

כיצד ניתן להמיר רוח לחשמל?

Asher Yahalom^{1,2*}

¹המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה, אוניברסיטת אריאל בשומרון
²המרכז לאסטרונומיה, גיאופיזיקה ומדעי החלל, אוניברסיטת אריאל בשומרון

סוקרים צעירים

AVIV
גיל: 8



CENTER FOR
GIFTED AND
TALENTED
STUDENTS,
EAST
JERUSALEM
גיל: 13



מטען חשמלי (Electric charge)

תכונה של החומר הגורמת ליצירת פעילות אלקטרומגנטית הדדית עם מטענים אחרים. כל חלקיקי החומר היסודיים הם בעלי מטען חשמלי, הנמדד ביחידות של קולון (C). לאלקטרון יש מטען שלילי ולגרעין האטום יש מטען חיובי.

מְחֻלְלֵי רוּחַ, המוכרים גם כטורבינות רוּחַ, הופכים רוּחַ לחשמל. הם מורכבים מְלֵהְבִים-פִּיסוֹת מתכת מעוצבות, המותקנות על מוט מתכת משותף (ציר), ומחוברים למחולל חשמל-גֶנֶרָטוֹר. המחולל יוצר חשמל באמצעות הנעת חוט מתכת המלוּפֵף על ליבה משותפת (כְּרִיכוֹת) ביחס למגנט (פיסת חומר המשפיעה על תנועת פיסות דומות או על אבקת ברזל). הרוח גורמת ללהבים להסתובב, ואלה מסובבים ציר המחובר למחולל באמצעות גלגלי שיניים. הסיבוב גורם לכריכות לזוז ביחס למגנט קבוע, כך שבתוך הכריכות נוצר זרם חשמלי המועבר אלינו למשל לצורך תאורה. טורבינות רוּחַ יכולות לייצר חשמל באופן חסכוני וידידותי לסביבה. כדאי להציבן באזורים המתאפיינים ברוחות חזקות, כמו חופי ים, פסגות הרים גבוהות, ואזורים פתוחים בעמקי הרים. הטורבינות לא צורכות דלק, ולכן אינן פולטות גזי חממה המזיקים לאקלים וגורמים להתחממות כדור הארץ.

איך ממירים תנועה לחשמל?

לפני כמעט מאתיים שנה (1831-1832) גילה הפיזיקאי והכימאי האנגלי מיכאל פאראדיי כי כאשר מעבירים חוט נחושת (מתכת המוליכה חשמל היטב) ליד מגנט, מתפתח בין קצות החוט מְתַח חשמלי. אם סוגרים את החוט בלולאה נוצרת תנועה של **מטענים חשמליים**

זרם חשמלי (Electric current)

תנועת מטענים חשמליים. מוגדר ככמות המטען החשמלי העובר ביחידת זמן דרך שטח נתון. כאשר עובר מטען של קולון אחד בזמן של שנייה אחת, אנו אומרים שזרם זרם של אֶמְפֶּר אחד.

מחולל ומנוע (Generator and engine)

אלה הם הֶתְקִינִים שתפקידם להמיר אנרגיה מצורה אחת לצורה אחרת. מחולל הרוח ממיר אנרגיה קינטית (ראו להלן במילון המונחים) של רוח לאנרגיה חשמלית. מנוע חשמלי ממיר אנרגיה חשמלית לאנרגיה מכנית.

איור 1

מיכאל פאראדיי, מדען בריטי, אבי תורת החשמל, לצד מחולל החשמל שאותו המציא. לצפייה בסרטון וידיאו על אודות חייו, לחצו כאן.
(קורדייט: Flourishing Exams).

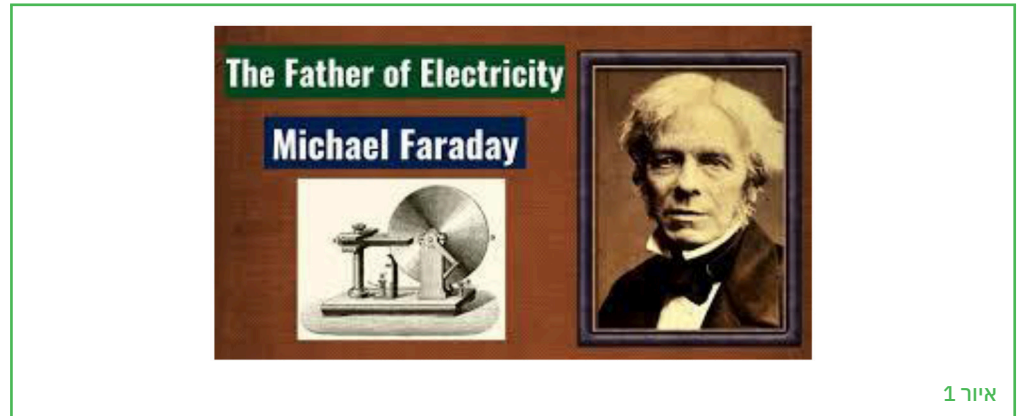
שדה (Field)

מדד לחוזק שבו גוף פועל על גוף אחר. שדה חשמלי הוא הכוח שאותו הגוף היה מפעיל על גוף אחר אילו מטען הגוף האחר היה קולון אחד. שדה מגנטי הוא תוצר של מטענים חשמליים המצויים בתנועה.

איור 2

המבנה הבסיסי של מחולל כולל חלק קבוע וחלק מסתובב. החלק הקבוע נקרא סטטור (Stator), והחלק המסתובב נקרא רוטור (Rotor). שני החלקים כוללים חוטי מתכת מלופפים (אלקטרומגנטים, Electro-Magnetics); באחד החלקים הקריכות משמשות ליצירת שדה מגנטי, ובאחר ליצירת זרם. האיור נלקח מהאתר: <https://www.polytechnichub.com/construction-3-phase-induction-motor/stator-and-rotor/>

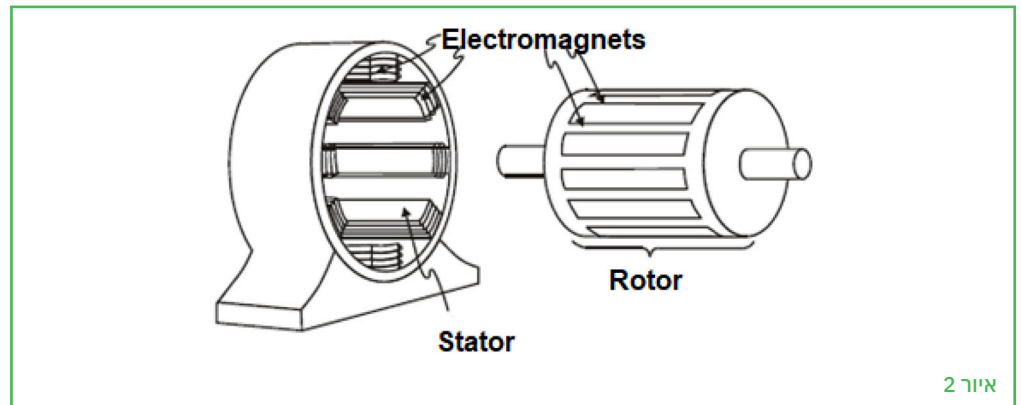
(זָרָם חשמלי). פאראדיי הסביר כי הרעיון עלה במוחו לאחר שתהה אם אפשר להפיק בעזרת מגנט זרם חשמלי, כשם שניתן לגרום לזרם חשמלי הזורם בחוט למשוך מגנטים—דבר שהיה ידוע אז בעקבות תגליתו של המדען הצרפתי אֶמְפֶּר. בהמשך לכך בנה פאראדיי מכשיר עשוי לוח נחושת עגול שאותו מסובבים בעזרת ידית בתוך מגנט בצורת פרסת סוס. דרך שני חיבורים חשמליים במרכז לוח הנחושת ובהיקפו, הצליח פאראדיי להפיק זרמים חשמליים חלשים (איור 1). שיטתו משמשת עד היום לייצור מרבית החשמל בעולם, באמצעות מחוללים חשמליים.



איור 1

בהמשך שוכלל המחולל כך שהמגנט הקבוע הוחלף באֶלְקֶטְרוֹמַגְנֵט (פריכת חוטים שבהם זורם זרם שיוצר שדה מגנטי כמו מגנט קבוע. פריכת הזרם מכונה אלקטרומגנט).

המבנה הבסיסי של כל מחולל מורכב משני חלקים: החלק הקבוע—הסטטור, והחלק הנע או המסתובב—הרוטור (איור 2). השאלה הנשאלת היא כיצד גורמים לרוטור להסתובב.



איור 2

מאז ועד היום זָרָם חשמל רב...

המחולל של פאראדיי סָבַב על ידי ידית בעזרת כוח הזרוע של המפעיל, אך מכשיר זה סיפק מעט מאוד חשמל. כיום אנו זקוקים לחשמל רב כדי להפעיל את שלל המכשירים המצויים בבתינו: התאורה, מיזוג האוויר, המקרר, מכונת הכביסה, התנור החשמלי, הטלוויזיה, המחשב ועוד. כמו כן אנו זקוקים לחשמל כדי לטעון את מכשירי הטלפון הניידים שלנו. בעתיד הקרוב נרצה לטעון גם את המכונית החשמלית שצוברת תאוצה, והצפי הוא כי

תחליף בעתיד את המכונות הרגילה. כמובן שאין מדובר בבית אחד, אלא במיליוני בתים במאות מדינות ברחבי העולם.

הספק (Power)

קצב שינוי האנרגיה ליחידת זמן. מערכת הממירה אנרגיה מסוג מסוים לאנרגיה חשמלית בקצב של ג'אול (J) אחד בכל שנייה, היא מערכת המייצרת הספק חשמלי של וואט (W) אחד.

אנרגיה (Energy)

בכל מערכת פיזיקלית סגורה יש גודל שמור המכונה אנרגיה. המתמטיקאית היהודייה-גרמנייה אָמִי נֶתֶר הראתה כי שימור האנרגיה נובע מכך שחוקי הטבע אינם משתנים במרחב-זמן. מקובל למדוד אנרגיה ביחידות של ג'אול.

סוגי אנרגיה (Types of energy)

פרט לאנרגיה קינטית (ראו להלן במילון המונחים), האנרגיה מופיעה בטבע בצורות שונות. למשל, אנרגיה פוטנציאלית (האנרגיה שנדרשת לזריקת כדור כלפי מעלה לגובה מסוים); אנרגיה חשמלית; אנרגיה מגנטית; אנרגיה כימית ואנרגיית חום.

מהו המענה שניתן להציע לצורך הגובר בחשמל? במקום לסובב את הרוטור בידיים, אנו משתמשים במנועים. המנוע יכול לספק כוח סיבוב רב יותר מאשר היד האנושית, וביכולתו להסתובב הרבה יותר מהר ולייצר הספק חשמלי רב יותר. החיסרון של המנוע טמון בצורך לתדלק אותו בדלק (חומר שאצורה בו אנרגיה פוטנציאלית רבה שאפשר להעבירה לצורה אחרת של אנרגיה). ניתן להשתמש כדלק מחומרים שונים ובהם פחם, גז טבעי או נפט. המשותף לכל סוגי הדלקים הוא שצריך לשלם עבורם [1], כלומר ישנה עלות כספית קבועה לייצור החשמל. יתרה מזו, למרות שבטבע קיימות כמויות גדולות מחומרי הדלק הללו הרי שהן סופיות, ויבוא יום שבו לא נוכל עוד להשתמש בחומרים אלה להפקת דלק. נוסף על כך כדי לגרום למנוע להסתובב, יש לשרוף את הדלק. תוצרי השרפה מזהמים את האוויר ותורמים לשינוי האקלים לרעה. כל הדלקים מזהמים, אך לא באותה מידה: הפחם מזהם יותר מהגז הטבעי, למשל. אחד מתוצרי שרפת דלקים הוא פחמן דו-חמצני (CO₂), מולקולה הכוללת אטום פחמן אחד ושני אטומי חמצן. גז זה שנפלט לאטמוספירה מונע מהחום לעזוב את כדור הארץ, ויוצר 'אפקט חממה'. זהו תהליך שבו כדור הארץ הולך ומתחמם, ואחד הביטויים לכך הוא עלייה בטמפרטורה הממוצעת. התחממות כדור הארץ גורמת גם להפשרת קרחונים ולעליית פני הים, מה שעתיד להוביל להצפות בערים הקרובות לים. כמו כן, ההתחממות גורמת לשינויי מזג אוויר קיצוניים כפי שאנו חווים בשנים האחרונות.

אם כן, מה ניתן לעשות? מצד אחד איננו יכולים לוותר על החשמל שאנו זקוקים לו למגוון שימושים, ומצד אחר לא נוכל להמשיך לזהם את האטמוספירה. התשובה טמונה בייצור חשמל נקי, כלומר שאינו כרוך בזיהום האטמוספירה.

ייצור חשמל נקי

כיצד ניתן להפיק חשמל ללא שרפת דלקים? זאת באמצעות שימוש בסוגי אנרגיה שונים. דרך אחת שאינה קשורה למחולל של פאראדיי היא הֶמְכָּה של אור השמש לחשמל. זו הדרך המרכזית להפקת חשמל נקי בישראל. בטבע, הצמחים משתמשים באור השמש ובחומרי הגלם העומדים לרשותם כדי לבנות את תאיהם, לגדול ולצמוח. בני האדם ובעלי החיים אוכלים את הצמחים הללו, מה שמאפשר גם להם לנוע ולגדול. שאריות של צמחים ובעלי חיים מעידנים קדומים, אשר עברו עיבודים במעבה כדור הארץ, הן למעשה הדלקים (נפט, פחם, גז טבעי) שבהם אנו משתמשים לייצור החשמל. כיום ישנם תאים פוטו-וולטאים (הֶתְקָנִים המשמשים להמרת אור לחשמל), המסוגלים להמיר את אור השמש לחשמל בעילות הגדלה עם השנים. אנשים פרטיים ובעלי עסקים כאחד מכסים את בתיהם, מבני עסקיהם ונכסיהם אחרים בתאים פוטו-וולטאים. על ידי כך הם פוטרים את עצמם מחשבון החשמל, ואף זוכים לתגמול בדמות תשלום מטעם חברת החשמל עבור החשמל שהם מייצרים. גם מחולל החשמל יכול לייצר חשמל נקי. אפשר לגרום לו להסתובב למשל על ידי שימוש במפל מים שנופל על גלגל שיניים. במפלי הניאגרה, המצויים בגבול שבין ארה"ב לקנדה, ישנה תחנת כוח המבוססת על המפל בלבד. בישראל קיימת תוכנית בשם 'תעלת הימים', המבוססת על רעיון דומה. במסגרתה מוצע לחפור תעלה בין הים התיכון לים המלח הנמוך-הֶפְרָשׁ הגבהים ביניהם עומד על 436 מטרים. ניתן לנצל הפרש זה כדי ליצור מפל

שיסובב מחולל חשמל. דרך אחרת ליצירת חשמל נקי, הקשורה לנושא העיקרי שבו עוסק מאמר זה, היא סיבוב המחולל בעזרת רוח.

מחולל המונע על ידי רוח

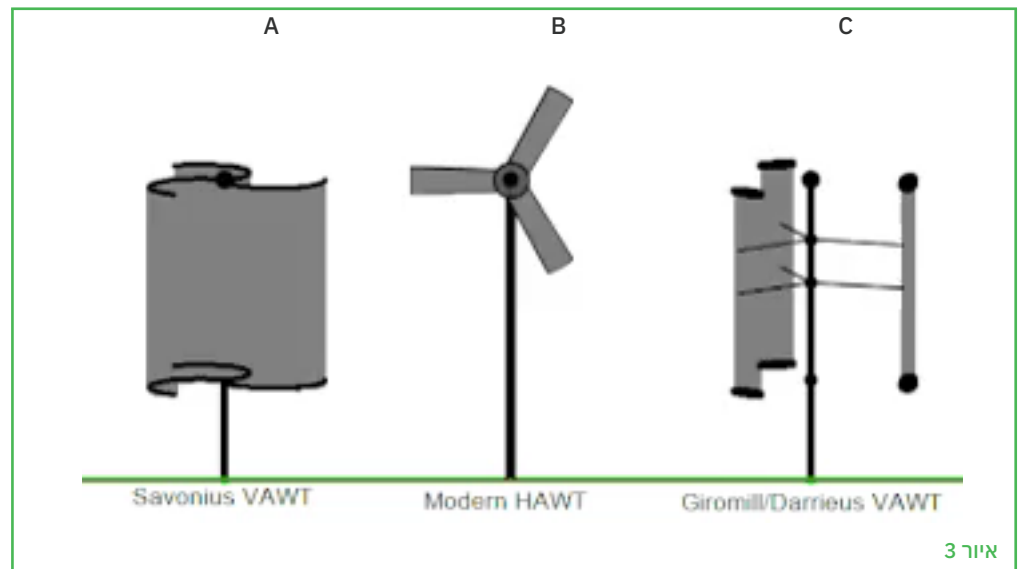
מחולל רוח, המכונה גם טורבינת רוח, הוא אוסף של להבים המשמשים להמרת רוח לחשמל-גרסה מעודכנת של טחנות הרוח ששימשו בעבר לטחינת חיטה לקמח. בישראל, הנדבן היהודי משה מונטיפיורי הקים טחנה כזו מחוץ לחומות העיר העתיקה בירושלים בשנת 1858, והיא שימשה כמקום עבודה וכמקור לאספקת קמח לייצור לחם. ישנם שני סוגים של מחוללי רוח, שניהם מבוססים על אנרגיה קינטית. הסוג הראשון הוא מחולל ציר אופקי-התנועה המכנית שנוצרת מסיבוב הציר האופקי מחוברת ישירות למחולל החשמל שאותו תיארונו קודם לכן, בצורה המזכירה מאוורר, אך באופן פעולה הפוך. כך, בעוד שבמאוורר החשמל מסובב את הכנפיים על ידי מנוע כדי ליצור רוח מלאכותית, במחולל רוח אנרגיית הרוח מסובבת את להבי המחולל המניעים מחולל חשמל. הסוג השני הוא מחולל ציר אנכי (המוטות בו מכונים צירים)-במחולל זה סיבוב הציר האופקי מסובב ציר אנכי המחובר למחולל חשמל שבבסיס מחולל הרוח. למרבית המחוללים מסוג זה מבנה המזכיר בצורתו להבת נר. מבנה זה נוצר על ידי 2-3 להבים קשתיים המחוברים בבסיסיהם ובקודקודיהם לציר אנכי המניע מחולל חשמל. סוג נוסף של מחוללי ציר אנכי, שלעיתים מונח באופן אנכי צמוד לקיר, או בצורה אופקית צמוד לקרקע, הוא מחולל המפוח, המכונה גם 'גלגל סנאי' (ראו החלק השמאלי באיור 3). מחקר שערכה הרשות המדעית של האיחוד האירופי בנושא הפעלת מחוללי רוח באסיה, מצא כי יעילות המחוללים הללו גבוהה מעילות מחוללי המדחף [2].

אנרגיה קינטית (Kinetic energy)

זוהי אנרגיית התנועה שהיא סוג האנרגיה הפשוט ביותר. עבור גופים איטיים הביטוי לאנרגיה זו הוא $\frac{1}{2}mv^2$, כאשר m הוא מסת הגוף ו- v הוא מהירות הגוף.

איור 3

אופן פעולת שלושה סוגים נפוצים של מחוללי רוח. (מימין לשמאל): טורבינת ציר אנכי, טורבינת ציר אופקי וטורבינת מפוח (הטורבינות הימנית והשמאלית קרויות על שם ממציאיהן. VAWT = Vertical Axis Wind Turbine, HAWT = Horizontal Axis Wind Turbine. האיור המונפש נוצר על ידי מעלה היצירה Ssgxnh, וזכויות היוצרים עליו הן נחלת הכלל. (A) מחולל רוח אנכי מסוג סבנוס (B) מחולל רוח אופקי (C) מחולל רוח אנכי מסוג דריוס, תת סוג גירומיל.



לצורך עמידה על יעילות המחולל נעשה שימוש במדד הנצילות, שמשמעו עד כמה המשאבים הזמינים לנו מנוצלים כראוי. נצילות מחולל הרוח מוגדרת כיחס באחוזים בין כמות החשמל הרגעית המופקת באמצעות המחולל ביחידת זמן נתונה, לבין כמות הרוח שיכולה לעבור ביחידת זמן דרך 'שטח הדיסק', שהוא שטח חתך הפעולה של להבי המחולל. הן כמות הרוח הן כמות החשמל מבוטאות במונחים של אנרגיה. הנצילות המרבית של מחולל

רוח עומדת באופן תיאורטי על כ-59.3%. מדד זה מכונה 'גבול בֶּץ' (Betz-Limit) שלפיו ניתן לנצל רק 16/27 מהאנרגיה הראשונית של הרוח, אך נצילות זו אינה בת-השגה. יצרני מחוללי רוח ומפעילי מחוללים כאלה טוענים לנצילות בפועל אשר נעה בין 15% ל-35%.

הניסיון והמחקר בתחום זה מלמדים כי הנצילות של מחוללי ציר אופקי נמוכה מזו של מחוללי ציר אנכי. למרות האמור, השימוש במחוללי ציר אנכי פחות שכיח בשל עלויות תכנון והקמה גבוהות.

סיכום

הפקת חשמל מרוח נמנית עם הדרכים הזולות ביותר לייצור חשמל, בהשוואה לעלויות הפקת חשמל בדרכים אחרות וממקורות אחרים. נמצא כי פוטנציאל ייצור החשמל מרוח הוא יחסי למהירות הרוח כשמעלים אותה בחזקה שלישית. בישראל למשל, תפוקת החשמל מיחידת שטח ברמת הגולן כאשר היחידה ניצבת לכיוון הרוח, גבוהה בממוצע פי 8 מתפוקת החשמל במישור החוף [3]. הטעם לכך הוא שמהירות הרוח ברמת הגולן כפולה בקירוב ממהירות הרוח במישור החוף. דרכים נוספות להשגת מהירויות רוח גבוהות יותר, פרט לבחירת מיקום מחולל הרוח, הן שימוש בשוברי רוח (נטיעת שורה או יותר של עצים או שיחים, סביב חוות או שדות, להגנה על הקרקע מפני סחיפה ולהגנה מפני הרוח) [4], וכן שימוש בעמודים גבוהים יותר [5] (ככל שעולים בגובה, הרוח מהירה יותר).

בעולם, השימוש במחוללי רוח נפוץ בדרך כלל במסגרת חוות רוח. אלה הם מתחמים שבהם כמה מחוללי רוח פועלים יחד. דנמרק היא מהמדינות הראשונות שעשו שימוש באנרגיית רוח לייצור חשמל. בימים מסוימים מצליחה מדינה זו לספק את כל צריכת החשמל שלה ממחוללי רוח, ואף להעביר חלק מהחשמל המיוצר לשכנותיה.

מקורות

1. Energy Efficiency Guide for Industry in Asia—www.energyefficiencyasia.org © UNEP 2006
2. Greenberg, D., Byalsky, M., and Yahalom, A. 2021. Valuation of wind energy turbines using volatility of wind and price. *Electronics* 10:1098. doi: 10.1103/Physics.14.112
3. Ditzkovich, Y., Kuperman, A., Yahalom, A., and Byalsky, M. A generalized approach to estimating capacity factor of fixed speed wind turbines. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 3:607–8. doi: 10.1109/TSTE.2012.22045382012
4. Garisto, D. 2021. Windbreaks may improve wind farm power. *Physics* 14:112. doi: 10.1103/Physics.14.112
5. Kolesnik, S., Sitbon, M., Yahalom A., and Kuperman, A. 2017. "Assessment of wind resource statistics in Samaria region," in *Proceedings of the 16th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development (Jelgava)*, 1409–1416.

פורסם אונליין: 25 בספטמבר 2023

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים : Roy Meirtchak | Bayan Abukatish

ציטוט: Yahalom A (2023) כיצד ניתן להמיר רוח לחשמל? Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2023.1237073-he

תורגם והותאם מ: Yahalom A (2023) How Can Wind Turn Into Electricity? Front. Young Minds 11:1237073. doi: 10.3389/frym.2023.1237073

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

זכויות יוצרים © 2023 © Yahalom 2023. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון 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: 8

שלום, אני אביב. אוהבת לקרוא ולצייר. נולדתי בישראל וגדלתי בה, אבל עברתי לאנגליה לכמה שנים. נשם אני גרה עם ההורים שלי, אחותי הקטנה ואחי התינוק, שאיתם אני אוהבת לשחק. החתול שלי ג'ורג' נשאר בישראל אצל סבתא שלי. כשאהיה גדולה ארצה להיות שחקנית או אומנית. אני מתעניינת במדע כי הוא קשור להמון נושאים שאני אוהבת.



CENTER FOR GIFTED AND TALENTED STUDENTS, EAST JERUSALEM, גיל: 13

אנחנו תלמידי כיתה ז' הלומדים במרכז לתלמידים מחוננים ומצטיינים במזרח ירושלים. אנו תלמידים סקרנים, בעלי מוטיבציה גבוהה, חדורי רוח של חקר והרפתקאות. ניחנו גם בחוש הומור, ואנו אנרגטיים ואוהבי ספורט.



הכותבים

ASHER YAHALOM

נולד ב-1968 בירושלים. למד פיזיקה ומתמטיקה באוניברסיטה העברית לתואר ראשון, ובהמשך למד לתואר שני ושלישי בפיזיקה באותה אוניברסיטה. בשנת 1996 קיבל תואר דוקטור. במהלך הפוסט-דוקטורט באוניברסיטת תל אביב הוזמן להצטרף לסגל אוניברסיטת אריאל בשומרון, וב-1999 היה לחבר הסגל הרביעי במחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה באוניברסיטה זו. ב-2006 מונה לפרופסור חבר, וב-2013 מונה לפרופסור מן המניין. בשנים 2014-2017 כיהן כראש המחלקה, ובשנים 2018-2021 כיהן כסגן הדיקן. על שמו רשומים יותר מ-270 פרסומים לרבות פטנטים. עד 2023 זכה תשע פעמים לציון לשבח מטעם הקרן למחקר כבידה (Gravity Research Foundation). פרופסור



יהלום נשוי לשופטת הדס יהלום, נשיאת בית הדין האזורי לעבודה בתל אביב, ולהם שלושה ילדים. בשעות הפנאי הוא גם שחקן כדורסל חובב. *asya@ariel.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