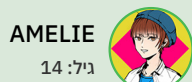


## כוח הַטְלוֹמֵרִים: איך לחיות חיים ארוכים יותר ובריאים יותר

Elizabeth Blackburn\*

המחלקה לבייכמיה ולביופיזיקה, אוניברסיטת קליפורניה, סן פרנסיסקו, סן פרנסיסקו, קליפורניה, ארה"ב

### סוקרים צעירים



האם ידעתם כי ההחלטות שאתם מקבלים בחיי היומיום, כמו באיזו מידה אתם עוסקים בפעילות גופנית; מה אתם אוכלים; ואפילו הדרך שבה אתם חושבים, יכולות לשנות את היחידות הבסיסיות המצויות בתאי הגוף? במאמר זה, אספר לכם על אודות הַטְלוֹמֵרִים. אלו הם הקצוות המגינים של מולקולות הדנ"א – המולקולות המאחסנות את הַנְּגִינִים של כל אורגניזם. אציג בפניכם גם אַנְזִיִּים שגילינו, בשם טְלוֹמֵרָאז, האחראי על הוספת הטלומרים ועל תחזוקתם. לאחר שנצלול לפרטים המולקולריים של הטלומרים ושל הטלומראזים, אחשוף בפניכם כמה קשרים מעניינים מאוד בין הטלומרים לבריאות האדם. אני מקווה כי עד לסיום קריאת המאמר, גם אתם תתרשמו כי הדרך שבה הגורמים הפסיכולוגיים, הסביבתיים והחברתיים יכולים להשפיע על יסודות הביולוגיה שלנו – היא ללא ספק מדהימה.

הפרופסורית אליזבת בֵּלְקֵבֶרן זכתה בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 2009, במשותף עם הפרופסורית קרול גְרִיִּידר והפרופסור ג'ק שוֹסְטֵק, עבור הגילוי כיצד הטלומרים מגינים על הכרומוזומים, ועל גילוי האנזים טלומראז.

## הקצוות המגינים של הדניא

החיים, על מורכבותם הרבה, הם חידה עצומה. אנשים סקרנים, כמוכם וכמוני, נוטים לשאול שאלות כמו 'מה זה?' 'מה מתרחש כאן?', ו'מדוע זה קורה כך?'. בחרתי לתעל את הסקרנות הבלתי נדלית הזו למחקר בתחום הביולוגיה – מדעי החיים. היות שביולוגיה היא דבר כה מורכב, עליכם לשאול את עצמכם תמיד: מָהם הדברים שבאפשרותי להבין, ובמה עליי למקד את המחקר שלי? אחרת, כל פרטי התופעות הביולוגיות שאתם חוקרים עלולים להציף אתכם ברגע. אחד מנתיבי המחקר שאתם עשויים לבחור בתחום הביולוגיה מכונה ביולוגיה מולקולרית. במסגרת תחום זה אנו בוחנים תהליכים ביולוגיים באמצעות מחקר המולקולות השונות ויחסי הגומלין ביניהן. עבורי, הביולוגיה המולקולרית היא תחום מדעי מספק מאוד, כיוון שבמובנים רבים היא מאפשרת לנו לענות על שאלות פרטניות ובסיסיות הנוגעות לתעלומות החיים. במאמר זה אספר לכם לגבי התגליות שאליהן הגענו באמצעות הביולוגיה המולקולרית. על אודות מנגנון ההגנה החשוב המצוי בקצוות מולקולות הדניא – המולקולות המכילות את ההוראות הגנטיות (הקוד) המועברות מהורים לילדיהם. אך ראשית, עלינו להניח את היסודות שלנו.

## דניא, כרומוזומים ושכפול

כל תא חי מכיל מבנים בשם **כרומוזומים**. כל כרומוזום מכיל פולימר (מולקולה גדולה מאוד) בשם חומצה דאוקסיריבונוקלאית, או בקיצור, **דניא**. יחד, כל הדניא הוא כמו ספרייה של הוראות המנחה את התא עצמו, וכל אורגניזם הבנוי מתאים כאלו, איך לתפקד. מולקולת הדניא היא בצורת סליל כפול המורכב משני גידילים לינאריים (קוויים). הגדילים הללו מקבילים זה לזה ומסתלסלים זה סביב זה, כך שהם יוצרים את מבנה הסליל הכפול (איור 1). בכרומוזומים, הדניא מגולגל ודחוס בצפיפות בתוך התאים (איור 1). בתאים של בני אדם, לדוגמה, ישנם 23 זוגות של כרומוזומים המכילים את כל הדניא שלנו. הכרומוזומים הללו ממוקמים בגרעין התא ומכונים **כרומוזומים לינאריים**, כיוון שלכל אחד מהם יש שני קצוות. זה נכון עבור כל התאים האיקריוטיים, שהם תאים בעלי גרעין. אורגניזמים בעלי תאים המכילים גרעין כוללים את כל החיות, הצמחים והפטירות, וכן את רוב האצות. מנגד, אורגניזמים שבתאיהם אין גרעין מכונים **פרוקריוטיים** (חיידקים למשל), ולהם **כרומוזומים עגולים** ללא קצוות (צורה דמוית מעגל).

כשהתאים מתחלקים עליהם לשכפל את הדניא שבתוכם, כדי שגם התאים החדשים יכילו את כל ההוראות הנחוצות המאוחסנות בדניא. כפי שאתם אולי כבר יודעים, פולימר הדניא הוא חוט המורכב מארבעה סוגי כימיקלים המהווים את אבני הבניין שלו. הם מכונים בסיסים, ומסומנים בארבע אותיות – G, T, A – ו-C שמייצגות את ארבעת הכימיקלים (A – אַדנין; T – תימין; G – גואנין ו-C – ציטוזין). רצף הבסיסים הללו לאורך פולימר הדניא יוצר את הקוד המשמש כהוראות הפעלה של התא. בשני הגדילים המרכיבים את הסליל הכפול, הבסיסים הללו תמיד מופיעים בזוגות: A-T ו-C-G, כך שמול כל בסיס A בגדיל אחד של הסליל הכפול ניצב בסיס T בסליל האחר, מול בסיס G ניצב בסיס C, ולהפך (איור 1).

כאשר תהליך השכפול מתרחש בגרעין התא, המנגנונים המולקולריים המורכבים מפרידים תחילה את הסליל הכפול לשני גדילי דניא נפרדים. אז, כל סליל מקורי משמש כתבנית

### כרומוזום (Chromosome)

מבנה של דניא הדחוס בצפיפות בתוך תאים.

### דניא (DNA)

המולקולה הנושאת את המידע על אודות נראותם של אורגניזמים חיים, ותפקודם.

### איקריוטיים (Eukaryotes)

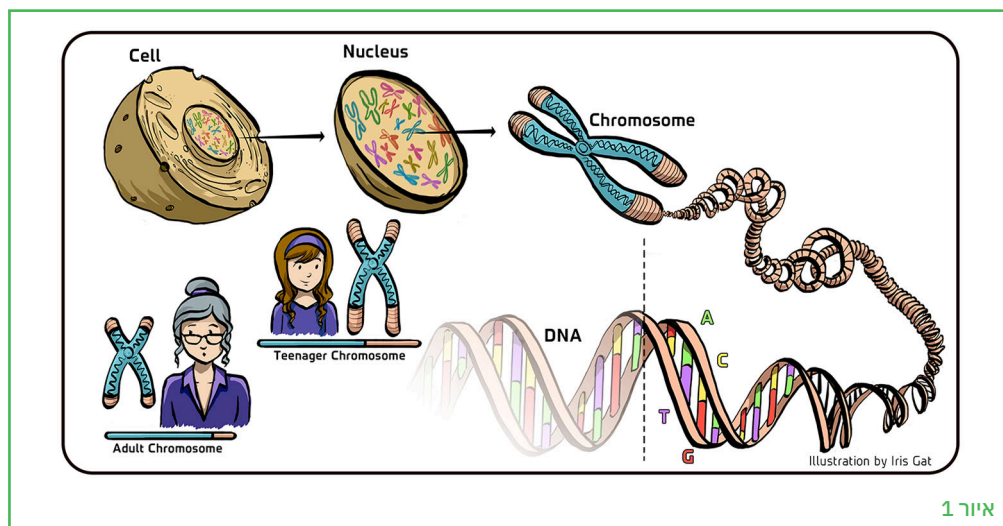
אורגניזמים שתאיהם מכילים גרעין.

