., Maroni, M., Jantunen, J., Cochet, C., Kirchner, S., Lindvall, T., McLaughlin, J., Mølhave, L., Fernandes, E. de. O., & Seifert, B (2005). Critical appraisal of the setting and implementation of indoor exposure limits in the EU. The INDEX project: Final Report. EUR, 21590.

Kruza, M., Lewis, A. C., Morrison, G. C., & Carslaw, N. (2017). Impact of surface ozone interactions on indoor air chemistry: A modeling study. *Indoor Air*, 27(5), 1001-1011

Kwon, M., Remøy, H., & Van den Bogaard, M. (2019). Influential design factors on occupant satisfaction with indoor environment in workplaces. *Building and Environment*, 157, 356-365.

Lan, L., & Lian, Z. (2009). Use of neurobehavioral tests to evaluate the effects of indoor environment quality on productivity. *Building and Environment*, 44(11), 2208-2217.

Langer, S., Ramalho, O., Le Ponner, E., Derbez, M., Kirchner, S., & Mandin, C. (2017). Perceived indoor air quality and its relationship to air pollutants in French dwellings. *Indoor air*, 27(6), 1168-1176.

Lu, C.-Y., Lin, J.-M., Chen, Y.-Y., Chen, Y.-C. (2015). Building-related symptoms among office employees associated with indoor carbon dioxide and total volatile organic compounds. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 12, 5833–5845

- Maddalena, R., Mendell, M. J., Eliseeva, K., Chan, W. R., Sullivan, D. P., Russell, M., Satish, U., & Fisk, W. J. (2015). Effects of ventilation rate per person and per floor area on perceived air quality, sick building syndrome symptoms, and decision-making. *Indoor air*, 25(4), 362-370.
- Madureira, J., Alvim-Ferraz, M. C. M., Rodrigues, S., Gonçalves, C., Azevedo, M. C., Pinto, E., & Mayan, O. (2009). Indoor air quality in schools and health symptoms among Portuguese teachers. *Human and Ecological Risk Assessment*, 15(1), 159-169.
- Maula, H., Hongisto, V., Östman, L., Haapakangas, A., Koskela, H., & Hyönä, J. (2016). The effect of slightly warm temperature on work performance and comfort in open-plan offices—a laboratory study. *Indoor air*, 26(2), 286-297.
- Maula, H., Hongisto, V., Naatula, V., Haapakangas, A., & Koskela, H. (2017). The effect of low ventilation rate with elevated bioeffluent concentration on work performance, perceived indoor air quality, and health symptoms. *Indoor Air*, 27(6), 1141-1153
- Mendell, M. J., Mirer, A. G., Cheung, K., Tong, M., & Douwes, J. (2011). Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: a review of the epidemiologic evidence. *Environmental health perspectives*, 119(6), 748-756
- Mendell, M. J., Eliseeva, E. A., Spears, M., Chan, W. R., Cohn, S., Sullivan, D. P., & Fisk, W. J. (2015). A longitudinal study of ventilation rates in California office buildings and self-reported occupant outcomes including respiratory illness absence. *Building and Environment*, 92, 292-304
- Mentese, S., Arisoy, M., Rad, A. Y., & Güllü, G. (2009). Bacteria and fungi levels in various indoor and outdoor environments in Ankara, Turkey. *Clean—Soil, Air, Water*, 37(6), 487-493
- Mille-Lindblom, C., Fischer, H., & J. Tranvik, L. (2006). Antagonism between bacteria and fungi: substrate competition and a possible tradeoff between fungal growth and tolerance towards bacteria. *Oikos*, 113(2), 233-242.
- Mills, P. R., Tomkins, S. C., & Schlangen, L. J. (2007). The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. *Journal of circadian rhythms*, 5(1), 1-9.
- Mott, M. S., Robinson, D. H., Walden, A., Burnette, J., & Rutherford, A. S. (2012). Illuminating the effects of dynamic lighting on student learning. *Sage Open*, 2(2), 2158244012445585
- Mujan, I., Anđelković, A. S., Munćan, V., Kljajić, M., & Ružić, D. (2019). Influence of indoor environmental quality on human health and productivity-A review. *Journal of cleaner production*, 217, 646-657.

Myatt, T. A., Staudenmayer, J., Adams, K., Walters, M., Rudnick, S. N., & Milton, D. K. (2002). A study of indoor carbon dioxide levels and sick leave among office workers. *Environmental Health*, 1(1), 1-10.

NASA, Global Climate Change, Vital signs, Carbon Dioxide.
<https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>. Last update February 2022
Retrieved 17.3.2022.

Nitmetawong, T., Boonvisut, S., Kallawicha, K., & Chao, H. J. (2020). Effect of indoor environmental quality on building-related symptoms among the residents of apartment-type buildings in Bangkok area. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(10), 2663-2677.

N.J.A.C 12:100-13.1 (2007), Title 12. Department of Labor, Chapter 100. Safety and Health Standards for Public Employees. Subchapter 13. Indoor Air Quality Standard.

Norbäck, D., Markowicz, P., Cai, G. H., Hashim, Z., Ali, F., Zheng, Y. W., Lai, X., Spangfort, M.D., Larsson, L., & Hashim, J. H. (2014). Endotoxin, ergosterol, fungal DNA and allergens in dust from schools in Johor Bahru, Malaysia-associations with asthma and respiratory infections in pupils. *PloS one*, 9(2), e88303.

Norbäck, D., Hashim, J. H., Cai, G. H., Hashim, Z., Ali, F., Bloom, E., & Larsson, L. (2016). Rhinitis, ocular, throat and dermal symptoms, headache and tiredness among students in schools from Johor Bahru, Malaysia: associations with fungal DNA and mycotoxins in classroom dust. *PLoS One*, 11(2), e0147996.

Porras-Salazar, J. A., Schiavon, S., Wargocki, P., Cheung, T., & Tham, K. W. (2021). Meta-analysis of 35 studies examining the effect of indoor temperature on office work performance. *Building and Environment*, 108037.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108037>

Pose-Juan, E., Fernández-Cruz, T., & Simal-Gándara, J. (2016). State of the art on public risk assessment of combined human exposure to multiple chemical contaminants. *Trends in Food Science & Technology*, 55, 11-28.

Radon, K. (2006). The two sides of the "endotoxin coin". *Occupational and environmental medicine*, 63(1), 73-78.

Sadick, A. M., & Issa, M. H. (2017). Occupants' indoor environmental quality satisfaction factors as measures of school teachers' well-being. *Building and Environment*, 119, 99-109.

Sahlberg, B., Gunnbjörnsdóttir, M., Soon, A., Jogi, R., Gislason, T., Wieslander, G., Janson C., & Norback, D. (2013). Airborne molds and bacteria, microbial volatile organic compounds (MVOC), plasticizers and formaldehyde in dwellings in three North European cities in relation to sick building syndrome (SBS). *Science of the total environment*, 444, 433-440.

Salthammer, T. (2020). Emerging indoor pollutants. *International journal of hygiene and environmental health*, 224, 113423.

Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671-1677.

Seppanen, O., Fisk, W. J., & Lei, Q. H. (2006). Room temperature and productivity in office work. <https://escholarship.org/content/qt9bw3n707/qt9bw3n707.pdf>

Senthilnathan, J., Kim, K. H., Kim, J. C., Lee, J. H., & Song, H. N. (2018). Indoor air pollution, sorbent selection, and analytical techniques for volatile organic compounds. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 12(4), 289-310.

Seppänen, O. A., & Fisk, W. (2006). Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. *Hvac&R Research*, 12(4), 957-973

Shan, X., Zhou, J., Chang, V.W.C., Yang, E.-H., 2016. Comparing mixing and displacement ventilation in tutorial rooms: students' thermal comfort, sick building syndromes, and short-term performance. *Build. Environ.* 102, 128–137.

Shin, H. Y., & Kim, J. T. (2009). Effects of task lighting on the subjects' performance and satisfaction; related to correlate color temperature and illuminance. In 9th International Healthy Buildings Conference and Exhibition, HB 2009.

Singer, B. C., Coleman, B. K., Destailats, H., Hodgson, A. T., Lunden, M. M., Weschler, C. J., & Nazaroff, W. W. (2006). Indoor secondary pollutants from cleaning product and air freshener use in the presence of ozone. *Atmospheric Environment*, 40(35), 6696-6710.

Stephens, E.R., Darley, E.F., Taylor, O.C., Scott, W.E., 1961. Photochemical reaction products in air pollution. *International Journal of Air and Water Pollution* 4, 79–100.

Strøm-Tejse, P., Weschler, C. J., Wargocki, P., Myśków, D., & Zarzycka, J. (2008). The influence of ozone on self-evaluation of symptoms in a simulated aircraft cabin. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 18(3), 272-281.

Sundell, J., Levin, H., Nazaroff, W. W., Cain, W. S., Fisk, W. J., Grimsrud, D. T., Gyntelberg, F., Li, Y., Persily A.K., Pickering, A.C., Samet, J.M., Spengler, J. D., Taylor, S. T., & Weschler, C. J. (2011). Ventilation rates and health: multidisciplinary review of the scientific literature. *Indoor air*, 21(3), 191-204

Takigawa, T., Wang, B. L., Saijo, Y., Morimoto, K., Nakayama, K., Tanaka, M, Shibata, E., Yoshimura, Y., Chikara, H., Ogino, K., & Kishi, R. (2010). Relationship between indoor chemical concentrations and subjective symptoms associated with sick

building syndrome in newly built houses in Japan. *International archives of occupational and environmental health*, 83(2), 225-235.

Tanabe, S. I., Iwahashi, Y., & Tsushima, S. (2012). Indoor environment and productivity in offices under mandatory electricity savings after the great east Japan earthquake. In 10th International Conference on Healthy Buildings 2012 (pp. 2077-2082).

The National Academies of Sciences Engineering Medicine (2011) Efforts Needed To Ensure That Climate Mitigation Initiatives Do Not Cause Or Worsen Health Problems Linked To Indoor Air Quality.

<https://www.nationalacademies.org/onpinews/newsitem.aspx?RecordID=13115>.

Tischer, C., Chen, C. M., & Heinrich, J. (2011a). Association between domestic mould and mould components, and asthma and allergy in children: a systematic review. *European Respiratory Journal*, 38(4), 812-824.

Tischer, C., Gehring, U., Chen, C. M., Kerkhof, M., Koppelman, G., Sausenthaler, S. O., Herbarth, B., Schaaf, I., Lehmann, U., Kraemer, D., Berdel, A., von Berg, C.P., Bauer, S., Koletzko, H-E., Wichmann, B., Brunekreef, & Heinrich, J. (2011b). Respiratory health in children, and indoor exposure to (1, 3)- β -D-glucan, EPS mould components and endotoxin. *European Respiratory Journal*, 37(5), 1050-1059.

Tsai, D. H., Lin, J. S., & Chan, C. C. (2012). Office workers' sick building syndrome and indoor carbon dioxide concentrations. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 9(5), 345-351.

Veenaas, C., Ripszam, M., Glas, B., Liljelind, I., Claeson, A. S., & Haglund, P. (2020). Differences in chemical composition of indoor air in rooms associated/not associated with building related symptoms. *Science of The Total Environment*, 720, 137444.

Vimalanathan, K., & Babu, T. R. (2014). The effect of indoor office environment on the work performance, health and well-being of office workers. *Journal of environmental health science and engineering*, 12(1), 1-8.

Viola, A. U., James, L. M., Schlangen, L. J., & Dijk, D. J. (2008). Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 297-306.

Wargocki, P. (2013). The effects of ventilation in homes on health. *International Journal of Ventilation*, 12(2), 101-118

Weschler, C. J. (2000). Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor air*, 10(4), 269-288

Wiegand, D. M. (2013). Lighting, Indoor Environmental Quality Concerns, and Job Stress at a Call Center-California. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health.

Wolkoff, P., Azuma, K., & Carrer, P. (2021). Health, work performance, and risk of infection in office-like environments: The role of indoor temperature, air humidity, and ventilation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 233, 113709

Xu an, X. (2018). Study of indoor environmental quality and occupant overall comfort and productivity in LEED-and non-LEED-certified healthcare settings. *Indoor and Built Environment*, 27(4), 544-560.

-