

איל רוטנברג

המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי הלכת, מכון ויצמן למדע

דן יקיר

המחלקה למדעי כדור הארץ וכוכבי הלכת, מכון ויצמן למדע

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

רוטנברג א ויקיר ד. 2018. ייעור, אקלים ועתיד היערות בישראל. *אקולוגיה וסביבה* 9(3): 22–33.



מערכת חיישני קרינה המוצבת על מגדל מדידות השטפים שביער יתיר. החיישנים הללו מודדים את קרינת השמש הכוללת (global radiation) המגיעה מהאטמוספירה; קרינת השמש בתחום שהצמחים מבצעים בו פוטוסינתזה; קרינת השמש בארבעה אורכי הגל החשובים להבנת תהליכים בתווך הצמחי; כלל קרינת החום (thermal radiation) המגיעה מהאטמוספירה; חילוף אנרגיית הקרינה (נטו) בין היער לאטמוספירה. כמו כן, על המוט מוצבים חיישנים זהים, הקולטים את רכיבי הקרינה הללו שנפלטים מהנוף הצמחי לאטמוספירה | צילום: איל רוטנברג

ייעור, אקלים ועתיד היערות בישראל

12 באוקטובר, 2018

גיליון סתיו 2018 / כרך 9(3)

[סקירות](#)

על קצה המזלג

- גזי חממה ובראשם פחמן דו-חמצני גורמים להתחממות העולמית, ומכאן העניין הרב בכימות מאזני הפחמן והאנרגיה של מערכות אקולוגיות שונות ובהן יערות.
- המאמר סוקר את הידע על השפעות הגומלין בין היער, החורש וסביבתם הקרובה, לבין האקלים, תוך התמקדות בידע הרלוונטי שנצבר ממחקר ארוך שנים בארץ (בעיקר ביער יתיר).
- התוצאות המתוארות במחקר הן מקור מידע חשוב לגבי שטפי גזי חממה באזורים מיוערים ופתוחים בארץ, ובאזורי אקלים צחיחים למחצה בכלל.
- לנתונים אלה חשיבות רבה להבנת ההשפעה של מערכות היער על האקלים העולמי ועל ההתחממות העולמית, השפעה שמקבלי החלטות וקובעי מדיניות צריכים להתחשב בה.

המערכת

תקציר

האקלים הוא תוצאה של מאזני אנרגיה בין האזורים השונים על פני כדור הארץ ועם החלל החיצון. הצומח מושפע מהמאזנים הללו ומשפיע עליהם. עלייה בריכוזי גזי חממה באטמוספירה גורמת להתחממות עולמית. לצמחים, בקובעם את גז החממה החשוב, הפחמן הדו-חמצני, השפעה מקררת על אקלים כדור הארץ. לצמחים השפעה גם על בליעת קרינת שמש, על שינוי בשטפי התאדות וחום, על משטר הרוחות ועוד, וגם אלה עשויים להשפיע על האקלים. החשש משינוי האקלים בעקבות פעילות אנושית הביא להקמת רשת בין-לאומית של תחנות מחקר שעוסקות בהבנת הקשר בין האקלים לצומח ברחבי העולם. בשנת 2000 הצטרפה תחנת מחקר ביער יתיר לרשת זו כתחנה יערנית יחידה על סף המדבר. המחקר ארוך בתוח בתחנה באזור אקלים צחיח למחצה הביא לתובנות חדשות ביחסי גומלין אלה. נמצא שעל אף תנאי היובש קצב קיבוע הפחמן השנתי ביער יתיר דומה לזה של יערות האורנים באירופה (כ-200 גרם פחמן למ"ר). היער בעל העלווה הכהה קולט מעל ל-15% יותר קרינת שמש מסביבתו המדברית. למרות זאת, הטמפרטורה של עלוות היער נמוכה מזו של פני השטח הסובב בכ-5 מעלות בממוצע, דבר הגורר ירידה בפליטת קרינת חום מהיער. פליטת חום מוחשי מוגבר מהתווך הצמחי מפצה על עומס הקרינה הרב הנקלט ביער בתהליך שנקרא 'אפקט הקונוקטור'. האפקט מציין את יעילות חילוף החום בין העלווה לאוויר, ואחת מתוצאותיו היא הגברת הסעת החום מהתווך הצמחי שתורמת להתחממות האטמוספירה ושמוגדת להשפעת היער המקררת עקב קליטת הפחמן מהאטמוספירה. מכימות תהליכים אלה עולה שלליעור באזור יתיר השפעה ראשונית מחממת, ורק בחלוף כ-50 עד 80 שנה, שהיער יקבע בהן כמות מצטברת של פחמן דו-חמצני, תגבר ההשפעה המקררת. הרחבת המדידות בעזרת מעבדה ניידת אל אזורי יער נוספים בישראל הראתה שמאזן החימום/קירור של היער רגיש לתנאים המקומיים. זמן האיזון בין ההשפעה המחממת לזו המקררת מתקצר בכ-80% ביער ביריה שבגליל. מודלי צומח-אקלים אזוריים מראים שהגדלת היקף היער באזורים צחיחים למחצה עשויה להביא לשינוי במערכות הסינופטיות, ובחלק מהאזורים גם להגברת משקעים. נוסף על כך, מתייחסת הסקירה לעתיד היערות בישראל בהינתן התחזיות לשינוי באקלים ובמאזן הפחמן של מדינת ישראל.

הקשר בין יער לאקלים

היער והחורש מכסים כ-30% משטח היבשות. בישראל הושקעו מאמצים רבים בייעור ובטיפול החורש במאה השנים האחרונות, וכיום הם מכסים כ-11.5% משטח המדינה (2.5×10^9 מ"ר). עם השתנות האקלים, תהליכי מדבור, ריבוי האוכלוסין ותהליכי פיתוח עולה החשש לעתיד היער והחורש בארץ. ידוע כי הצומח מושפע מתנאי האקלים, אך האם הצומח משפיע על מערכת האקלים, ואם כן, כיצד? **משמעות יחסי הגומלין צומח-אקלים באזורים צחיחים למחצה (semi arid), בדגש על יערות אורנים בישראל, מצויה במוקד סקירה זו.**

מערכות האקלים בכדור הארץ נגזרות מבליעת אנרגיה באטמוספירה, המניעה שינויים בטמפרטורה ובלחות. השינויים הללו משפיעים על זרימות אוויר, על עננות ועל גשם. כ-17% מהאנרגיה הנקלטת באטמוספירה מקורה בבליעת קרינה המגיעה ישירות מהשמש, ושאר האנרגיה הנקלטת באטמוספירה הוא ממעבר שטפי קרינה וחום מהיבשות ומהיםים ^[61] (נספח 1). היות שפני כדור הארץ קולטים כ-47% מקרינת השמש, לשינוי בכסות הקרקע השפעה חזקה על העוצמות וההרכב של שטפי האנרגיה שנפלטים או מוחזרים מן הקרקע לאוויר ^[16]. כ-74% מהגשם היורד על היבשות מקורו בהתאדות מפניהן, והשאר מקורו באוקיינוסים ^[32]. לשינויים בכסות היער (חופה) השפעות שונות על מערכות האקלים ועל תנאי הסביבה, כדוגמת טמפרטורה ולחות האוויר ^[9] וכן על כמות המים הזמינים לשימושנו ^[43]. האקלים על פני כדור הארץ משתנה לאורך הזמן, וכיום ברור שאנו מצויים בתקופת התחממות מהירה יחסית. **השפעת שינויים אלה על יחסי הגומלין בין הצמחייה והאקלים היא נושא המעסיק אלפי מדענים בעולם מתוך הכרה ביכולתה של הצמחייה להשפיע משמעותית על קצב שינוי האקלים.** טפח מהרקע המדעי לנושא זה, עם התייחסות מיוחדת לאזורנו, יסקר כאן.

ניצוד משפיע הצומח על האקלים?

צומח משפיע על האקלים בשתי צורות: א. תהליכים ביוגיאוכימיים, הנובעים מחילוף חומרים שיש להם השפעה על סביבתם. לצמחים יש יכולת לווסת את עוצמות החילופים; ב. תהליכים ביוגיאופיזיים, הנובעים מהתכונות הפיזיקליות של התווך הצמחי.

תהליכים ביוגאוכימיים – תהליכים ביוגאוכימיים הם תהליכים כדוגמת פוטוסינתזה (הטמעה), שבמהלכה הצמחים קולטים פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה (ופולטים חמצן), וכן דיות (evapotranspiration), שבמהלכו פולטים הצמחים כמויות גדולות של אדי מים לאטמוספירה. בתהליכי הפוטוסינתזה והנשימה מחליף התווך הצמחי פחמן דו-חמצני עם האטמוספירה. **חשוב לציין שאומנם שטפי הפחמן הדו-חמצני נמדדים, אך מקובל לבטא את הכמויות והמאזנים ביחידות 'פחמן', כפי שנעשה גם לכל אורך סקירה זו** (1 ק"ג פחמן=3.67 ק"ג פחמן דו-חמצני). ברמה העולמית, השטפים המעורבים עצומים: כ-120 מיליארד טונות פחמן בשנה [13]. בתנאי שיווי משקל, כמות הפחמן הנקלטת בפוטוסינתזה והכמות הנפלטת בנשימה זהות, ואין לתהליכים הללו כל השפעה על כמות הפחמן (או הפחמן הדו-חמצני) הממוצעת באטמוספירה. עם זאת, במאתיים השנים האחרונות משנות פליטות אנתרופוגניות (בעקבות פעילות האדם) את שיווי המשקל בין השטפים, וגורמות לעלייה משמעותית בריכוז הפחמן באטמוספירה. מצד שני, מדידות מ-50 השנים האחרונות מראות שכיום קולטת צמחיית כדור הארץ בתהליך הפוטוסינתזה יותר פחמן מזה הנפלט בתהליכי נשימה על-ידי כלל האורגניזמים, וכך תורמת למיתון השפעת הפליטות האנתרופוגניות.

