



## התמנון: חיית מודל ייחודית לחקר מנגנוני המוח ומרכיביו

Tal Shomrat\*, Nir Neshet

הפקולטה למדעי הים, המרכז האקדמי רופין, מכמורת, ישראל

### סוקרים צעירים

AVIV  
גיל: 15



ISRAEL ARTS  
AND  
SCIENCE  
ACADEMY  
גיל: 15-14



מהם מרכיבי המוח והמנגנונים בו שחשובים ליכולת למידה מורכבת, כמו להטמיע במהירות את סדר הפעולות שיש לבצע כדי לתפעל יישומון חדש בטלפון? מהו המנגנון המוחי שמאפשר לאחסן זיכרונות ולשלוף אותם במהירות רבה גם לאחר שנים, למשל, להיזכר במחנכת הראשונה מכיתה א? איזה חלק במוח מאפשר יצירתיות וגמישות מחשבתית, כלומר היכולת לשנות הרגלים ולהסתגל במהירות לשינויים, דוגמת רכישת שליטה זריזה בטלפון חדש בעל ממשק שונה מהמוכר? הניסיון לענות על שאלות אלה נמצא במרכז תחום חקר המוח. מאמר זה יציג כיצד מחקר נוירוביולוגי בתמנון יכול לסייע במציאת תשובות לשאלות הללו. זאת על ידי מחקר בגישת ביולוגיה השוואתית, שבו משווים בין מוח התמנון ויכולותיו לאלו של חיות מודל אחרות.

### האם ניתן לחקור בתמנון התנהגות מורכבת ויכולת למידה גבוהה ואם כן, מה מיוחד בחקר התמנון?

התמנונים והדיונונים שייכים למערכת הרכיכות, קבוצת בעלי חיים שמורכבת ברובה מחלזונות וצדפות. אם כן, נשאלת השאלה האם בתמנון, שאפשר לראות בו מעין "חילזון" מפותח, ניתן לחקור התנהגות מורכבת ויכולות למידה גבוהות? אכן, התמנונים והדיונונים מהווים קבוצה נפרדת במערכת הרכיכות, המכונה "ראש-רגלאים" (הראש מחובר ישירות לזרועות - "רגליים",

איור 1). להבדיל מהחלזונות ומהצדפות, הראש-רגלאים ניחנו במוח מרכזי מפותח באופן יוצא דופן לרכיכות ולחסרי חוליות בכלל.

קבוצה זו מתאפיינת גם במורכבות התנהגותית ובגמישות התנהגותית המשתוות לאלה של יונקים וציפורים [1]. רכיכות פשוטות כמו החילזון מפגינות התנהגות פשוטה מאוד. למשל, חילזון ימי רעב ינוע לכיוון שממנו מגיע ריח האצות שאותן הוא אוהב לאכול, ויתקדם לכיווןן כאשר הוא שומר על הנתבי שבו עוצמת הריח הולכת ומתגברת, ומסמנת לו התקדמות אל עבר המזון שהוא מקור הריח. ייתכן שילמד כי ריח מסוים מקורו במזון טעים במיוחד, ולכן יבחר בריח זה על פני ריחות אחרים אם ייתקל בו שוב, אבל ככלל, החילזון יחזור תמיד על אותה התנהגות פשוטה של חיפוש מזון.

לעומת החילזון, התמנון מפגין התנהגות מורכבת בהרבה. תמנון ניזון מצדפות, סרטנים ודגים. כל אחד מסוגי הטרף האלה מצריך התנהגות ציד שונה: מצדפות וקונכיות צריך לשלוף את החיה שבתוכן. זו משימה לא פשוטה, שאותה פותר התמנון על ידי קדיחת חור בקונכיה והזרקת ארס בנקודה מדויקת שמאפשרת שיתוק והרפיה של שרירי החיה ושליפתה מהקונכיה. כדי לטרוף סרטנים הוא מתגנב בזהירות כדי שהסרטן לא יבחין בו מרחוק ויברח, ואז תוקף במהירות ובמיומנות שמונעות מהסרטן לצבט אותו ולגרם לו נזק.

התמנון לא רק לומד וזוכר כיצד לצוד כל אחד מסוגי הטרף השונים, אלא ניתן להניח שהוא משנן פרטים נוספים כגון באיזו עונה או זמן במשך היום ובאיזה אזור בשונית יוכל לצוד טרף מסוים. נוסף על כך התמנונים מראים התנהגות מורכבת כמו למידה מהתבוננות בפרט אחר. נמצא כי תמנונים שצפו בתמנונים אחרים פותרים בעיה – למשל להבין כיצד לפתוח צנצנת מזון על ידי הברגת המכסה (**סרטון 1**) – מצליחים להשתמש בידע שלמדו ולמצוא את הפתרון מהר בהרבה מתמנונים שלא זכו ללמוד מהסתכלות על תמנונים אחרים מבצעים את הפעולה. תמנונים גם נצפים לא פעם כשהם מפגינים סקרנות גדולה ואף התנהגות משחק כלפי חפצים שאינם מזון (**סרטון 2**). דוגמאות אלה מראות בבירור שלא מדובר בחילזון פשוט. לעומת זאת היכולות שאותן מפגין התמנון דומות לאלה של חולדות ועכברים, שהן חיות המודל העיקריות במדעי המוח, מאפיין שמוביל אותנו לשאלה הבאה:

## מה מציב את התמנון כחיית מודל ראויה למדעי המוח?

שאלה זו נשאלת כיוון שבהשוואה לתמנונים, חולדות ועכברים קל באופן ניכר לגדל ולהרבות במעבדה – למשל, הם אינם זקוקים למערכת אקווריומים מורכבת. נוסף על כך להבדיל מתמנונים, החולדות, ובעיקר העכברים, ניתנים למניפולציות גנטיות שרובן הגדול בלתי אפשרי עדיין בתמנונים. אולי ההבדל הכי משמעותי הוא שחולדות ועכברים הם יונקים כמונו, ולכן חולקים איתנו דמיון רב בכל הקשור למבנה המוח ותפקודו, ומהווים בסיס טוב להבנת המוח האנושי.

ובכן, מה שמציב את התמנון כחיית מודל ייחודית לחקר המוח אינו הדמיון אלא דווקא השוני! היונקים כגון החולדה ובני האדם חלקו אב קדמון משותף עם התמנונים לפני יותר מחצי מיליארד שנה (איור 2). יצור פרהיסטורי זה היה סוג של תולעת ללא מוח, ומאז, אותו יצור התפתח בשני מסלולים נפרדים – אחד שבסופו נוצרו היונקים, והשני שממנו נוצר התמנון.

### סרטון 1

תמנון מוצא פתרון לבעיה שלא נתקל בה בעבר. הוא פותח מכסה מוברג של בקבוק כדי להשיג חתיכת דג.

### סרטון 2

תמנון מציג התנהגות משחק עם מכסה פלסטיק של בקבוק.

### מניפולציות גנטיות (Genetic manipulations)

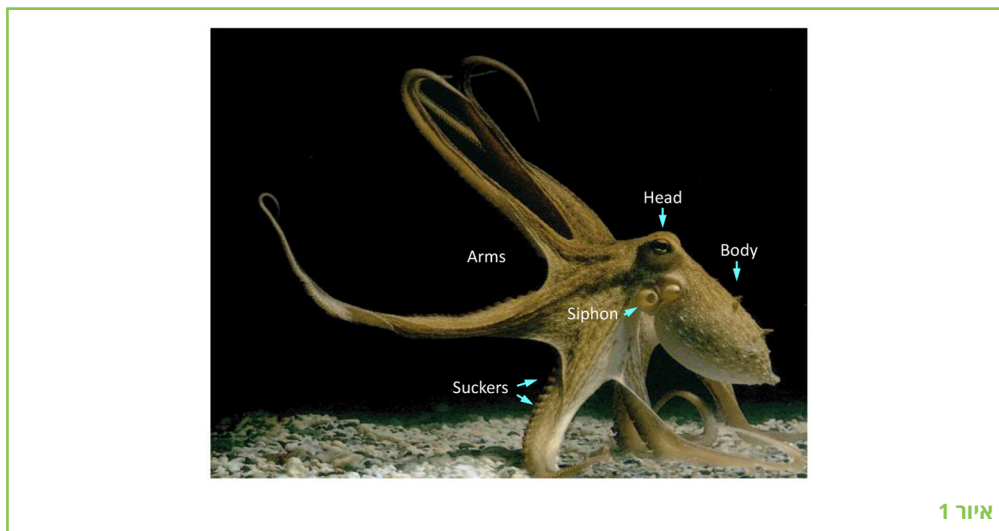
שינוי מלאכותי של גנים ביצור חי, שגורם לשינוי תכונותיו. באמצעות שיטה זו ניתן למשל לזהות אופן פעילות חלבונים שונים ותפקידם, על ידי סימנם או שינוי עוצמת פעילותם ושליטה בה.

### חיית מודל (Model animal)

לרוב חיית מעבדה, להבדיל מחיות בר (מחקר שדה) או חיות משק (חקלאות), בעלת תכונות מסוימות שמאפשרות מחקר שתוצאותיו מספקות הבנה גם לגבי הביולוגיה בחיות אחרות.

**איור 1**

**מבנה גופו של התמנון.**  
 לתמנון שמונה זרועות, לאורכה של כל זרוע ישנם מאות כפתורי הצמדה (Suckers, מוצג גם באיור 2) שמסוגלים להידבק לטרף או לסלעים. כפתורים אלה הם בעלי רגישות דומה לזו של הלשון שלנו, ובאמצעותם התמנון יכול לחוש טעם ומרקם. הזרועות מחוברות ישירות לראש התמנון, ומצידו השני הראש מחובר לגוף המכיל את איברי הגוף כגון זימים, מערכת העיכול והרבייה. איבר מעניין נוסף הוא הסיפון (Siphon) המשמש "לנשיפת" מים לאחר "שאוורור" את הזימים, להוצאת צרכים ולהשפצת דיו ומים לצורך הגנה וטריפה (התמונה מ-Benny Hochner-HUJ).



**איור 1**

כיוון שהתמנון התפתח בצורה כל כך שונה ובסביבה אחרת (ים מול יבשה), בבסיס השימוש בתמנון להבנת מנגנונים מוחיים עומדת ההשוואה בין מוח התמנון ויכולותיו לאלה של חיות אחרות, דוגמת החולדות והעכברים [1].

דמיינו שאתם מבקרים מהעבר, מעולם לא ראיתם סמארטפון ואתם רוצים להבין את עקרונות הפעולה שלו. אחת הדרכים לעשות זאת תהיה באמצעות השוואה בין שני סוגים שונים של טלפונים ניידים, למשל, "אייפון" של חברת אפל, ו"גלקסי" של חברת סמסונג. ההשוואה בין שני המכשירים שפותחו במקביל בחברות שונות, מאפשרת להגיע לתובנות רבות לגבי המרכיבים השונים וחשיבותם בטלפון הנייד. כאשר נבחן את המכשירים נמצא למשל שלשניהם מסך מגע; ממשק הפעלה מבוסס אייקונים גרפיים וחיבור רציף לרשת האינטרנט לטובת הפעלת היישומים השונים. כיוון שכל אלה מאפיינים משותפים, ניתן להסיק שמדובר בעקרונות חשובים במבנה הטלפון הנייד ובאופן הפעלתו. לעומת זאת בכל אחד מהמכשירים תוכנת ההפעלה; המִסְעָן; ממשק הכפתורים המכניים והאייקונים של היישומים נבדלים. מכך אפשר להסיק כי אלה אינם עקרונות חשובים, וניתן לקבל יכולות דומות באִפְּנִים שונים. בדומה לכך, השוואה בין מוחות התמנון והחולדה ויכולותיהם, מאפשרת לחשוף עקרונות ביולוגיים בסיסיים כגון מה נדרש ממבנה המוח כדי להוציא לפועל התנהגות מורכבת ויכולת למידה גבוהה. כמו כן אפשר לבחון אילו מנגנונים השתכללו והתפתחו לאורך שנות האבולוציה במוח התמנון, שאינם קיימים בחלזונות פשוטים. ניתן להניח שמנגנונים "חדשים" אלה, הם שמאפשרים לתמנון יכולות דומות לאלה של חיות מפותחות כגון חולדות ועכברים. גישת מחקר זו מכונה **ביולוגיה השוואתית** [1].

**ביולוגיה השוואתית (Comparative biology)**

תחום חקר העושה שימוש בשוונות ובהבדלים טבעיים כדי להבין את דפוסי החיים בכל הרמות - מְנִיָּים ועד חברות - ואת תפקידים המשמעותי של אורגניזמים במערכות אקולוגיות.

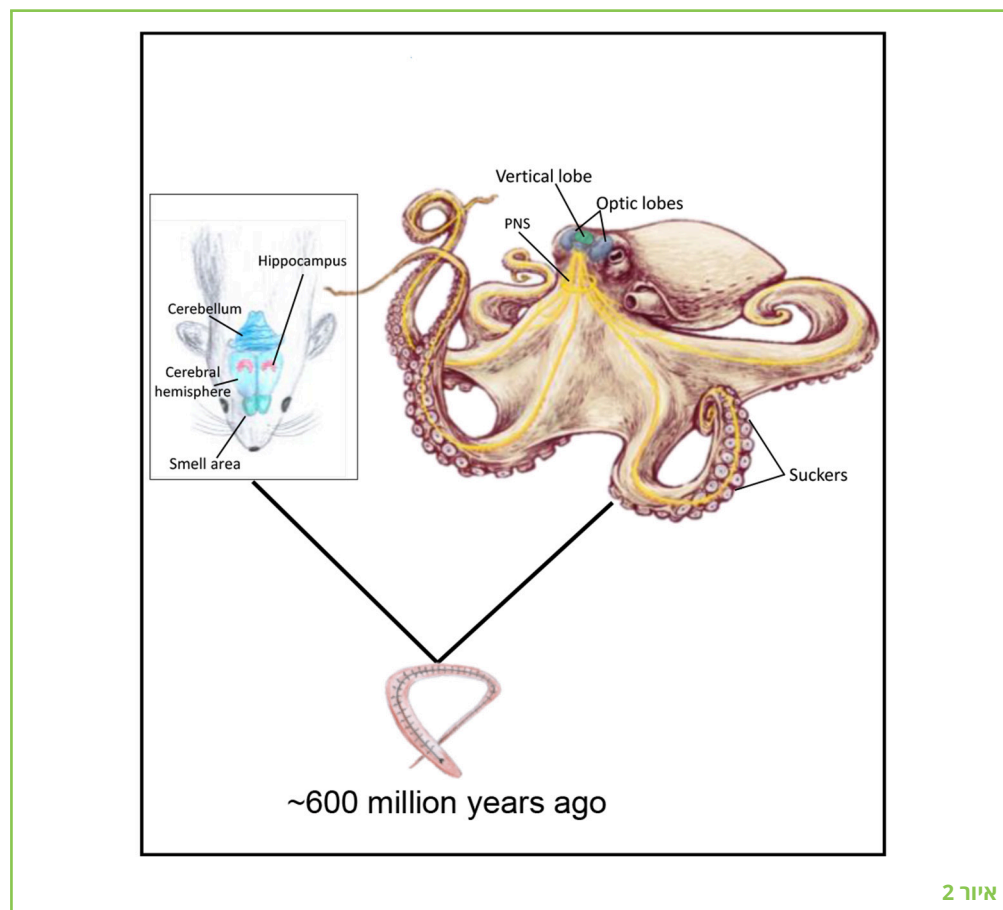
**דוגמאות לממצאים מתוך המחקר בתמנונים**

ברכיכות פשוטות שאינן בעלות מוח מרכזי, כמו החלזונות, הלמידה והזיכרון מתרחשים במרכזים עצביים הפזורים באזורים שונים בגוף (נְנִגְלִינִים). לדוגמה, הזיכרון הנרכש בעקבות אכילת מזון שגורם לצריבה בפה נוצר ונשמר על ידי מערכת העצבים ששולטת בפה, וממנה גם יישלף בפעם הבאה שהחילזון יטעם את המזון המכאיב. לעומת זאת ביונקים כמונו, הלמידה והזיכרון מתרחשים במוח ולא באיברי הגוף, למשל, עמידה על הקשר בין טעם וניל וגלידה קרה, בצבע

**איור 2**

**לתמנונים והיונקים אב קדמון משותף שחי לפני יותר מחצי מיליארד שנה.**

מאז, כל אחת מהקבוצות התפתחה בדרכים שונות. מניחים שהאב הקדמון היה סוג של תולעת בעלת מערכת עצבים פשוטה, כנראה ללא מוח מרכזי. כלומר, המוחות של כל אחת מהחיות נוצרו לגמרי בנפרד. לתמנון מוח שמוזכר במבנה הכללי שלו מוח של חרקים, ולחולדה מוח דומה במבנה הבסיסי לזה שלנו, בני האדם. ההיפוקמפוס של התמנון, המשמש ללמידה המתבססת על חוש הראייה, נקרא Vertical lobe ונמצא בחלק העליון של המוח (בירוק). בצהוב - מערכת העצבים הגופנית (PNS) שמפותחת מאוד בתמנון. ההיפוקמפוסים של החולדה (בוורוד) נמצאים מתחת לקליפת המוח. (איור תמנון - מיכאל אפלבוים, איורי החולדה והתולעת - ענת שמרת).



איור 2

**היפוקמפוס (Hippocampus)**

אזור במוח, שבאדם נמצא באונה הרקתית, בשני צידי המוח. לאיבר זה תפקיד בניווט וביזרון. ההיפוקמפוס הוא המבנה הגדול ביותר במערכת הלימבית, האחראית על מוטיבציה, רגשות, זיכרון ולמידה, ועל הקשרים ביניהם.

**רשת שתי וערב (Horizontally and vertically net)**

סידור של השלוחות העצביות לאורך ולרוחב, בהצלבה.

**זיכרון אסוציאטיבי (Associative memory)**

נוצר לאחר למידה של הקשר בין דברים שונים. לדוגמה, הקשר בין המנגינה שמשמיע אוטו גלידה לרכב שמוכר גלידות. אחרי שהקשר נלמד, נדע שיש אוטו גלידה בסביבה רק משמיעת המנגינה.

לבן, מתבצעים במוח ולא בלשון. כמו כן במוח של יונקים התפתח אזור שנקרא **היפוקמפוס**, שתפקידו העיקרי לחבר את כלל הדברים שמעובדים במוחנו כגון מה שאנו רואים, שומעים, מריחים ומרגישים לכדי זיכרון של אירוע מסוים. במוח התמנון התפתח במקביל אזור שדומה בתפקידו לזה של ההיפוקמפוס (Octopus Vertical Lobe, איור 2). סידור תאי העצב בהיפוקמפוסים של היונקים והתמנון התפתח באופן דומה של **רשת שתי וערב**, שכנראה הכרחית ליצירת קישורים רבים לכדי **זיכרון אסוציאטיבי**. התפתחות אזור ייעודי במוחות של יונקים ושל תמנונים, שתפקידו לייצר זיכרונות, מובילה למסקנה שמדובר במבנה מוחי הכרחי ללמידה מורכבת, בדומה למרכיבי חמרה דומים בטלפונים ניידים שונים, כמו מסך מגע. אבל, מה לגבי התכנה? כלומר המנגנון הביולוגי בתאי העצב שמאפשר ליצור את הזיכרונות? נמצא כי תאי העצב בהיפוקמפוס של האדם מצטיינים ביכולתם לשנות במהירות וביעילות את הקשרים ביניהם וכך ליצור זיכרונות חדשים, למשל לקשר בין תאי עצב שקשורים לשיר מסוים עם קבוצה אחרת של תאי עצב שמייצגת את פניו של הזמר ששר אותו. גם תאי העצב בהיפוקמפוס של התמנון מסוגלים לשנות את עוצמת הקשרים ביניהם במהירות וביעילות, אבל המנגנון שדרכו מתבצע השינוי שונה מזה שנמצא ביונקים. מכאן אנו מסיקים שיכולת שינוי הקשרים בהיפוקמפוס הכרחית ללמידה, אבל הדרך שבה משתנים הקשרים עשויה להתבצע באופנים שונים, ולכן אין מדובר בעקרונות ביולוגיים [2, 3].

מאפיין מעניין וייחודי לתמנון, הוא התפתחותם של שני היפוקמפוסים - אחד שתפקידו ליצור זיכרונות שמבוססים על ראייה (מידע שמגיע מהעין), ושני שתפקידו ליצור זיכרונות שקשורים לטעם ולמגע (מידע שמגיע מהזרועות, איור 1).

במחקר שמתנהל במעבדתנו אנו ממשיכים לחקור את מוח התמנון בגישה של ביולוגיה השוואתית, אבל הפעם ההשוואה אינה רק למוחות היונקים או הרכיכות הפשוטות, אלא בעיקרה בין שתי מערכות הלמידה במוח התמנון. לדוגמה, מצאנו שאות עצבי (נוירוטרנסמיטר) בשם סרוטונין גורם לחיזוק של קשרים בהיפוקמפוס האחד – האיבר שאחראי ליצירת זיכרונות המבוססים על מה שהתמנון רואה – בעוד שבהיפוקמפוס השני – האיבר שתפקידו ליצור זיכרונות המבוססים על מגע וטעם – הסרוטונין גורם להחלשה של הקשרים. כרגע אנו מעוניינים להבין אם יש לכך משמעות שקשורה לתפקיד השונה של כל אחד מהאזורים.

הבדל משמעותי נוסף בין מבנה המוח ומערכת העצבים של התמנון לזה של יונקים הוא הימצאותה של מערכת עצבים גופנית מפותחת ביותר בתמנון (PNS, איור 2). להבדיל מהידיים שלנו, זרועות התמנון מסוגלות לבצע מגוון פעולות באופן עצמאי, ללא תלות במוח. למשל, אם ננתק את זרוע התמנון מגופו ונצבט אותה בקצה, היא תבצע תנועת רפלקס מהירה של התקפלות והתרחקות. להבדיל, אם ננתק את היד שלנו ממערכת העצבים המרכזית וניגע במשהו חם, היא תישאר חסרת תנועה. מורכבותה של מערכת העצבים הגופנית ויכולותיה בתמנון מעלות את האפשרות שבדומה לרכיכות פשוטות, זיכרון מלמידה פשוטה יכול להיווצר בזרוע עצמה, שתתנהג בצורה שונה לאחר הלמידה, גם כשהיא מנותקת מהמוח.

## סיכום

לתמנון יכולות התנהגותיות שמשוות לאלו של יונקים כגון חולדות (חיית המודל העיקרית בחקר המוח) ועם זאת מערכת עצבים הכוללת מוח מרכזי שונה מאוד, שהתפתח במסלול מקביל במהלך האבולוציה. מאפיינים אלה מציבים את התמנון כחיית מודל ייחודית למחקר בגישה של ביולוגיה השוואתית. מחקר זה עשוי לספק הבנה על אודות חשיבות המרכיבים השונים במוח ותפקידיהם על פי הדמיון והשוני בין מוח התמנון לזה של היונקים, ובד בבד לחשוף מנגנונים מעניינים שהתפתחו באופן ייחודי בתמנון [1].

## מקורות

1. Schnell, A. K., Amodio, P., Boeckle, M. and Clayton, N. S. 2021. How intelligent is a cephalopod? Lessons from comparative cognition. *Biol Rev.* 96:162–78. doi: 10.1111/brv.12651
2. Shomrat, T., Turchetti-Maia, A. L., Stern-Mentch, N., Basil, J. A., and Hochner, B. 2015. The vertical lobe of cephalopods: an attractive brain structure for understanding the evolution of advanced learning and memory systems. *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sens. Neural Behav. Physiol.* 201:947–56. doi: 10.1007/s00359-015-1023-6
3. Shomrat, T., Graindorge, N., Bellanger, C., Fiorito, G., Loewenstein, Y., and Hochner, B. 2011. Alternative sites of synaptic plasticity in two homologous “fan-out fan-in” learning and memory networks. *Curr. Biol.* 21:1773–82. doi: 10.1016/j.cub.2011.09.011

פורסם אונליין: 22 בפברואר 2022

נערך על ידי: Idan Segev

**מנחה מדעי:** Idan Segev

**ציטוט:** Shomrat T and Neshar N (2022) התמנן: חיית מודל ייחודית לחקר מנגנוני המוח ומרכיביו. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2021.752743-he

**תורגם והותאם:** Shomrat T and Neshar N (2021) The Octopus: A Unique Animal for Studying the Brain. Front. Young Minds 9:752743. doi: 10.3389/frym.2021.752743

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

**COPYRIGHT** © 2021 © Shomrat and Neshar 2022. 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 למחברים (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****AVIV, גיל: 15**

קוראים לי אביב. אני אוהב לעשות הרבה דברים: לנגן בפסנתר- נסעתי לתחרויות בינלאומיות, ולהשתתף בדיונים: לדבר מול קהל על נושאים שונים. אני גם אוהב לשחק כדורסל, לטייל ולשחק פינג פונג.

**ISRAEL ARTS AND SCIENCE ACADEMY, גיל: 14-15**

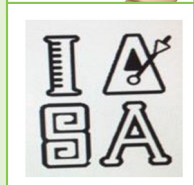
התיכון הישראלי למדעים ולאומנויות הוא מקום לתלמידים סקרנים שאוהבים ללמוד. בכיתה ט, במסגרת שיעורי הבחירה, אנו 15 תלמידות ותלמידים אשר קוראים מאמרים מדעיים שבחרנו בהם. את הקורס הובילה ענת מעוז, מנהלת חטיבת הביניים שלנו, ובעלת תואר שני בביולוגיה ימית.

**הכותבים****TAL SHOMRAT**

אני חוקר בפקולטה למדעי הים במכללת רופין. במעבדה על שפת הים התיכון אני מגדל תמנונים, דיונונים ותולעים שטוחות הנקראות פלנריות. באמצעות מבחני התנהגות ובחינה של הפעילות העצבית במוחותיהן של שלוש חיות המודל, אני מעוניין להבין את הבסיס הניורוביולוגי להתנהגות מורכבת, למידה וזיכרון. אני צולל מגיל צעיר מאוד, וההיכרות שלי עם התמנן נוצרה עוד בילדותי, הרבה לפני שידעתי שיום אחד אהיה חוקר של היצורים המופלאים הללו. \*tal.shomrat@mail.huji.ac.il

**NIR NESHER**

גדלתי בקיבוץ בית זרע. כילד וכנער בן קיבוץ העברתי את רוב זמני בטבע ובעבודות חקלאיות. אחרי השירות הצבאי נסעתי לטיול בעולם שנמשך כמעט עשור, ועורר בי עניין רב בנושאים הקשורים למדעי הים ולמדעי כדור הארץ. כששבת, למדתי מדעי הים וכיום אני דוקטור בתחום, חוקר ומרצה בכיר בפקולטה למדעי הים של המרכז האקדמי רופין. במעבדתנו, דוקטור טל שמרת ואני חוקרים יחד פיזיולוגיה של אחת החיות המעניינות בטבע, התמנן. אנו מתמקדים בהתנהגות, זיכרון ולמידה, ובמערכת השליטה המוטורית הייחודית שהתפתחה ביצור גמיש ורב-זרועות זה.



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