

פרק א': תחזיות אקלימיות והיערכות לאומית

סקירת התחזיות לשינוי האקלים הצפוי בישראל

פנחס אלפרט ^[1]*, אסף הוכמן ^[2],
 וחופית יצחק-בן-שלום ^[1]

^[1] בית הספר לסביבה ולמדעי כדור הארץ ע"ש פורטר, אוניברסיטת תל-אביב

^[2] המכון לחקר מטורולוגיה ואקלים, המכון הטכנולוגי Karlsruhe (גרמניה)
 * pinhas@post.tau.ac.il



גרפיטי של האומן הנודע בנקס, בלונדון | צילום: Matt Brown, Flickr. CC BY 2.0

תקציר

במאמר זה נציג את הייחודיות והרגישות של אקלים הים התיכון וישראל, ובהמשך את התחזיות האקלימיות המוקדמות שהתקבלו למאה ה-21. ראוי לציין שמחקר המודלים הראשון בסקלה מזר-מטאורולוגית שהצביע על הפחתה בגשמי השקעים הקפריסאיים עקב התחממות כדור הארץ נערך כבר לפני 25 שנה (1994), אך מודלים אקלימיים אזוריים ראשונים הורצו על-ידינו בישראל במסגרת המיזם הגרמני GLOWA Jordan River רק בתחילת המאה ה-21. לאחרונה הפעלנו תחזיות אקלימיות למאה ה-21 בשימוש בשיטה חדשנית שכללה ניתוח של השינויים במצבים הסינופטיים היומיומיים עד לשנת 2100 באשכול של שמונה מודלים אקלימיים מובילים בעולם, ומסקנות ראשונות מהן מוצגות כאן. נוסף על כך, נציג תחזיות אקלימיות למאה ה-21 המתקבלות משימוש במודל האקלימי בהפרדה הגבוהה ביותר שבוצעה אי-פעם מעל ישראל (8 ק"מ מרחק סריג) וגם נזכיר את התוצאות בשיטה שמורידה את סקלות המרחק והזמן הרלוונטיות לגשם לאזור הנחקר (downscaling). לבסוף נציג תחזיות אקלימיות עירוניות לישראל למאה ה-21. את התוצאות לא ניתן לקבל באמצעות מודלים אקלימיים מודרניים, והן מצביעות על חימום עירוני משמעותי מסדר גודל דומה לזה של ההתחממות העולמית. בשיטות השונות והמתקדמות נחתה ירידה של עד 40% בכמויות הגשם העונתיות לאזור הצפון והמרכז של ישראל, בעוד שבדרום נחתה עלייה בחורף ובאביב. מעל מזרח הים התיכון המודלים מסכימים לגבי ירידה בכמויות המשקעים השנתיות ב-20-35%, ברצף של ימי גשם ב-10-20% ובמספר ימי הגשם ב-20-35%. ממוצעי הטמפרטורה העונתיים צפויים לעלות בכ-2.5 מעלות צלזיוס, בייחוד בחורף ובסתיו.

מילות מפתח: התחממות עולמית · התחממות עירונית · ירידה בגשמים · שינוי אקלים עירוני · שינויים עונתיים · תחזיות אקלימיות

מבוא – שינוי האקלים ותחזיות אקלימיות

הים התיכון מושפע מאוד משינוי האקלים בהווה, וצפוי להמשיך להיות מושפע ממנו ואף בצורה ניכרת יותר גם בעתיד בשל מגמות התחממות והתייבשות [11, 18, 22]. השפעה זאת צפויה להתבטא בשינויים בשכיחות ובעוצמה של השקעים הים תיכוניים באופן כללי, ובשקעי מזרח הים התיכון (בעיקר שקעים קפריסאיים) בפרט, וכן בשינויים בשכיחות המצבים הסינופטיים האחרים באזור.

מזרח אגם הים התיכון ממוקם על הגבול שבין אקלים ים תיכוני ואקלים צחיח למחצה וצחיח, ועל כן הוא רגיש במיוחד לשינויים אקלימיים [12, 32]. אקלים מזרח הים התיכון מאופיין בטמפרטורות מתונות ובאירועי גשם קצרים בעונת החורף [26] ובמזג אוויר חם ויבש עם תנודות מעטות בעונת הקיץ [1].

מחקרים בנושא שינוי האקלים הנצפים באזור מזרח הים התיכון וישראל בעשורים האחרונים הצביעו על מגמת התחממות מובהקת, ועל ירידה בגשמים, ברובה לא מובהקת [34], וזאת יחד עם שינויים באופיין ובשכיחותן של מערכות מזג האוויר באזור. מגמת התחממות של כ-0.2-1 מעלות צלזיוס לעשור נצפתה מעל מזרח הים התיכון בכל עונות השנה, אך בייחוד בעונת הקיץ [18, 31, 33]. אך על פי שמגמות הגשם הנצפות בישראל היו בדרך כלל לא מובהקות בעשורים האחרונים, הן עדיין מצביעות על מגמה אזורית שלילית, שכן מגמה מובהקת באזור ישראל קשה לזיהוי בשל התנודות הבין-

שנתיות הגדולות [23]. שינויים בשכיחות מערכות מזג האוויר נצפו גם כן באזור מזרח הים התיכון. זוהתה מגמה שלילית בשכיחות שקעים קפריסאיים (כלומר פחות שקעים מגיעים לאזורנו, ובמשתמע פחות מספר הימים הגשומים) [4, 30], ועם זאת זוהתה מגמת עלייה מובהקת בשכיחות של אפיקים סוף בין שנות ה-50 של המאה ה-20 ועד שנת 2000 [4].

מחקרים בנושא **תחזיות אקלימיות למאה ה-21** בשנים האחרונות הצביעו על מגמת התחממות מובהקת שממשיכה את המגמה שאנו רואים בתצפיות. אף על פי שמגמת ההתייבשות בתצפיות זוהתה ברובה כלא מובהקת, התחזיות צופות מגמת התייבשות ברורה באזור מזרח הים התיכון וישראל [3, 7-10, 20, 21, 24, 25, 27]. המודל האקלימי האזורי, שהורץ לראשונה בישראל, התמקד בנהר הירדן ובכינרת (בזכות מיזם GLOWA Jordan River, במימון גרמניה) [3]. מחקר המודלים הראשון בסקלה מזר-מטאורולוגית שהצביע על הפחתה בגשמי השקעים הקפריסאיים במספר אירועים עקב הכפלת גזי חממה בישראל נערך כבר ב-1994 [29].

תחזיות אקלימיות למאה ה-21 בשימוש בשיטה חדשנית על פי מצבים סינופטיים

בסדרת מחקרים שנערכו לאחרונה נבחנה השפעת עליית ריכוז גזי החממה על שכיחות מערכות מזג האוויר, על אורך עונות השנה ועל



על קצה המזלג

- * שינוי האקלים שעובר על מזרח אגן הים התיכון וצפוי להימשך בו הוא בקצב ובעוצמה גבוהים יותר מאשר במרבית אזורי כדור הארץ.
- * בעשורים האחרונים נצפו בישראל מגמת התחממות מובהקת וכן פחיתה בכמות המשקעים, שברובה אינה מובהקת.
- * התחזיות מצביעות על המשך ההתחממות, פחיתה במשקעים, התארכות הקיץ והתקצרות החורף. בתרחיש החמור ישררו בישראל תנאי קיץ רוב חודשי השנה, מלבד חורף קצר.
- * חיזוי אקלים בסקלה המרחבית המצומצמת של מדינת ישראל, ובפרט חיזוי שינויים באזורים שונים במדינה, מציב אתגרים מדעיים וטכנולוגיים, אך ניתן לראות בהם סמנים למגמות הכלליות של האקלים העתידי.

המערכת

את השינויים הצפויים באורך העונות במאה ה-21. האשכול מסוגל למדל היטב את העונתיות של המצבים הסינופטיים העיקריים מעל מזרח הים התיכון. המסקנה מכך היא שעונת הקיץ, המיוצגת על-ידי השכיחות של האפיק הפרסי, צפויה להתארך מאוד, עד כדי שיעור של 49% (כחודשיים), בעוד שעונת החורף, המיוצגת על-ידי שכיחות שקעים קפריסאיים, צפויה להתקצר ב-56% (כחודשיים) בתרחיש RCP8.5 ולקראת סוף המאה ה-21^[15]. **איור 1** מציג את משך העונות כיום ואת השינויים באורך עונות השנה בתרחיש החמור של RCP8.5. על פי תרחיש זה, במרבית השנה ישררו בישראל תנאי קיץ, מלבד חורף קצרצר.

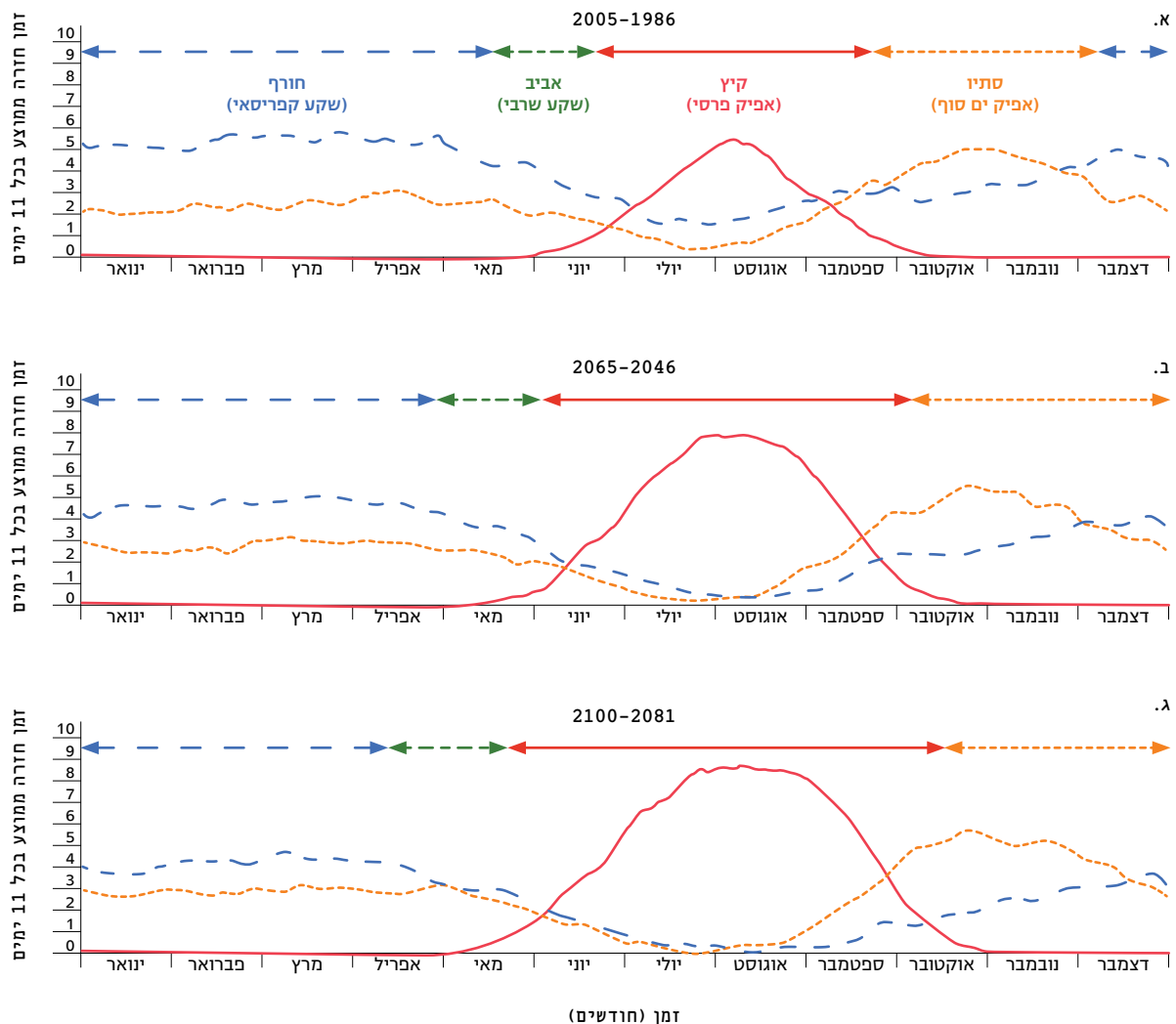
השינויים בשכיחות ובעונתיות של המצבים הסינופטיים עלולה להשפיע על תפרוסת המשקעים והטמפרטורה בזמן ובמרחב. על כן, בחנו את היכולת של 23 מודלים אקלימיים עולמיים למדל ערכי קיצון של משקעים מעל הסהר הפורה ומזרח הים התיכון. השתמשנו באשכול של מודלים אלה כדי לחזות את ערכי הקיצון של משקעים מעל האזורים האלה לסוף המאה ה-21 על פי תרחישים RCP4.5 ו-RCP8.5. מעל מזרח הים התיכון המודלים מסכימים לגבי ירידה בכמויות המשקעים השנתיות ב-20-35%, ברצף הימים הרטובים ב-10-20% ובמספר ימי הגשם ב-20-35%. מעל הסהר הפורה ערכי הקיצון (האחוזון ה-95) של כמות הגשם היומית צפויים דווקא לעלות בכ-25%. לעומת זאת, בדרום-מזרח הים התיכון מדד זה צפוי לרדת^[28]. ראוי לציין, כי דווקא עלייה בגשמים העזים למרות הפחתה בכמויות הגשמים הכוללת זוהתה באזורים רבים במרחב הים התיכון (למעט בדרום-מזרח כאמור לעיל) בעבר, והוגדרה כפרדוקס (כי ברוב העולם המגמה של הגשמים העזים זהה למגמה בסך הגשם) שמאפיין דווקא את אזור הים התיכון^[2].

תחזיות אקלימיות למאה ה-21 בשימוש במודל בהפרדה הגבוהה ביותר

לאחרונה השתמשנו במודל COSMO-CLM ברזולוציה האקלימית הגבוהה ביותר (8 ק"מ מרחק סריג או גודל של כל פיקסל במודל) שנעשתה בישראל, כדי לחזות את ערכי הקיצון וממוצעי הגשם והטמפרטורה אצלנו לתקופה 2041-2070 ביחס לממוצע של התקופה 1981-2010 וכן גם לתרחיש RCP4.5. הריצות דרשו זמני מחשוב גדולים מאוד, ונעשו בשיתוף עם חוקרים מאיטליה. התוצאות מלמדות שממוצעי הטמפרטורה העונתיים צפויים לעלות בכ-2.5 מעלות, בייחוד בחורף ובסתיו (**איור 2**). ערכי הקיצון של הטמפרטורה הראו גם הם עלייה, שערכה גדול יותר בערכי המינימום מאשר המקסימום. תופעה זו של הקטנה במשרעת היומית של הטמפרטורה (כלומר בהפרש היממתי בין הטמפרטורה הקרה לחמה) היא עולמית. גורמיה נחקרו בישראל בפירוט, ונמצא כי הלחות האטמוספירית היא הגורם הדומיננטי^[6]. כמו כן, נחזתה ירידה של עד 40% בכמויות הגשם העונתיות באזור הצפון והמרכז

ערכי הקיצון של טמפרטורה וגשם באזור מזרח הים התיכון וישראל. לצורך המחקרים נעשתה התאמה של הסיווג הסינופטי האובייקטיבי למחצה – סיווג שנעזר גם בחזאים בעלי ניסיון רב כדי ליצור בסיס להשוואה אובייקטיבית^[4]. הסיווג החדש הופעל על שמונה מודלים אקלימיים עולמיים מובילים לתקופה "היסטורית" או תקופת "עבר", כלומר לפרק זמן מהעבר הקרוב (1986-2005), לאמצע המאה ה-21 (2046-2065) ולתקופה של סוף המאה ה-21 (2081-2100) עבור התרחישים RCP4.5 ו-RCP8.5. מדובר בתרחישי פליטה של גזי חממה שהאילוץ הקרינתי בהם, הנובע מהעלייה בריכוזים, יהיה בתוספת של 4.5 ו-8.5 וואט למ"ר. הסיווג החדש הצליח יפה בייצוג שכיחות של מערכות מזג אוויר (כלומר המצבים הסינופטיים), ובייחוד הצטיין בסיווג השקעים הקפריסאיים. המשמעות המעניינת (והבשורה הלא-טובה מבחינת תושבי ישראל) היא כי שכיחותם של השקעים הקפריסאיים מורידה הגשם בישראל ובאזור מזרח הים התיכון צפויה לרדת בכ-35% לקראת סוף המאה ה-21 בגלל ההתחממות שנגרמת מהעלייה בריכוז גזי חממה (RCP8.5)^[14]. בהמשך למחקר זה הופעלה הגדרת העונות החדשה על פי מערכות מזג האוויר^[5] על אשכול של שמונת המודלים האקלימיים העולמיים כדי לחזות

איור 1. השינויים באורך ארבע עונות השנה בהתאם להגדרתן על פי מערכות מזג אוויר^[15] הממוצעים של שמונת המודלים העולמיים מוצגים עבור אפיקים פרטיים (קיץ), שקעים שרביים (אביב), אפיקי ים סוף (סתיו) ושקעים קפריסאיים (חורף). התקופות המוצגות הן: א) 2005-1986 כמייצגת את תקופה הנוכחית; ב) 2065-2046 כמייצגת את אמצע המאה ה-21; ג) 2100-2081 כמייצגת את סוף המאה ה-21. התוצאות הן על פי אשכול המודלים האקלימיים שצוינו לעיל ובתרחיש של התחממות גבוהה הנקרא RCP8.5. האזור מתוך Hochman ואחרים^[11].



המקומיות של העיר. לשם כך, הצענו שיטה חדשה שמאפשרת ניתוח של ההשפעה העירונית למאה ה-21 עם השוואה לתרומה שנובעת מן ההתחממות העולמית^[19]. בדיקה של מגמות ארוכות טווח בקיץ בערים מרכזיות בעולם, על פי קצב גידול האוכלוסייה וגודל האוכלוסייה, מאפשרת ראייה טובה ומקומית של מגמות הטמפרטורה ההיסטוריות בערים מרכזיות בישראל (איור 3). חישוב החלק של טמפרטורת האוויר העירונית הצפויה עד שנת 2060 נעשה באמצעות המודל האקלימי RegCM על פי שלושת תרחישי גידול באוכלוסייה – העיר שומרת על גודל אוכלוסייתה, אוכלוסיית

של ישראל, בעוד שבדרום נחזתה עלייה בחורף ובאביב (איור 2). עלייה בערכי הקיצון של הגשם נחזתה בייחוד באזורים הדרומיים של ישראל, עם סימנים מסוימים לעלייה בערכי הקיצון גם בצפון^[17,13]. מגמות דומות נחזו לסוף המאה ה-21 גם במחקר שהשתמש בשיטה מודלים אקלימיים וב-18 תחנות גשם מעל ישראל^[16].

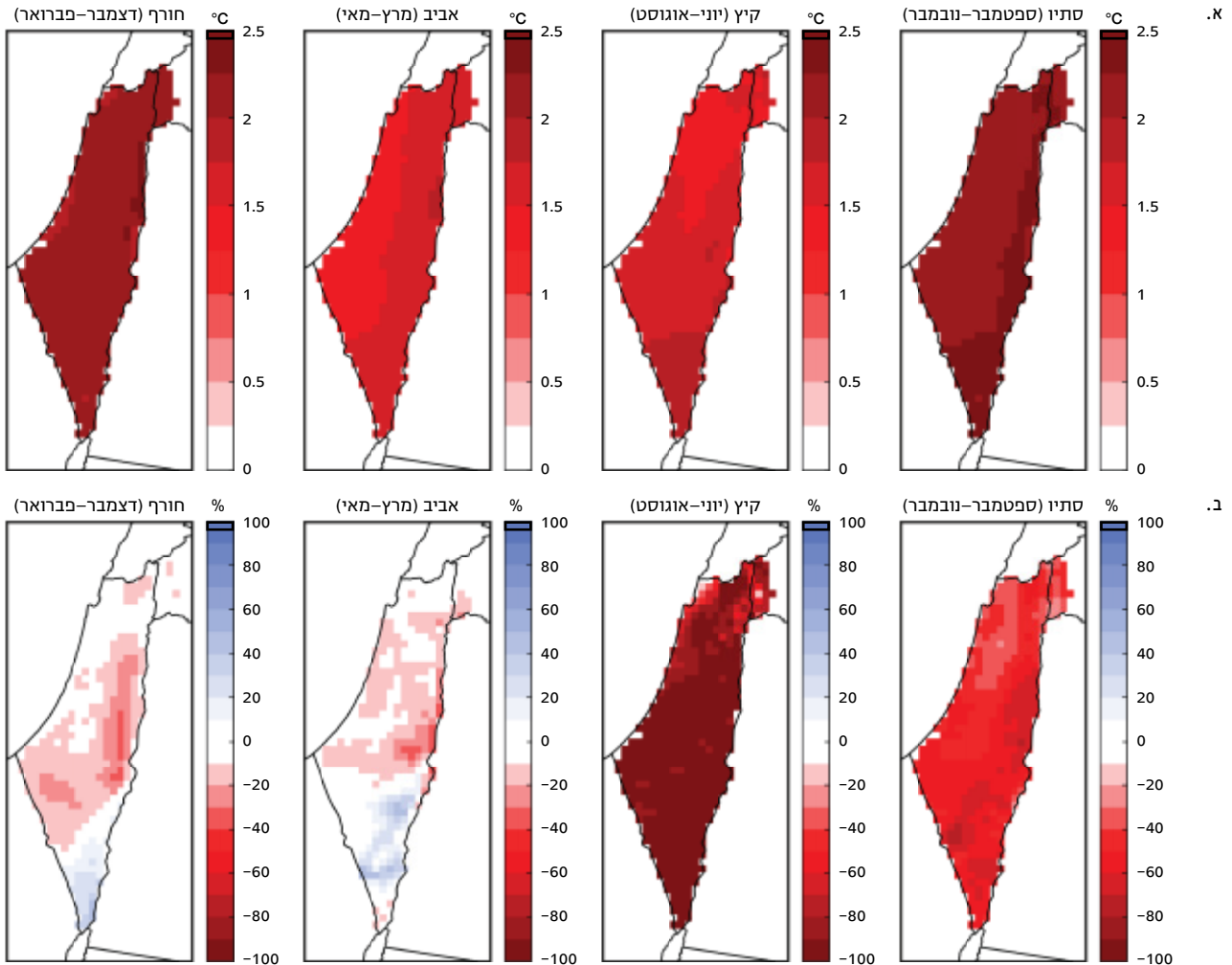
תחזיות אקלימיות עירוניות למאה ה-21

המודלים האקלימיים שהוצגו עד כה גם בהפרדה מרחבית גבוהה ביותר אינם מסוגלים לייצג בצורה אמיתית את ההשפעות





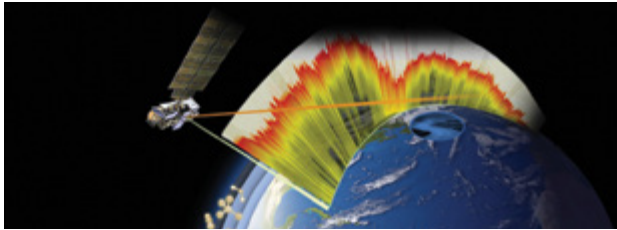
איור 2. תחזיות של השינויים לשנים 2070–2041 לעומת 1981–2010, בתרחיש של התחממות בינונית (RCP4.5) (א) בממוצעי טמפרטורה עונתיים (במעלות צלזיוס), (ב) בממוצעי גשם (באחוזים) מתוך: Hochman ואחרים ¹⁷⁰



סיכום

אחד מן האתגרים הגדולים ביותר בחיזוי שינוי האקלים בכלל, ובים התיכון ובישראל בפרט, הוא הורדת סקלת המרחק (והזמן) הרלוונטית לאזור הנחקר (downscaling). עניין זה נעשה קריטי באופן כללי, ובייחוד בחיזוי של ירידת הגשם הצפויה באזור עם שינויים טופוגרפיים ופני שטח גדולים, למשל, באגן הניקוז של הכינרת או ים המלח, וזאת משום שמרחק סריג המודל הטיפוסי במודלים האקלימיים אינו מכיל ואינו מכסה באופן אמיתי את התהליכים הפיזיקליים והדינמיים שקובעים את מזג האוויר שם, שמתרחשים בסקלות מרחק קטנות יותר (למשל, יצירת עננים ומשקעים). בסדרה של מאמרים שפרסמנו משנת 2016 בספרות המדעית, הפעלנו מגוון של שיטות חדשניות להורדת הסקלה של

העיר ממשיכה לגדול בקצב אחיד ואוכלוסיית העיר גדלה במהירות. מצאנו כי הגידול בטמפרטורה בשעה 15:00 חזק משמעותית מזה של שעות הבוקר; בירושלים ובאילת עלייה של כ-0.3 מעלות לעשור ובבאר שבע של כ-0.15 מעלות. ערכי הגידול העירוניים בטמפרטורות משמעותיים ביותר ומסדר גודל דומה לערכים שנובעים מן ההתחממות בסקלה העולמית. לתוצאות המחקר השלכות יישומיות על תהליכי תכנון, בנייה ועיר. עולה מכאן כי יש צורך בבנייה עירונית מודעת אקלים ובפיתוח אסטרטגיות למיתון תהליכי ההתחממות העירוניים. ישנן השלכות חשובות של ההתחממות הגלובלית והעירונית גם יחד על ההחמרה הניכרת בנוחות התרמית על האדם הגר בעיר בעתיד הקרוב.



איור של איסוף חותמת ספקטרית של אוזון וגזים אחרים באטמוספירה התחתונה | באדיבות נאס"א

מקורות

ראו **נספח 1** באתר כתב העת.

המלצות קריאה

מאמר המציג את הבסיס המדעי לשינויים הצפויים באורך עונות השנה באזורנו במאה ה־21.

Hochman A, Harpaz T, Saaroni H, and Alpert P. 2018. The seasons' length in 21st century CMIP5 projections over the eastern Mediterranean. *International Journal of Climatology* 38(6): 2627–2637.

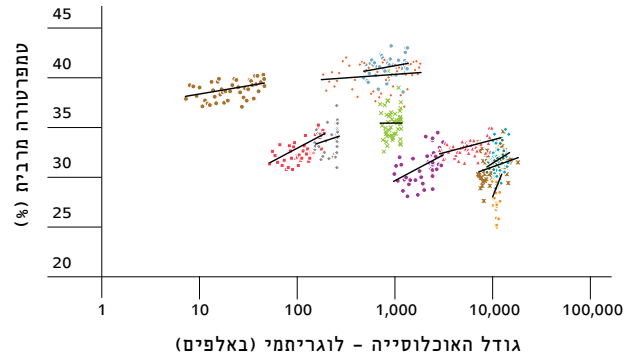
מאמר המציג את אופן איסוף הנתונים מתחנה מטאורולוגית, ניתוחם והצגתם, וכן מספק בסיס טוב להבנת ניתוח הנתונים ושינוי האקלים המקומי בעקבות השינוי העירוני.

Itzhak-Ben-Shalom H, Samuels R, Potchter O, and Alpert P. 2016. Recent trends and future predictions until 2060 of urban warming in four Israeli cities employing the RegCM climate model. *American Journal of Climate Change* 5(04): 464–484.

הטמפרטורה ושל הגשם מעל המזרח התיכון עם התמקדות באקלים החזוי של ישראל ובאזורים שונים. באופן דומה, אתגר קשה אחר קשור לאי־יכולתם של המודלים האקלימיים המקובלים "לראות" שינויים עירוניים, משום שהם מתרחשים בסקלה קטנה מדי למרחק הסריג הטיפוסי במודלים אלה.

איור 3. שינוי טמפרטורה האוויר המרבית בערים גדולות

שינוי הטמפרטורה העירונית המרבית בערים גדולות בעולם ובערים בישראל, לעומת גידול באוכלוסייתן לשנים 1964–2010 (למעט שתי התחנות המצוינות במקרא).



טוקיו	קולקטה (כלכותה)	דאלאס
גואנגג'ואו	(2010-1981)	באר שבע
שנגחאי	אלג'יר (אלג'יריה)	גרנדה (ספרד)
(1998-1964)	לאס וגאס	אילת
בייג'ינג	פיניקס	

הלכה למעשה

לצורך היערכות משרדי הממשלה והמגזרים השונים לשינוי האקלים, יש צורך בתחזיות מדויקות ככל הניתן. רוב התחזיות לאזורנו מבוססות על תוצאות מודלים אקלימיים גסים, שאינם מסוגלים לתאר כהלכה תהליכים מטאורולוגיים חשובים, כגון חלק ממנגנוני יצירת המשקעים בחורף (התכנסות רוחות בקו החוף, השפעתם של ההרים על היווצרות ענני גשם) או מהלך הבריזה וגובה האינורסיה בקיץ. הנחת העבודה המקובלת היא שלמרות זאת, יש בהם ערך כמסמנים את המגמות הכלליות. אף על פי כן, היות שהם מתקשים לדמות כהלכה את האקלים הנוכחי, קיים

קושי לבצע השקעות חריגות לצורך היערכות לעתיד תוך התבססות עליהם. לפיכך, הגישה הרווחת בממשלה היא נקיטת צעדי אי־חרטה. כדי להגיע לתחזיות מדויקות יותר יש להריץ מודלים אקלימיים ברזולוציה גבוהה, ולשם כך נכון לממש את החלטת הממשלה בנדון ולהקים מרכז חישובים אקלימי לאומי, שישמש משאב לחוקרי האקלים באקדמיה ולממשלה. הנושא נדון בימים אלה במנהלת היערכות לשינוי אקלים.

ניר סתיו,

מנהל השירות המטאורולוגי