מה חשיבות הפרת מאזן הפחמן הדו-חמצני בין הצמחייה והאטמוספירה? בשל הפקת אנרגיה וביורא יערות נפלטות כיום לאטמוספירה כ-10 מיליארד טונות פחמן בשנה. הצמחייה קולטת כ-25% מפליטות תוצר הפעילות האנושית הזו [48], כ-2.5 מיליארד טונות של פחמן. כ-25% נוספים נקלטים באוקיינוסים, והשאר, כ-50% מהפליטות, נותר באטמוספירה. הקשר לאקלים ברור: ריכוזו של הפחמן הדו-חמצני, שפרט לאדי מים הוא הגז המשפיע ביותר על עוצמת אפקט החממה, עלה מ-280 חלקים למיליון בתחילת המהפכה התעשייתית עד ל-400 חלקים למיליון בשנת 2017. הודות לקליטת הפחמן דו-חמצני על-ידי הצומח והאוקיינוסים עלייה זו מתונה בהרבה מזו הצפויה בעקבות הפליטות האנתרופוגניות.

התהליך השני בחשיבותו הוא הדיות, והשפעתו באה לידי ביטוי בארבע דרכים: א. לצמחים מעוצים (צמחי חורש ויער) שורשים עמוקים, המאפשרים קליטת מים ודיותם בכמויות גדולות ובמשך כל השנה (עץ בודד יכול לדיית מאות ליטרים מים ביום). במקומות רבים בעולם, וגם בישראל, יכולים העצים לדיית כמעט את כל כמות הגשם השנתית מבלי שמים יחלחלו למי תהום ויגיעו לנחלים. ב. אידוי המים מהעלים דורש השקעת אנרגיה כחום כמס. האנרגיה נישאת עם אדי המים לאטמוספירה ושם משתחררת בתהליך העיבוי בעננים. בדרך זו מועברות כמויות גדולות של אנרגיה מפני השטח לגובה האטמוספירה. פני השטח מתקררים, והתהליך בכללותו מספק אנרגיה לזרימות אוויר. ג. הדיות מספק אדי המים לאטמוספירה, והם גז החממה החשוב ביותר (אך השפעתו הישירה של האדם על ריכוזו באוויר זניחה) [37]. ריכוז האדים באוויר משתנה בעקבות שינויים בטמפרטורת האטמוספירה. ד. לדיות יכולת השפעה על עננות, ולעננים השפעה עצומה על האקלים. הם מסייעים בקירור פני כדור הארץ על-ידי החזרת חלק ניכר מקרינת השמש לחלל, אך עננים גבוהים עשויים להגביר את אפקט החממה.

תהליכים ביוגאופיזיים – תהליכים ביוגאופיזיים הם תהליכים המושפעים מהתכונות הפיזיקליות של הצמחים, כגון מידת ההחזרה של קרינת שמש (reflectivity), הפליטות (emissivity), מקדם פליטת קרינה תרמית) ומידת החספוס של כסות הצומח שמשפיעה על זרימות אוויר [15, 16, 20].



מידת שטפי פחמן, מים ואנרגיה בעזרת המעבדה הניידת באזור מדברי שליד יער יתיר באביב 2015 | צילום: איל רוטנברג
לכיסוי הצומח השפעה ישירה על עוצמת שטפי האנרגיה שנפלטת מהקרקע ונקלטים באטמוספירה. 'צבעם' של הקרקע והצומח קובע את מידת ההחזרה של קרינת השמש מהקרקע (אלבדו), וכך גם את כמות הקרינה הנבלעת בפני כדור הארץ. צמחים וקרקעות מסוגים שונים יכולים לשנות את מידת ההחזרה של הקרינה באחוזים ניכרים, ואת כמות האנרגיה הנקלטת

בהם. בממוצע מחזיר כדור הארץ כ-30% מקרינת השמש לחלל.

קרינה שאינה מוחזרת נבלעת, וחלק גדול ממנה נפלט כקרינה תרמית (קרינה תת-אדומה). שטף קרינת החום רגיש מאוד לטמפרטורת פני השטח, ואם הצמיחה משנה את הטמפרטורה, למשל מקררת אותו בעקבות דיות, שטף הקרינה לאטמוספירה ולחלל קטן. אנרגיה שאינה מוחזרת ואינה נפלטת כקרינה תרמית או מועברת כחום כמוס באידוי מים, מועברת לאטמוספירה כחום מוחשי (כלומר כאוויר חם). כמות החום המועברת מפני השטח לאטמוספירה בדרך זו תלויה בתכונות ההסעה של התווך, המורכב מכיסויי צומח בעלי תכונות שונות. בניגוד לקרקע חשופה, הצומח מגביר את "חספוס" פני השטח וגורם לערבוב אוויר יעיל ולהחשת מעבר חום (חום מוחשי וכמוס כאחד) לאטמוספירה. החספוס תלוי בגובה הצמיחה, בצפיפותה ובמבנה החופה. תהליכי משב נוספים עשויים להשפיע על חלופי אנרגיה עם האטמוספירה^[16], ומכאן ברור ששינוי בכיסוי הצמחי יכול לגרום חימום או קירור של פני השטח.

לפעילות הצמחית השפעות בלתי ישירות נוספות, כגון פליטה של תרכובות אורגניות נדיפות (VOC) שלהן השפעה על היווצרות עננים ועל תכונותיה האופטיות של האטמוספירה. לכל התהליכים שתוארו עד כה יש אינטראקציה עם תנאי האקלים האזוריים. מודלים אקלימיים מראים כי לייעור באזורים טרופיים השפעה כוללת מקררת על האקלים, ולייעור באזורים הקרים השפעה מחממת, אך השפעת התווך הצמחי באזורים ממוזגים וצחיחים למחצה עדיין אינה ידועה כראוי^[27,24,22].

זיבטי יער-אקלים הייחודיים לאזורים צחיחים למחצה

אזורים צחיחים למחצה מכסים קרוב ל-20% משטח פני היבשות^[41,12]. לפי היחס שבין כמות הגשם שנתי היורד להתאיידות הפוטנציאלית (ראו הסבר למונח אצל^[17] Brutsaert) מוגדר רוב השטח של מדינת ישראל מצפון לבאר שבע כאזור צחיח למחצה (^[41] semi-arid and sub-humid) הכולל גם את האקלים הים תיכוני^[36]. באזורים צחיחים למחצה, המצויים סביב חגורת המדבריות העולמית, קרינת השמש חזקה במיוחד, ולשינויים בכיסוי הצומח השפעה חזקה על מאזן הקרינה. מאזן הקרינה עשוי להשפיע באופן ניכר על תנאי האקלים המקומיים ואף על תנאי האקלים האזוריים^[47,19]. מודלי אקלים מהשנים האחרונות מראים כיצד שינויים בכמות המשקעים באזורים צחיחים ובאזורים הצחיחים למחצה מושפעים מגורמים שונים, כגון תנודתיות בהפרשי הטמפרטורות שבין האוקיינוס הקר ליבשה החמה^[30] הנובעים בתורם משינויים בעוצמות קרינת השמש, בכסות הצומח, ובמעגלי היזון בין רמת המשקעים להתאדות^[64].

השכיחות והצפיפות של יערות באזורים צחיחים למחצה בעולם נמוכה, אך סך השטח המיוער באזורים אלה דומה לשטח היערות באזורים הצפוניים (boreal) שבאסיה, באירופה ובאמריקה או באזור הטרופי^[26,12]. קיימות הערכות שבעבר יערות כיסו שטחים נרחבים יותר באזורים שעל סף המדבר והצחיחים למחצה^[35]. התחזיות להתחממות ולהגברת תנאי היובש (הפחתה בגשמים, ירידה בלחות) באזורים היבשים מלוות בתחזיות לירידה בכיסוי הצומח ובהגברת תהליכי המדבור בחגורות ספר המדבר של כדור הארץ^[42]. בשל כך, קיבוע פחמן באזורים צחיחים למחצה ותרומתם למיתון האקלים לא זכו לתשומת לב ראויה במחקר המדעי בעבר. בשנים האחרונות חל שינוי במגמה זו, ובמחקרים נמצא כי קיומם של יערות נטועים באזורים שחונים אפשרי^[58]. נמצא כי האפשרות לקיבוע פחמן ביערות אלה עשויה להיות משמעותית ולמתן את עליית ריכוז הפחמן הדו-חמצני, וכן כי כושר ההסתגלות של העצים ועמידותם לשינוי האקלים החזוי גדולים מהצפוי^[60,39,23]. יתרה מכך, ההכרה בחשיבות הצומח באזורים הצחיחים למחצה גברה גם לאור מחקרים חדשים המראים כי ניתן לייחס חלק ניכר מהשינויים בקצב עליית ריכוזי הפחמן דו-חמצני באטמוספירה בין שנים לשינויים מקבילים בכמות המשקעים ובפעילות הפוטוסינתזה של הצומח באזורים צחיחים למחצה, כיוון שבאזורים אלה הצמחים רגישים יותר לכמות המים בקרקע בהשוואה לאזורים לחים^[50,8]. כלומר, לאזורים הצחיחים למחצה חשיבות רבה מכמה סיבות: שטחם הגדול, יכולתם לקיים יערות קולטי פחמן, השפעתם הרבה על שינויים בריכוזי הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה, וכמות האוכלוסייה העולמית השוכנת באזורים אלה (שליש מתושבי כדור הארץ) שתלויה מאוד בשירותי המערכת של היערות.



תא מדידה אוטומטי המאפשר סגירת ענף בתוכו למשך זמן קצר ומדידת קצב הפוטוסינתזה, הדיות, ומדדים פיזיולוגיים נוספים. תאים כאלה פזורים באתר המחקר ביתר ומספקים מדידות רציפות המשלימות את המדידות ממגדל המחקר (ראו [איור 2](#)) | צילום: איל רוטנברג

יצד מכמתים השפעות יער על האקלים?

ההבנה כי לכיסוי הצומח השפעה ניכרת על האקלים העולמי ובייחוד על תנאי האקלים האזוריים, הובילה לגיבוש תוכניות מחקר בהיקף עולמי ובתקציבים גבוהים, שנעשה בהן שימוש בשיטות מדידה חדשניות על פני הקרקע, באטמוספירה ובחלל. במרכז מאמץ זה בולטת הקמת רשת מגדלי מחקר (כדוגמת זה שביער יתיר - [איור 1](#)) למדידת שטפי גזי חממה, אנרגיה ומים, המוחלפים בין בתי הגידול היבשתיים (בעיקר יערות) והאטמוספירה. כ-600 מגדלי מחקר פזורים ברחבי העולם, מתנשאים מעל חופות צמחייה לעיתים לגובה של עשרות מטרים, ומאפשרים הצבת מכשור מדעי בשכבת הגבול שבין הצמחייה והאטמוספירה. בליבה של כל תחנה מערכת מדידות המבוססת על שיטות מיקרו-מטאורולוגיות, ומאפשרת לכמת שטפי פחמן דו-חמצני (המומרים לכמויות פחמן), מים ואנרגיה (ולעיתים גם מרכיבים נוספים כמו אוזון, מתאן ותרכובות אורגניות נדיפות) המוחלפים בין חופות הצמחים והאטמוספירה באופן רציף ועל פני שנים רבות ([נספח 2](#)).

איור 1. מערכות מדידת השטפים ששימשו את קבוצת המחקר

א1. צילום 'מעוף הציפור' של ראש המגדל למדידות שטפי הקרינה, גזי חממה וחום שבמרכז יער יתיר. ב1. מעבדה ניידת למדידות השטפים עם תורן החיישנים וציוד הפעלה נלווה (ארון בקרה וגנרטור לאספקת חשמל) במהלך סבב מדידות באזור חבל מודיעין.



איור 1

מערכות מדידת השטפים ששימשו את קבוצת המחקר

א1. צילום 'מעוף הציפור' של ראש המגדל למדידות שטפי הקרינה, גזי חממה וחום שבמרכז יער יתיר.

ב1. מעבדה ניידת למדידות השטפים עם תורן החיישנים וציוד הפעלה נלווה (ארון בקרה וגנרטור לאספקת חשמל)

במהלך סבב מדידות באזור חבל מודיעין.

וביב מדידות הליבה נערכות מדידות משלימות, כגון מדידות בקרקע של אגירת חום, תכולת מים [52,38], כמות החומר האורגני, רמת המזינים (חנקן [33,29] ואחרים) והפעילות המיקרוביאלית; מדידות ישירות בעצים, כגון רמת הפוטוסינתזה של העלים, מדידות בגזעים של זרימת מים ושינויי קוטר [63,40,38]; מדידות בתת-היער, כגון עושר מינים; מדידות של תהליכים בשכבות האטמוספירה שמעל [25] ומדידות מהחלל [59].

הצד הישראלי של המחקר

ישראל הצטרפה למחקר עולמי זה בשנת 2000, עת הוקם מגדל המחקר ביער יתיר על-ידי צוות ממכון ויצמן למדע. משנה זו נמשכות המדידות ברציפות עד היום. תחנת יתיר ייחודית ברשת העולמית, כיוון שהיער ניטע באזור הצחיח למחצה שעל גבול המדבר, עם כמות משקעים רב-שנתית ממוצעת של $285 (\pm 90)$ מ"מ והתאדות פוטנציאלית של כ-1,600 מ"מ בשנה. בישראל יש מפל משקעים גדול מצפון לדרום, של מעל 500 מ"מ גשם במרחק הקטן מ-200 ק"מ. למדרון האקלימי השפעה ברורה על כסות הנוף ועל פעילות הצומח, ויער יתיר נמצא בקצה הדרומי שלו. צוות המחקר הוסיף בשנת 2012 תחנה נידת (איור 1) שמאפשרת הרחבה של המדידות לתנאים אקולוגיים ואקלימיים לאורך מדרון זה. הרחבה זו כללה מדידות באזור אשתאול (ממוצע משקעים רב-שנתי של 540 מ"מ) ובאזור ביריה (755 מ"מ) ביערות ובשטחים פתוחים סמוכים. השילוב של תחנה נידת עם תחנת מחקר קבועה ייחודי לתחנה הישראלית ברשת העולמית. לתחנה הישראלית חשיבות מיוחדת, מאחר שהמחקר העולמי פסח כמעט לחלוטין על האזור הצחיח למחצה ועל אזור המזרח התיכון. שאלות מפתח בחזית המחקר כיום, שמענה הולם להן תלוי בקיום נתונים מהאזורים המייצגים נכונה את המערכת האקולוגית העולמית, כוללות היבטים כגון רמת קיבוע פחמן באזורים הצחיחים למחצה, כימות הקשר בין השפעות המדדים הביוגיאוכימיים והמדדים הביוגיאופיזיים על מערכות האקלים, רגישות המערכות האקולוגיות לשינוי אקלים חד כמו לאורך המדרון האקלימי בארץ, ויכולת הצמחים להסתגל לשינויים עתידיים במערכת האקלים האזורית והעולמית.

תוצאות המחקר

קיבוע שנתי של הפחמן ביער יתיר

ביער מתקיימים בו-זמנית שטפי פחמן (כפחמן דו-חמצני) מהאטמוספירה אל הצמחייה בתהליך הפוטוסינתזה (יצרנות ראשונית, GPP), ומנגד פליטה מהתווך הצמחי ומהפעילות המיקרוביאלית שבקרקע לאטמוספירה בתהליך נשימה (נשימה במערכת האקולוגית, Re). ציוד המדידה העיקרי בתחנות החקר (נספח 2) מאפשר למדוד רק את שטף הפחמן הדו-חמצני נטו (ההפרש בין השטף הנצרך לנפלט במערכת האקולוגית, NEE, המומר ליחידות פחמן), והוא מתאר את קצב הקיבוע של הפחמן השנתי הנשמר ביער לזמן ארוך, המתואר במשוואה: $NEE = GPP - Re$.

היכולת למדוד את שטף הפחמן הדו-חמצני נטו בלבד היא מגבלה של שיטת המדידה, המחייבת פיתוח שיטות משלימות להערכת המרכיבים השונים במשוואה ואת בחינת תגובתם לשינויים בתנאי הסביבה. המדידות ביער יתיר הראו כי 'קיבוע פחמן' ממוצע בין השנים 2000–2015 היה כ-190 גרם פחמן למ"ר יער לשנה (טבלה 1). הממצאים מפתיעים, היות שהם דומים לממוצע השנתי ביערות אורנים באירופה (כ-200 גרם למ"ר) ולא רחוקים מהממוצע ברשת המדידות העולמית שעומד על כ-260 גרם פחמן למ"ר יער [44]. הפרדת מרכיבי השטפים המתוארים במשוואה (בשיטות מקובלות) מראה שההבדלים בין יערות הגדלים באזורים לחים וביער יתיר שבאזור הצחיח למחצה הם בעוצמות השטפים: ביערות הלחים שטפי הקיבוע של הפחמן ושטפי הנשימה גדולים מאלה שביתיר, אך ההפרש ביניהם, 'קיבוע הפחמן נטו', דומה בשני האזורים (טבלה 1).

טבלה 1. השוואת ממוצע שטפי פחמן מיערות מחט בעולם ומיערות אורן באירופה וביתר

נחוני יערות אורנים באירופה על פי רשת המחקר CarboEurope ויערות מחטניים ברשת העולמית (על פי רשת FluxNet^[28]) ומנחוני המדידות ביער יתיר. נחוני החנות העולמיות על בסיס השנים 1995–2005, ואילו המדידות מיער יתיר הן מהשנים 2001–2010.