### פרוקריוטיים (Prokaryotes)

אורגניזמים שתאיהם אינם מכילים גרעין.

## איור 1

דנ"א וכרומוזומים בתאים איקרוטיים. באיקרוטיים, הדנ"א (DNA) מאוחסן בגרעין התא (Nucleus), שבו הוא מגולגל ודחוס במבנים המכונים כרומוזומים (Chromosomes). הדנ"א מופיע בצורת סליל כפול המורכב מארבעה בסיסים מסומנים בארבעה צבעים (C-I G, T, A). באיור, הם המרכיבים את הדנ"א. כאשר התאים (Cells) מתרחשת העתקה של הדנ"א, שבה נוצרים שני סלילים כפולים חדשים מהסליל הכפול המקורי. המנגנון המולקולרי שמעתיק את הדנ"א אינו מעתיק את רצף הדנ"א בקצה הכרומוזום (החלק השקוף של הדנ"א שמופיע בתחתית האיור). כתוצאה מכך, הדנ"א מתקצר ככל שאנו מתבגרים (ראו החלק השמאלי בתחתית האיור). כדי להבטיח תורשה יציבה של החומר הגנטי יש צורך במנגנון מיוחד להגנה על קצוות רצף הדנ"א במהלך השכפול. מקרא: Teenager Chromosome = כרומוזום של בן/בת נוער Adult Chromosome = כרומוזום של אדם מבוגר



איור 1

לסינתזה (מיזוג) עם הגדיל המתאים לו. בתהליך זה, לכל בסיס בכל גדיל (שבשלב זה הוא כבר נפרד), 'משודך' הבסיס המתאים לו בזוג (A משלים את T, ו-T את C. A משלים את G, ו-G את C), עד שנוצר סליל חדש ומשלים עבור כל אחד מגדילי הדנ"א המקורי. בסיום התהליך מתקבלים שני סלילים כפולים חדשים, שהם לדנ"א המקורי.

עד כאן, הכול מובן – יש לנו סליל דנ"א כפול חדש, מוכן לשימוש בתא האיקרוטי החדש שנוצר לאחר חלוקת התא. אולם מסתבר כי המנגנון המורכב הזה לא יכול להעתיק את גדילי הדנ"א ממש עד קצותיהם (איור 1). לכן בתהליך חלוקת התא לא מתרחשת העתקה של רצף זוגות הבסיסים המצויים בסוף כל גדיל דנ"א. כלומר, בעקבות כל שכפול הדנ"א המקורי מתקצר עוד ועוד.

כאן ודאי תתעורר במוחותיכם הסקרנים השאלה – ובכן, מדוע זה קורה? למה הדנ"א לא משתכפל במלואו במהלך חלוקת התא? למען האמת, איננו יודעים ממש. זו אחת מאותן דוגמאות שבהן הביולוגים מרגישים כמו ארכיאולוגים – מנסים לפענח את התפתחות האירועים ההיסטוריים באמצעות פיסות מידע מהפריטים ששרדו עד ימינו אלה. אנו יודעים רק שלא מתרחשת העתקה מלאה של הדנ"א במהלך חלוקת התאים. אנו גם מסיקים כי התאים הראשונים באבולוציית החיים היו תאים פרוקרוטיים (ולא איקרוטיים), כלומר בעלי כרומוזומים מעגליים, כך שלדנ"א לא היו קצוות חופשיים, וכי התאים האיקרוטיים בעלי הדנ"א הליניארי – ומכאן גם קצוות הדנ"א – התפתחו בשלב מאוחר יותר של האבולוציה.

קו המחשבה הזה הביא אותנו לשיער כי מנגנון שכפול הדנ"א הפועל באיקרוטיים התפתח במקור בפרוקרוטיים. שם הוא פעל בצורה מספיק טובה, ולא נאלץ להתמודד עם קצוות הדנ"א, כיוון שלדנ"א מעגלי אין קצוות! האם המשמעות היא כי במקרה של כרומוזומים ליניאריים בתאים איקרוטיים, בכל פעם שהתא משכפל את הדנ"א שלו חלק מהחומר הגנטי החשוב שנושא את הקוד ומצוי בדנ"א אובד? למרבה המזל, זה לא מה שקורה, הודות למנגנון הגנה המוודא כי לא יאבד אף חלק מהדנ"א, שחשוב לתפקודו הפקין בתאים האיקרוטיים.

## הטלומרים – מגיני הדניא

כפי שראינו בחלק הקודם של המאמר (איור 1), באיקריוטים, שכפול הדניא אינו מגיע עד לקצות גדילי הדניא. אם היו שואלים אתכם איך להגן על החומר החשוב המקודד במקטע הסופי של הדניא, האם יכולתם לחשוב על פתרון לחידה הזו? מסתבר כי בסופם של כרומוזומים ליניאריים ישנם רצפי דניא מיוחדים בשם **טלומרים** (ביונית, משמעות המילה 'טלו' היא סוף, ומשמעות המילה 'מר' – חלק). הדניא בטלומרים נקרא 'דניא לא מקודד', ותפקידו להבטיח כי החלק המקודד של הדניא (הכולל את ההוראות שההורים מעבירים לצאצאיהם), יועבר באופן תקין לדור הבא.

תוכלו לחשוב על הטלומרים כעל קצוות הפלסטיק המגוננים שבסוף שרוכי הנעליים. בפעל, הטלומרים מפצים על כך שלא מתרחשת העתקה של הדניא שבקצות הכרומוזומים. למה הכוונה? כדי להימנע ממקרים שבהם חלקים חשובים (מקודדים) בקצות הדניא לא יועתקו במהלך חלוקת התא, כשישנם טלומרים ממש בקצות הכרומוזומים, רק הם החלקים שלא מועתקים עד סופם, וכך חלקים בעלי חשיבות (מקודדים) של חומר הדניא אינם הולכים לאיבוד. אם נדמה זאת לשרוכי נעליים – כשמשתמשים בשרוכים לאורך זמן, קצוות הפלסטיק שלהם הולכים ומתבלים, אך השרוכים עצמם נשארים מוגנים. גילינו דבר אפילו יותר מלהיב – כאשר הטלומר מתקצר, ישנו **אנזים** מיוחד שנמשך אליו, שביכולתו להוסיף עוד דניא טלומרי לכרומוזום. כך, הטלומר יכול להתחדש. זהו פתרון יפהפה שהטבע מצא לבעיית אי השלמת שכפול הדניא בקצות הכרומוזומים הליניאריים.

ב-1930, הגנטיקאים האמריקאיים הרמן מולר [1] וברברה מקלינטוק [2] זיהו את הטלומרים כ'משהו' מיוחד בסוף הכרומוזומים, שהגן על קצותיהם. בהמשך, עם התפתחות הביולוגיה המולקולרית, היה ניתן לאפיין את טבעם המולקולרי של הטלומרים. ב-1978, הביולוג האמריקאי ג'וזף גול ואני זיהינו את מבנה הטלומרים בקצות הכרומוזומים הליניאריים באורגניזם מעניין בשם *Tetrahymena thermophila* (להלן: טטרהימנה, בתעתיק לעברית), הנפוץ ברקת המצויה על פני השטח של מאגרי מים [3]. מצאנו כי הטלומרים של האורגניזם הזה מורכבים מדפוס מסוים של בסיסי דניא – הרצף TTGGGG (איור 2), שחזר על עצמו מספר שונה של פעמים (בין 20-50) בכרומוזומים שונים בתוך אוכלוסיית התאים. זמן לא רב לאחר מכן התגלו דפוסים חזרתיים דומים בטלומרים של אורגניזמים אחרים, כמו אוקסיטרִיכה רִיסִנית (*ciliate Oxytricha*) – TTTTGGGG, וברִינִית – TTAGGG [4]. טלומרים אנושיים מכילים את הרצף TTAGGG, שחזר על עצמו אלפי פעמים בסופי כל הכרומוזומים שלנו [4].

בנקודה זו, יכולות לעלות הרבה שאלות מעניינות על אודות הטלומרים והדפוסים החוזרים שלהם. הייתי רוצה להתמקד כעת בשאלה זו: כיצד הטלומרים מתווספים לקצוות הכרומוזומים? האם מנגנון זה מספק הגנה במצבים אחרים, נוסף על חלוקת התא? בהמשך המאמר נתבונן במנגנון המופלא שבונה את הטלומרים, ונראה מה הם יכולים ללמד אותנו על אודות בריאות בני האדם ולגבי רווחתנו.

### טלומר (Telomere)

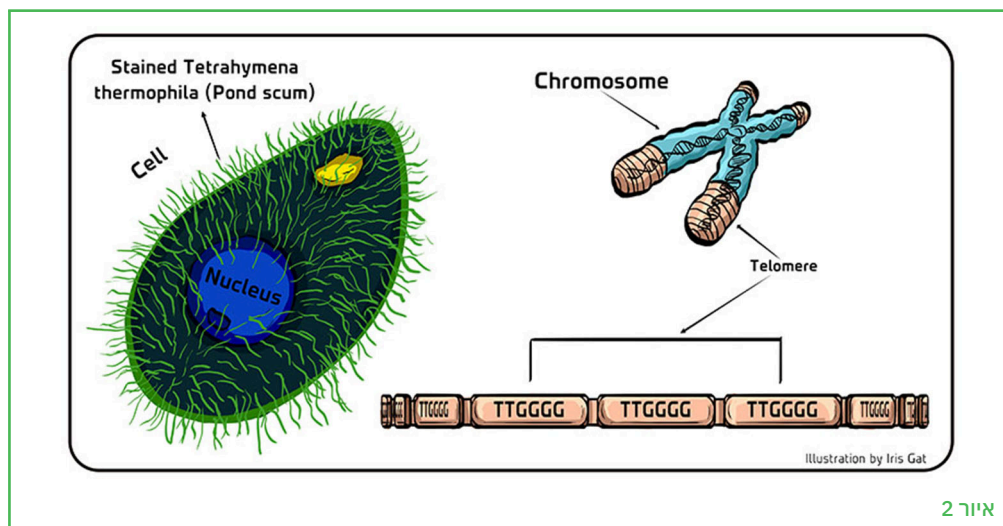
רצף דניא 'מגן' (כמו סוג של פקק), המופיע בסופיהם של כרומוזומים ליניאריים.

### אנזימים (Enzymes)

מבני חלבונים שמעצמים את הפעילות הכימית המתרחשת בתאים חיים.

## איור 2

טלומרים המצויים בירוקת מאגרי מים. צד שמאל: איור של האורגניזם האיקריוטי החד-תאי טטרהימנה, החי במים מתוקים. מאות האברונים דמויי השערות (ריסונים) על פני השטח של התא (Cell) פועלים כמְשׁוּטֵים זעירים המאפשרים לאורגניזם לנוע במים, לצוד מזון או להזדווג. צד ימין: טלומרים הם כמו קצוות הפלסטיק המגינים בשרוכי הנעליים. הם שומרים על החומר הגנטי המאוחסן בחלק המקודד של הדנ"א (חלק הכרומוזום הצבוע בכחול). החלק הטלומרי (לא מקודד) של הדנ"א (חלק הכרומוזום הצבוע בחום) מורכב מיחידות חוזרות של בסיסים TTGGGG, בטטרהימנה; TTAGGG, בני האדם).  
 Stained = צבוע  
 Nucleus = גרעין.



איור 2

## מארכים את חיי הטטרהימנה – גילוי הטלומראז

כשחקרתי את הטטרהימנה ואת הזנים הקשורים לה, בשנות ה-80 המוקדמות של המאה הקודמת, היה ידוע כי במהלך מחזור חיי הטטרהימנה, יש שלב שבו הכרומוזומים המקוריים נחתכים לכרומוזומים ליניאריים קטנים, המכונים מיני-כרומוזומים. גם הם, כמו הכרומוזומים השלמים שעליהם דיברנו קודם לכן, מסתיימים בחזרות של דפוס רצפי הדנ"א הטלומרי – TTGGGG. כשגילינו את המבנה של חזרות הדנ"א האלה בתאי ירוקת במאגרי מים, ניסינו לבדוק אם הוא תואם את הידע שהיה בידינו באותה תקופה בנוגע להתווספות בסיסי דנ"א לכרומוזומים. המנגונים היחידים בתחום שהיו מוכרים לנו באותו זמן היו (i) שכפול דנ"א, ו(ii) שְחִלּוּף דנ"א. לכל אחד מהמנגונים הללו היו מערכי חוקים מסוימים מאוד לתוספת דנ"א. הופעת רצפי הטלומרים החזרתיים שגילינו (למשל, לאור העובדה שהטלומרים של הירוקת המצויה במאגרי מים לא היו אחידים באורכם – לפעמים הכילו מספר מועט של חזרות; לעיתים מספר רב; ולפעמים כל הטלומרים התארכו בבת אחת) סתרה את הידע הקודם שהיה ברשותנו על אודות מערכי החוקים הללו. הופתענו לגלות את ההתנהגויות האלה כיוון שהממצאים החדשים שלנו לגבי מבנה הטלומרים לא תאמו את העקרונות והידע המבוססים היחידים שהיו לנו בזמנו על אודות דנ"א.

כשניצבים בפני צמתים יוצאי דופן שכאלה במדע, צריך לחשוב 'מחוץ לקופסה' ולשקול אפשרויות יצירתיות אחרות כדי למצוא את התשובה שמחפשים. במקרה הזה, ניסיתי לשער איזה מנגון יכול להיות אחראי לתוספת רצפי הטלומרים החזרתיים למיני-כרומוזומים לאחר שהם נפרדים מהכרומוזומים הארוכים. אחת האפשרויות הייתה פעילות של אנזים. כדי לבדוק את ההשערה הזו, שמתי במבחנת המחקר תמצית של תאי ירוקת המצויה במאגרי מים, והוספתי כימיקלים שונים כדי לראות אם אחד מהם נָרָם להוספה של טלומרים למיני-כרומוזומים. לאחר תהליך של ניסוי וטעייה, גיליתי כי אחת התוספות אכן האיצה סינתזה של רצפי טלומרים חזרתיים.

בשלב הזה, קרול גְרִיִּיִד, כיום פרופסורית, הצטרפה למעבדה שלי במסגרת לימודי הדוקטורט שלה. האתגר שניצב בפניה היה לפשט את התגובה במבחנת המחקר, כדי שנוכל לגלות את פעילות האנזים המסוימת האחראית לתוספת הטלומרים בקצוות. לאחר ניסוי

וטעייה נוספים קרול צמצמה ופישטה את הבדיקה עד כמה שניתן. הוספנו רצפים חזרתיים של TTGGGG שיצרנו במעבדה, מייד לאחר שהכרומוזומים נחתכו למיני-כרומוזומים. בשלב זה ציינו שהטלומרים יתווספו. הוספנו את אבני הבניין של הדנ"א למבחנה (שתי מולקולות בשם dGTP ו-TTP), עם מעט מגנזיום גופרתי. ראינו כי רצפי החזרות של ה-TTGGGG אכן נוספו לקצוות הדנ"א שיצרנו במעבדה [5]. משמעות הדבר הייתה שמצאנו מנגנון אפשרי להארכת טלומרים! עמיתתה של קרול, תלמידת התואר השני Claire Wyman, המציאה שם לאנזים החדש, שנראה כאחראי לתוספת רצפי הטלומרים החזרתיים: **טלומראז** [6].

