

מדע אזרחי ושיתוף ציבור בסוגיות בריאות וסביבה: המקרה של סקר גז הראדון בבתי ספר

יעלה גולומביק, אלין פרי, מקסים שפאק, אנדריי צפאלוב,
קוסטה (קונסטנטין) קובלר, דני בן-צבי, אילת ברעם-צברי*

תקציר. מדע אזרחי הוא סוגת מחקר המשלבת אזרחים מתנדבים בביצוע מחקר מדעי ויוצרת הזדמנויות לערב את הציבור במדע. מאמר זה בוחן כיצד עקרונות המדע האזרחי פועלים לקידום יתרונות לבעלי עניין שונים, ובכללם המשתתפים, המדענים והחברה בכללותה, במסגרת סקר הראדון – פרויקט מדע אזרחי לזיהוי ומדידה של ריכוזי גז ראדון במבנים בישראל. למאמר שתי מטרות מחקר. מטרתו המדעית היא למדוד את ריכוזי הראדון במבנים בישראל ולבחון את היתכנות מיפוי הראדון באמצעות מדע אזרחי. מטרתו החינוכית היא להבין מהם תהליכי הלמידה שעברו תלמידי בתי ספר שהשתתפו בפרויקט, שכלל התנסות במחקר, עריכת מדידות וניתוח נתונים. מתודולוגיית המחקר מבוססת על ראיונות עם המורות והמורים שהפעילו את סקר הראדון בבתי הספר (n=8) ועל שאלוני משוב של התלמידים (n=112). המאמר מתאר את הגברת המודעות בקרב תלמידים לנושאים סביבתיים ואת הפיכתם לסוכני שינוי בחברתם המקומית. ממצאים אלו מדגישים את חשיבות המדע אזרחי למיפוי ראדון בישראל, להעלאת מודעות סביבתית, לפיתוח למידה חווייתית וללקיחת אחריות אישית, וכן את האתגרים שבמיזמים כאלה.

מילות מפתח: מדע אזרחי, ראדון, בריאות הציבור, למידת חקר, מודעות סביבתית

* ד"ר יעלה גולומביק, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב אלין פרי, החוג למדעי הלמידה וההוראה, אוניברסיטת חיפה
מקסים שפאק, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון
ד"ר אנדריי צפאלוב, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון
פרופ' קוסטה (קונסטנטין) קובלר, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, הטכניון

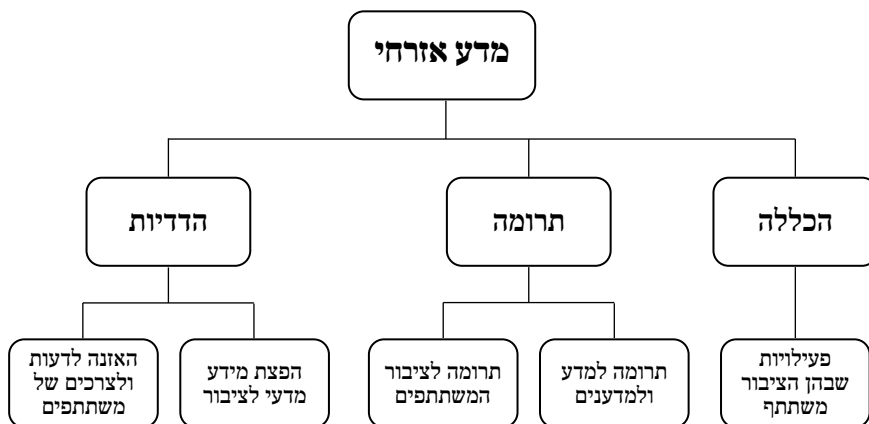
פרופ' דני בן-צבי, החוג למדעי הלמידה וההוראה, אוניברסיטת חיפה
פרופ' אילת ברעם-צברי, הפקולטה לחינוך למדע וטכנולוגיה, הטכניון
מחקר זה נתמך על ידי המרכז לקידום מדע אזרחי בבית הספר (TCSS – Taking Citizen Science to School) והקרן הלאומית למדע (2678/17). אנו רוצים להודות לכל המורות והמורים שהשתתפו במחקר זה, על העבודה הרבה שהושקעה בהובלת סקר הראדון בבית ספרם ועל מסירותם לנושא סביבתי חשוב.

מבוא ורציונל המחקר

מדע אזרחי הוא סוגת מחקר שמתפתחת במהירות בעולם בעשור האחרון, שבמסגרתה אזרחים מתנדבים עוסקים במחקר מדעי (גולומביק ואחרים, 2015). סוגה זו כוללת פרויקטים במגוון תחומים, מאסטרופיזיקה ועד אקולוגיה, ומקיפה יוזמות מקומיות לצד מיזמים חובקי עולם. המשתתפים בהם לוקחים חלק בפעילויות מחקר כגון ניטור מגוון ביולוגי, סיווג תמונות, מיפוי צמחים פולשניים, דיווח על מפגעים סביבתיים, ניטור איכות מים ואוויר, ועוד. בכך תורם המדע האזרחי לאיסוף נתונים מדעיים, לגיבוש מאגרי מידע ולפיתוח הידע המדעי (Bonney et al., 2014).

אך מדע אזרחי הוא הרבה מעבר לאוסף פרקטיקות מדעיות שהציבור מעורב בהן. בכוחו לקדם שיח בין אזרחים ומדענים, לקדם דמוקרטיזציה של המדע, להביא להעצמת אזרחים, ולעודד את שיתוף הציבור באופן פעיל בסוגיות מדעיות וחברתיות אותנטיות. על כן יישומו והשלכותיו חשובים למדע ולחברה כאחד (Mahr et al., 2018). עוצמתו של המדע האזרחי נובעת משינוי הדרך שבה נוצר הידע המדעי ומהפיכתו לרלוונטי, שקוף ונגיש לאנשים שאינם מומחים (Cooper & Lewenstein, 2016). עם זאת, הפוטנציאל הטמון בכך לא תמיד יוצא מן הכוח אל הפועל, שכן חלק מהמדענים רואים במדע אזרחי כלי חינוכי בלבד (דרך "לחנך את הציבור הבור") במקרה הטוב, או כלי שרת תועלתני המספק "עוזרי מחקר בחינם" במקרה הרע (Golumbic et al., 2017).

הספרות מייחסת למדע האזרחי שלושה מאפיינים עיקריים: הכללה, תרומה והדדיות (ראו איור 1). הכללה פירושה פעילויות מחקר מדעי שבהן הציבור יכול להשתתף כך שיש לו השפעה על הנעשה בפרויקט המחקר, וכל אדם – גם נטול השכלה מדעית – יכול להיות שותף פעיל במחקר. תרומה פירושה התועלת הטמונה בהשתתפות במדע אזרחי למדע ולמדענים מצד אחד, ולציבור המשתתפים מצד שני. ולבסוף, הדדיות פירושה מערכת היחסים בין ציבור המשתתפים ובין המדענים, ותקשורת דו-כיוונית שבה כל צד מתייחס בכבוד לצד האחר ונתרם מפעילותו. שלושה מאפיינים אלו ממחישים את פוטנציאל



תרומתו של המדע האזרחי למדע, לחברה ולמשתתפים כאנשים פרטיים (Shirk et al., 2012), אך מבהירים גם את האתגרים הטמונים בו – שינוי מערכות היחסים בין מדענים ובין הציבור, וניצול של המשתתפים לאיסוף נתונים ללא תמורה (Mahr et al., 2018).

ייחודיותו של המדע האזרחי מעלה את השאלה מהי התרומה בפועל של מדע אזרחי ומיהם הנהגים העיקריים מהשתתפות הציבור במחקר. רוב המחקר שנעשה בהקשר זה מתייחס באופן צר לתרומת המדע האזרחי, ומתמקד בדרך כלל רק בתוצר הסופי ורק בהיבט אחד של התרומה הפוטנציאלית, כגון תרומה למדע או תרומה ללמידה של הציבור.

למאמר זה שתי מטרות מחקר עיקריות, האחת מדעית והשנייה חינוכית. מטרתנו המדעית היא למדוד את ריכוזי הראדון במבנים במדינת ישראל ולבחון את ההיתכנות של מיפוי ריכוזים אלו בעזרת שילוב תלמידים' במדידות באמצעות כלי המדע האזרחי. מבחינה זו אנו שואלים מהם ריכוזי הראדון בישראל כפי שעולה ממדידות סקר הראדון, והאם וכיצד אפשר למפות את ריכוזי הראדון בישראל באמצעות מדע אזרחי. מטרתנו החינוכית היא להבין את תהליכי הלמידה שעוברים תלמידים המשתתפים בסקר הראדון. מבחינה זו אנו שואלים מהם הגורמים המעורבים בתהליכי הלמידה של התלמידים, והאם וכיצד הם תומכים בפיתוח מודעות חברתית וסביבתית. לבסוף, אנו מבקשים לקשור בין שתי המטרות ולדון בשאלה אם קיימות סינרגיות או מחלוקות בין המטרות המדעיות של פרויקט מדע אזרחי ובין מטרותיו החינוכיות.

חלקו הראשון של המאמר סוקר את הספרות העוסקת במדע אזרחי בהקשר של סביבה, סכנות גז הראדון ותרומת המדע האזרחי ללמידה. לאחר מכן מתואר שדה המחקר – סקר הראדון בישראל, אוכלוסיית המחקר, מהלך המחקר במסגרת הפעלת הסקר בבתי הספר, ואיסוף וניתוח נתונים. פרק הממצאים מפרט את הממצאים המדעיים והחינוכיים ומציג את הגורמים המעורבים בתהליכי למידה ומודעות סביבתית. חלקו האחרון של המאמר דן בתמיכתם של גורמים אלו בשלושה תהליכי משנה – לימודי, חברתי וסביבתי – ובקשיים ובמתחים שעלו במהלך עריכת המחקר.

סקירת ספרות

מדע אזרחי ותרומתו למדע ולחקר מפגעים סביבתיים

השתתפות פעילה של ציבורים שונים במחקר, בעיקר בנושאים סביבתיים כמו מפגעי ריח וזיהומי אוויר ומים, יכולה לאפשר לאזרחים לקחת אחריות על סביבתם, ולכוון את נושאי המחקר כך שיהיו רלוונטיים לחיי היומיום שלהם ויאפשרו מציאת פתרונות למפגעים סביבתיים. בהקשר זה, משבר המים שאירע לאחרונה בעיר פלינט במדינת מישיגן בארצות הברית הוא דוגמה לסיפור הצלחה (Pieper et al., 2018). לפני שנים אחדות החליפו בפלינט את מקור מי השתייה על מנת לחסוך בהוצאות. זמן קצר לאחר מכן הבחינו התושבים המקומיים שמי הברז כתומים וחלודים, ואף דיווחו על מפגעים בריאותיים כמו שיער דליל, נגעים בעור ותחלואת ילדים. רופאים מקומיים שיערו שמדובר בתופעות של

הרעלת עופרת, אך הרשויות המקומיות התעלמו מכך וטענו שלא נמצאו כל חריגות במי השתייה.

