

## חלונות חסרי-צבע שממירים אור שמש לחשמל

Varun Vohra\* | Takashi Sano

המחלקה למדע ההנדסה, אוניברסיטת אלקטרו-תקשורת, צ'ופו, יפן

### סוקרים צעירים

ADDY  
גיל: 12



OLIVER  
גיל: 10



PRICE  
גיל: 13



PRINCESS  
גיל: 15



PROVIDENCE  
גיל: 10



TEDDY  
גיל: 10



תאים סולריים מסייעים לנו להשתמש בפחות פחם או נפט בתהליך ייצור חשמל, וכפועל יוצא להפחית את הפגיעה בסביבה. מרבית הפאנלים הסולריים הם יקרים ולא ניתן להשתמש בהם כחלונות מאחר שאינם שקופים, ולכן מסתירים את הנוף. אולם, אפשר לייצר חלונות סולריים באמצעות כימיקלים מיוחדים שנקראים צֶבְעָנִים אורגניים. חלונות אלה יכולים לקלוט אור שמש ולהשתמש באנרגיה שלו לייצור חשמל, אך עדיין ניתן לראות דרכם את הנוף. החלונות שייצרנו במחקרנו אינם יקרים, ושומרים על צבעי הנוף ללא שינוי. כל חלון חסר-צבע מייצר 100 ואט של חשמל – מספיק כדי לטעון 20 טלפונים ניידים במקביל. מאחר שבאפשרותנו להשתמש בחלונות הסולריים הזולים וחסרי-הצבע האלה בכל מקום, ביכולתנו לייצר הרבה אנרגיה נקייה!

### שימוש באור שמש כמקור לאנרגיה נקייה

בכדור הארץ חיים אנשים רבים. הם משתמשים בטלפונים ניידים, טלוויזיות, מחשבים ומגוון מכשירים נוספים שצורכים חשמל לצורך הפעלתם. הדרך השכיחה ביותר לייצר חשמל היא לשרוף פחם, גז, או נפט. בעת שריפתם, חומרים אלה משחררים גזים כמו פחמן דו-חמצני

## איור 1

צפייה בהר פיג'י דרך תאים סולריים מסיליקון לעומת חלונות סולריים. הר פיג'י הוא ההר הגבוה ביותר והיפה ביותר ביפן. (A) תאים סולריים מסיליקון יכולים להסתיר את הר פיג'י מאחר שהם פועלים כמו מראות. אם הפאנלים האלה ישמשו כחלונות, לא נהיה מסוגלים לראות דרכם. (B) כשאנו מסתכלים על הר פיג'י דרך חלון סולרי שמורכב מהצבען האורגני בטא-קרואטין ( $\beta$ -carotene), הנוף דרך החלון נראה כתום [2], אך עם הצבענים האדומים שאנו משתמשים בהם כאן, הנוף נראה אדום [3].

### צבען אורגני (Organic Colorant)

חומר כימי המורכב מאטומי פחמן, שיכול לתפוס אור שמש. צבענים מספקים צבעים למזון, לעלים של עצים ואפילו לעורכם.

## איור 2

אופן הפעולה של חלונות סולריים. חלונות סולריים מסוגים מסוימים מכילים שכבה פעילה הממוקמת בין שתי אלקטרודות. כאשר אור השמש פוגע בחלון, הצבענים בשכבה הפעילה תופסים פוטונים ומשתמשים באנרגיה שלהם ליצירת אלקטרונים שיכולים לנוע בקלות ממקום אחד לאחר. האלקטרונים באיזה כיוון הם אמורים לנוע, וזרימת האלקטרונים מייצרת חשמל.

### שכבה פעילה (Active Layer)

יריעה דקה מאוד בחלון סולרי, שתופסת אור ומתמירה אותו לחשמל.

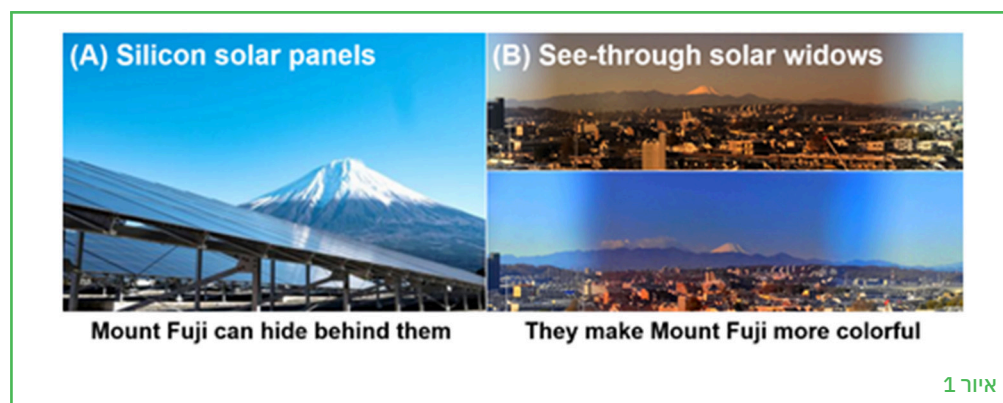
### אלקטרודה (Electrode)

יריעת מתכת המשמשת לתפיסת אלקטרונים או לשחרורם.

### אלקטרון (Electron)

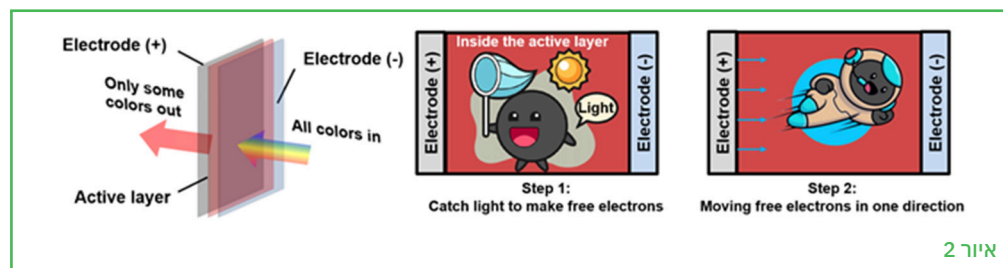
חלקיק קטן עם מטען חשמלי שלילי. תנועת אלקטרונים ממקום אחד לאחר מייצרת חשמל.

ומתאן, אשר מחממים את כדור הארץ ויוצרים בעיות סביבתיות אחרות. בשל כך, מדינות רבות מעוניינות לייצר חשמל ממקורות אנרגיה נקייה, כמו אור שמש [1]. כדי לעשות זאת, אנו זקוקים לפאנלים סולריים, המורכבים בדרך כלל מהחומר סיליקון, שיכול לקלוט את אור השמש. סיליקון הוא יקר, ולכן קשה להתקין כמות רבה של פאנלים סולריים במדינות עניות. נוסף על כך סיליקון לא מאפשר לאור לעבור דרכו, ולכן פאנלים סולריים מחומר זה אינם יכולים לשמש כחלונות, מאחר שהם יסתירו את הנופים הטבעיים (איור 1A).



איור 1

למרבה המזל, ישנם הרבה חומרים צבע כימיים – צְבָעֵנִים, שיכולים לקלוט אור שמש. כשצבענים אלה כוללים אטומי פחמן, אנו מכנים אותם **צבענים אורגניים**. צבענים מסוג זה ניתן למצוא בטבע, לדוגמה, כלורופיל הוא צבען שמעניק לצמחים את הצבע הירוק שלהם, ובטא-קרואטין הוא הצבען שגורם לגזרים להיראות כתומים. אנו השתמשנו בצבענים מלאכותיים אורגניים כדי ליצור חלונות סולריים חסרי-צבע – המבנה של החלון הסולרי שפיתחנו מוצג (איור 2).



איור 2

ראשית, יצרנו יריעות דקות מאוד של צבען אורגני – דקות פי אלף מנייר [2, 3], שאותן אנו מכנים **שכבות פעילות** (אקטיביות). כדי להמיר אור שמש לחשמל, אנו צריכים לערבב לפחות שני צבענים לשכבה האקטיבית. בהמשך התהליך אנו מכינים מעין כריך משכבה אקטיבית אחת המונחת בין שתי יריעות אחרות, שנקראות **אלקטרודות**, אשר לוכדות **אלקטרונים** או משחררות אותם, מתוך השכבה האקטיבית או לתוכה. אלקטרונים הם חלקיקים קטנים אשר יוצרים חשמל כשהם זורמים מאלקטרודה אחת לאחרת. אם שתי האלקטרודות הן גם שקופות, ניתן לראות דרך החלונות הסולריים (איור 1B). חלונות אלה מייצרים חשמל מפחות ממחצית אור השמש שפוגע בהם, שעה שהם מאפשרים לשאר האור לעבור דרכם, כך שעדיין ניתן לראות את הנוף דרך החלונות הסולריים.

הרעיון של חלונות סולריים נשמע כמו פריצת דרך מלהיבה, אך ישנן שתי בעיות גדולות שהוא מעלה. ראשית, בסופו של דבר חלונות אלה מפסיקים לפעול מאחר שחמצן באוויר מפרק את הצבענים האורגניים. שנית, אם הצבענים האורגניים לא תופסים את כל הצבעים של האור באופן זהה, הנוף דרך החלון ייראה כתום או אדום. במחקר שלנו ביקשנו לבדוק אם ניתן לייצר חלונות סולריים שיחזיקו מעמד לאורך זמן רב, ושאינם משנים את צבע הנוף הטבעי.

## כיצד חלונות סולריים פועלים?

כדי לייצר חשמל, חלקיקים קטנים, שנקראים אלקטרונים, צריכים לנוע ממקום אחד לאחר. זרימת האלקטרונים הזו נקראת **זרם חשמלי**. לאלקטרונים יש מטען שלילי, ולכן הם בדרך כלל צמודים חזק לאטומים, בעוד שלחלקיקים אחרים בתוך האטומים, שנקראים פְּרוֹטוֹנִים, יש מטען חיובי. באטום מתקיימים כוחות משיכה ודחייה חשמליים – חלקיקים בעלי אותו מטען דוחים זה את זה, בעוד שחלקיקים בעלי מטען הפוך מושכים זה את זה. כדי ליצור זרימת חשמל, ראשית אלקטרונים צריכים להשתחרר מהאטומים שהם שייכים אליהם. פעולה זו דורשת קָלֵט של אנרגיה. בחלונות הסולריים שלנו, אלקטרונים משוחררים מהאטומים של צבען אחד, שנקרא לו צבען A, על ידי אנרגיה מאור השמש. לאחר השחרור, הם "נגנבים" על ידי אטומים של צבען אחר, שנקרא לו צבען B. האלקטרון ש"נגנב" על ידי צבען B יכול לנוע בחופשיות ממקום אחד לאחר כיוון שלצבען B כבר יש אלקטרונים שנמשכים בחוזקה לפרוטונים בתוך האטום שלו. האלקטרונים החופשיים יכולים כעת לזרום מאלקטרודה אחת לאלקטרודה אחרת, מה שיוצר חשמל. זהו הבסיס ליצירת חשמל באמצעות חלונות סולריים אורגניים, אך ישנם כמה פרטים חשובים נוספים שעליכם לדעת.

כמו כל אור, גם אור השמש מורכב מחלקיקים קטנים שנקראים פְּוֹטוֹנִים. פוטונים בעלי אנרגיות שונות נדמים לעינינו כבעלי צבעים שונים. לדוגמה, לפוטונים של אור אדום יש פחות אנרגיה מאשר לפוטונים של אור כחול או ירוק. לצורך יצירת זרם חשמלי, האנרגיה של הפוטונים שפוגעים באטומים של הצבען צריכה להיות חזקה מספיק כדי להפריד אלקטרונים מאטומי הצבען. אם לפוטונים אין די אנרגיה לשם כך, הם יעברו דרך החלון בלי לסייע בהפקת זרם חשמלי.

כפי שצינו קודם לכן, השכבה הפעילה של החלונות הסולריים שלנו ממוקמת בין שתי שכבות נוספות של אלקטרודות, אשר חשיבותן בכך שהן קובעות לאלקטרונים באיזה כיוון עליהם לזרום. האלקטרודות הן גם נקודות החיבור שאליהם תחברו את הציוד החשמלי שאתם מבקשים להפעיל באמצעות אור השמש. לדוגמה, אם ברצונכם לטעון את סוללת הטלפון הנייד שלכם, תחברו את אלקטרודות הסוללה לאלקטרודות של החלון הסולרי.

## כיצד ניתן לייצר חלונות סולריים חסרי-צבע?

האם ידעתם שאור השמש מורכב מצבעים שונים רבים? אלה הצבעים שמופיעים בקשת בענן. שלושת הצבעים העיקריים הם כחול, ירוק ואדום (לעיתים מתוארים הצבעים כחול, צהוב ואדום, אך במדע אנו משתמשים בירוק). זכרו שהצבעים משקפים את רמת האנרגיה של הפוטונים. לחלק מהפוטונים של אור השמש אשר פוגעים בחלון הסולרי תהיה מספיק

### זרם חשמלי (Electrical Current)

זרם של אלקטרונים  
מאלקטרודה אחת לאחרת,  
שמייצר חשמל.

### פוטון (Photon)

חלקיק אור. לפוטונים בעלי  
אנרגיות שונות יש  
צבעים שונים.

**אור מועבר  
(Transmitted Light  
(T%))**

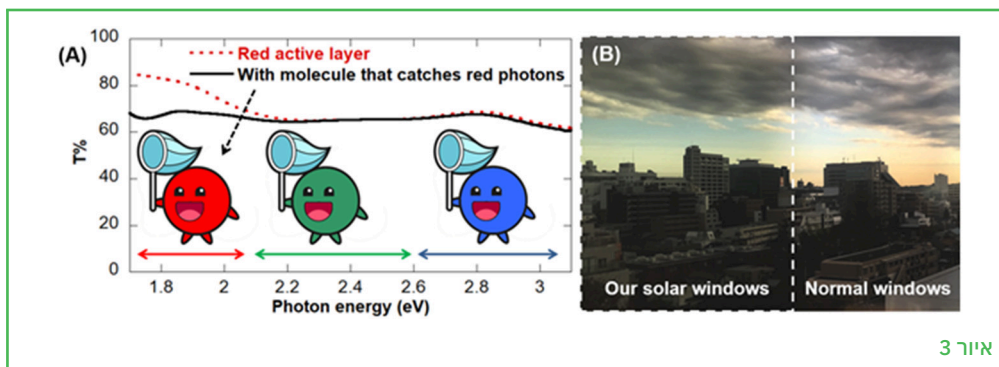
אחוז האור שעובר דרך  
משהו, כמו חלון.

$$T\% = \text{האור שמועבר דרך החלון/האור שפוגע בחלון} \times 100\%$$

יצרנו חלונות סולריים באמצעות שני צבענים אורגניים, ואז הארנו אור אדום, כחול, או ירוק על החלונות במטרה לקבוע את T% עבור כל צבע של האור. כשבחנו חלונות סולריים שיוצרו משני הצבענים האדומים בלבד, מצאנו ש-T% היה גבוה ב-20% עבור אור אדום מאשר עבור אור כחול וירוק. הסיבה לכך היא שלפוטונים אדומים אין מספיק אנרגיה כדי לשחרר אלקטרונים מהאטומים של צבענים אדומים בשכבה הפעילה. 20% הנוספים של האור האדום שעובר דרך החלון ומרכיב את החלון, כמו גם הנוף דרך החלון, נראים אדומים. שינינו את השכבות הפעילות כדי שיכילו צבען שלישי שהפוטונים האדומים יכולים לשחרר ממנו את האלקטרונים. על ידי כך, היינו מסוגלים ליצור שכבות פעילות בעלות T% של 60% עבור כל שלושת הצבעים הראשיים (איור 3A). השכבות הפעילות האלה חסרות-צבע מאחר שהן מעבירות את כל האור שהעין האנושית יכולה לקלוט באותה הכמות, מה שהופך את גרף T% להיראות כקו אופקי.

**איור 3**

ממצאים מהמחקר שערכנו. (A) כשמדדנו את כמות האור המועבר דרך החלונות בצבע אדום שלנו, מצאנו ש-T% היה גבוה ב-20% עבור אור אדום ביחס לאור ירוק או כחול (קו אדום מקווקו). כשהוספנו כימיקל שלישי שיכול לקלוט פוטונים אדומים, T% היה בקירוב 60% עבור כל שלושת צבעי האור, והחלונות הסולריים היו חסרי-צבע. (B) לחלונות רגילים יש T% של בערך 43%, ולכן הנוף דרך החלונות הסולריים שלנו נראה מעט כהה יותר, אך הצבעים שלו אינם משתנים.



איור 3

אולם, אפילו עם התערובת הראויה בין שלושת הצבעים, ה-T% בפועל של החלון הסולרי שלנו עומד על כ-43%, מאחר שהרכיבים בשכבות האלקטרוודה מפחיתים את כמות האור שמועבר. ה-T% של חלון רגיל הוא כ-70%. המשמעות היא שהחלונות הסולריים שלנו ייראו קצת יותר כהים מחלונות רגילים (איור 3B), אך היתרון הוא שהם יוכלו להתמיר כ-4% מאור השמש שפוגע בהם לחשמל!

**האם חלונות סולריים יכולים לייצר מספיק חשמל?**

כשאנו מְחַשְׁבִים את כמות החשמל שאנו משתמשים בה או מייצרים, אנו עושים שימוש ביחידה שנקרא וואט, שהיא מדד לכוח חשמלי. הכוח שאנו מקבלים מאור השמש על פני אזור של מטר מרובע אחד הוא אלף וואט. החלונות הסולריים שלנו הם בדרך כלל בגובה של

1.9 מטרים וברוחב של 1.3 מטרים, ויכולים להמיר 4% מאור השמש לחשמל. נחשב כמה חשמל תא סולרי אחד יכול לייצר:

אזור החלון:  $1.9 \text{ מטר} \times 1.3 \text{ מטר} = 2.47 \text{ מ}^2$  (נעגל למעלה ל- $2.5 \text{ מ}^2$ ;  $\text{מ}^2 = \text{מטר מרובע}$ ).

באמצעות שימוש באזור החלון, הכוח הסולרי שמתקבל מחלון אחד נהיה: 2.5 מטרים מרובעים  $\times 1,000$  ואט/מ<sup>2</sup> = 2,500 ואט.

אם כן, החשמל שמויצר על ידי חלון אחד הוא:  $2,500 \text{ ואט} \times 4\% = 100 \text{ ואט}$ .

מסכי טלוויזיה שטוחים משתמשים ב-90 ואט של חשמל; תוכלו לטעון טלפון נייד עם 5 ואט, ומחשב לוח (טאבלט) עם 12 ואט; עבור מחשב נייד, תצטרכו בסביבות 50 ואט. לכן, אם יש בביתכם טלוויזיה אחת, שני טלפונים ניידים, מחשב לוח אחד ושני מחשבים ניידים, תצטרכו:  $90 \text{ ואט} + (2 \times 5 \text{ ואט}) + 12 \text{ ואט} + (2 \times 50 \text{ ואט}) = 212 \text{ ואט}$ . באמצעות 3 חלונות סולריים, תוכלו בקלות להשתמש בכל המכשור האלקטרוני הזה באותו הזמן!

מה במקרה שבו המיקרוגל שלכם צורך 500 ואט? המשמעות היא שתזדקקו ל-5 חלונות פעילים. האם ביכולתנו לייצר חלונות סולריים של 500 ואט? נכון להיום, קשה לייצר חלונות של 500 ואט בעלי T% מעל 40%, ועקב כך הנוף דרך חלונות אלה ייראה די כהה. כעת אנו בוחנים צבענים חדשים במטרה לייצר חלונות של 250 ואט בעלי T% של כ-40%. באמצעות שני חלונות כאלה בלבד, נוכל להפעיל מיקרוגל של 500 ואט!

מרבית האנשים משתמשים במיקרוגל במשך 5-10 דקות ביום, ולכן ישנם זמנים שבהם החלונות הסולריים שלנו ייצרו יותר חשמל ממה שצריך. ניתן להשתמש בסוללות כדי לאגור את החשמל העודף לשימוש מאוחר יותר. אם נשתמש בחלונות סולריים ובסוללות יחד, נהיה מסוגלים להפעיל את כל מכשירי האלקטרוניקה בבתינו. החשמל שאגור בסוללות יוכל לשמש גם כדי להפעיל את מכשירי האלקטרוניקה שלנו בלילה, או כשאין אור שמש.

## סיכום

באמצעות שכבה פעילה שמכילה שלושה צבענים, באפשרותנו לייצר חלונות סולריים שמעבירים בסביבות 40% מאור השמש דרכם, בלי לשנות את צבעי הנוף הטבעי. כל אחד מהחלונות האלה יכול לייצר כ-100 ואט, ואנו עוסקים בפיתוח דרכים נוספות שבהן נוכל לייצר יותר כוח מחלון בודד. החלונות הסולריים האורגניים הם זולים ואינם מפריעים לנוף, לכן ניתן להתקיןם בכל מקום כדי להפעיל ציוד חשמלי. מאחר שעם הזמן התבַּרְה שלנו משתמשת ביותר ויותר כוח חשמלי, חלונות סולריים יהיו לטכנולוגיית מפתח המבטיחה שנוכל לקיים חברה מודרנית בלי לגרום לבעיות סביבתיות.

## מאמר המקור

Sano, T., Inaba, S., Vohra, V. 2019. Ternary active layers for neutral color semitransparent organic solar cells with PCEs over 4%. *ACS Appl. Energy Mater.* 2:2534–40. doi: 10.1021/acsaem.8b02144

## מקורות

1. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). 2019. *Renewables 2019 Global Status Report*. Available online at: <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
2. Vohra, V., Uchiyama, T., Inaba, S., and Okada-Shudo, Y. 2019. Efficient ultrathin organic solar cells with sustainable  $\beta$ -carotene as electron donor. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 7:4376–81. doi: 10.1021/acssuschemeng.8b06255
3. Inaba, S., Arai, R., Mihai, G., Lazar, O., Moise, C., Enachescu, M., et al. 2019. Eco-friendly push-coated polymer solar cells with no active material wastes yield power conversion efficiencies over 5.5%. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11:10785–93. doi: 10.1021/acsaem.8b02144

פורסם אונליין: 05 ביולי 2023

עורכת: Anna Regoutz

מנחים מדעיים: Florence Awino, Adam Hartstone-Rose, Francesca Paradisi

ציטוט: Vohra V | Sano T (2023) חלונות חסרי-צבע שממירים אור שמש לחשמל. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2021.552439-he

תורגם והותאם מ: Vohra V and Sano T (2021) Colorless Windows That Transform Sunlight Into Electricity. *Front. Young Minds* 9:552439. doi: 10.3389/frym.2021.552439

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

זכויות יוצרים © 2021 © Vohra | Sano 2023. 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

### ADDY, גיל: 12

אני בכיתה ז', אוהבת מאוד להתנדב במוזיאון המקומי שלי ולסייע לחיות – מקווה להיות וטרנירית כשאגדל. השיעור האהוב עליי בבית הספר הוא שיעור הריקוד שלי – אני גמישה מאוד, וגם אוהבת לטייל.



### OLIVER, גיל: 10

אוליבר אוהב מדע וסקרן מאוד. מאחר שגר בארצות שונות (אירלנד, אנגליה, וכעת בשווייץ), הוא דובר כבר ארבע שפות באופן שוטף, וכשיגדל רוצה לטייל עוד בעולם.



### PRICE, גיל: 13

פרייס אוהבת להמציא סיפורים, וגם כתבה ספר – "גברת ז'בלסון ואימפריית הפסולת". היא אמיצה וקופצנית, אוהבת התעמלות, אתלטיקה, כדורעף וכדורסל, נהנית מזמן איכות עם משפחתה ויצירתית מאוד. בבית הספר שלה, היא חלק מ"צוות ירוק" שפועל להגנה על הסביבה. פרייס אוהבת דיבייטינג, ויש לה תשוקה ללמוד ולהיות פעילה כנגד חוסר צדק חברתי.



### PRINCESS, גיל: 15

לפרינסס יש הרבה רעיונות ומטרות, ותשוקה לסייע לאחרים להשתפר. בשעת פתרון בעיות היא מיישמת חשיבה עמוקה. היא מצחיקה, ספורטיבית, קופצנית, אדיבה, אוהבת לחקור ולמצוא פתרונות, יצירתית, סיפורית וחובבת כתיבה – חיברה ספר שנקרא "שרה ומרכז הפסולת". פרינסס אוהבת כדורעף, מוזיקה, להקות, אומנות, צילום דיגיטלי וכן ללמוד דברים חדשים. מטרתה היא ללמוד עוד על מדע, ולשפר את כישורי הכתיבה והעריכה שלה.



### PROVIDENCE, גיל: 10

פרובידנס היא הצעירה ביותר מבין שלוש אחיותיה. היא שובבה וקופצנית, סקרנית, דברנית ואוהבת לשאול הרבה שאלות שמצחיקות אנשים אחרים. היא גם אוהבת לפגוש חברים חדשים, לטייל ולערוך ניסויים מדעיים, שבמהלכם היא עשויה להרוס חלק מהפריטים בביתה, לתקן אותם או למחזרם. כחלק מכך פרובידנס תיקנה רמקולים מקולקלים, אך אחרי כמה שבועות של פעולה, הפכה את חוטי הרמקול לדלגיות. יש לה תשוקה למוזיקה ולספורט, בפרט לכדורעף.



### TEDDY, גיל: 10

אני רוצה להיות מהנדס. נהייתי מאוד להתנסות ולהתמודד עם למידה כיצד להיות מהנדס ולקודד דברים. אני דיסלקטי, אוהב מאוד מתמטיקה, במיוחד אלגברה וגיאומטריה. אני גם אוהב לטייל ונוהג לרכוב 30 מייל בשבוע.



## הכותבים

### VARUN VOHRA

כשאנשים שואלים אותי מה אני עושה בחיים, לעיתים קרובות אני משיב: "מנסה להציל את כדור הארץ, אבל לא כמו סופרמן". מדע אינו מעניק לי כוחות-על, אך הוא מסייע לי להבין מדוע פלסטיקים מסוימים מיוחדים מאוד, או חומרים אורגניים אחרים, יכולים להוליך מטענים חשמליים. באמצעות החומרים





האורגניים המיוחדים האלה, אני מייצר תאים סולריים דקים מאוד שיכולים להיות שקופים או גמישים, ומנסה להבין כיצד לשפר את ביצועיהם, במטרה לסייע לנו להתקדם לקראת עתיד בר-קיימא יותר מבחינה אנרגטית. [\\*varun.vohra@uec.ac.jp](mailto:varun.vohra@uec.ac.jp)



### TAKASHI SANO

העניין שלי במוליכים למחצה החל כשהייתי נער. עקב כך, הצטרפתי לאוניברסיטת אלקטרו-תקשורת בשנת 2015. תחת הנחייתו של פרופסור ווהרה, גיליתי טכנולוגיה חדשה מדהימה: תאים סולריים שרואים דרכם, שאפשר לכופף או למתוח. כאשר מסיימים לשחק איתם, הם חוזרים לצורתם המקורית, ועדיין עובדים! אני מקווה שתוצאות מחקרנו יסקרנו אתכם, כך שאולי תצטרפו לדור המדענים הבא שיפתח תאים סולריים אורגניים.

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