



## מיפוי השדה המגנטי של כדור הארץ

Ciarán D. Beggan\*

מכון המחקר הגיאולוגי הבריטי, אדינבורו, בריטניה

### סוקר צעיר

SASYAK

גיל: 10



### ליבה חיצונית (Outer core)

שכבת המתכת הנוזלית בתוך כדור הארץ, שמתחילה בערך בחצי הדרך אל המרכז.

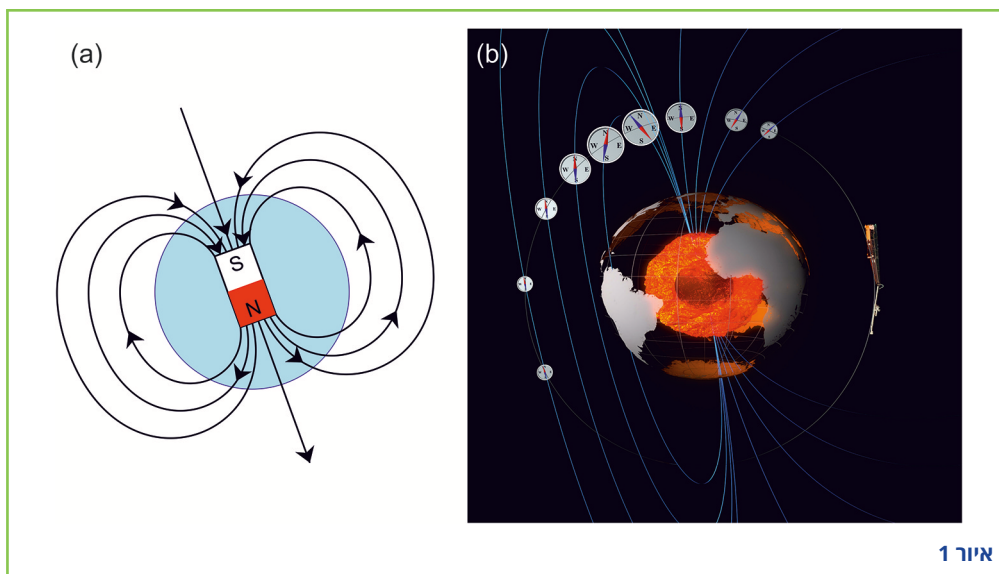
לכדור הארץ יש ליבה פנימית מוצקה וליבה חיצונית נוזלית ששתיהן מורכבות מברזל ומניקל. המתכת מוליכה זרם חשמלי שנגרם על-ידי תנועת הנוזל. הזרם החשמלי יוצר שדה מגנטי שמגיע מהליבה אל המעטפת של כדור הארץ, ומעבר לה. השדה המגנטי שנוצר על-ידי קליפת כדור הארץ צפוי להסתדר עם ציר הסיבוב, אולם הוא סוטה ממנו קצת מסיבות שאינן מובנות לגמרי. מחט מצפן לרוב לא מצביעה על הצפון האמיתי (ציר הסיבוב של כדור הארץ), אולם היא מצביעה אל קוטב הצפון המגנטי. הזווית בין הצפון האמיתי והצפון המגנטי בכל נקודה בכדור הארץ נקראת זווית הנטייה המגנטית (דִקְלִינָצְיָה). מפות של הנטייה המגנטית הן מסובכות מאוד, ובשל זרימת הליבה החיצונית מיקום הצפון המגנטי משתנה עם הזמן.

### הליבה החיצונית של כדור הארץ

אפשר לחלק את כדור הארץ לארבע שכבות: הליבה הפנימית המוצקה במרכז; הליבה החיצונית הנוזלית; המעטפת הסלעית והקרום בפני השטח, שעליו אנו חיים. רוחב הליבה של כדור הארץ הוא בערך 6,800 קילומטרים, והיא מתחילה בערך במחצית הדרך למרכז הכדור (איור 1b). בערך תשע עשיריות ממנה מורכבות מברזל ומניקל [1]. הליבה הפנימית היא בערך