יערות	יצרנות ראשונית (GPP) גרם פחמן למ"ר יער לשנה	נשימה במערכת האקולוגית (Re) גרם פחמן למ"ר יער לשנה	מבלע הפחמן נטו (NEE) גרם פחמן למ"ר יער לשנה	היחס בין יצרנות ראשונית ליצרנות נטו (NEE/GPP)
ממוצע יערות אורן אירופיים	+1,144	-944	200	0.17
כלל היערות המחטניים בעולם	+1,540	-1,280	260	0.17
יער יתיר - סף המדבר	+800	-600	220	0.27

טבלה 1

השוואת ממוצע שטפי פחמן מיערות מחט בעולם ומיערות אורן באירופה וביתר

נחוני יערות אורנים באירופה על פי רשת המחקר CarboEurope ויערות מחטניים ברשת העולמית (על פי רשת ה-FluxNet^[28]) ומנחוני המדידות ביער יתיר. נתוני התחנות העולמיות על בסיס השנים 1995 – 2005, ואילו המדידות מיער יתיר הן מהשנים 2001 – 2010.

רמת קיבוע הפחמן השנתית עשויה להשתנות באופן חד בין השנים, והיא תלויה בגורמים שונים, כגון כמות המשקעים ומשטרם השנתי, רמת המשקעים בשנים קודמות ושינויים בתנאי אקלים כטמפרטורה ולחות אוויר. בעקבות שינויים בגורמים אלה עשוי חילוף הפחמן השנתי נטו במערכת האקולוגית ביתר לנוע בין 350 גרם למ"ר בשנה שידרו בה 373 מ"מ גשם (2004–2005) לכ-80 גרם למ"ר בשנת בצורת עם 166 מ"מ גשם (2008–2009). מידע רב-שנתי על קיבוע פחמן ליחידת שטח, שנאסף לאורך שנים רבות, חיוני לקבלת תמונה אמיתית על קיבוע ארוך טווח של הפחמן ולהבנת רגישות המערכת לגורמים המשפיעים עליה. בישראל קיים מידע זה לגבי יער יתיר בלבד (טבלה 1). מידע שנאסף בעזרת המעבדה הניידת (איור 1ב) מספק נתונים חדשים על יערות הנטועים באזורים שהאקלים מתון (לח) בהם יותר מביתר. על סמך מידע ראשוני זה מסתמן שקיבוע הפחמן ביערות אשתאול וביריה בשיא תקופת פעילות העצים (במהלך החודשים מרץ עד מאי) גבוה ב-10% וב-40% מיער יתיר בהתאמה. בקיץ, כשיער יתיר מפסיק להיות מבלע לפחמן (כלומר סך פליטת הפחמן בתהליך הנשימה של העצים והקרקע משתווה לסך קליטת הפחמן בתהליך הפוטוסינתזה במהלך היום ואף עולה עליו), קיבוע הפחמן נטו ביער אשתאול וביער ביריה נמשך, אך בקצב נמוך יותר מאשר בתקופת האביב^[51]. כאמור, לקיבוע הפחמן השנתי על-ידי יערות חשיבות רבה בגלל השפעתו המקררת על האקלים.

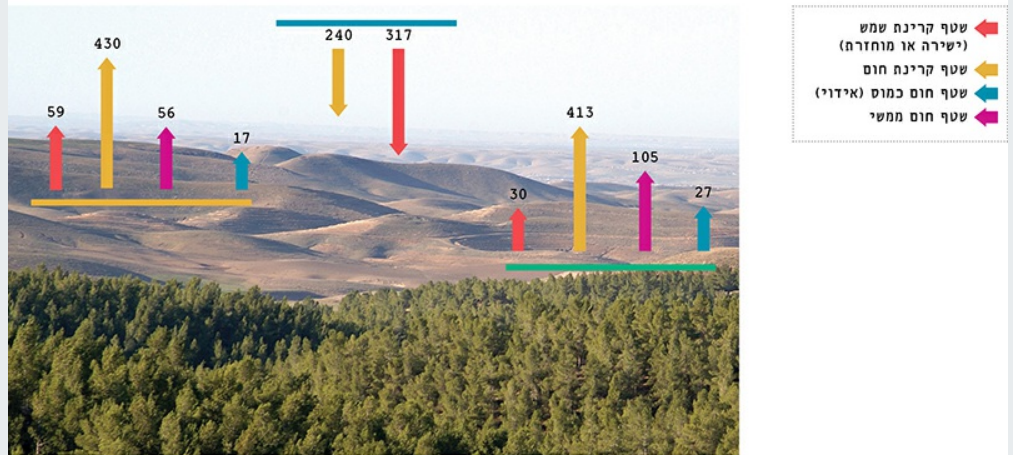
ההשפעות הביוגיאופיזיות על האקלים

חקר יחסי הגומלין בין הצומח לאקלים כולל גם את השפעת השנויים הפיזיקליים. תוצאות המחקר באזור יתיר הראו שלעומת המדבר סביב, חופת היער הכהה מחזירה כ-17% פחות קרינת שמש. כלומר, היא בעלת אלבדו נמוך, ובחופת היער נבלעת אנרגיה עודפת רבה, בייחוד בשיא הקיץ.

למרות העלייה החדה בכמות קרינת השמש הנבלעת בחופה, מיעוט המים בקרקע מגביל את האידוי מהצמחים ואת קירורם בדרך זו, ועם זאת נמצא שחופת היער קרה מפני הקרקע במדבר סביבה. הפרש הטמפרטורה מגיע עד ל-20 מעלות בצהרי יום הקיץ. ממוצע שנתי של הפרש הטמפרטורות בין חופת היער לסביבה מגיע לחמש מעלות. הירידה בטמפרטורת העלווה, יחסית לפני הקרקע, גוררת הפחתה ניכרת בפליטת קרינה תרמית מחופת היער לאטמוספירה, כיוון ששטף קרינת החום של 'גוף שחור' נמצא ביחס ישר לטמפרטורה בחזקת 4. כלומר, יחסית לקרקעות הרקע, חופת היער ביתר גורמת לעלייה בבליעת קרינת שמש (בגלל ירידה באלבדו), ולירידה בפליטת קרינה תרמית (בעקבות התקררות חופת היער). עוצמות שני התהליכים הללו דומות, ושילובם מכפיל את עומס הקרינה הכולל על נוף היער^[56] ההפרש בקליטת הקרינה בין יער יתיר לסביבתו (איור 2) מוערך ב-47 ואט למ"ר (ממוצע שנתי) – הפרש הדומה בגודלו להפרש עומס הקרינה באזורנו שבין הים ליבשה הסמוכה, המספק אנרגיה לזרימת אוויר, כמו בריזה בין הים ליבשה.

איור 2. מאזן אנרגיה שנתי טיפוסי (ואט למ"ר) מעל היער שעל גבול המדבר (יתיר) והאזור הלא מיוער הסמוך

החיצים מסמנים את כיוון השטפים ובאופן סכמטי את עוצמתם, שרשומה מעליהם. הקווים האופקיים מסמנים את מקור הקרינה (כחול לאטמוספירה, ירוק ליער וכתום לאזור המדברי החשוף). עוצמות הקרינות מהאטמוספירה (קרינת שמש וקרינת חום) זהות ליער ולשטח החשוף. עוצמת קרינת השמש המוחזרת מהיער נמוכה משל הסביבה, וכך גם הקרינה התרמית הנפלטת מהיער. בשני האזורים שטף החום המוחשי רב, והוא הגורם העיקרי המאפשר איזון בין שטפי האנרגיה. כמות החום הכמוס הנפלטת מועטה. נתוני היער ביתיר הם ממדידות רציפות בין השנים 2000–2010, נתונים מהאזור הלא מיוער סביב היער הם שילוב של מדידות שנעשו בעזרת המערכת הניידת בין השנים 2012–2016 והרחבה בעזרת מודל לשנים 2000–2015.^[51, 43]



איור 2

מאזן אנרגיה שנתי טיפוסי (ואט למ"ר) מעל היער שעל גבול המדבר (יתיר) והאזור הלא מיוער הסמוך

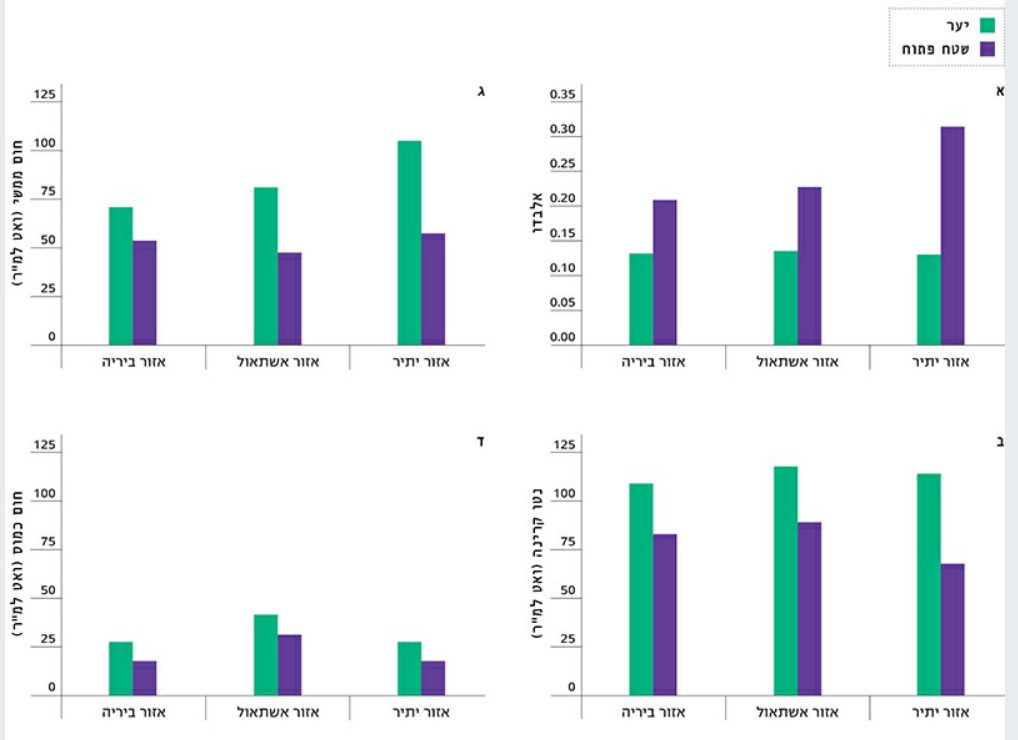
החיצים מסמנים את כיוון השטפים ובאופן סכמטי את עוצמתם, שרשומה מעליהם. הקווים האופקיים מסמנים את מקור הקרינה (כחול לאטמוספירה, ירוק ליער וכתום לאזור המדברי החשוף). עוצמות הקרינות מהאטמוספירה (קרינת שמש וקרינת חום) זהות ליער ולשטח החשוף. עוצמת קרינת השמש המוחזרת מהיער נמוכה משל הסביבה, וכך גם הקרינה התרמית הנפלטת מהיער. בשני האזורים שטף החום המוחשי רב, והוא הגורם העיקרי המאפשר איזון בין שטפי האנרגיה. כמות החום הכמוס הנפלטת מועטה. נתוני היער ביתיר הם ממדידות רציפות בין השנים 2000 – 2010, נתונים מהאזור הלא מיוער סביב היער הם שילוב של מדידות שנעשו בעזרת המערכת הניידת בין השנים 2012 – 2016 והרחבה בעזרת מודל לשנים 2000 – 2015.^[51, 43]

מהו המנגנון המאפשר ליער לקלוט קרינה (אנרגיה) רבה ועם זאת להיות קר מסביבתו? התווך הצמחי, שלא כקרקע החשופה, הוא מבנה תלת-ממדי גבוה יחסית, המורכב מגופים קטנים, בעיקר ענפים ועלים, הפזורים במרחב ומוקפים אוויר שמאפשר העברת חום יעילה ביניהם. באזורי אקלים לחים (כגון אזורים טרופיים) כשאספקת המים לצמח מספקת, חופת היער צפופה, ויעילות העברת החום נמוכה. קרינת השמש הנקלטת במהלך היום משתחררת בעיקרה כדיות מהצמחים (כשטף חום כמוס) המאפשר קירור של העלווה יחסית לסביבתה (קירור מים). באזורים צחיחים, כשעומס הקרינה גבוה, האידוי מוגבל, אך חופת היער הפתוחה מאפשרת החלפת אוויר חם עם האטמוספירה, בעיקר כשטף חום מוחשי (קירור אוויר). כינינו את התופעה הזו בשם אפקט הקונבוקטור (The convective effect), והיא נמצאה כמוסדת עיקרית של עומס הקרינה המוגבר הנבלע ביער^[57]. עוצמת שטף החום המוחשי ביער יתיר היא מהגבוהות שנמדדו ביערות בעולם. לקליטת אנרגיה עודפת זו השפעה מחממת על האקלים.

באיזו מידה משתנים אפקט האלבדו ואפקט הקונבוקטור בעקבות ייעור באזורים מתונים מבחינה אקלימית, לאורך מפל המשקעים בישראל? התוצאות שהתקבלו מהמעבדה הניידת הראו כי האלבדו ביערות אשתאול וביריה דומה לזה של יער יתיר, אך האלבדו של השטחים הלא מיוערים הסמוכים ליערות אלה נמוך יחסית לאזור המדברי בחבל יתיר, בשל הצומח המפותח יותר ובשל הימצאות קרקעות שצבען כהה. התוצאה – הפרש אלבדו בין האזור המיוער לשטח הסובב אותו נמוך ב-40% באזורי אשתאול וביריה מזה שבחבל יתיר. גם הפרשי הטמפרטורה בין האזור המיוער לשטחים הסובבים אותו קטנים יותר מביתיר, ובשל כך השפעת הקרינה התרמית קטנה יותר. הייעור אומנם מגביר את עומס הקרינה בכל האזורים שנבחנו, אך הפרש עומס הקרינה בין אזור יתיר המדברי לביריה הממוקמת באזור הים תיכוני הלח, קטן ב-55%^[51, 43] (איור 3).

איור 3. השפעות כסות הנוף על עוצמות חילופי שטפי אנרגיה (ואט למ"ר) השנתיים עם האטמוספירה באחרי המחקר [51, 43]

א3. ממוצע אלבדו שנתי של יער ושטח פתוח לידו המחושב כממוצע אריתמטי של החזרי הקרינה המדודים בשטחי המחקר (חסר יחידות).
 א3. ממוצע שנתי של שטפי הקרינה נטו (Rn) שנבלעים ביערות ובשטחים הפתוחים. ג3. ממוצע שנתי של שטפי החום הממשי (H) הנפלטים מהיערות ומהשטחים הפתוחים הסמוכים. ד3. ממוצע שנתי של שטפי החום הכמוס (LE) הנפלטים מהיערות ומהשטחים הפתוחים הסמוכים.
 אחרי המחקר: אזור ביריה – יער ביריה והשטח הפתוח בקדיא; אזור אשתאול – יער אשתאול והשטח הפתוח שמדרום למודיעין; אזור יתיר – יער יתיר והמדבר שמערב ליער.



איור 3

השפעות כסות הנוף על עוצמות חילופי שטפי אנרגיה (ואט למ"ר) השנתיים עם האטמוספירה באחרי המחקר [51, 43]

א3. ממוצע אלבדו שנתי של יער ושטח פתוח לידו המחושב כממוצע אריתמטי של החזרי הקרינה המדודים בשטחי המחקר (חסר יחידות).
 ב3. ממוצע שנתי של שטפי הקרינה נטו (Rn) שנבלעים ביערות ובשטחים הפתוחים. ג3. ממוצע שנתי של שטפי החום הממשי (H) הנפלטים מהיערות ומהשטחים הפתוחים הסמוכים. ד3. ממוצע שנתי של שטפי החום הכמוס (LE) הנפלטים מהיערות ומהשטחים הפתוחים הסמוכים.
 אחרי המחקר: אזור ביריה – יער ביריה והשטח הפתוח בקדיא; אזור אשתאול – יער אשתאול והשטח הפתוח שמדרום למודיעין; אזור יתיר – יער יתיר והמדבר שמערב ליער.

האם היער 'מחמם' או 'מקרר'?

קליטת פחמן על-ידי הצומח מפחיתה את ריכוז גז חממה חשוב זה באטמוספירה, מקטינה את אפקט החממה, והשפעה זו מקררת. חום כמוס וחום מוחשי הנפלטים לאטמוספירה מחממים את האטמוספירה התחתונה, כלומר את האזור שאנו חיים בו. על כן, לקליטה של קרינה בתווך יער השפעה 'מחממת' על האקלים [14], בעוד שהגברה של החזרת קרינת שמש ופליטה של קרינה תרמית מפני כדור הארץ לחלל החיצון או לשכבות אוויר גבוהות מסייעות בקירור. על בסיס המחקר והמדידות שלעיל, ניתן לכמת את תרומת הגורמים השונים של יער (ושל כל מערכת אקולוגית) להתחממות או להתקררות של האקלים ולהצביע על האפקט הכולל (נספח 3). בניית זה חשוב לשים לב ששינויים במרכיבים הביוגיאופיזיים (למשל באלבדו) הם חד-פעמיים, אך קליטת פחמן היא תהליך מצטבר, כיוון שיער יכול לקלוט ולאגור פחמן במשך שנים רבות.

עיקרי תוצאות אלה מוצגים בטבלה 2. בטבלה ניתן לראות את התרומות העיקריות של הייעור למאזן הקירור/חימום בהיבט האקלימי. באזור יתיר נדרשות כ-50 עד 80 שנות קיבוע פחמן כדי שההשפעה 'המקררת' המצטברת תגבר על עליית עומס הקרינה 'המחמם'. מאזן שלילי תחילתי זה (מבחינת האקלים) משתנה במהירות עם השינוי בתנאי הסביבה אפילו בטווח הגיאוגרפי הקצר בישראל. וכך, באזור ביריה המרוחק כ-190 ק"מ מאזור יתיר יידרשו כ-22 שנים בלבד עד שלייעור תהיה

השפעה מקררת. כלומר, במעבר מייעור ב'ספר המדבר' לאזור הלח יותר ההשפעות המחממות קטנות: אפקט האלבדו בין יער לשטח הפתוח מצטמצם במידה רבה, והפרש פליטות הקרינה התרמית קטן במידה מתונה יותר; מנגד, ההשפעה המקררת (כלומר קיבוע הפחמן) גדלה משמעותית. שוני מסוג זה בהשפעת הייעור באזורים שונים נצפה עד כה רק בקנה מידה גיאוגרפי גדול, כגון בהשוואה בין האזור הטרופי (שם הייעור יעיל בקירור) לאזור היער הצפוני (שם הייעור יביא להתחממות האקלים). האפשרות ששינויים דומים יקרו בטווח של פחות מ-200 ק"מ היא חדשנית.

טבלה 2. הערכת ההבדל בעומסי הקרינה השנתיים המוחלפים בין הצמחייה והאטמוספירה (radiative forcing) עקב שינוי בקיבוע פחמן ובתכונות הפיזיקליות של כסות הקרקע בעקבות הייעור

השוואה בין אזור מיוער ואזור לא מיוער ליחידות שטח נוף ועבור האזור הצחיח למחצה ^[53] (יתיר) והאזור הלח (ביריה) המתקבלת משילוב המדידות הרציפות במגדל שביתר ועם המעבדה הניידת, לשנות הפעילות 2015–2011 ^[51, 43]. שינוי עומסי הקרינה מחושב כהפרש שבין השטפים נטו שנמדדו מעל היער לזה שמעל לשטח הפתוח. סימן 'חיובי' משמעותו יותר עומס קרינה מעל היער, הגורר פליטות חום וחימום של האטמוספירה (והאקלים).

חבל יתיר	חבל ביריה	
220	450	הפרש קיבוע פחמן שנתי (גרם פחמן למ"ר לשנה)
-0.6	-1.3	המרת השפעת קיבוע פחמן ליחידות אנרגיה (ואט למ"ר לשנה)
+29	+20	פער בעוצמת קרינת השמש הנקלטת בין שני כיסויי הנוף (ואט למ"ר לשנה)
+18	+8	פער בעוצמת קרינת החום הנפלטת בין שני כיסויי הנוף (ואט למ"ר לשנה)
80	22	הערכת הזמן הנדרש להשפעה המקררת לפחות על זו המחממת (שנים)

טבלה 2

הערכת ההבדל בעומסי הקרינה השנתיים המוחלפים בין הצמחייה והאטמוספירה (radiative forcing) עקב שינוי בקיבוע פחמן ובתכונות הפיזיקליות של כסות הקרקע בעקבות הייעור

השוואה בין אזור מיוער ואזור לא מיוער ליחידות שטח נוף ועבור האזור הצחיח למחצה ^[53] (יתיר) והאזור הלח (ביריה) המתקבלת משילוב המדידות הרציפות במגדל שביתר ועם המעבדה הניידת, לשנות הפעילות 2015 – 2011 ^[51, 43]. שינוי עומסי הקרינה מחושב כהפרש שבין השטפים נטו שנמדדו מעל היער לזה שמעל לשטח הפתוח. סימן 'חיובי' משמעותו יותר עומס קרינה מעל היער, הגורר פליטות חום וחימום של האטמוספירה (והאקלים).

השפעות היער תלויות במידה רבה גם במדיניות ניהולו. עוצמות קיבוע הפחמן וחילופי שטפי אנרגיה מושפעים ממדיניות הדילולים, מכריתת עצים, מהשימוש בעץ הכרות, מקצב התחדשות הנוף ומעוצמת הרעייה בתת-היער. אגירת פחמן ביער היא תהליך ארוך שנים: עצים חדשים מחליפים עצים שהוצאו (עקב כרייתה, תמותה וכדומה), ומכאן שליער תרומה אקלימית מקררת ארוכת טווח, בייחוד בקרקעות שכמות הפחמן בהן לפני הנטיעות נמוכה ומאפשרת צבירת פחמן מוגברת, הנשמרת באדמה לאורך זמן באקלים יבש. חשוב לציין שבבואנו לנטוע יערות נדרש להעריך השפעות ושירותי מערכת נוספים של היער על המערכות האקולוגיות, על תנאי הסביבה הקרובה ועל החברה האנושית, כגון המגוון הביולוגי, הגנה מסחף קרקע, אספקת עץ, אזורי רעייה ואתרי נופש.

זשפעת גודלו של יער על האקלים

המחקר ביתיר בשנים האחרונות הראה ששטפי החום המוחשי הגדולים (אפקט הקונוקטור) מנפחים (מגביהים) את שכבת הגבול האטמוספרי (Planetary Boundary Layer) מעל היער [25]. שכבת הגבול, המגיעה בצהרי היום באזור לגובה הקרוב ל-2 ק"מ, מתנפחת בעוד 100 עד 250 מטרים בהשוואה לאזור לא מיוער (נספח 4), וזאת ביער ששטחו קטן יחסית. הגבהה זו של שכבת הגבול רגישה לזרימות אוויר באזור, ובתנאי בריזה חלשה השפעתה גוברת. ההשפעה על גובה שכבת הגבול גדלה ככל ששטח היער גדול, ותוספת הגובה יכולה להגיע למאות מטרים כשממדי היער מגיעים למאות קמ"ר. אף בקנה המידה הקטן של יער יתיר ניתן לזהות שינויים בזרימות האוויר המקומיות [25]. בקנה מידה גדול שינויים כאלה יכולים להביא לשינוי בזרימות אוויר גדולות יותר, להכנסת אוויר לח, לעננות ולהקלה בתנאי האקלים.

כדי להשליך מתוצאות מחקר מיער מודל קטן כיתיר (כ-28,000 דונם) לקנה מידה גדול צריך להשתמש במודלים מבוססי מחשב. בעזרת מודל גלובלי הראינו כי באזור הסאהל הצחיח למחצה שבאפריקה ובאזור אקלים דומה באוסטרליה, החלפת הצומח המקומי בקנה מידה של עשרות מיליוני דונמים ביער עם מאפיינים פיזיקליים כמו ביער יתיר, תביא להגברת הגשמים בעקבות השפעת היער על הזרימות האטמוספיריות. כאמור, יערות ישראל קטנים בשטחם, ומשמעות ייעור שטחים גדולים באגן היבש של הים התיכון על האקלים האזורי לא נבחנה עדיין. רמז לאפשרות שיחסי גומלין אחרים התרחשו בעבר ניתן ללמוד ממחקרים המראים כי אזורים של ספר המדבר באגן הים התיכון היו מיוערים עד התקופה הרומאית. יערות אלה נכחדו בשל שימוש שעשה בהם האדם [49].

קיבוע הפחמן ומאזן שטפי הפחמן האטמוספרי של ישראל

יערות אורנים הם כ-20% מכלל שטחי החורש והיער בישראל [2]. לאומדן קיבוע הפחמן ביערות אלה השתמשנו בנתונים שנאספו ביער יתיר בין השנים 2000–2016. הקיבוע הרב-שנתי של שטחים פתוחים הסמוכים ליערות האורנים נמוך משמעותית מאזורי היערות. ניתן להניח שתרומתם של אזורים אלה ושל שטחי המדבר בישראל לקיבוע הפחמן זניחה. כמו כן, אין נתונים על קיבוע של שטחים חקלאיים, אך משום שמחזור הגידול שלהם קצר בהשוואה ליערות, ניתן להניח שתרומתם למאזן פליטות הפחמן זניחה. מכאן עולה שעל פי ערכי הקיבוע שנמדדו ביער יתיר, נדרשים בממוצע שטח יער של כ-1 מ"ר כדי לקבוע בשנה פחמן הנפלט בייצור 1 קוט"ש [4] וכ-3.5 מ"ר יער לקלוט בשנה פחמן המשתחרר בשריפת ליטר בנזין. ברמה הארצית, ניתן להעריך כי סך שטחי היערות והחורשים בישראל מקבעים כ- 8.7×10^5 טונות פחמן לשנה (ראו טבלה בנספח 5). מנגד, הממוצע השנתי של הפחמן שנפלט בישראל בשנים 2010–2016 עמד על כ- 7.01×10^6 טונות, ש-97% מתוכם מקורם בשריפת דלקים [2], ועל כן קיבוע הפחמן בישראל יכול לאזן כ-5% מכלל הפחמן הנפלט ממקורות אנושיים (לא כולל המסת פחמן דו-חמצני באזור הכלכלי הבלעדי של ישראל [מי הים התיכון של ישראל]).



חיישן למדידת מהלך השינוי היומי של קוטר גזע עץ אורן, המוצב בתחנת המחקר ביער יתיר. רגישות מדידת החיישן היא עשירית המיקרון | צילום: איל רוטנברג

מבט לעתיד

תחזיות לגבי שינוי האקלים באזורנו צופות התחממות והתייבשות בד בבד עם עלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה (למשל [21]). באגן המזרחי של הים התיכון צפויים ירידה של עד כ-30% ברמת המשקעים ושינויים במשטר הגשמים עד סוף המאה [31]. יער יתיר הממוקם בקצה גבול התפוצה מבחינת טמפרטורות ומשקעים להתפתחות עצי אורן בעולם, מקבל בממוצע כ-285 מ"מ גשם בשנה. בסוף המאה עלול קו משקעים זה לעבור באזור שכמות המשקעים השנתית בו כיום היא 410 מ"מ, כלומר בקו שעובר מאזור קריית גת לדרום פארק בריטניה.

תגובתם של יערות וחורשים לשינוי האקלים מורכבת, דבר המקשה על חיזוי שרידותם העתידית. התחממות האקלים צפויה לגרום שינויים בעונת הגידול, כגון הקדמת האביב, תופעה שתוכל לשפר את הייצור הראשוני (קיבוע פחמן) באזורים הלחים, אך גם תאריך את תקופת היובש באזורים צחיחים למחצה. לשינוי בחלוקת המשקעים במהלך העונה הרטובה יכולה להיות השפעה מכרעת על שרידות היערות. המודלים צופים ירידה בכמות המשקעים באזור בליווי הערכה שמספר אירועי הגשם יקטן, אך עוצמתם תגדל [10]. הנתונים הרב-שנתיים מראים שיער יתיר יכול לשמר פעילות פיזיולוגית גבוהה גם עם ירידה של עד כ-30% בכמות הגשם, אם יתקיימו מספר אירועי סופה משמעותיים עם כמות משקעים מעל ל-20 מ"מ, שיבטיחו חדירת מים לבית השורשים. לעומת זאת, בשנת גשמים ממוצעת יראה היער סימני עקה, אם הגשם יגיע בפזיור רב ובכמויות קטנות המתאדות במהירות מהקרקע ומהעלווה [54].

שרידות יערות באזורים צחיחים למחצה

הנתונים ביתיר מצביעים על התאמות אקופיזיולוגיות רבות ומרשימות של עצי האורן. השוואת מועד שיא הפעילות הפוטוסינתטית של יערות אורנים בעולם מצביעה על הקדמת תקופת פעילותם (שינוי פנולוגי) לעבר החורף ככל שהטמפרטורה עולה, עוצמת הקרינה עולה וזמינות המים יורדת. זוהי כנראה אסטרטגיה להימנעות מתנאי עקה מרכזית. לאחרונה הראינו שבעוד שיא קיבוע הפחמן ביערות האורנים בצפון אירופה מתרחש בקיץ (באוגוסט), ביתיר מתרחש שיא הפעילות בחודש מרץ [56]. ההתאוששות המהירה והחזרה לפעילות פוטוסינתטית כמעט מלאה מיד לאחר תקופות של עקת חום ויובש מסתמנת כמנגנון חשוב נוסף המאפשר לעצי האורן לשרוד [60]. שרידות באזורים צחיחים למחצה כדוגמת יתיר, תהיה כמובן מורכבת יותר אם התנאים יורעו, אך נראה כי ניהול יער, שיכלול משטר דילולים שיתאים את צפיפות היער לתנאי הסביבה [1], שילוב רעיה לוויסות צמחיית תת-היער ונטיעת עצי אורן המתאימים לאזור הצחיח למחצה (אקוטיפים) מאזורי אקלים שונים [18, 23, 39], עשוי לאפשר ליער יתיר לשרוד.

ממוצע גשם שנתי יציב של 285 מ"מ אינו מגבילה לקיום יער בתנאים כיום באזור יתיר, והחשש לקיומו נובע משנות בצורת קיצוניות האופייניות למרחב. שנות הבצורת הרצופות 2007/08 ו-2008/09 מחישות זאת היטב: רמת המשקעים בשנים אלה הסתכמה ב-201 וב-166 מ"מ בהתאמה, וביניהם שררו 349 ימי יובש (ימי גשם בודדים בכמות הנמוכה מ-5 מ"מ, כך שהעצים לא יכלו לקלוט מים). שנות הבצורת הביאו לראשונה לתמותה של כ-5-7% מעצי האורן ביתיר [7]. ספק אם היער היה שורד לולא שני גלי גשם שירדו בתקופה של 47 יום בסוף עונת הגשמים 2008/09.

מחקרים מרחבי העולם מצביעים על תמותה נרחבת של עצי אורן בשל שינוי האקלים. מודלים של פעילות פיזיולוגית של אורנים לסוף המאה צופים תמותה שעלולה לגרום להיעלמות עצי מחט מאזורים נרחבים בחצי הכדור הצפוני [45]. שינוי האקלים עשוי להיות מהיר יותר מקצב ההתאמה של העצים אליו. כיוון שיער יתיר מצוי בקצה גבול התפוצה מבחינת משקעים, עולה גם ספק לגבי עתידו, ואף לגבי עתיד יערות הגדלים באזורים מתונים בישראל.

במהלך מאה השנים האחרונות בישראל גדלו שטחי היערות והחורשים במאות אחוזים. ספק אם בעתיד יעלה גודל שטחים אלה אף באחוזים בודדים, ולא ברור אם הדבר רצוי כלל מבחינה סביבתית או חברתית. נראה שהיכולת של יערות וחורשים בישראל לקבוע פחמן כפי שחישבנו, כמעט מוצתת עד תום.

במהלך 2015 הציבה לעצמה ישראל יעד שאפתני להפחתת פליטות גזי חממה לנפש [3] בכ-26% עד שנת 2030. מנגד, גידול האוכלוסייה הצפוי, 28% (ערך תחזית ביניים [6]), והעלייה ברמת החיים במהלך אותן שנים יביאו לגידול בפליטות, ולכן עשויים לבטל לחלוטין הפחתה זו. מכלול השינויים הסביבתיים העתידיים עד 2030 אינו צפוי להשפיע על קצב הקיבוע של פחמן ליחידת שטח יער ובשטחים אחרים, ומכאן שללא הפחתה דרמטית בהרבה מהמוצע או מיתון בקצב גידול האוכלוסין מדינת ישראל לא תוכל לתרום למאמץ ההפחתה העולמי של פליטות הפחמן, שהוא גז החממה העיקרי שלאדם יכולת השפעה עליו.

בהתחשב בשינוי האקלים החזוי ובלחצי הפיתוח הצפויים במדינת ישראל ניתן לשער כי נושא שרידות היערות והחורשים בישראל ויכולתנו להתמודד איתו יהוו אתגר לתושבי הארץ הזאת החרדים לנופיה ולתנאי המחיה בה.

תודות

תודה מיוחדת מופנת לחברי קבוצת המחקר הקבועים, אפרת שוורץ ופידור טרינוב, ולתלמיד המחקר לדוקטורט יקיר פריזלר, המלווה את המחקר עוד מתחילת לימודיו לתואר ראשון.

מחקר ארוך טווח זה התבצע בעזרת התמיכה ארוכת השנים של אנשי קק"ל: מנהל יער יתיר עבד אבו-אלקלין וצוותו, מנהל מרחב דרום עמי אוליאל, מנהל אגף הייעור ד"ר דוד ברנד, ובייחוד מנהל מחלקת היער איציק משה; העזרה בבנייה ובתחזוקה של מסד הנתונים מצד יטי ורון; העזרה הטכנית של חגי שגיא, אברהם פלנר ובועז נינו-סתר מהמחלקה למדעי כדור הארץ וחקר הכוכבים שבמכון ויצמן; תלמידי המחקר לתארים מתקדמים של קבוצת המחקר ועזרת סטודנטים רבים במשרות זמניות מהפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית בירושלים.

המחקר ביער יתיר והמחקר בעזרת התחנה הניידת מומנו לאורך השנים (לפי סדר אל"ף-בי"ת) בעזרת:

BSF, DIP, FPEU, EU-FP7, IAEA, IMO, IMO, IMON, IMOS-French, IMOS-Germany, ISF-NESF, ISF, IWA, KKL, Kaplan Sanford, Minerva, Robert & Cathy Lewis funding, USDA, University of Arizona.

הלכה למעשה

ד"ר דוד ברנד, יצחק משה ואסף קרואני, אגף הייעור, קק"ל:

המאמר מתבסס על מחקרים ארוכי טווח המתבצעים על-ידי חוקרי מכון ויצמן ביערות קק"ל ומדגיש את חשיבות היערות המחטניים בבליעת גזי חממה. תוצאות מחקרים אלה תורמות להבנת מאזן המים של היערות באזורי הארץ השונים, ומסייעות בקביעת ממשק הדילולים וצפיפות היער בגילם שונים. הממשק נדרש להבטחת קיימות היערות ולאספקת שירותים אקולוגיים מגוונים לנוכח שינוי האקלים הצפוי באזורנו. במסגרת מפעל הייעור נערכת קק"ל לשינוי אקלים ולהבטחת יערות בני-קיימא. פעולותיה כוללות, בין השאר, נטיעת יערות וחורשות המתאימים לתנאים האקולוגיים המאפיינים את חבלי הארץ השונים, בחינה ונטיעה של סוגי צומח העמידים ליובש, וכן פעולות איסוף מי נגר המבוססות על עקרונות החקלאות העתיקה להגדלת לחות הקרקע ולוויסות עוצמת השיטפונות. יעדי האו"ם לפיתוח בר-קיימא 2030 מדגישים, בין השאר, את חיוניותם ותורומם של היערות, את המאבק במדבור ואת שיקום המערכות המדורדרות באזורים צחיחים. בוועידת הייעור העולמית של האו"ם (COFO 24) ביולי 2018 הדגישה קק"ל בפני פורום הייעור הים תיכוני את המורכבות בניהול יערות באזורים צחיחים וצחיחים למחצה לנוכח שינוי האקלים ועליית קו המדבור צפונה. מדינות העולם מקבלות בברכה את מומחיות קק"ל בנושאים אלה, ושיתופי פעולה רבים נרקמים סביב המחויבות העולמית הגוברת לשיקום מערכות יער מדורדרות באזורים יובשניים.

מקורות

1. אסם י. 2013. סוגיות עיקריות בחקר היערות המחטניים של ישראל – סיכום ארבעים שנות מחקר (1972–2012). חלק ב: הבנת התהליכים הטבעיים המתרחשים ביער ומעבר לניהול היער כמערכת אקולוגית רב-תכליתית. *אקולוגיה וסביבה* 4(4): 321–330.
2. הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. 2002. *דו"ח שימושי קרקע*.
3. הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. 2016. *פליטות משריפת דלק, לפי סוג דלק*.
4. חברת החשמל לישראל. *דין וחשבון סביבתי, לשנים 2014-2015*.
5. ממשלת ישראל. 2015. *הפחתת פליטות גזי חממה וייעול צריכת האנרגיה במשק*.

6. פלטיאל א, ספולקר מ, קורנילקו א ומלדונדו מ. 2012. [תחזיות אוכלוסייה לישראל לטווח ארוך: 2009–2059](#). הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.
7. פרייזלר י, רוטנברג א, הר נ, ואחרים. 2016. שרידות יער אורנים על גבול המדבר בעקבות שנות בצורת קיצונית. *אקולוגיה וסביבה* **7**(1): 41–51.
8. Ahlstrom A, Raupach MR, Schurgers G, et al. 2015. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science* **348**: 895-899.
9. Alkama R and Cescatti A. 2016. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science* **351**: 600-604.
10. Alpert P, Ben-Gai T, Baharad A, et al. 2002. The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophysical Research Letters* **29**.
11. Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. 2000. *Advances in Ecological Research* **30**: 113-175.
12. Bastin JF, Berrahmouni N, Grainger A, et al. 2017. The extent of forest in dryland biomes. *Science* **356**: 635-638.
13. Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, et al. 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science* **329**: 834-838.
14. Betts RA. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* **408**: 187-190.
15. Betts RA, Boucher O, Collins M, et al. 2007. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature* **448**: 1037-1041.
16. Bonan GB. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* **320**: 1444-1449.
17. Brutsaert W. 1982. Evaporation into the atmosphere; Theory, history and applications. Dordrecht (Holland): Springer Science, Business Media B.V.
18. Calev A, Zoref C, Tzukerman M, et al. 2016. High-intensity thinning treatments in mature *Pinus halepensis* plantations experiencing prolonged drought. *European Journal of Forest Research* **135**: 551-563.
19. Charney J, Stone PH, and Quirk WJ. 1975. Drought in Sahara – Biogeophysical feedback mechanism. *Science* **187**: 434-435.
20. Claussen M, Brovkin V, and Ganopolski A. 2001. Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change. *Geophysical Research Letters* **28**: 1011-1014.
21. Collins M, Knutti R, Arblaster J, et al. 2013. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, et al. (Eds). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK): Cambridge University Press.

22. Cox PM, Betts RA, Bunton CB, et al. 1999. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics* **15**: 183-203.
23. David-Schwartz R, Paudel I, Mizrachi M, et al. 2016. Indirect evidence for genetic differentiation in vulnerability to embolism in *Pinus halepensis*. *Frontiers in Plant Science* **7**: 768.
24. Davin EL and de Noblet-Ducoudre N. 2010. Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate* **23**: 97-112.
25. Eder F, De Roo F, Rotenberg E, et al. 2015. Secondary circulations at a solitary forest surrounded by semi-arid shrubland and their impact on eddy-covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **211**: 115-127.
26. FAO. 2006. Global forest resources assessment 2005 – Progress towards sustainable forest management. Vol. 147.
27. Feddema JJ, Oleson KW, Bonan GB, et al. 2005. The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science* **310**: 1674-1678.
28. FluxNet. www.fluxnet.fluxdata.org.
29. Gelfand I, Feig G, Meixner FX, et al. 2009. Afforestation of semi-arid shrubland reduces biogenic NO emission from soil. *Soil Biology and Biochemistry* **41**: 1561-1570.
30. Giannini A, Saravanan R, and Chang P. 2003. Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science* **302**: 1027-1030.
31. Giorgi F and Lionello P. 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* **63**: 90-104.
32. Good SP, Noone D, and Bowen G. 2015. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science* **349**: 175-177.
33. Grunzweig JM, Hemming D, Maseyk K, et al. 2009. Water limitation to soil CO₂ efflux in a pine forest at the semiarid "timberline ". *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* **114**: 14.
34. Helman D, Osem Y, Yakir D, et al. 2017. Relationships between climate, topography, water use and productivity in two key Mediterranean forest types with different water-use strategies. *Agricultural and Forest Meteorology* **232**: 319-330.
35. Houghton RA and Hackler JL. 2006. Emissions of carbon from land use change in sub-Saharan Africa. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* **111**: 12.
36. Kafle HK and Bruins HJ. 2009. Climatic trends in Israel 1970–2002: Warmer and increasing aridity inland. *Climatic Change* **96**: 63-77.
37. Kiehl JT and Trenberth KE. 1997. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* **78**: 197-208.
38. Klein T, Cohen S, Paudel I, et al. 2016. Diurnal dynamics of water transport, storage and hydraulic conductivity in pine trees under seasonal drought. *iForest* **9**: 710-719.

39. Klein T, Di Matteo G, Rotenberg E, et al. 2013. Differential ecophysiological response of a major Mediterranean pine species across a climatic gradient. *Tree Physiology* **33**: 26-36.
40. Klein T, Rotenberg E, Tatarinov F, et al. 2016. Association between sap flow-derived and eddy covariance-derived measurements of forest canopy CO₂ uptake. *New Phytologist* **209**: 436-446.
41. Lal R. 2004. Carbon sequestration in dryland ecosystems. *Environmental Management* **33**: 528-544.
42. LeHouerou HN. 1996. Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments* **34**: 133-185.
43. Llusia J, Roahtyn S, Yakir D, et al. 2016. Photosynthesis, stomatal conductance and terpene emission response to water availability in dry and mesic Mediterranean forests. *Trees-Structure and Function* **30**: 749-759.
44. Luyssaert S, Inglima I, Jung M, et al. 2007. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* **13**: 2509-2537.
45. McDowell NG, Williams AP, Xu C, et al. 2016. Multi-scale predictions of massive conifer mortality due to chronic temperature rise. *Nature Climate Change* **6**: 295-300.
46. Myhre G, Kvilevag MM, and Schaaf CB. 2005. Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS surface albedo data. *Geophysical Research Letters* **32**.
47. Otterman J. 1974. Baring high-albedo soils by overgrazing – hypothesized desertification mechanism. *Science* **186**: 531-533.
48. Pan YD, Birdsey RA, Fang JY, et al. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* **333**: 988-993.
49. Perlin J. 2005. A forest journey: The story of wood and civilization. New York: Countryman Press.
50. Poulter B, Frank D, Ciais P, et al. 2014. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature* **509**: 600-603.
51. Ramati E. 2015. Tradeoffs between carbon sequestration and radiation budget in influencing climate along the precipitation gradient in Israel (MSc Thesis). Rehovot: The Weizmann Institute of Science.
52. Raz-Yaseef N, Rotenberg E, and Yakir D. 2010. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**: 454-462.
53. Raz-Yaseef N, Rotenberg E, and Yakir D. 2010. Effects of spatial variations in soil evaporation caused by tree shading on water flux partitioning in a semi-arid pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**(3): 454-462.
54. Raz Yaseef N, Yakir D, Rotenberg E, et al. 2010. Ecohydrology of a semi-arid forest:

- Partitioning among water balance components and its implications for predicted precipitation changes. *Ecohydrology* **3**: 143-154.
55. Ross J. 1981 The radiation regime and architecture of plant stand. London: Dr W. Junk Publishers.
56. Rotenberg E and Yakir D. 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science* **327**: 451-454.
57. Rotenberg E and Yakir D. 2011. Distinct patterns of changes in surface energy budget associated with forestation in the semiarid region. *Global Change Biology* **17**: 1536-1548.
58. Sankaran M, Hanan NP, Scholes RJ, et al. 2005. Determinants of woody cover in African savannas. *Nature* **438**: 846-849.
59. Sprintsin M, Karnieli A, Berliner P, et al. 2009. Evaluating the performance of the MODIS Leaf Area Index (LAI) product over a Mediterranean dryland planted forest. *International Journal of Remote Sensing* **30**: 5061-5069.
60. Tatarinov F, Rotenberg E, Maseyk K, et al. 2016. Resilience to seasonal heat wave episodes in a Mediterranean pine forest. *New Phytologist* **210**: 485-496.
61. Trenberth KE, Dai AG, van der Schrier G, et al. 2014. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change* **4**: 17-22.
62. Trenberth KE, Fasullo JT, and Kiehl J. 2009. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* **90**: 311-323.
63. Ungar ED, Rotenberg E, Raz-Yaseef N, et al. 2013. Transpiration and annual water balance of *Aleppo pine* in a semiarid region: Implications for forest management. *Forest Ecology and Management* **298**: 39-51.
64. Xue YK. 1997. Biosphere feedback on regional climate in tropical North Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **123**: 1483-1515.

נספחים (זמינים באתר)

נספחים 1-6

[להורדה](#)