

# יעילות היערות באזור צחיח למחצה בהפחתת זיהום אוויר (PM) במהלך סופות אבק

דפנה אוני ויצחק קטרה

המחלקה לגיאוגרפיה ופיתוח סביבתי, אוניברסיטת בן גוריון בנגב

## תקציר

תחת סיכון פוטנציאלי של זיהום אוויר בעקבות שימושי קרקע ו/או שינויי אקלים.

**מילות מפתח:** חומר חלקיקי, אבק שוקע, איכות אוויר, שירות אקולוגי.

## מבוא

סופות אבק הן תופעה נפוצה באזורים צחיחים וצחיחים למחצה. סופות אלו מסוגלות להסיע באטמוספירה כמויות אדירות של חומר חלקיקי (Particulate Matter – PM) למרחק רב משטח המקור של החומר. סופות אבק הן מקור עיקרי לחומר חלקיקי באטמוספירה בקנה מידה עולמי (Shao, Wyrwoll, Chappell et al., 2011). ההרכב הכימי (Ganor, Osetinsky, Stupp et al., 2010) והביולוגי (Katra, Arotsker, Krasnov et al., 2014) של האבק המוסע באטמוספירה משפיע הן על הסביבה הפיסית (בליעה ופיזור קרינה סולרית, יצירת עננים) והן על הסביבה האנושית (זיהום אוויר). אמצעי נפוץ למדידת זיהום האוויר הוא מדד לריכוז  $PM_{10}$  – חומר חלקיקי שקוטרו קטן מ-10 מיקרומטר. במהלך סופות אבק זיהום האוויר יכול לזנק בסדרי גודל מעל תקן איכות האוויר שנקבע על ידי ארגון הבריאות העולמי (WHO, 2005), הקובע ממוצע יומי  $> 50$  מיקרוגרם/מ"ק. בישראל, ריכוז  $PM_{10}$  במהלך סופות אבק יכול להגיע לממוצע יומי של 2000 מיקרוגרם/מ"ק ואפילו גבוה יותר בדרום ישראל (Ganor & Foner, 2001; Kalderon-Asael, Erel, Sandler et al., 2009; Krasnov, Katra, Koutrakis et al., 2014).

מחקרים מצאו קשר חיובי בין עליית ריכוז  $PM_{10}$ , שמקורו בסופות אבק לבין מקרי תחלואה: שיעור האשפוזים בבתי חולים בעקבות מחלות נשימה כרוניות (אסטמה ו-COPD), בקרב בני גיל 65 והלאה, עלה ב-1% (0.4%-1.5%) עבור כל עלייה של 10 מיקרוגרם/מ"ק במהלך סופות אבק בצפון הנגב (Vodonos, Friger, Katra et al., 2015). מודלים אטמוספריים חוזים, כי אבק אטמוספרי במזרח אגן הים התיכון (ערב הסעודית, עיראק, סוריה) צפוי לעלות ב-70% בעשור הקרוב כתוצאה מעלייה בטמפרטורת האוויר. בעבודתה של Krasnov ועמיתיה (2016) נמצאה מגמה של עלייה בריכוז היומי והשעתי

סופות אבק הן מקור עיקרי לחומר חלקיקי (particular matter – PM) באטמוספירה, ובכך הן גורמות לעלייה בזיהום האוויר ולהשפעה על בריאות האדם. במהלך סופות אבק ריכוז  $PM_{10}$  (חומר חלקיקי בעל קוטר קטן מ-10 מיקרומטר) יכול להגיע לממוצע יומי של 2000 מיקרוגרם/מ"ק – ריכוז שהוא גבוה פי 40 מהתקן לאיכות אוויר על פי ארגון הבריאות העולמי. מטרת עבודה זו היא לבחון את השפעתם של יערות נטועים באזור צחיח-למחצה על זיהום אוויר במהלך סופות אבק.

ריכוזי אבק אטמוספרי נמדדו במרחב יער להב בצפון הנגב, בסביבה אורבנית הנמצאת בצדו המוגן מרוח של היער (קיבוץ להב) ובסביבה אורבנית הנמצאת במרחק משטח היער (לקייה *القيية*). ריכוזי  $PM_{10}$  נמדדו במרחב היער בתקופת רקע (ללא סופות אבק) ובזמן אמת של סופות אבק באמצעות מדי חלקיקים. במהלך תקופת הרקע היער וסביבתו התאפיינו בריכוזים נמוכים יותר של  $PM_{10}$  (38 מיקרוגרם/מ"ק) בהשוואה לאזור המרוחק מהשפעת היער (54 מיקרוגרם/מ"ק). למרות ההבדל הקטן יחסית, יש לכך חשיבות בחשיפה ארוכת טווח לבריאות האדם. במהלך סופות אבק נמצאה הפחתה בריכוז החומר החלקיקי במרחב היער ובקיבוץ להב. מידת ההשפעה של היער על זיהום האוויר בסביבתו תלויה בגודל הסופה ובכיוון הרוח. בקיבוץ להב ההפחתה הייתה מרבית בסופות מערביות, שבהן הקיבוץ נמצא בצד המוגן מרוח. עם זאת, גם הצד החשוף לרוח, בסמוך ליער, אופיין בריכוז  $PM_{10}$  נמוך ביחס ליישוב לקייה. חלקיקי האבק אשר שוקעים ונצמדים לעלוות עצי האורן (מחטים) נבדקו במעבדה. נמצא כי משקל האבק הכולל על גבי שטח הפנים של מחטי האורן הוא 8.1-9.2 גרם/מ"ר, המסתכמים לערך מינימלי של כ-418 טון אבק לשטח היער כולו אשר הוסר מהאטמוספירה. מסך האבק השוקע, החלק היחסי של  $PM_{10}$ , הוא 41.7%-60.2%.

התוצאות מלמדות על התפקיד של היער בהפחתת ריכוז החומר החלקיקי וכתוצאה מכך איכות האוויר טובה יותר בסביבת היער ובאזורים עירוניים סמוכים. ממצאים אלו יכולים להצביע על שירות מערכת אקולוגי נוסף שהיער מספק ולתמוך בתכניות פיתוח סביבתי באזורים הנמצאים



איור 1: סכמה של ריכוז חומר חלקיקי (PM) במהלך סופות אבק ללא השפעת היער (תמונה עליונה) ועם השפעת היער (תמונה תחתונה).

Figure 1: Scheme of PM distribution following dust storms with no forest effect (upper plate) and with forest effect (lower plate).

הבדלים בזיהום חומר חלקיקי ממקור טבעי (אבק) במרחב של יערות נטועים בצפון הנגב על ידי: (1) ניתוח ריכוזי PM אטמוספרי לאורך ציר במרחב היער, מהצד החשוף לרוח עד הצד המוגן מרוח, כולל סביבות אורבניות סמוכות, במהלך סופות אבק ובימים ללא סופות אבק; (2) כימות אבק שוקע על עלוות העצים במרחב היער לקביעת יכולת הסינון של חומר חלקיקי.

## אתר המחקר

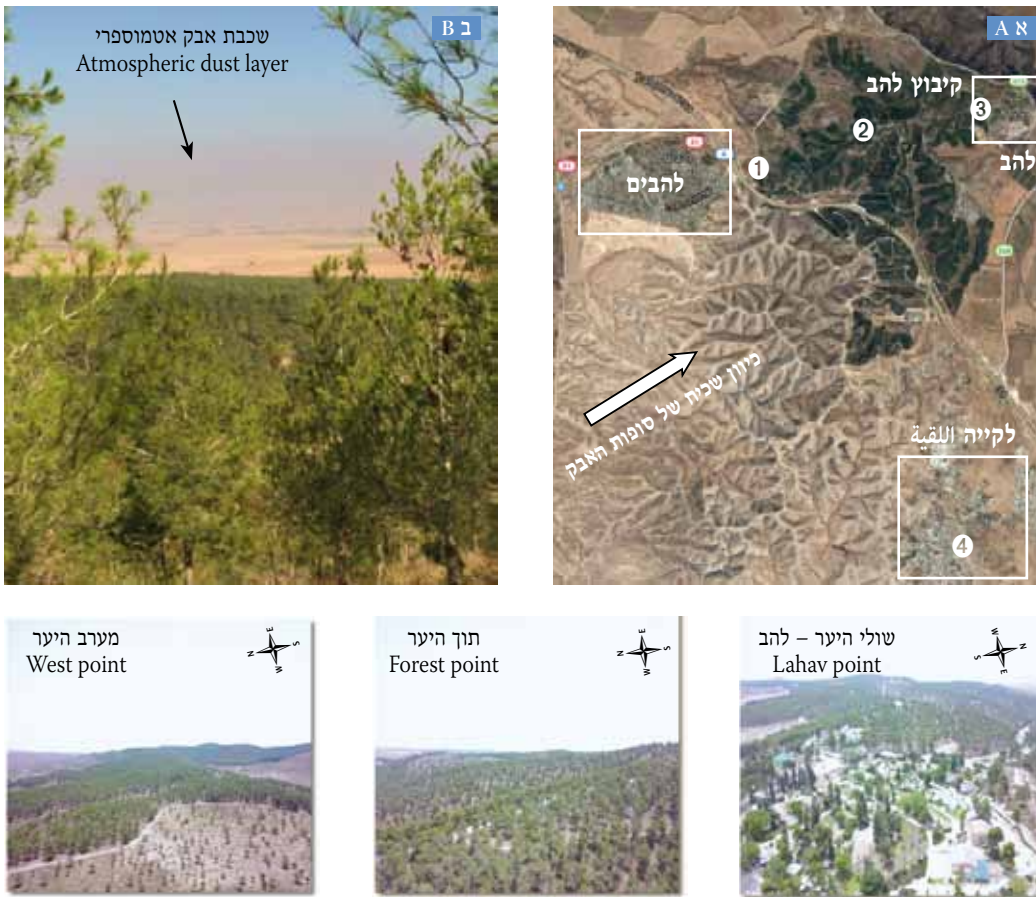
המחקר נערך באזור צפון הנגב. האזור מתאפיין באקלים צחיח למחצה עם ממוצע משקעים של כ-300 מ"מ לשנה, היורדים בעונת הגשמים (ספטמבר עד מאי). סופות אבק מגיעות למזרח אגן הים התיכון בעיקר בעונת החורף ובעונות המעבר על ידי שלוש מערכות סינופטיות עיקריות (Dayan, Heffter, Miller et al., 1991; Kalderon-Asael, Erel, Sandler et al., 2009; Krasnov, Kutra, Koutrakis et al., 2014): (1) שקע קפריסין מכיוון דרום-מערב; (2) אפיק ים סוף מכיוון מזרח; (3) שקע שרבי מכיוון מערב. בין משטחי הלס הטבעיים ושדות הגידולים החקלאיים בולטים כתמים ירוקים בנוף הצהבהב, יער דבירה ויער להב. המחקר התבצע ביער להב בשל מיקומו האידיאלי לבחינת השפעה על יישוב סמוך (קיבוץ להב), במהלך סופות אבק מערביות, שהן הסופות הנפוצות באזור. יער להב הוא יער נטוע טיפוסי לסביבה זו מבחינת מיני העצים, צפיפות וגודל. היער ניטע בשנות ה-50 על ידי קק"ל וכיום משתרע על שטח של כ-30,000 דונם (Dorman, Perevolotsky, Sarris et al., 2015). העץ הדומיננטי אשר ניטע ביערות הנגב באותה התקופה הוא אורן ירושלמי (*Pinus halepensis*), בגלל עמידותו האיתנה מול בצורות והמלחת קרקע (Bernstein, 2010).

של  $PM_{10}$  במהלך סופות אבק מאז 2009, במיוחד בדרום ישראל, ועל כן ישנה התעניינות גוברת בזיהום אוויר שמקורו בסופות אבק באזורים מיושבים בסביבות צחיחות וצחיחות למחצה.

צפון הנגב נמצא בשוליים של חגורת האבק העולמית, המשתרעת ממערב אפריקה עד ערב הסעודית, והוא חשוף לסופות אבק תדירות. בשנים האחרונות, צפון הנגב נמצא תחת תהליכי פיתוח מואץ ובתוך כך צפוי גם גידול באוכלוסיית האזור. למרות היותו אזור צחיח, צפון הנגב מתאפיין בפעולות ייעור ובנטיעת עצים מאז שנות ה-50 (של המאה הקודמת) על ידי קרן קימת לישראל. יערות אלו נחקרו בקנה מידה נרחב ונמצא, כי הם בעלי השפעה על גורמים סביבתיים, כגון רמות פחמן, קרינה סולרית, טמפרטורת האוויר ותכונות הקרקע (Grünzweig, Lin, Rotenberg et al., 2003; Roteberg & Yakir, 2010; Schimel, 2010).

יערות יכולים להיות יעילים בסינון מכני של האוויר. היעילות של העצים בהפחתת הזיהום נקבעת על ידי מאפיינים שונים של העצים, כגון צורתם, גובהם וצפיפותם (Cornelis & Gabriels, 2005). יכולת לכידת חלקיקי אבק על ידי עלוות העצים קשורה למבנה שטח הפנים של העלה: אורך, חספוס ושכיחות פיגויות (Ram, Majumder, Chaudhuri et al., 2014). האבק הנתפס על גבי העלווה יכול להיות משמעותי בהוספת חומרי הזנה למערכת היער לאחר שקיעתו על הקרקע (Koren, Kaufman, Washington et al., 2006). מחקרים הראו, כי צמחייה באזורים עירוניים יעילה בהפחתת זיהום אוויר ממקור תעשייתי (McDonald, Bealey, Fowler et al., 2007; Sæbø, Popek, Nawrot et al., 2012; Popek, Gawronska, Wrochna et al., 2013; Manes, Marando, Capotorti et al., 2016). שנתרך ב-55 ערים בארה"ב מצא, כי יעילות עצים ושיחים מסתכמת בהסרת 214,900 טון בשנה של  $PM_{10}$  מהאטמוספירה (טווח נע בין 84,000-335,800 טון) (Nowak, Crane, & Stevens et al., 2006). בנוסף, נמדד שיפור של איכות האוויר כתוצאה מנוכחות עצים בסן פרנסיסקו (0.05%) ובאטלנטה (0.24%). מודל אשר בחן זיהום אוויר מפליטות תחבורתיות ברומא, באמצעות ריכוזי  $PM_{2.5}$ , מצא כי כמות משמעותית של חומר חלקיקי הוסרה על ידי צמחייה בימים שבהם כיוון הרוח עבר דרך היער העירוני בפאתי רומא (Donateo, Contini, & Belosi et al., 2006). מחקר נוסף ברומא תמך בממצאים אלו ואף הוסיף כי פוטנציאל ההפחתה של צמחייה עירונית הוא מעל 20% לריכוז  $PM_1$  באטמוספירה מזהמת (Fares, Savi, & Fusaro et al., 2016).

למרות הידע שנצבר בנושא זה, עדיין חסר מידע כמותי אודות ההשפעה של יערות על ריכוז חומר חלקיקי באטמו-ספירה שמקורו בסופות אבק. ההשערה הייתה, כי זיהום האוויר ביישובים הסמוכים לאזורים מיוערים בצפון הנגב מופחת בהשוואה ליישובים מרוחקים מיער כתוצאה מסינון של חומר חלקיקי על ידי עצי היער (איור 1). מטרת המחקר היא לבחון



**איור 2:** (א) שטח המחקר ביער להב, צפון הנגב, ישראל, כולל את נקודות המדידה 1-4 לאורך חתך היער. (1) צידו החשוף לרוח של היער - מערב היער (2) תוך היער (3) סביבה אורבנית בקרבת היער - קיבוץ להב (4) סביבה אורבנית במרחק מהיער - לקייה (ב) נוף אופייני מתוך יער להב וברקע שכבת אבק (חומר חלקיקי) באטמוספירה.

**Figure 2:** (A) The northern Negev region (Israel) and the location of study site, including measurement points 1-4 along transect in the study site (1) West point, (2) inside the forest, (3) a built environment that is affected by the forest, (4) a built environment that is not affected by the forest.

בציר המדידה מהכיוון החשוף לרוח עד לאזור המוגן מרוח של היער וכן ביישובים הסמוכים (איור 2ב' נקודות 1-4). במהלך ימי רקע ( $n=30$ ), נמדדו הריכוזים בעונת הקיץ (יולי-אוגוסט), הנחשבת "עונה ללא אבק" בישראל (Krasnov, Katra, Koutrakis et al., 2014). במהלך סופות אבק המדידות התבצעו בין החודשים דצמבר-מאי. מדידת ריכוז PM התבצעה בשטח בזמן אמת, באמצעות מכשיר מדידה נייד (TSI DustTrak DRX 8534) עם חיישן ריכוזי (מיקרוגרם/מ"מ)  $PM_{2.5}$  ו- $PM_{10}$  ברזולוציית קריאה של 1%. מכשיר זה הוא בעל זמן תגובה מהיר ורזולוציה עתית גבוהה (כל 5 שניות), המשמש כלי מדידה מרכזי במחקרי סביבה (Krasnov, Katra, Novack et al., 2015; Irga, Burchett, & Torpy, 2015; Kupiainen, Ritola, Stojiljkovic et al., 2016).

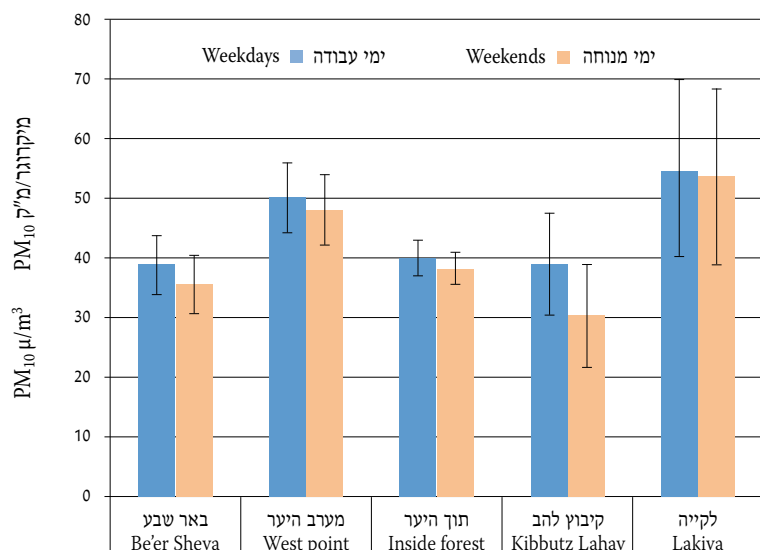
במטרה לבחון את התרומה האנושית לריכוז החומר החלקיקי באטמוספירה, שמקורה לרוב בתעשייה ובתחבורה, נאספו נתוני זיהום אוויר גם מתחנת המדידה המטאורולוגית בבאר שבע (איור 2), המנוהלת על ידי המשרד להגנת הסביבה (www.sviva.gov.il). התחנה המטאורולוגית ממוקמת על גג בניין במרכז העיר ( $34.78132^{\circ}N$ ,  $31.25674^{\circ}E$ ) ומאפשרת מידע היסטורי (משנת 2001) לגבי ריכוז מזהמים שנמדדו בזמן אמת ( $PM$ ,  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $O_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ) ובנוסף מידע אודות משתנים מטאורולוגיים (מהירות וכיוון הרוח,

באתר המחקר הוגדר ציר מדידה במרחב היער בהתייחס לכיוון הדומיננטי שממנו מגיעות סופות האבק. ציר המדידה כלל ארבע נקודות (איור 2): (1) צד מערב של היער החשוף לרוח; (2) תוך היער; (3) הצד המוגן מרוח, קיבוץ להב - יישוב המושפע מנוכחות היער; (4) היישוב לקייה (בערבית אל-ליה) - שאינו מושפע מנוכחות היער. במהלך עונת החורף, בחלוף חזיתות קרות כתוצאה ממעבר של שקע קפריסין, כיוון הרוח של סופות האבק הוא דרום-מערב. בתנאים אלו, יער להב ( $31^{\circ}22'14.9''N$   $34^{\circ}50'59.7''E$ ) מתפקד כ"מגן אבק" עבור קיבוץ להב ( $31^{\circ}22'52.5''N$   $34^{\circ}52'15.2''E$ ). בציר הנ"ל היישוב לקייה ( $31^{\circ}19'28.7''N$   $34^{\circ}51'55.7''E$ ) מהווה שטח ביקורת של סביבה אורבנית החשופה לאותם תנאי סביבה פרט לנוכחות עצי היער. נתונים היסטוריים ונתוני זמן אמת של זיהום האוויר נאספו בציר המדידה, וגם בבאר שבע לצורכי השוואה אזורית וניתוח התוספת האנתרופוגנית לריכוזי חלקיקים אטמוספריים (ראו המשך).

## שיטות המחקר

### 1. מדידות אבק אטמוספרי

ריכוזי החומר החלקיקי באטמוספירה נמדדו במהלך ימי רקע (ללא סופות אבק) ובמהלך סופות אבק. הריכוזים נמדדו



**איור 3:** ריכוז PM<sub>10</sub> ממוצע (n=30) בבאר שבע ובאתר המחקר במהלך תקופת רקע ללא סופות אבק (יולי-אוגוסט 2015-2016) בחלוקה לימי עבודה (א'-ר') ולימי מנוחה (שבת).  
**Figure 3:** Average PM<sub>10</sub> concentrations (n=30, SD values represented by error bars) in Be'er-Sheva and in the study site during a non-dust period (July–August) in 2015 and 2016.

לעומת 35 מיקרוגרם/מ"ק בשבתות (SD= ±4.89), ללא הבדל סטטיסטי מובהק בין שני סוגי הימים (P ≤ 0.05) (איור 3). ההבדלים במוצעים בין יום עבודה ושבת מצביעים על כלל התרומה של פעילות אנושית לריכוזי PM<sub>10</sub>. ניתן ללמוד, כי התוספת של הפעילות האנושית לערכי PM<sub>10</sub> באזור זה מזערית, כפי שנמצא גם בעבודתם של Krasnov ועמיתיה (2016). התוצאות תומכות בהנחה כי מרבית ריכוזי PM בצפון הנגב הם ממקור טבעי, כלומר של הסעת חומר חלקיקי מקרקעות קרובות ורחוקות (Katra, Gross, Swet et al., 2016a; Swet & Katra, 2016; Tanner, Katra, Haim et al., 2016).

ערכי PM בתקופת רקע נמדדו גם בשטח המחקר במהלך החודשים יולי-אוגוסט, שבהם אין סופות אבק, בשנים 2015 ו-2016. ערכי הרקע המופיעים באיור 3 מראים, כי הריכוזים בלקייה (54 מיקרוגרם/מ"ק) גבוהים יותר משמעותית מאשר בקיבוץ להב (38 מיקרוגרם/מ"ק). ההבדל יכול להיות מוסבר בשימושי הקרקע השונים המקיפים את היישובים – קיבוץ להב ממוקם בסמיכות ליער להב בעוד שהיישוב לקייה מוקף בשטחי קרקע פתוחים ובדרכים לא סלולות אשר מהווים מקורות מקומיים לפליטת אבק. ממוצעי PM<sub>10</sub> בנקודת המדידה המערבית (50 מיקרוגרם/מ"ק) ובתוך היער (42 מיקרוגרם/מ"ק) היו גם הם נמוכים יותר מאלה של לקייה. תוצאות אלו של ריכוזי PM במהלך ימים נקיים מאבק באתר המחקר שימשו לתיקון הערכים הנמדדים במהלך סופות אבק (ראו בהמשך) – בכל נקודת מדידה ערך הרקע הממוצע הופחת מהערך הנמדד בזמן סופות אבק.

טמפרטורת האוויר, לחות יחסית). נתונים אלו נותחו ועובדו לטובת השוואה בין ימי עבודה (א'-ר') לבין ימי מנוחה.

## 2. כמויות אבק שוקע

סופות אבק באזור צפון הנגב מאפשרות השקעה של כמויות גדולות מאוד של חומר חלקיקי על פני השטח (Offer, Zaady, & Shachak, 1998; Ganor & Foner, 2001; Katra, Arotsker, & Krasnov et al., 2014). כימות ישיר של כמויות האבק על גבי עלוות האורנים ביער להב התבצע במהלך תקופת האבק (ינואר) ובסוף תקופת האבק (מאי).

עלי מחט של עצי אורן בוגרים נאספו בשלוש נקודות מדידה במרחב היער (נקודות 1-3, איור 2). ענפים בגודל 20 ס"מ נלקחו מגובה 1.5-2 מטר לצורך בדיקות מעבדה (n=180). האבק שהצטבר על גבי העלים נשטף באמצעות מים מזוקקים ומברשת לתוך כוס מדידה. התרחיף (מים ואבק) הוכנס לתנור ייבוש (105°C למשך 24 שעות) לצורך שקילת האבק הנותר בכוס. מסת האבק השוקע ליחידת שטח של עלים (גרם/מ"ר) חושבה על ידי מספר העלים אשר מכסים שטח מישורי של 1 מטר רבוע (n=50).

חלקיקי האבק נבדקו במעבדה לצורך אפיון תכונות החומר. התפלגות גודל חלקיקים נבדקה באמצעות טכניקת הלייזר (ANALSETTE 22 Micro Tec Plus, Fritsch) אשר מודד בטווח של 0.08-2000 מיקרומטר. תוצאות ההתפלגות ומדדים סטטיסטיים מחושבים ברזולוציה של 0.01 מיקרומטר באמצעות תכנת MasControl. מורפולוגיה של חלקיקים והרכב כימי התקבלו באמצעות שימוש במיקרוסקופ אלקטרוניים (SEM-EDS, Quanta 200, FEI).

## תוצאות ודיון

### 1. ריכוזי PM בימי רקע

חישוב לריכוזי אבק אטמוספרי עבור ימים ללא סופות אבק (ימי רקע) בוצע במטרה לאפיין את זיהום PM ללא ההשפעה של סופות האבק. ערך הרקע הממוצע בכל נקודת מדידה (איור 2) הופחת לאחר מכן מהערכים הנמדדים בזמן סופות האבק.

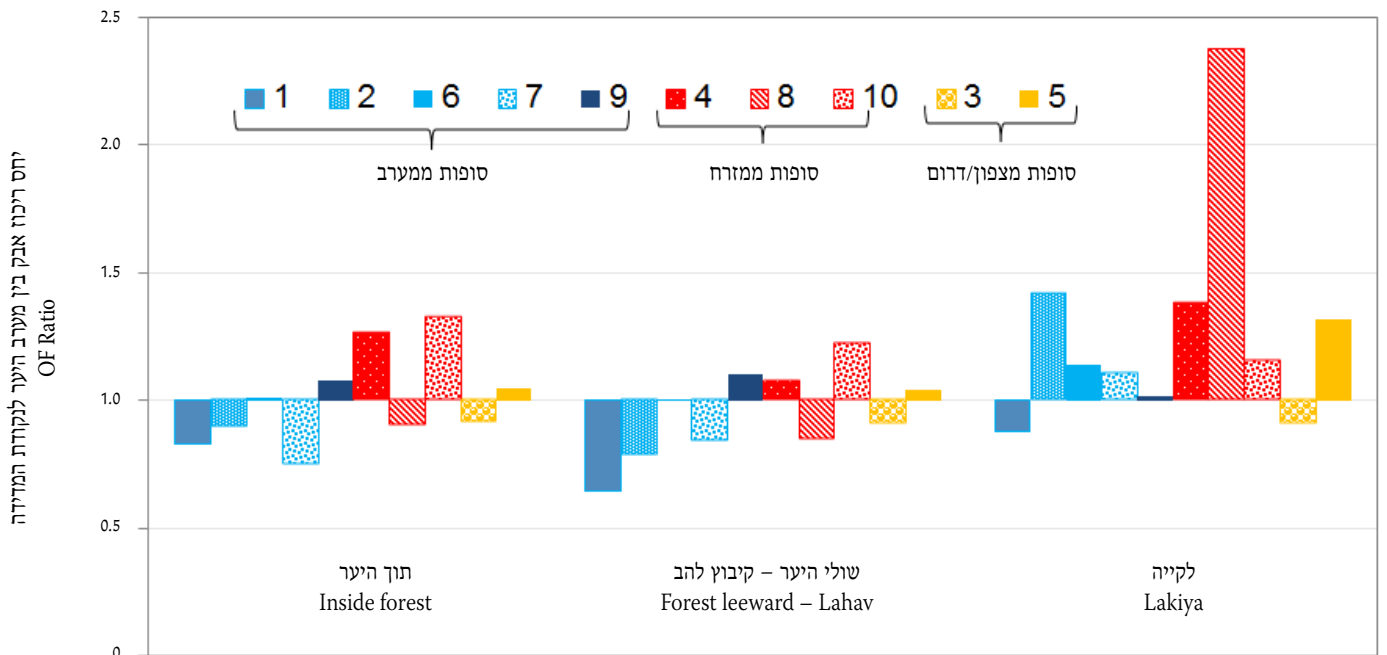
ממוצע PM<sub>10</sub> יומי חושב תחילה לתקופה של שנה (אוגוסט 2015 עד יולי 2016) בבאר שבע, היכן שקיימים נתונים היסטוריים, לצורך השוואה בהמשך עם נתוני אתר המחקר. במהלך אותה השנה, 262 ימים סווגו כימים "נקיים" מאבק על פי שיטת המיון של Krasnov ועמיתיה (2014) ו-30 ימי אבק עם ממוצע יומי של PM<sub>10</sub> > 200 מיקרוגרם/מ"ק (חסר מידע עבור 73 ימים באותה השנה). הימים ה"נקיים" מוינו לימי עבודה (א'-ר') ולימי מנוחה (שבת). הממוצע היומי של PM<sub>10</sub> בימי עבודה הוא 39 מיקרוגרם/מ"ק (SD= ±6.41)



מס. סופה Event No.	נתוני סופת אבק Storm ID					ריכוז חומר חלקיקי (מיקרוגרם/מ"ק) PM concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	תאריך Date	מערכת סינופטית Synoptic system	כיוון הרוח Wind direction	מהירות רוח (מ/ש) Wind speed (m/s)	עוצמת סופה Storm level	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
1	7.1.15	חזית קרה	W (210°)	6.6	בינונית	286 (±46)	197 (±30)
2	11.2.15	חזית קרה	W (209°)	5.4	גבוהה	729 (±90)	479 (±130)
3	10.9.15	נדירה – רוח צפונית	N (307°)	2.3	גבוהה	1119 (±107)	589 (±56)
4	4.11.15	אפיק ים סוף	E (80°)	5.5	נמוכה	176 (±42)	130 (±20)
5	16.11.15	חזית קרה	S (175°)	2.5	נמוכה	195 (±25)	198 (±23)
6	8.1.16	חזית קרה	W (221°)	4.9	בינונית	536 (±30)	268 (±17)
7	18.1.16	חזית קרה	W (200°)	3.9	בינונית	229 (±86)	157 (±44)
8	13.3.16	אפיק ים סוף	E (99°)	2.6	נמוכה	247 (±100)	137 (±84)
9	1.5.16	חזית קרה	W (214°)	3.1	נמוכה	124 (±30)	90 (±5)
10	30.11.16	אפיק ים סוף	E (150°)	2.3	נמוכה	93 (±14)	33 (±10)

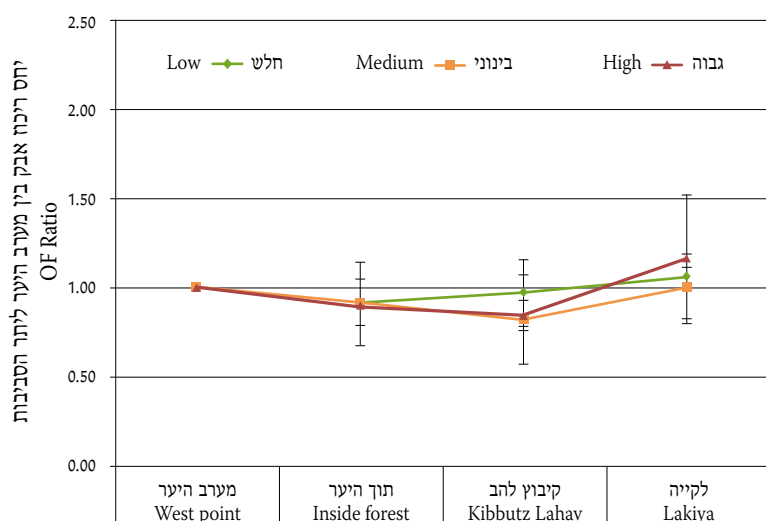
**טבלה 1:** סופות אבק אשר נמדדו במהלך 2015–2016. עוצמת הסופות מסווגת על פי קרסנוב ועמיתיה (2014). ריכוזי PM<sub>10</sub> ו PM<sub>2.5</sub> הינם ממוצעים למשך הסופה (מספר שעות). ערכי סטיית התקן ניתנים בסוגריים.

**Table 1:** Dust storms measured during 2015–2016. The storm level was classified according to Krasnov et al (2014). PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations are averages for the duration of the dust storm (several hours). SD values are given in brackets.



**איור 4:** יחס ריכוזי PM<sub>10</sub> בין נקודת המדידה במערב היער לבין נקודות המדידה האחרות (איור 1) במהלך 10 סופות אבק (טבלה 1). כחול, אדום וצהוב מייצגים סופות בתנאי שקע קר מכיוון מערב, אפיק ים סוף מכיוון מזרח והסעה מכיוון צפון או דרום, בהתאמה.

**Figure 4:** OF Ratio of PM<sub>10</sub> concentrations between the west side (not affected by the forest) and the other measurement points along the study transect during 10 dust storms (Table 1). Blue, red and yellow textures represent cold-front, red-sea-trough, and unusual synoptic systems, respectively.



**איור 5:** יחס ריכוזי PM<sub>10</sub> בין נקודת המדידה מערב היער לבין נקודות המדידה האחרות (מערב היער = 1) בסופות מערביות בסיווג על פי גודל סופת האבק.

**Figure 5:** OF ratio for PM<sub>10</sub> concentrations (SD values represented by error bars) during dust storms from the west (west side of the forest = 1) classified by storm intensities (low, medium, high).

ובמחסה היער (קיבוץ להב). עם זאת, המגמה אינה מובהקת, בעיקר בסופות שבהן כמות החומר המוסע באטמוספירה היא קטנה יחסית (סופות חלשות) וההשפעה של עצי היער היא לכן מוגבלת. גם במחקר של Nowak ועמיתים (2006) נמצאה השקעת חלקיקים מתונה יותר במהירויות רוח חלשות. התוצאות מראות, שבמהלך סופות אבק בעוצמה בינונית זיהום האוויר מופחת בסביבה המוגנת מיער (קיבוץ להב). ריכוז PM<sub>10</sub> שנמדד בלהב נמצא נמוך ב-28% מאשר בלקייה אשר אינה נמצאת בהשפעת שטח היער. ההפחתה בזיהום האוויר יכולה להיות משמעותית מאוד בתנאים של סופות אבק, שבהן יש סכנה בריאותית בחשיפה לריכוזים גבוהים של חומר חלקיקי.

### 3. מאפייני אבק שוקע על עצי היער

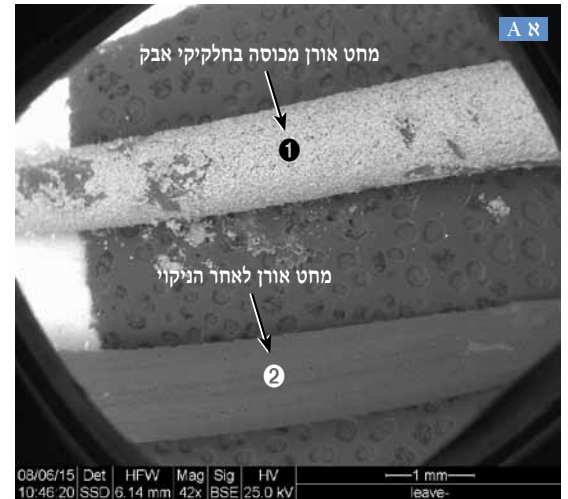
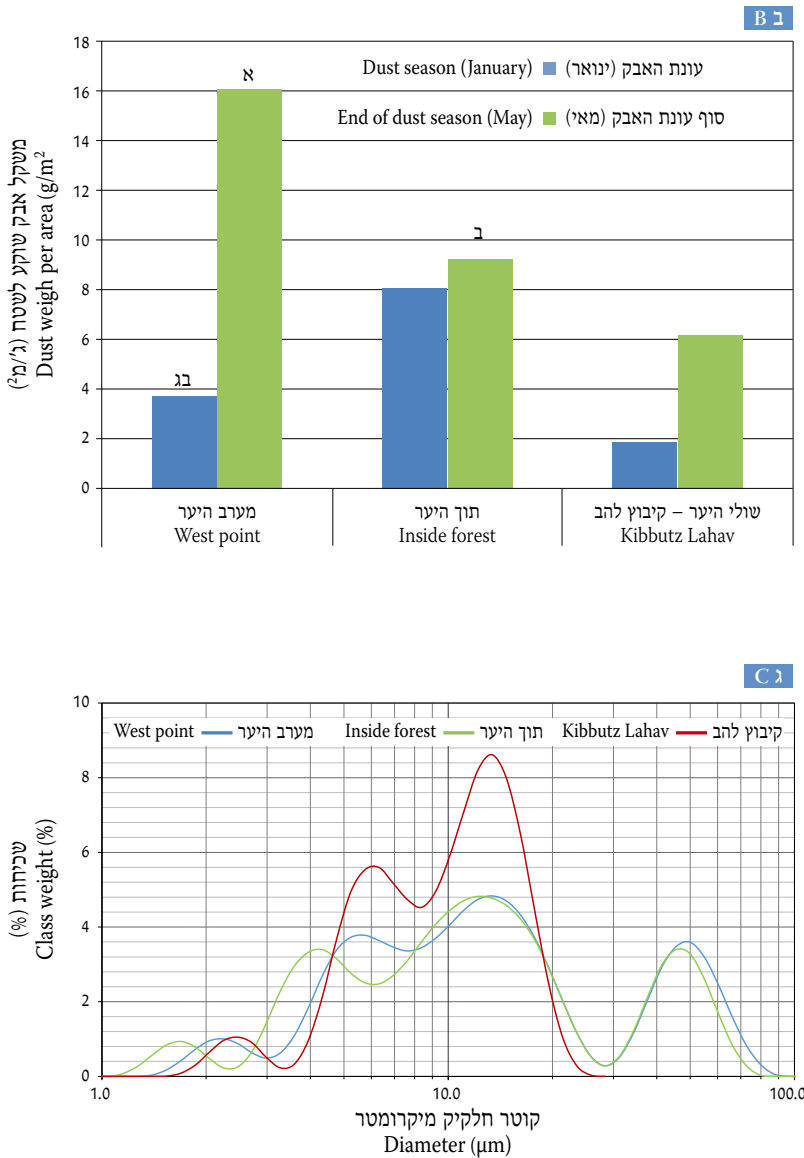
תוצאות ההפחתה בריכוז האבק המרחף בסביבות המוגנות מיער (איורים 4, 5) מלמדות על השקעה של אבק בתוך היער. האבק ששקע והצטבר על עלוות האורנים נבדק במעבדה לצורך קביעת כמויות החומר ומאפייניו.

היכולת של עצי אורן לקלוט חלקיקי אבק גבוהה, כפי שניתן לראות באיור 6' - שטח הפנים של מחט האורן מכוסה בשכבת אבק. המורפולוגיה של עלוות האורן המורכבת מעלים קטנים וצרים (מחטים) מתאפיינת בשטח פנים גבוה ולכן גם בקיבול האבק על העלווה (Beckett, Freer-Smith, & Taylor, 2000; Nguyen, Yu, Zhang et al., 2015). בנוסף לכך, הסיידור המוארך והצפוף של העלים מאפשר החלשה של מהירות הרוח ומפגשים תדירים בין החלקיקים המרחפים באוויר ובין העלה. תנאים אלה גורמים להשקעת חלקיקים

## 2. ערכי PM במהלך סופות אבק

במטרה לבחון את ההבדלים בריכוזי אבק אטמוספרי בין הנקודות השונות לאורך ציר המדידה, חושב היחס שבין ריכוז PM<sub>10</sub> בכל אחת מנקודות המדידה והערך הנמדד בנקודת מערב (OF Ratio), בהנחה שרוב סופות האבק מגיעות מכיוון מערב. שש סופות אבק מתוך כלל הסופות שנמדדו (טבלה 1) התאפיינו בחזית מערבית (כולל סופה 3 עם רכיב רוח מערבי בשטח המחקר). ברוב הסופות נמצא יחס  $1 >$  בקיבוץ להב (הממוקם ממזרח ליער להב) ויחס  $1 <$  בלקייה (איור 4). ההבדלים נובעים מהמיקום של היישובים ביחס ליער להב, כאשר הקיבוץ נמצא במחסה היער ואילו היישוב לקייה חשוף לרוחות ולאבק. לעומת זאת, במהלך הסופה של מאי 2016 (אירוע 9 טבלה 1) הערך היה גבוה מ-1 בקיבוץ להב וגם בתוך היער. סופת אבק זו התאפיינה במהירויות רוח נמוכות ובריכוז אבק נמוך, ולכן לא נצפתה השפעה של היער על ההבדלים בריכוזי האבק בין נקודות המדידה. במהלך סופות אבק מזרחיות, נמצא יחס גבוה יותר בתוך היער לעומת קיבוץ להב (איור 4), בניגוד למגמה בסופות מערביות ובהתאם להשערת המחקר. בסופות מזרחיות, מסת האוויר חולפת תחילה בקיבוץ להב ולאחר סינון מכני על ידי העצים במרכז היער מתקבל ריכוז נמוך יותר של חומר חלקיקי בצידו המערבי של היער. במהלך שתי סופות אבק מזרחיות נמצאו אכן ערכים נמוכים יותר בנקודת מערב. לעומת זאת, בסופה של מרץ 2016 (אירוע 8 טבלה 1) היחס היה גבוה יותר בנקודת מערב לעומת שאר החתך. הסבר אפשרי הוא הרכיב הדרומי של הרוח באותה סופה. נמצא כי ריכוזי PM<sub>10</sub> בקיבוץ להב היו נמוכים יותר מאשר הערכים שנמדדו בלקייה גם בסופות מזרחיות. בסופות אבק מדרום ומצפון, גם להב וגם לקייה חשופות לרוחות וההשפעה של היער על ריכוזי האבק מצטמצמת. בסופה של חודש ספטמבר 2015 (אירוע 3 איור 4) ערכי PM<sub>10</sub> ירדו בתוך היער בקיבוץ להב ( $OF Ratio < 1$ ), כפי הנראה בגלל רכיב רוח מערבי ( $307^\circ$ ), שנמדד בסביבת היער במהלך הסופה. בניגוד לכך, במהלך סופת אבק עם רכיב דרומי (אירוע 5 טבלה 1), היחס היה גדול מ-1, ככל הנראה בגלל רכיב רוח מזרחי קל ( $175^\circ$ ). תוצאות אלה מלמדות על החשיבות של מיקום היישוב ביחס ליער בהפחתת זיהום PM<sub>10</sub>.

ההבדלים בריכוזי PM<sub>10</sub> בין נקודות המדידה נבדקו עבור סופות אבק מערביות (טבלה 1) בסיווג לפי עוצמת הסופה (Krasnov, Katra, Koutrakis et al., 2014): "חלש" 264 מיקרוגרם/מ"ק; "בינוני" 661 מיקרוגרם/מ"ק; "גבוה" 1,322 מיקרוגרם/מ"ק או "גבוה מאוד" 1,983 מיקרוגרם/מ"ק. בכל הסופות, נצפו ערכי PM נמוכים בקיבוץ להב ובתוך היער ביחס לנקודת מערב היער אשר חשופה לרוחות מערביות (איור 5). התוצאות מראות, שעצי היער מסננים כמויות של חלקיקי אבק ובכך מופחת זיהום PM באטמוספירה בתוך היער



**איור 6:** (א) מבנה של עלה מחט אורן ירושלמי, צולם באמצעות מיקרוסקופ אלקטרוני (SEM-EDS) (בהגדלה 42x). מחט עליונה (1) מיער להב, מכוסה בשכבת חלקיקי אבק. מחט תחתונה (2) לאחר ניקוי. (ב) משקל אבק ליחידת שטח (גרם/מטר רבוע) בשלושת נקודות המדידה בחתך היער, במהלך עונת האבק (מדידה בחודש ינואר) ובסוף עונת האבק (מדידה בחודש מאי). אותיות שונות מעל העמודות (א-ג) מייצגות מובהקות סטטיסטית ( $P \leq 0.05$ ) בין נקודות המדידה ולאור העונות. (ג) התפלגות גודל חלקיקים של אבק שוקע על גבי עלים בשולי היער, בתוך היער ובמערב היער.

**Figure 6:** (A) Leaf structure of the Aleppo pine tree derived from Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) (magnification of X42). Upper needle leaf covered with dust particles before treatment and cleaning (leaf 1); lower needle leaf without dust after dry cleaning (leaf 2). (B) Weight per area ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) of settled dust on leaves in the forest transect during the dust season (January) and at the end of the dust season (May). Different letters above the columns indicate significant differences ( $P \leq 0.05$ ) between locations and/or seasons. (C) Particle size distribution of the settled dust in Kibbutz Lahav, inside the forest and in west point.

האורן עד לחודש מאי אשר בו התקבלו כמויות גדולות יותר בהשוואה לחודש ינואר. כמויות האבק השוקע באזור המחקר גדולות יותר בסדר גודל מאשר באזורי אקלים אחרים. בבלגיה לדוגמה, נמצא כי כמות  $\text{PM}_{10}$  (מתוך סך האבק) על גבי עלוות עצים מסוגים שונים נעה בטווח שבין 0.07-0.49 גרם/מ"ר (Beckett, Freer-Smith, & Taylor, 2000), כתלות בסוג העלווה ועוצמת החשיפה לחומר חלקיקי. באיטליה, תכולת  $\text{PM}_{10}$  באבק ששקע על גבי עלוות אורנים הסתכמה ב-0.19 גרם/מ"ר בעונת החורף ו-0.26 גרם/מ"ר בקיץ (Marando, Salvatori, Fusaro et al., 2016). בנורווגיה חומר חלקיקי ששקע על גבי עצים ממינים שונים (*Pinus mugo*, *Betula pendula*, *Pinus sylvestris*, *Salix cinerea*, *Skimmia japonica* and *Stephanandra incisa*) במשך שנתיים חושב לערך ממוצע הנע בטווח 0.24-0.55 גרם/מ"ר (Sæbø, Popek, Nawrot et al., 2012). התוצאות שהתקבלו

רבה יותר בעצי אורנים בהשוואה לעצים רחבי עלים (Sæbø, Popek, Nawrot et al., 2012). עבודות קודמות הראו כי הממוצע השנתי של שקיעת אבק על פני השטח בצפון הנגב נע בין 85 גרם/מ"ר ל-210 גרם/מ"ר כתלות בעוצמת סופת האבק (Offer, Zaady, & Shachak, 1998; Ganor & Foner, 2001; Katra, Arotsker, Krasnov et al., 2014). במחקר הנוכחי נמדדה כמות האבק על גבי עלוות האורנים (גרם/מ"ר) במהלך עונת האבק (ינואר) ובסוף עונת האבק (מאי) (איור 6). כמות האבק שנמצאה בינואר הייתה 4.6 גרם/מ"ר בממוצע לשלושת הסביבות (מערב, תוך היער ושולי היער). כמות זו קטנה פי 2 מהכמות הממוצעת לחודש מאי (10.5 גרם/מ"ר). בעונת החורף ישנה שטיפה של האבק המצטבר אל מערכת הקרקע ולכן באמצע עונת החורף נמצאו כמויות קטנות יותר. מאחר שאירוע הגשם האחרון באותה שנה התרחש באפריל, האבק המשיך להצטבר על גבי עלוות

מ-10 מיקרומטר באטמוספירה על ידי קליטת האבק בעלוות האורנים הן בכניסה ליער והן בשולי היער.

## מסקנות

המחקר בחן זיהום חומר חלקיקי במרחב מיוער באזור צחיח למחצה במהלך סופות אבק. התוצאות מצביעות שקיימת השפעה לנוכחות היער בהפחתת ריכוזי PM וכתוצאה מכך, הפחתה בזיהום האוויר ביישובים עירוניים הסמוכים ליער.

בימים ללא סופות אבק, היער והיישוב הסמוך (קיבוץ להב) אופיינו בריכוזים נמוכים של PM לעומת יישוב מרוחק אשר אינו בהשפעת היער (לקייה). על אף ההבדלים הקטנים יחסית בריכוזי PM בין להב ולקייה יש לכך משמעות מבחינת חשיפה ארוכת טווח לבריאות האדם. במהלך סופות אבק נמצאה השפעה גדולה יותר של היער בהפחתת ריכוזי PM באטמוספירה, וכן הבדלים גדולים יותר ברמת הזיהום בין קיבוץ להב לבין לקייה. רמת ההשפעה של היער תלויה בגודל הסופה ובכיוון הרוח ביחס למקום המדידה. עם זאת, כל סביבת היער (כולל שולי היער החשופים או מוגנים מרוח) התאפיינו בערכי PM נמוכים בהשוואה לסביבה המרוחקת מהיער. יער להב ברובו נטוע במיני אורנים, אשר גדלים בתפוצה רחבה באזורי אקלים ים-תיכוני. עלוות עצי האורן מאופיינת בחופה בעלת שטח פנים גבוה ועל כן העצים מסוגלים לקלוט חומר חלקיקי אטמוספרי. נמצא כי קליטת אבק על גבי עלי האורן (מחטים) עשויה להגיע לכמויות גדולות מאוד ובכך לסנן בעילות את המזהמים במהלך סופות אבק.

התוצאות של המחקר מדגישות את השירות של המערכת האקולוגית, שמספק היער הנטוע, לבריאותם של בני אדם המתגוררים באזור צחיח למחצה. זאת, על ידי סינון של זיהום אוויר בחומר חלקיקי בתוך היער וביישובים הסמוכים אליו במהלך סופות אבק (איור 1). הממצאים הנ"ל מאפשרים לפתח כלים יישומיים להשגת שיפור באיכות האוויר, בתכנון פיתוח עתידיות, באזור שצפוי לחוות סופות אבק כתוצאה של שינויים בשימושי קרקע ו/או אפשרות לשינוי אקלים.

## תודות

המחקר מומן על ידי קרן קימת לישראל. המחברים מבקשים להודות לאנשי קק"ל, ד"ר עמרי בונה ויצחק משה, על הסיוע והתמיכה.

## מקורות

- Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H., & Taylor, G. (2000). Effective tree species for local air quality management. *Journal of Arboriculture*, 26(1), 12–19.
- Bernstein, I. (2010). Limans in the Negev, Policy Document

במחקר הנוכחי מצביעות על ההשפעה של המיקום הגיאוגרפי (קרבה למערכות הסעת אבק גלובליות) ומיעוט גשמים באזור המחקר (אקלים צחיח למחצה) אשר מאפשרים חשיפה גבוהה של העצים ביער לכמויות גדולות של חומר חלקיקי מרחף (Krasnov, Katra, Koutrakis et al., 2014).

במהלך עונת האבק (ינואר), הכמות הגבוהה ביותר של אבק שוקע נמצאה בתוך היער אשר מוגן יחסית מפני גשם בהשוואה לסביבות השוליים החשופות (נקודת מערב ולהב). לעומת זאת, במדידה של חודש מאי נמצאה כמות אבק שוקע גבוהה יותר באופן מובהק בשולי היער. סביבות אלה חשופות לרוח ולפגיעה ישירה של סופות (מכיוון מערב ומכיוון מזרח) ולהצטברות של אבק בתנאים של מיעוט גשמים. התדירות והעוצמה של סופות אבק מכיוון מערב (טבלה 1) מסבירות את הכמות הגבוהה של אבק שהצטבר בנקודת מערב בהשוואה ללהב. משקל האבק שנמדד בתוך היער נשאר יציב בין שני זמני המדידה (8.1–9.2 גרם/מ"ר) (איור 6). הכמות הכוללת של אבק ששקע בשטח היער כולו חושבה על בסיס התוצאות של סביבת תוך היער, המושפעת פחות מאירועי רוח וגשם כפי שנצפה בשולי היער. הכמות המינימלית של אבק שהוסר מהאטמוספירה והצטבר על עלוות האורנים ביער היא 418.2 טון של אבק (או 0.81 טון לקמ"ר).

בניתוח התפלגות גודל חלקיקים של האבק השוקע על עלוות העצים נמצא, כי גודל החלקיק המרבי הוא 100 מיקרומטר (איור 6). בנקודות המדידה "מערב" ו"תוך היער" האבק השוקע מאופיין בהתפלגות תלת-מודלית (שכיחים בגודל 2.5, 10 ו-75 מיקרומטר). החלקיקים הגדולים יחסית (30 מיקרומטר ומעלה) יכולים להיות גם ממקור שטחי לס חקלאי, המצויים בקרבת היער (Katra, Gross, Swet et al., 2016a; Swet & Katra, 2016; Tanner, Katra, Haim et al., 2016). האבק ששקע בנקודת המדידה של שולי יער "להב" מכיל חלקיקים דקים יותר בהשוואה לסביבות האחרות, עם התפלגות דו-מודלית שבה החלקיקים הגדולים ביותר הם בגודל 25 מיקרומטר. ישנה מגמה של עלייה בתכולת PM<sub>10</sub> מתוך סך דוגמת האבק השוקע: מכיוון מערב (42.7%), דרך תוך היער (44.6%), אל שולי היער (66.2%) (איור 6). מכיוון שרוב סופות האבק מגיעות מכיוון מערב (טבלה 1, איור 4), המגמה הזו מעידה על תהליך סינון של החומר החלקיקי הגס (10–100 מיקרון) בכניסה ליער (נקודת מערב) ובתוך היער, וסינון גם של חומר חלקיקי דק ביציאה מהיער (נקודת להב). על בסיס משקל האבק השוקע והתפלגות גודל חלקיקים חושבה הכמות היחסית של PM<sub>10</sub> מתוך סך האבק ששקע על עלוות האורנים. במהלך עונת האבק (ינואר): מערב 1.47 גרם/מ"ר, תוך היער 3.66 גרם/מ"ר, ולהב 0.96 גרם/מ"ר. בסוף עונת האבק (מאי) הכמויות היו גדולות יותר משמעותית: מערב 6.72 גרם/מ"ר, תוך היער 4.10 גרם/מ"ר ולהב 3.60 גרם/מ"ר. התוצאות הנ"ל מעידות על היעילות של העצים בהפחתת חלקיקים הקטנים



- Kupiainen, K., Ritola, R., Stojiljkovic, A., Pirjola, L., Malinen, A., & Niemi, J. (2016). Contribution of mineral dust sources to street side ambient and suspension PM 10 samples. *Atmospheric Environment*, 147, 178–189.
- Manes, F., Marando, F., Capotorti, G., Blasi, C., Salvatori, E., Fusaro, L., & Munafò, M. (2016). Regulating Ecosystem Services of forests in ten Italian Metropolitan Cities: Air quality improvement by PM 10 and O 3 removal. *Ecological Indicators*, 67, 425–440.
- Marando, F., Salvatori, E., Fusaro, L., & Manes, F. (2016). Removal of PM10 by Forests as a Nature-Based Solution for Air Quality Improvement in the Metropolitan City of Rome. *Forests*, 7(7), 150.
- McDonald, A. G., Bealey, W. J., Fowler, D., Dragosits, U., Skiba, U., Smith, R. I., & Nemitz, E. (2007). Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM 10 in two UK conurbations. *Atmospheric Environment*, 41(38), 8455–8467.
- Nguyen, T., Yu, X., Zhang, Z., Liu, M., & Liu, X. (2015). Relationship between types of urban forest and PM 2.5 capture at three growth stages of leaves. *Journal of Environmental Sciences*, 27, 33–41.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3), 115–123.
- Offer, Z. Y., Zaady, E., & Shachak, M. (1998). Aeolian particle input to the soil surface at the northern limit of the Negev desert. *Arid Land Research and Management*, 12(1), 55–62.
- Popek, R., Gawrońska, H., Wrochna, M., Gawroński, S. W., & Sæbø, A. (2013). Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes—a 3-year study. *International Journal of Phytoremediation*, 15(3), 245–256.
- Ram, S. S., Majumder, S., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, S. C., Maiti, P. K., & Chakraborty, A. (2014). Plant canopies: bio-monitor and trap for re-suspended dust particulates contaminated with heavy metals. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(5), 499–508.
- Rotenberg, E., & Yakir, D. (2010). Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science*, 327(5964), 451–454.
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H. M., Gawronska, H., & Gawronski, S. W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 427, 347–354.
- Schimel, D. S. (2010). Drylands in the earth system. *Science*, 327(5964), 418–419.
- Shao, Y., Wyrwoll, K. H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H. & Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2(4), 181–204.
- Swet, N., & Katra, I. (2016). Reduction in soil aggregation in response to dust emission processes. *Geomorphology*, 268, 177–183.
- Tanner, S., Katra, I., Haim, A., & Zaady, E. (2016). Short-term soil loss by Aeolian erosion in response to different rain-fed agricultural practices. *Soil and Tillage Research*, 155, 149–156.
- Vodonos, A., Friger, M., Katra, I., Krasnov, H., Zahger, D., Schwartz, J., & Novack, V. (2015). Individual Effect Modifiers of Dust Exposure Effect on Cardiovascular Morbidity. *PLoS one*, 10(9), e0137714.
- World Health Organization (2005). *WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. (in Hebrew: <http://www.kkl.org.il/files/files/planning/limanim.pdf>).
- Cornelis, W. M., & Gabriels, D. (2005). Optimal windbreak design for wind-erosion control. *Journal of Arid Environments*, 61(2), 315–332.
- Dayan, U., Heffter, J., Miller, J., & Gutman, G. (1991). Dust intrusion events into the Mediterranean basin. *Journal of Applied Meteorology*, 30(8), 1185–1199.
- Donateo, A., Contini, D., & Belosi, F. (2006). Real time measurements of PM2.5 concentrations and vertical turbulent fluxes using an optical detector. *Atmospheric Environment*, 40(7), 1346–1360.
- Dorman, M., Perevolotsky, A., Sarris, D., & Svoray, T. (2015). Amount vs. temporal pattern: On the importance of intra-annual climatic conditions on tree growth in a dry environment. *Journal of Arid Environments*, 118, 65–68.
- Fares, S., Savi, F., Fusaro, L., Conte, A., Salvatori, E., Aromolo, R., & Manes, F. (2016). Particle deposition in a peri-urban Mediterranean forest. *Environmental Pollution*, 218, 1278–1286.
- Ganor, E., & Foner, H. A. (2001). Mineral dust concentrations, deposition fluxes and deposition velocities in dust episodes over Israel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D16), 18431–18437.
- Ganor, E., Osetinsky, I., Stupp, A., & Alpert, P. (2010). Increasing trend of African dust, over 49 years, in the eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical research: atmospheres*, 115(D7).
- Grünzweig, J. M., Lin, T., Rotenberg, E., Schwartz, A., & Yakir, D. (2003). Carbon sequestration in arid-land forest. *Global Change Biology*, 9(5), 791–799.
- Irga, P. J., Burchett, M. D., & Torpy, F. R. (2015). Does urban forestry have a quantitative effect on ambient air quality in an urban environment? *Atmospheric Environment*, 120, 173–181.
- Kalderon-Asael, B., Erel, Y., Sandler, A., & Dayan, U. (2009). Mineralogical and chemical characterization of suspended atmospheric particles over the east Mediterranean based on synoptic-scale circulation patterns. *Atmospheric Environment*, 43(25), 3963–3970.
- Katra, I., Arotsker, L., Krasnov, H., Zaritsky, A., Kushmaro, A., & Ben-Dov, E. (2014). Richness and diversity in dust stormborne biomes at the southeast Mediterranean. *Scientific Reports*, 4, 5265.
- Katra, I., Gross, A., Swet, N., Tanner, S., Krasnov, H., & Angert, A. (2016a). Substantial dust loss of bioavailable phosphorus from agricultural soils. *Scientific Reports*, 6, 24736.
- Koren, I., Kaufman, Y. J., Washington, R., Todd, M. C., Rudich, Y., Martins, J. V., & Rosenfeld, D. (2006). The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest. *Environmental Research Letters*, 1(1), 014005.
- Krasnov, H., Katra, I., Koutrakis, P., & Friger, M. D. (2014). Contribution of dust storms to PM10 levels in an urban arid environment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(1), 89–94.
- Krasnov, H., Katra, I., Novack, V., Vodonos, A., & Friger, M. D. (2015). Increased indoor PM concentrations controlled by atmospheric dust events and urban factors. *Building and Environment*, 87, 169–176.
- Krasnov, H., Katra, I., Friger, M. (2016) Increase in dust storm related PM10 concentrations: A time series analysis of 2001–2015. *Environmental Pollution*, 213, 36–42.