### איור 1

(a) המחשה של קווי השדה המגנטי מבר מגנטי פשוט, בדומה לשדה המגנטי של כדור הארץ. כמו בכדור הארץ, הקוטב הדרומי (שמסומן ב-"S") נמצא למעשה בחצי הכדור הצפוני. (b) ליבת כדור הארץ נמצאת במרכז הכדור. המעטפת הסלעית והקרומ שקופים בתמונה הזו. הליבה החיצונית מוצגת בכתום, והשכבה הפנימית מוצגת על-ידי הספֶרָה הכהה יותר במרכז. השדה המגנטי (קוויים כחולים) נוצר בליבה החיצונית. מימין רואים מבט אומנותי של הליוון Swarm magnetic, שחש את השינוי בכיוון המצפן בזמן שהוא טס דרך השדה המגנטי של כדור הארץ במסלול ההקפה שלו (קו אפור). כל הזכויות שמורות ©ESA/ATG Medialab-7. איור 1a ברישיון: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth's\\_magnetic\\_field\\_pole.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth's_magnetic_field_pole.svg)



בגודל של הירח. היא חמה מאוד (מעל 5,000 מעלות צלזיוס) והיא מוצקה כתוצאה מהלחץ העצום שנובע ממשקל החומר שנמצא מעליה.

במרחק גדול יותר ממרכז כדור הארץ נמצאת ליבה חיצונית, שהיא בערך בגודל של מאדים. המתכת עדיין חמה מאוד (יותר מ-3,000 מעלות צלזיוס) אולם למרות הלחץ הגדול הליבה החיצונית נוזלית מאוד, כאשר החום גובר על ההשפעה של הלחץ. הליבה החיצונית זורמת בקלות כמו שמים זורמים על פני השטח של כדור הארץ. משמעות הדבר היא שהמתכת כל הזמן זזה וזורמת, כמו האוקיינוסים. באופן דומה למה שקורה כשאתם מערבבים כוס תה מהר, הסיבוב המהיר של כדור הארץ פעם ביום גורם לזרם שבליבה החיצונית להסתובב גם כן.

הליבה מנסה לקרר את עצמה. אולם המעטפת הסלעית שבין הליבה לבין פני השטח האחרים מתנהגת כמו שמירה ומונעת מהליבה להתקרר מהר מדי. הליבה מנסה למצוא דרכים אחרות להיפטר מהחום ומהאנרגיה העודפים. דרך אחת לעשות זאת היא באמצעות יצירת שדה מגנטי. השדה המגנטי יכול לעבור את כל הדרך אל פני השטח של כדור הארץ, מה שמאפשר לכמות קטנה של אנרגיה להשתחרר מהליבה.

### חשמל יוצר שדה מגנטי

מגנטיות וחשמל קשורים באופן פיזיקלי – לרוב מקבלים אחד כשהשני נוצר, וזה קורה גם בתוך הליבה. הנוזל המתכתי של הליבה חם מדי להיות מגנט קבוע, כמו מגנט של מקרר, אולם הוא **חומר מוליך חשמלי**, כמו חוט נחושת. באופן דומה לחוטי החשמל בבית שלכם, הליבה הנוזלית נושאת זרם חשמלי גדול מאוד, מה שבתורו יוצר שדה מגנטי חזק.

החשמל נוצר מתנועה של מתכת נוזלית, באופן דומה לטורבינת רוח שמייצרת חשמל מתנועה של להבים. החשמל זורם סביב לקו המשווה של כדור הארץ בלולאה גדולה מאוד ומייצר שדה מגנטי חזק, שבדרך לליבה החיצונית. השדה המגנטי עובר כל הדרך אל פני השטח של כדור הארץ ועד לחלל.

### חומר מוליך חשמלי (Electrically conductive material)

חומר שמאפשר לחשמל לעבור דרכו בצורה קלה.

הוא מייצר שדה מגנטי בצורה של בר מגנטי (איור 1a). השדה המגנטי נמשך החוצה לחלל ויוצר "בועה" שבה כדור הארץ יושב. הבועה המגנטית הזו מגינה על האטמוספירה של כדור הארץ מפני השדה המגנטי של השמש, שאחרת היה מסיר את האטמוספירה של כדור הארץ במשך מיליארדי שנים.

הדרך שבה נוצר השדה המגנטי של כדור הארץ מורכבת מאוד ולא לגמרי מובנת על-ידי מדענים כיום. חושבים שלולאת הזרם החשמלי בליבה לא יוצרת מעגל מושלם סביב לקו המשווה, וזו הסיבה לכך שהשדה המגנטי למעשה "מוטה" בזווית של כ-11 מעלות הרחק מציר הסיבוב של כדור הארץ. חוזק הזרם החשמלי משתנה גם הוא עם הזמן, מה שגורם לשדה המגנטי בפני השטח של כדור הארץ להשתנות. לבסוף, זרימת המתכת הנוזלית "גוררת" את השדה המגנטי לכיוון מערב. כל התהליכים השונים האלה משתלבים ויוצרים שדה מגנטי מורכב מאוד, וקשה לצפות כיצד הוא משתנה עם הזמן. בערך ארבע פעמים בכל מיליון שנים השדה המגנטי חווה היפוך שבו הקטבים "מתהפכים", אף על פי שלוקח אלפי שנים עד שזה קורה.

## השדה המגנטי בפני השטח של כדור הארץ

בזמן שהצורה הכוללת של השדה המגנטי של כדור הארץ דומה לבר מגנטי פשוט, כשמסתגלים על השדה המגנטי לפרטים הוא הרבה יותר מורכב. באופן כללי, מחט מצפן מצביעה בקירוב צפונה אולם היא לא מצביעה לצפון האמיתי (הנקודה שסביבה כדור הארץ מסתובב). הזווית שבין הצפון האמיתי לבין הכיוון שאליו מצביעה מחט מצפן נקראת **הנטייה המגנטית (דקלינציה)**. מחט מצפן מצביעה לכיוון מיקום שנקרא קוטב צפון מגנטי.

השדה המגנטי שימושי מאוד לניווט. הסינים השתמשו במצפנים פשוטים כבר בשנת 1100 כדי למצוא כיוונים. המפה הראשונה נוצרה על-ידי Edmund Halley מ-Halley's comet ב-1699. הוא הבין שהשדה המגנטי משתנה כל הזמן, והציע שיש שכבת נוזל במרכז כדור הארץ. הקוטב המגנטי הצפוני התגלה על-ידי James Clerk Ross בשנת 1831 בקנדה. אולם, כדי לסבך עוד יותר את העניינים, קוטב הצפון המגנטי לא נשאר באותו המקום אלא זז כל הזמן, כתוצאה מזרימתה של הליבה החיצונית.

כיום (בשנת 2019), הקוטב המגנטי הצפוני עדיין ממוקם בצפון קנדה, אולם הוא זז בקצב של 50 ק"מ בשנה, והוא יחצה את צפון רוסיה מתישהו במהלך העשור הבא. איור 2 מציג את המיקומים של הקטבים הצפוני והדרומי בין השנים 1900 ו-2020. שימו לב כמה מהר הקוטב הצפוני זז מאז שנת 2000, בעוד שהקוטב הדרומי לא זז הרבה בהשוואה אליו.

## יצירת מפה

יצירת מפה של השדה המגנטי היא פשוטה יחסית, בתיאוריה. כל מה שאתם צריכים הוא מכשיר GPS (כמו שיש בסמארטפון) כדי לפענח את המיקום המדויק שלכם ולסייע לכם למצוא את כיוון הצפון האמיתי. אתם גם צריכים מצפן. ראשית, השתמשו ב-GPS כדי לפענח את כיוון הצפון האמיתי. זה יכול להיעשות באמצעות מיקום שני מקלות על האדמה לאורך קו אורך

### נטייה מגנטית,

### דקלינציה

### (Declination)

הזווית בין הצפון המגנטי לצפון האמיתי של כדור הארץ.

