

איזו דרך למוח? השערים האהובים על טפילים לכניסה אל דגים

Gabrielle S. van Beest^{1,2*}, Ana Born-Torrijos^{1,2}

¹מכון קבנילס למגוון ביולוגי וביולוגיה אבולוציונית, פארק המדע, אוניברסיטת ולנסיה, ולנסיה, ספרד
²המכון לחקר טפילות, המרכז לביולוגיה, האקדמיה הצ'כית למדעים, צ'סקה בודייוביצה, צ'כיה

סוקרים צעירים

EREN

גיל: 8



SARVADEB

גיל: 9



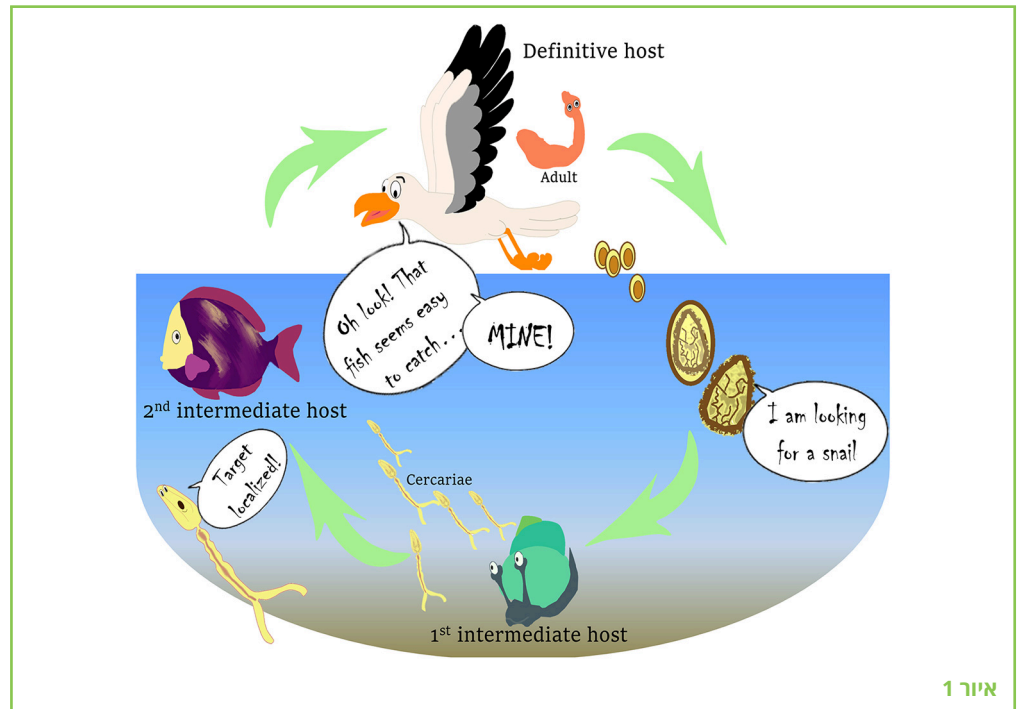
טפילים נמצאים בכל רחבי העולם, וישנם סוגים שונים רבים. אולם לעיתים קרובות מתעלמים מהם בגלל גודלם הקטן. טפילים נסמכים על מארחים כדי לשרוד. מארחים הם אורגניזמים שנדרשים להשלמת מחזור החיים של הטפיל. לכן, טפילים נעים כל הזמן מחיה אחת לאחרת. כיצד המעבר הזה בין חיות מתרחש? אנו חוקרים כיצד טפיל שנקרא *Cardiocephaloides longicollis* זו בין חיות, וכיצד הוא נכנס לדגים מארחים. הטפיל הזה מדביק את הדגים דרך העור שלהם, כדי להגיע בסופו של דבר למוח שלהם. על ידי ויזואליזציה של *C. longicollis* באמצעות פלואורסנציה וצבע זוהר, צפינו בכך ששערי הכניסה המועדפים על הטפיל לתוך דגים היו אזורים שקרובים למוח, או עם חיבור קל אליו, כמו למשל העיניים, הזימים, או אזורי הגב והבטן. המחקר שלנו מסייע לנו להבין את אחת האסטרטגיות שחלק מהטפילים משתמשים בה כדי להשלים את מחזור חייהם.

מהם טפילים?

טפילים (פְּרָזִיטִים) הם אורגניזמים חיים שתלויים באורגניזמים אחרים כדי לשרוד. מקורה של המילה הוא במילה היוונית "parásitos", שמשמעותה "מי שאוכל בשולחן של אחר".

איור 1

מחזור החיים המורכב של הטפיל *C. longicollis*. מחזור החיים של הטפיל הזה כולל שלושה מארחים שהטפיל צריך לעבור בהם כדי להשלים את מחזור החיים. שלבי חוסר הבגרות והשחייה של הטפיל מוצגים בצהוב, והשלב הבוגר מוצג בכתום. האיור נלקח מ-Born-Torrijos et al. [3].



מארח סופי (Definitive Host)

אורגניזם שהפחית מדביק ושבּו הוא מתפתח לשלב הבגרות, אשר בו הוא מתרבה על ידי הטלת ביצים שמשוחררות לסביבה דרך צואתו של המארח הסופי.

זחל (Larvae)

שלב צעיר לפני הפיכה למבוגר. לדוגמה, לפני הפיכתם לפרפרים, הצאצאים היו זחלים.

מארח ביניים (Intermediate Host)

אורגניזם שהפחית מדביק ושבּו הוא מתפתח בתור שלב הזחל. מארחי ביניים נדרשים עבור חלק מהטפילים כדי להשלים את מחזור החיים שלהם.

זחל עם זנב (Cercariae)

שלב התפתחותי של הזחל שחלק מהטפילים עוברים דרכו במהלך ההתפתחות. חלק מהזחלים עם זנב יכולים לשחות בחופשיות במים ולהדביק את המארחים שלהם.

הטפיל בדרך כלל מרוויח מהקשר הזה באמצעות לקיחת חומרי מזון מהאורגניזם הנבחר, שנקרא מארח, ולעיתים גם באמצעות שימוש במארח כמקור מקלט והתְרַבּוּת. באינטראקציות טפיל-מארח, מארחים מפתחים מנגנוני הגנה כדי להילחם בזיהומי טפילים, אולם טפילים, בתורם, ממציאים אסטרטגיות חדשות כדי לשרוד במארחים שלהם [1]. לחלק מהטפילים יש מחזור חיים פשוט, שבו הם זקוקים רק למין מארח אחד כדי להתפתח ולהתרבות. המארח הזה, שבו הטפיל מתפתח לשלב הבוגר ומתרבה, נקרא **מארח סופי**. במקרים אחרים, לטפילים יש מחזור חיים מורכב שמְעַרְב יותר ממין מארח אחד, לעיתים אפילו שלושה (איור 1). במחזור חיים מורכב טיפוסי, הטפיל מתרבה במארח הסופי, בדרך כלל בעל חוליות כמו למשל ציפור או דג, שאז משחרר את ביצי הטפיל לסביבה דרך הצואה שלו. הביצים בוקעות ומשחררות **זחלים** שיכולים להדביק את **מארח הביניים** הראשון, בדרך כלל חסר חוליות, כמו למשל חילזון. הזחלים האלה מתרבים בתוך מארח הביניים הזה, ואלפי צאצאים לא בוגרים שחיים ושוחים בחופשיות, שנקראים **זחלים עם זנב**, משוחררים לתוך הסביבה, שם הם מדביקים מארח ביניים שני, בדרך כלל דג או חסר חוליות אחר. זחלים עם זנב גדלים ומתבגרים בתוך המארח הזה, ומתפתחים לשלב אחר שנקרא metacercariae, והמחזור מושלם כשהמארח הסופי אוכל את מארח הביניים. האם זה גורם לכם לתהות כיצד טפילים מצליחים להשלים את מחזור החיים שלהם כשהוא נראה כל כך מאתגר?

האם טפילים זקוקים למזל כדי להיתקל במארחים שלהם במקרה?

כדי להדביק מארח, טפילים צריכים תחילה למצוא אותו בסביבה שלהם, ולשם כך הם מפתחים מה שאנו מכנים אסטרטגיות מעבר, או דרכים למציאה ולהדבקה מוצלחת של מארח. לעיתים, טפילים יכולים להיות מועברים כשמארח מודבק נצרך על ידי טורף שעבר במקרה ליד המארח של הטפיל. לאחר מכן, הטפיל מדביק את המארח הזה ומחזור החיים ממשיך. במקרים אחרים מעורב יותר ממזל, והטפילים מגדילים באופן פעיל את סיכויי המעבר שלהם בדרכים שונות.

אסטרטגיה שכיחה אחת היא על ידי השפעה על ההתנהגות של המארח, כדי ליצור מגע עם המארח הבא בצורה קלה יותר. לדוגמה, הטפיל *Gyrodactylus bullatarudis* משתמש בדג גופי צבעוני כמארח, מזהם את הקשקשים שלו ומשנה את האופן שבו הדג שוחה. דגי גופי בריאים נפגשים עם דגי גופי מודבקים מאחר שהם נמשכים להתנהגות השחייה המוזרה שלהם, שנגרמת על ידי הזיהום הטפילי [2]. באופן הזה, הדבקות הטפיל מתפשטת בקרב הדגים הבריאים. דוגמה אחרת לטפיל שמשפיע על התנהגות הפונדקאי שלו כדי לשפר העברה, מתרחשת כאשר הדגים מודבקים על ידי *Schistocephalus solidus*. דגים מזהמים הופכים לטורף קל עבור טורפים, שיכולים להיות הדור הבא של מארחים על ידי כך שהם משפיעים על הדגים המודבקים בעודם מתעלמים מנוכחות טורפים שיכולים לאכול אותם. באופן דומה, דגי קרפיון מסוג common dace fish שמודבקים על ידי הטפיל *Diplostomum spathaceum* מבלים זמן רב יותר בחלק המואר יותר של פני השטח של המים מאשר דגים לא מודבקים, מה שהופך אותם קלים יותר לתפיסה על ידי ציפורים, המארח הבא של הטפיל [2].

מה אנחנו חוקרים?

חקרנו טפיל שנקרא *Cardiocephaloides longicollis*, ששמו מגיע מלטינית ומסייע לזכור כיצד נראה השלב הבוגר: ראש בצורת לב עם צוואר ארוך מאוד (איור 1). חקרנו את האסטרטגיות שמשמשות את שלבי הזחל של *C. longicollis* כדי להיכנס לדגים המארחים שלהם. הטפיל הזה שכיח בחופי הים התיכון, והוא מדביק דגי פרא ודגים שמגודלים בבריכות גידול, כמו למשל ספרוס זהוב (*Sparus aurata*), אחד מדגי הים החשובים ביותר בחקלאות הים-תיכונית [3]. במחזור החיים המורכב שלו, *C. longicollis* משתמש בחלזונות ים ובדגים כמארח ראשוני וביניים, ובשחפים כמארחים סופיים (איור 1). הזחלים עם זנב משוחררים מהחלזונות, ולמרות תוחלת החיים הקצרה שלהם הם מסוגלים להגיע לדג המארח. אחרי שהם נכנסים לדג דרך העור, הם זזים דרך הרקמות לכיוון הראש כדי להדביק את המוח, היכן שזחלי *C. longicollis* עם זנב מתבגרים כדי ליצור ציסטה, ה-*metacercariae*. שם, הטפיל מחכה עד שהדג נאכל על ידי שחף, המארח הסופי.

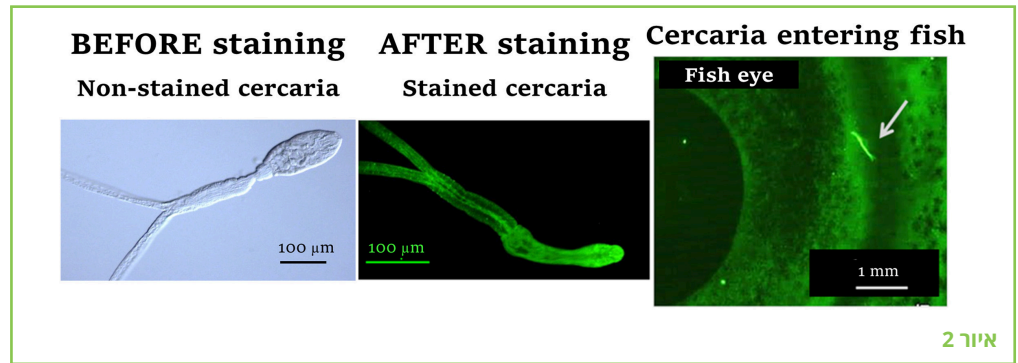
כיצד זחלי *C. longicollis* עם זנב מוצאים דרך מהחלזונות לדגים? Bartoli and Prévot [4] הציעו ש-*C. longicollis*, ברגע שהם משוחררים מהחלזון, מתקרבים לדג המארח על ידי שחייה לכיוון אור השמש ופגישת הדג בעמודת המים. שאלנו את עצמנו האם זחלי *C. longicollis* עם זנב דומים לטפילים אחרים, והאם יש להם סוג של אסטרטגיית מעבר ברגע שהם באים במגע עם הדג. לדוגמה, זחלי *Centrocestus armatus* עם זנב נכנסים למארחים ספציפית דרך הקשקשים [5], וזחלי *Diplostomum spathaceum* עם זנב מדביקים את עיני הדג על ידי חדירה לקשקשים ולעור [6]. אם כן, במטרה להבין אינטראקציות טפיל-מארח (הקשר שבין הזחלים לבין הדג), חקרנו את הנקודות המסוימות, או שערי הכניסה, שהזחלים משתמשים בהם כדי להדביק את הדג.

שערי הכניסה המועדפים על הזחלים לכניסה אל הדג

במטרה לחקור אסטרטגיות מעבר של זחלי *C. longicollis* עם זנב, ראשית היינו צריכים להיות מסוגלים לראות את הזחלים על פני השטח של גוף הדג. כפי שמוצג באיור 2, זחלים עם זנב הם

איור 2

זחלי *C. longicollis* הם שקופים, ולכן סימנו אותם באמצעות פלואורסצנט כדי להיות מסוגלים לראותם ולמקמם על פני השטח של גוף הדגים. תראו כיצד הם נראו לפני (משמאל) ואחרי (באמצע) שהם סומנו באמצעות סמן פלואורסצנט. אתם יכולים לראות כיצד הזחלים נראים מתחת למיקרוסקופ ששימש לבחון את הדגים המודבקים. (מימין): זחל צבוע (מסומן על ידי החץ הלבן) מנסה להיכנס דרך עיני הדג.



איור 2

פלואורסצנטי (Fluorescent)

זוהר. במקרה הזה, זחלים עם זנב נצבעו באמצעות סמן פלואורסצנט כדי לגרום להם להיות בהירים יותר, ולסייע לנו לזהותם ולאתרם על פני השטח של הדג.

קטנים ושקופים, ולכן סימננום על ידי סמן פלואורסצנט מאפשר לנו לראותם במהרה, כזחלים שזוהרים באור פלואורסצנטי. בניסוי שלנו, חמישה עשר דגי *S. aurata* הודבקו כל אחד על ידי 100 זחלים זוהרים עם זנב. אחרי ההדבקה, הדגים מוקמו בקופסה חשוכה עם מספיק מים כדי לכסותם, ואנו צפינו בפני השטח שלהם מתחת למיקרוסקופ מיוחד כדי למקם את הזחלים הזוהרים. רשמנו את המיקומים המדויקים שהזחלים השתמשו בהם כשהם חדרו לתוך הדגים, באמצעות מפת נייר של גוף הדגים. אחרי שחזרנו על התהליך הזה עם חמישה עשר דגים, הרכבנו בסיס נתונים שמסכם את המידע על שערי הכניסה של הזחלים. ערכנו ניתוח מתמטי במטרה לראות אם היו הבדלים בריכוזים של הזחלים בין אזורים שונים בגוף הדגים, והניתוח שלנו הראה שהזחלים עקבו אחרי אסטרטגיה מסוימת. מפת החום שמוצגת באיור 3A משתמשת בצבעים שונים כדי לייצג את הריכוזים של הזחלים, כאשר האזורים הצהובים הם אלה שמכילים יותר זחלים. מפת החום הזו מראה את שערי הכניסה המועדפים של הזחלים – אזורי הגוף ששימשו לעיתים הקרובות ביותר להדבקות מארח הדג. הזחלים אותרו לאורך כל גוף הדגים, אולם הם היו מרוכזים במיוחד באזורים שקרובים לראש, לעיניים ולקשקשים, כמו גם לאזורים שסביב לגב ולבטן של הדגים (איור 3B).

מה המשמעות של זה?

המטרה הסופית של הזחלים היא להגיע למוחו של הדג, שהוא איבר המטרה שלהם. במוח, הזחלים מתבגרים ומחכים לשחף רעב שיצרוך את הדג המודבק. המחקר שלנו מציע שזחלי *C. longicollis* מנסים לחדור לדג על ידי התרכוזות סביב לאזורים מסוימים לעיתים קרובות יותר מאחרים. לכן, האזורים האלה עשויים להיות אטרקטיביים לזחלים מאחר שהם קרובים למוחו של הדג, או מאחר שהם מספקים נתיבי גישה נוחים אליו. המוח אינו רחוק מהעיניים, ולכן זחלים שחודרים דרך העיניים יכולים להגיע למוח בקלות. באותו האופן, חדירה דרך אזור הבטן עשויה להיות קשורה לקרבתם של ה-**pelvic girdles** לאזור הראש במין הדג הזה. חדירה דרך הקשקשים עשויה לספק גישה ישירה לדם דרך מערכת הדם, שיכול לשמש ככביש מהיר ליעד הסופי של המוח. באמצעות חדירה דרך אזור הגב, הזחלים יכולים להשתמש בחוט השדרה ובעצבים ככבישים מהירים למוח.

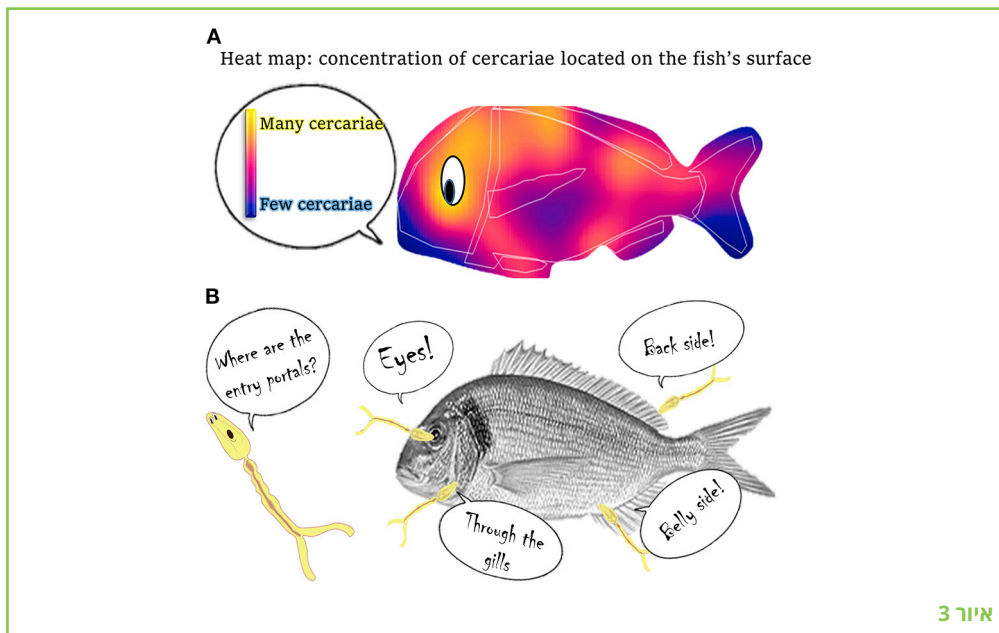
התוצאות שלנו הראו שזחלי *C. longicollis* בחרו שערי כניסה אסטרטגיים כדי להגיע למוחות של הדגים, מה שמראה שטפילים עם מחזור חיים כל כך מורכב לא נשענים רק על מזל – הם פיתחו שיטות מסוימות ומוצלחות כדי להגיע ולהדביק את המארח הבא שלהם. חקירת *C. longicollis* והקשר שלו עם המארח שלו מספקת לנו מידע רב על אינטראקציות טפיל-מארח

Pelvic Girdles

חלקים בשלד הדג שמגשרים על החלל שבין סנפירי האגן.

איור 3

שערי כניסה אל הדג ששימשו את זחלי *C. longicollis* (A) מפת חום, עם צבעים צהובים שמצביעים על המקומות שבהם מצאנו ריכוזים גבוהים יותר של זחלים שמנסים להיכנס לתוך הדג. (B) שערי הכניסה המועדפים שזחלי *C. longicollis* משתמשים בהם כדי לחדור לתוך הדגים.



איור 3

וכן הבנה טובה יותר של אסטרטגיות ההדבקה והחדירה שהזחל יכול לפתח כדי להשלים את מחזור החיים שלו. קשה ללמוד להכיר טפילים בהינתן מחזור החיים המורכב שלהם וגודלם הקטן, אולם חקר אסטרטגיות המעבר שלהם חשוב מאחר שהוא מספק מידע על המערכות האקולוגיות שסובבות אותנו, ועל האורגניזמים שחיים ומתקשרים בתוכן.

תודות

אנו מודות לג'סטין ת. ה. צ'אן עבור הערותיו יקרות הערך על כתב היד הסופי.

מאמר המקור

van Beest, G. S., Villar-Torres, M., Raga, J. A., Montero, F. E., and Born-Torrijos, A. 2019. *In vivo* fluorescent cercariae reveal the entry portals of *Cardiocephaloides longicollis* (Rudolphi, 1819) Dubois, 1982 (Strigeidae) into the gilthead seabream *Sparus aurata* L. *Parasit. Vectors* 12:92. doi: 10.1186/s13071-019-3351-9

מקורות

1. Poulin, R. 1995. "Adaptive" changes in the behaviour of parasitized animals: a critical review. *Int. J. Parasitol.* 25:1371–83. doi: 10.1016/0020-7519(95)00100-X
2. Dobson, A. P. 1988. The population biology of parasite-induced changes in host behavior. A review. *Q. Rev. Biol.* 63:139–65. doi: 10.1086/415837
3. Born-Torrijos, A., Poulin, R., Pérez-del-Olmo, A., Culurgioni, J., Raga, J. A., and Holzer, A. S. 2016. An optimised multi-host trematode life cycle: fishery discards enhance

מערכת אקולוגית (Ecosystem)

מורכבת מכל האורגניזמים החיים והחומר הלא חי. אורגניזמים חיים הם חלק מחברה שבה חברים מתקשרים זה עם זה ועם החומר שסביבם.

- trophic parasite transmission to scavenging birds. *Int. J. Parasitol.* 46:745–53. doi: 10.1016/j.ijpara.2016.06.005
4. Bartoli, P., and Prévot, G., 1986. Stratégies d'infestation des hôtes cibles chez les trématodes marins parasites de *Larus cachinnans michaellis* de Provence. *Ann. Parasitol. Hum. Comp.* 61:533–52. doi: 10.1051/parasite/1986615533
 5. Paller, V. G. V., and Uga, S. 2008. Attachment and penetration of *Centrocestus armatus* (Digenea: Heterophyidae) cercariae to gills of secondary intermediate fish hosts. *J. Parasitol.* 94:578–83. doi: 10.1645/GE-1402.1
 6. Karvonen, A., Seppälä, O., and Valtonen, E. T. 2004. Eye fluke-induced cataract formation in fish: quantitative analysis using an ophthalmological microscope. *Parasitology* 129:473–8. doi: 10.1017/S0031182004006006

פורסם אונליין: 07 במרץ 2022

נערך על ידי: Vishal Shah

מנחה מדעי: Bruno Buzatto, Dr. Gourisankar Roymahapatra

ציטוט: van Beest GS and Born-Torrijos A (2022) איזו דרך למוח? השערים האהובים על טפילים לכניסה אל דגים. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2020.00025-he

van Beest GS and Born-Torrijos A (2020) Which Way to the Brain? A Parasite's Favorite Entry Portals Into Fish. *Front. Young Minds* 8:25. doi: 10.3389/frym.2020.00025

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

COPYRIGHT © 2020 © van Beest and Born-Torrijos. זהו מאמר בנישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

EREN, גיל: 8

קוראים לי Eren. אני בן 8 ואוהב צפרות. אני בכיתה ב'. אני אוהב מסכים וללכת למקומות שטובים לצפרות. תמיד יש ציפור מטרה שאני מנסה למצוא כשאני הולך למקומות של צפרות. אני גם אוהב לקרוא ספרים של פול ג'ינגס, מאחר שהם מוזרים ומגניבים מאוד.

SARVADEB, גיל: 9

Sarva מוכשר בחשיבה ובניתוח של דברים בטבע. הוא כתב רעיונות שונים במחברת שלו מאז שהיה בן 7.



הוא לא רוצה לסיים את הספר שהוא קורא. אבא שלו הוא מדען ידוע. המזונות האהובים עליו הם פיצה וחלב. הוא שחיין טוב.

הכתבות

GABRIELLE S. VAN BEEST

במהלך לימודי הביולוגיה שלי באוניברסיטת ולנסיה, התחלתי ללמוד על טפילים והתאהבתי בהם! כל כך נדהמתי שהתחלתי לשתף פעולה עם יחידת הזואולוגיה ממכון קבנילס למגוון ביולוגי ולביולוגיה אבולוציונית. שם, פגשתי את דוקטור Ana Born-Torrijos, שעבדה עם טפילים מגניבים מאוד Cardiocephaloides longicollis (תולעת טרמטודה). כיום, אני דוקטורנטית באוניברסיטת ולנסיה שחוקרת מַעֲבָר ואסטרטגיות זיהום של C. longicollis. אני גם חוקרת טפילים של מים מתוקים במכון לחקר פריזטים (BC CAS) ברפובליקה הצ'כית. *gavanbe@alumni.uv.es

ANA BORN-TORRIJOS

נולדתי בספרד, ומאז שהייתי ילדה התעניינתי בחיות, והייתי סקרנית במיוחד לגבי ההתנהגות שלהן. כשגדלתי, למדתי ביולוגיה והשלמתי תואר שני במגוון ביולוגי באוניברסיטת ולנסיה (ספרד). המשכתי לחקור פריזטים והשלמתי את תזת הדוקטורט שלי על מחזור החיים ואסטרטגיות המַעֲבָר של פריזטים שנקראים digenean trematodes ונמצאים בסביבות מְחִיָה של חופים. לאחר מכן, החלטתי לעבור לרפובליקה הצ'כית, שם המשכתי את המחקר שלי במכון לחקר פריזטים (BC CAS), וחקרתי אינטראקציות טפיל-מארח, פריטולוגיה אקולוגית ודינמיקות של מַעֲבָר.



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירס מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK