

מיכאל דורמן

המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי,
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

טל סבוראי

המחלקה לגאוגרפיה ופיתוח סביבתי,
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

אבי פרבולוצקי

המחלקה לגידולי שדה ומשאבי טבע,
מנהל המחקר החקלאי – מרכז
וולקני

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

דורמן מ, סבוראי ט ופרבולוצקי א.
2012. התייבשות עצים ביערות אורן
ירושלים בישראל – מבט מגובה רב.
אקולוגיה וסביבה 3(3): 230–237.



עצי אורן ירושלים יבשים ביער כרמים, הנמצא באזור צחיח למחצה. מרץ 2012 | צילום: מיכאל דורמן

התייבשות עצים ביערות אורן ירושלים בישראל – מבט מגובה רב

30 באוגוסט, 2012

גיליון סתיו 2012 / כרך 3(3)

[חזית המחקר](#)

על קצה המזלג

- עלייה בקצב תמותת עצים ביערות היא תופעה מוכרת בישראל כמו במקומות נוספים בעולם, ויש המייחסים אותה לשינוי האקלים.
- בישראל נצפתה תמותה מוגברת של עצי אורן ירושלים ביערות נטועים.
- המאמר מציג גישה המאפשרת בחינה רחבת היקף, במרחב ובזמן, של תופעת התייבשות עצים ביערות, באמצעות כלי חישה מרחוק.
- המחקר בדק שינויים בתכולת המים ביערות בצפון הארץ בשנים 1992–2007, בעזרת הדמאות לוויין.
- ככל שעולה גיל היער ויורדת כמות המשקעים בו, מתקיימת תחרות חזקה יותר על מאגר נמוך של מים בקרקע, ולכן עצי יערות אלה נפגעים ראשונים מבצורות.

המערכת

תקציר

תמותת יער בקצב גבוה מבעבר, המיוחסת לשינויי אקלים, נצפית במקומות רבים בעולם. תופעה זו מושפעת מגורמי סביבה רבים, ותוצאותיה ניכרות, על פי רוב, זמן רב לאחר אירוע עקה, ומתפרסות על פני שטחים נרחבים. מאפיינים אלה מקשים על המעקב אחריה. חישה מרחוק היא כלי מתאים למשימה, שכן בעזרתה ניתן לנטר מדדי יער בעלי משמעות פיזיולוגית בקנה מידה מקומי ואזורי ולאורך תקופות ארוכות.

לאחרונה נצפתה ביערות בישראל תמותה מוגברת של אורן ירושלים (*Pinus halepensis*), המין הנפוץ ביותר ביערות הנטועים. מטרת מחקר זה היא לבחון את הדפוס המרחבי של שינויי מדד תכולת המים (NDWI) ביערות אורן ירושלים בצפון ישראל, וכן את השפעת תנאי הסביבה על דפוס זה.

שינויים במדד ה-NDWI בתקופה 1992–2007 חושבו מסדרה של 7 הדמאות לוויין Landsat של צפון ישראל. השפעת גורמי סביבה ביוטיים ופיזיים על שינוי NDWI נבדקה בעזרת רגרסיה ליניארית מרובת משתנים בשיטת Generalized Least Squares המאפשרת להתחשב במתאם בין תצפיות קרובות גאוגרפית.

שנת הנטיעה, כמות המשקעים הממוצעת, כמות הקרינה והאינטראקציה בין כמות המשקעים הממוצעת לכמות הקרינה השפיעו על שינוי ב-NDWI. בחלקות באזורים יבשים יותר ובגיל מבוגר יותר נטו ערכי השינוי ב-NDWI לכיוון השלילי יותר.

אנו משערים שההתאמה בין גיל מבוגר ואקלים יבש יותר לבין שינוי שלילי ב-NDWI מבטאת תחרות חזקה יותר על מאגר נמוך יותר של מים בקרקע. באתרים כאלה העצים עשויים להיות קרובים יותר לסף העמידות ליובש, ולכן נצפה לראות ירידה תלולה יותר בתפקודם בתקופת בצורת. אנו מציעים להמשיך את המחקר המוצג תוך הגדלה של הרזולוציה בזמן ובמרחב ותוך בחינה של גורמים נוספים, כדי לבטא בצורה מפורטת יותר הן את השונות בתגובת היער הן את השונות בתנאי הסביבה.

תקציר

תמותת יער בקצב גבוה מבעבר, המיוחסת לשינויי אקלים, נצפית במקומות רבים בעולם. תופעה זו מושפעת מגורמי סביבה רבים, ותוצאותיה ניכרות, על פי רוב, זמן רב לאחר אירוע עקה, ומתפרסות על פני שטחים נרחבים. מאפיינים אלה מקשים על המעקב אחריה. חישה מרחוק היא כלי מתאים למשימה, שכן בעזרתה ניתן לנטר מדדי יער בעלי משמעות פיזיולוגית בקנה מידה מקומי ואזורי ולאורך תקופות ארוכות.

לאחרונה נצפתה ביערות בישראל תמותה מוגברת של אורן ירושלים (*Pinus halepensis*), המין הנפוץ ביותר ביערות הנטועים. מטרת מחקר זה היא לבחון את הדפוס המרחבי של שינויי מדד תכולת המים (NDWI) ביערות אורן ירושלים בצפון ישראל, וכן את השפעת תנאי הסביבה על דפוס זה.

שינויים במדד ה-NDWI בתקופה 1992–2007 חושבו מסדרה של 7 הדמאות לוויין Landsat של צפון ישראל. השפעת גורמי סביבה ביוטיים ופיזיים על שינוי NDWI נבדקה בעזרת רגרסיה ליניארית מרובת משתנים בשיטת Generalized Least Squares המאפשרת להתחשב במתאם בין תצפיות קרובות גאוגרפית.

שנת הנטיעה, כמות המשקעים הממוצעת, כמות הקרינה והאינטראקציה בין כמות המשקעים הממוצעת לכמות הקרינה השפיעו על שינוי ב-NDWI. בחלקות באזורים יבשים יותר ובגיל מבוגר יותר נטו ערכי השינוי ב-NDWI לכיוון השלילי יותר.

אנו משערים שההתאמה בין גיל מבוגר ואקלים יבש יותר לבין שינוי שלילי ב-NDWI מבטאת תחרות חזקה יותר על מאגר נמוך יותר של מים בקרקע. באתרים כאלה העצים עשויים להיות קרובים יותר לסף העמידות ליובש, ולכן נצפה לראות ירידה תלולה יותר.

יותר בתפקודם בתקופת בצורת. אנו מציעים להמשיך את המחקר המוצג תוך הגדלה של הרזולוציה בזמן ובמרחב ותוך בחינה של גורמים נוספים, כדי לבטא בצורה מפורטת יותר הן את השונות בתגובת היער הן את השונות בתנאי הסביבה.

מבוא ותיאור הבעיה

שינויי אקלים גלובליים הביאו לעלייה בתדירות אירועי תמותת עצים ביערות בכל רחבי העולם [5]. לדוגמה, תמותה נרחבת – בעקבות רצף של שנות בצורת – של אורן אדוליס (*Pinus edulis*), אורן פונדרוסה (*Pinus Ponderosa*) ומינים נוספים תועדה בצורה אמינה ביותר בדרום-מערב ארה"ב [6]. במאה האחרונה פחתה כסות היערות של כדור הארץ במידה ניכרת בעקבות ניצול מוגבר מצד האדם, וכעת קיים החשש ששינויי אקלים יצמצמו עוד את שטח היערות הנוותרים. נושא זה זוכה לתשומת לב הולכת וגוברת בזכות השירותים האקולוגיים החיוניים שהיערות מספקים לביוספרה [5, 12].

תמותת עצים מתרחשת לאט (עצים יכולים למות מספר שנים לאחר אירוע עקה) ובשטחים נרחבים (עד קילומטרים רבועים רבים), ומשום כך יש צורך בניטור תגובת היער ברזולוציות זמן-מרחב מתאימות, כמו גם במחקר שיעזור להבין את הגורמים המשפיעים על מהלכה. לשם כך הוצע השילוב של נתוני חישה מרחוק עם אימות קרקעי [10]. אחת המטרות במחקרים מסוג זה היא להתיר את סבך הגורמים האקולוגיים ויחסי הגומלין ביניהם כדי לקבוע את התרומה היחסית של כל גורם לסיכויי התמותה של עץ בודד ואת השפעתו על דפוסי זמן-מרחב של התמותה ביער. דפוסי השינוי אינם ברורים מאליהם. בקנה מידה אזורי, לעתים קרובות מדווח על אירועי תמותה רבים יותר סמוך לגבולות היבשים יותר של תפוצת המין, במקומות שתנאי הסביבה מגבילים את תפקודו (performance) במידה רבה יותר [13]. בקנה מידה מקומי, כלומר בהשוואה בין בתי גידול משופרים לעומת בתי גידול גרועים, התמונה מורכבת יותר. איכות בית הגידול וגורמים תלויי צפיפות, כגון תחרות והתפרצויות מזיקים, עשויים לפעול בכיוונים מנוגדים ולהביא לדפוסי תמותה שונים לחלוטין במערכות שונות [5]. לדוגמה, לפי תרחיש אחד, תמותה מוגברת עשויה להתרחש בבתי הגידול הגרועים יותר, מכיוון ששם זמינות המים נמוכה יותר והעצים קרובים יותר לסף העמידות הפיזיולוגי. על פי תרחיש אחר, תמותה מוגברת עשויה להתרחש דווקא בבתי הגידול הטובים יותר, מכיוון ששם צפיפות העצים גבוהה יותר, דבר שעשוי להביא לתחרות חזקה יותר על מים בזמן עקת יובש, או לסיכוי גדול יותר של התפרצות מזיקים.

בעת עקת יובש עוברים עצי יער שינויים פיזיולוגיים וביוכימיים (כגון סגירת פיוניות ועיכוב תהליך הפוטוסינתזה) ובהמשך גם שינויים מבניים (ירידה בתכולת המים והכלורופיל בעלים והשרת עלים). שינויים אלה באים לידי ביטוי במאפייני החזרת האור של חופת היער; על עיקרון זה מבוססת חישה מרחוק של יער. לדוגמה, בתחום הנראה, כאשר עלה מתייבש, צבעו משתנה מירוק לצהוב או לחום. שינויים אחרים, שעין אדם לא חשה בהם, מתרחשים גם בתחום התת-אדום (infra-red). שינויים אלה חשובים, שכן ההחזרה של צומח בתחום התת-אדום מושפעת מהמבנה הפיזי (שטח העלווה, סוג העלים, גילם וכו') ומתכולת המים שלו. לכן, כדי להגדיל את רגישות מדידות החישה מרחוק לניטור שינויים בתכונות מבניות של הצומח, תחום אורכי הגל שיש להתרכז בו הוא האדום - תת-אדום קרוב עד תת-אדום בינוני. לרוב נעשה שימוש ב"מדדי צומח" (Vegetation Indices) או ב"מדדי תכולת מים" (Water Indices) המכמתים את דפוס ההחזרה בתחום זה של אורכי גל. לדוגמה, NDVI, כלומר Normalized Difference Vegetation Index, הוא מדד צומח המבטא את ההבדלים בין החזרה בתת-אדום קרוב לבין החזרה באדום [5, 15]; NDWI, כלומר Normalized Difference Water Index, הוא מדד תכולת מים המבטא את הבדל ההחזרה בין תת-אדום קרוב לבין תת-אדום בינוני [28]. ניתן להניח שמדד ה-NDVI מתייחס במיוחד לכמות הביומסה הירוקה ו-NDWI - לתכולת המים בחופת היער. שני המדדים שימשו לניטור השפעות עקת יובש על יערות בעבודות קודמות [16, 26, 28], NDVI, [11, 25, 27] (NDWI). יש לציין שבמחקרים שנעשתה בהם השוואה בין NDWI לבין NDVI, נמצא ה-NDWI רגיש יותר בזיהוי נזקי עקת יובש ביער [26, 28]. לאור זאת, בחרנו להשתמש בעבודה זו במדד NDWI להערכת שינויים בהחזרה של חופת היער, המבטאים את מידת עקת היובש. אורן ירושלים (*Pinus halepensis*) הוא המין הנפוץ ביותר ביערות הנוטעים בישראל. בשנים האחרונות נצפות התייבשות ותמותה של מין זה בישראל בקצב גבוה במעבר [2, 3] (איור 1), כמו גם במקומות אחרים באגן הים התיכון [20]. ניתן להניח שהסיבה לכך היא הירידה בכמות המשקעים השנתית בעשור האחרון, שכן זמינות המים היא הגורם המגביל עבור מין זה באזורים של פחות מ-600 מ"מ גשם בשנה ועומק קרקע הרדוד מ-60 ס"מ [22]. רוב היערות הנוטעים בארץ עונים לשני קריטריונים אלה. השפעת תנאי הסביבה, ובמיוחד תנאי זמינות מים, על קצב הגידול ועל ההתפתחות של אורן ירושלים באזורים שזמינות המים היא הגורם המגביל בהם עבור הצומח, נחקרה במשך שנים רבות. מחקרים אחדים בדקו את השפעתם של גורמים אקלימיים על התפתחות אורן ירושלים על סמך סקרי יער בקנה מידה אזורי [19, 24]. מחקרים אחרים בחנו את תגובת העץ לעקת יובש באופן מפורט יותר, אולם בקנה מידה מקומי יותר [1, 3, 14, 20, 21, 23, 29]. שינויים ביערות אורן ירושלים כתוצאה מעקת יובש נחקרו גם בעזרת מדד ה-NDWI בחישה מרחוק [11, 25, 27].



איור 1. עצי אורן ירושלים יבשים ביער גלבוט, אפריל 2011 | צילום: מיכאל דורמן ©
המחקר המוצג כאן מכוון להוסיף על הידע הקיים בבחינת השפעת תנאי הסביבה על תופעת ההתייבשות של עצי אורן ירושלים בתקופת מעבר מתנאים ממוצעים לתנאי בצורת, באזור נרחב וברזולוציה מרחבית גבוהה יחסית. כדי להגיע לקנה המידה הנדרש בחרנו להשתמש בנתונים טופוגרפיים ואקלימיים לאפיון תנאי סביבה בעזרת מערכת מידע גאוגרפית (GIS – 1°) ובחישה מרחוק לאפיון תגובות היער. למחקר שתי מטרות: (א) לבחון את ההיקף ואת הפריסה המרחבית של שינויים במדד תכולת המים NDWI, שעשויים להעיד על התייבשות ביערות אורן ירושלים בתקופה 1992–2007; (ב) לבחון אילו גורמי סביבה פיזיים וביוטיים עיקריים השפיעו על שינויים אלה. מענה על שתי השאלות הוא השלב הראשון להבנת הדפוס המרחבי של שינויים ביערות הנטועים כתוצאה מיובש בעשור האחרון. הנחת המוצא שלנו היא שההתייבשות תהיה מושפעת מזמינות המים (המושפעת בעיקר מהסביבה הפיזית) ומהדרישה למים של הצומח (המושפעת ממאפייני היער, כלומר מהסביבה הביוטית), ולכן הגורמים הבלתי תלויים שבדקנו נבחרו משתי קטגוריות אלה. גורמי הסביבה הפיזיים נבחרו לייצג הן את מפל זמינות המים בקנה מידה אזורי (כמות המשקעים השנתית הממוצעת) הן את השונות הטופוגרפית המקומית (השיפוע הטופוגרפי וכמות הקרינה). גורמי הסביבה הביוטיים שנבחרו קשורים למדדים פיזיולוגיים ולתחרות על מים, והם שנת הנטיעה ושטח גזעי העצים ליחידת שטח (Basal Area, BA).

טבלה 1. רשימת הדמאות Landsat ששימשו לחישוב NDWI

לוחין וחישן	תאריך
Landsat-4 TM	06.10.1992
Landsat-5 TM	15.10.1998
Landsat-5 TM	04.10.2000
Landsat-7 ETM+	18.10.2002
Landsat-5 TM	27.09.2003
Landsat-5 TM	05.10.2006
Landsat-5 TM	20.07.2007

טבלה 1

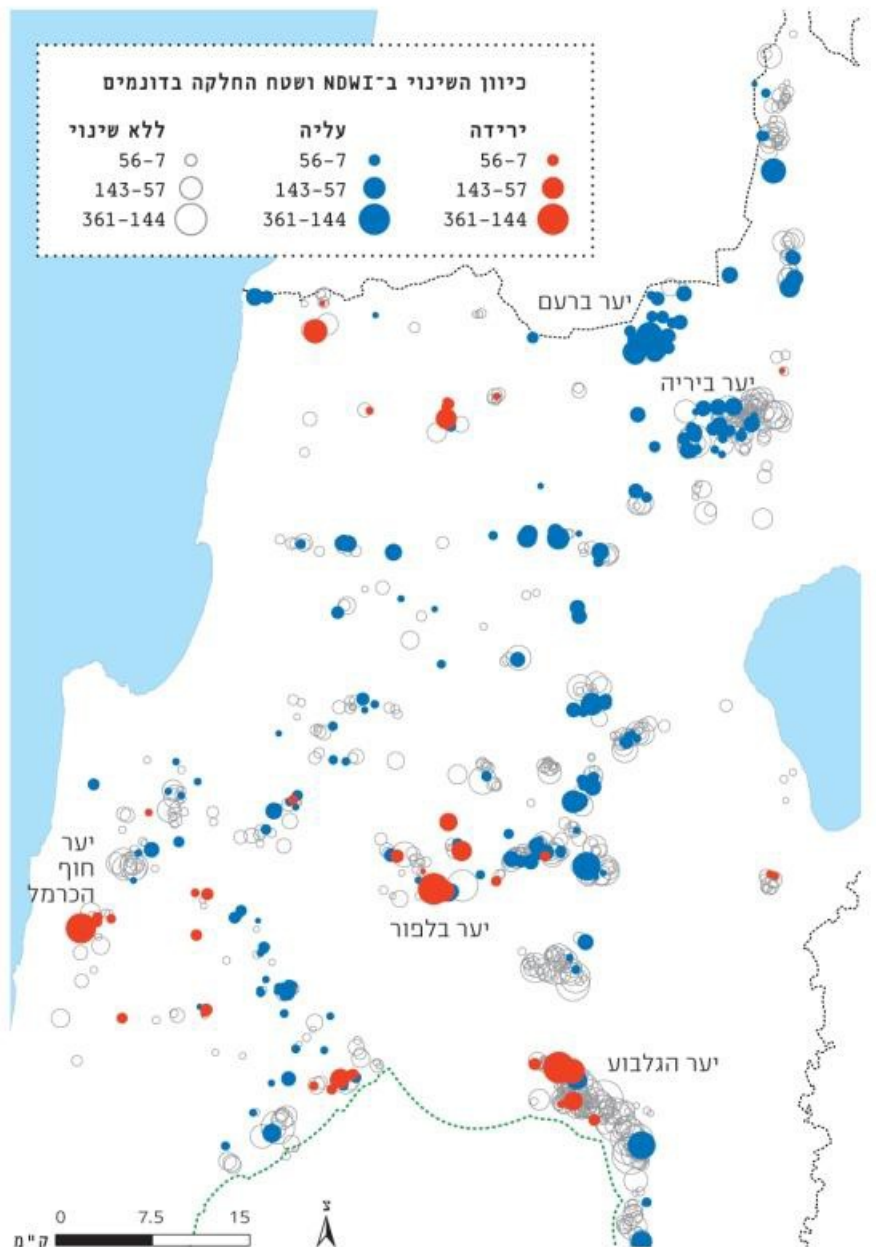
רשימת הדמאות Landsat ששימשו לחישוב NDWI

שיטות

הגורם התלוי, NDWI, חושב מהדמאות של לוחין ה-Landsat. לוחין זה מתאים במיוחד לניתוח שינויים בזמן על פני תקופה ארוכה (זמינות של הדמאות של אזורים רבים על פני כדור הארץ החל משנת 1982 ועד היום) וברזולוציה גבוהה יחסית (30 מ'). חישני ה-TM וה-ETM+ של לוחין ה-Landsat מודדים את ההחזרה בשישה ערוצים של קרינה מוחזרת: שלושת הערוצים של האור הנראה (כחול, ירוק ואדום), ערוץ תת-אדום קרוב, ושני ערוצי תת-אדום בינוניים [7]. NDWI חושב כהפרש ההחזרה בין תת-אדום קרוב לבין תת-אדום בינוני, המנורמל לסכומם [28]. השתמשנו בשבע הדמאות Landsat של אזור צפון ישראל (איור 2) מהתקופה 1992–2007 (טבלה 1). ההדמאות נבחרו במידת האפשר מטווח תאריכים קבוע בסוף הקיץ/תחילת הסתיו כדי להקטין את ההשפעה של צומח עשבוני על האות הספקטרי ולצמצם את השונות התוך-עונתית בזמינות המים [25]. תיקון רדיומטרי של ההדמאות נעשה על סמך קבועים עדכניים מהספרות [7]; תיקון אטמוספרי נעשה בשיטת Dark Object DOS4 (Subtraction) בעזרת חבילת landsat [8] בתכנת R [18].

הניתוח כלל שני רכיבים: בחינה ויזואלית של שינויי NDWI על גבי מפה וניתוח כמותי של השפעת גורמי סביבה בלתי תלויים על דפוס השינוי ב-NDWI.

איור 2. שינוי NDWI ב-991 חלקות אורן ירושלים בצפון ישראל חלקות המאופיינות בירידה מובהקת ($P < 0.05$) מסומנות באדום, חלקות המאופיינות בעלייה מובהקת ($P < 0.05$) – בכחול, וחלקות שאינן מאופיינות בשינוי מובהק ($P \geq 0.05$) – באפור. גודל העיגול פרופורציוני לשטחה של החלקה בשלוש קטגוריות (7–56 דונם, 143–57 דונם ו-144–361 דונם).



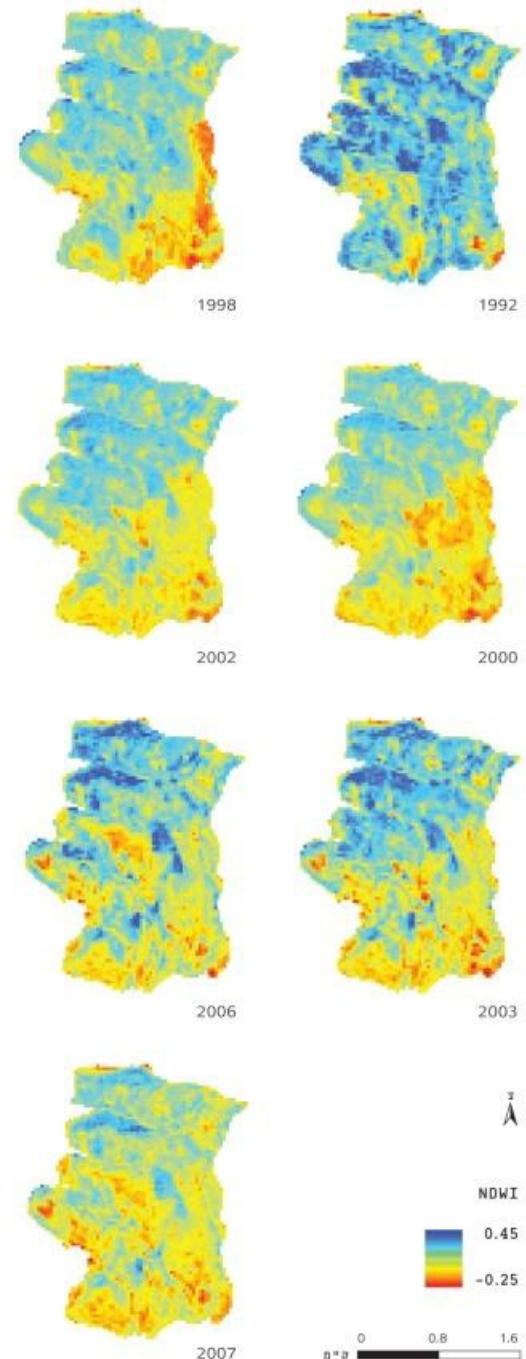
איור 2

שינוי NDWI ב-991 חלקות אורן ירושלים בצפון ישראל

חלקות המאופיינות בירידה מובהקת ($P < 0.05$) מסומנות באדום, חלקות המאופיינות בעלייה מובהקת ($P < 0.05$) – בכחול, וחלקות שאינן מאופיינות בשינוי מובהק ($P \geq 0.05$) – באפור. גודל העיגול פרופורציוני לשטחה של החלקה בשלוש קטגוריות (7–56 דונם, 143–57 דונם ו-144–361 דונם).

בניתוח הוויזואלי מוצג כיוון השינוי בממוצע NDWI בחלקות יער באזור המחקר. השתמשנו בשכבת המידע הגאוגרפית של חלקות היער של קק"ל, ששולבה עם הדמאות ה-Landsat כדי להפיק את ממוצע ה-NDWI בשטחה של כל חלקה. מתוך שכבה זו נבחרו 991 חלקות יער בעלות הרכב של 90–100% אורן ירושלים ושטח הגדול מ-7 דונם (כדי להקטין את הרעש הנובע משולי יער, מדרכים וכו'). ערך NDWI ממוצע הופק עבור כל חלקה ועבור כל אחת משבע השנים (דוגמה ב**איור 3**). שינוי ה-NDWI בזמן חושב כשיפוע רגרסיה לינארית של NDWI כפונקציה של שנה (**איור 2**).

איור 3. מדד NDWI, שהתקבל באמצעות הדמאות לוויין Landsat, בחלק הצפוני של יער חוף הכרמל (שטח של 3.8 קמ"ר) ניתן לראות את הירידה ב-NDWI ולהבחין במספר תקופות: מעבר משנה טובה (1992) להשפעת בצורת בשנים 1998–2000, התאוששות ממנה בשנים 2002–2006, והשפעת תחילת תקופת בצורת נוספת ב-2007.



איור 3

מדד NDWI, שהתקבל באמצעות הדמאות לוויין Landsat, בחלק הצפוני של יער חוף הכרמל (שטח של 3.8 קמ"ר)

ניתן לראות את הירידה ב-NDWI ולהבחין במספר תקופות: מעבר משנה טובה (1992) להשפעת בצורת בשנים 1998–2000, התאוששות ממנה בשנים 2002–2006, והשפעת תחילת תקופת בצורת נוספת ב-2007.

בניתוח הכמותי נבחנה השפעת הגורמים הבלתי תלויים על שינויי ה-NDWI. הגורמים הבלתי תלויים שהערכנו את השפעתם היו שני גורמים ביוטיים (שנת הנטיעה ו-BA) ושלושה פיזיים (כמות המשקעים הממוצעת, השיפוע וכמות הקרינה). BA חושב כמכפלה של שטח הגזע הממוצע בצפיפות הממוצעת לדונם. נתוני הגורמים הביוטיים לכל

חלקה נלקחו מסקרי המצאי של קק"ל, שנעשו בתקופה 2000-2007 עבור 623 חלקות בעלות הרכב 100% אורן ירושלים. לא הוכנסו חלקות בעלות שטח נמוך מ-20 דונם, ולכן גודל המדגם הסופי היה 414 חלקות. גורמי הסביבה הפיזיים נדגמו עבור כל חלקה כממוצע חשבוני מתוך שכבות מ"ג נושיות. שכבת כמות משקעים ממוצעת חושבה באינטרפולציה TIN, כלומר Triangulated Irregular Network, משכבת קווים שווי גשם של ממוצע משקעים רב-שנתי (בעלת מרווחים של 50 מ"מ גשם). שכבות השיפוע וכמות הקרינה השנתית חושבו מ-DEM, שהוא Digital Elevation Model של ישראל ברזולוציה של 25 מ' [9]. כדי לאפשר השוואה בין השפעותיהם היחסיות של הגורמים, נעשה נרמול של כל אחד מששת הגורמים (NDWI ו-5 הגורמים הבלתי תלויים) לממוצע 0 ולסטיית תקן 1 לפני הניתוח הסטטיסטי (טבלה 2).

ניתוח הנתונים נעשה בעזרת רגרסיה לינארית מרובת משתנים מסוג GLS (Generalized Least Squares). שיטה זו מאפשרת להתאים מודלים לינאריים שקיימים בהם מתאם או שונות לא הומוגנית במרכיב השגיאה בין תצפיות [30]. זאת לעומת רגרסיה לינארית רגילה, ששימוש בה טומן בחובה את ההנחה שהשגיאות הן בלתי תלויות ושונותן הומוגנית בין התצפיות. במידע מרחבי, לעתים קרובות הנחת היעדר המתאם בין תצפיות אינה תקפה (כפי שאכן התקבל במקרה הזה, להלן). נוסף על כך, המודל כלל משקלים (weights) לתצפיות (חלקות) כפונקציית חזקה (power of variance covariate) של שטח חלקה, מכיוון שבדיקה מקדימה הראתה הטרוגניות של שונות ברמות שונות של גודל חלקה (השונות בין חלקות קטנות גדולה יותר מאשר השונות בין חלקות גדולות). הסיבות לבחירה זו יידונו להלן.

זערכת ההשפעה של הגורמים הבלתי תלויים נעשתה בשני שלבים [30]. בשלב ראשון כלל המודל את כל הגורמים הקבועים (fixed effects) – חמש ההשפעות העיקריות ועשר האינטראקציות מסדר שני – והמבנה המיטבי של המתאם בין התצפיות והמשקלים הוערך בעזרת מדד Akaike Information Criterion – AIC [30,4]. נבדקו ארבעה מודלים בעלי מתאם מסוגים שונים (Spherical, Ratio, Gaussian, Exponential), עם או בלי משקלים, לעומת מודל שאינו כולל מתאם ו/או לא כולל משקלים. על סמך מדד ה-AIC, הביצועים של המודל בעל מבנה מתאם אקספוננציאלי ובעל משקלים היו הטובים ביותר (AIC=1013). המודל שלא כלל מתאם ולא כלל משקלים היה בעל הביצועים הגרועים ביותר (AIC=1155). המסקנה משלב זה היא שהתצפיות נמצאות במתאם שעוצמתו היא פונקציה (במקרה זה פונקציה אקספוננציאלית) של מרחק ביניהן, כלומר קיים מתאם עצמי (autocorrelation) מרחבי בין התצפיות. בשלב שני נבחר המבנה המיטבי של הגורמים הקבועים בעזרת כמה "סיבובים" של backward selection על סמך Likelihood Ratio Test בין מודל מלא לבין מודל שכל אחד מהמשתנים חסר בו בתורו (בתנאי סף של P=0.05). המקדמים של המודל הסופי וסטיית התקן שלהם מופיעים בטבלה 2. ניתוח ה-GLS נעשה בעזרת חבילת nlme [17] בתוכנת R [18].

תוצאות

הדפוס המרחבי של שינויי NDWI בתקופה 1992-2007 לא היה אקראי (איור 2). ניתן לראות שחלקות באזורים מסוימים (למשל יער ביריה ויער ברעם) היו מאופיינות בעליית NDWI, ואילו חלקות באזורים אחרים (למשל, מערב יער הגלובע, יער חוף הכרמל [איור 3] ויער בלפור [שליד מגדל העמק]) היו מאופיינות בירידת NDWI.

שנת הנטיעה, כמות המשקעים הממוצעת, כמות הקרינה והאינטראקציה בין כמות המשקעים הממוצעת לכמות הקרינה היו הגורמים שהשפיעו על כיוון השינוי ב-NDWI בתקופה 1992-2007 (טבלה 2). אף על פי שגורם הקרינה לא הוצא מהמודל ב-backward selection, יש לציין שהמקדם של גורם זה קרוב ל-0 (טבלה 2), כלומר שלקרינה יש השפעה מועטה מאוד יחסית לגורמים האחרים. השפעות שנת הנטיעה וכמות המשקעים היו חיוביות (טבלה 2), כלומר ביערות ששנת הנטיעה שלהם מוקדמת יותר (ולכן הם מבוגרים יותר) ובאזורים יבשים יותר, נטו ערכי השינוי ב-NDWI לכיוון השלילי יותר.

טבלה 2. השפעת גורמי סביבה על שינוי ב-NDWI

ערכי המקדמים ושגיאות תקן במודל לינארי מסוג Generalized Least Squares בעל מבנה מתאם אקספוננציאלי בין תצפיות כפונקציה של מרחק גאוגרפי (exponential spatial correlation) ומשקלים (weights) כפונקציית חזקה של שטח חלקה (power of variance covariate). כל המשתנים נורמלו לממוצע 0 ולסטיית תקן 1 לפני הניתוח, ומשום כך ערכי המקדמים אינם ביחידות המקוריות אלא מבטאים את עוצמת ההשפעה היחסית של כל משתנה ואת כיוון השפעתו.

גורם	ערך	שגיאת תקן
שנת הנטיעה	0.41	0.06
(intercept)	-0.22	0.16
משקעים	0.19	0.14
משקעים X קרינה	0.11	0.04
קרינה	0.02	0.04

טבלה 2

השפעת גורמי סביבה על שינוי ב-NDWI

ערכי המקדמים ושגיאות תקן במודל לינארי מסוג Generalized Least Squares בעל מבנה מתאם אקספוננציאלי בין תצפיות כפונקציה של מרחק גאוגרפי (exponential spatial correlation) ומשקלים (weights) כפונקציית חזקה של שטח חלקה (power of variance covariate). כל המשתנים נורמלו לממוצע 0 ולסטיית תקן 1 לפני הניתוח, ומשום כך ערכי המקדמים אינם ביחידות המקוריות אלא מבטאים את עוצמת ההשפעה היחסית של כל משתנה ואת כיוון השפעתו.

דיון ומסקנות

ירידה ב-NDWI באזורים יבשים יותר וביערות מבוגרים יותר (טבלה 2) תואמת את אחד התרחישים שהוצגו במבוא. לפי תרחיש זה, בתי הגידול הגרועים יותר יהיו הראשונים להיפגע בזמן עקת יובש חזקה, שכן זמינות המשאב המגביל בהם (מים) נמוכה (אזורים יבשים יותר) והתחרות עליו גבוהה (יערות מבוגרים, בעלי שטח עלווה גבוה). בבתי גידול אלה, העצים קרובים יותר לסף העמידות לזמינות המשאב המגביל, ולכן נצפה לראות ירידה תלולה יותר בתפקודם כתוצאה משינוי שלילי בתנאי הסביבה (למשל, בתקופת בצורת).

השפעות כמות הקרינה על שינוי NDWI הייתה חיובית, אבל מועטה מאוד בהשוואה לשנת הנטיעה ולכמות המשקעים (טבלה 2). מעבודות קודמות ידוע שחשיבותו של המפנה להתפתחות אורן ירושלים משתנה בהתאם למיקום על מפל כמות המשקעים. לדוגמה, השפעה מובהקת של מפנה נצפתה בשני אתרים יבשים יחסית (280 ו-303 מ"מ) [1] אך לא נצפתה באתר לח יותר (414 מ"מ) [14], ואילו באתרים לחים עוד יותר (צפון-מזרח ספרד, 480-740 מ"מ) העדיף אורן ירושלים דווקא מפנים דרומיים והוחלף בהדרגה על-ידי אלון אילקס (*Quercus ilex*) במפנים הצפוניים, ולאחר מכן גם במפנים הדרומיים [29]. ביער יתיר

(ממוצע 280 מ"מ), נמצא הבדל מובהק בדיוות השנתית בין מפנה צפוני לדרומי בשנה שחונה (231 מ"מ), אך לא בשנה גשומה (373 מ"מ) [3]. כלומר, השפעת כמות הקרינה על התפקוד של אורן ירושלים הייתה שלילית בקצה הצחיח של אזור התפוצה שלו (בגלל זמינות מים נמוכה במפנה דרומי), חיובית בקצה הלח של אזור התפוצה שלו (בזכות היעדר תחרות עם מינים אחרים במפנה דרומי), וחשובה פחות במרכז תחום התפוצה. ניתן לשער שבצפון ישראל זמינות המים גבוהה מספיק כך שהשפעת המפנה אינה משמעותית לעומת גורמים אחרים, כגון תחרות עם מינים אחרים, שעשויה להביא להשפעה המועטה של כמות הקרינה שנמצאה. יש לבחון השערה זו על-ידי א) עריכת ניתוח דומה של שינויי NDWI ביערות הנטועים בדרום ישראל והשוואת ההשפעה של כמות הקרינה; ב) הערכת ההשפעה של תחרות עם מינים אחרים על תפקודו של אורן ירושלים בצפון ישראל במפנים שונים.



עצי אורן ירושלים יבשים ביער להב, מרץ 2012 | צילום: מיכאל דורמן ©

חישה מרחוק מאפשרת ניטור בקנה מידה נרחב ולאורך זמן של מדדי יער בעלי משמעות פיזיולוגית, המבטאים את השפעת הסביבה על תגובת יער לשינויי אקלים. במחקר זה נמצאה שונות מרחבית ברגישות היערות הנטועים של אורן ירושלים לעקת יובש בזמן בצורת. על סמך התוצאות אנו משערים שבקנה מידה אזורי, שונות זו קשורה ביחסי הגומלין בין התחרות על מים לבין זמינותם, שקובעים את ה"קרבה" של היער לסף העמידות הפיזיולוגי ליובש.

אנו מציעים מספר דרכים להמשך המחקר: (א) הגדלת הרזולוציה המרחבית מעבר לרמת החלקה (שגבולותיה נקבעים במידה רבה באופן שרירותי) לאפיון מפורט יותר של השונות המרחבית, הן של תגובת היער הן של המשתנים הסביבתיים; (ב) הגדלת הרזולוציה העתית כדי לתאר שינויים תוך-שנתיים (עונתיים) ובין-שנתיים באופן מפורט יותר; (ג) אפיון גורמי סביבה נוספים, שהשפעתם על התפתחות אורן ירושלים נמצאה במחקרים קודמים, כגון סוג המסלע [21], עומק הקרקע [22] ותחרות בין-מינית [29]; (ד) השוואה של השינויים בהחזרה מחישה מרחוק עם מדידות שדה של

משתנים פיזיולוגיים ביער (כגון מספר עצים שהתייבשו בפרק זמן מסוים) כדי לכמת את הקשר בין שינויים ספקטריים לבין שינויים דמוגרפיים ביער.

תודות

אנו מודים לישראל טאובר, לרון טלמור ולאפרת שפר על עזרתם בכל הנוגע לשכבת ה-GIS של יערות קק"ל ולנתוני סקרי המצאי של קק"ל, ולקק"ל על הרשות להשתמש במידע זה למחקר. אנו מודים לשירות המטאורולוגי על הרשות להשתמש בשכבת ה-GIS של כמות המשקעים השנתית הממוצעת בישראל. אנו מודים לסוכנות החלל האמריקנית (NASA) ולשירות הגאולוגי של ארצות הברית (USGS) על שהם משתפים הדמאות Landsat נבחרות באופן חופשי באתר www.earthexplorer.usgs.gov. המחקר מומן חלקית על-ידי המדען הראשי של משרד החקלאות ופיתוח הכפר וקק"ל. אנו

מקורות

1. שילר ג. 1972. גורמים אקולוגיים המשפיעים על הצמיחה של אורן ירושלים בדרום הרי יהודה. אילנות: המחלקה לחקר היער, מנהל המחקר החקלאי.
2. שילר ג, אונגר י"ד וגניז א. 2005. האם גורל העץ כתוב בטבעות השנתיות? אפיון עצים ביער כרמים בעקבות החורף השחון 1998/99. יער 7: 18–25.
3. שילר ג, אונגר ד, כהן ש ואחרים. 2009. השפעת פנות המדרון על הדיות של אורן ירושלים ביער יתיר. יער 11: 14–19.
4. Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* **AC19**: 716-723.
5. Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* **259**: 660-684.
6. Breshears DD, Cobb NS, Rich PM, et al. 2005. Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **102**: 15144-15148.
7. Chander G, Markham BL, and Helder DL. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* **113**: 893-903.
8. Goslee SC. 2011. Analyzing remote sensing data in R: The Landsat Package. *Journal of Statistical Software* **43**(4).
9. Hall JK and Cleave RL. 1988. The DTM project. *Geological Survey of Israel* **6**: 1-7.
10. Jump AS, Cavin L, and Hunter PD. 2010. Monitoring and managing responses to climate change at the retreating range edge of forest trees. *Journal of Environmental Monitoring* **12**: 1791-1798.
11. Lloret F, Lobo A, Estevan H, et al. 2007. Woody plant richness and NDVI response to drought events in Catalanian (northeastern Spain) forests. *Ecology* **88**: 2270-2279.
12. Matyas C. 2010. Forecasts needed for retreating forests. *Nature* **464**: 1271.
13. McDowell NG, Allen CD, and Marshall L. 2010. Growth, carbon-isotope discrimination, and drought-associated mortality across a *Pinus ponderosa* elevational transect. *Global Change Biology* **16**: 399-415.
14. Olarieta JR, Uson A, Rodriguez R, et al. 2000. Land requirements for *Pinus halepensis* Mill. growth in a plantation in Huesca, Spain. *Soil Use and Management* **16**: 88-92.
15. Pettorelli N, Vik JO, Mysterud A, et al. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* **20**.

.503-510

- Pinder JE and McLeod KW. 1999. Indications of relative drought stress in longleaf pine from thematic mapper data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **65**: 495-501 .16
- Pinheiro J, DebRoy S, and Sarkar D. 2011. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-103 .17
- R Development Core Team. 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0 .18
- Rathgeber CBK, Misson L, Nicault A, and Guiot J. 2005. Bioclimatic model of tree radial growth: Application to the French Mediterranean Aleppo pine forests. *Trees-Structure and Function* **19**: 162-176 .19
- Sarris D, Christodoulakis D, and Korner C. 2011. Impact of recent climatic change on growth of low elevation eastern Mediterranean forest trees. *Climatic Change* **106**: 203-223 .20
- Schiller G. 1982. Significance of bedrock as a site factor for Aleppo pine. *Forest Ecology and Management* **4**: 213-223 .21
- Schiller G. 2000. Ecophysiology of *Pinus halepensis* Mill. and *P. brutia* Ten. In: Ne'eman G and Trabaud L (Eds). Ecology, biogeography and management of *Pinus halepensis* and *P. brutia* forest ecosystems in the Mediterranean basin. The Netherlands: Backhuys Publishers .22
- Schiller G and Cohen Y. 1995. Water regime of a pine forest under a Mediterranean climate. *Agricultural and Forest Meteorology* **74**: 181-193 .23
- Trasobares A, Tome M, and Miina J. 2004. Growth and yield model for *Pinus halepensis* Mill. in Catalonia, north-east Spain. *Forest Ecology and Management* **203**: 49-62 .24
- Vicente-Serrano SM, Lasanta T, and Gracia C. 2010. Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**: 614-628 .25
- Vogelmann JE, Tolk B, and Zhu ZL. 2009. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data. *Remote Sensing of Environment* **113**: 1739-1748 .26
- Volcani A, Karnieli A, and Svoray T. 2005. The use of remote sensing and GIS for spatio-temporal analysis of the physiological state of a semi-arid forest with respect to drought years. *Forest Ecology and Management* **215**: 239-250 .27
- Wang CZ, Lu ZQ, and Haithcoat TL. 2007. Using Landsat images to detect oak decline in the Mark Twain National Forest, Ozark Highlands. *Forest Ecology and Management* **240**: 70-78 .28

- Zavala MA, Espelta JM, and Retana J. 2000. Constraints and trade-offs in Mediterranean plant communities: The case of holm oak-Aleppo pine forests. *Botanical Review* **66**: 119-149 .29
- Zuur AF, Ieno EN, Walker NJ, et al. 2009. Mixed effects models and extensions in ecology with R. New-York: Springer-Verlag .30