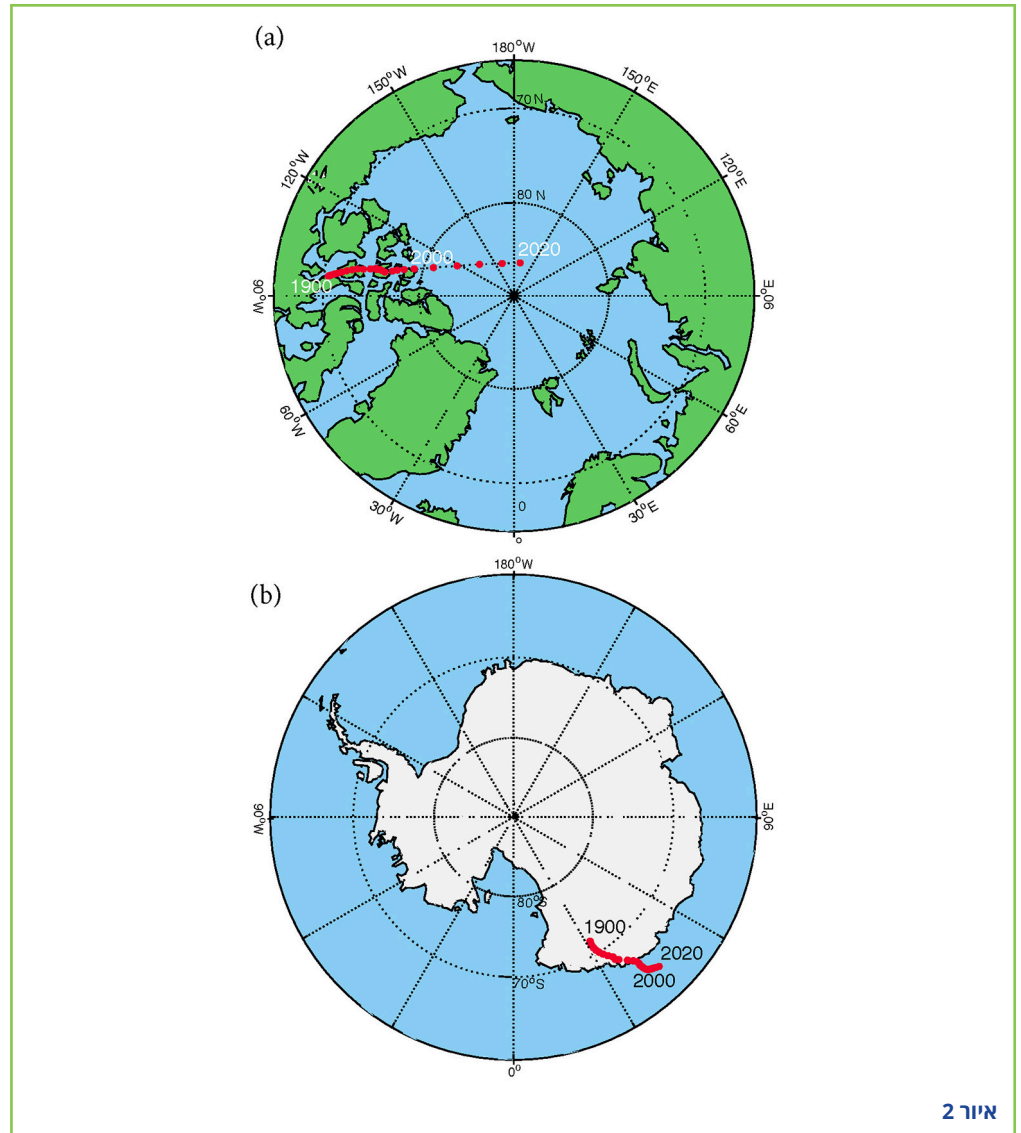
### צפון מגנטי

### (Magnetic north)

הנקודה על פני כדור הארץ שבה השדה המגנטי מצביע ישירות לכיוון מרכז כדור הארץ.

**איור 2**

מיקום הקטבים המגנטיים מוצג בקפיצות של חמש שנים מ-1900 ועד 2020, עבור קוטב הצפון המגנטי (a) וקוטב הדרום המגנטי (b). שימו לב שקוטב הצפון המגנטי זז מרחק גדול הרבה יותר ובקצב מהיר יותר מאשר קוטב הדרום המגנטי מאז 1900.



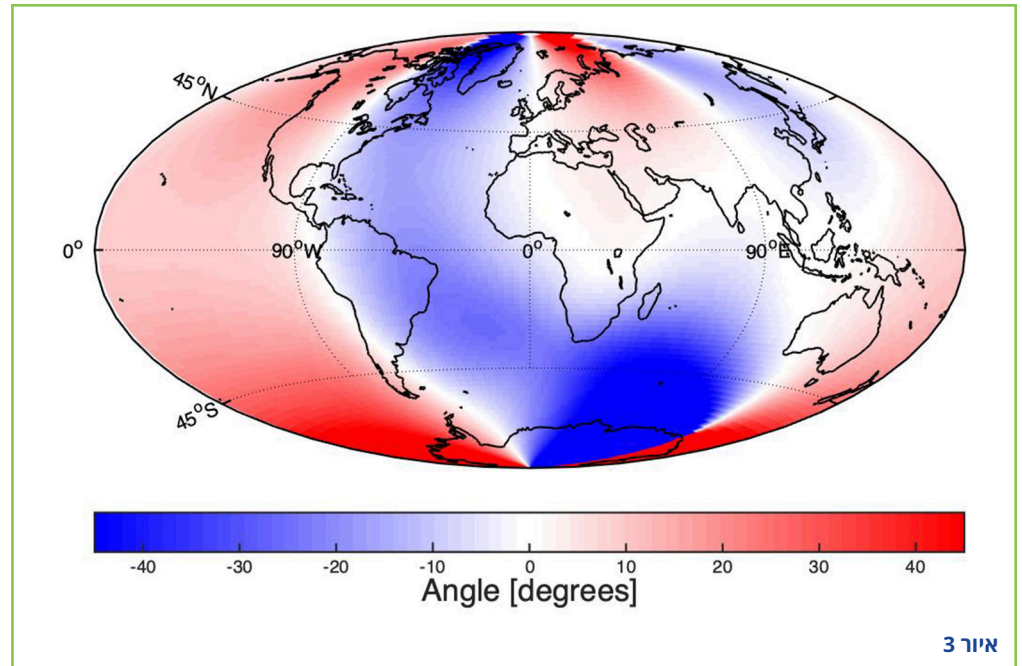
**איור 2**

קבוע. עמדו בין המקלות ופענחו את הזווית שבין מחט המצפן לבין קו הצפון האמיתי שיצרתם באמצעות שני המקלות. מזל טוב, זה עתה מדדתם את זווית הנטייה המגנטית! כדי ליצור מפה, חזרו על המדידות במיקום אחד, ועוד אחד. עשו זאת כמה מיליון פעמים ברחבי העולם כולו, כולל באוקיינוסים ובמדברים, ואז עבודתכם תושלם... לפחות לכמה שנים קדימה, עד שהשדה המגנטי יזוז. כמובן שזה לא בר-ביצוע עבור בן אדם, אולם זה אפשרי עבור לוויין.

מאז 1999 התקיימו משימות של שלושה לוויינים אירופאיים שמטרתם הייתה למדוד בצורה מדויקת מאוד את השדה המגנטי של כדור הארץ. איור 1b מציג כיצד לוויין חש את השדה המגנטי שמגיע מהליבה החיצונית. שלושת הלוויינים הנוכחיים, שנקראים Swarm, טסים בין 450 ל-500 קילומטרים מעל פני השטח של כדור הארץ ומתקדמים במהירות של 8 קילומטרים בשנייה. לוקח להם כ-90 דקות להקיף את כדור הארץ, והם משלימים 15 הקפות ביום. אחרי 4 חודשים הם אוספים מספיק מדידות סביב לעולם כדי ליצור מפה [2].

### איור 3

הנטייה המגנטית בשנת 2019 (במעלות), כפי שהתקבלה ממודל ה-International Geomagnetic Reference Field (IGRF-12). הצבעים מראים את הזווית שבין הצפון המגנטי לבין הצפון האמיתי. אזורים לבנים הם מקומות שבהם המצפן מצביע מערבה מהצפון האמיתי, בעוד שצבעים אדומים מראים היכן המצפן מצביע מזרחה מהצפון האמיתי. אתם יכולים לראות את התבנית המורכבת מאוד של זוויות הנטייה המגנטית ברחבי כדור הארץ [3].



איור 3

מידות הליווינים נאספות לתוך מחשב, שם משתמשים בתהליך מתמטי שנקרא אינוורסיה כדי לייצר מפה (או תמונת מצב) של השדה המגנטי בנקודה מסוימת בזמן. איור 3 מראה מפה של הנטייה המגנטית בינואר 2019, וממחיש עד כמה השדה המגנטי מורכב.

מאחר שהשינוי בשדה המגנטי אינו ניתן לחיזוי הרבה מעבר שנים קדימה, מפות השדה המגנטי האלה מתעדכנות באופן רגיל כל 5 שנים. מפות מסוימות נוצרות חינם על-ידי קבוצת מדענים סביב לעולם, והן ידועות כ-International Geomagnetic Reference Field, או IGRF [3]. נדרש מאמץ אמיתי ליצור מפה טובה, וזה אורך כמה חודשי עבודה. הגרסה המאוחרת ביותר השתחררה בשנת 2015 והבאה תהיה מוכנה בשנת 2020.

