

ירוסים – סוכנים של שינוי באוקיינוסים

Sarit Avrani^{1,2*}, Daniel Sher^{3*}

¹החוג לביולוגיה אבולוציונית וסביבתית, אוניברסיטת חיפה, חיפה, ישראל

²המכון לאבולוציה, אוניברסיטת חיפה, חיפה, ישראל

³החוג לביולוגיה ימית, בית הספר למדעי הים על שם ליאון צ'רני, אוניברסיטת חיפה, חיפה, ישראל

סוקר צעיר

SHASHI-
PREETHAM

גיל: 14



ירוסים נחשבים בדרך כלל כגורמים למחלות רבות. אולם, באוקיינוסים וירוסים הם חלק ממחזור טבעי של חיים ומוות. מאמר זה עוסק בוירוסים ימיים שמשפיעים על פִּיטוֹפְלַנְקְטוֹן – מיקרו-אצות זעירות שיוצרות את הבסיס של שרשרת המזון הימית, ומשפיעות על אקלים כדור הארץ. דרך "מרוץ חימוש" מתמשך בין וירוסים לתאים שהם מדביקים, וירוסים יכולים לקדם את האבולוציה של המאכסנים שלהם, ואפילו לעזור למאכסניהם לרכוש גִּנִּים שיסייעו להם לשרוד. על ידי הריגת מִיְנֵי פִּיטוֹפְלַנְקְטוֹן שנעשים נפוצים מאוד, וירוסים יכולים לאפשר למינים אחרים לגדול, מה שמקדם מגוון ביולוגי. לבסוף, וירוסים משפיעים על מחזורים גלובליים של פחמן ושל יסודות אחרים, ובכך משפיעים בעקיפין על אקלים כדור הארץ.

ירוסים נמצאים בכל מקום, אפילו באוקיינוסים

כולנו שמענו על וירוסים, ויודעים כי הם גורמים למחלות כמו למשל שפעת, אֶבּוֹלָה, אבעבועות שחורות וכמובן מחלת הנשימה שמחולל נגיף הקורונה – COVID-19. מה

מארח (Host)

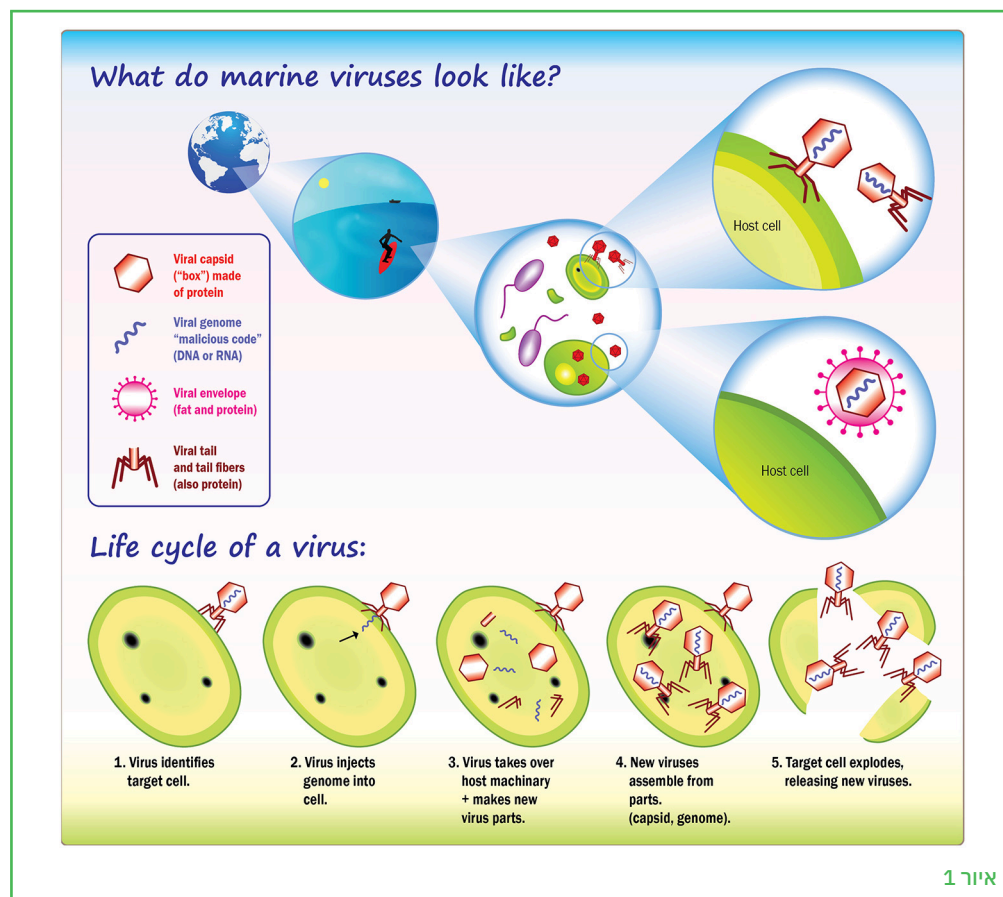
יצור שבו וירוס יכול להתרבות. כל וירוס מתרבה רק במאכסן אחד או בכמה מאכסנים קשורים. המאכסן צריך להכיל את הקולטנים הנכונים שאותם הווירוס יכול לזהות.

פיטופלנקטון (Phytoplankton)

אורגניזמים מיקרוסקופיים שמקבלים את האנרגיה שלהם מהשמש על ידי פוטוסינתזה. הם רכיב חשוב בכל שרשרת מזון ימית.

איור 1

דוגמה למבנים של שני וירוסים ימיים, וסיכום של מחזור החיים הוויראלי: 1. הווירוס מזהה את תא המטרה שלו לתוך התא 3. הווירוס משתלט על מערכת התא המארח, המייצר כעת עוד חלקי וירוסים 4. וירוסים חדשים מתרכבים מהחלקים (קפסיד וגנום) 5. תא המטרה מתפוצץ ומשחרר וירוסים חדשים



איור 1

שפחות ידוע לרוב הוא שווירוסים לא רק גורמים למחלות אצל בני אדם – הם נמצאים בכל מקום, ומדביקים בעיקרו של דבר כל צורת חיים ידועה. חשוב מכך, וירוסים משפיעים לא רק על בריאותם של היצורים שהם מדביקים, אלא גם על המערכת האקולוגית כולה. למעשה, וירוסים הם תורם חשוב למחזור של יסודות כמו למשל פחמן, חנקן וזרחן. וירוסים הם גם סוכנים של שינוי ושל חידוש, שמשפיעים על הגנטיקה ועל האבולוציה של האורגניזמים המאכסנים שלהם, ומגדילים את המגוון הביולוגי של המערכות האקולוגיות שבהן הם נמצאים.

אנו יודעים הרבה על אקולוגיה של וירוסים שנמצאים באוקיינוס. במשך כ-20 השנים האחרונות, למדנו רבות על וירוסים שמדביקים מיקרו-אצות חד-תאיות שנקראות **פיטופלנקטון**, אשר חיות ב-200 המטרים העליונים של האוקיינוסים, שאליהם אור השמש יכול לחדור. פיטופלנקטון ידועים בתור "צמחים של הים" – הם אחראיים על כמחצית מהפוטוסינתזה בכדור הארץ, ומספקים מזון לאורגניזמים ימיים רבים, מחיידקים ועד לוויתנים. בשל החשיבות האקולוגית של פיטופלנקטון, הווירוסים שמשפיעים עליהם נחקרו לעומק (איור 1) [1, 2].

קפסיד (Capsid)

קליפה חלבונית שמגינה על החומר הגנטי של וירוס, במהלך חיפוש אחר מארח חדש להדבקה.

מהו וירוס?

וירוסים יכולים להיחשב כגנו-מכונות ביולוגיות בעלי מטרה אחת – להתרבות. כל הווירוסים מורכבים מ"קופסה" חיצונית עשויה חלבונים שנקראת **קפסיד**, אשר מגינה על הדנ"א

גנום (Genome)

הקט שלם של הוראות שנדרשות כדי לבנות אורגניזם ולשמרו. כל סט הוראות מאוחסן בגן. הגנום הוויראלי מורכב מדנ"א או מרנ"א.

קולטנים (Receptors)

מגוון מולקולות על פני השטח של תאים, שעשויות לשמש כאותות זיהוי על ידי וירוסים. כל וירוס מזהה קולטן מסוים (או קולטנים ספציפיים) על פני השטח של המארח שלו.

או הרנ"א שיוצרים את הגנום של וירוסים. לעיתים הקפסיד מוקף על ידי מעטפה שנייה שמכילה גם מולקולות שומן. זו הסיבה לכך ששטיפת ידיכם בסבון הורסת חלק מהווירוסים לרבות וירוס SARS-COV-2 שגורם למחלת הקורונה – פעולה זו ממוססת את שכבת השומן בוירוס. וירוסים אינם מדביקים כל תא שהם פוגשים. הם צריכים לפגוש את המארח המתאים, שאותו הם מזהים באמצעות מולקולות ספציפיות על פני השטח של תא המארח, שנקראות **קולטנים**. כאשר וירוס פוגש את המארח שלו, או שהוא נכנס לתא או שהוא מזריק את הגנום שלו לתוכו. כעת הווירוס הוא רק קליפה ריקה, אך הגנום שלו הוא כמו קוד זדוני שמשלט על התא המארח, ומאלץ אותו להפוך למפעל לייצור וירוסים חדשים. כאשר הווירוסים החדשים מורכבים בתוך המארח ומוכנים להדביק תאים חדשים, הם משוחררים, בעוד שהתא המארח לעיתים קרובות מתפוצץ ומת.

וירוסים רבים הם די פשוטים, בעלי קוד זדוני שכולל מספר מועט ביותר של "פקודות" (גנים בגנום). חלק מהפקודות האלה מכבות את התהליכים הטבעיים בתוך התא, בעוד שפקודות אחרות מורות לתא להפיק את אבני הבניין שמרכיבות וירוסים חדשים – הגנום הוויראלי; החלבונים שבונים את הקפסיד, ולעיתים שכבת השומן.

אולם, מדענים מצאו שחלק מהווירוסים מורכבים הרבה יותר. כך, לחלק מהווירוסים הימיים יש גנים שמאפשרים להם לשנות תהליכים תאיים, כמו למשל פוטוסינתזה; ייצור של רכיבי תא מסוימים, או את הדרכים שבהן תאים חשים את סביבתם [1]. זה הוביל להשערה שלפיה וירוסים רבים לא רק מכבים את תאי המטרה שלהם. הקוד הזדוני של הווירוס משלט על מרכז הבקרה של התא שנדבק, משנה את האופן שבו המנגנון התאי פועל, והופך את התא המארח לתא וירוס בן-כלאיים שנקרא virocell. ה-virocell מתוכנת להישאר בחיים מספיק זמן כדי לייצר וירוסים בכמות המרביית שניתן [2].

"מרוץ חימוש" בין וירוסים ותאים

הווירוסים יכולים להיות טפילים מפחידים – הם משתלטים על התא המארח וגורמים לו להיות virocell "זומבי". אך התאים המארחים לא רק יושבים מנגד – הם נלחמים חזרה (איור 2). לדוגמה, חלק מהתאים מייצרים מבנים זעירים דמויי-תאים שעשויים להוות מלכודות עבור וירוסים. אז, במקום להדביק את התא האמיתי, וירוסים תוקפים את המלכודות. דרך שכיחה אחרת שבה התאים המארחים נמנעים ממתקפת וירוס היא באמצעות שימוש בהסוואה. תאים מארחים עשויים לשנות את הקולטנים על פני השטח שלהם באופן כזה שהווירוס כבר לא יכול לזהות את התא כמארח אפשרי [3].

חיידקים גם יכולים לנסות להגן על עצמם אחרי שהווירוס הזריק את הקוד המרושע שלו, כדי למנוע ייצור של וירוסים חדשים. לדוגמה, חיידקים עשויים לפרק את הגנום הוויראלי לפיסות קטנות, ובכך לעצור את הווירוס מהשתלטות על התא. לבסוף, חלק מהתאים "מתאבדים" כשהם מבינים שווירוסים השתלטו עליהם. אם התאים מתים מספיק מהר, הווירוסים החדשים עשויים שלא להספיק להרכיב את עצמם ולהיות מוכנים להדביק תאים חדשים.

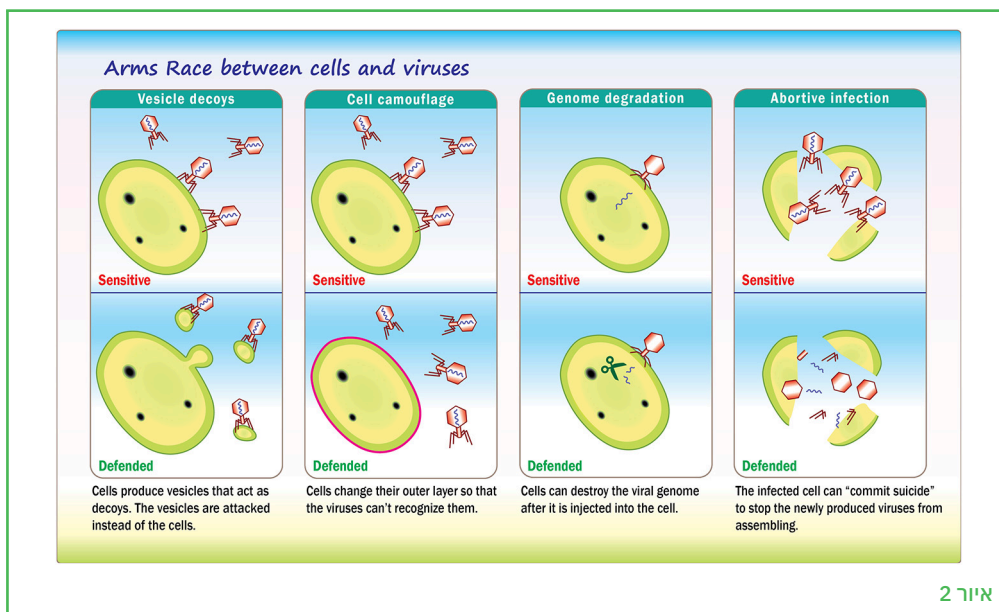
מאחר שמדובר **במרוץ חימוש**, הווירוסים גם מפתחים דרכים להתנגד להגנות של התאים. כאשר התא המארח משנה את הופעתו, וירוסים יכולים להתפתח במטרה לזהות קולטנים

מרוץ חימוש (Arms Race)

מחזור מתמשך שבו טורף מפתח יתרון על הטרף שלו, מלגה בכך שהטרף מפתח את היתרון שלו, וכן הלאה.

איור 2

יחסי הגומלין בין וירוסים לתאים המארחים שלהם. וירוסים והתאים המארחים שלהם משתנים ומסתגלים בלי הרף, במטרה למצוא דרכים להתנגד להגנת ההדדיות כדי לשרוד טוב יותר (זה נקרא "מרוץ חימוש"). השורה העליונה מציגה תאים שרגישים לוורוסים, והשורה התחתונה מציגה כמה מנגנוני הגנה שתאים משתמשים בהם במטרה להגן על עצמם כנגד וירוסים.



חדשים על המארח המוסווה. לעיתים, הווירוס אפילו עשוי להתפתח במטרה לזהות מארחים חדשים שלא יכול היה לזהות קודם. זה ככל הנראה מה שקרה עם וירוס SARS-COV-2 שגורם למחלת הקורונה. במקרה הזה, הווירוס ששימש להדבקת עטלפים או פנגולנים רכש את היכולת להדביק בני אדם. נוסף על כך וירוסים יכולים לעיתים לפלוש למערכת החיסון של המארח, לדוגמה על ידי ייצור חלבונים שמתערבים במנגנוני ההגנה של התא. כדי לשרוד, המארח יצטרך גם להשתנות, במטרה לוודא שמערכת החיסון שלו יכולה לזהות את הווירוס ולעצור אותו. מרוץ החימוש הזה בין וירוסים לתאים מארחים הוא מתמשך, כאשר כל צד מסתגל ומשתנה בתגובה לאסטרטגיות של היריב.

וירוסים כסוכנים של שינוי ומגוון

מרוץ החימוש המתמשך בין וירוסים לבין התאים המארחים שלהם עשוי להידמות לתהליך הרסני, אך כמו דוגמאות אחרות בטבע, תהליך הרסני יכול להביא חיים חדשים. ממש כפי ששריפת יער יכולה באופן פוטנציאלי לאפשר לעצים חדשים ו שונים לגדול, כך וירוס שמדביק והורס אוכלוסייה של חיידקים או פיטופלנקטון יכול לאפשר לאורגניזמים אחרים לגדול במקומם. בתהליך הזה, וירוסים לעיתים קרובות מדביקים את האורגניזמים הנפוצים והמצליחים ביותר, מאחר ששפע גדול משמעותו שקל יותר למצוא תאים מארחים להדבקה. כאשר מארח נפוץ במיוחד נהרג על ידי וירוסים, לאורגניזמים הנדירים יותר יש כעת מספיק מרחב ומזון כדי לגדול, כשהתוצאה היא עלייה במגוון הביולוגי.

לוורוסים יש דרך נוספת להגדיל מגוון – הם גורמים להחלפת גנים בין אורגניזמים. כאשר וירוסים מורכבים בתוך תא מאכסן, לעיתים הם אורזים בטעות פיסות של דנ"א מהתא המאכסן אל תוך הקספידים שלהם, במקום לארוז את הדנ"א שלהם. כאשר הווירוסים ה"מקולקלים" האלה מדביקים תא חדש הם לא יכולים להרוג אותו, מאחר שאין להם את הקוד הזדוני השלם שלהם להזריק. במקום זאת, הם מזריקים את הדנ"א שהם ארזו מהמארח הקודם שלהם, אשר יכול להיות משולב לתוך הקוד של התא המאכסן

החדש – זה יכול להוביל לשינוי גנטי אצל המאכסן. למעשה, כ-8% מהדנ"א האנושי שלנו מורכב מפיסות עתיקות של דנ"א שהגיעו מוורוסים קדומים (שנקראים וירוסים מאובנים). הוורוסים המאובנים האלה מעורבים בתהליכים חשובים בגופנו [4].

השפעותיהם של וירוסים ימיים על שרשראות מזון ומיחזור של יסודות

וירוסים עשויים להיות זעירים – קטנים יותר מפי 1,000 מעובי שערה אנושית – ובכל זאת, כשהם מדביקים תאי פיטופלנקטון, וירוסים יכולים להשפיע על **מארג המזון** הימי כולו, וכן על מְחָזָר של יסודות, כמו למשל פחמן, חנקן וזרחן (איור 3). כאשר פיטופלנקטון מבצעים פוטוסינתזה, הם מנצלים את אנרגיית השמש כדי להפוך פחמן דו-חמצני (CO₂) ומים לסוכר ולחמצן. התהליך הזה מייצר חמצן ומסיר פחמן דו-חמצני מהאטמוספירה. חמצן חיוני למרבית היצורים החיים, ופחמן דו-חמצני הוא גז חממה. הסוכר שמיוצר מהפחמן הדו-חמצני בתהליך הפוטוסינתזה משמש ליצירת מולקולות ביולוגיות אחרות, כמו למשל חלבונים. חלבונים אלה משמשים כמזון עבור המערכת האקולוגית הימית כולה לרבות דגים, **זואופלנקטון**, לוויתנים ובני אדם. באופן זה, הפחמן מהאטמוספירה הופך לחלק משרשרת המזון (איור 3). כאשר וירוסים הורגים את הפיטופלנקטון המאכסנים שלהם, הם עשויים להפריע לתהליך הזה על ידי שחרור תוצרים פוטוסינתטיים למים הסובבים. שחרור זה מונע מחיות גדולות יותר לצרוך פיטופלנקטון, ובאופן פוטנציאלי יכול להפחית את כמות הפחמן שנע במעלה שרשרת המזון. מְדֵי יום, מתרחשות כ-10²⁸ הדבקות ויראליות באוקיינוסים בעולם (1 שאחריו 28 אפסים, או 10 אוקטיליון) [2]. הדבקות אלה משחררות עד למיליארד טונות של פחמן מְתָאִים באופן יומיומי. אף על פי שכל תא פיטופלנקטון הוא זעיר, ההשפעה שיש להם על כדור הארץ שלנו היא עצומה.

מארג מזון (Food Web)

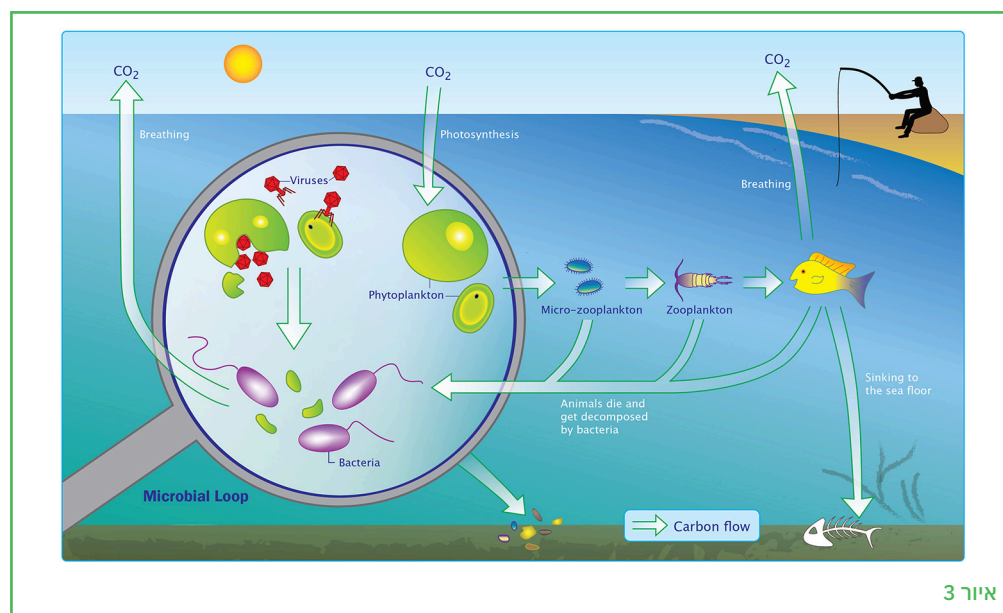
רשת של אורגניזמים שאוכלים זה את זה, כך שהאנרגיה והיסודות זורמים דרך השרשרת, מהטֶרֶף לטורפים.

זואופלנקטון (Zooplankton)

אורגניזמים קטנים מאוד שחיים בסביבות מחיה ימיות. הם ניזונים מפיטופלנקטון, מחיידקים או מזואופלנקטון אחרים. מיקרו-זואופלנקטון מורכבים מתא אחד. זואופלנקטון גדולים יותר יכולים להגיע לגודל של כמה מילימטרים.

איור 3

וירוסים משפיעים על מחזור הפחמן הימי. דרך פיטופלנקטון, פוטוסינתזה, הופכים פחמן למולקולות שבונות תאים חיים. פיטופלנקטון נאכלים על ידי אורגניזמים גדולים יותר, כמו למשל מיקרו-זואופלנקטון, שאז נאכלים על ידי זואופלנקטון גדולים יותר וחיות אחרות, כמו למשל דגים. תהליך זה מעביר את הפחמן במעלה שרשרת המזון. כאשר חיות גדולות יותר נושמות, הן משחררות חלק מהפחמן חזרה לאטמוספירה בתור פחמן דו-חמצני, וכאשר הן מתות, הגוף שלהן שוקע לקרקעית האוקיינוס ומפורק על ידי חיידקים ימיים. בניגוד לכך, פיטופלנקטון שנדבקים על ידי וירוס מתים לפני שהם יכולים להיאכל, והפחמן שלהם ממוחזר במהירות על ידי חיידקים.



איור 3

לעיתים, כאשר וירוסים הורגים את הפיטופלנקטון המאכסנים שלהם, הם יכולים לעודד את גדילתם של פיטופלנקטון וחיידקים אחרים. הסיבה לכך היא שכאשר תא שנדבק על ידי וירוס "מתפוצץ", הוא יכול לשחרר יסודות, כמו חנקן וזרחן, שאז נעשים זמינים עבור פיטופלנקטון וחיידקים אחרים, שיכולים למחזר אותם ולהשתמש בהם עבור גדילה.

לבסוף, כאשר פיטופלנקטון, חיידקים וחיות מתים באוקיינוסים, חלק מהחומר שמרכיב את הגוף שלהם שוקע אל קרקעית האוקיינוס. זה כולל את הפחמן הדו-חמצני שבמקור נלקח על ידי פיטופלנקטון, מה שתורם להסרה יעילה של גז החממה הזה מהאטמוספירה, ומפחית את ההתחממות הגלובלית. כאשר יירוסיים הורסים פיטופלנקטון, תאי הפיטופלנקטון מפורקים לפיסות קטנות יותר שלעיתים רחוקות שוקעות, ואינן זמינות לצריכתן של חיות גדולות יותר. לכן, יירוסיים ימייים ככל הנראה מפחיתים את כמות הפחמן הדו-חמצני שמועבר לקרקעית האוקיינוסים, ובכך משפיעים לא רק על חייהם של התאים שהם מדביקים, אלא גם על שרשרת המזון הימית כולה וייתכן שאפילו על אקלים כדור הארץ שלנו [2, 5].

מרוץ חימוש בטיפת מים

בפעם הבאה שתלכו לחוף הים, או לאגם, נהר, או מעיין, זכרו שכל טיפת מים שופעת חיים מיקרוסקופיים, כמו למשל פיטופלנקטון וחיידקים, לצד הווירוסים שלהם. בתוך כל טיפת מים מתקיים מרוץ חימוש מתמשך בין הווירוסים למאכסניהם, שמביא עימו מוות, אך גם גדילה ומגוון. יירוסיים ימייים הם חלק ממחזור חיים ומוות טבעי באוקיינוס. בכך יצורים זעירים אלה יכולים להיות שחקנים מרכזיים בבריאות כדור הארץ שלנו.

הודות

אנו מודים לשׂרׂי ערן הרשקוביץ' על סבלנותה וכישרונה בציור האיורים עבור המאמר. אנו מבקשים להודות גם לעינב ולעידן גרטן, לאלון ולמעין נשר, לארי האריס, ולגאיה סגרה' על הצעותיהם המצוינות הרבות, ולניצן שר על בדיקת הגרסא העברית.

מקורות

1. Breitbart, M. 2012. Marine viruses: truth or dare. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 4:425–48. doi: 10.1146/annurev-marine-120709-142805
2. Breitbart, M., Bonnain, C., Malki, K., and Sawaya, N. A. 2018. Phage puppet masters of the marine microbial realm. *Nat. Microbiol.* 3:754–66. doi: 10.1038/s41564-018-0166-y
3. Labrie, S. J., Samson, J. E., and Moineau, S. 2010. Bacteriophage resistance mechanisms. *Nat. Rev. Microbiol.* 8:317–27. doi: 10.1038/nrmicro2315
4. Chuong, E. B. 2018. The placenta goes viral: retroviruses control gene expression in pregnancy. *PLoS Biol.* 16:e3000028. doi: 10.1371/journal.pbio.3000028
5. Suttle, C. A. 2007. Marine viruses—major players in the global ecosystem. *Nat. Rev. Microbiol.* 5:801–12. doi: 10.1038/nrmicro1750

פורסם אונליין: 20 בדצמבר 2022

נערך על ידי: Sanae Chiba

מנחה מדעי: Sreenivas Ravella

Front. Young Minds. (2022) Avrani S and Sher D – סוכנים של שינוי באוקיינוסים. doi: 10.3389/frym.2021.569372-he

Avrani S and Sher D (2021) Viruses—Agents of Change in the Oceans. **תורגם והותאם מ:** Front. Young Minds 9:569372. doi: 10.3389/frym.2021.569372

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

COPYRIGHT © 2021 © 2022 Avrani and Sher. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(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.

סוקר צעיר

SHASHIPREETHAM, גיל: 14

שלום, שמי נְשִׁי, אני בן 14, לומד בכיתה ט בבית ספר פְּנִיָּלִים. אני נוהג לשחק כדורגל וכדורסל. המקצועות האהובים עליי הם מתמטיקה ומחשבים. אני מחזיק בשיא גינס ארבע פעמים במשחק רוקט ליג, ושמי מופיע במהדורת הגיימרים של ספר שיאי גינס העולמי לשנת 2018.

הכותבים

SARIT AVRANI

אני מרצה במחלקה לאבולוציה וביולוגיה סביבתית במכון לאבולוציה באוניברסיטת חיפה בישראל. במעבדה שלי, אנו חוקרים אינטראקציות וירוס-מארח בסביבות ימיות, ומתמקדים בהשפעה שיש לאינטראקציות האלה על האקולוגיה והאבולוציה של וירוסים ושל מארחים. אני מוצאת שוויוסטים הם מרגשים מאוד הודות ליכולתם להשפיע על מארחיהם ועל הסביבה בדרכים רבות כל כך. יתרה מזו, גודלם הקטן מועיל לתכנון ניסויים. בזמני הפנוי, אני אוהבת לפגוש חברים ולבלות עם משפחתי.

*savrani@univ.haifa.ac.il

DANIEL SHER

אני פרופסור בחוג לביולוגיה ימית, שהוא חלק מבית ספר לאון צ'רני למדעי הים באוניברסיטת חיפה בישראל. במעבדה שלי, אנו חוקרים כיצד מיקרואורגניזמים מתקשרים באוקיינוסים, ומנסים להבין את ה"שפות" הכימיות שהם משתמשים בהן כדי לתקשר. החלק הטוב ביותר בעריכת מחקר הוא ההתרגשות



שהמדע גורם שניתן לחלוק עם סטודנטים ועמיתים. בזמני הפנוי, אני אוהב לטייל, לצלול, לצלם, לבשל ולבלות עם משפחתי. *dsher@univ.haifa.ac.il

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



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
 Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK