



פרק ז

שינוי האקלים והשפעתו על המגוון הביולוגי

תקציר

- קיים קונצנזוס מדעי שההתחממות העולמית ושינוי האקלים הם תופעה עולמית שנגרמת ברובה בעקבות פליטת גזי חממה שנובעת מפעילות אנושית, ובעיקר בשל שרפת דלקי מחצבים.
- הטמפרטורה הממוצעת העולמית בעשור החולף חמה יותר בכ-1.1 מעלות צלזיוס לעומת הטמפרטורה הממוצעת במחצית השנייה של המאה ה-19. הטמפרטורה בכדור הארץ לא הייתה כה חמה מזה לפחות 125 אלף שנים.
- טמפרטורת האוקיינוסים והימים עולה, ואיתה מפלס פני הים.
- אירועי מזג אוויר קיצוני, כגון סופות, בצורות וגלי חום ביבשה ובים צפויים להתרחש בתדירות גבוהה יותר ובעוצמה רבה יותר, וצפויים להיות הרסניים עבור המערכות האקולוגיות והאדם.
- בשל שינוי האקלים מתרחשים שינויים משמעותיים בתפוצת מינים, במאפיינים פיזיולוגיים של בעלי החיים ובדגמי פעילות של צמחים ובעלי חיים.
- על פי הדו"ח האחרון של הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי האקלים (IPCC), ישראל והמזרח התיכון מתחממים בקצב גבוה מהממוצע העולמי.
- בארצות אגן הים התיכון הטמפרטורה עלתה בין השנים 1961-2015 בקצב של 0.24 מעלות לעשור - קצב מהיר ב-13% מהממוצע העולמי (0.21 מעלות לעשור). הטמפרטורה היבשתית הממוצעת צפויה עוד לעלות בכ-1.5-3.7 מעלות עד השנים 2070-2100 ביחס לממוצע בשלושת העשורים האחרונים. עיקר ההתחממות צפוי להיות בקיץ.
- ב-30 השנים האחרונות ישראל התחממה ב-1.7 מעלות. ישראל מתחממת באופן רציף מאז 1980.
- אגן הים התיכון צפוי להיעשות שחון יותר. בישראל צפויה הפחתה של 15% עד 25% בכמות המשקעים עד סוף המאה הנוכחית (ביחס לתקופה שבין השנים 1961-1990).
- ישראל היא גבול תפוצה עולמי למינים רבים. אוכלוסיות בגבול תפוצה נוטות להיות פגיעות במיוחד לשינויים בסביבה, ובהם שינוי האקלים.
- בעקבות הירידה בכמות המשקעים והעלייה בטמפרטורה הממוצעת בישראל צפויה פגיעה משמעותית בבתי גידול של מים מתוקים (אקוויטים) כנחלים, מעיינות ובריכות חורף. אזורים רגישים נוספים הם אזורי הספר, בין החבל המדברי לחבל הים תיכוני, ואזורים המתאפיינים בטמפרטורות קרירות, כהר הנגב הגבוה והחרמון. נוסף על כך, חורשים, יערות ובתות צפויים להיפגע מאירועי בצורת ממושכים ומעלייה בתדירות השרפות. באזורים המדבריים בישראל שינויים בתקופות הגשומות, רצף שנים צחיחות ועליית הטמפרטורות צפויים להשפיע על הצומח והחי.
- הים התיכון התחמם בכמעלה וחצי בארבעים השנים האחרונות. קצב זה מהיר משמעותית מהקצב הממוצע של התחממות האוקיינוסים בעולם.
- בשל התחממות הים התיכון צפויה הכחדה של כחמישית ממיני הדגים האנדמיים לו עד סוף המאה ה-21.
- התחממות הים תקל על התבססות של מינים פולשים מגופי ים אחרים (ים סוף, האוקיינוס ההודי ודרום האוקיינוס השקט), דבר שיוביל לפגיעה נוספת בהרכב המינים המקומי.
- כיום ישנם פערי ידע משמעותיים לגבי השפעות שינוי האקלים על מגוון המינים והמערכות האקולוגיות.
- ישנו צורך חיוני בניטור ארוך-טווח ובמחקר אמפירי כדי להקטין את פערי הידע וכבסיס לניהול בר-קיימא של מגוון המינים והמערכות האקולוגיות בישראל.

מבוא

תשומת לב תקשורתית נרחבת, המודעות הציבורית לנושא גוברת, והוא משפיע על סדר היום הציבורי, הביטחוני והפוליטי ברחבי העולם.²

קצב פליטות גזי חממה⁽ⁱ⁾ לאטמוספירה התגבר עשרות מונים בעקבות המהפכה התעשייתית והשרפה המואצת של דלקי מחצבים. קיים קונצנזוס בין מדעני האקלים כי הפליטות האלה תורמות לשינוי האקלים העולמי¹. כיום שינוי האקלים מקבל

אפורית החמשון (*Pyrgus serratulae*)



שלגן חרמוני (*Parnassius mnemosyne*)



כתמית פנדורה (*Argynnis pandora*)



ירוקי אירופי (*Callophrys rubi*)

דוגמאות למיני פרפרים שישראל היא גבול תפוצתם הדרומי. שינוי האקלים עלול לדחוק אותם צפונה ממנה ולגרום להכחדתם המקומית. צילום: משה לאודון

(i) גזי חממה (greenhouse gases) - גזים באטמוספירה אשר קולטים קרינה קצרת-גל הנפלטת מפני השטח של כדור הארץ, ומחזירים חלק ממנה חזרה לפני השטח. העיקריים שבהם הם פחמן דו-חמצני, מתאן ותחמוצות חנקן. אדי מים הם אומנם גז חממה, אך בשל מחזור המים (אידיוי מפני הים, התעבות בעננים, ירידת משקעים וזרימה חזרה לים) - המתרחש בקצב מהיר בהרבה ממחזור הפחמן למשל - הם בעיקר מגיבים לריכוז גזי החממה האחרים ואינם מנוע אקלימי בזכות עצמם.

מגמות ותרחישים בשינוי האקלים בעולם

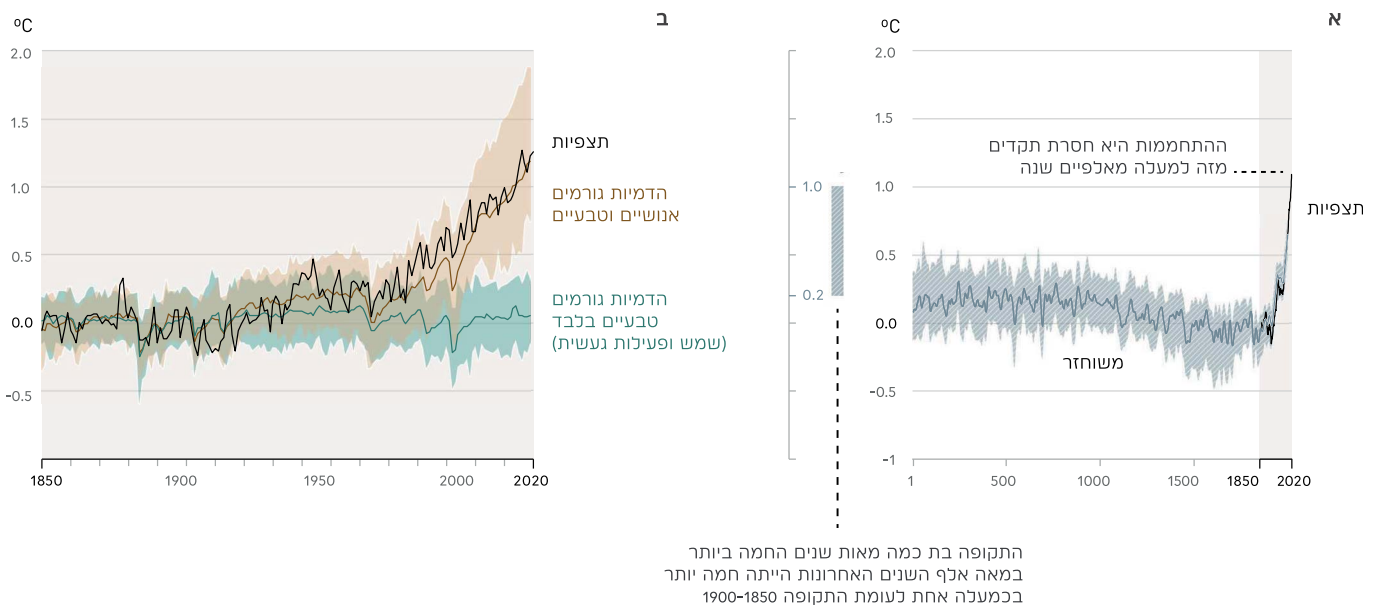
התחממות כדור הארץ

הטמפרטורה העולמית הממוצעת בין השנים 2001-2020 הייתה גבוהה יותר ב-0.84 עד 1.10 מעלות צלזיוס לעומת השנים 1850-1900 (איור 1). קצב ההתחממות אינו אחיד בכל העולם: בארצות אגן הים התיכון הטמפרטורה עלתה בקצב של 0.24 מעלות לעשור בין השנים 1961-2015, בעוד שהממוצע העולמי לאותה תקופה עמד על 0.21 מעלות לעשור בלבד. התחממות פני השטח של כדור הארץ מאז 1970 היא המהירה ביותר בכל תקופה של 50 שנה באלפיים השנים האחרונות. הטמפרטורות בעשור האחרון (2011-2020) היו גבוהות בכ-1.09 מעלות לעומת השנים 1850-1900. הן גם היו גבוהות יותר מאלה שבתקופה החמה האחרונה, שחלה לפני כ-6,500 שנה ונמשכה מאות שנים. טמפרטורת פני השטח לא הייתה כה חמה לכל הפחות מאז התקופה הבין-קרחונית⁽ⁱⁱⁱ⁾ הקודמת, שחלה לפני כ-125 אלף שנים. דו"ח ה-IPCC מעריך כי על כל 1,000 גיגה טונות פחמן דו-חמצני שהאנושות תפלוט, טמפרטורת פני השטח הממוצעת תתחמם בכ-0.27 עד 0.63 מעלות (אומדן מיטבי של כ-0.45 מעלות).

הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי האקלים (IPCC - Intergovernmental Panel for Climate Change)⁽ⁱⁱⁱ⁾ הוא הגוף המדעי של האו"ם, האחראי לעריכת דו"חות מדעיים בנושא שינוי האקלים. המידע והנתונים בפרק זה מבוססים על דו"ח הבסיס הפיזיקלי של ההערכה השישית של ה-IPCC (להלן "דו"ח ה-IPCC")³.

גזי חממה

היקף שינוי האקלים בעקבות השפעות האדם הוא חסר תקדים מאז המהפכה התעשייתית. דו"ח ה-IPCC קובע כי האנושות גרמה לשינוי האקלים, בעיקר דרך פליטת גזי חממה. בשל כמות גזי החממה שכבר פלטה האנושות כולה, ואלה שעוד ייפלטו בעתיד, גם בתרחיש האופטימי ביותר ימשיך שינוי האקלים מעשי ידי אדם לבוא לידי ביטוי במאות עד אלפי השנים הבאות. ריכוז שניים מגזי החממה המרכזיים באטמוספירה (מתאן וחמצן דו-חנקני) הוא הגבוה ביותר מזה לפחות 800,000 שנה, וזה של פחמן דו-חמצני הוא הגבוה מזה שני מיליון שנה.



השינוי בטמפרטורת פני השטח העולמית לפי שחזור (לשנים 1850-1) ולפי מדידות (בשנים 1850-2020).
 א. ממוצע לעשר שנים, משוחזר עד שנת 1850 ומדוד עד שנת 2020. תחום האי-ודאות (באפור) נידון כעת, וייתכן שהוא צר יותר (א' הוכמן, מידע בע"פ);
 ב. ממוצע שנתי מדוד וכן מחושב בהדמיות הכוללות גורמים אנושיים וטבעיים (בחום) וגורמים טבעיים בלבד (בטורקיז), בשנים 1850-2020. מקור: דו"ח ה-IPCC³.

(iii) האקלים בעידן הפלייסטוקן התנדנד בין תקופות קרחוניות (glacial periods) לבין תקופות בין-קרחוניות (interglacial periods). בתקופות קרחוניות הקרחונים בקטבים ובהרים התרחבו, ומפלס פני הים ירד, ואילו בתקופות בין-קרחוניות הקרחונים התכווצו, ומפלס פני הים עלה.

שינוי בדגמי המשקעים

התחזיות צופות שאירועי קיצון יהיו שכיחים יותר עם המשך ההתחממות העולמית, גם אם היא תוגבל ל-1.5 מעלות. למשל, סופות ציקלון טרופיות בדרגות 4–5 (רוחות במהירות מעל 200 קמ"ש). בתרחיש התחממות עולמית בת 2 מעלות, גל חום יבשתי שהתרחש בעבר רק אחת ליוכל, צפוי להתרחש 14 פעמים ביוכל, ולהיות חם יותר ב-2.7 מעלות.

ימים ואוקיינוסים

התחממות האוקיינוסים צפויה להיות איטית יותר מהתחממות היבשות, והאזור הארקטי צפוי להתחמם בקצב כפול מהמוצע העולמי. טמפרטורת פני הים הממוצעת בין השנים 2001 עד 2020 הייתה גבוהה ב-0.88 מעלות בהשוואה לשנים 1850–1900⁴, והיא צפויה להמשיך ולעלות בקצב מהיר פי 2–8 מקצב ההתחממות שנצפה ב-50 השנים האחרונות. ההתחממות גרמה להתרחבות גוף המים ולהפשרת קרחונים, ולכן גובה פני הים עלה ב-120 השנים האחרונות (1901–2018) בכ-20 ס"מ. קצב העלייה הולך וגובר, וצפוי להמשיך ולעלות במאות עד אלפי השנים הבאות³.

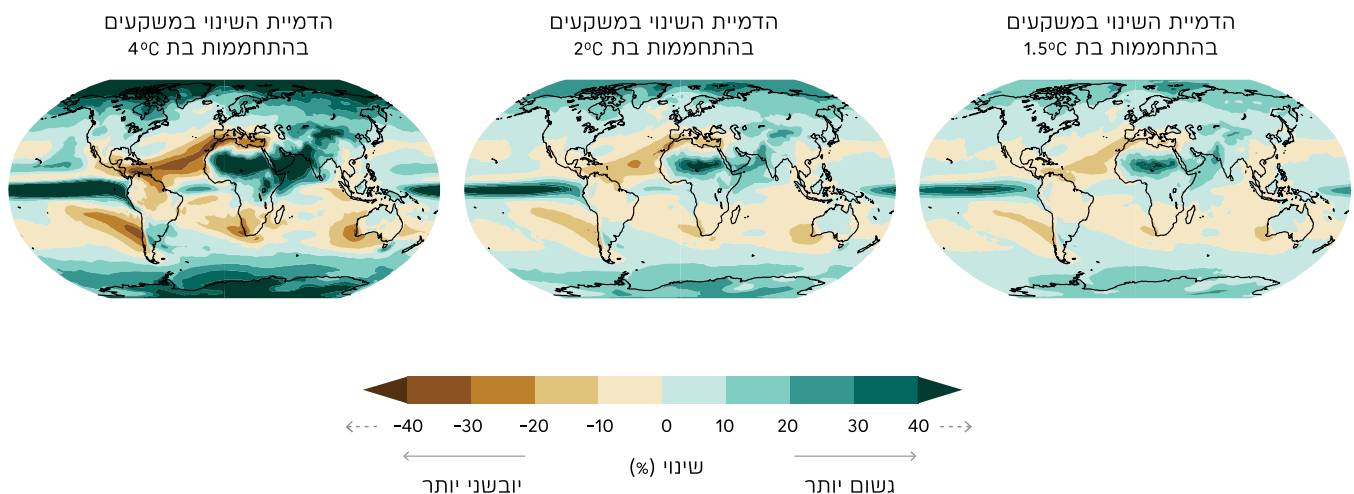
כמות המשקעים העולמית ברחבי שטחי היבשה עלתה מאז 1950, ועולה בקצב גובר מאז שנות ה-80 של המאה הקודמת. בעוד שרוב העולם צפוי להיות גשום יותר, אגן הים התיכון, דרום אפריקה ואגן האמזונס צפויים להיעשות שחונים יותר. אזורים אלה צפויים להיעשות יובשניים עוד יותר בשל השפעה משולבת של פחת במשקעים והגברת האידוי-דיות (איור 2).

אירועי מזג אוויר קיצוניים

אחת ההשלכות המשמעותיות של שינוי האקלים היא העלייה בתדירות ובעוצמה של אירועי מזג אוויר קיצוניים ברחבי העולם. אירועים אלה כוללים חום קיצוני, גלי חום ימיים, גשמי זעף, בצורות וסופות טרופיות. אירועי חום קיצוניים, כולל גלי חום, נעשו תכופים יותר ובעצימות רבה יותר במרבית שטחי היבשה מאז שנות ה-50 של המאה הקודמת. אירועי קור קיצוניים נעשו תכופים פחות ובעצימות נמוכה יותר. תדירות ועוצמות הגשמים הכבדים התגברו ברוב שטחי היבשה, במקביל להתרבות בצורות באזורים מסוימים בעולם בשל הפחתת משקעים לצד הגברת האידוי-דיות.

שינוי בממוצע המשקעים השנתי (%) בהשוואה לשנים 1900–1850

כמות המשקעים צפויה לגדול בקווי רוחב גבוהים, באזורים המשווניים של האוקיינוס השקט ובחלקים מאזורי המונסונים, אבל לפחות בחלק מהאזורים התת-טרופיים (כגון אגן הים התיכון) ובחלקים מהאזורים הטרופיים (כגון אגן האמזונס) צפויה הפחתה במשקעים.



איור 2

השינוי היחסי בכמות המשקעים השנתית עם התחממות האקלים. מקור: דו"ח ה-IPCC³. שינויים קטנים בכמויות המשקעים המוחלטות עשויים להתבטא כשינויים גבוהים באחוזים במקומות יובשניים (כגון הסהרה).