## מפה מגנטית על הסמארטפון שלכם

אתם ודאי מכירים את השימוש בשדה המגנטי של כדור הארץ לצורכי ניווט – חשבו על ספינות שמפליגות באוקיינוס או על אנשים שמטיילים בהרים. אולם, אם אי פעם השתמשתם במפה בסמארטפון שלכם כדי למצוא איך להגיע למקום כלשהו, אז השתמשתם במפה של השדה המגנטי של כדור הארץ.

כשאתם פותחים אפליקציה של מפה המיקום שלכם מוצג בדרך כלל כנקודה קטנה עם חץ או משולש שמצביע על הכיוון שבו אתם מסתכלים. סמארטפונים משתמשים במצפן דיגיטלי פנימי כדי לפענח את הכיוון של הצפון המגנטי. אולם, מאחר שמפות מיושרות עם הצפון האמיתי, התוכנה של הסמארטפון צריכה לתקן את פער הזווית הנטייה המגנטית. הסמארטפון משתמש במיקום ה-GPS כדי לפענח את הזווית הנכונה ממפת הנטייה המגנטית, כמו למשל מ-IGRF. באיור 3 אתם יכולים לראות שבאזורים מסוימים בעולם הזווית הזו מגיעה עד ל-45 מעלות.

## מסקנות

יצירת מפות של השדה המגנטי של כדור הארץ היא תהליך מורכב שצריך לחזור עליו לפחות פעם ב-5 שנים כדי לשמור על המפות מעודכנות. המפות יכולות ללמד אותנו על הליבה החיצונית של כדור הארץ, והן גם יעילות עבור יישומים רבים אחרים שוודאי חוויתם כמו למשל ניווט בעיר באמצעות הסמארטפון.

## מקורות

1. Lowrie, W. 2007. *Fundamentals of Geophysics, 2nd Edn.* Cambridge: Cambridge University Press.
2. Olsen, N., Hulot, G., Lesur, V., Finlay, C. C., Beggan, C., Chulliat, A., et al. 2015. The Swarm Initial Field Model for the 2014 geomagnetic field. *Geophys. Res. Lett.* 42:1092–8. doi: 10.1002/2014GL062659
3. Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., et al. 2015. International Geomagnetic Reference Field (IGRF): the 12th generation. *Earth Planets Space* 67:79. doi: 10.1186/s40623-015-0228-9

פורסם אונליין: 28 בינואר 2021

נערך על ידי: Anna Regoutz, Imperial College London, United Kingdom

ציטוט: Beggan CD (2021) מיפוי השדה המגנטי של כדור הארץ. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2019.00042-he

### תורגם והותאם:

Beggan CD (2019) Making a Map of the Earth's Magnetic Field. *Front. Young Minds* 7:42. doi: 10.3389/frym.2019.00042

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

**COPYRIGHT** © 2019 © Beggan 2020. 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.

## סוקר צעיר

### SASYAK, גיל: 10

אני בן 10 ואני תלמיד בהודו. אני חוקר נלהב של כמה סוגי ספרים. אני משתתף להוט בתחרויות של בחנים ואולימפיאדות, וזוכה של תחרות איות. אני משתתף בשיעורי כדורגל ונהנה לרכוב על אופניים.



## הכותב

### CIARÁN D. BEGGAN

אני מדען בכיר במכון המחקר הגיאולוגי הבריטי. אני עובד בצוות הגיאומגנטיות באדינבורו. הם חוקרים את כל ההיבטים של השדה המגנטי של כדור הארץ, מהליבה ועד לחלל החיצון. אני בוחן את הסיבות לכך שהשדה המגנטי משתנה עם הזמן, ואת האופן שבו אפשר לשפר את יכולתנו לנבא שינויים בשדה המגנטי באופן מדויק בטווח זמן של יותר מ-5 שנים. אני גם בוחן יישומים של מדידות השדה המגנטי לצורך הבנת האופן שבו השדות המגנטיים של כדור הארץ ושל השמש משפיעים זה על זה, במיוחד כשאורות הזוהר הצפוני ניתנים לצפייה. \*ciar@bgs.ac.uk



Hebrew version  
provided by

מזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים (ע.ר.)  
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس  
Bloomfield Science Museum Jerusalem