בהתארגנות קהילתית רחבת היקף, אשר כללה תושבים וראשי קהילות, רופאים ומנהיגים מקומיים, בנו התושבים רשת אזרחית לבחינת הנושא. הם פנו לחוקרים מאוניברסיטת וירג'יניה טק, ואלה סייעו להם לאסוף דגימות של מי שתייה בבתיהם ולערוך בדיקות של איכות המים. הדגימות נותחו על ידי חוקרים במעבדה, והתוצאות איששו את חששות הציבור והוכיחו כי אכן יש במים ריכוזים גבוהים של עופרת. הדבר זכה לתשומת לב רבה בתקשורת, ובעקבות זאת נוצר לחץ ציבורי רב למצוא פתרונות, לשפר את איכות המים ולקבוע רגולציות בנושא. כך, פרויקט שהחל ביוזמה מקומית ובאסוף נתונים פשוטי יחסית הפך עד מהרה למרכיב מרכזי בדיון הפוליטי בארצות הברית על יחסי כוחות בחברה ועל ההגדרה מיהו מומחה (Cooper & Lewenstein, 2016). מחד גיסא זהו סיפור על כישלון הגורמים הרגולטוריים בשמירה על בריאות התושבים; מאידך גיסא זהו סיפור על כוחן של התארגנויות מדעיות וחברתיות העושות שימוש במדע אזרחי, ועל יכולתן לסייע בזיהוי מפגעים בריאותיים, לאסוף נתונים מהימנים לגביהם, ולהשתמש בהם באמצעות העלאת המודעות לבעיה ומציאת פתרונות. העלאת המודעות לנושא אף הובילה לשינוי במדיניות המשרד האמריקני להגנת הסביבה (EPA) ולהקמת מיזמים נוספים של מדע אזרחי, הבוחנים את חשיפת האוכלוסייה לעופרת במי שתייה (Redmon et al., 2020) ומנטרים מפגעים סביבתיים נוספים בסביבות אזרחיים מגורים.

נוסף על בדיקות של איכות המים, מיזמים רבים של מדע אזרחי מבצעים ניטור קצר טווח וארוך טווח של איכות האוויר. המיזמים נבדלים זה מזה באופני הפעלתם ובשיטות הניטור, וכוללים שימוש בחיישני ספיחה פסיביים, חיישנים ניידים או לבישים, וביצוע ניטור ביולוגי לזיהוי השפעות זיהום אוויר על חזויות וצמחים (Constant, 2018). פיתוח טכנולוגיות חדשניות לניטור אוויר בסיוע מתנדבים מאפשר הקמת מערך משלים למערך הניטור של הרשויות, ומספק הבנה מעמיקה יותר של איכות האוויר במקומות שונים בארץ ובעולם. נוסף על כך, במקרים רבים מיזמי מדע אזרחי פועלים להנגשת נתוני ניטור אוויר לציבור הרחב ובכך מאפשרים לתושבים לפעול לצמצום חשיפתם האישית לזיהום אוויר (Golubic et al., 2019).

כפי שעולה מדוגמאות אלו ואחרות, בכוחו של המדע אזרחי לתרום לציבור בכללותו הן ברמה האישית הן ברמה הציבורית. עם זאת, חשוב לציין שמדע אזרחי טומן בחובו גם אתגרים רבים שבגללם הוא מורכב ומאתגר לביצוע – למשל חוסר מיומנות של אנשים שאינם מומחים, שיטות מדידה פשטניות שלעיתים אינן עומדות בתקנים סטנדרטיים, וחוסר תום לב של בעלי אינטרסים. אלה עלולים לגרום לחוסר אמון במדע האזרחי ובשיטותיו ולדחיית התוצאות של מיזמו בכל הנוגע לקידום מדע ומדיניות (Ottinger, 2016). כך למשל, סידרתא רוי ומארק אדוארדס (Roy & Edwards, 2019) מתארים דילמות אתיות שנתקלו בהן במיזמי מדע אזרחי, אשר נבעו משימוש מוטעה בנתוני מדע אזרחי לאחר שהוכרו מצב החירום בעיר פלינט והוזרמו כספים לטיפול בתשתיות המים. הם מראים כיצד בעלי אינטרסים יכולים לנצל את חוסר מומחיותו של הציבור ולעודד אותו להשתמש במכשירי מדידה לא תקינים או לנתח נתונים באופן שגוי, וכך לעוות את תוצאות המדידה ולהעמיק את חוסר האמון של הציבור במדענים וברשויות.

המקרה של חקר גז הראדון ומדידתו בכלי מדע אזרחי

ראדון הוא גז רדיואקטיבי שנמצא בתוך מבנים. חשיפה ארוכת טווח לריכוזים גבוהים של ראדון עלולה להיות מסוכנת לבריאות ולגרום לסרטן ריאות. היות שלגז הראדון אין טעם, ריח או צבע, זיהויו מורכב וקל להתעלם מנוכחותו. אולם גילוי מוקדם של ריכוזי ראדון גבוהים מאפשר לדיירי לטפל בבעיה ולהגן על בריאותם, ולכן למדידת ריכוזי ראדון יש חשיבות רבה מבחינת בריאות הציבור.

המקורות העיקריים לנוכחות ראדון במבנים הם האדמה עצמה, שבה נוצר הראדון, וחומרי בניין שמיוצרים ממינרלים המופקים מבטן האדמה. בשל כך ראדון נמצא בכל מבנה, אך בדרך כלל ריכוזו בקומות קרקע ובמרתפים גבוה יותר מאשר בקומות העליונות. הסקר האחרון של גז הראדון בישראל נערך בשנת 1998 וכלל 1800 דיגמות מרחבי הארץ. בדוח הסקר נמצא כי אזורים גיאוגרפיים מסוימים ובהם ירושלים, מעלה אדומים, כרמיאל וערד הם בעלי תוחלת גבוהה לראדון (המשרד לאיכות הסביבה, 2003). מאז חלו שינויים שעשויים להשפיע על ריכוזי הראדון במבנים, ובהם התפתחות טכנולוגיות בנייה, החלתם של תקני בנייה חדשים בישראל, עלייה בהיקף השימוש במזגנים בבתים פרטיים המעלה את קצב החלפת האוויר במבנים, וגידול במספר חדרי המ"ד (Tsapalov & Kovler, 2018b). עם זאת, מאז הסקר האחרון לא נערך עוד סקר ראדון לאומי, בעיקר בשל היעדר תקציבים. אמנם נערכות בדיקות ראדון על ידי אנשי מקצוע לפני אכלוס מבנים (על פי דרישת החוק) או ביוזמתם של תושבים מודאגים, אך הבדיקות האלה מספקות תמונה חלקית בלבד של פיזור הראדון בישראל והן אינן מאפשרות השוואה לממצאי הסקר הלאומי הישן. נוסף על כך, מדידת ראדון על ידי בעל מקצוע עצמאי היא יקרה, ולכן אינה זמינה לקהל הרחב.

בשל כך, המטרה הראשונה של מחקר זה היא לבחון את ההיתכנות של מדידת ראדון באמצעות מדע אזרחי, בעזרת תלמידים שמודדים ראדון בבתיהם, אגב לימוד הנושא והעלאת המודעות כלפיו. קיימים בעולם מיזמים אחדים של מדע אזרחי הבוחנים ריכוזי ראדון במבנים. בפרויקט שנערך באלברטה שבקנדה קנו בעלי בתים ערכות למדידת ראדון בעלות של 45 דולר; הם חשפו בבתיהם את חיישני הספיחה שבערכות ושלחו אותם בדואר לחוקרים לניתוח הדגימות (Stanley et al., 2017). פרויקט אחר, שגם הוא נערך בקנדה, מאפשר לתושבים לשאול חיישני ראדון דיגיטליים ללא עלות מספריות מקומיות ולמדוד בעצמם את ריכוזי הראדון בבתים לאורך זמן (Friesen, 2020).

מודעות ציבורית לסיכוני גז הראדון וביצוע בדיקות ביתיות

אפשר לבצע התערבויות לטיפול בראדון במבנים, למשל אוורור או שימוש במזגן, ולהפחית את הסיכונים הבריאותיים הקשורים לראדון. עם זאת, ייתכן שחסרה הבנה מעמיקה של נושא זה בקרב האוכלוסייה, הן בשל טבעו של הגז – שכאמור הוא חסר טעם, ריח וצבע – הן בשל היעדר השלכות בריאותיות מיידיות ונראות לעין (McLaughlin, 2012). גם בקרב בעלי בתים, שעשויים להיות מודאגים מסיכונים בריאותיים הקשורים לראדון, נמצא כי רק שיעור קטן מבצע בדיקות ראדון הלכה למעשה. סיבה אפשרית לכך היא היעדר מודעות לגבי התערבויות מנע ויעילותן בהפחתת ריכוזי ראדון במבנים (Rosenthal, 2011).

אחד הגורמים העיקריים לשיפור המודעות הציבורית לסיכוני הראדון הוא תקשורת סיכונים, כלומר יידוע אוכלוסיית היעד בסכנות הראדון ובפעולות המנע שאפשר לעשותן כדי לצמצם את הסיכון (למשל בדיקות ביתיות). יעילותה של תקשורת סיכונים תלויה במאמץ השיתופי הכרוך בה, כלומר בשילובם של אנשי מקצוע העוסקים בקרינה ובאפידמיולוגיה ובשילובם של מומחי תקשורת כגון פסיכולוגים ועיתונאים (McLaughlin, 2012).

במחקר שנערך באנגליה נמצא שהמודעות לראדון עלתה ומספר הבדיקות שנערכו על ידי תושבים גדל לאחר שנערך קמפיין מקומי להעלאת המודעות לראדון (Poortinga et al., 2011). במחקר אחר, שנערך בקרב רוכשי בתים בארבע מדינות בארצות הברית, נמצא כי במדינות שבהן חלה מדיניות התראות שחייבה את הקונים, המוכרים וסוכני הנדל"ן לקבל חוברת הסברה על ראדון ולחתום על מסמך שמאשר כי נערכה (או לא נערכה) בדיקת ראדון בבית, היו המשתתפים במחקר מודעים יותר לבעיות הבריאות הקשורות לחשיפה לראדון (Neri et al., 2018). עוד נמצא כי משיבים שנטו יותר לבצע בדיקת ראדון בביתם דיווחו כי שמעו בעבר על בעיות בריאות הקשורות לראדון.