### טלומראז (Telomerase)

אנזים המוסיף דנ"א  
טלומרי לכרומוזומים.

### רנ"א (RNA)

עותק נייד של דנ"א המשמש  
את התא לביצוע פעולות  
שונות, כמו שֶׁכָּפֹּל דנ"א.

כדי לְתַקֵּף את השערותנו בנוגע לתפקידו של הטלומראז בהארכת הדנ"א בתאים חיים (ולא רק במבחנת מחקר), ביצענו כמה ניסויים נוספים. לא אכנס כאן לפרטים, אך גילינו כי לאנזים הטלומראז יש חלק של **רנ"א**, המכיל רצף קצר המשלים את רצף הדנ"א של הטלומרים. הרנ"א הזה פועל כתבנית לרצף הטלומרי המשלים המתווסף לכרומוזום. בכמה מהניסויים הללו שינינו (במילים אחרות, הנדסנו) את מבנה הטלומראז כדי לבחון אם השינויים השפיעו על יכולתו לסנֵת את רצף הדנ"א הטלומרי, ולהאריך את הטלומרים. היו גרסאות מהונדסות שאפשרו לטלומראז להמשיך לפעול, אך הכילו שינוי בתבנית הרנ"א שאחראית על הוספת רצפי הדנ"א הטלומרי. בגרסאות הללו מצאנו כי בתאי הירוקת המצויה במאגרי מים היו חזרות חלופיות של רצפי הטלומרים – שונות מהרצף החוזר המקורי, TTGGGG, ומשלימות לשינוי הבסיסים ששֵׁמְנו בתבנית [7].

חשוב לציין שכאשר הִנְדַסְנו את הטלומראז כך שלא יתפקד כלל, הטלומרים של תאי ירוקת מאגרי מים המשיכו להתקצר עוד ועוד עם כל חלוקה של התא, ולבסוף, לאחר 20-25 חלוקות, התא הפסיק להתחלק ומת [7] (**איור 3**, צד שמאל). כלומר, כאשר פעולת הטלומראז ניזוקה, תאי הירוקת המצויה במאגרי מים, שבאופן רגיל לא מתים (לכאורה אלה תאים שמתחלקים לְנֶצַח), הפכו לבני תמותה (כלומר, הפסיקו להתחלק אחרי מספר מסוים של חלוקות). כל הממצאים הללו הובילו למסקנה שלפיה הטלומראז אכן אחראי להוספת הדנ"א הטלומרי לקצוות הכרומוזומים הליניאריים. זו הייתה התגלית שזיכתה את קרול ואותי בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 2009 (במשותף עם עמית נוסף, פרופ' ג'ק שוֹסְטֵק, שעמו חקרתי את תפקודי הטלומרים בתאים של שֶׁמֶר האפִייה). חשוב לציין שבהמשך, לאחר גילוי הטלומראז, התגלה כי פעילותו חשובה במקרים נוספים פרט לחלוקת תאים. הסתבר שדנ"א טלומרי רגיש מבחינה כימית לנזק גם בתוך תאים, ולכן מצריך תיקון במצבים שונים – במיוחד לאורך תקופות ארוכות, כמו במהלך חיי בני האדם. מסיבה זו, הטלומראז חשוב גם בתאים שלא מתחלקים (**איור 3**, צד ימין).

כעת, משהתוודעתם לעבודתי בתחום הטלומרים והטלומראז, אני רוצה להציג בפניכם נתיב מחקר נוסף שהתפתח בשלב מאוחר יותר של הקריירה המדעית שלי. נתיב מחקר זה הצביע על הֶקְשֶׁר שבין הטלומרים לבריאות האדם, בכמה דרכים מפתיעות מאוד.

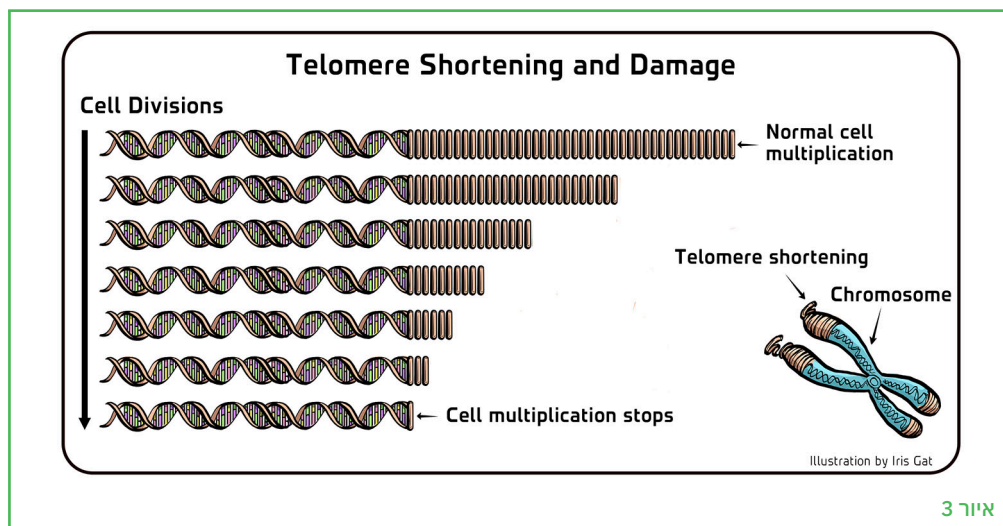
## שיעורים מהטלומרים – דרכים לשיפור בריאות האדם

כשחקרתי את תחזוקת הטלומרים ואת הטלומראז בתאים אנושיים באוניברסיטת קליפורניה, סן פרנסיסקו (UCSF), פנתה אליי חוקרת צעירה ומבריקה בתחום הפסיכולוגיה בשם אֵלִיֶסָה אֶפֶל. אליסה, כיום פרופסורית במחלקה לפסיכיאטריה באוניברסיטת

## איור 3

### התקצרות טלומרים ונזק שנגרם להם. צד שמאל:

כאשר מתקיימת פעילות בלתי תקינה של הטלומראז בתאי ירוקת המצויה במאגרי מים, הדנ"א הטלומרי (המוצג כחלק הימני החוזר באיור זה), מתקצר עוד ועוד עם כל חלוקה של התא. כאשר הטלומרים נהיים קצרים מדי, התא מפסיק להתחלק. הדבר נכון גם עבור תאים אנושיים. **צד ימין:** הקצוות המורכבים מטלומרים רגישים מבחינה כימית לנזק בתוך התאים. לכן, פעילות הטלומראז חשובה גם לתחזוקת הטלומרים בתאים שאינם מתחלקים. מקרא: = Cell divisions חלוקת תאים Normal cell multiplication = שכפול תאים רגיל = Telomere shortening התקצרות טלומר = Cell multiplication stops שכפול התא מפסיק.



קליפורניה, סן פרנסיסקו, חקרה אז במסגרת לימודי הפוסט-דוקטורט שלה לחץ נפשי מתמשך חמור. באותו זמן, בתחילת שנות ה-2000, היה ידוע כי אנשים הסובלים מלחץ נפשי מתמשך חמור לעיתים קרובות מראים שינויים גופניים המחקים תהליכים המאפיינים הזדקנות טבעית של בני אדם, אך בקצב מהיר יותר. במילים אחרות, ראינו קשר בין לחץ נפשי מתמשך להזדקנות מואצת בקרב בני אדם. מנקודת מבט אחרת, כשחקרנו את הטלומרים הבנו כי אם משנים גנטית את הטלומראז של תאי ירוקת במאגרי מים, או של תאי השֶׁמֶר, כך שיפסיק לפעול, הטלומרים ימשיכו להתקצר עם כל חלוקה. זאת עד שלבסוף הם יהיו קצרים מדי וישלחו אותות לתא להפסיק להתחלק (איור 3). תגלית זו הובילה לרעיון חדש שהחל לצבור תשומת לב ותמיכה בתחום: ייתכן כי התקצרות הטלומרים קשורה להזדקנות של יונקים כמונו. בזמנו, לא היה ברור מה מתרחש בתאי הגוף האנושי במהלך ההזדקנות.

כשאליסה פנתה אליי ושאלה אם ייתכן שישנו קשר בין לחץ נפשי מתמשך להתקצרות הטלומרים, חשבתי שזו שאלה מעניינת מאוד. היא סיפרה לי על אודות מחקר מרתק שהיא עורכת באימהות לילדים המתמודדים עם בעיות התפתחותיות או עם מחלות כרוניות. קבוצת האימהות הזו הייתה נתונה תחת לחץ נפשי מתמשך חמור, בין השאר משום שלעיתים קרובות לא ניתנת תמיכה במצבים כאלו בארה"ב (שבה חיו האימהות וילדיהן, ושבה נערך המחקר). נוסף על העניין המדעי שניצת בי כששמעתי על המחקר של אליסה, וכשתיתי לגבי הקֶשֶׁר שעשוי להתקיים בין ממצאי מחקרה להתקצרות הטלומרים, הייתה לי סיבה נוספת, אישית יותר, לעסוק במחקר הזה. בתקופה ההיא בני עוד היה קטן, ומצאתי שאני דואגת לו לעיתים קרובות למדי. זה גרם לי להרגיש אֶמפֶּתיה רבה כלפי הנשים מהמחקר של אליסה, במיוחד כשהבנתי כמה לחץ נפשי הן עלולות לחוות בתור מטפלות במצבים המאתגרים הללו.

החלטנו להתחיל במחקר ניסיוני, שבו הקבוצה שלי מדדה את פעילות הטלומראז, וקבוצה אחרת מדדה את אורך הטלומרים בתאים של אימהות שהיו המטפלות העיקריות בילדיהן המתמודדים עם מחלות כרוניות. השווינו את הממצאים לאלו של ההורים בקבוצת הביקורת. הורים בקבוצת הביקורת תאמו מכל בחינה להורים בקבוצה הנחקרת, פרט לעובדה שלהורים בקבוצת הביקורת לא היו ילדים המתמודדים עם מחלות כרוניות. את עבודתנו הובילה פוסט-דוקטורנטית בשם Jue Lin. Jue היא חוקרת שעסקה בעבר בטלומרים של

שְׁמֵרִים וּבִטְלוֹמֵרָאז, וּמִצָּאָה עֲנִיין בְּנִתִּיב הַמַּחְקֵר הַחֲדָשׁ הַזֶּה. מִיִּיד, כִּבֵּר בַּמַּחְקֵר הָרֵאשׁוֹן, קִיבְּלָנוּ תּוֹצָאָה מִפְתִּיעָה – הֵיִתָּה קוֹרְלִצִּיָּה כְּמוֹתֵית מִשְׁמַעוֹתֵית בֵּין אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵר – בַּמַּקְרָה זֶה, בֵּין אֹרֶכְו הַקֶּצֶר שֶׁל הַטְּלוֹמֵר – לְנוֹכְחוֹת הַטִּיפּוֹל, וּלְתַחוּשֵׁת הַהוֹרָה הַמִּטְפֵּל שֶׁלִּפְיָה הַטִּיפּוֹל גּוֹרֵם לָהֶם לְלַחֵץ נִפְשִׁי (אִיּוֹר 4)! הַתּוֹצָאָה הַמְדַהִימָה הַזֹּאת הֵיִתָּה הָאִינְדִּיקָצִיָּה הָרֵאשׁוֹנָה לְכָךְ שֶׁעֲשׂוּיָה לִהְיוֹת הַתְּאֵמָה בֵּין מִצַּב פְּסִיכּוֹלוֹגִי, כְּמוֹ לַחֵץ נִפְשִׁי מִתְּמַשֵּׁךְ, לְשִׁינוֹי גּוֹפְנִי מוֹבֵהֵק מְאֹד בְּרֵמָה הַמוֹלְקוֹלֵרִית הַבְּסִיסִית בִּיּוֹתֵר!

#### איור 4

אורך הטלומרים  
(Telomere length)  
ולחץ  
(Chronic stress).  
מתמשך  
במחקר שביצענו לראשונה  
בהשתתפות אימהות שהיו  
המטפלות הראשיות בילדיהן  
המתמודדים עם מחלות  
כרוניות, מצאנו שהייתה  
קורלציה סטטיסטית מובהקת  
בין הטלומרים הקצרים  
שנמצאו אצל האימהות  
למספר השנים שהיו במצב  
זה (צד שמאל של האיור), וכן  
לרמות הלחץ הנפשי שהן  
דיווחו שחוו (צד ימין של  
האיור). נלקח  
מ- Epel et al. [8].  
מקרא:

= Telomere Length

אורך הטלומר

קצר = Short

בינוני = Medium

ארוך = Long

Chronicity of Caregiving

(שנים) = מְשָׁךְ

הטיפול (שנים)

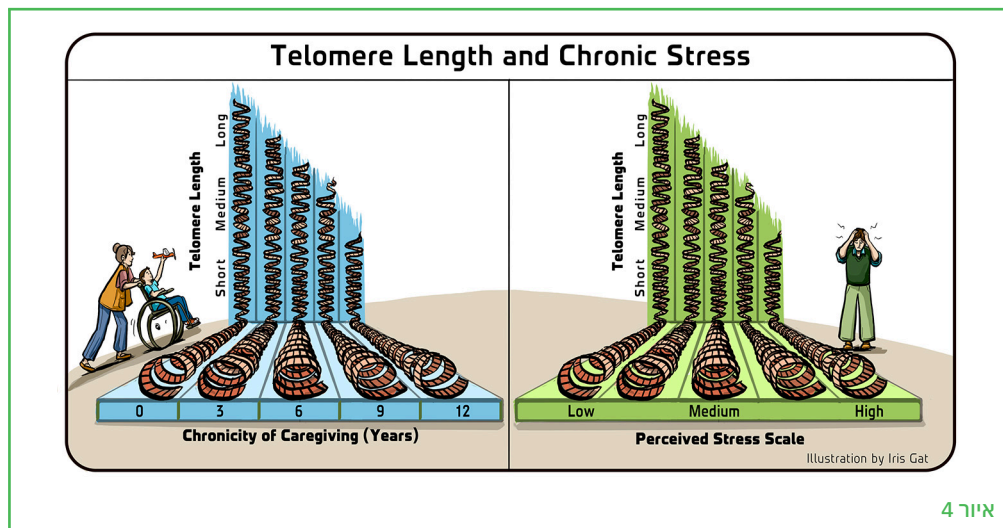
= Perceived Stress Scale

מידת הלחץ הנחווית

נמוך = Low

בינוני = Medium

גבוה = High



איור 4

כַּמְדַּעֲנִים, אִינּוֹ נַחֲפָזִים לְמַסְקָנוֹת, כִּיּוֹן שֶׁאֵנוּ מוֹדְעִים לְנִטְיָה הָאֲנוּשִׁית לְכַפּוֹת עַל הַמִּצִּיאוֹת וְעַל הַנִּתּוֹנִים שֶׁלָנוּ אֵת מָה שֶׁאֵנוּ רוֹצִים לְרֵאוֹת אוּ לְמִצּוֹא. הַמִּשְׁמַעוֹת הַיָּא שֶׁעָלִינוּ לִהְיוֹת חֲשָׁדִים בְּמִיּוֹחַד כֶּשֶׁהַתּוֹצָאוֹת הַהִתְחַלְתִּיּוֹת שֶׁאֵנוּ מְקַבְּלִים תּוֹאֲמוֹת אֵת הַהֲשַׁעְרוֹת ה'רְצוּיּוֹת' לָנוּ. מִסִּבָּה זֹאת, הַחֲלָטָנוּ לְנַקּוּט בַּפְּעוּלוֹת נוֹסְפוֹת כְּדִי לְאִמֵּת אֵת הַתּוֹצָאוֹת הָרֵאשׁוֹנוֹת שֶׁלָנוּ. אַחַת הַדְּרָכִים הֵיִתָּה לְבַחֵן קְבוּצוֹת שׁוֹנוֹת שֶׁל אֲנָשִׁים, הַחוּוִים סוֹגִים דּוֹמִים שֶׁל לַחֵץ פְּסִיכּוֹלוֹגִי מִתְּמַשֵּׁךְ הַקֶּשׁוֹר בְּטִיפּוֹל בְּאַחֲרִים (לְמַשֵּׁל, טִיפּוֹל בְּבֵן מִשְׁפַּחָה הַלוֹקָה בְּדִמְנָצְיָה). בִּיקְשָׁנוּ לְבַדּוֹק אִם הַהֲשַׁפְּעוֹת עַל אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵרִים שֶׁלָהֶם יִהְיוּ זֵהוּת. בַּמַּחְקֵר נוֹסֵף שֶׁעֲרַכְנוּ בְּדַקְנוּ קֶשְׁרִים אֲפִשְׁרִים בֵּין אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵרִים לְמִשְׁתַּנִּים אַחֲרִים כְּמוֹ גּוֹרְמִים סְבִיבִיתִים, חִינוּכִים, וְגוֹרְמִים נוֹסְפִים – נִפְשִׁים אוּ פְּסִיכּוֹלוֹגִים. מִצָּאנוּ קֶשְׁרִים רַבִּים כֵּאלֹו. הַקְּבוּצָה שֶׁלִּי וְחֻקְרִים אַחֲרִים הִגִּיעוּ לְבִסּוֹף לְמַסְקָנָה כִּי יִשְׁנֵם קֶשְׁרִים מִשְׁמַעוֹתִים בִּיּוֹתֵר בֵּין אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵרִים לְבִרְיאוֹת הָאָדָם [9].

ב-2017, אליסה ואני כתבנו יחד ספר לקהל הרחב, המציג את ליבית עבודתנו המתמשכת בנושא טלומרים ובריאות האדם, בשם 'The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer' (ראו בחלק המאמר שכותרתו 'חומרים לחיים צעירים, בריאים וארוכים יותר') [10] (ראו בחלק המאמר שכותרתו 'חומרים נוספים'). על אף שהמוציאים לאור שלנו הם אלו שהתעקשו שנוסיף את המילה 'מהפכנית' לשמו של הספר, הספר אכן מקבץ ומציג מגוון עובדות ומסקנות מעניינות. אני רוצה לחלוק עימכם שתי נקודות חשובות. ראשית, אֶרֶךְ הַחַיִּים וְהַגִּישָׁה שֶׁלָנוּ אֵלֵיהֶם – עוֹשִׂים אֵת הַהִבְדָּל! הַכּוּוֹנָה הַיָּא לְכָךְ שֶׁהַבְּחִירוֹת שֶׁלָנוּ בְּנוֹגַע לְשִׁינָה, לְמִזּוֹן וּלְפְעִילוֹת גּוֹפְנִית קְבוּעָה מִשְׁפִּיעוֹת עַל אֹרֶךְ הַטְּלוֹמֵרִים שֶׁלָנוּ. לָכֵן, הַפְּעוּלוֹת הַלָּלוּ יִכּוּלוֹת לְתַרוֹם לְבִרְיאוֹתָנוּ בְּטוּוֹחַ הָאֲרוֹךְ, אוּ לְחִלּוּפִין לְפַגּוֹעַ בָּהֶן, כְּמוֹ גַם לְהַשְׁלִיךְ עַל תּוֹחַלַת הַחַיִּים שֶׁלָנוּ. הַדְּבָר נִכּוֹן גַּם לְגַבֵּי הָרְגָלִים



של חשיבה שלילית, הקשורים להתקצרות הטלומרים. בניגוד לכך, חשיבה חיובית וחוסן נפשי תורמים לתחזוקה הטובה של הטלומרים שלנו. שנית, ברצוני להדגיש את נקודת המבט החברתית הרחבה יותר של אורך הטלומרים. הטלומרים מושפעים מהסביבה שלנו! המשמעות היא שכשאנו תומכים זה בזה, הן ברמת הפרט הן ברמת החברה, אנו תורמים לתחזוקה טובה של הטלומרים ושל בריאות האדם באופן כללי. אם כך, עלינו לזכור שיש לנו תפקיד חשוב בשמירה על אורכם ועל בריאותם של הטלומרים שלנו ושל שאר בני האדם. ישנה השפעה לבחירות שאנו עושים על בסיס יומיומי, כמו גם להשלכות החברתיות שעלינו לשאוף לשפר תמיד, כיוון שהן משתקפות אפילו בביוכימיה המולקולרית הבסיסית ביותר של תאי הגוף.

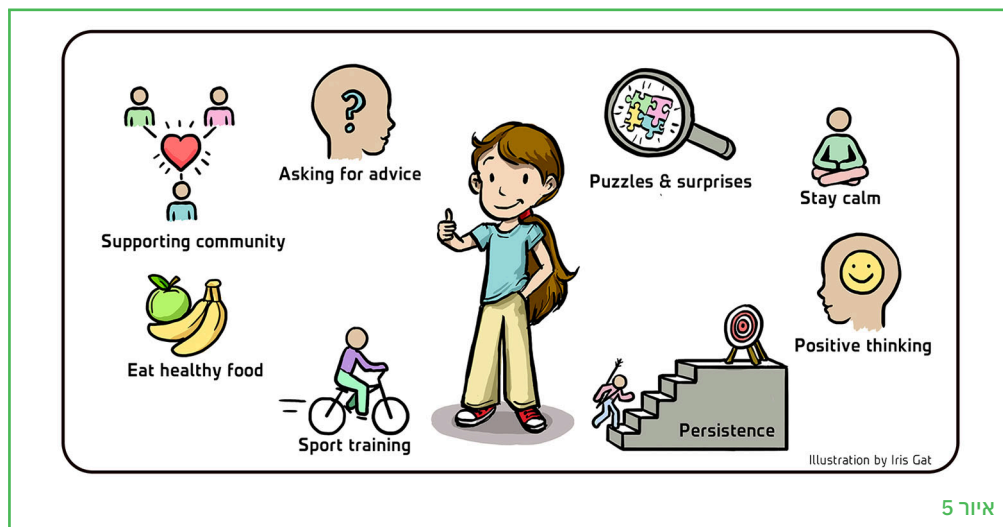
## המלצות למוחות צעירים

מִהְיוֹ הַדְרָכִים הַמִּיטְבִּיּוֹת לַעֲסוֹק בַּמַּדַּע, וַאִיךָ תִּהְיֶה מִדְעָנִים וּמִדְעָנוֹת טוֹבִים? יֵשׁ לִי כַּמָּה עֲצוֹת לַתֵּת לָכֵם (אִיור 5). בַּתּוֹר הַתַּחֲלָה, בַּרְצוֹנִי לַהֲדַגִּישׁ אֶת חֲשִׁיבוֹתָהּ שֶׁל הַהִתְמַדָּה. אִם אַתֶּם מִתְעַנְיִינִים בַּמַּדַּע עֲלֵיכֶם לַדַּעַת שֶׁתְּצַטְרוּ לַהֲתַמִּיד, כִּיּוֹן שֶׁלְפַעֲמִים הַתַּחֲוֹם הַזֶּה עֲלוּל לַהִירָאוֹת דִּי מוֹרַכֵּב וּמְאִיִּים. אִף עַל פִּי כֵן, אַל תּוֹוֹתְרוּ! אַז, בַּנְקוּדָה מִסּוּיֵמַת, תִּגְלוּ שִׁיגִיעַ זְמַן נִפְלָא שְׁבוּ תִפְצְחוּ אֶת הָאֵתֵגֵר. כַּשֶּׁתִּגִּיעוּ לְשֵׁם תַּחֲוֹ סִיפּוֹק גָּדוֹל, וְתַדְעוּ שֶׁהַהִתְמַדָּה שֶׁלָּכֶם הַשְׁתַּלְמָה. כְּמוֹ כֵן, כַּדִּי לִהְיוֹת מְרוֹצִים לְאוֹרֵךְ זְמַן, עֲלֵיכֶם לִהְיוֹת מְשׁוֹכְנָעִים שֶׁאַתֶּם עוֹשִׂים מִשְׁהוּ חָשׁוּב וּבַעַל עֵרָף. כַּשֶּׁאַתֶּם בּוֹחֵרִים אֶת הַנְּתִיב הַיִּיעוּדִי לְכָל אַחַת וְאַחַד מִכֶּם בַּמַּדַּע (אוּ בְכָל מְקוּצוֹעַ אַחֵר), וְדַאוּ שֶׁאַתֶּם עוֹסְקִים בַּדְּבָרִים שֶׁאַתֶּם מֵאִמִּינִים שֶׁכַּדָּאִי לַעֲסוֹק בָּהֶם. כֵּךְ, תַּחֲוֹשֶׁת הָעֵרָף שֶׁאַתֶּם מְקִינִים לַעֲבוֹדַתְכֶם תַּעוֹדֵד אֶתְכֶם לַהֲתַמִּיד, אִפִּילוּ בַּזְמַנִּים שֶׁבָּהֶם יִירָאֵה לָכֶם שֶׁקָּל יוֹתֵר לוֹוֹתֵר. בַּבְּחִירַת דְּרַכְכֶם הַיִּיחֻדִּית וְהַתְּמַדָּה בָּהּ, זָכְרוּ שֶׁאַפְשָׁר לַהֲשַׁתְּמֵשׁ בְּכָל כְּלִי בַּדְרָכִים שׁוֹנוֹת – בַּמִּיּוּחַד בִּידְעוּ וּבִטְכְּנֹלוֹגִיָּה, וְלִכֵּן, שִׁימוּ לֵב שֶׁאַתֶּם רוֹתְמִים אֶת יְכוּלוֹתֵיכֶם לְטוֹבוֹת הָאֲנוּשׁוֹת. כַּשֶּׁאַתֶּם עוֹשִׂים זֹאת, זָכְרוּ תַּמִּיד גַּם לְבַדּוֹק אֶת הַתּוֹצְאוֹת שֶׁלָּכֶם בַּקִּפִּידָה, וְאַל תַּאֲפִשְׁרוּ לַהֲעַדְפוֹת וּלְמַשְׁאֲלוֹת הָאִישִׁיּוֹת שֶׁלָּכֶם לַהֲשַׁפִּיעַ עַל הַדֶּרֶךְ שֶׁבָּהּ אַתֶּם אוֹסְפִים נְתוּנִים וּמִנְתַּחִים אוֹתָם.

### איור 5

#### המלצות למוחות צעירים.

- מקרא (מלמעלה – ציור זכוכית המגדלת, עם כיוון השעון):
- = Puzzles & surprises
- עיסוק במדע כולל חידות והפתעות
- Stay calm = הישארו רגועים
- אִמְצוּ = Positive thinking
- חשיבה חיובית
- הקפידו = Persistence
- על התמדה
- Sport training = עסקו בפעילות גופנית
- אִכְלוּ = Eat healthy food
- מזון בריא
- Supporting community = היעזרו בתמיכת הקהילה
- אל = Asking for advice
- תהססו לבקש עצה.



איור 5

ברצוני להדגיש היבט נוסף – חשוב מאוד לדעת לבקש עצות. למדתי זאת בדרך הקשה; בשלב מוקדם בקריירה שלי היססתי לעשות זאת. דאגתי מכך שאם אבקש עזרה אנשים

יעריכו אותי פחות, לכן נמנעתי מלבקש עצות. במבט לאחור, אני מבינה שלפעמים התנהלות זו הקשתה על דרכי. אני אומרת זאת כיוון שככל שהזמן עבר, ובמיוחד כשבני נולד ונאלצתי לתמך בין היותי אימא צעירה למשפחה כפרופסורית באוניברסיטה, הסכמתי לשקול לבקש עצות. הסתבר שזה מקל ומסייע מאוד – אנשים שכבר התמודדו עם אתגרים שעמדתי בפניהם, מקצועיים ואישיים כאחד, הציעו לי מגוון פתרונות שלא הייתי חושבת עליהם. הבנתי שברוב המקרים אנשים אוהבים לעזור לזולת, ואף מכבדים את הנכונות לבקש עצה. לכן, אני מעודדת אתכם לבקש עצות לאורך הדרך, במקום להקשות על עצמכם שלא לצורך. כמו כן, חשוב שתזכרו כי ישנם הרבה אנשים שרוצים בהצלחתכם. מצאו את האנשים האלה וטפחו את הקשרים איתם, ולעומת זאת אל תקנו חשיבות רבה מדי לאנשים שאינם מסייעים לכם.

ברצוני לדבר איתכם גם על אודות חידות והפתעות. עבורי, המדע מלא בחידות – חלקן גדולות, כאלו שעשויות ללוות אתכם לאורך כל הקריירה שלכם, וחלקן קטנות יותר, שאתם נתקלים בהן יום-יום. החידה הגדולה שאני מנסה לפתור היא להבין איך פועלים החיים עצמם. חידה גדולה זו מתחלקת לחידות קטנות יותר מדי יום, כאשר אני מנתחת נתונים ומנסה לפתור שאלה פרטנית הנוגעת לתופעה מסוימת. בעיניי, בתמונה הרחבה, מצד אחד המדע מספק לי ביטחון ויציבות, בצורת נתיב אובייקטיבי ומדוקדק לחקר האמת; ומצד אחר המדע מפתיע ומלהיב אותי, באמצעות תגליות בלתי צפויות לאורך הדרך. אני מכנה את התגליות הללו 'הפתעות יום הולדת', ונהנית מהן מאוד. במובן הזה, עצתי לכם היא ליהנות עד תום מ'הפתעות יום הולדת' שנקרות בדרכיכם. אני יודעת שעבור חלקכם הפתעות עלולות להראות מאיימות, אך מבטיחה לכם שההפתעות שבהן תתקלו בתחום המדע הן טובות, אם תתייחסו אליהן ככאלה. ככל שתעמיקו יותר בתחום התמחות מסוים, כך תרגישו חופשיים יותר לצאת מאזור הנוחות שלכם, ולחקור 'הפתעות יום הולדת' מדעיות.

לסיום, אבקש להפנות כמה מילות עידוד מיוחדות למדעניות העתידיות שביניכם. כפי שתוכלו להתרשם מהמקרה שלי, נשים יכולות לפתח קריירה מדעית המובילה להצלחה, למימוש עצמי, ולרוב גם לשמחה. אני בטוחה שאתן יודעות זאת, אך בשנת 2009, כאשר קרול גריינר ואני זכינו בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה, שלוש נשים אחרות זכו גם הן בפרסי נובל, בתחומים כימיה, כלכלה וספרות. הרגשתי שהצלחנו להעביר מסר משמעותי למדעניות ולמדענים מהדור הצעיר – שלפיו זוכי פרס נובל יכולים להיות נשים וגברים באותה המידה. על כן, אני מרגישה שנפל בחלקי הכבוד להיות סמל לדורות הבאים של הנשים, ושל כל האנשים, שמעוניינות ומעוניינים לעסוק במדע.

## חומרים נוספים

1. [The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer—Amazon.](#)
2. [Women who changed Science—Elizabeth Blackburn.](#)
3. [Elizabeth Blackburn on the telomere effect—The Guardian.](#)

## תודות

ברצוני להודות לננועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר. תודה לאיריס גת עבור האיורים, ול-Susan Debad על עריכת כתב היד.

## מקורות

1. Muller, H. J. 1938. The remaking of chromosomes. *Collect. Net* 13:181–98.
2. McClintock, B. 1939. The behavior in successive nuclear divisions of a chromosome broken at meiosis. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 25:405–16. doi: 10.1073/pnas.25.8.405
3. Blackburn, E. H., and Gall, J. G. 1978. A tandemly repeated sequence at the termini of the extrachromosomal ribosomal RNA genes in *Tetrahymena*. *J. Mol. Biol.* 120:33–53.
4. Blackburn, E. H. 2010. Telomeres and telomerase: the means to the end (Nobel lecture). *Angew. Chem. Int. Ed.* 49:7405–21. doi: 10.1002/anie.201002387
5. Greider, C. W., and Blackburn, E. H. 1985. Identification of a specific telomere terminal transferase activity in *Tetrahymena* extracts. *Cell.* 43:405–13.
6. Greider, C. W., and Blackburn, E. H. 1987. The telomere terminal transferase of *Tetrahymena* is a ribonucleoprotein enzyme with two kinds of primer specificity. *Cell.* 51:887–98.
7. Yu, G. L., Bradley, J. D., Attardi, L. D., and Blackburn, E. H. 1990. *In vivo* alteration of telomere sequences and senescence caused by mutated *Tetrahymena* telomerase RNAs. *Nature.* 344:126–32.
8. Epel, E. S., Blackburn, E. H., Lin, J., Dhabhar, F. S., Adler, N. E., Morrow, J. D., et al. 2004. Accelerated telomere shortening in response to life stress. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101:17312–5. doi: 10.1073/pnas.0407162101
9. Blackburn, E. H., Epel, E. S., and Lin, J. 2015. Human telomere biology: a contributory and interactive factor in aging, disease risks, and protection. *Science.* 350:1193–8. doi: 10.1126/science.aab3389
10. Blackburn, E., and Epel, E. 2017. *The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer.* New York, NY: Grand Central Publishing.

פורסם אונליין: 22 ביולי 2024

נערך על ידי: Fulvio D'Acquisto

מנחים מדעיים: Jean Calleja-Agius | Alina Nico West

ציטוט: Blackburn E (2024) כוח הטלומרים: איך לחיות חיים ארוכים יותר ובריאים יותר. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2022.995003-he

Blackburn E (2023) Telomere Power: How to Live Longer and Healthier. **תורגם והותאם מ:** Front. Young Minds 10:995003. doi: 10.3389/frym.2022.995003

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

**זכויות יוצרים © 2023 © Blackburn 2024.** זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). 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

### AMELIE, גיל: 14

אני אוהבת מדעים, לומדת פיזיקה, כימיה וביולוגיה בבית הספר. עם זה עליי להודות שיש לי גם תשוקה לתחום המשחק. בזמני הפנוי אני אוהבת לצייר ולעסוק בג'ודו. אני תמיד שמחה ונרגשת לנסוע לחו"ל עם הוריי, וסקרנית מאוד לגבי תרבויות חדשות ונופים אחרים! סוגות הספרות האהובות עליי הן קומדיה; פעולה ואימה; ולאחרונה פיתחתי עניין במגוון (סגנון איור המשמש בקומיקס יפני). אני נהנית לסקור מאמרים מדעיים מעניינים!

### AMITOJ, גיל: 14

קוראים לי Amitoj ואני תלמיד כיתה ט. המקצוע האהוב עליי בבית הספר הוא מדע. אני מנגן בסקסופון בלהקת בית הספר שלי, ונהנה לטייל ולעסוק בצילום. אוהב לבשל ולנסות מאכלים חדשים; לשחק כדורסל; לקרוא ספרים ולאייט מילים. כשאגדל, ארצה לעסוק בתחום הרפואה.

## הכותבים

### ELIZABETH BLACKBURN

הפרופסורית אליזבת בלקברן נולדה ב-1948 בעיר קטנה בטזמניה שבאוסטרליה. היא הייתה ילדה סקרנית מאוד שאהבה חיות, ונמשכה לביולוגיה מגיל צעיר. בשנות ה-70 של המאה הקודמת, בלקברן למדה באוניברסיטת מלבורן שבאוסטרליה, שם קיבלה את התארים הראשון והשני שלה בביולוגיה. לאחר מכן המשיכה בלימודי דוקטורט בביולוגיה מולקולרית באוניברסיטת קיימברידג' שבאנגליה, במסגרתם השתמשה בריצוף דנ"א כדי לחקור את הרכב חומצת הגרעין של בקטריופאג (נגיף התוקף חיידק) מסוים. ב-1975, לאחר שסיימה את לימודי הדוקטורט שלה בביולוגיה מולקולרית, החלה את לימודי הפוסט-דוקטורט במעבדה של פרופ' ג'וזף גול באוניברסיטת ייל שבארה"ב. שם חקרה את הכרומוזומים של הטטרסהימנה, הנפוצה בירוקת המצויה על פני השטח של מאגרי מים. היא גילתה כי הטלומרים של הטטרסהימנה מורכבים מתבניות חזרתיות קצרות של הנוקלאוטידים תימן וגואנין, המסודרים כך: TTGGGG. ב-1978, מונתה לעוזרת פרופסור לביולוגיה מולקולרית באוניברסיטת קליפורניה בברקלי, ארה"ב, שם המשיכה לחקור את הטלומרים של הטטרסהימנה. ב-1985, פרופ' בלקברן עם תלמידתה, קרול גריידר, זיהו את האנזים האחראי להוספת הטלומרים בקצות הכרומוזומים הליניאריים, שלאחר מכן קיבל את השם 'טלומראז'. עבור התגליות הללו פרופ' בלקברן זכתה בפרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה לשנת 2009, במשותף עם הפרופסורית קרול גריידר וחוקר טלומרים נוסף, פרופסור ג'ק שוסטק. ב-1990, פרופ' בלקברן עזבה את ברקלי והמשיכה לחקור



את הטלומרים כפרופסורית באוניברסיטת קליפורניה, סן פרנסיסקו (UCFS). עם חוקרת הפסיכולוגיה אליסה אפל, לימים פרופסורית, היא חקרה את מערכות היחסים בין הטלומרים ללחץ נפשי מתמשך. המחקר הראשון שלהן הוביל לסדרה שלמה של מחקרים העוסקים בקשר שבין אורך הטלומרים לבריאות האדם, בצורות שונות. הממצאים ששיתוף הפעולה המתמשך הזה הניב יצאו לאור ב-2017 בספר מדע לקהל הרחב שכתבו יחד, בשם: 'The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer'. פרס NAS (האקדמיה הלאומית למדעים של ארה"ב) לביוכימיה מולקולרית (1990); פרס אוסטרליה (1998); פרס הארווי (1999); פרס דיקסון (2000); פרס ASCB (האיגוד האמריקאי לביוכימיה התא) לשירות ציבורי (2004); פרס לוראל-אונסק"ו (ארגון החינוך, המדע והתרבות של האו"ם) לנשים במדע (2008); פרס נובל לפיזיולוגיה או לרפואה (2009), ומדליית הזהב של AIC – המכון האמריקאי לכימיה (2012). [\\*Elizabeth.Blackburn@ucsf.edu](mailto:Elizabeth.Blackburn@ucsf.edu)

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



הוצאת פרונטירה מדע לצעירים ישראל  
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK