

ההשפעות האפשריות של שינויי האקלים על הביטחון הלאומי של ישראל

קולין פרייס ויואב יאיר

שינויי אקלים כתוצאה מהעלייה בריכוז גזי החממה באטמוספירה מתרחשים כבר היום, וללא התערבות משמעותית בזירה העולמית המצב יחמיר עוד יותר בעשורים הקרובים, עם השלכות ברורות שכבר ניתן לראותן. מודלים ותרחשי אקלים עדכניים חוזים עלייה של עד ארבע מעלות צלזיוס בטמפרטורה העולמית עד סוף המאה הנוכחית, עלייה של עד מטר אחד בגובה פני הים ושינויים בדפוסי המשקעים ברחבי העולם. באזורים מסוימים יתגברו גלי חום, בצורות ושריפות, ואילו באחרים יהיו סופות ושיטפונות בעוצמה גבוהה יותר. במאמר זה נציג את תרחשי האקלים לאזור הים התיכון וישראל, המצביעים על התחממות ניכרת בקיץ ועל משקעים מופחתים. למרות קיומן של בעיות ביטחון פנים הנובעות ישירות מהשפעות שינויי האקלים, האיום הגדול ביותר על ביטחון ישראל עשוי להיות חיצוני, בעקבות חוסר יציבות במשטרי מדינות שכנות ולחץ ישיר על גבולות המדינה מצד פליטי אקלים ממדינות אפריקה והלבנט, שייפגעו בצורה קשה מהתוצאות של שינויי אקלים, בעיקר בהקשר של ביטחון מזון ומים.

מבוא

שינויי האקלים מתרחשים כבר עכשיו. ישנן עדויות ברורות לכך שאקלים כדור הארץ משתנה, וכי אנחנו יוצאים מ"אזור הנוחות" של תקופת ההולוקן, שבה שררו תנאי אקלים קבועים למדי על פני כדור הארץ במשך עשרת אלפים השנים האחרונות. זו התקופה שבה הציוויליזציות שלנו התפתחו ברחבי העולם, ושבה שררו טמפרטורות קבועות למדי, דפוסי גשם סדירים ורמות יציבות של גובה פני הים. עתה אנו יוצאים במהירות מתקופת ההולוקן ונכנסים לזו המכונה אנתרופוקן (Anthropocene). מאז המהפכה התעשייתית, לא רק שאוכלוסיית העולם גדלה מפחות מחצי מיליארד בני אדם ליותר משבעה וחצי מיליארד כיום, אלא גם רמת גזי החממה באטמוספירה כיום היא הגבוהה ביותר מזה 800 אלף שנים, ואולי אף יותר (נתונים על דגימות קרח

מתקופות קדומות יותר נמצאים עדיין בשלבי ניתוח, לאחר שדגימות הגיעו מעומק השקול לגיל של מיליון שנה בקרח של אנטארקטיקה).

נכון שכדור הארץ עבר עידני קרח בעבר ותקופות ביניים חמות (אפילו חמות מעט יותר מאשר כיום), אך הציוויליזציה שלנו לא הייתה קיימת באותן תקופות, ולכן אם ברצוננו להתמקד בהשפעה על האנושות, אנלוגיות כאלה אינן רלוונטיות ואפילו מטעות. עם זאת, כדור הארץ שרד חרף השינויים העצומים הללו בטמפרטורות, בגשמים ובגובה פני הים, ולכן כוכב הלכת שלנו ימשיך להתקיים בצורה כזו או אחרת, גם אם האקלים יתחמם בעתיד אפילו ב-10 מעלות. נציין כי במהלך עידן הקרח האחרון לפני כ-20 אלף שנים, התפשטות יריעות הקרח היבשתיות גרמה לירידה של 100 מטרים בגובה פני הים (יש הוכחות ברורות לכך שבעבר היה גשר יבשתי בין רוסיה לאלסקה). כיום יש מספיק קרח יבשתי בגרינלנד ובאנטארקטיקה, שאם יפשר כולו הוא יכול לגרום לעליית גובה פני הים בעולם ב-70 מטרים נוספים. כך, למרות שהתנודות הטבעיות הללו באקלים כדור הארץ התרחשו בעבר ויתרחשו בעתיד, האנושות היא זו שתושפע במידה הרבה ביותר מכל השינויים הצפויים. הערים, המדינות והכלכלות שלנו מוגדרות על ידי האקלים המקומי וקווי החוף, שנותרו קבועים בעשרת אלפים השנים האחרונות. כאשר בוחנים את הסיכונים כתוצאה משינויי האקלים באזורנו, עלינו לשקול את חומרת הסכנות (למשל גלי חום, שיטפונות, עליית גובה פני מי הים), את מידת החשיפה לסיכונים אלה (למשל אוכלוסייה, תשתיות פיזיות, משאבי טבע) ואת מידת הפגיעות מהם (כמו היכולת שלנו להיערך לסכנות, החוסן הציבורי, התמיכה הממשלתית). במאמר הנוכחי נתמקד בעיקר בסיכונים הצפויים בישראל בעשורים הקרובים, תוך דיון קצר בהשלכות האפשריות על הביטחון הלאומי.

הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי האקלים (IPCC, 2014) מתייחס לתרחישים שונים של פליטת גזי חממה, בניסיון לאמוד את ההשפעות בעשורים הבאים. במאמר זה נתמקד בשני תרחישי ריכוזים מייצגים (RCP – representative concentration pathway): RCP4.5 ו-RCP8.5. הראשון RCP4.5 מייצג תרחיש מתון שבו פליטת גזי החממה לאטמוספירה תגיע למקסימום בין השנים 2030 ל-2040, ואז תתחיל לרדת. התרחיש השני RCP8.5 הוא הקיצוני יותר שמכונה "עסקים כרגיל", שלפיו אנחנו ממשיכים במעשינו הנוכחיים ובתמהיל האנרגיה הקיים, ולכן איננו צפויים לראות ירידה ממשית בפליטות של גזי חממה בעתיד.

שינויי אקלים באגן הים התיכון

אגן הים התיכון הוא אחד מהאזורים הגיאוגרפיים שצפויים להיות מושפעים לרעה משינוי אקלימי מתמשך, שלפי התחזיות יתעצם בעשורים הקרובים ולכן הוא מוגדר "מוקד" (hot spot) של התחממות גלובלית עתידית (Diffenbaugh & Giorgi, 2012; Giorgi, 2008; Turco et al., 2015).

ואכן, אזור הים התיכון פגיע ביותר לשינויי אקלים, בגלל האקלים הסובטרופי החם-יבש ממילא שלו ומיעוט מאגרי מים מתוקים. הטמפרטורה הממוצעת באזור הים התיכון כבר התחממה ב-1.4 מעלות צלזיוס מאז סוף המאה ה-19 – עלייה גדולה יותר מהממוצע העולמי עד כה, שעומד על 1.1 מעלות צלזיוס. מודלים רבים של אקלים חוזים המשך של מגמת ההתחממות בכל האזור, עם טמפרטורות גבוהות יותר בכמה רמות מהממוצעים הרב-שנתיים, עומס חום הולך וגובר באזור (Diffenbaugh et al., 2007) וסיכוי לאירועי קיצון תכופים יותר (Sanchez et al., 2004). התרחבות תא ה־דלי (Hadley cell) לכיוון הקוטב צפויה להשפיע לרעה על מספר מערכות המשקעים ומשכן (Seidel et al., 2008; Yin, 2005) ולהאיץ את מגמות המדבור שכבר נראות בכמה מדינות (Ozturk et al., 2015). על פי תרחיש RCP8.5, אפשר לצפות להתחממות נוספת של 1.5 מעלות צלזיוס עד שנת 2050 (Cramer et al., 2018). העלייה בטמפרטורה צפויה להשפיע על גלי החום, במיוחד בחודשי הקיץ, להגביר את השתנות המשקעים (בצורות, שריפות, שיטפונות) ולהעלות את גובה פני הים (שיטפונות בחוף). מודלים אקלימיים חוזים (RCP8.5) כי מספר הימים בשנה שבהם ישררו טמפרטורות מעל 37 מעלות צלזיוס יעלה בכל רחבי הים התיכון (McKinsey Global Institute, 2020), כאשר באזורנו הוא יוכפל מ-30 ל-60 ימים עד שנת 2050. זאת ועוד, כמות המשקעים באזור צפויה לצנוח, ושיעור הירידה המוערך הוא 20 אחוזים עד שנת 2100 (IPCC, 2014).

נוסף על ירידה בכמות הגשמים יתגברו הדיות (אידיוי מים) וההתאדות באזור (evapo-transpiration), שיגדילו את מספר תקופות הבצורת ברחבי אגן הים התיכון. לשינויים אלה השפעות ישירות על שריפות ועל בריאות הציבור. באומן ועמיתיו (Bowman et al., 2017) הראו כי אירועי שריפות קיצוניים צפויים להתגבר במזרח הים התיכון ובבלבנט, ולכך יהיו עלויות כלכליות, חברתיות וסביבתיות ניכרות. אירועים כאלה התרחשו בישראל בשנים 2010 ו-2016. השפעת השריפות על בריאות הציבור קשורה לריכוזי גזים ולחלקיקים (PM) הנפלטים בעשן השריפות. חלקיקי PM2.5 (חלקיקים קטנים מ-2.5 מיקרון) מסוכנים במיוחד לציבור, מכיוון שהם יכולים לחדור לעומק הריאות ולגרור מחלות בדרכי הנשימה. באשר להשפעות הבריאותיות של גלי החום, בפרק זמן של 11 יום באוגוסט 2003 נרשמו 50 אלף מקרי מוות נוספים באירופה בשל גל

החום העז שפשט ברחבי היבשת. הסיבה הייתה עומס חום קיצוני שנגרם משילוב של טמפרטורות גבוהות ולחות גבוהה. עד שנת 2050, גל חום בעוצמה של הגל מ-2003 צפוי להפוך לנורמה באירופה. טמפרטורות קיץ גבוהות נקשרו גם להתפרצויות גוברים של קדחת הנילוס המערבי באגן הים התיכון (Tran et al., 2014).

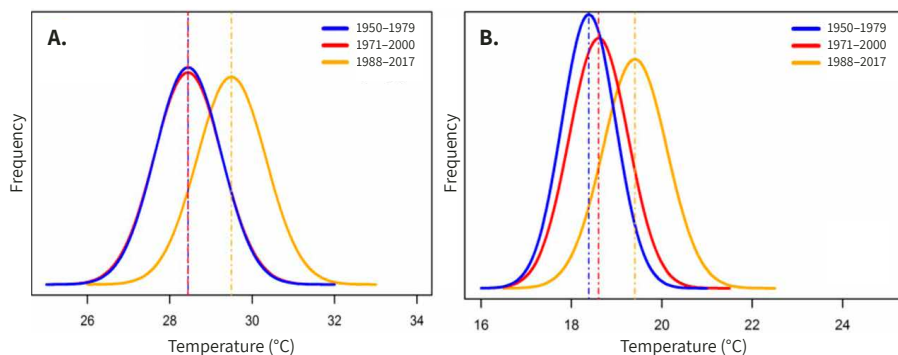
אזור הים התיכון נשען במידה רבה על תיירות לצורך צמיחה כלכלית, וריבוי גלי החום עשוי להרתיע את התיירים מלהגיע לאתרים בדרום היבשת. האירופים מתייחסים לטמפרטורה של 37 מעלות צלזיוס כאל חום בלתי נסבל (Rutty & Scott, 2010), ומכאן שתיירות במדינות הים התיכון החמות תושפע בעתיד, במיוחד תיירי הקיץ שצריכים לתכנן את חופשותיהם על פי לוח השנה של בתי הספר. יתרה מכך, עליית גובה פני הים תסכן את ערי החוף, ויהיה צורך לשקול את עלויות ההגנה על הנכסים והתשתיות הקיימות אל מול שינוי תכנוני לנוכח קו החוף הנסוג. בין השנים 1993 ל-2015 עלה גובה פני הים התיכון בשניים עד שלושה מ"מ בשנה (Marcos et al., 2016). עד שנת 2050 צפוי גובה פני הים התיכון להגיע ל-25 ס"מ מעל הגובה הנוכחי, וככל הנראה לעלייה של מטר אחד עד שנת 2100. בעוד שינוי ממוצע של מטר אחד אולי נשמע לא גדול במיוחד, גלי סערה קיצוניים, גלי הים ותנודות הגאות והשפל הם שישיעו על קו החוף סביב הים התיכון, וכתוצאה מכך יגברו הבליה החופית וההצפות בעתיד.

באופן כללי, מאזן המשקעים-התאדות של הים התיכון הוא שלילי, כאשר עקב העלייה בטמפרטורה מתאדים יותר מים מאשר נוספים מן המשקעים (Mariotti, 2010). הדמיות מודל שערכו הורלינג ועמיתיו (Hoerling et al., 2012) מראות כי עלייה של חצי מעלת צלזיוס בטמפרטורת פני הים (SST) באוקיינוסים הטרופיים גורמת להתייבשות ברורה של אגן הים התיכון, בהתאם למגמה שנצפית מאז 1902 ואחראית לעלייה בתדירות הבצורות שנצפו באזור. כתוצאה בלתי נמנעת, המגזר החקלאי יושפע משינויי אקלים באזור הים התיכון וביטחון המזון יהפוך לנושא קריטי עבור מדינות רבות. אנו מביאים את הדוגמה של מצרים בשל קרבתה לישראל, ואת ההשלכות האפשריות על הביטחון הלאומי שיידונו בהמשך.

גידול החיטה במצרים נשען על השקיה, ולאור הגידול הצפוי באוכלוסיית מצרים בשלושים השנים הבאות, לא ניתן לסמוך על מקורות המים העתידיים להשקיה (Asseng et al., 2018). מרבית המים המתוקים נלקחים מנהר הנילוס, וכאשר אתיופיה וסודאן בונות סכרים ומפיקות יותר מים לצרכים שלהן, יכולתה של מצרים לגדל חיטה מושפעת ישירות. מצב כזה עשוי להחמיר את המחסור במזון ואת החיכוכים החברתיים, שעלולים לגרום להשלכות גיאופוליטיות על ישראל שאינן שונות בהרבה מהמצב בסוריה, כפי שנדון אצל קלי ועמיתיו (Kelley et al., 2015).

שינויי אקלים בישראל

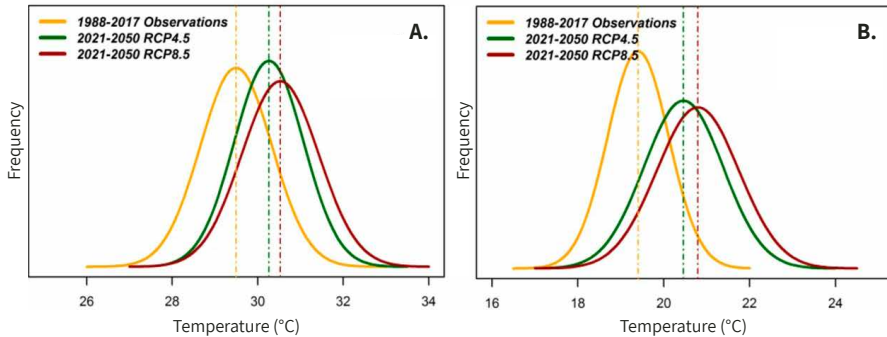
גם בישראל ניתן לראות שינויי טמפרטורה משמעותיים בעשורים האחרונים, כפי שנצפה בכלל אזור הים התיכון, והמגמה צפויה להימשך גם בעתיד. הטמפרטורה השנתית הממוצעת בישראל עלתה ב-1.4 מעלות צלזיוס במהלך השנים 1950–2017, כאשר ההתחממות הרבה ביותר הייתה בשלושת העשורים האחרונים. לשם המחשה נתמקד בשינויי הטמפרטורה בירושלים, בהיותה אזור עירוני גדול במרכז ישראל המייצג את המגמות בשאר המדינה. בתרשים 1 מוצגת השוואה של פונקציות התפלגות טמפרטורות הקיץ המקסימליות והמינימליות בירושלים, על פני תקופות חופפות בנות 30 שנה כל אחת. ניתן לראות בבירור כי 30 השנים האחרונות מציגות את השינוי הגדול ביותר בטמפרטורות, הן בטמפרטורות הקיץ המקסימליות בשעות היום והן בטמפרטורות הקיץ המינימליות בשעות הלילה. שינוי ממוצע של מעלה אחת עד שתיים לא בהכרח יורגש בציבור הרחב, אולם ההתפלגויות מראות גם עלייה בסטיית התקן של התפלגויות הטמפרטורה, עם גידול ניכר בתדירות שבירת השיאים של ימים ולילות חמים במהלך 30 השנים האחרונות. השינויים בטמפרטורה בחודשי החורף (לא מוצגים) במהלך 70 השנים האחרונות הם פחות ברורים ואינם מובהקים סטטיסטית.



תרשים 1. פונקציית ההתפלגות של A – טמפרטורת מקסימום ו-B – טמפרטורת מינימום בירושלים במהלך חודשי הקיץ (JJJ) בשלוש תקופות שונות: 1950–1979 (כחול), 1971–2000 (אדום), 2017–1988 (צהוב), עם נתונים של 30 שנה בכל התפלגות (יוסף ועמיתיו, 2019).

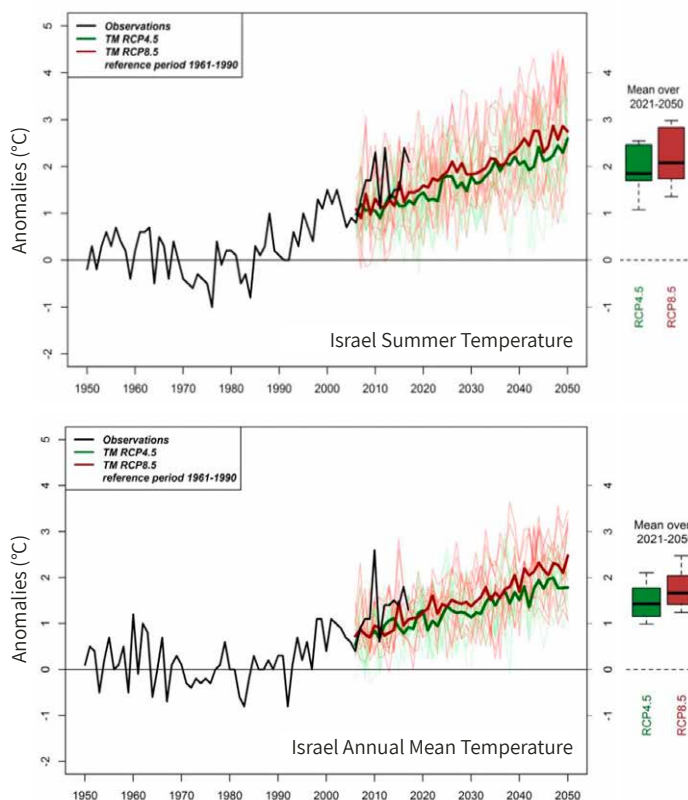
בחינת ההתפלגות החזויה לפי תרחישים RCP4.5 ו-RCP8.5 – תרשים 2 מראה כיצד התפלגות הטמפרטורות בירושלים צפויה להשתנות בקיץ של השנים 2021–2050. סימולציות אלו הן ממוצע אנסמבל של 15 מודלים גלובליים שונים. כאן מוצג ממוצע האנסמבל. בתרחיש "עסקים כרגיל", הטמפרטורות הממוצעות בקיץ יהיו מעל 30 מעלות צלזיוס, והטמפרטורות הליליות הממוצעות יהיו מעל 20 מעלות צלזיוס, עם

שונות רבה יותר בטמפרטורות הקיץ בעתיד. עד שנת 2050 יורגשו בירושלים בחודשי הקיץ טמפרטורות מינימום ומקסימום שמעולם לא נרשמו בעבר בתולדות המדינה. יש לציין כי כל השינויים הללו בחודשי הקיץ הם מובהקים סטטיסטית.



תרשים 2. פונקציית ההתפלגות של A – טמפרטורות מקסימום ו-B – טמפרטורות מינימום בירושלים במהלך חודשי הקיץ (JJA) בתקופות שונות: תצפיות 1988–2017 (צהוב) ותחזיות עתידיות על בסיס תרחיש RCP4.5 (ירוק) ותרחיש RCP8.5 (אדום) לשנים 2021–2050 (יוסף ועמיתיו, 2019).

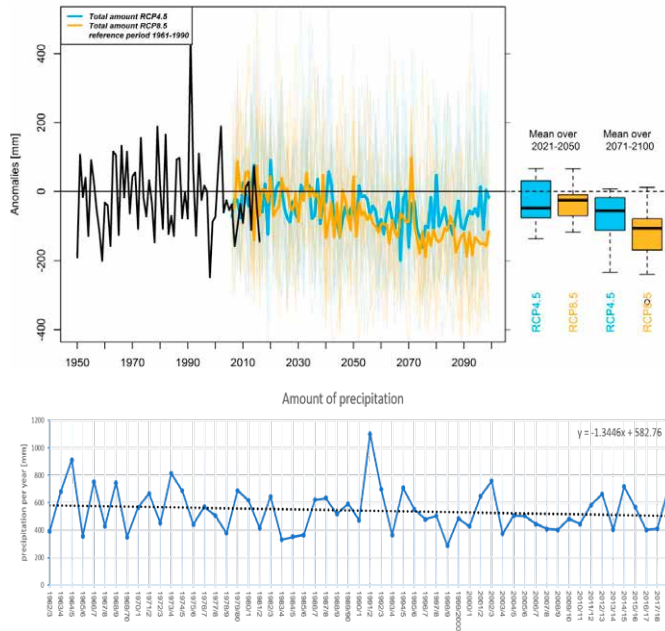
בשקלול כל המיקומים ברחבי ישראל ניתן לראות בתרשים 3 את התצפיות ההיסטוריות משנת 1950, לצד השינויים החזויים עד שנת 2050. מגמות הטמפרטורה בקיץ מוצגות בחלק העליון, ואילו תצפיות הממוצע השנתי והמגמות העתידיות עבור כלל המדינה מופיעות בחלק התחתון. תקופת הייחוס היא השנים 1961–1990. נוכל לראות כי הטמפרטורות בישראל החלו לעלות באופן שיטתי החל משנות ה-80 (קו שחור), ומגמת ההתחממות ב-30 השנים האחרונות הייתה 0.53 מעלות צלזיוס בעשור – נתונים שמעידים על התחממות מובהקת סטטיסטית עבור הממוצע השנתי ועונת הקיץ. הטמפרטורה הממוצעת בישראל צפויה לעלות מרמתה הנוכחית (2020) בעוד 0.9 מעלות צלזיוס עד שנת 2050 לפי תרחיש RCP4.5, ובעוד 1.2 מעלות צלזיוס לפי תרחיש RCP8.5. ההבדל העיקרי בין שני התרחישים יורגש לקראת אמצע המאה, ואילו בעשורים הקרובים שני התרחישים מנבאים שינויים דומים למדי בטמפרטורה ברחבי ישראל.



תרשים 3. שינויים בממוצע הטמפרטורה בישראל בקיץ (למעלה) ובממוצע השנתי (למטה) ביחס לשנים 1961–1990. התצפיות הממוצעות (קו שחור) מוצגות לצד תוצאות של 15 מודלים (אנסמבל) לתרחישי הפליטה לפי RCP4.5 (ירוק) ולפי RCP8.5 (אדום). הקווים הירוקים והאדומים המודגשים מייצגים את הממוצע של מודל האנסמבל עבור כל תרחיש פליטה. בצד ימין מוצגים תרשימי קופסה המראים את התפלגות ערכי הטמפרטורה החזויה על חציון (קו שחור) עבור השנים 2021–2050.

באשר לכמויות המשקעים, ראוי לציין שניתוח נתוני המשקעים בישראל מציג תוצאות ברורות פחות. ב־30 השנים האחרונות אנו רואים מגמת ירידה בכמות המשקעים בכל הארץ (יוסף ועמיתיו, 2019), בהתאם למגמות באגן הים התיכון (Hoerling et al., 2012). עם זאת, אף אחת מהמגמות ארוכות הטווח לגבי משקעים עדיין אינה מובהקת סטטיסטית. לצורך התרחישים העתידיים ועבור תקופת הייחוס 1961–1990, נוכל לצפות לירידה של עד 25 אחוזים בכמויות המשקעים עד סוף המאה. תרשים 4 מציג את השינויים הנצפים והחזויים במשקעים השנתיים בישראל, במילימטרים (בתל-אביב יורדים כ־500 מ"מ גשם בשנה). תרחיש RCP8.5 מראה שעד שנת 2100 צפויה הפחתה ממוצעת כוללת של 126 מ"מ בשנה, שהיא יותר מ־25 אחוזים מכמות

הגשמים השנתית הממוצעת בישראל. עם זאת, עלינו לשים לב גם לשונות הגבוהה של המודלים השונים משנה לשנה. לכן קיימת אי־ודאות רבה באומדנים אלה.



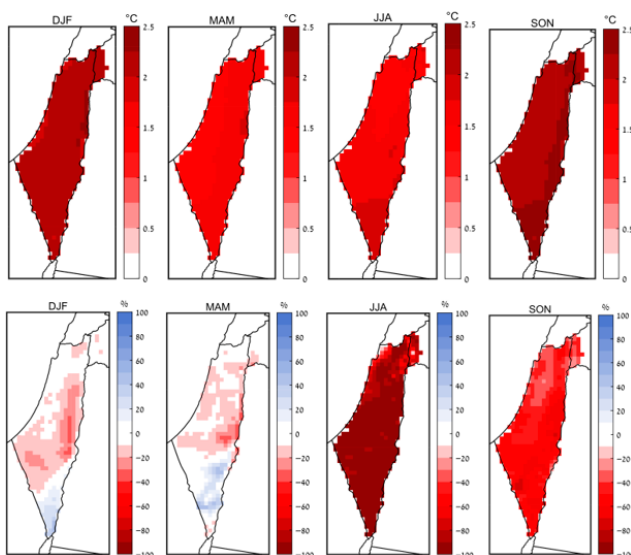
תרשים 4. (למעלה) השינוי בכמות הגשמים ברחבי ישראל (במ"מ) ביחס לתקופה 1961–1990. ממוצע התצפיות (קו שחור) וממוצע תחזיות האנסמבל עבור תרחיש RCP4.5 (כחול) ותרחיש RCP8.5 (כתום). (תחתון). תרשימי הקופסה מייצגים את השינויים הצפויים לפי שני התרחישים עבור תחזיות שונות (2021–2050 ו־2050–2100) (יוסף ועמיתיו, 2019). (למטה) רישום סך המשקעים השנתי בתחנת בית דגן לשנים 1962–2019. יש לציין את החורף החריג של 1991–1992, שיתכן כי הוא קשור להתקררות חצי הכדור הצפוני בעקבות התפרצות הר הגעש פינטובו (Bookman et al., 2014), או לתופעת אל ניניו שהתרחשה באותו חורף (Price et al., 1998) או לשניהם.

מגמה מעניינת ניתן לראות בנתוני הגשם שנמדדו בתחנת בית דגן במהלך 30 השנים האחרונות. מגמת ירידה קטנה אך מובהקת נראית בבירור (תרשים 4b). בהתחשב בעובדה ששטח מטרופולין תל־אביב הוכפל ואף יותר מכך בתקופה זו, ושבאזורים עירוניים כמות הגשמים מעל הערים עצמן ובמורד הרוח מהן נוטה להתגבר – מגמה זו מדאיגה במיוחד, מכיוון שהיא מראה כי הירידה במשקעים הנובעת משינויי האקלים בכל אגן הים התיכון גוברת על כל עלייה פוטנציאלית שמקורה בהשפעות עירוניות. אף שהדבר בולט במיוחד באזור המאוכלס של מרכז הארץ, מגמה דומה נצפתה גם בקרבת האזורים העירוניים של חיפה ובאר־שבע.

חופית יצחק־בן־שלום ועמיתיה (Itzhak-Ben-Shalom et al., 2016) חקרו את השפעות שינויי האקלים על ארבע ערים גדולות בישראל: ירושלים, תל־אביב, באר־

שבע וחיפה. התוצאות מצביעות על מגמת התחממות ברורה בכל ארבע הערים, שם השטח הבנוי העירוני והאוכלוסייה (ומכאן הביקוש לחשמל) גדלו במידה משמעותית. באמצעות מודל RegCM (מודל אקלים אזורי) הראו החוקרים כי עבור תרחיש שבו נמשך הגידול באוכלוסייה (אפשרות סבירה בהתחשב במדיניות הממשלה הנוכחית), העלייה הצפויה בטמפרטורת שעות אחר הצהריים עד שנת 2060 תהיה בין 2.9 ל-4.1 מעלות צלזיוס.

סימולציות מספריות עם מודל COSMO-CLM נערכו על ידי הוכמן ועמיתיו (Hochman et al., 2018) ומציגות מגמות דומות בטמפרטורות ובמשקעים. החוקרים הריצו את התרחישים RCP4.5 ו-RCP8.5 ברזולוציה מרחבית של שמונה קילומטרים. תרשים 5 מציג את תחזיות אמצע המאה (2041-2070) לערכים העונתיים של טמפרטורה ומשקעים בישראל. המשמעות של חורפים חמים ויבשים היא לא רק זמינות המים אלא גם לחות האדמה, אשר תשפיע על התוצרת החקלאית ותפחית את יכולת ייצור המזון בישראל.



תרשים 5. השינוי הצפוי בטמפרטורה העונתית במעלות צלזיוס (למעלה) ובאחוזי משקעים (למטה) בשנים 2070-2041 בקיזוז השנים 1981-2010 לפי תרחיש RCP4.5.

השפעות על הביטחון הלאומי

שלושת הפרמטרים הבסיסיים הצפויים להשתנות בכל התרחישים לשינויי אקלים בעתיד הם טמפרטורה, גשמים ועליית גובה פני הים. בהתאם לקצב הגידול בפליטת גזי החממה, שינויים אלה יתרחשו במוקדם או במאוחר, אם מנהיגי העולם לא יפעלו במהירות כדי למתן את משבר האקלים המתעצם. נתייחס לשלושת הגורמים הללו בדיון על הביטחון הלאומי של ישראל.

עלייה בטמפרטורה, במיוחד בחודשי הקיץ, תביא לכך שבקיץ ישררו טמפרטורות שיהיו לעיתים קרובות מעל 37 מעלות צלזיוס ברוב חלקי הארץ. הדבר ישפיע ישירות על התיירות, על הכלכלה הלאומית ועל הפעילות המבצעית של הצבא. לדוגמה, ידוע היטב כי מרחקי המראה/נחיתה של מטוסי סילון תלויים בטמפרטורת הסביבה וגדלים ככל שהטמפרטורה עולה. המשמעות היא שכאשר יעלה מספר הימים החמים במיוחד, הגבלה של פעילות חיל האוויר הישראלי תפגע במספר הגיחות שחיל האוויר יוכל לבצע בשעות מסוימות. הדבר ישפיע גם על התעבורה האווירית האזרחית מנמל התעופה הבינלאומי בן-גוריון ועל צריכת הדלק, ובעקבות זאת על הארכת משך הסבב של מטוסים (שהייה על הקרקע) והעלויות. מערכות קירור באוניות, במטוסים, בטנקים וכדומה עשויות להתחמם יתר על המידה, ובכך לשבש פעילות שוטפת עקב כשל הנובע מתנאי חום קיצוני ממושך.

הפחתת כמויות הגשם בצד התאדות מוגברת יגבירו את המחסור במים באזור וישפיעו על זמינות המים ועל איכותם, במיוחד במדינות שכנות שבהן עדיין לא נעשה שימוש נרחב בהתפלת מים. הדבר ישפיע ישירות על היבולים החקלאיים עקב התגברות בצורות, עם השלכות על ביטחון המזון באזור. זאת נוסף על ההשפעות מהמשך הגידול באוכלוסייה בישראל ובאזור.

למרות שכמות הגשם השנתית הכוללת צפויה לרדת בעתיד, המודלים חוזים גם סופות עזות יותר, שכאשר יתרחשו עלולות ליצור שיטפונות כבדים. אירועים כאלה של משקעים כבדים עלולים לפגוע בתשתיות כמו גשרים, סכרים וכבישים, ולעיתים לנתק אזורים במדינה במשך שעות ואף ימים. תשתיות ובסיסים צבאיים, אם לא ייערכו ויותאמו היטב לאירועי מזג אוויר קשה, ייקלעו למצבים שישבשו את פעילותם ועלולים לפגוע ביכולותיהם המבצעיות. דוגמה לאירוע חמור כזה התרחשה במהלך חורף 2019-2020, כאשר גשמים עזים ושיטפונות גרמו לעליית מפלס נחל לכיש, שהציף בין היתר שטחי חניית מטוסים בבסיס חיל האוויר בחצור (כנף 4) והביא להשבתה של כמה מטוסי F-16 במשך שבועות אחדים, ולנזק של עשרות מיליוני שקלים.

היבט נוסף של מזג האוויר הקשה הוא מכות ברק שיסכנו תשתיות צבאיות ואזרחיות בשל נזקים לרשת החשמל. הפסקת חשמל ממושכת כתוצאה מסופת ברקים

חזקה וחריגה התרחשה ב-25 באוקטובר 2015, כאשר ענן סופה מסיבי מסוג תא"על (supercell) השפיע על מרכז הארץ (Yair et al., 2020). בטווח של 24 שעות נרשמו כמעט 30 אלף מכות ברק בקרקע, שגרמו להפרעות חמורות ברשת החשמל בערים רעננה וכפר סבא, ובחלק מהשכונות החשמל חזר רק כעבור 72 שעות. סקירה של סכנות ברקים חזויות לתעופה, לתחבורה ולמשק האנרגיה ניתן למצוא אצל יואב יאיר (Yair, 2018). האיום השלישי הנשקף משינויי אקלים (לאחר שינויי טמפרטורה וגשם) הוא עליית גובה פני הים. זה אולי אינו איום חמור ישיר על ישראל, אך הוא איום מרכזי על שכנתנו מדרום, מצרים. עלייה של מטר אחד בגובה פני הים (כפי שחווה תרחיש RCP8.5 עד שנת 2100) בים התיכון תביא לכך שאזור הדלתא של הנילוס ישקע בחלקו, וערים כמו אלכסנדריה ופורט סעיד יהיו בחלקן מתחת למים. כיום מתגוררים באזורים אלה יותר משישה מיליון איש, ורובם יצטרכו לנדוד ולהתיישב במקום אחר. זאת ועוד, האוכלוסייה במצרים צפויה להכפיל את עצמה ולהגיע ל-200 מיליון איש עד שנת 2050. מצב זה עלול ליצור בעיית פליטים עצומת ממדים באזור. כמו כן, חדירת מים מליחים לאקוויפר הדלתא של הנילוס תפגע באיכות המים ובהשקיה, ובשל כך בחקלאות ובייצור המזון, כאמור לעיל (Abutaleb et al., 2018).

נראה אפוא כי האיום המרכזי על הביטחון הלאומי של ישראל הנובע משינויי האקלים הוא מצד שכנינו, ומהאופן שבו הם נערכים לתוצאות של שינויי האקלים בתחומי מדינותיהם. עקב העלייה הצפויה בגלי החום, הידלדלות מקורות המים והעלייה בגובה פני הים, אנו צפויים לראות תסיסה באזורים כפריים ועירוניים שמקורה בנזקים ליבולים, במחסור במים ובמזון ובהצפות של ערי חוף. ללא מענה ממשלתי הולם שייצא לאוכלוסייה, תסיסה כזו יכולה להתפתח להתקוממויות עממיות כפי שנראו ב'אביב הערבי', וכפי שעדיין קורה בסוריה ובאזורים אחרים במזרח התיכון. משוער כי הגורם המניע לתסיסה בסוריה היה כאשר חקלאים נטשו את שדותיהם לאחר בצורת שנמשכה ארבע שנים (2007-2010) ועברו לערים כמו דמשק, ולאחר שלא מצאו עבודה גויסו לארגונים כמו דאע"ש (Kelley et al., 2015). התקוממויות עממיות כאלה יכולות להוביל בקלות לאלימות ולמלחמת אזרחים, ולבסוף לנדידת פליטים בין מדינות, כפי שהיה בשנת 2015 באירופה.

תרחיש שלפיו עד שנת 2050 שינויי האקלים יביאו למיליוני פליטי אקלים מאפריקה, ממצרים וממדינות אחרות באזורנו אינו בלתי סביר. האם ייתכן שחלק גדול מהפליטים ינסו לחפש מזון ומים במדינה היציבה באזור? ומה נעשה כאשר מיליון פליטי אקלים יתדפקו על גבולותינו, או פשוט יחצו את גבול הערבה מירדן? אומנם קשה לחזות את העתיד, אך מטרתנו בפרק זה היא להציג שורה של איומים על הביטחון הלאומי של ישראל בעשורים הבאים, כתוצאה משינויי האקלים (תרשים

6). האיומים המוצגים מוגדרים באופן כללי לפי הסבירות שיתרחשו בעשורים הבאים, יחד עם היקף השפעתם על ביטחון המדינה במידה שאכן יתרחשו.

רבים מהאיומים הללו נדונו לעיל ואף נחקרו על ידי אחרים, אולם אנו מבקשים להצביע באופן ספציפי על אירועי "ברבור שחור", כלומר אלה שסבירות התרחשותם נמוכה מאוד אך השפעותיהם עצומות. כיום כולם מבינים את חומרתם של אירועים מסוג ברבור שחור (Aven, 2013). למשל, מגפת הקורונה היא אירוע בהסתברות נמוכה מאוד ובעל השפעה מתמשכת ואדירה על כל העולם, וגם על ישראל. אירועים דומים מסוג ברבור שחור עשויים להתרחש עקב שינויי אקלים.

ראשית נציין כי מגפות כמו הקורונה עשויות להפוך שכיחות יותר בעתיד, כתוצאה משינויי אקלים. השילוב של טמפרטורות מתחממות עם הרס בתי גידול ביערות טרופיים מוביל לנדידת מינים אקזוטיים של בעלי חיים למקומות נוחים יותר. נדידות אלה של מינים במצוקה מובילות לא פעם לאינטראקציה עם בעלי חיים מבויתים (פרות, חזירים, עופות), שבתורם באים במגע עם בני אדם. לכן אפשר לצפות למגפות דומות בעתיד כתוצאה משינויי אקלים. דוגמה מובהקת לכניסתם של וקטורים חדשים נושאי מחלות היא הגעתם של מינים פולשים כמו היתוש המפיץ את קדחת מערב הנילוס (Culex Pipiens) אשר שמציב איום חדש על בריאות הציבור בישראל, עם עלייה ברורה במספר המקרים המדווחים מדי שנה (אתר משרד הבריאות).



תרשים 6. ייצוג סכמתי של איומים שונים על הביטחון הלאומי של ישראל, בהתבסס על ההסתברות להתרחשותם (נמוכה, בינונית וגבוהה) והשפעתם על הביטחון הלאומי (נמוכה, בינונית וגבוהה).

אולם ייתכנו אירועי ברבור שחור אחרים הקשורים ישירות ל"נקודות מפנה" שיתרחשו במערכת האקלים. האם ייתכן שיריעת הקרח של מערב אנטארקטיקה תתנתק מאנטארקטיקה ותגרום לעלייה פתאומית עצומה בגובה פני הים, בזמן שהקרח

מהיבשת זורם לאוקיינוסים (Bamber et al., 2009)? האם נחזה בהמסה מעריכית (אקספוננציאלית) של גרינלנד, שכבר עברה את "נקודת האל־חזור" (King et al., 2020)? ההשפעות המיידיות על קו החוף ועל ערי חוף ברחבי העולם יהיו קטסטרופליות. כאמור, שכנתנו מדרום נמצאת במצב מעורער ביותר בכל הנוגע למקורות מים, ביטחון מזון ועליית גובה פני הים. כיצד תושפע מדינת ישראל מטלטלות חברתיות וכלכליות עצומות שיתרחשו בעשורים הקרובים בארצות השכנות? נקודות מפנה נוספות קשורות להפשרת אזורי קיפאון־עד בעולם, שתגרום לפליטת כמויות אדירות של מתאן (גז חממה חזק) לאטמוספירה ותאיץ את שינויי האקלים מעבר לתרחיש "עסקים כרגיל" (Schuur & Abbott, 2011). נקודות מפנה דומות עשויות לنبוע מהתנוונות עצים (dieback) ביערות הגשם באמזונס, שתביא לעלייה מהירה בריכוזי הפחמן הדו־חמצני באטמוספירה ולהתחממות מהירה נוספת (Cox et al., 2000). יש להביא בחשבון אירועי ברבור שחור כאלה בכל התרחישים העתידיים.

סיכום ומסקנות

שינויי האקלים כבר כאן והשלכותיהם רק יחמירו בעשורים הקרובים. גם אם נעצור היום את כל פליטות גזי החממה, המערכת תזדקק לעשרות שנים כדי להסתגל לשינויים האטמוספריים בריכוזים שלהם, ומכאן שגם ללא פליטות נוספות של גזי חממה בעתיד, הטמפרטורה העולמית תמשיך לעלות במעלה אחת עד שתיים בעשורים הקרובים. לכן, ללא קשר להסכמים גלובליים ולמדיניות הפחתה עולמית, האקלים ימשיך להתחמם בעשורים הבאים, וככל הנראה עוד זמן רב יותר.

שלושת הפרמטרים האקלימיים העיקריים שצפויים להשתנות לפי כל המודלים הם טמפרטורה, גשם וגובה פני הים. שלושת הפרמטרים הללו משפיעים על היבטים רבים בחיי היום־יום שלנו, החל בבריאות הציבור, בחקלאות, במשאבי מים ואנרגיה וכלה בפעילות צבאית. למרבה הצער, האקלים אינו צפוי להשתנות מאקלים מסוים לאקלים אחר, אלא ימשיך להשתנות בעתיד עד שנצליח "לשטח את העקומה" של פליטת גזי החממה לאטמוספירה. לאור זאת, ההיערכות לשינויי האקלים צריכה להיות דינמית ורציפה, תוך הסתמכות על תחזיות של מודלים לתרחישים עתידיים.

ישראל אומנם מדינה עתירת חוסן ובעלת יכולת להתמודד עם מזג אוויר קיצוני מקומי, שיטפונות ואפילו גלי חום ושריפות, אך האיום האמיתי על הביטחון הלאומי נמצא מחוץ לגבולותינו. המדינות השכנות פגיעות הרבה יותר לשינויי אקלים, ולכן ייתכן שכתוצאה משינויי אקלים נתמודד עם בעיות קשות של חוסר יציבות אזורית, לצד מספר רב של פליטי אקלים בגבולותינו. יש להביא בחשבון תרחישים כאלה בכל תוכנית היערכות בעתיד.

מקורות

- אתר משרד הבריאות. קדחת מערב הנילוס. <https://www.health.gov.il/Subjects/disease/WNF/Pages/default.aspx>
- יוסף, י', בהר"ד ע', אוזן ל', אוסטינסקי-צדקי א', כרמונה י', חלפון נ', פורשפן א', לוי י' וסתינו נ' (2019). **שינוי האקלים בישראל – מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורות והמשקעים** (דו"ח מחקר 4000-0804-2019-0000075, נובמבר 2019). השירות המטאורולוגי הישראלי. https://ims.gov.il/sites/default/files/ClimateChangeInIsraelReport_20191128_new.pdf
- Abutaleb, K. A. A., Mohammed, A.H.E., & Ahmed, M.H.M (2018). Climate change impacts, vulnerabilities and adaptation measures for Egypt's Nile Delta. *Earth Systems and Environment* 2, 183-192. DOI: 10.1007/s41748-018-0047-9
- Asseng, S., Kheir, A., Kassie, B.T., & Hoogenboom, G. (2018). Can Egypt become self-sufficient in wheat? *Environmental Research Letters* 13 (9):09402. DOI: 10.1088/1748-9326/aada50
- Aven, T. (2013). On the meaning of a black swan in a risk context. *Safety Science* 57, 44-51. DOI: 10.1016/j.ssci.2013.01.016
- Bamber, J.L., Riva, R.E.M, Vermeersen, B.L.A., & LeBroek, A.M. (2009). Reassessment of the potential sea-level rise from a collapse of the west Antarctic Ice Sheet. *Science* 324, 901-903.
- Bookman, R., Filin, S., Avni, Y., Rosenfeld, D., & Marco, S. (2014). Possible connection between large volcanic eruptions and level rise episodes in the Dead Sea Basin. *Quaternary Scientific Review* 89, 123-128.
- Bowman, D.M.J.S., Williamson, G.J., Abatzoglou, J.T., Kolden, C.A., Cochrane, M.A., & Smith, A.S.M. (2017). Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nature Ecology & Evolution* 1: 0058.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A., & Totterdell, I.J. (2000). Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184-187.
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.P., Iglesias, A., Lange, M.A., Lionello, P., Llasat, M.C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M.N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change* 8 (11), 972-980.
- Diffenbaugh, N. S., Pal, J.S., Giorgi, F., & Gao, X. (2007). Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophysical Research Letters* 34 (11): L11706.
- Diffenbaugh, N. S. & Giorgi, F. (2012). Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climate Change* 114, 813-822.
- IPCC (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33(8): L08707.
- Giorgi, F. & Lionello, P. (2008). Climate change projection for the Mediterranean region. *Global Planetary Change* 63, 90-104.
- Hochman, A., Mercogliano, A., Alpert, P., Saaroni, H., & Bucchignani, E. (2018). High-resolution projection of climate change and extremity over Israel using COSMO-CLIM. *International Journal of Climate*, 2018, 1-12.
- Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., X. Quan, Zhang, T., & Pegion, P. (2012). On the increased frequency of Mediterranean drought. *Journal of Climate* 25, 2146-2161.

- Itzhak-Ben-Shalom, H., Samuels, R., Potchter, O., & 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, 464-484. DOI: 10.4236/ajcc.2016.54034
- Kelley, C.P., Shahrzad, M., Cane, M.A., Seager, R., & Kushnir, Y. (2015). Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. *PNAS* 112 (11), 3241-3246.
- King, M. D., Howat, I. M., Candela, S. G., Noh, M. J., Jeong, S., Noel, B. P. Y., van den Broeke, M. R., Wouters, B., & Negrete, A. (2020). Dynamic ice loss from the Greenland Ice Sheet driven by sustained glacier retreat. *communications earth and environment* 1 (1), 1-7.
- Marcos, M., Jorda, G., & Le Cozannet, G. (2016). Sea level rise and its impacts on the Mediterranean. in S. Thiebault & J.P. Moatti (Eds.). *The Mediterranean region under climate change: A scientific update.*, IRD Editions, P. 265-275.
- Mariotti, A., (2010). Recent changes in the Mediterranean water cycle: A pathway toward long-term regional hydroclimatic change? *Journal Climate* 23, 1513–1525.
- McKinsey Global Institute (2020). *A Mediterranean basin without a Mediterranean climate?* <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/a%20mediterranean%20basin%20without%20a%20mediterranean%20climate/a-mediterranean-basin-without-a-mediterranean-climate.pdf>
- Ozturk, T., Ceber, Z.P., Türkeş, M., & Kurnaz, M.L. (2015). Projections of climate change in the Mediterranean Basin by using downscaled global climate model outputs. *International Journal of Climatology* 35 (14), 4276-4292. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.4285>
- Price, C., Stone, L., Huppert, A., Rajagopalan, B., & Alpert, P. (1998). A possible link between El Nino and precipitation in Israel. *Geophysical Research Letters* 25(21), 3963-3966.
- Rutty, M., Scott, D. (2015). Bioclimatic comfort and the thermal perceptions and preferences of beach tourists. *International Journal of Biometeorology* 59 (1), 37–45. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0820-x>
- Sanchez, E., Gallardo, C., Gaertner, M.A., Arribas, A., Castro, M. (2004). Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: A first approach. *Global and Planetary Change* 44, 163–180.
- Schuur, E.A.G., & Abbott, B., (2011). High risk of permafrost thaw. *Nature* 480, 32-33.
- Seidel, D. J., Fu, Q., Randel, W.J., & Reichler, T. J. (2008). Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geoscience* 1 (1):21–24.
- Tran, A., Sudre, B., Paz, S., Rossi, M., Desbrosse, A., Chevalie, V., & Semenza, J.C. (2014). Environmental predictors of West Nile fever in Europe. *International Journal of Health Geographics* 13, 26.
- Yair Y. (2018). Lightning hazards to human societies in a changing climate. *Environmental Research Letters* 13, 12, 123002.
- Yair, Y., B. Lynn, M. Yaffe, B. Ziv & Shpund, J. (2020). Observations and numerical simulations of the October 25th, 2015 super-cell thunderstorm over central Israel. *Atmospheric Research* 247, 105165.
- Yin, J. H. (2005). A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophysical Research Letter* 32, L18701, doi:10.1029/2005GL023684