שינוי האקלים בישראל

מגמות אקלימיות בישראל

התחממות - עד היום

ב-70 השנים האחרונות עלתה הטמפרטורה הממוצעת בישראל ב-1.4 מעלות. השינוי בטמפרטורה אינו אחיד, בעוד שבין שנות ה-50 לשנות ה-70 נצפתה התקררות, לאחריה חלה התחממות מהירה⁵: ב-30 השנים האחרונות נצפתה התחממות מובהקת ורצופה של כ-0.55 מעלות לעשור, וישראל התחממה ב-1.7 מעלות. שיעור ההתחממות הגדול ביותר נצפה בקיץ.

ביטוי ההתחממות בישראל

ביבשה

- גידול מובהק במספר הימים והלילות החמים לצד ירידה מובהקת במספר הימים והלילות הקרים.
- עלייה בעומס החום בלילות הקיץ במישור החוף והתחממות הצהריים בימות הקיץ בהרים.
- רצפי הימים החמים התארכו (גלי חום), בעוד שרצפי הימים הקרים התקצרו (גלי קור).

בים

- באגן המזרחי של הים התיכון עלתה טמפרטורת פני הים בכ-1.5 מעלות בין השנים 1982–2019. עיקר השינוי הוא בחודשי הקיץ⁶. קצב זה מהיר משמעותית מהקצב הממוצע של התחממות פני הים בעולם, ומהיר יותר אף מקצב ההתחממות של יתר חלקי אגן הים התיכון.
- בחלקו הצפוני של ים סוף עלתה הטמפרטורה השנתית הממוצעת של פני הים בכ-1.2 מעלות בין השנים 1982–2016⁷. קצב ההתחממות מתגבר, הוא מהיר יחסית לשאר אגני ים סוף, וגבוה משמעותית מהממוצע העולמי.

התחממות - תחזיות

- תחזית ההתחממות היא ביחס לתקופה 1961–1990, וצפויה להיות גבוהה יותר בקיץ מאשר בחורף⁸.
- לפי התרחיש המתון – פליטת גזי החממה תגיע לשיאה בשנת 2040, ולאחר מכן תפחת בהדרגה. הטמפרטורה הממוצעת בישראל צפויה לעלות לקראת סוף המאה (2071–2100) בכ-2.3 מעלות (איור 3).
- לפי התרחיש החמור – העלייה בפליטת גזי החממה תימשך ("עסקים כרגיל"). הטמפרטורה הממוצעת בישראל צפויה לעלות לקראת סוף המאה בכ-4.5 מעלות.

שינויים במשטרי המשקעים בישראל

עד היום

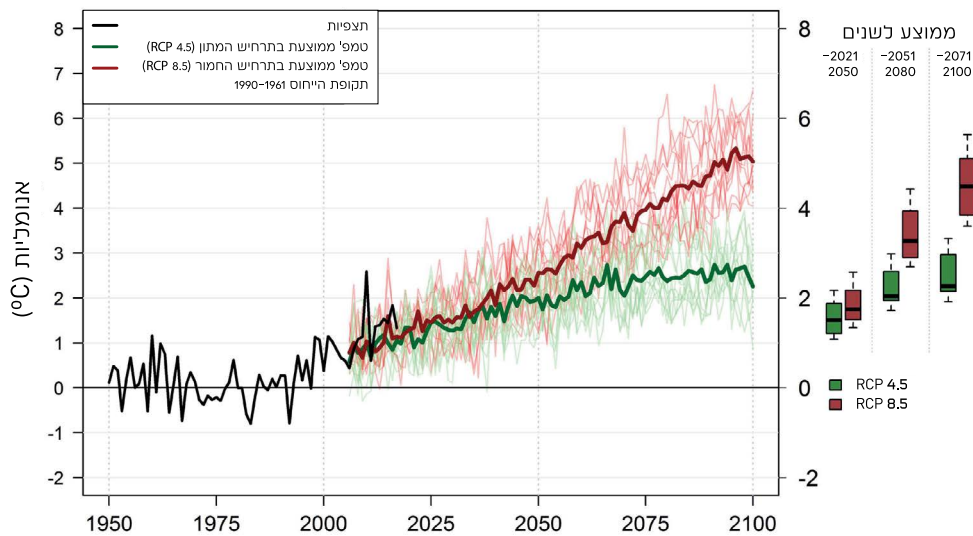
- הפחתה בכמות המשקעים - בממוצע הארצי ישנה הפחתה של כ-25 מ"מ לעשור בשלושת העשורים האחרונים⁹. בשל השונות הגבוהה בין שנים גשומות לשנים שחונות ובין אזורים שונים בארץ המגמה אינה מובהקת⁵ (נטייה להפחתה בכמות המשקעים ברמת הגולן, בגליל המזרחי, בגליל העליון ובחלקים מאזור החוף והשפלה במרכז הארץ, בעוד שבצפון הנגב ובמישור החוף הדרומי נצפית מגמת עלייה).

תחזיות

- כמות המשקעים הכללית צפויה לרדת לקראת סוף המאה ב-15% עד 25% (ביחס לתקופה 1961–1990; איור 4), בניגוד לתחזית לעלייה במשקעים ברוב העולם¹⁰.
- באגן ההיקוות של הכינרת צפויה הפחתה של 24 עד 80 מ"מ בכמות המשקעים השנתית עד שנת 2100, שהם 4% עד 14% (ביחס לתקופה 1988–2017; איור 5).

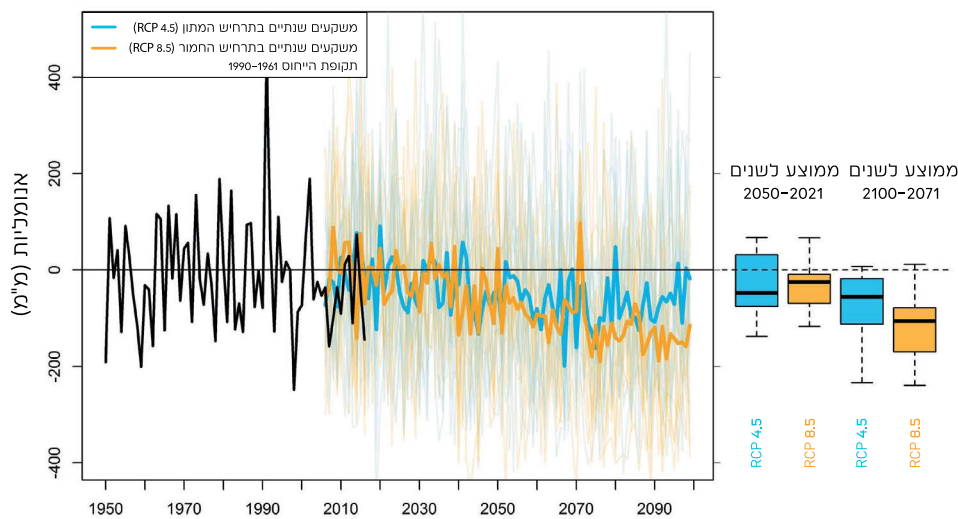
הגברת אידוי-דיות

כיום ממוצע האידוי-דיות בחבל הים תיכוני של ישראל עומד על כ-1,000–1,300 מ"מ לשנה, וממוצע המשקעים בו כ-520 מ"מ לשנה. מחקר שבחן את ההשפעה המשולבת של האידוי-דיות המוגבר והפחתת המשקעים על זמינות המים השפירים במדינות צפון אפריקה והמזרח התיכון, מצא כי בין השנים 2000–2050 האידוי-דיות צפוי להתגבר בכ-7% עד 9%, והמשקעים צפויים לפחות בכ-5% עד 10% בחבל הים תיכוני של ישראל¹¹. פירוש הדבר אידוי-דיות של כ-90 מ"מ נוספים, לצד הפחתה של כ-40 מ"מ בכמות המשקעים. כלומר, צפוי אובדן של כ-130 מ"מ בממוצע בשנה בחבל הים תיכוני של ישראל במים השפירים הזמינים עד אמצע המאה הנוכחית, ועיקר האובדן הוא בשל הגברת האידוי-דיות.



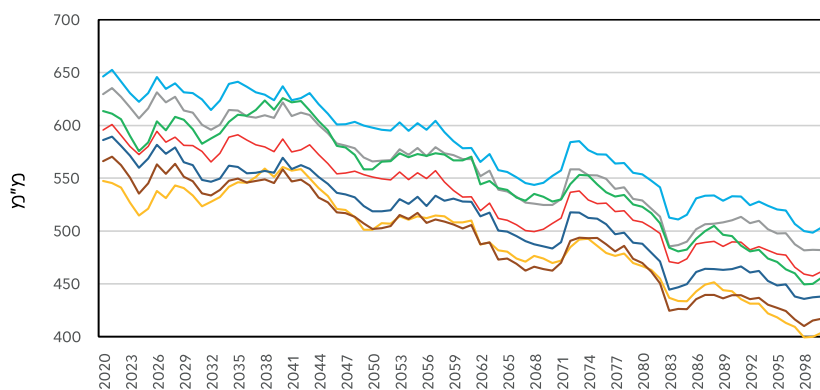
איור 3:

תחזיות התחממות ישראל עד שנת 2100, בהשוואה לשנים 1990-1961. הקווים המודגשים הם ממוצעי המודלים. הקו השחור הוא התצפיות בפועל. מקור: יוסף ואחרים.⁸



איור 4:

השינוי בכמות הגשם הכללית בישראל (מ"מ) ביחס לממוצע השנים 1990-1961. הקווים המודגשים הם ממוצעי המודלים, הקו השחור הוא התצפיות בפועל. מקור: יוסף ואחרים.⁹



איור 5:

השינוי הצפוי במשקעים באגני ההיקוות בחבל הים תיכוני של ישראל בתרחיש החמור, לפי שקלול של המודלים. ממוצע נע של 11 שנים. מקור: וגנר ואחרים.¹⁰

שקלול מודלים (ensemble) לאזורים שונים

— הכינרת
— אקוויפר הגליל המערבי
— אקוויפר ירקון-תנינים הצפוני
— אקוויפר ירושלים
— אקוויפר ירקון-תנינים המרכזי
— אקוויפר החוף המרכזי
— אקוויפר החוף הצפוני

השפעות שינוי האקלים על המגוון הביולוגי

ממחקרים בתחום הפליאואקולוגיה^[iv] עולה כי המגוון הביולוגי מגיב באופנים שונים ובעצמות גוברת ככל שתופעות שינוי האקלים מתגברות. שינויים בסביבה צפויים להשפיע ראשית על ההתנהגות של האוכלוסיות, לאחר מכן על השפע ובסוף על נוכחות או היעדרות של האוכלוסיות (טבלה 1)¹⁸. עם זאת, היות שקצב ההתחממות הנוכחי מהיר בהרבה מהעבר הפרהיסטורי שהמחקרים הפליאואקולוגיים מתמקדים בו, התובנות שניתן לגזור מיכולת ההתמודדות של עולם הטבע עם שינוי האקלים המודרני מוגבלות³.

לפי תאוריית הגומחה האקולוגית¹², כל מין מותאם להתקיים בטווח תנאי סביבה מסוימים כמו מזון, חמצן וטמפרטורות. כאשר מין מסוגל להתקיים במשרעת רחבה של תנאי סביבה – מתארים אותו כמין שמתאים ל"גומחה אקולוגית רחבה", ולהפך. כאשר בוחנים אילו מהגורמים המרכיבים את הגומחה האקולוגית הם החשובים ביותר עבור מרבית המינים, נמצא כי האקלים הוא אחד המשפיעים ביותר¹³. מכאן עולה ששינוי האקלים צפוי להשפיע על קיומם של מינים באזורי המחיה שלהם. המחקר על אודות השפעת שינוי האקלים על המגוון הביולוגי^[iv] דל באופן יחסי^{14,15}, בייחוד בשל מחסור בנתונים ביולוגיים שנאספו בשיטתיות לאורך זמן, ומורכבות המערכות האקולוגיות והגורמים המשפיעים על ההתנהגות, הפיזיולוגיה, השפע והנוכחות של המינים בבית גידולם^{16,17}.



שינוי האקלים צפוי לקצר את העונה שיש בה מים בנחלי אכזב ובבריכות חורף. שמורת ביצת ואדי מלחה. צילום: דורון ניסים

[iv] מגוון ביולוגי (biodiversity) - מגוון המינים, המגוון הגנטי ומגוון המערכות האקולוגיות.
[v] פליאואקולוגיה (paleoecology) - חקר המערכות האקולוגיות של העבר הרחוק, ובכלל זה תמורות אקולוגיות שנמשכו עידינים.

עוצמת שינוי האקלים	השפעות על המגוון הביולוגי
מתון	לא יחול שינוי גלוי ("סטאזיס")
מורגש	שינוי בהרכב הצומח המוביל לשינויים בתזונת בעלי חיים ושינויים בשעות הפעילות
ניכר	חלק מאוכלוסיות המינים יצטמצמו, וחלק מאוכלוסיות המינים יתרחבו
משמעותי	הכחדות מקומיות של מינים
קיצוני	שינויים דרמטיים בעולם החי והצומח

טבלה 1

הקשר בין עוצמת שינוי האקלים לבין עוצמת התגובה הצפויה של עולם החי והצומח¹⁸.

מין אקטותרמי בעל יכולת הפצה מוגבלת החי באתר אחד בחרמון (איור 6א)²¹, צפוי להיפגע מהתחממות או מיובש יותר מאשר הזאב האפור (*Canis lupus*), יונק אנדותרמי קל תנועה החי גם במדבריות ערב וגם באלסקה (איור 6ב)²².



איור 6א

סגורית החרמון בהר החרמון. צילום: עוז ריטנר, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב (ומינו).



רוב המחקרים המציגים תגובות לשינוי האקלים כיום מבוססים על מתאמים בין שינוי אקלים לשינויים בתפוצה, בנוכחות או בשפע של מיני צמחים ובעלי חיים, אולם ישנם פערי ידע משמעותיים בכל הנוגע למנגנונים שבאמצעותם שינוי האקלים משפיע על המגוון הביולוגי¹⁵. מאמר סקירה רחב מצביע על שישה תחומי ידע ביולוגי מרכזיים המאפשרים לחזות כיצד יגיבו צמחים ובעלי חיים לשינוי האקלים: פיזיולוגיה, מחזור החיים, כושר הסתגלות ואבולוציה, יחסי גומלין בין המינים, כושר הפצה ואכלוס ותגובות לשונות הסביבתית¹⁵.

מינים מסוימים רגישים יותר מאחרים לשינוי האקלים בשל תכונותיהם הפיזיולוגיות או מגבלות הפצה ותנועה. מינים שמתאימים לגומחה אקולוגית רחבה צפויים להיות סתגלנים יותר ממינים שמתאימים לגומחה אקולוגית מצומצמת¹⁶. טקסונים^(vi) מסוימים צפויים להיות רגישים יותר לשינוי האקלים מאחרים. לדוגמה, טורפי-על עשויים להגיב יותר לשינוי האקלים מבעלי חיים צמחוניים, משום שהם צורכים יותר אנרגיה, ואוכלוסיותיהם קטנות ועל כן רגישות לתנודות¹⁷. מינים אקטותרמיים^(viii) צפויים להיות רגישים יותר לשינוי אקלים מאשר מינים אנדותרמיים^(viii). מינים גדולי גוף צפויים להגיב יותר לשינוי האקלים בהשוואה למינים קטנים, משום שתחזוקת גוף גדול מצריכה יותר אנרגיה¹⁷. בניגוד לגישה הזו, מחקרים מתחום הפליאואקולוגיה מצאו שבעבר הרחוק דווקא מינים קטנים (מכרסמים וארנבאים) הושפעו משינויי אקלים יותר ממינים גדולים (פרסתנים)¹⁹. למינים בעלי יכולת הפצה למרחק קיים סיכוי גבוה יותר לאיתור בית גידול חלופי בהשוואה למינים עם יכולת הפצה מוגבלת²⁰. עם זאת, למינים המתקיימים רק בסביבות קרות בפסגות הרים או בקטבים, ישנה יכולת הפצה מוגבלת ביותר, והתחממות אזור המחיה שלהם עשויה להוביל להכחדתם.

לדוגמה, החילזון סגורית החרמון (*Cristataria hermonensis*),

(vi) טקסון (taxon) – יצורים חיים המסווגים באופן היררכי כקבוצה על פי הקרבה האבולוציונית (מין, סוג, משפחה וכדומה).
(vii) מינים אקטותרמיים (ectothermic species) – בעלי חיים שאינם מסוגלים לווסת את חום גופם ללא מקור חום חיצוני.
(viii) מינים אנדותרמיים (endothermic species) – בעלי חיים המווסתים את חום גופם באופן פעיל ואינם תלויים במקור חום חיצוני.

(קבוצה הכוללת זבובים ויתושים) לבין אלה המועברות על ידי קרציות (Ixodida): זבובאים משלימים את מחזור חייהם תוך שבועות ספורים, הם מעופפים ומתפשטים במהירות לאזורים חדשים, ומסוגלים לנצל היטב תנאי מזג אוויר ארעיים, כמו סערות וגלי חום, ומקווי מים זמניים. לכן, התפרצות המחלות המופצות באמצעות זבובאים, לעיתים קרובות מהירה ופתאומית, אך יכולה גם לדעוך במהירות. בניגוד לכך, מחזור החיים של הקרציות נמשך חודשים או שנים. הן אינן מעופפות, ותלויות בפונדקאי, ובהקשר של מחלות המועברות לאדם מדובר לרוב ביונק. על כן, התפשטות הקרציות והמחלות שהן נושאות, איטית יחסית.²⁵

שינויים בגודל גוף

לפי כלל ברגמן, יונקים ועופות באזורים קרים גדולים יותר בהשוואה לבני אותו מין שחי באזורים חמים. התופעה מוסברת בכך שבאזורים קרים לגוף גדול יש יתרון בשמירה על חום, וגוף קטן מתקרר ביעילות רבה יותר בסביבה חמה.²⁶ כפועל יוצא מכלל זה הועלתה ההשערה שיונקים ועופות צפויים לקטון עם התחממות כדור הארץ, כדי להסתגל לעומס החום הגובר.²⁷ ואומנם, נמצא שבעלי חיים רבים, אנדותרמיים ואקטותרמיים, קטנו בעשרות השנים האחרונות, אך לא ברור אם הסיבה המרכזית לכך היא התחממות כדור הארץ.²⁸

מחקר שבחן את המסה ואת צורת הגוף של עופות בישראל בין השנים 1950-2020 מצא כי המסה של מינים רבים קטנה בקצב של כ-2.1% עד 3.3% לעשור, ויחס שטח הפנים לנפח גדל בקצב של כ-2.9% עד 4.6% לעשור, אם כי רק לעתים נדירות נצפו שתי המגמות גם יחד באותו המין.²⁹ הממצאים תואמים לכלל ברגמן שהוזכר לעיל, ולכלל אכן, שקובע כי במקומות חמים יותר חיים פרטים בעלי יחס שטח פנים לנפח גבוה יותר בהשוואה לבני מינים החיים במקומות קרים יותר. משום כך, מחברי המחקר מציעים שההתחממות העולמית היא הגורם למגמות האלה.

צמחים

צמחים מטמיעים פחמן, בייחוד בעונת הצמיחה, וכך מפחיתים את ריכוז הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה. התוצאה היא שעליית ריכוזי הפחמן הדו-חמצני אינה אחידה בזמן, אלא בעלת דגם עונתי מובהק. בשל שינוי האקלים צמחים בצפון כדור הארץ מאריכים את עונת צמיחתם (עונת הצמיחה מצפון לאזורים הטרופיים התארכה בקצב של עד יומיים מדי עשור מאז שנות ה-50 של המאה ה-20), בעיקר בגלל הקדמת הבלבוב, אך גם עקב דחיית השלכת וקמילת הסתיו^[xi] של צמחים חד-שנתיים^[xi],³⁰ מסיבה זו, ריכוזי הפחמן הדו-חמצני באטמוספירה מתגדדים במשרעת עונתית הנמצאת במגמת התרחבות מאז שנות ה-60.³¹

שיבוש בסנכרון ההדדי בין מינים בשל שינוי אקלים

עונות השנה משפיעות על ההתפתחות וההתנהגות של צמחים ובעלי חיים. למשל: צמחים מלבלבים כתלות בלחות הקרקע ומבצעים פוטוסינתזה כתלות בעוצמת קרינת השמש; חרקים מאביקים מגיחים מהגלמים בסנכרון עם פריחה; עטלפים נכנסים



איור 6

זאב אפור בכרמל. צילום: המארג, ממצלמות תוכנית הניטור הלאומית.

השפעות אקולוגיות של שינוי האקלים

שינויים באזורי תפוצה

מינים ימיים משנים את אזורי התפוצה שלהם עם עליית הטמפרטורה מהר יותר ממינים יבשתיים, ככל הנראה בשל רגישותם הגבוהה לתנאי חום, ובשל היעדר מכשולים להגירה בתווך הימי (שטחי יבשה העשירים במכשולים, כמו רכסי הרים, נחלים, כבישים, יישובים ושטחי חקלאות אינטנסיבית)²³. בעשרות השנים האחרונות ישנן עדויות שמנים יבשתיים הרגשים לשינוי האקלים נעים בעיקר לעבר אזורים גבוהים יותר, בעוד שמרכז התפוצה של מינים ימיים מוסט לעבר הקטבים.²³

שינוי האקלים גורם גם להרחבת תפוצה של מינים, לרוב חובבי חום. פוטנציאל ההתבססות של מינים פולשים, רבים מהם ממקורות טרופיים חמים, גדל עם עליית הטמפרטורות באזורים רבים בכדור הארץ.²⁴ רוב העדויות לכך עולות מפרוקי רגליים מעבירי מחלות (בשל חשיבות הנושא לאדם). לדוגמה, יתוש-יום מצרי (*Aedes aegypti*), וקטור (מעביר) של מחלות נגיפיות כגון קדחת דנגי וזיקה, הגדיל את תחום תפוצתו מאות קילומטרים צפונה. ככלל, נמצאו הבדלים במאפייני זמן ומרחב של התפשטות והתפרצות של מחלות המועברות על ידי זבובאים (Diptera)

[xi] וקטור (מעביר), [vector] - של מחלה הוא יצור חי המשמש פונדקאי או נשא של מחוללי מחלות כגון נגיפים וחיידקים.

מעוצים הולכים ומתפשטים³⁹. הסיבה לכך קשורה, ככל הנראה, להפחתה משמעותית ברעייה ובכריתה, המאפשרת שיקום של הצמחייה הטבעית אחרי שנים רבות של דיכוי.

אזורי מחיה ותפוצה

ישנה הערכה המבוססת על מודלים אקולוגיים, ולפיה המינים הרגישים לשינוי האקלים ינועו צפונה ומערבה, לעבר אזורי קרירים וגשומים יותר, כדי להישאר באקלים דומה לזה שהם חיים בו כיום. להערכת המומחים, האזור הרגיש ביותר לשינוי אקלים בישראל הוא אזור הגבול בין החבל המדברי לחבל הים תיכוני⁴⁰. עם זאת, בניסוי שבחן את השפעת המשקעים על הצומח לאורך מפל המשקעים בין הגליל העליון לצפון הנגב, לא נמצאו הבדלים בביומסה ובעושר המינים. גם בחלקות שהמשקעים בהן צומצמו ב-30% וגם בחלקות שקיבלו תוספת של 30% משקעים, לא נמצא הבדל אף לאחר תשע שנות ניסוי⁴¹. מכך הסיקו החוקרים שחברות הצומח החד-שנתי בארץ עמידות להפחתת משקעים בקנה המידה הצפוי, לפחות בטווח של מספר שנים, אם כי טרם ברור כיצד הצמחים מצליחים לעמוד בפני בצורות ממושכות כאלה. במחקר המשך, שבחן אם הסיבה לכך היא בנק זר [xi] גדול, נמצא כי רק שלושה מתוך 18 מיני צמחים חד-שנתיים הנפוצים באזור המחקר נוטים לפתח בנק זרעים גדול יותר בסביבות צחיחות⁴². לעומת זאת, בניסוי המשך נוסף, שדימה בצורת חריפה (הפחתה של כשני שלישים מכמות המשקעים) נמצאה הפחתה מובהקת בביומסה ובעושר המינים של צמחים חד-שנתיים תוך שנה אחת⁴³.

מחקר נוסף של השפעות שינוי האקלים על הצומח בספר המדבר נערך בתחנה למחקר אקולוגי ארוך-טווח בפארק סיירת שקד הסמוך לאופקים (155 מ"מ גשם בשנה בממוצע)⁴⁴. החוקרים מדדו בין השנים 1994-2013 את המשקעים, הטמפרטורה, מהירות הרוח והלחות היחסית, וכן את השפעה של הצמחייה. החוקרים מצאו כי תוך 20 שנה התחממו הלילות בכארבע מעלות (מ-12 ל-16 מעלות), הלחות היחסית פחתה (מ-80% ל-63%), הרוח נחלשה (מ-2.6 מטר לשנייה ל-2.1 מטר לשנייה בממוצע), והאידוי-דיות עלה בכ-9%. מחקר נוסף בפארק סיירת שקד מצא כי לאחר תקופת בצורת ממושכת בשנים 2006-2008 שיחים התייבשו ומתו בהמוניהם (אומדן של 90% תמותה בקיץ 2008) במדרונות חסרי אבנים⁴⁵, אך הצליחו לשרוד במדרונות שהיו בהם אבנים⁴⁶.

רק ל מיקומה הגיאוגרפי, ישראל היא גבול תפוצה עולמי למינים רבים^{47,48,49}. רוב אוכלוסיות קצה גבול תפוצה נוטות להיות רגשיות לשינויים בתנאי הסביבה, בהם שינוי האקלים⁵⁰. לדוגמה, החרמון הוא גבול תפוצה דרומי של מספר מיני צמחים ובעלי חיים, ושינוי האקלים עשוי להוביל להכחדת מינים המוגבלים לאזורים הגבוהים בו.

לתרדמת חורף עם התקררות מזג האוויר. מינים שונים מושפעים באופנים שונים, והדבר תלוי בסמן העונתי שלהם ובגורם הסביבתי המגביל את פעילותם בחלק מהשנה³². למשל, עופות המתחילים לנדוד דרומה עם התקצרות שעות האור צפויים להמשיך לנדוד במועדים קבועים, אולם צמחים חד-שנתיים הקמלים מדי קיץ צפויים להקדים לנבול עם ההתחממות העולמית. מינים התלויים זה בזה אך נסמכים על סמנים עונתיים שונים (או בעלי רגישות שונה לאותם הסמנים) עלולים לצאת מהסנכרון ההדדי הקיים ביניהם. לדוגמה, חרקים מאביקים עלולים להגיח מהגלמים לפני תחילת הפריחה, וציפורים טורפות חרקים עלולות לקנן לאחר שיא פעילות החרקים.

עופות נודדים מתזמנים את מועד הגעתם לאתרי הרבייה, כך שתקופת האכלת הגוזלים תחפוף לתקופת שיא המזון - חרקים, זרעים ועוד. מטא-אנליזה שניתחה מחקרים מרחבי העולם מצאה כי שינוי האקלים גורם למיני עופות נודדים להקדים בערך ביומיים את הגעתם לאתרי הרבייה מדי עשור³³. ההסבר לתופעה טמון בכך שכחלק מהנדידה בת אלפי הקילומטרים בין אתרי החריפה באפריקה לאתרי הרבייה באירופה ובאסיה, רבים מהעופות הנודדים עוצרים למנוחה ולאכילה במספר אתרים בדרך. ככל שהעופות יעצרו לזמן קצר יותר, כך יגיעו מהר יותר לאתרי הרבייה. אולם אין הם יכולים לקצר את משך העצירה ללא הגבלה, כיוון שעליהם להגיע בזמן שזמינות המזון באתרי הקינון נמצאת בשיאה³⁴. שינוי האקלים מרחיק את האתרים המתאימים לרבייה באירופה ובאסיה מאתרי החריפה באפריקה (אזורי אקלים נעו לכיוון הקטבים - הצפוני והדרומי), ומשום כך העופות יזדקקו לעצירות רבות יותר³⁵. לכן, הדרך היחידה שיש לעופות נודדים להקדים את הגעתם לאתרי הרבייה באופן שהולם את קצב שינוי האקלים היא לצאת לדרך מאתרי החריפה מוקדם יותר. עופות שלא היטיבו לתזמן את הגעתם לאתרי הרבייה באביב, אוכלוסייתם הצטמצמה³⁶.

השפעות שינוי האקלים על המגוון הביולוגי בישראל

מערכות אקולוגיות יבשתיות

מומחים למערכות אקולוגיות יבשתיות בישראל העריכו כי עכירת הטמפרטורות והפחתת כמויות המשקעים הם המדדים האקלימיים המשפיעים ביותר על הטבע^{37,38}.

צומח

החורש הים תיכוני צפוי להיפגע מבצורות חוזרות ונשנות ומשרפות תכופות - שני גורמים שצפויים לשנות מהותית את המגוון הביולוגי בחורש תוך עשורים ספורים³⁸. כשבוחנים את השינוי לאורך הזמן בכיסוי הצומח בחבל הים תיכוני בישראל, נראית כביכול תמונה הפוכה, המצביעה על כך שצמחים

דוגמאות למינים יבשתיים בישראל הרגישים לשינוי האקלים

תפוצתם של חלזונות יבשה (*Stylommatophora*), החיים באזורים יבשניים, מושפעת מאוד משינויים בכמות המשקעים, ורגישותם להתייבשות נחקרה בהרחבה^{51,52}. 39 מתוך 103 מיני חלזונות היבשה בישראל מאוימים מההתחממות ומהתייבשות אזורי המחיה שלהם⁵³.

רוב פרפרי היום בישראל חיים באזורים הקרירים והגשומים יחסית בין חבלי הארץ⁴⁸. נוסף על כך, עבור 36 מינים ישראל היא גבול תפוצתם הדרומי בעולם. לנוכח השפעת האקלים על תפוצת הפרפרים בארץ מסתמן כי המשך מגמת ההתחממות וההתייבשות בישראל צפוי לדחוק חלק מהמינים מחוץ לגבולות הארץ. 42 מתוך 140 מיני פרפרים המקומיים בישראל מאוימים מההתחממות ומהתייבשות אזורי המחיה שלהם⁵³.

מחקר שבחן את תמותת העצים בישראל בין השנים 1948-2017 מצא עלייה בתמותת העצים, בעיקר בשל בצורות ושרפות. עורכי המחקר מצאו כי השרפה בכרמל בשנת 2010 אחראית לבדה על למעלה מ-15% מכלל תמותת העצים בישראל בתקופה זו. עוד נמצא כי אורנים הסובלים מייבוש, פגיעים יותר למזיקים, לרוחות עזות ולשרפות⁵⁴.

מערכות אקולוגיות של מים מתוקים (אקווסיות)

שינוי האקלים צפוי לקצר את העונה שיש בה מים בנחלי אכזב ובבריכות חורף. כפועל יוצא מכך, הזמן שבעלי חיים יוכלו להשלים בו את מחזור חייהם יתקצר, והם עשויים שלא לסיים את מחזור החיים, או לסיים מחזור קצר (למשל, התפתחות מזחל לבוגר) כאשר גודל גופם קטן מהרגיל. גם נחלי איתן עלולים להשתנות: המים צפויים לחדול לזרום ברציפות ולהיקוות לבריכות קטנות ומקוטעות לאורך הערוץ. מנגד, התגברות גשמי הזעף והשיטפונות צפויה לשנות את משטרי הזרימה ואף את מבנה הקרקעית וגדות הנחל^{37,38}.

הים התיכון

מקורם של הדגים בים התיכון ושל שאר המגוון הביולוגי בו באוקיינוס האטלנטי, הקר בהרבה מהים התיכון. ישראל שוכנת בצידו המזרחי של האגן, ובאזור זה טמפרטורת המים היא הגבוהה ביותר בים התיכון. המינים החיים כאן נחשבים רגישים במיוחד להתחממות, כיוון שהם נמצאים בגבול הסיבולת האקלימית שלהם: מחקר שבחן 75 מתוך 79 מיני הדגים האנדמיים^(xiii) לים התיכון כולו ולסביבתו הקרובה מצא כי 14 מתוכם (19%) צפויים להיכחד ממנו בשל שינוי האקלים עד סוף המאה ה-21, ו-31 מינים נוספים (41%) יהיו בסכנת הכחדה (ללא שקלול עקות נוספות, כגון דיג, או לחלופין מאמצי שמירת טבע)⁵⁵. מחקר נוסף מצא

כי לכל הפחות 88% ממיני הרכיכות החיות באזור תת-הכרית^(xiv) נעלמו מחופי הים התיכון הישראלי בעשורים האחרונים, ככל הנראה בשל שינוי האקלים⁵⁶. בעלי חיים שוכני מים קרים בים התיכון מעמיקים לאזורים קרים יותר עקב התחממות הים⁵⁷. מחקר שהתבסס על מודל פיזיולוגי של גדילת דגי ים, צופה שגודלם של מרבית המינים שנחקרו יקטן בכ-10% בין השנים 1991-2060 בשל התחממות מי הים, שבתורה תגביר את צריכת החמצן של הדגים, ובה בעת תפחית את כמות החמצן המומס במי הים⁵⁸. אותו מחקר צופה גם כי הירידה הכוללת בגודל הגוף של כלל הדגה (כולל השפעות של שינוי תפוצה) תהיה חמורה יותר בים התיכון בהשוואה לממוצע העולמי, ובאגן המזרחי של הים התיכון היא עשויה להגיע לכדי עשרות אחוזים.

השפעת עליית פני הים צפויה לפגוע באזור הכרית^(xv), בייחוד לנוכח גורמים נוספים המשנים את סביבת הכרית: החמצת פני הים, הנובעת מהתמוססות פחמן דו-חמצני במי הים, והחמרת העוצמה והתדירות של הסופות. כבר כעת מתרחשת התמעטות דרמטית של חלזונות בוני שוניות בחופי הצפון בישראל⁵⁹.

ייתכן שהתחממות הים בישראל מאיצה את קצב ההדירה ומשפרת את סיכויי ההתבססות של מינים פולשים מים סוף



צדפות מתות בחוף הים התיכון בישראל. מחקר שנערך בארץ מצא כי לכל הפחות 88% ממיני הרכיכות החיות באזור תת-הכרית (עד 5 מטר מפני הים) נעלמו מחופי הים התיכון הישראלי בעשורים האחרונים, ככל הנראה בשל שינוי אקלים. צילום: Paolo Albano

(xii) בנק זרעים (seed bank) – מאגר הזרעים המוכנים לנביטה על הצמח, או לרוב, על פני הקרקע או בתוכה.

הזרעים עשויים לנבט בעונה הקרובה או בשנים הבאות.

(xiii) מין אנדמי (endemic species) – יצור חי בעל תפוצה ייחודית לאזור גיאוגרפי אחד מוגדר.

(xiv) אזור תת-הכרית (subtidal zone) – האזור הימי הסמוך לקו החוף. במאמר המצוטט לעיל תת-הכרית הוגדר כטווח העומקים 10 עד 40 מטר מתחת לפני הים.

(xv) אזור הכרית (intertidal zone) – אזור החוף המושפע מתהליכי גאות ושפל.

סיכום

שינוי האקלים פוגע במגוון הביולוגי, והשפעתו צפויה להמשיך ולהחריף: שינויים בזמני הפעילות היומיים והעונתיים, הסטה ושינוי של דגמי התנהגות בזמן ובמרחב, שינויים באזורי התפוצה, שיבוש בסנכרון בין מינים שונים ואירועי קיצון אקלימיים או כאלה הנובעים משינוי האקלים, גורמים כולם לתמותה רחבה של אוכלוסיות.

תחום המחקר העוסק בהשפעות שינוי האקלים על המגוון הביולוגי בעולם בכלל ובישראל בפרט עדיין מצומצם, ופערי הידע בנושא רחבים. עם זאת, סיכום המידע המצוי מציג את שינוי האקלים כגורם מרכזי המאיים על המגוון הביולוגי. תחזיות שינוי האקלים צופות התרחבות משמעותית של הפגיעה במגוון הביולוגי בעקבות שינוי האקלים כבר בעתיד הקרוב. בישראל המגוון הביולוגי נתון לאיום גובר בשל עלייה חדה בגודל אוכלוסיית האדם ופיתוח נרחב ומואץ. אובדן בתי גידול, קיטוע, זיהום האוויר, המים והאור והתפשטות מינים פולשים ומינים מתפרצים מובילים לפגיעה ישירה ועקיפה במגוון הביולוגי ולשיבוש המערכות האקולוגיות. שינוי האקלים המתעצם מחליש עוד את המערכת האקולוגית ואת המגוון הביולוגי בישראל.



זהרון הדור (*Pterois miles*) גוסס באירוע תמותה המוני של דגים שהתרחש במפרץ אילת בקיץ 2017 בעקבות התחממות חריגה של יותר מ-4 מעלות ביומיים וחצי. חוקרים מעריכים שתופעות כאלה עלולות להתרחש בתכיפות גדולה יותר ככל שמשבר האקלים יחמיר. צילום: אריק דיאמנט

החם יותר, שמגיעים דרך תעלת סואץ (הגירה לספסית)⁵⁷. סקירה מקיפה על פלישות ביולוגיות בים התיכון מצאה כי הקצב שלהן התגבר בעשורים האחרונים בשל הרחבת תעלת סואץ והגידול בפעילותה, דלדול הפאונה המקומית באגן הלבנט ותנאי האקלים המתחממים, המקילים על התבססותם של מינים טרופיים⁶⁰.

ים סוף

השונית במפרץ אילת היא בין שוניות האלמוגים הצפוניות בעולם, והיא מתקיימת בטמפרטורת מים נמוכה יחסית לשוניות באזורים אחרים בעולם. בקיץ 2017 התרחשה תמותה יוצאת דופן בדגי מפרץ אילת, בעיקר טורפים ואוכלי פגרים. נמצא כי גורם התמותה הוא התפרצות החיידק *Streptococcus iniae* שנבעה מהתחממות חריגה של כ-4.2 מעלות בתוך יומיים וחצי בלבד. הגם שהטמפרטורה של מי הים (28.6 מעלות) לא הייתה חריגה בקיץ⁶¹, התחממות מהירה של המים היא גורם עקה (stress) אצל דגים, והיא מחלישה את מערכת החיסון שלהם ומגבירה את פגיעותם לחיידקים. אירועי קיצון מסוג זה צפויים להתרחש בתדירות גדלה עם שינוי האקלים. אירוע קיצון נוסף התרחש במרץ 2020: סערה ימית חזקה פגעה במפרץ אילת, וגרמה לפגיעה בשונית הרדודה שבשמורת חוף האלמוגים ולירידה של כ-10% בכיסוי האלמוגים החיים בה⁶². אירועים אלה מדגימים כיצד העלייה הצפויה בתדירות אירועי הקיצון עלולה לפגוע בשונית האלמוגים.

במחקר שנערך על עמידות האלמוגים באילת לעומת שוניות אלמוגים שונות, נמצא כי אלמוגי צפון ים סוף עמידים לגלי חום יותר מרוב השוניות בעולם, ואף יותר משוניות במרכז ים סוף⁶³. כיום ישנו פער של כחמש מעלות בין טמפרטורת המים היממתית המרבית הממוצעת באוגוסט (27.2 מעלות) לבין הטמפרטורה שאלמוגי צפון ים סוף עוברים בה הלבנה (32 מעלות)⁶⁴. בשל כך, הציעו חוקרים כי שונית מפרץ אילת היא אתר מקלט פוטנציאלי למיני אלמוגים מפני התחממות ימים ואוקיינוסים הגורמים להלבנה (bleaching) ברוב שוניות העולם⁶⁵.

לציטוט הפרק:

קומאי א, בן-משה נ, רנן א. 2022. שינוי האקלים והשפעתו על המגוון הביולוגי. בתוך: בן-משה נ, רנן א (עורכים). דו"ח מצב הטבע 2022 – כרך מגמות ואיומים. המארג – התכנית הלאומית להערכת מצב הטבע. מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.

מקורות

14. Williams JW, Huntley B, Seddon AWR (2022). Climate sensitivity and ecoclimate sensitivity: Theory, usage, and past implications for future biospheric responses. *Current Climate Change Reports* 8: 1-16.
15. Urban MC, Bokedi G, Hendry AP, Mihoub J-B, Perer G, Singer A, Bridle JR, Crozier LG, De Meester L, Godsoe W, Gonzalez A, Hellmann JJ, Holt RD, Huth A, Johst K, Krug CB, Leadley PW, Palmer SCF, Pantel JH, Schmitz A, Zollner PA, Travis JMJ (2016). Improving the forecast for biodiversity under climate change. *Science* 353: aad8466.
16. Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB (2005). Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change: Predicting species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography* 14: 347-357.
17. Urban MC, Zarnetske PL, Skelly DK (2017). Searching for biotic multipliers of climate change. *Integrative and Comparative Biology* 57: 134-147.
18. Belmaker M (2017). The southern Levant during the last glacial and zooarchaeological evidence for the effects of climate-forcing on hominin population dynamics. In: Climate Change and Human Responses. Monks G (Ed). Netherlands, Dordrecht: Springer. pp 7-25.
19. Samuels JX, Hopkins SSB (2017). The impacts of Cenozoic climate and habitat changes on small mammal diversity of North America. *Global and Planetary Change* 149: 36-52.
20. Angert AL, Bontrager MG, Ågren J (2020). What do we really know about adaptation at range edges? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 51: 341-361.
21. Heller J, Arad Z (2009). Land snails of the land of Israel: Natural history and a field guide. Sofia: Pensoft.
22. Boitani L, Phillips M, Jhala Y (2018). *Canis lupus*. In: The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T3746A163508960. 23.
23. Lenoir J, Bertrand R, Comte L, Bourgeaud L, Hattab T, Muriene J, Grenouillet G (2020). Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nature Ecology & Evolution* 4: 1044-1059.
24. Bellard C, Thuiller W, Leroy B, Genovesi P, Bakkenes M, Courchamp F (2013). Will climate change promote future invasions? *Global Change Biology* 19: 3740-3748.
25. Ogden NH, Lindsay LR (2016). Effects of climate and climate change on vectors and vector-borne diseases: Ticks are different. *Trends in Parasitology* 32: 646-656.
26. Meiri S (2011). Bergmann's Rule - what's in a name? *Global Ecology and Biogeography* 20: 203-207.
27. Ohlberger J (2013). Climate warming and ectotherm body size - from individual physiology to community ecology. *Functional Ecology* 27: 991-1001.
28. Gardner JL, Peters A, Kearney MR, Joseph L, Heinsohn R (2011). Declining body size: A third universal response to warming? *Trends in Ecology & Evolution* 26: 285-291.
1. Myers KF, Doran PT, Cook J, Kotcher JE, Myers TA (2021). Consensus revisited: quantifying scientific agreement on climate change and climate expertise among Earth scientists 10 years later. *Environmental Research Letters* 16: 104030.
2.  אנגלמן מ (2021). פעולות ממשלת ישראל והיערכותה למשבר האקלים. ירושלים: משרד מבקר המדינה ונציב תלונות הציבור.
3. Masson-Delmotte V, Zhai A, Pirani SL, Connors C, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (Eds). (In press). IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
4. IPCC, 2021. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (Eds). (In press). Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
5. Yosef Y, Aguilar E, Alpert P (2019). Changes in extreme temperature and precipitation indices: Using an innovative daily homogenized database in Israel. *International Journal of Climatology* 39: 5022-5045.
6. Pastor F, Valiente JA, Khodayar S (2020). A warming Mediterranean: 38 years of increasing sea surface temperature. *Remote Sensing* 12: 2687.
7. Shaltout M (2019). Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Red Sea. *Oceanologia* 61: 484-504.
8. יוסף י, בהר"ד ע, אוזן ל, פורשפן א, לוי י (2020). מגמות השינוי בטמפרטורה בישראל - תחזיות עד 2100. השירות המטאורולוגי.
9. יוסף י, בהר"ד ע, אוזן ל, אוסטינסקי-צדקי א, כרמונה י, חלפון נ, פורשפן א, לוי י, סתיו נ (2019). שינוי האקלים בישראל - מגמות עבר ומגמות חזויות במשטר הטמפרטורה והמשקעים. השירות המטאורולוגי.
10. ונגר ד, חלפון נ, יוסף י (2021). מגמות היסטוריות ומגמות חזויות בדפוסי המשקעים בישראל עד סוף המאה הנוכחית. דו"ח מסכם - רשות המים. השירות המטאורולוגי.
11. Terink W, Immerzeel WW, Droogers P (2013). Climate change projections of precipitation and reference evapotranspiration for the Middle East and northern Africa until 2050: Climate change projections for the Middle East and northern Africa. *International Journal of Climatology* 33: 3055-3072.
12. Sales LP, Hayward MW, Loyola R (2021). What do you mean by "niche"? Modern ecological theories are not coherent on rhetoric about the niche concept. *Acta Oecologica* 110: 103701.
13. Hawkins BA, Field R, Cornell HV, Currie DJ, Guégan J-F, Kaufman DM, Kerr JT, Mittelbach GG, Oberdorff T, O'Brien EM, Porter EE, Turner JRG (2003). Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness. *Ecology* 84: 3105-3117.

