

# מערכות אקולוגיות בעידן של שינויים גלובליים



## מאת פרופ' תמר דיין

ועל המבנה של חברות אקולוגיות. מכיוון שמדובר במערכות הביולוגיות המורכבות ביותר – מדובר באתגר מדעי עצום.

מחקריי התמקדו בהבנת הגורמים שמשפיעים על המבנה ועל ההרכב של חברות אקולוגיות לפי קנה המידה האקולוגי והאבולוציוני וברתימת הממצאים המדעיים והתובנות האקולוגיות למאמץ להגנה על חברות אקולוגיות בעידן של שינויים גלובליים.

### מבנה, צורה ויחסי הגומלין בחברות אקולוגיות

שאלה קלאסית באקולוגיה של חברות היא כיצד מתקיימים כל כך הרבה מינים זה בצד זה, במיוחד

מדע האקולוגיה עוסק בהבנת הגורמים המשפיעים על השפע ועל התפוצה של יצורים חיים, אך מספרם של אלו עדיין אינו ידוע. עד כה במאמץ מדעי מאמצע המאה השמונה-עשרה תוארו כשני מיליון מינים, אלא שיצורים אאוקריוטים (בעלי גרעין תא מובחן) לבדם מונים מיליונים רבים, ומאליו יובן שהמספר המוערך של המינים הפרוקריוטים (חסרי גרעין) הוא עצום, כדי טריליון מינים. מכאן שבמקומות שונים מתקיימות חברות אקולוגיות המורכבות ממינים רבים ומגוונים, והם מקיימים ביניהם יחסי גומלין מורכבים וכמובן משפיעים על הסביבה הפיזית שבה הם מתקיימים מחד, ומושפעים ממנה מאידך. תחום האקולוגיה של חברות עוסק בהבנת יחסי הגומלין הללו וכן בהשפעתם ובהשפעת תנאי הסביבה על ההרכב

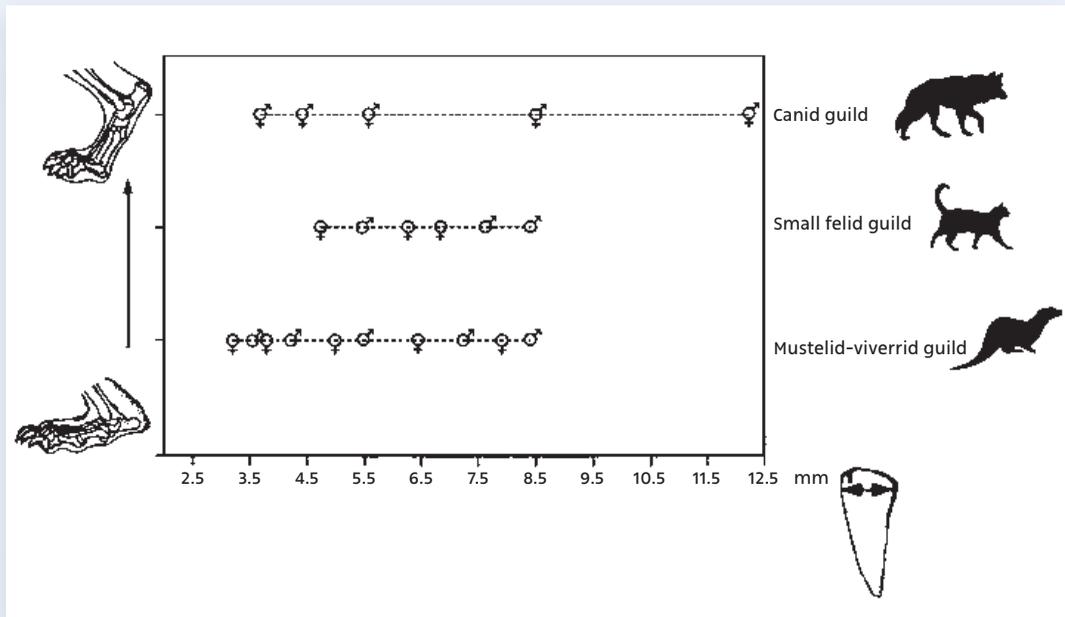


איור 1. אוסף האב שמיץ, המוצג במוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט שבאוניברסיטת תל אביב, כולל כמה מהמוצגים הנדירים במוזיאון: הנמר האחרון שניצוד בהרי ירושלים; תנין יאור, שהיה אחד האחרונים שחיו בנחל התנינים; הברדלס האחרון שניצוד בסביבות ים המלח וחתולי בר טהורי גזע, שאינם נראים עוד בטבע בישראל. לצידם מוצגים פריטים מארצות רחוקות. המוזיאון פועל בחסות האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים. הוא נוסד בידי פרופ' דיין (כותבת מאמר זה), שמכהנת בו כיושבת ראש, ומנהלו הוא אלון ספן. (צילום: איתי בית)

צריכות להיות קבוצות ההתייחסות ליחסי הגומלין הללו בין מינים.

אלו הן שאלות מפתח להבנת אופיין של חברות אקולוגיות, ולמרות חשיבותן הן היו שנויות במחלוקת עמוקה במשך שנים. בראשית דרכי האקדמית התמקדו מחקריי בשאלות הבסיסיות האלו ובמיוחד בשאלה כיצד אנחנו מגדירים גילדות אקולוגיות, קרי קבוצות מינים דומים המנצלים אותו סוג משאבים ובאופן דומה, ואם לתחרות בין-מינית ותוך-מינית יש השפעה על גודלם של המינים המתחרים, ומכאן – אם לגודלם של בעלי חיים יש השפעה על הרכב חברות אקולוגיות. ◀

כאשר מדובר במינים קרובים או דומים זה לזה, ולכן – בעלי פוטנציאל להתחרות זה בזה. ההנחה היא שהמינים מתחלקים על צירים שונים של הנישה האקולוגית, ובכך מתקיימת ביניהם הפרדה במידה המאפשרת דו־קיום. צירי הנישה האקולוגית העיקריים שנחקרו רבות היו הפרדה בשימושי בתי-גידול או מיקרו־בתי-גידול (micro habitats) והפרדה בגודל פריטי המזון, שמתאפשרת הודות להבדלי גודל בין מינים מתחרים. עם זאת מורכבותן של חברות אקולוגיות היא כה גדולה, שבמהלך השנים עלו שאלות חשובות ובסיסיות, אפילו בסוגיה כיצד מאפיינים את המינים המקיימים יחסי גומלין ישירים ביניהם, ומכאן השאלה מי



איור 2. קוטר הניב המשמש לטריפה בגילדות הטורפים של ישראל המוגדרות על פי ההתאמה שלהן לתנועה, קרי המורפולוגיה הפונקציונלית שלהן. קוטרי הניב מציגים דגם השונה באופן מובהק מן האקראי ומעיד על תפקיד התחרות בקביעת הרכב חברות אקולוגיות. מקור: Dayan, T., and D. Simberloff. *Patterns of size separation in carnivore communities*. In: Gittleman, J.L. ed. *Carnivore Behavior*, *Ecology, and Evolution*, Vol. 2. Cornell University Press: Ithaca and London. pp. 243–266, 1996.

ובכך מתאפשר קיום זה בצד זה של מינים בעלי פוטנציאל לתחרות. נראה שההפרדה בגודל הגוף שנחקרה רבות בעבר היא בעיקר תוצר של הבחירה הטבעית הישירה שפעלה על האברים הקשורים בתזונה ומשקפת את המתאם (קורלציה) הכללי שבינם לבין גודל הגוף של בעל החיים. ייתכן שמכאן נבעו חילוקי הדעות העמוקים על קיומה, או היעדרה, של הפרדה בציר הגודל: ההפרדה בגודל הגוף הייתה חלקית משום שהבחירה הטבעית לא פעלה עליה ישירות (איור 2).

המפתח להבנת הרכב גילדות של בעלי חיים בחברות אקולוגיות ולהפרדה בציר המזון היה גם המנוף להתמודדות עם שאלה מהותית נוספת – מהם הגורמים שמשפיעים על האבולוציה של גודל גופם של בעלי חיים על גבי איים. מינים על

ההתמודדות במחקרי עם שאלות אלו התבססה על תובנות מתחום המורפולוגיה הפונקציונלית שמשקפת הן את ההיסטוריה האבולוציונית והן את התכונות האקולוגיות של המינים. ההתבססות עליה מלמדת אותנו מי הם המינים הדומים זה לזה מבחינה מורפולוגית בהבנה שהדמיון הזה משקף את התפקוד שלהם, ועל כן הם עשויים להתקיים באותה גילדה אקולוגית, דהיינו קבוצת המינים המשתמשים באותו סוג משאבים ובאופן דומה.

המורפולוגיה מלמדת אותנו גם כיצד מינים צורכים את המשאבים, ולכן כאשר אנחנו מתמקדים בהפרדה על ציר המשאבים, מתברר שהמאפיינים המורפולוגיים הקשורים ישירות בצריכת המשאבים הם שמאפשרים הפרדה במשאבי המזון בין בעלי חיים ממינים שונים (ואפילו בין זכרים לנקבות),

צוהר לעולם שלא נחקר עד אותה עת – תפקידו החשוב של ציר הזמן היממתי בדו־קיום בין מינים שונים של בעלי חיים והשפעתו של מכלול לחצי הברירה של יחסי גומלין ושל אקלים על עיצוב זמני הפעילות של מינים שונים ובתנאים שונים. כמו כן למדנו את תפקידן החשוב של מגבלות אבולוציוניות בעיצוב זמני הפעילות של בעלי חיים.

### מבט מקור-אבולוציוני על גודל גוף זמני פעילות

נשאלת השאלה עד כמה ההפרדה לאורך צירי הנישה האקולוגית משפיעה על האבולוציה של בעלי חיים בממד הזמן. דוגמה מרתקת לזה אנחנו מוצאים באבולוציה של גודל גוף ושל זמני פעילות יממתיים בין דינוזאורים לבין יונקים. היונקים הם מחלקה של בעלי חיים שהתפתחה לפני כ-225 מיליון שנה, ובמשך כ-160 מיליון שנה התקיימה בצד הדינוזאורים. הדינוזאורים היו יצורים גדולים, ורבים מהם אפילו ענקיים, ששלטו ביבשות, ואילו היונקים שהתקיימו בצידם היו קטנים, והתאוריה הניחה שהיו פעילי לילה. הדינוזאורים נכחדו לפני כ-65 מיליון שנה, בהרף עין גאולוגי, כנראה בעקבות פגיעת מטאוריט בכדור הארץ.

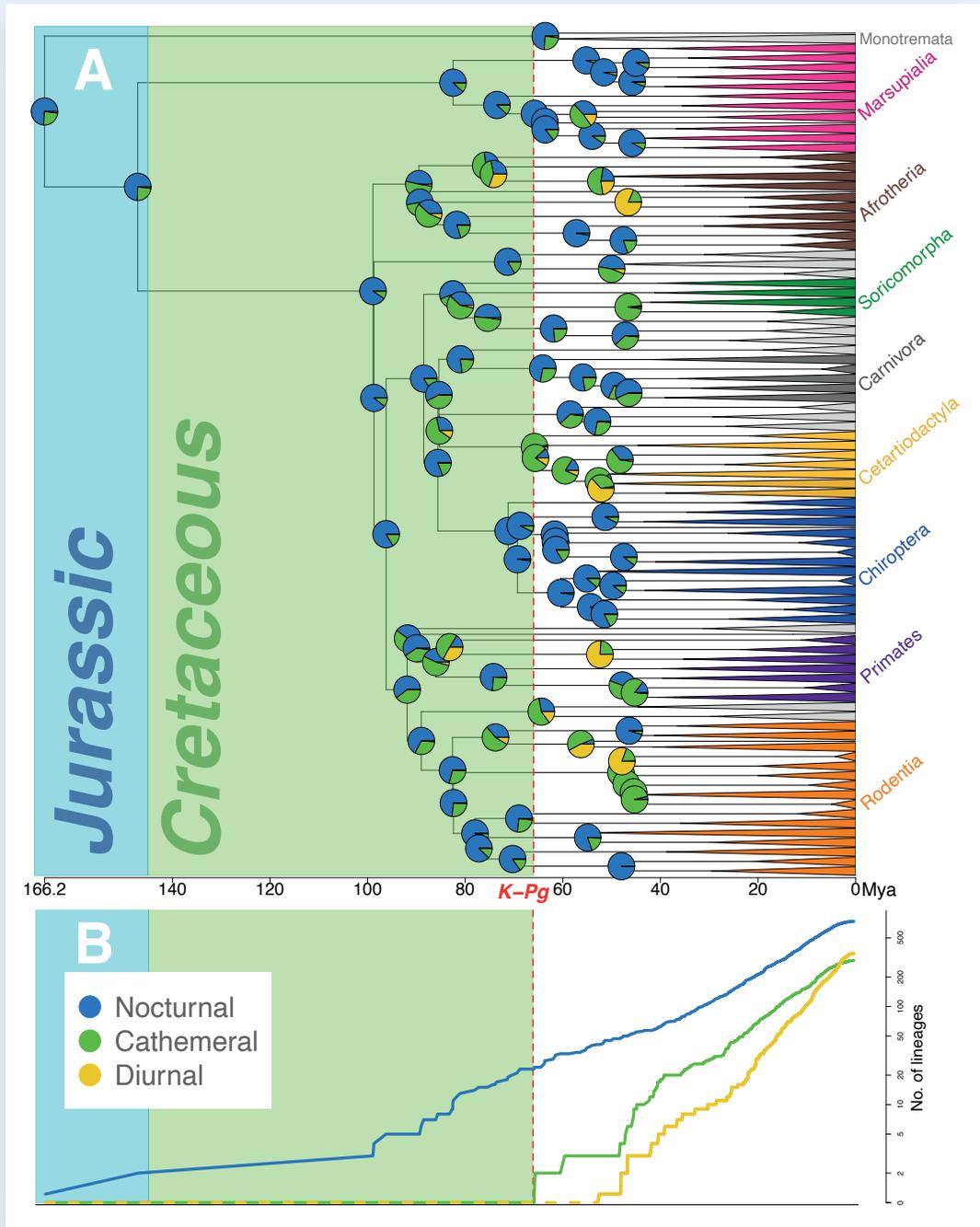
מייד לאחר מכן, בסוף הקרטיקון, אנחנו מגלים זינוק אקספוננציאלי בגודל הגוף המרבי של היונקים. משמעות הדבר היא שהדינוזאורים שלטו בנישות אקולוגיות מגוונות, והיונקים יכלו לפלוש אליהן ולמלא אותן רק עם הכחדת הדינוזאורים. אנחנו רואים אותו דגם ביונקים מקווים אבולוציוניים שונים, חלקם מינים שנכחדו ואחרים עדיין קיימים, ביבשות שונות, והדבר מצביע על חוקיות: גידול אקספוננציאלי ועצירה באותו סף של גודל גוף מרבי.

גבי איים שונים לעיתים שינוי דרמטי בגודל גופם מאותם מינים שעל גבי יבשות – ממותות זעירות וצבי ענק, לדוגמה. המינים בחברות אקולוגיות שעל גבי איים מעטים מאלה שביבשות, הן בשל גודלם הקטן יחסית של איים והן, לעיתים קרובות, בשל הקושי לאכלס חלק מן האיים.

גודל גופם של מינים של בעלי חיים אנדותרמיים (משרעת הטמפרטורות הצרה של גופם נשמרת בעזרת תהליכים פיזיולוגיים פנימיים) מושפע גם מטמפרטורת הסביבה, ולכן האבולוציה של גודל הגוף של בעלי חיים מושפעת הן ממבנה החברה האקולוגית, הן מקיומם של מינים מתחרים והן מן התנאים הא־ביוטיים, כשכולם פועלים בו־זמנית.

### ציר הזמן היממתי בחברות אקולוגיות

במאמץ להבין את ההרכב ואת המבנה של חברות אקולוגיות הוזנח מחקרית ציר חשוב במשך שנים ארוכות והוא ציר הזמן היממתי, ועל כן הוא היה נושא נוסף שבחרתי להתמקד בו עם קבוצת המחקר שלי בד בבד עם המחקרים שהתמקדו באבולוציה של גודל גוף. מחקר זה החל במערכת ניסויי שדה בעין גדי שמתקיימים בה שני מיני מכרסמים מן הסוג קוצן זה בצד זה – אחד פעיל יום ואחד פעיל לילה – ומחקר קודם, כבר משנות השישים של המאה העשרים, הראה כי כאשר מסלקים את המין הלילי מן השטח המשותף, המין היומי עובר גם לפעילות לילה, מה שמרמז על דחיקה תחרותית שגורמת להפרדה אקולוגית בזמני פעילות. על כן כדי להבין את תפקיד ציר הזמן היממתי במערכת האקולוגית בחרתי למקד את המחקר ביחסים שבין המינים הללו וכן במכלול יחסי הגומלין שלהם עם הטורפים שלהם (עופות, יונקים וזוחלים), בהשפעת זמינות המזון (פרוקי רגליים) עליהם, בהשפעת מבנה בית הגידול ובהשפעת תנאי האקלים. אלו קרעו לנו



**איור 3.** למעלה: שחזור האבולוציה של זמני פעילות לאורך אילן היוחסין של היונקים. תרשימי עוגה מייצגים את התמיכה הסטטיסטית בדפוסי הפעילות השונים בכל ענף אבולוציוני (כחול – פעיל לילה; צהוב – פעיל יום; ירוק – פעיל יום ולילה). אורך ענפי האילן האבולוציוני פרופורציוני לזמן. לא פורטו ענפים שהתפצלו לפני פחות מ-45 מיליון שנה כדי להקל את ההתמצאות. למטה: מספר המינים (ענפים אבולוציוניים) המשתייכים לכל דפוס פעילות לאורך האבולוציה של היונקים. פעילות יום (מעורבת) מופיעה לראשונה מייד לאחר הכחדת הדינוזאורים לפני 66 מיליון שנה (קו אדום מרוסק). מקור: Maor, R., T. Dayan, H. Ferguson-Gow, and K.E. Jones. Temporal niche expansion in mammals: from a nocturnal ancestor after dinosaur extinction. *Nature Ecology & Evolution* 1:1889–1895, 2017

איש בסוף המאה העשרים ואחת. יתר על כן, בשנים אלו חלו חידושים טכנולוגיים עצומים ופותחו חומרים סינתטיים חדשים בקצב חסר תקדים. התוצר המקומי הגולמי (תמ"ג) הממוצע לאדם גדל מאוד, ויש לזה השלכות עצומות על קצב צריכת המשאבים על פני כדור הארץ ועל קצב ייצור הפסולת, ומכאן על השפעת האדם על מערכות אקולוגיות.

שינויים אלו גורמים לירידה בתחום התפוצה של מינים, בגודל אוכלוסייתם, ובסופו של דבר – להכחדה מואצת של אוכלוסיות ומינים, הנחשבת לאירוע ההכחדה ההמוני הגדול ביותר מאז אירוע ההכחדה הגדול האחרון, שבו נכחדו הדינוזאורים, וכפי שראינו לעיל, השפעתו של אירוע זה על האבולוציה של בעלי חיים הייתה דרמטית. משמעות השינויים האלו היא השפעה גדולה על המבנה ועל התפקוד של חברות אקולוגיות בהיבטים מגוונים. מכיוון שהמין האנושי עבר אבולוציה במערכת אקולוגית קיימת, הוא תלוי תלות מוחלטת בתפקודים של מערכות אקולוגיות שזכו לכינוי "שירותי המערכת האקולוגית", והם למעשה תפקודים תומכי-חיים. אם המערכת נפגעת, אספקת השירותים הללו נפגעת. דוחות ומחקרים בין-לאומיים כבר מצביעים על הפגיעה הזאת ועל הסיכון הגלום בה לעתיד המין האנושי.

ההכרה בעוצמת השינויים הללו הייתה איטית גם בקהילה המדעית, אולם בעשורים האחרונים מדענים ודוחות בין-לאומיים מצביעים על התהליכים שמשפיעים על המגוון הביולוגי ועל תפקודי המערכות האקולוגיות. עוצמת השינויים הללו כה גדולה, עד שהיום רבים מכנים את העידן שבו אנחנו מצויים "אנתרופוקן" – עידן המתאפיין בראש ובראשונה בהשפעת האדם על מערכות כדור הארץ.

גודל הגוף כאמור הוא אחד מצירי הנישה האקולוגית והוא מתקיים במתאם כללי גבוה עם גישה למשאבים, ולכן נראה שהתקיימה תחרות בין דינוזאורים ליונקים בקנה המידה המקרו-אבולוציוני על הציר הזה. ברור גם שיש מגבלה אקולוגית-אבולוציונית לגודל הגוף המרבי של יונקים.

עוד מתברר שהדינוזאורים שלטו גם בנישה של פעילות יום. אימתנו מחקרית את ההשערה שעד להכחדתם היו היונקים ליליים בלבד, ורק עם היעלמם של הדינוזאורים התאפשרה האבולוציה של חלק מקבוצות היונקים לפעילות יום, ולמעשה כבני אדם אנחנו שייכים לקבוצה כזאת – לפרימטים, שרוב חבריה הם פעילי יום (איור 3). לכן אין ספק שגם ציר הזמן היממתי הוא ציר של הנישה האקולוגית שהיה מושא לתחרות גם בקנה המידה הזה. על כן קנה המידה המקרו-אבולוציוני מלמד אותנו על החשיבות העצומה של שני הצירים האלו – ציר הגודל וציר הזמן היממתי – לא רק בקנה המידה האקולוגי אלא גם בקנה המידה האבולוציוני.

### מערכות אקולוגיות באנתרופוקן

בעודנו עמלים לפענח את החוקיות שבהרכב ובמבנה של חברות אקולוגיות, דהיינו להבין את הכללים ואת הסדר המתקיימים במערכת האקולוגית, חלו שינויים עצומים בסביבה הטבעית שהשפיעו השפעה עצומה על הסדר הזה. במאה השנים האחרונות גדלה אוכלוסיית האדם בעולם ביותר מפי ארבעה, והיום יש יותר מ-8 מיליארד איש על פני כדור הארץ. מדובר באירוע חסר תקדים בהיסטוריה של המין האנושי והוא גם לא יישנה: קצב גידול האוכלוסייה הואט בממוצע עולמי, ואוכלוסיית האדם צפויה להגיע לשיא של 10-11 מיליארד

משפיעים על הרכב מינים, על מבנה החברה ועל יחסי הגומלין בין המינים השונים לסביבתם. להלן אציג מעט דוגמאות להמחשה, מתוך מחקרים של קבוצת המחקר שלי.

### הרס, קיטוע וטרנספורמציה של שטחים טבעיים

הרס, קיטוע וטרנספורמציה של בתי גידול טבעיים הם הגורמים הראשונים בעולם ובישראל לאובדן המגוון הביולוגי. מחקרנו שלנו התמקדו בשטחים הגדולים שעברו טרנספורמציה בישראל - בראש ובראשונה בשטחי חקלאות ומרעה ובשטחי יער נטוע. מחקר דגמי המגוון הביולוגי בשטחים אלו שעברו טרנספורמציה גדולה מצביע על הבדלים עמוקים בין טיפולים חקלאיים ויערניים שונים ומראה כי מינים מסוימים נמשכים לפעולות ממשק שונות, ואילו מינים אחרים נפגעים מהן, ולדבר השפעה ניכרת על יחסי הגומלין בין מינים שונים לימוד הדגמים הללו מאפשר להבין את השינויים המתרחשים בחברות אקולוגיות ובה בעת נותן את הכלים להמליץ על התנהלות שתמזער את הפגיעה במגוון הביולוגי ותאפשר שימור רציפות ככל הניתן כדי להקטין את הקיטוע ולמזער את הפגיעה באוכלוסיות בעלי חיים. הכלים הללו הם כלים ממשקיים (כלים של ניהול שטח), כלים תכנוניים וכלים אסדרתיים, ושאלה חשובה היא מהי מידת האפקטיביות שלהם בהגנה על המגוון הביולוגי וכיצד ניתן למקסם את יכולותיהם. בגלל המורכבות של מערכות אקולוגיות נחוץ גם פיתוח אינדיקטורים אקולוגיים שיהוו קיצור דרך למעקב אחר מצבן לצורך שימור וניהול בר-קיימה. בעולם שאוכלוסייתו גדלה במידה דרמטית ובמדינה צפופה לידע הזה חשיבות קריטית לניהול ההון הטבעי.

חלק מן המחקרים הללו התמקד גם בהבנת השפעתם של שינויים בשימושי שטח על

כיום ברור שמדובר באתגר עצום הניצב בפני האנושות, ושעל המדע להירתם להתמודדות איתו, להבין את השפעת השינויים על חברות אקולוגיות ולפתח כלים מבוססי-מדע כדי למזער אותם. מדובר בראש ובראשונה בשאלות אקולוגיות, אך ההתמודדות עימן דורשת כלים גם מתחום התכנון, האסדרה, החינוך, הכלכלה, היחסים הבין-לאומיים, המשפט, החקלאות, המדיניות ואפילו מדיניות המדע, וכל אלו נוספו למורכבות המדעית העצומה במחקר חברות ומערכות אקולוגיות. במענה לאתגר העצום הזה נוסד באמצע שנות השמונים של המאה הקודמת תחום המחקר הביולוגי של שמירת הטבע (conservation biology), שלמעשה הפך לתחום מדעי מולטידיסציפלינרי (conservation science), כשהוא מטמיע בו את הכלים מתחום מדעי החברה, ובתוך התקופה הזאת נוסדו עשרות כתבי עת מדעיים המתמקדים בהיבטים שונים של המדע הרב-תחומי הזה.

במענה לאתגר זה הסב דור של אקולוגים את המחקר שלו ממחקר בסיסי המנסה להתמודד עם שאלות מורכבות בהבנת חברות אקולוגיות ומתמקד בחברות אקולוגיות טבעיות, למחקר יישומי בתחום שמירת הטבע ברותמו את התובנות האקולוגיות ומתוך הבנת הדחיפות העצומה של ההתמודדות עם אתגרים אלו. גם הרבה מן המחקר שלי הוסב להתמודדות עם משברי הסביבה, ובמעבדתי צמח דור של מדענים צעירים ואיכותיים שהתמודדו עם שאלות מגוונות של מחקר שמירת טבע בשילוב של כלים מתחום המדיניות, האסדרה, המשפט, הסוציולוגיה, האנתרופולוגיה והכלכלה. המחקרים הללו עסקו בהיבטים שונים ששייכים לחמש הקטגוריות הראשיות של גורמים עיקריים לאובדן המגוון הביולוגי בעולם ובישראל: הרס, קיטוע וטרנספורמציה של בתי גידול טבעיים, פלישות ביולוגיות, זיהום לסוגיו, ניצול יתר של אוכלוסיות ושינוי אקלים. התהליכים האלו כולם

## שינוי אקלים, זיהום אור

### וציר הזמן היממתי באתרופוקן

למעלה התייחסתי לציר הזמן היממתי, ועתה אחזור ואדגיש נושא זה. ראשית, אנחנו בעיצומו של שינוי אקלים שמשמעותו שתנאי הפעילות בסביבה משתנים, ואחת ההשלכות שלו היא שבאזורים חמים ומתחממים טמפרטורות יום קיצוניות מאלצות בעלי חיים יומיים שאינם מותאמים להן לצמצם את פעילותם למספר שעות קטן ביממה, ובכך מצטמצמים המשאבים שעומדים לרשותם, מה שמגדיל את התחרות ביניהם על ציר הזמן היממתי, או להעביר חלק מן הפעילות שלהם ללילה, ללא ההתאמות הנחוצות לזה ותוך כדי תחרות עם מינים אחרים המותאמים יותר לפעילות לילית.

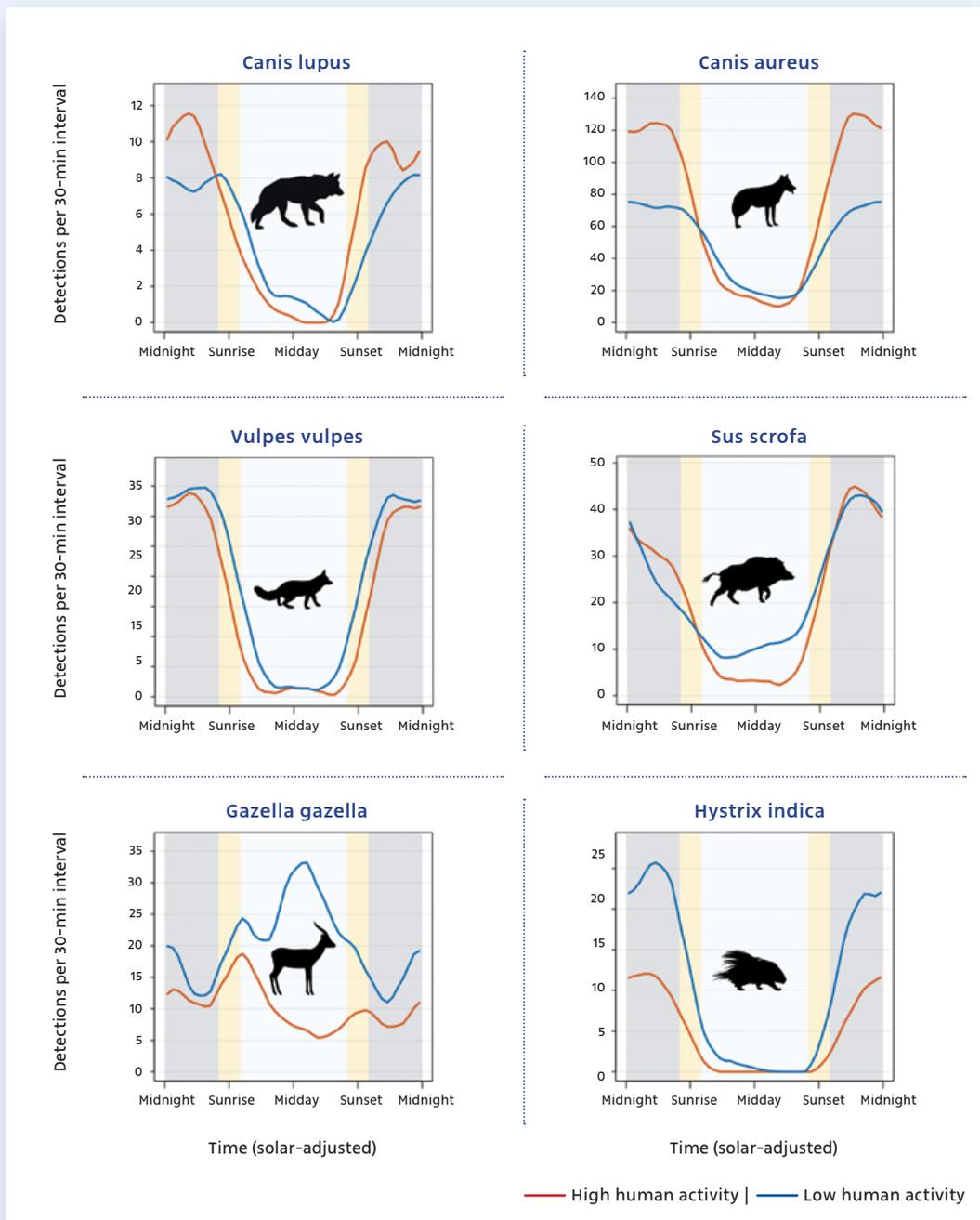
כיונקים יומיים (ראו לעיל) אנו מרגישים בטוחים לפעול ברמות תאורה גבוהות שאליהן הראייה שלנו מותאמת, ועל כן הציף האדם את כדור הארץ בתאורה - תופעה שנקראת "זיהום אור אקולוגי", תופעה נרחבת מאוד בעולם ובמיוחד היום בישראל. התוצאה היא שגם מינים ליליים נאלצים להפחית את שעות הפעילות שלהם בגלל התאורה שחושפת אותם לטורפים ליליים, וזה פוגע באוכלוסיות שלהם, במצבם הפיזיולוגי וברבייה שלהם, כמו גם ביחסי הגומלין בין מינים שונים ובין פרטים שונים באותה אוכלוסייה.

נוסף על הנאמר לעיל, צפיפות האוכלוסייה בעולם, ובייחוד בישראל, עצומה, ואנחנו פעילים כאמור ברמה גבוהה בשעות היום. מחקרנו מגלים כי באזורים שבהם רמת פעילות האדם גבוהה, ואלה שטחים נרחבים בישראל שיש בהם חקלאות, טיילות או פעילויות אחרות, בעלי חיים גדולים אחרים - טורפים כגון זאבים ותנים ונטרפים כמו צבאים - מצמצמים את שעות הפעילות היומית שלהם לשעות שבהן אין פעילות אדם, ◀

אספקת שירותי המערכת האקולוגית, למשל: מחקרים על השפעת ניהול שטחי החולה משנות החמישים ואילך הן על אספקת שירותי המערכת האקולוגית והן, היום, על המחירים הכלכליים של ניהול השטח. הכלים הנחוצים להתמודדות עם האתגרים שהטרנספורמציה הזאת מייצרת הם בראש ובראשונה מתחומי התכנון, החקלאות והיערנות וכן קבלת הנתונים המדעיים שיאפשרו לייצר איזון בין שימושי שטח ליעדים שונים. למשל, רעייה מקטינה את כמות החומר האורגני הדליק, ובכך מועילה להקטנת השפעתן של שרפות, אך בה בעת מתברר שעדרי בקר מושכים מיני טורפים והם פוגעים באוכלוסיית הצבי הארץ-ישראלי הנתון בסכנת הכחדה. ומאליו יובן שכל זה מתקיים על רקע שינויי אקלים המשפיעים, וצפויים להשפיע עוד הרבה יותר, על התפוצה ועל השרידות של מיני צמחים ובעלי חיים.

### פלישות ביולוגיות

השלכות אקולוגיות נרחבות יש גם לתופעת הפלישות הביולוגיות. פלישות ביולוגיות הן התופעה שבה מינים מועברים ממקום למקום בשל פעילות אדם, ואוכלוסיותיהם גדלות במקום החדש ומסיבות שם נזקים סביבתיים, חקלאיים, תשתיתיים או בריאותיים. מאליו יובן שלמינים חדשים שנוספים לחברות אקולוגיות השפעה דומיננטית על הרכבן ועל מבנן של החברות הללו ועל מכלול יחסי הגומלין שבהן. ההתמודדות המחקרית כללה מיפוי של המינים הזרים בישראל המשתייכים לקבוצות חי שונות, לימוד ההשפעה ההתנהגותית של מינים פולשים על הביולוגיה ועל האקולוגיה של מינים מקומיים, מחקר הנתיבים שדרכם מינים פולשים חודרים למערכות היבשתיות של ישראל ומחקר השוואתי על הכלים האסדרתיים בעולם ובישראל להתמודדות עם התופעה הזאת.



**איור 4.** דפוסי פעילות יממתיים של שישה מיני יונקים באזורים בעלי פעילות אנושית רבה ומעטה ברמת הגולן (קיץ-סתיו 2020). כל גרף מציג ספירת תצפיות בלתי תלויות במצלמות שביל לאורך היממה, מחצות ועד חצות. עקומות כתומות מייצגות אזורים בעלי פעילות אנושית רבה (הרבעון העליון של המצלמות לפי מספר תצפיות אדם), ועקומות כחולות מייצגות פעילות אנושית מעטה (הרבעון התחתון). הצללת הרקע מציינת לילה (אפור), שחר ושקיעה (צהוב בהיר) ויום (כחול בהיר). המינים המוצגים (משמאל לימין, מלמעלה למטה): זאב אפור (*Canis lupus*), תן זהוב (*Canis aureus*), שועל מצוי (*Vulpes vulpes*), חזיר בר (*Sus scrofa*), צבי ארץ-ישראלי (*Gazella gazella*), דורבן מצוי (*Hystrix indica*). פעילות אדם דוחקת את המינים ובמיוחד את הצבי הארץ-ישראלי לפעילות לילה, ובכך גדלה החפיפה שלו בזמני פעילות עם מיני הטורפים. מקור: פרייטבלום 2025, עבודת דוקטור בהכנה

שורשיה מוקדמים, וככל שאנו מבינים יותר את השפעת האדם היום על המערכת האקולוגית, כן אנו מבינים יותר את השורשים הללו ואת אופיין של המערכות האקולוגיות הטבעיות. גם קבוצת המחקר שלי נדרשה לסוגיות אלו במחקר המתבסס על ממצאים מחפירות ארכאולוגיות. רבים מן המחקרים שקורעים לנו צוהר לאירועי עבר נשענים על שרידים של צמחים ושל בעלי חיים מהקשרים ארכאולוגיים ועל תובנות אקולוגיות ואנתרופולוגיות כאחת. הם מלמדים אותנו על הניצול של אוכלוסיות בר כבר בידי ציידים-לקטים-דייגים, על טרנספורמציה של שטחים טבעיים בסביבת יישובי אדם קדומים ועל השפעתה על אוכלוסיות בעלי חיים, על ראשית הביות והחקלאות ועל הגורמים להם ועל התפתחות הכלכלה האנושית. עוד מגלים לנו המחקרים הללו שלבני אדם הייתה השפעה רבה על סביבתם עוד טרם הביות, וייתכן שזו הייתה אחת הסיבות לראשית החקלאות, וגם על אופיין של אוכלוסיות בעלי חיים שנוצלו ביתר, ולעומתן על מינים שמגלים משיכה למגורי אדם כבר מתקופות ארכאולוגיות קדומות.

אין ספק שהמאה העשרים ואחת היא התקופה המרתקת ביותר שניתן להעלות על הדעת למדע האקולוגיה ולמחקר סינתטי בתחום שמירת הטבע. הפריחה העצומה של התחום בעולם, הרבת-חומיות המתרחבת, הרלוונטיות הגדולה לנושאים המהותיים ביותר לקיומנו כמין האנושי, האינטראקציה הקרובה בין המדע לעשייה בשטח והמאמץ הבין-לאומי להתמודד עם האתגר הזה – כל אלה מייצרים כר פורה לעשייה מדעית חשובה ולאתגר מדעי, מוסדי ומוסרי שעלינו להירתם להתמודד איתו לטובת החברה היום ולתועלת הדורות הבאים. ■

בדרך כלל לשעות הלילה (איור 4). זה כמובן מצמצם את פעילותם על ציר הזמן היממתי, מגדיל מאוד את התחרות על משאב הזמן, מקטין את הגישה למשאבים אחרים, ואשר לצבאים, זה כופה עליהם להיות פעילים בעיקר בשעות השטרפים שלהם פעילים, מה שמגדיל את הסיכון שלהם להיטרף.

על כן בין שינוי אקלים לזיהום אור ולצפיפות פעילות – בני אדם, בעולם ובישראל, עשו שינויים מפליגים בציר הזמן היממתי. אנחנו נמצאים היום בעשור השיקום האקולוגי של האו"ם, ואנחנו עמלים לפתח כלים מבוססי-מדע לשיקום מערכות אקולוגיות ותפקודיהן, למשל הבנת השפעתו של ייבוש החולה ואחר כך של שיקום השטח על אספקת שירותי המערכת האקולוגית, שיקום אקולוגי לאחר כריתת חורשות אקליפטוס, שיקום של משאָרְי שדה (שטחים טבעיים במרקם או בשולי שטחי חקלאות) ועידוד מאביקים לטובת החקלאות ועוד. יש לקוות שבראייה זאת יהיה אפשר לשקם גם את ציר הזמן היממתי ולהחזיר למערכת האקולוגית את סדר הזמנים הנכון של הפעילות הטבעית שתואמת את האבולוציה זה מאות מיליוני שנים וכן את מבנה החברה של המינים השונים.

### יחסי אדם וחי בממד הזמן

עם התבונה שלפיה אנו נמצאים בעידן של שינוי דרמטי במערכות אקולוגיות גבר העניין בהבנת ההיסטוריה של מערכות היחסים בין האדם לבין המערכת הטבעית, שהחלו לגרום לשינוי כבר לפני אלפי שנים, ובמיוחד עם ראשית החקלאות. אומנם השפעת האדם על המערכת האקולוגית הואצה מאוד במאה האחרונה, אך