בישראל לא מתבצעות כיום מספיק בדיקות ראדון בבתים, הן בשל חוסר תקציב ממשלתי הן בשל העלות הגבוהה של הבדיקה לבעלי בתים פרטיים. שימוש במדע אזרחי עשוי להיות פתרון אפשרי לשתי בעיות אלו. נוסף על כך, אפשר לצפות כי בשל העיסוק האקטיבי של המשתתפים בביצוע הבדיקה (בהשוואה להזמנת בעל מקצוע לשם בדיקה כזאת), ובשל העיון וניתוח הנתונים שעליהם לבצע, תגבר מודעותם של המשתתפים לסיכוני הראדון ולפעולות המנע האפשריות.

מדע אזרחי ותרומתו ללמידה

עד כה עסקנו בתרומת המדע האזרחי למדע, לסביבה, וכן להעלאת המודעות לנושאים סביבתיים ולצמצום החשיפה האישית של משתתפים למפגעים סביבתיים. נוסף על תרומות אלו, המדע האזרחי תורם גם ללמידה ולרכישת מיומנויות מדעיות (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2018). למידה באמצעות מדע אזרחי עשויה להשפיע על היבטים אפקטיביים (מה אנשים מרגישים), היבטים קוגניטיביים (מה אנשים יודעים) והיבטים התנהגותיים (מה אנשים עושים) (Phillips et al., 2012).

למדע אזרחי יש פוטנציאל רב לקידום הוראת המדעים בבתי הספר, לשילוב תלמידים בתהליכי חקר, ולפיתוח אוריינות מדעית ואוריינות נתונים (גולומביק, 2018). אוריינות אלו כוללות את היכולת להשתמש בידע ובהבנה של עקרונות מדעיים וסטטיסטיים כדי להבין את העולם סביבנו ולקבל החלטות מושכלות. מחקרים רבים מדווחים כי תלמידים שהשתתפו במיזמי מדע אזרחי הפיקו תוצרי למידה חשובים, כגון למידת תוכן מדעי, שיפור החשיבה המדעית, וכן עלייה במודעות ובאחריות האישית כלפי הסביבה (ראו למשל Ballard et al., 2017; Phillips et al., 2019). תוצרי למידה אלו קשורים ישירות למטרות הפרויקט ולחוויות המשתתפים בו. לדוגמה, באמצעות בחינה חוזרת של מאגרי נתונים וזיהוי דפוסים בהם, המשתתפים עשויים לפתח מיומנויות של זיהוי תבניות (Jennett et al., 2016). בהקשר הסביבתי נמצא כי השתתפות תלמידים במיזמי ניטור הובילה לגיבוש מודעות ותחושת סוכנות המאופיינת בשלושה תוצרי למידה: למידת תוכן מדעי וסביבתי

ופיתוח מיומנויות חקר, הזדהות עם פרקטיקות אלו, ושימוש בידע ובמיומנויות הסביבתיות כבסיס ליצירת שינוי (Ballard et al., 2017).

לעיתים אפשר לזהות תוצרי למידה באופן מיידי, כתוצאה ישירה של תוכנית או פעילות מוגדרת, אך במקרים אחרים הלמידה היא תהליך מורכב המשלב בנייה והרחבה של ידע, הבנה ומיומנויות. אף על פי כן, מחקרים של תוצרי למידה במדע אזרחי מתייחסים לעיתים לתוצרים סופיים בלבד ולא לתהליך שהביא לתוצרים אלו. במאמר זה אנו בוחנים למידה כתהליך ולא כתוצר סופי. למידה כתהליך כוללת מעורבות פעילה של הלומדים והבניית ידע אגב התבוננות, שיחה וקישור בין רעיונות חדשים לתובנות קודמות (Glassman, 2001). ביקשנו לבחון כיצד השתתפות בפרויקט מדע אזרחי סביבתי עשויה לעורר תהליכי למידה משמעותיים, וכן לתאר את הגורמים המעורבים בתהליכים אלו ואת האתגרים והקשיים שבדרך. יש בכך מן התרומה לספרות המקצועית העוסקת בתהליכי למידה בכלל ובלמידה באמצעות מדע אזרחי בפרט, והרחבה של המסגרת התיאורטית העוסקת ביתרונות המדע האזרחי ובאתגרו למשתתפים, למדענים ולחברה.

שיטת המחקר

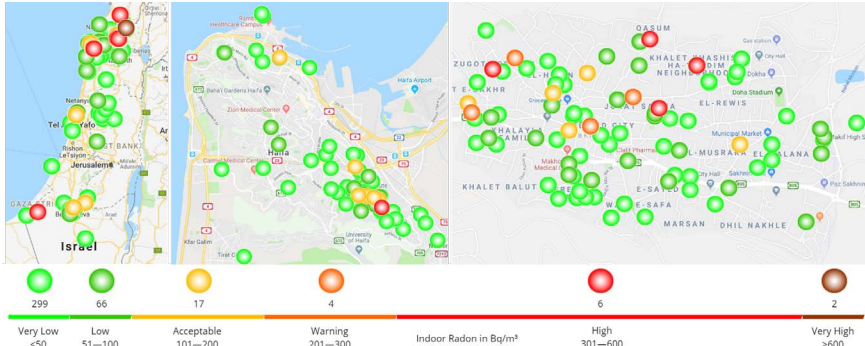
המחקר כלל מרכיב אמפירי מדעי ומרכיב סוציולוגי איכותני, המתבונן על תהליך המחקר המדעי באמצעות כלי הערכה וחקר. בפרק זה נציג תחילה את סקר הראדון, השדה שבו נערך המחקר. נמשיך בתיאור הפעלתו של הסקר בבתי ספר, אוכלוסיית המחקר, מהלך המחקר ותהליך איסוף הנתונים וניתוחם.

שדה המחקר: סקר הראדון

מחקר זה נערך במסגרת סקר הראדון – פרויקט מדע אזרחי לזיהוי ומדידה של ריכוזי ראדון במבנים בישראל, היוצר שיתופי פעולה בין צוותי הוראה, תלמידים וחוקרים מהאקדמיה. סקר הראדון הוא יוזמה של חוקרי המכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון, בשיתוף פעולה עם חוקרי מרכז המצוינות המחקרית לקידום מדע אזרחי בבית הספר (TCSS, Taking Citizen Science to School) (המכון הלאומי לחקר הבנייה, 2020); המרכז לקידום מדע אזרחי בבית הספר, ל"ת). מטרתו למפות את ריכוזי הראדון במבנים בישראל בעזרת שיתוף הציבור בביצוע המדידות ומתוך כך לספק לתושבים מידע על צמצום החשיפה האישית לראדון. המשתתפים מודדים את ריכוזי הראדון בבתיהם, ללא צורך במומחה, בעזרת אמצעי מדידה זול ובמהלך פשוט – חשיפת בקבוקון פחם פעיל בחדר הנבדק למשך ארבעה או חמישה ימים.

ההכנה והניתוח של הדגימות נעשים על ידי חוקרי המכון הלאומי לחקר הבנייה, בבדיקת מעבדה: תכולת בקבוקון הפחם הפעיל מועברת לגלאי קרינה, שמזהה את תוצרי פירוק גז הראדון ומאפשר לכמת את ריכוזי הראדון בכל דגימה. מדידות אלו מסייעות להרחיב את ידיעותיהם של מדענים בנוגע לשיטות למדידת ראדון לטווח קצר וארוך. הסטייה היחסית של המדידה (או שיעור אי-הוודאות) עומדת על 25%, ערך נמוך מספיק כדי לקבל תמונת מצב מהימנה על ריכוזי הראדון ולזהות סביבות שבהן יש ריכוזי ראדון חריגים. התוצאות

של מדידות הראדון נמסרות למשתתפים וכן מועלות למפה ציבורית באתר הפרויקט (ראו איור 2). ריכוזי הראדון במפה מסומנים בצבע: ירוק פירושו ריכוזי ראדון נמוכים מאוד, ואילו אדום פירושו ריכוזים גבוהים מאוד. החלון השמאלי במפה מציג את ריכוזי הראדון בכל הארץ. החלון האמצעי והימני מציגים את ריכוזי הראדון באזור חיפה ובאזור סחנין, שבהם נערכו מדידות רבות. המספרים מתחת לעיגולים הצבעוניים מייצגים שכיחויות מוחלטות.



איור 2. מפת תוצאות של כ-400 מדידות ראדון מרחבי הארץ. RadonMap

הפעלת סקר הראדון בבתי ספר

לצורך השתתפותם של תלמידים בסקר הראדון, חיברו כותבי מאמר זה יחידת לימוד שנועדה ללוות את הפרויקט ולסייע להוראת הנושא בכיתה על ידי מורי מדעים. יחידת הלימוד כוללת את הרקע התוכני, מקשרת את נושא הראדון לתוכניות הלימודים הקיימות ומציגה שמונה שיעורים מובנים שמלווים את כל שלבי החקר, ובהם הצעות לפעילויות ולדיונים שהמורים יכולים לקיים עם תלמידיהם. יחידת הלימוד נעזרת בפדגוגיה חדשנית של למידה באמצעות עזרים טכנולוגיים ולמידה שיתופית בקבוצות. התלמידים נחשפים למדע אזרחי ולסקר הראדון, מכירים את גז הראדון וסכנותיו, לומדים כיצד מודדים אותו, ועורכים מדידות בבתיהם. הדגימות נשלחות לניתוח במעבדה בטכניון, ולאחריהן מקבלים התלמידים את תוצאותיהם ומנתחים את הנתונים באמצעות תוכנת CODAP². כך משתף סקר הראדון תלמידים במחקר סביבתי אותנטי ומשלב בו למידת חקר מדעי והפעלת שיקולי דעת סטטיסטיים.

מדידת ראדון באמצעות פחם פעיל הוצעה לשימוש בהוראה בבתי ספר ברחבי העולם כבר בשנת 1988 (Downey & Simolunas, 1988) והודגמה באופן מעשי בבתי ספר באיטליה, בשוודיה ועוד. אך בניגוד לסקר הראדון, מחקרים קודמים ערכו מדידות בעיקר בסביבת בית הספר והשתמשו בשיטה בעיקר למטרות לימוד פיזיקה, ולא בהקשר של היבטים סביבתיים כגון הימצאות ראדון במבנים (Esposito et al., 2005; Angell et al., 2012).

2 סביבה דיגיטלית פשוטה לניתוח נתונים, המותאמת לשימושם של תלמידים מכיתות ה ומעלה. הסביבה מסייעת לתלמידים לסכם, להמחיש ולפרש נתונים, וכך לקדם כישורי חקר ושימוש בנתונים לתמיכה בטענות.

אוכלוסיית המחקר ומהלך המחקר

השתתפות בסקר הראדון פורסמה לכלל בתי הספר בישראל באמצעות רשתות של מורי מדעים ומורי סביבה. כל בתי הספר שבחרו להשתתף בפרויקט בשנת הלימודים תש"ף הוזמנו ונתנו את הסכמתם להשתתף במחקר זה. המחקר נערך בשבעה בתי ספר ברחבי הארץ ובחן את התהליכים שעברו 301 תלמידים ותלמידות ב-11 כיתות ז-י, באמצעות עדויות מורותיהם ובאמצעות משובי התלמידים. מדגם המחקר כלל שמונה אנשי חינוך מנוסים (גיל 47.9 ± 6 ; ותק 24.7 ± 6.9 שנים) מבתי הספר הללו, אשר רואיינו לאחר שהשתתפו בסקר הראדון. כמו כן נעשה שימוש בשאלוני משוב שמילאו 112 תלמידים מחמישה בתי ספר (שאר התלמידים לא סיימו את כל שלבי החקר עד מועד כתיבתו של המאמר, ועל כן משוביהם לא נכללו בניחוח הנתונים). איסוף הנתונים נעשה בין ינואר לאפריל 2019. המאפיינים הדמוגרפיים של בתי הספר, והמורות והמורים שהשתתפו במחקר, מתוארים בטבלה 1. המחקר נערך באישור ועדת האתיקה המוסדית של הטכניון (אישור מס' 045-2018) ובהיתר המדען הראשי של משרד החינוך, תשע"ט, מס' 10407. כל המשתתפים הביעו את הסכמתם לקיום הראיונות ולמילוי השאלונים. לאורך המאמר נעשה שימוש בשמות בדויים כדי לשמור על אנונימיות המרואיינים.

טבלה 1. המאפיינים הדמוגרפיים של בתי הספר, והמורות והמורים שהשתתפו בפרויקט

#	שם המורה	תפקיד	גיל	ותק בהוראה	מגזר	מספר תלמידים	שכבת גיל	אזור בארץ
1	שירן	רכות מדעים	45-50	24	יהודי	29 (כיתה אחת)	ז	צפון
2	רואן	מדריכת מדעים בית ספרית (רכות הפרויקט בבית הספר)	45-50	23	ערבי	120 (5 כיתות)	ט	צפון
3	שאקירה*	רכות מדעים – אחת המורות בהדרכתה של רואן	45-50	24	ערבי	30 (כיתה אחת)	ט	צפון
4	חבצלת	רכות מדעים	60-65	37	יהודי	35 (כיתה אחת)	ט	מרכז
5	סונדוס	רכות מדעים	45-50	24	ערבי	28 (כיתה אחת)	ט	צפון
6	נור	רכז פרויקט בשבעה בתי ספר ביישוב ומורה למדעים	50-55	31	ערבי	35 (כיתה אחת)	י	צפון
7	נסרין	מורה למדעים	40-45	11	ערבי	29 (כיתה אחת)	ט	צפון
8	עירית	רכות מדעים	45-50	24	יהודי	25 (כיתה אחת)	ח	דרום
סה"כ:								301 תלמידים (11 כיתות)

* במקרה של המורה שאקירה, תלמידיה היו חלק מפרויקט בית ספרי שכלל חמש כיתות בהדרכתה של רואן. תלמידים אלו לא נספרו פעמיים.

איסוף וניתוח נתונים

ראיונות מובנים למחצה

ראיונות עומק מובנים למחצה עם המורות והמורים המשתתפים התקיימו במהלך הפרויקט או בסיומו, ובהם נבחן התהליך שעברו התלמידים בעת השתתפותם בפרויקט. רוב הראיונות נערכו בטלפון, פרט לריאיון אחד שנערך פנים אל פנים בבית הספר שבו עובדת המורה, לאחר שעות הלימודים ובחדר פרטי ושקט. הראיונות התנהלו בשפה העברית, ארכו כ-40 דקות, והוקלטו ותומללו במלואם. כל ריאיון נפתח בשאלות דמוגרפיות, ועיקרו עסק בתהליך ההוראה בכיתה; במעורבות התלמידים, השתתפותם ותגובותיהם; באתגרים בהוראה ובלמידה; בתוצרי למידה; ובפוטנציאל ההשפעה על התלמידים בנושאים מדעיים וסביבתיים. הראיונות נחתמו במשוב על הפרויקט.

הראיונות נותחו באופן איכותני, באמצעות פירוק של המידע הקיים והרכבתו מחדש ביחידות תוכן בעלות משמעות וזיהוי תמות מרכזיות (Creswell, 2008). מטרת ניתוח זה היא לשפוך אור על התרחשויות ותפיסות קיימות באמצעות התייחסות למשמעויות, להגדרות מושגים ולתיאורים שעלו בראיונות (Berg & Lune, 2012), על פי תיאוריה מעוגנת בשדה המתפתחת מההסברים של המשתתפים ומתייחסת לנקודת מבטם על התופעות המתרחשות (שקדי, 2003). בשלב הראשון, כל אחד מהראיונות המתומללים נקרא על ידי שני מנתחים בלתי תלויים כדי להכיר את תוכן הריאיון ולמצוא בו תמות מרכזיות. אחר כך נעשה ניתוח רוחב (cross-case analysis) לזיהוי תמות משותפות בין הראיונות (Kvale & Brinkmann, 2008).

שאלוני משוב על השתתפות בסקר הראדון

תלמידי הכיתות שסיימו את כל שלבי החקר בסקר הראדון התבקשו למלא שאלון משוב על הפרויקט. השאלון היה אינטרנטי, נשלח אליהם על ידי מורותיהם, וענו עליו בסך הכול 112 תלמידים ותלמידות מארבעה בתי ספר (37% מכלל התלמידים שהשתתפו בסקר הראדון). השאלון כלל שאלות פתוחות בנוגע לשביעות רצון המשתתפים מסקר הראדון – למשל: מה היה החלק המהנה ביותר בפרויקט? האם היית ממליץ לתלמידים בבתי ספר נוספים להשתתף בתוכנית זו? הסבר את תשובתך. השאלון נכתב בעברית וניתנה תמיכתן של המורות למענה עליו, לתלמידים עם קושי בשפה.

ניתוח השאלונים נעשה באמצעות קידוד, שהחל ביצירת קטגוריות המייצגות נושאים אופייניים ושוידך כל תשובה לקטגוריה מתאימה (Strauss & Corbin, 1990). לאחר מעבר של שני מקודדים על תשובות התלמידים, הושגה מהימנות גבוהה בין שופטים (97%) וסוכמו השכיחויות עבור כל קטגוריה. קידוד זה אפשר להציג את תשובות התלמידים באופן כמותי המעיד על מגמות בתחושותיהם ובעמדותיהם עם סיום הפרויקט.

ממצאים

מדידות ראדון

כדי לענות על מטרת המחקר הראשונה – מדידת ריכוזי ראדון בישראל – נאספו במחקר כ-400 מדידות מכל רחבי הארץ לאורך תקופה של שישה חודשים. אלה כללו מדידות מבתי תלמידים וכן מדידות נוספות של משתתפים מתעניינים אחרים. תוצאות המדידות הוצגו במפה מקוונת אינטראקטיבית נגישה לקהל הרחב (איור 2 לעיל), ובה מופיעים ריכוזי הראדון מדורגים על פי סולם צבעים בין ירוק לאדום. ניתוח ראשוני של הממצאים העלה כי ב-96% מהמקרים נמדדו ערכי ראדון נמוכים מסף הסיכון (סף הפעולה) המקובל בארץ, העומד על 200 Bq/m^3 לבתים פרטיים ועל 500 Bq/m^3 למקומות עבודה. במילים אחרות, רק במקרים מעטים (כ-12 מקרים, שהם כ-4% מכלל המדידות) נמצאו רמות חריגות של גז ראדון (ראו טבלה 2). במקרים החריגים הומלץ לבצע מדידות ארוכות טווח באמצעות מכשור לניטור רציף כדי לוודא את המסקנה שהעלתה המדידה קצרת הטווח. פיזור ריכוזי הראדון תואם את ההתפלגות הלוג-נורמלית (log-normal distribution), שבה מספר הדגימות הגדול ביותר הוא של ריכוז ראדון נמוך מאוד ומספר קטן של דגימות הן של ריכוז ראדון גבוה. ריכוז הראדון הממוצע שהתקבל הוא 45.4 Bq/m^3 , החציון הוא 26.4 Bq/m^3 , וסטיית התקן היא 2.83. ריכוזים אלו נמוכים משמעותית מריכוזי התקן הישראלי. עם זאת, חשוב לבחון נקודתית את אותם מקומות שבהם נמצאו ריכוזי ראדון גבוהים יחסית. בחינה של סך הדגימות מעלה כי ארבע הדגימות שבהן נמצאו הריכוזים הגבוהים ביותר (מעל 500 Bq/m^3) נלקחו בשוגג ממקלטים או מחדרים אטומים הרמטית, בניגוד להוראות הדגימה, שהנחו את המשתתפים לערוך מדידות בחדרי השינה שלהם. מדידות כאלה אמנם נעשו בניגוד להנחיות המדענים, אך הן ממחישות את החשיבות שבאזורי חדרים ואת הצטברות גז הראדון בחדרים סגורים, ועשויות אף לשקף צורך בהבהרת פרוטוקול הדגימה בהמשך.

טבלה 2. שכיחויות של ריכוזי ראדון כפי שנמדדו בסקר הראדון בין דצמבר 2018 למאי 2019 (n=394). הנתונים כוללים ארבע דגימות אשר נלקחו בניגוד להוראות הדגימה, ובהן התקבלו הערכים הגבוהים ביותר (מעל 500 Bq/m^3).

ריכוז ראדון (Bq/m^3)	תדירות (n)	תדירות (%)	תדירות מצטברת (%)
>50	299	76%	76%
100-51	66	17%	93%
200-101	17	4%	97%
300-201	4	1%	98%
600-301	6	1.5%	99.5%
<600	2	0.5%	100%
סה"כ:	394	100%	

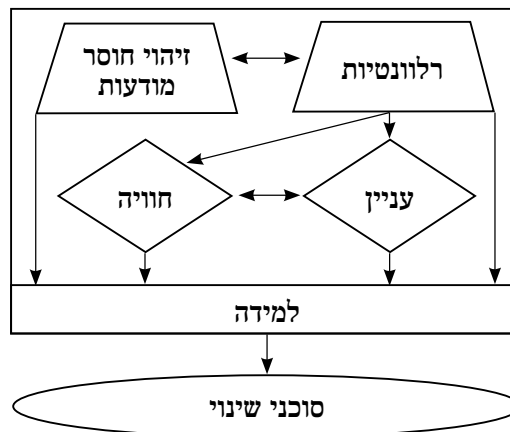
בבתים אחרים שבהם נמצאו ריכוזי ראדון גבוהים מרמת הייחוס הותקנו גלאים ארוכי טווח לזיהוי ולמדידה של ראדון. תוצאות המדידות האלה יאפשרו למדענים להבין מגמות

משתנות בהתפלגות הראדון בבתים לאורך זמן, ויסייעו לדיירים להתגונן מפני התופעה ולטפל בה.

לסיכום, באמצעות השתתפות התלמידים במדע אזרחי, עלה בידינו בתוך זמן קצר יחסית ובעלות נמוכה לערוך מיפוי ראשוני של ריכוזי ראדון בחלקים נרחבים של מדינת ישראל (ראו חלון שמאלי באיור 2). עם זאת, כדי לקבל תמונת מצב מהימנה של ריכוזי הראדון ברחבי הארץ, יש צורך להגדיל את המספר והתפוצה של המדידות באופן שיכסה את כל שטח ישראל וישקף את צפיפות האוכלוסייה לפי שיטת דגימה מבוססת (Tsapalov & Kovler, 2018a). נוסף על כך, מכיוון שהמדידות נעשות במשך זמן קצר בלבד, ומכיוון שהפרשי טמפרטורה ותחלופת אוויר עשויים להשפיע על ריכוזי הראדון, ייתכן שיהיה צורך לחזור על מדידות באותם מקומות בעונות שונות בשנה. בהתחשב בכל הגורמים הללו, אנו מעריכים כי יהיה צורך לערוך בין 2,000 ל-3,000 מדידות בסך הכול, תהליך שלפי הערכותינו יידרשו לו שנתיים או שלוש בהתבסס על מערך המחקר הנוכחי, הכולל שיתוף פעולה עם בתי ספר ושימוש בכלי המדע האזרחי (Tsapalov et al., 2020).

תהליכי למידה בסקר הראדון

חלק זה של פרק הממצאים מתייחס למטרת המחקר השנייה, והוא מתאר את תהליכי הלמידה שעברו תלמידים שהשתתפו בסקר הראדון באמצעות כלי המדע האזרחי. חלק זה מתבסס על ניתוח ראיונות העומק עם המורות והמורים ועל קידוד שאלוני המשוב של התלמידים. ניתוח הנתונים העלה שש תמות שכיחות, שבאו לידי ביטוי בתהליך של ארבעה שלבים ונמצאו קשורות ביחסי גומלין זו לזו. התמות, המוצגות באיור 3, מתארות יחדיו את תהליך הלמידה: התלמידים, שבתחילה היו חסרי מודעות לנושא הראדון, פיתחו עניין בנושא וניסו לקדם את העלאת המודעות אליו בסביבתם. נתאר להלן את שש התמות, בחלוקה לארבעה שלבים שאיפיינו את התהליך: 1. רלוונטיות נושא הראדון וזיהוי חוסר המודעות של תלמידים לנושא, 2. עניין וחוויה של התלמידים, 3. למידה כמדענים אזרחיים, 4. התלמידים כסוכני שינוי.



איור 3. מפת התמות המדגימות את תהליך הלמידה הטיפוסי בסקר הראדון והיחסים ביניהן

רלוונטיות נושא הראדון לחיי התלמידים וזיהוי חוסר מודעותם לנושא

בכל הראיונות תיארו המורות ורכזות הפרויקט את הרלוונטיות של סקר הראדון לחיי התלמידים, ומתוך כך את המוטיבציה הגבוהה של התלמידים לחקור את הנושא לעומק. כבר בחשיפה הראשונית לפרויקט הבינו מרבית התלמידים את החשיבות הטמונה בו מתוקף עיסוקו בנושא הקשור לבריאות. ככל שהעמיקו בלמידה, הרלוונטיות של חקירת הגז – העלול להימצא בבתיהם שלהם – הפכה מובנת יותר עבורם, כפי שעולה מדבריה של המורה סונדוס:

מחצית מהתלמידים, אולי קצת יותר, זה [הפרויקט] ממש הדליק אותם כבר מההתחלה [...]. אחר כך כשלמדו יותר וראו שזה משהו אחר, שיש חשיבות לחיים, ושחשוב שהם יודעים, אז כמעט כולם הראו רצון ללמוד ולהשקיע. פתאום זה היה חשוב להם כי זה היה קשור אליהם.

על הבנת הרלוונטיות של הנושא שהתגבשה בקרב התלמידים אפשר ללמוד גם מדבריהם בשאלוני המשוב שמילאו בסוף הפרויקט. אחד התלמידים כתב: "כיוון שהראדון נמצא כגז רעיל ומסרטן, חשוב לדעת שבאזור המחיה בו אנו חיים יש ריכוז תקין של הגז" (ת27, תלמיד של חבצלת).³

חשיפת התלמידים לנושא הראדון המחישה את חוסר מודעותם לנושא. כשנשאלו במה תרמה להם ההשתתפות בסקר הראדון, 61% מהתלמידים התייחסו לחוסר מודעותם אליו וכן למודעות שפיתחו כתוצאה מהשתתפותם בפרויקט. אחד התלמידים סיפר, "[לפני הפרויקט] לא ידעתי שיש גז ראדון" (ת58, תלמיד של נסרין). תלמידה אחרת הסבירה כי "ההשתתפות בפרויקט תרמה למודעות שלי בנושא. לפני כן, לא שמעתי על הגז הזה, אך עכשיו אני יודעת עליו, על גורמיו ועל השפעותיו יותר" (ת20, תלמידה של חבצלת).

על פי דברי המורות, חוסר המודעות ההתחלתי לנושא הראדון מבלבל את התלמידים. הם מציינים שלא שמעו על גז הראדון קודם לכן, ואינם מבינים כיצד ייתכן שלמרות סכנותיו לא שמעו עליו ושהמודעות לנושא נמוכה כל כך בקרב הציבור, כפי שעולה מדבריה של המורה עירית:

[התלמידים אומרים] "אם יש כאלו נתונים – למה לא אומרים לנו בארץ? למה לא מודיעים? למה אנשים לא יודעים על זה?" [...] הם לא קיבלו את זה. הם אמרו שיש מקרים קיצוניים של מחלות ממש, ולכן צריך להגיד את זה לאנשים, הם צריכים לדעת מזה.

הדיסוננס הזה הוביל את התלמידים לבטא כעס ואכזבה ועורר אצלם שאלות לגבי האחריות להגברת המודעות ולטיפול בנושא מצד התקשורת, הרשויות והשלטונות, כפי שעולה מדבריה של המורה חבצלת:

דיברנו על אחריות של הממשל, על תקינה. התלמידים שאלו שאלות כמו: האם יש תקן? האם בודקים [את רמת הראדון במבנים], האם לא בודקים את זה? והיה ויכוח

3 בציטוטים של תלמידים מצוין בסוגריים מספר התלמיד המצוטט ושם המורה, כדי לתת את ההקשר שבין דברי התלמיד ובין מורתו.

למה לא בודקים את זה. זה [הבדיקה] חובה, לא חובה? היה להם מאוד קשה עם זה [שאינן אחריות של הממשל]. הם לא הבינו למה אם זה מסוכן כל כך – אז למה לא עושים את הבדיקה הזו לכל בניין שבונים [...], למה זה בעצם נתון לאקדמיה ולא משהו שהוא בחוק. היה לי קשה להרגיע אותם בעניין.

עם זיהוי חוסר המודעות של התלמידים לנושא הראדון ותחושת חוסר האונים שמתלווה לכך, עולה אצל התלמידים הרצון ללמוד עוד על הנושא ולקחת חלק בפרויקט. רצון זה מתקשר לשתי התמות הבאות: העניין של התלמידים בנושא, והחוויה שלהם במהלך השתתפותם בפרויקט.

העניין והחוויה של התלמידים

ההבנה כי סקר הראדון רלוונטי לחייהם של התלמידים, והמודעות הגוברת לחשיבותו, הובילו את התלמידים לגלות עניין רב כאשר הופעל הפרויקט בכיתה. העניין שגילו נחלק לשני סוגים – עניין ראשוני ועניין מתמשך, שעלו בשלבים שונים במהלך הפרויקט. העניין הראשוני עלה בעקבות הצגת הפרויקט בכיתה ויצירת מודעות לנושא שטרם נחשפו אליו, והעניין המתמשך עלה לאחר לימוד הנושא באמצעות יחידת הלימוד, שכאמור כללה שימוש בשיטות הוראה חדשניות, בטכנולוגיה ובביצוע מדידות באופן עצמאי על ידי כל תלמיד-חוקר בביתו. חוויית הלמידה מזינה את העניין הראשוני ומונעת את התפוגגותו, כפי שתיארו למשל המורות רואן וחבצלת:

זו יחידת הוראה שהם לא חוו קודם, וזה היה שונה ומהנה. [...] התלמידים מבינים שעכשיו [החקר] זה מעגל וזה בסדר שאנחנו הגענו למשהו [מסקנה], שפותח לנו עוד שאלה. זה משהו שהם חווים שהוא חדש. [...] מעניין אותם חקר אמיתי של איך שהמדענים חוקרים, של איך שהם יכולים להגיע לכל מיני תוצאות לא צפויות. זה גם דבר שהם לא חוו קודם. (רואן)

הם בדקו [ריכוזי ראדון] לא רק אצלם בבית, הם הלכו לבדוק אצל המשפחה. הם רצו אפילו עוד בקבוקונים [עם פחם פעיל]. הם רצו גם להשוות נניח באותו בניין בין שכנים. הם העלו שאלות חקר לפני שבכלל ביצענו את זה [המדידות], מה אפשר לעשות עם זה [התוצאות] ואיפה אפשר לחקור. [אלו] שאלות שהראו גם חשיבה, גם מפתח את החשיבה וגם הראו את העניין שלהם. (חבצלת)

בחלק מבתי הספר היה השימוש בטכנולוגיה נקודת ציון חשובה עבור התלמידים, משום שלא נחשפו קודם לכן לשימוש כזה בטכנולוגיה בלמידה. עבור המורים בבתי הספר הללו זו הייתה הזדמנות להראות את כוחו של הטלפון הנייד ואת השימושים שאפשר לעשות בו מעבר למשחק, כפי שסיפר המורה נור:

אנחנו בבית הספר לא מרשים לתלמידים לבוא עם מכשירי פלאפון, אז אני לקחתי אחריות על עצמי וביקשתי מהתלמידים שיביאו. אנחנו עשינו סקר שאלות על ראדון בחלק מהשיעור, וגם ביקשתי שהם יתחילו לגלוש בפלאפון לחפש חומרים. זו למידה אחרת, אז הם נהנו.

גם התלמידים דיווחו על העניין הרב שחוו בסקר הראדון, בעיקר כשהתייחסו לחשיבות של למידה בדרך חדשנית ושונה. ניכר כי אחת החוויות החשובות בעבורם הייתה ההתנסות הפעילה במחקר מדעי ובביצוע ניסוי – מדידת הראדון באמצעות בקבוקון הפחם הפעיל, שתוצאותיה יישמשו את המדענים, כפי שסיפרה אחת התלמידות: "החלק המהנה ביותר בפרויקט הוא כאשר לקחתי את הבקבוק והנחתי אותו במקום בבית" (ת51, תלמידה של נור). כמו תלמידה זו, 55% מהתלמידים שענו על שאלוני המשוב ציינו כי החלק המהנה ביותר בהשתתפותם היה ביצוע המדידות והתנסות בתהליך חקר כחוקרים, החל בהצבתה של שאלת מחקר וכלה בחקר הנתונים שמדדו בעצמם. עם זאת, יש לציין כי לא כל התלמידים שהשתתפו בסקר הראדון חשבו כי הוא מעניין ומהנה; ארבעה תלמידים (3%) ציינו במשוב שהשתעממו כשנשאלו איך הרגישו במהלך הפרויקט. דוגמה נוספת לעניין שעורר סקר הראדון בקרב התלמידים היא הצלחתה של המורה עינת ליצור עניין בלמידה ובחקר בקרב תלמידות מסוימות שבדרך כלל התקשתה לעניין אותן בנלמד:

היו לנו שלוש או ארבע בנות שהגיעו מהסקטור החרדי, שהן הגיעו עם רמה ממש נמוכה בהרבה מאוד מהמקצועות. פתאום זה [חקר הראדון] מאוד עניין אותן ברמה האישית. "מה, זה באמת? מה, יכול להיות שיש לנו גז רעיל בבית ולא ידוע לנו עליו?" [...] הצלחתי עם הפרויקט לעורר את הסקרנות שלהן, הצלחתי לעניין אותן. זה ממש הדליק אותן, ממש!

החוויה משיטות ההוראה והעניין שגילו התלמידים בנושא הגבירו את רצונם ללמוד עליו עוד כדי להבין טוב יותר את התופעה, ומכאן אנו מגיעים לתמה הבאה – למידה.

למידה כמדענים אזרחיים

כל ארבע התמות שהוזכרו עד כה – רלוונטיות, זיהוי חוסר מודעות, עניין וחוויה – מתקשרות לתמת הלמידה, תוצאת השתתפותם של התלמידים כמדענים אזרחיים בסקר הראדון. למידה זו נחלקת ללמידת תוכן מדעי, רכישת מיומנויות מדעיות, ורכישת מיומנויות חשיבה ולמידה עצמית.

באשר ללמידת תוכן, התלמידים ציינו בשאלוני המשוב את אשר למדו על גז הראדון. כך למשל אחת התלמידות הסבירה כי "הראדון נוצר כתוצאה מהתפרקות היסוד רדיום המצוי בכל סוגי הקרקעות בריכוזים שונים, סמלו הכימי הוא Rn ומספרו האטומי 86" (ת83, תלמידה של נור). תלמיד אחר ענה כי "גז הראדון יוצא מהקירות והסלעים והוא הסיבה השנייה [לתחלואה] בסרטן הריאות" (ת79, תלמיד של נסרין).

לגבי מיומנויות למידה, אמנם לא הייתה מיומנות מסוימת שבלטה במיוחד בתגובות התלמידים, אך הם ציינו כמה מיומנויות חשובות, למשל: "[הסקר] גרם לי לאחריות כשהשתתפתי במחקר ולעשות את כל השלבים בחקר כמו שצריך" (ת73, תלמידה של נסרין); "למדתי לעבוד בצוות ושיתוף פעולה" (ת77, תלמידה של נור); "להסתדר עם קושי לבר" (ת14, תלמיד של חבצלת); "להקשיב להנחיות ויישום בצורה נכונה" (ת57, תלמיד של סונדוס); "לחפש מידע דרך האינטרנט" (ת86, תלמידה של סונדוס).

מיומנויות אלו התפתחו מעבר להקשר של הפעולות הספציפיות שביצעו התלמידים במסגרת הפרויקט והביאו לפיתוח ראשוני של חשיבה מדעית וסטטיסטית. התלמידים החלו להיות ביקורתיים יותר לגבי הנתונים שהתקבלו ואף העלו שאלות לגבי מהימנותם ולגבי היכולת להסתמך עליהם כדי לקבל מסקנות מהימנות, כפי שעולה מדברי המורה עירית: "התלמידים אמרו: וואי איזה באסה, יש לנו רק 24 מדידות, אם הייתה לנו אוכלוסייה [מדגם] יותר גדולה אז המסקנות שלנו היה יותר בתוקף, כי זו אוכלוסייה [מדגם] קטנה". ניכר כי התלמידים עברו תהליך שבו הפכו למעין חוקרים צעירים: הם למדו באופן עצמאי, התנסו בעצמם בחקירה מדעית, ומתוך כך התחילו לפתח מומחיות בנושא. המורה רואן הדגישה בדבריה:

התהליך שהם עוברים הוא תהליך ממש משמעותי כי הוא בא מהם, הם לומדים בעצמם, עושים את הכול בעצמם. הם גם למדו איך ללמוד, כי הם למדו בצורה עצמאית. הם עוברים את התהליך צעד אחר צעד – כל העניין של איך חוקרים, מה חושבים, איך אוספים נתונים.

על אף התהליך שעברו התלמידים, שכלל ניצנים של פיתוח חשיבה מדעית ורכישת מיומנויות למידה אישיות וקבוצתיות, לא בא לידי ביטוי בדבריהם או בדברי המורות פיתוח של מיומנויות מדעיות כגון תכנון ניסוי עצמאי, ניסוח שאלות מחקר או התייחסות לביקורת ולהטיות מוקנות. עם זאת, כפי שהראינו, העיסוק של התלמידים בנושא הביא לפיתוח מודעות לנושא חקר הראדון ולהבנת חשיבותו מתוך למידה והתנסות אישית, והדבר הוביל אותם לשלב האחרון בתהליך: הפיכה לסוכני שינוי.

התלמידים כסוכני שינוי

ניכר כי חוסר האונים שחשו התלמידים בתחילת הפרויקט הביאה אצל חלקם לשינוי אישי (התנהגותי) ולשינוי חברתי (ניסיון להשפיע על הסביבה). המורות והמורים היו עדים לשינויים הללו באופן אישי, ואף שמעו עליהם בסיפורי התלמידים. דבריה של המורה סונדוס מציגים דוגמאות לשני סוגי השינויים האלה:

אני באה בבוקר והדבר הראשון שהם עושים זה שהם מתחילים לפתוח את כל החלונות בחדר הלימוד שלנו כי הם אומרים שחייבים לאוורר ולאוויר טוב. ואנחנו בקומה ראשונה, זה לא מקום שאין אוויר. הם ממש נכנסו לזה. זה [הפרויקט] מאוד חשוב להם [מבחינה] חברתית, סביבתית וגם לימודית. התלמידים הבינו שמה שהם הולכים לעשות, זה משפיע על הסביבה. [...] יש [תלמיד] אחד שאמר לי: "אני עשיתי ישיבה עם כל המשפחה, עם סבא וסבתא, ואמרתי להם – המרתף, שאתם משתמשים בו כחדר שינה, תשנו את זה, הוא לא מתאים לשינה".

גם התלמידים עצמם מעידים על השינוי שעברו במהלך השתתפותם ועל האחריות האישית והחברתית שגיבשו. הם מציינים את מודעותם לסכנה האפשרית, לחשיבות האוורור של הבית ולאחריותם כלפי המשפחה, בית הספר והסביבה. אחת התלמידות אמרה, "קיבלתי

ידע חדש ואיתו אני יכולה לתרום להעלאת המודעות, ויש לי מחויבות למשפחה שלי ולעיר שלי" (תלמידה של נסרין).

במהלך הפרויקט העלו התלמידים רעיונות שבעזרתם יוכלו לבדוק את מידת המודעות במהלך הציבור, והציעו דרכים להעלאת המודעות הקיימת בסביבתם הקרובה. הם אף יזמו פעולות כגון כתיבת שאלון לבחינת מודעות הקהילה ופרסום תוצאות המחקר שלהם באירוע קהילתי. המורה נסרין סיפרה: "התלמידים חיכו להציג את הפוסטרים שלהם במרכז בעיר. היה חשוב להם שהרבה אנשים יחשפו לזה [לנושא]: חברים שלהם, משפחה, אנשים שגרים בעיר וגם העירייה. רצו שזה [האירוע] יהיה מפורסם ושהרבה ישמעו על זה".

דיון

מחקר זה בחן את ההיתכנות של מדידת ראדון באמצעות מדע אזרחי, את תהליך השתתפותם של תלמידים במדידות ואת תוצרי הלמידה שלהם. הוא מתאר הן את תוצאות המדידות ומיפוי ריכוזי הראדון בישראל, הן את השלבים בתהליך הלמידה של תלמידים. אף שהמאמר מציג ממצאים משתי שאלות מחקר נפרדות לכאורה, הצגתם יחד משקפת מחד גיסא את התרומה של השימוש בכלי מדע אזרחי למיפוי ריכוזי ראדון במבנים ברמה הארצית, דהיינו את התרומה למדע ולמדענים במחקרם; ומאידך גיסא את תרומתו של מדע אזרחי לתלמידים (או לאזרחים) המשתתפים, דהיינו לתהליכי למידה ומודעות חינוכית. תרומה משולבת זו, כפי שמודגם במאמר, אפשרית לאור הצרכים השונים של בעלי העניין בפרויקט. המחקר גם תורם להרחבת הידע התיאורטי על יתרונות המדע האזרחי לבעלי עניין שונים, ובהם משתתפים, מדענים והחברה בכללותה, כפי שטוענים ג'ניפר שירק ועמיתיה (Shirk et al., 2012). הוא דן באתגרים ובמתחים בין מטרותיהם של בעלי עניין שונים וקורא לגבש מודל גמיש ודינמי ליישום מדע אזרחי, שיאפשר להשיג מגוון מטרות של קהלים שצורכיהם שונים.

ממצאי המחקר מצביעים על פיתוח מודעות לנושא הראדון בקרב תלמידים ועל גיבושה של אחריות אישית וחברתית להעלאת המודעות בסביבתם, לפחות בטווח הקצר. ממצאים אלו ממחישים את הפוטנציאל הטמון במדע אזרחי למיפוי מפגעים סביבתיים, ואת כוחו להעלות מודעות סביבתית בקרב תושבים, להעצים את הציבור ולעודד אותו לקחת אחריות אישית. אמנם עוד רב המרחק בין פיתוח המודעות המתואר במאמר זה ובין שינוי הלכה למעשה, אך העלאת המודעות לבעיה סביבתית, במקרה זה סכנת חשיפתו של הציבור לריכוזי ראדון גבוהים, היא השלב הראשון וההכרחי להתמודדות עימה (Minkler et al., 2008). האם וכיצד תורם סקר הראדון בפועל לצמצום חשיפתו של הציבור – את זאת יהיה אפשר לבחון ככל שתתבסס ותתרחב פעילותו של הסקר.

את התהליך שעברו התלמידים והתלמידות במהלך השתתפותם בפרויקט ואת תוצרי הלמידה שלו אפשר לחלק לשלושה תהליכי משנה: תהליך לימודי, תהליך חברתי ותהליך סביבתי. התהליך הלימודי מתבטא בלמידת תוכן וברכישת מיומנויות. מורות ותלמידים כאחד הדגישו את הידע הרב שצברו התלמידים לגבי גז הראדון. הלמידה ניזונה מהחוויה שבביצוע העצמאי של הניסוי, ומשיטות ההוראה שתרמו להבנתם של התלמידים את

הנושא. התלמידים אף גיבשו רצון ומוטיבציה ללמידה עצמאית מעבר לתוכן הנלמד בשיעור, וגם יצרו תוצרים פיזיים כגון גרפים ופוסטרים המציגים את ממצאיהם. התהליך החברתי החל בזיהוי חוסר המודעות לנושא הראדון אצל התלמידים, והם העלו שאלות כמו "איך לא ידענו על זה קודם?" וביטאו תחושת חוסר אונים. תחושה זו עוררה אצלם דאגה לחברה, והביאה לשינוי אישי התנהגותי (למשל אורור הכיתה) ולשינוי חברתי (ניסיון להשפיע על הסביבה הקרובה).

התהליך הסביבתי מרחיב את התהליך החברתי: התלמידים השליכו מנושא הראדון אל נושאים אחרים של איכות הסביבה ובריאות הציבור והעלו שאלות כמו "של מי האחריות לשמירה על בריאות התושבים?" ו"איך יכול להיות שיש בעיה כל כך חמורה ואף אחד לא מדבר על זה?". התהליך זה כלל גם לקיחת אחריות אישית על קידום שינוי בסביבה, למשל באמצעות העברת שאלונים בקהילה או כתיבת מכתבים לעיתונות. כלומר, תוך כדי ההשתתפות בפרויקט פיתחו התלמידים תחושת סוכנות – הבנה כי גם להם יש אחריות על הסביבה, וגם הם יכולים לפעול בעניין ולתרום לשינוי.

שלושת התהליכים האלה מרחיבים את תוצרי הלמידה של השתתפות במיזמי מדע אזרחי, שלפי טינה פיליפס ועמיתיה (Phillips et al., 2012) כוללים היבטים קוגניטיביים, אפקטיביים והתנהגותיים. ממצאי מחקרנו ממחישים את ההיבטים הללו הלכה למעשה ומתווים דרך להשגתם. ההתייחסות ללמידה כאל תהליך ולא כאל תוצר סופי מרחיבה את הדיון על תוצרי ההשתתפות במדע אזרחי ומבהירה אילו גורמים מעורבים בתהליך זה: רלוונטיות הנושא, זיהוי חוסר המודעות, גיבוש עניין, חוויה, למידה והפיכה לסוכני שינוי. לגורמים אלו יש חשיבות גם בהקשרים נוספים, והם עשויים לתרום תרומה מעשית להבנה של תוצרי למידה ולעיצוב סביבות למידה מיטביות.

מיזמי מדע אזרחי המנטרים מפגעים סביבתיים מקורם לעיתים קרובות ביוזמה של אזרחים שמזהים צורך במידע או במחקר הנוגע לנושא סביבתי מקומי (Dhillon, 2017). ריק בוני ועמיתותיו (Bonney et al., 2009) הגדירו מיזמים שכאלה כמחקר ביצירה הדדית שמתקיים בה שיתוף פעולה בין אזרחים למדענים במרבית שלבי החקר. סקר הראדון אינו יוזמה של אזרחים אלא של מדענים העוסקים בתחום, והוא משויך לקטגוריה של מחקר מסייע, כזה שמתוכנן בידי מדענים ומערב את הציבור בעיקר בשלב איסוף הנתונים (גולומביק ואחרים, 2015). אף על פי כן, הפעלתו וקידומו של סקר הראדון נעשתה על ידי אזרחים – המורות והמורים, אשר הבינו את חשיבות הנושא והחליטו לחשוף אליו את תלמידיהם. זהו שילוב בין מודל היצירה ההדדית של מדע אזרחי ובין המודל של מחקר מסייע, שבהם משתתפים שונים לוקחים חלק בפרויקט בדרכים שונות ובמידת מעורבות הולכת וגדלה (Haklay, 2013). מעורבות שכזאת יכולה לסייע לעיצובו של פרויקט המחקר מחדש ולהתאמתו לצרכים שעולים מהשטח.

המפגש בין הרצונות והצרכים של מדענים באקדמיה ובין הרצונות, הסקרנות והעניין של הציבור עלול לעורר מתחים. ואכן, במחקר זה היינו עדים למתח שנוצר בין המטרות המדעיות שהוגדרו לפרויקט ובין מטרותיו החינוכיות. התחדדה ההבנה כי למדענים יש מטרה מוגדרת מאוד להשתתפות הציבור בפרויקט, והיא איסוף נתונים שיטתי על ריכוזי ראדון במבנים. מטרה זו לא תמיד עלתה בקנה אחד עם מטרותיו של הציבור שנעזרו בו – התלמידים: אלה ביקשו לדעת מה ריכוזי הראדון במקומות ובתנאים שונים, בהקשר של

סביבתם המקומית. שאלות המחקר, והחקר שנעשה בעקבותיהן, הביאו חלק מהתלמידים לחרוג מן ההוראות שקיבלו לביצוע המדידות. המדענים התאכזבו לגלות כי כמה מדידות שהראו ריכוז ראדון גבוה מהמותר נעשו במקומות שהתלמידים לא התבקשו למדוד בהם, ובתנאים שלא התאימו למדידה לפי הגדרת המחקר של המדענים.

ההתנגשות בין המטרה המדעית למטרה החינוכית וליזומת התלמידים ממחישה את המתח שבין תרומת המדע אזרחי למדע ובין תרומתו למשתתפים. במקרה זה, ההתנגשות בין המטרות הובילה לאפשרות שהמדענים ישתמשו בדיווח שגוי ובמדידות שעלולות להיות לא מהימנות. זוהי למעשה אחת הביקורות העיקריות על מדע אזרחי – חוסר אמינות של הנתונים. נתונים שאין לדעת בוודאות אם אכן נאספו על פי פרוטוקול המחקר עלולים לשבש את תוצאות המחקר, וזוהי אחת הסיבות שמדענים רבים בוחרים שלא לעבוד בשיטה זו (Conrad & Hilchey, 2011). עם זאת, הקשחת הפרוטוקול המדעי באופן שכלל אינו מאפשר לציבור המשתתפים לחרוג ממנו, מגבילה את ציבור המשתתפים ואינה מאפשרת להם להשיג את שלל המטרות שלשמן הצטרפו לפרויקט. מתוך כך מוגבלים גם היתרונות החברתיים של המדע האזרחי וקידום השיח בין מדענים לאזרחים, וגדל הפער בין המחקר באקדמיה ובין צורכי הציבור. על מנת שיהיה אפשר להמשיך ולפתח את תחום המדע אזרחי, להגשים את מגוון היתרונות הטמונים בו ולאפשר לכל בעלי העניין להיתרם ממעורבותם, יש צורך למצוא מודל יישום גמיש המאפשר להשיג מגוון מטרות של קהלים ובעלי עניין שונים בנושא הנחקר. למחקר זה יש כמה מגבלות העלולות להשפיע על השלכתם של הממצאים מן הפרט אל הכלל, בעיקר בתחום החינוכי. ראשית, הוא מציג את תהליך הלמידה של תלמידים במספר קטן יחסית של בתי ספר. המורות שבחרו להשתתף בפרויקט הן מורות ותיקות המשמשות כרכזות מקצוע או כמדריכות מורים, ורובן פעילות סביבה. מכיוון שתוצרי הלמידה של תלמידים קשורים ישירות לניסיון ולאופן ההוראה של המורים, ייתכן כי הפעלת הפרויקט על ידי מורים אחרים לא הייתה מביאה לתוצרים המתוארים במאמר זה. נוסף על כך, מרבית הכיתות שנבחרו להשתתף בפרויקט הן כיתות מדעים, שלתלמידיהן יש עניין במדעים והישגיהם גבוהים מהמוצע. ייתכן כי כיתות אחרות היו מגלות פחות עניין ומחויבות לפרויקט. מגבלה נוספת של המחקר היא הקושי הקצר של הפעלת המיזם בכיתה – כחודש – ומדידת התוצרים החינוכיים אצל התלמידים בסמוך להפעלה בלבד. מחקרי המשך שמתוכננים על ידי המחברים יבחנו תהליכי למידה ארוכים יותר, לאורך חודשים אחדים, ויתבוננו מנקודת זמן מרוחקת בתהליך שעברו התלמידים כדי לזהות השלכות ארוכות טווח.

לסיכום, הממצאים המוצגים במאמר זה מדגימים שימוש במדע אזרחי ושילוב של תלמידים בביצוע מדידות ראדון לשם מיפוי ריכוזי ראדון בישראל. המאמר מבהיר את המורכבות הכרוכה בהפעלת פרויקט כזה בבתי ספר ואת המתחים שבין המטרות המדעיות של הפרויקט למטרותיו החינוכיות. ממצאיו מדגישים את חשיבות המיזם להעלאת המודעות לראדון בקרב תושבים, את תרומתו לקידום מודעות סביבתית וללקיחת אחריות אישית, ואת הצורך בפיתוח מודל יישום גמיש של מדע אזרחי שיאפשר להשיג מטרות מדעיות לצד מטרות חברתיות, חינוכיות וסביבתיות.

ביבליוגרפיה

- גולומביק, יעלה. (2018). למידת חקר באמצעות מדע אזרחי. קריאת ביניים, 31, 19–22.
- גולומביק, יעלה, אילת ברעם-צברי וברק פישביין. (2015). מדע אזרחי: שיתוף הציבור בביצוע מחקר מדעי. אקולוגיה וסביבה, 6(1), 226–235.
- המכון הלאומי לחקר הבנייה. (2020). *מידע על פרויקט ראדון*.
- המרכז לקידום מדע אזרחי בבית הספר. (ל"ת). *פרויקט הראדון יוצא לדרך*.
- המשרד לאיכות הסביבה. (2003, 17 בפברואר). סקר ראדון ארצי 1998. אגף מניעת רעש וקרינה, המשרד לאיכות הסביבה.
- שקדי, אליעזר. (2003). מילים המנסות לגעת: מחקר איכותני – תיאוריה ויישום. רמות.
- Angell, C. T., A. C. Kaplan, J. D. Seelig, E. B. Norman, and M. Pedretti. (2012). Concepts in nuclear science illustrated by experiments with radon. *American Journal of Physics*, 80(1), 61–65.
- Ballard, Heidi L., Colin G. H. Dixon, & Emily M. Harris. (2017). Youth-Focused citizen science: Examining the role of environmental science learning and agency for conservation. *Biological Conservation*, 208, 65–75.
- Berg, Bruce L., & Howard Lune. (2012) *Qualitative research methods for the social sciences* (8th ed.). Pearson.
- Bonney, Rick, Heidi Ballard, Rebecca Jordan, Ellen McCallie, Tina Phillips, Jennifer Shirk, & Candie C. Wilderman. (2009). *Public participation in scientific research: Defining the field and assessing its potential for informal science education*. A CAISE Inquiry Group Report.
- Bonney, Rick, Jennifer Lynn Shirk, Tina B. Phillips, Andrea Wiggins, Heidi L. Ballard, Abraham J. Miller-Rushing, & Julia K. Parrish. (2014). Citizen science: Next steps for citizen science. *Science*, 343(6178), 1436–1437.
- Conrad, Cathy C., & Krista G. Hilchey. (2011). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: Issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176, 273–291.
- Constant, Natasha. (2018). Role of citizen science in air quality monitoring. In Susanne M. Charlesworth & Colin A. Booth (Eds.), *Urban pollution: Science and management* (pp. 303–312). Wiley Blackwell.
- Cooper, Caren B., & Bruce Lewenstein. (2016). Two meanings of citizen science. In Darlene Cavalier & Eric B. Kennedy (Eds.), *The rightful place of science: Citizen science* (pp. 51–62). Consortium for Science, Policy & Outcomes.
- Creswell, John W. (2008). *Research design: Qualitative, quantitative and mixed methods approaches*. Sage.
- Dhillon, Carla May. (2017). Using citizen science in environmental justice: Participation and decision-making in a Southern California waste facility siting conflict. *Local Environment*, 22(12), 1479–1496.

- Downey, Daniel M., & Glenn Simolunas. (1988). Measurement of radon in indoor air: A laboratory exercise. *Journal of Chemical Education*, 65(12), 1042.
- Esposito, Adolfo M., M. Ambrosio, Emilio Balzano, L. Gialanella, Mariagabriella Pugliese, V. Roca, M. Romano, C. Sabbarese, & Gennaro Venoso. (2005). The ENVIRAD project: A way to control and to teach how to protect from high indoor radon level. *International Congress Series*, 1276, 242–244.
- Friesen, Michael. (2020). Critical evaluation of radon detector library lending programs in Canada [Master's research project, Simon Fraser University].
- Glassman, Michael. (2001). Dewey and Vygotsky: Society, experience, and inquiry in educational practice. *Educational Researcher*, 30(4), 3–14.
- Golumbic, Yaela N., Barak Fishbain, & Ayelet Baram-Tsabari. (2019). User centered design of a citizen science air-quality monitoring project. *International Journal of Science Education, Part B*, 9(3), 195–213.
- Golumbic, Yaela N., Daniela Orr, Ayelet Baram-Tsabari, & Barak Fishbain. (2017). Between vision and reality: A study of scientists' views on citizen science. *Citizen Science: Theory and Practice*, 2(1), 1–13.
- Haklay, Muki. (2013). Citizen science and volunteered geographic information – overview and typology of participation. In Daniel Sui, Sarah Elwood, & Michael Goodchild (Eds.), *Crowdsourcing geographic knowledge: Volunteered geographic information (VGI) in theory and practice* (pp. 105–122). Springer.
- Jennett, Charlene, Laure Kloetzer, Daniel K. Schneider, Ioanna Iacovides, Anna L. Cox, Margaret Gold, Brian Fuchs, Alexandra Eveleigh, Kamdem Mathieu, Zahra Ajani, & Yasmin Talsi. (2016). Motivations, learning and creativity in online citizen science. *Journal of Science Communication*, 15(3), Article A05.
- Kvale, Steinar, & Svend Brinkmann. (2008). *InterViews: Learning the craft of qualitative research interviewing*. Sage.
- Mahr, Dana, Claudia Göbel, Alan Irwin, & Katrin Vohland. (2018). Watching or being watched: Enhancing productive discussion between the citizen sciences, the social sciences, and the humanities. In Susanne Hecker, Muki Haklay, Anne Bowser, Zen Makuch, Johannes Vogel, & Aletta Bonn (Eds.), *Citizen science: Innovation in open science, society and policy* (pp. 99–109). University of California Press.
- McLaughlin, James. (2012). Risk communication as a strategic tool to raise awareness of radon health effects and to reduce exposures of the public. *Radiation Emergency Medicine*, 1(1–2), 2–6.
- Minkler, Meredith, Victoria Breckwich Vásquez, Mansoureh Tajik, & Dana Petersen. (2008). Promoting environmental justice through community-based participatory research: The role of community and partnership capacity. *Health Education & Behavior*, 35(1), 119–137.

- National Academies of Sciences Engineering and Medicine. (2018). *Learning through citizen science: Enhancing opportunities by design*. National Academies Press.
- Neri, Antonio, Christina McNaughton, Behnoosh Ramji Momin, Mary Puckett, & M. Shaune Gallaway. (2018). Measuring public knowledge, attitudes, and behaviors related to radon to inform cancer control activities and practices. *Indoor Air*, 28(4), 604–610.
- Ottinger, Gwen. (2016). Social movement-based citizen science. In Darlene Cavalier & Eric B. Kennedy (Eds.), *The rightful place of science: Citizen science* (pp. 89–103). Consortium for Science, Policy & Outcomes.
- Phillips, Tina B., Heidi L. Ballard, Bruce V. Lewenstein, & Rick Bonney. (2019). Engagement in science through citizen science: Moving beyond data collection. *Science Education*, 103(3), 665–690.
- Phillips, Tina, Rick Bonney, & Jennifer L. Shirk. (2012). What is our impact? Toward a unified framework for evaluating impacts of citizen science participation. In Janis L. Dickinson & Rick. Bonney (Eds.), *Citizen science: Public participation in environmental research* (pp. 82–95). Comstock Publishing Associates.
- Pieper, Kelsey J., Rebekah Martin, Min Tang, LeeAnne Walters, Jeffrey Parks, Siddhartha Roy, Christina Devine, & Marc A. Edwards. (2018). Evaluating water lead levels during the Flint water crisis. *Environmental Science & Technology*, 52(15), 8124–8132.
- Poortinga, Wouter, Karin Bronstering, & Simon Lannon. (2011). Awareness and perceptions of the risks of exposure to indoor radon: A population-based approach to evaluate a radon awareness and testing campaign in England and Wales. *Risk Analysis*, 31(11), 1800–1812.
- Redmon, Jennifer Hoponick, Keith E. Levine, Anna M. Aceituno, Kristin Litzenberger, & Jacqueline MacDonald Gibson. (2020). Lead in drinking water at North Carolina childcare centers: Piloting a citizen science-based testing strategy. *Environmental Research*, 183, Article 109126.
- Rosenthal, Sonny. (2011). Measuring knowledge of indoor environmental hazards. *Journal of Environmental Psychology*, 31(2), 137–146.
- Roy, Siddhartha, & Marc Edwards. (2019). Citizen science during the Flint, Michigan federal water emergency: Ethical dilemmas and lessons learned. *Citizen Science: Theory and Practice*, 4(1), Article 12.
- Shirk, Jennifer L., Heidi L. Ballard, Candie C. Wilderman, Tina Phillips, Andrea Wiggins, Rebecca Jordan, Ellen McCallie, Matthew Minarchek, Bruce V. Lewenstein, Marianne E. Krasny, & Rick Bonney. (2012). Public participation in scientific research: A framework for deliberate design. *Ecology and Society*, 17(2), Article 29.

- Stanley, Fintan K. T., Siavash Zarezadeh, Colin D. Dumais, Karin Dumais, Renata MacQueen, Fiona Clement, & Aaron A. Goodarzi. (2017). Comprehensive survey of household radon gas levels and risk factors in southern Alberta. *CMAJ Open*, 5(1), E255–E264.
- Strauss, Anselm, & Juliet Corbin. (1990). *Basics of qualitative research*. Sage.
- Tsapalov, Andrey, & Konstantin Kovler. (2018a). Indoor radon regulation using tabulated values of temporal radon variation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 183, 59–72.
- Tsapalov, Andrey, & Konstantin Kovler. (2018b, May 8–10). *Radon surveys in Israel – problems and solutions* [Conference session]. The 29th Conference of the Nuclear Societies in Israel, Herzliya.
- Tsapalov, Andrey, Konstantin Kovler, Maxim Shpak, E. Shafir, Yaela Golumbic, Aline Peri, Dani Ben-Zvi, Ayelet Baram-Tsabari, Tania Maslov, & Odelia Schrire. (2020). Involving school children in radon surveys by means of the “RadonTest” online system. *Journal of Environmental Radioactivity*, 217, Article 106215.