41. Tielbörger K, Bilton MC, Metz J, Kigel J, Holzapfel C, Lebrejia-Trejos E, Konsens I, Parag HA, Sternberg M (2014). Middle-Eastern plant communities tolerate 9 years of drought in a multi-site climate manipulation experiment. *Nature Communications* 5: 5102.
42. Zogas A, Kosman E, Sternberg M (2020). Germination strategies under climate change scenarios along an aridity gradient. *Journal of Plant Ecology* 13: 470–477.
43. Alon M, Sternberg M (2019). Effects of extreme drought on primary production, species composition and species diversity of a Mediterranean annual plant community. *Journal of Vegetation Science* 30: 1045–1061.
44. Argaman E, Barth R, Moshe Y, Ben-Hur M (2020). Long-term effects of climatic and hydrological variation on natural vegetation production and characteristics in a semiarid watershed: The northern Negev, Israel. *Science of the Total Environment* 747: 141146.
45. Sher Y, Zaady E, Ronen Z, Nejdat A (2012). Nitrification activity and levels of inorganic nitrogen in soils of a semi-arid ecosystem following a drought-induced shrub death. *European Journal of Soil Biology* 53: 86–93.
46. Stavi I, Rachmilevitch S, Hjazin A, Yizhaq H (2018). Geodiversity decreases shrub mortality and increases ecosystem tolerance to droughts and climate change. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 2808–2817.
47. Yom-Tov Y (1988). The zoogeography of the birds and mammals of Israel. In: Yom-Tov Y, Tchernov E (Eds). *The Zoogeography of Israel: The Distribution and Abundance at a Zoogeographical Crossroad*. Dordrecht / Boston / Lancaster: Dr W. Junk Publishers. Kluwer Academic Publishers Group. pp. 389–410.
48. Comay O, Ben Yehuda O, Schwartz-Tzachor R, Benyamini D, Pe'er I, Ktalav I, Pe'er G (2021). Environmental controls on butterfly occurrence and species richness in Israel: The importance of temperature over rainfall. *Ecology and Evolution* 11: 12035–12050.
49. Matalin AV, Chikatunov VI (2016). The tiger beetles (Coleoptera, Carabidae, Cicindelinae) of Israel and adjacent lands. *ZooKeys* 578: 115–160.
50. Vilà-Cabrera A, Premoli AC, Jump AS (2019). Refining predictions of population decline at species' rear edges. *Global Change Biology* 25: 1549–1560.
51. Arad Z (2009). Resistance to dessication and heat. In: Heller J. (ed.). *Land snails of the land of Israel: Natural history and a field guide*. Sofia: Pensoft. pp. 74–93.
52. Kadmon R, Heller J (1998). Modelling faunal responses to climatic gradients with GIS: Land snails as a case study. *Journal of Biogeography* 25: 527–539.
53. תומר א, פאר י, פאר ג, בן-יהודה ע, בנימיני ד, בירד ט, קומאי א (בהכנה). הספר האדום של פרפדי היום בישראל. בתוך: דנן א (עורך). הספר האדום של חסרי החוליות בישראל. רשות הטבע והגנים, קרן קימת לישראל, מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
54. Klein T, Cahanovitch R, Sprintsin M, Herr N, Schiller G (2019). A nation-wide analysis of tree mortality under climate change: Forest loss and its causes in Israel 1948–2017. *Forest Ecology and Management* 432: 840–849.
29. Dubiner S, Meiri S (2022). Widespread recent changes in morphology of Old World birds, global warming the immediate suspect. *Global Ecology and Biogeography* 31: 791–801.
30. Piao S, Liu Q, Chen A, Janssens IA, Fu Y, Dai J, Liu L, Lian X, Shen M, Zhu X (2019). Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. *Global Change Biology* 25: 1922–1940.
31. Gulev SK, Thorne PW, Ahn J, Dentener FJ, Domingues CM, Gerland S, Gong D, Kaufman DS, Nnamchi HC, Quaas J, Rivera JA, Sathyendranath S, Smith SL, Trewin B, von Shuckmann K, Vose RS (2021). Changing state of the climate system. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B (Eds). (In press). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press. pp. 287–422, Section 2.3.4.1.
32. Root TL, Hughes L (2005). Present and future phenological changes in wild plants and animals. In: Lovejoy TE, Hannah L (Eds). *Climate Change and Biodiversity*. Yale University Press, New Haven and London.
33. Usui T, Butchart SHM, Phillimore AB (2017). Temporal shifts and temperature sensitivity of avian spring migratory phenology: A phylogenetic meta-analysis. *Journal of Animal Ecology* 86: 250–261.
34. Schmaljohann H, Both C (2017). The limits of modifying migration speed to adjust to climate change. *Nature Climate Change* 7: 573–576.
35. Howard C, Stephens PA, Tobias JA, Sheard C, Butchart SHM, Willis SG (2018). Flight range, fuel load and the impact of climate change on the journeys of migrant birds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285: 20172329.
36. Knudsen E, Lindén A, Both C, Jonzén N, Pulido F, Saino N, Sutherland WJ, Bach LA, Coppack T, Ergon T, Gienapp P, Gill JA, Gordo O, Hedenström A, Lehikoinen E, Marra PP, Møller AP, Nilsson ALK, Péron G, Ranta E, Rubolini D, Sparks TH, Spina F, Studds CE, Saether SA, Tryjanowski P, Stenseth NC (2011). Challenging claims in the study of migratory birds and climate change. *Biological Reviews* 86: 928–946.
37. גבאי ע, שטרנברג מ, אנגיל ד, ברנע א, גורן מ, גזית א, גפני ש, גרינצוויג ז, הרשקוביץ י, זהרי ת, יום טוב י, ישראל א, מילשטיין ד, רילוב ג, שטיינהרדט י (2014). האיומים על המגוון הביולוגי בישראל בעידן של שינוי אקלים – קריאה להקמת מרכז לאומי לחקר שינוי האקלים בישראל. *אקולוגיה וסביבה* 5(2): 161–171.
38. Sternberg M, Gabay O, Angel D, Barneah O, Gafny S, Gasith A, Grünzweig JM, Hershkowitz Y, Israel A, Milstein D, Rilov G, Steinberger Y, Zohary T (2015). Impacts of climate change on biodiversity in Israel: an expert assessment approach. *Regional Environmental Change* 15: 895–906.
39. בן-משה נ, פרלברג א, ליבנה ע, קומאי א, סלינגרד ש, דנן א. 2022. כיסוי הצומח ותצורות הצומח בישראל. בתוך: בן-משה נ, דנן א (עורכים). דו"ח מצב הטבע 2022. כרך מגמות ואיומים. המארג התכנית הלאומית להערכת מצב הטבע. מוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט, אוניברסיטת תל אביב.
40. Steinitz H (2010). The effects of global climate change on the distribution of terrestrial mammals in Israel (PhD dissertation). Tel Aviv: Tel Aviv University.

- .55
Ben Rais Lasram F, Guilhaumon F, Albouy C, Somot S, Thuiller W, Mouillot D (2010). The Mediterranean Sea as a 'cul-de-sac' for endemic fishes facing climate change: A marine endemic hotspot under threat. *Global Change Biology* 16: 3233–3245.
- .56
Albano PG, Steger J, Bošnjak M, Dunne B, Guifarro Z, Turapova E, Hua Q, Kaufman DS, Rilov G, Zuschin M (2021). Native biodiversity collapse in the eastern Mediterranean. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 288: 20202469.
- .57
Chaikin S, Dubiner S, Belmaker J, MacNeil A (2022). Cold-water species deepen to escape warm water temperatures. *Global Ecology and Biogeography* 31: 75–88.
- .58
Cheung WWL, Sarmiento JL, Dunne J, Frölicher TL, Lam VWY, Deng Palomares ML, Watson R, Pauly D (2013). Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems. *Nature Climate Change* 3: 254–258.
- .59
Rilov G (2013). Regional extinctions and invaders' domination: An ecosystem phase-shift of Levantine reefs. In: Rapport de la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée 40, Marseilles. pp 783.
- .60
Rilov G, Galil BS (2009). Marine bioinvasions in the Mediterranean Sea – History, Distribution and Ecology. In: Rilov G, Crooks JA (Eds). *Biological Invasions in Marine Ecosystems*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. pp. 549–575.
- .61
Genin A, Levy L, Sharon G, Raitsos DE, Diamant A (2020). Rapid onsets of warming events trigger mass mortality of coral reef fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117: 25378–25385.
- .62
שקד י, גנין א (2021). התוכנית הלאומית לניטור מפרץ אילת. דו"ח מדעי לשנת 2020. המכון הבינאוניברסיטאי למדעי הים באילת.
- .63
Osman EO, Smith DJ, Ziegler M, Kürten B, Conrad C, El-Haddad KM, Voolstra CR, Suggett DJ (2018). Thermal refugia against coral bleaching throughout the northern Red Sea. *Global Change Biology* 24: e474–e484.
- .64
Fine M, Gildor H, Genin A (2013). A coral reef refuge in the Red Sea. *Global Change Biology* 19: 3640–3647.
- .65
Kleinhaus K, Al-Sawalmih A, Barshis DJ, Genin A, Grace LN, Hoegh-Guldberg O, Loya Y, Meibom A, Osman EO, Ruch J-D, Shaked Y, Voolstra CR, Zvuloni A, Fine M (2020). Science, diplomacy, and the Red Sea's unique coral reef: It's time for action. *Frontiers in Marine Science* 7: 90.