

## כוכב מלא אור, כוכב מלא הילה... בואו נבנה בית על הירח הלילה!

Jeneé A. Jagoda\*, Andrew J. Hoisington, Steven J. Schuldt

מכון הטכנולוגיה של חיל האוויר, בסיס צבאי רייט-פטרסון, דייטון, אוהיו, ארצות הברית

### סוקרים צעירים

KATELYN

גיל: 11



ROSE

גיל: 14



ב-20 ביולי 1969, האסטרונאוט ניל ארמסטרונג היה לאדם הראשון שהלך על הירח. במהלך שלוש השנים שלאחר מכן, 11 אנשים נוספים צעדו בעקבותיו. אולם, אסטרונאוטים לא חזרו לירח במשך כמעט חמישה עשורים. מאז, מדענים דנים ברעיון שליחת אנשים חזרה לירח, או אפילו למאדים. חלק מהמדענים מעוניינים לבסס מושבות קבועות בחלל, למקרה שהמשאבים על כדור הארץ ייגמרו. אך כיצד בונים מקומות למחיה ולעבודה באזור שבו אין חומרי בנייה, ציוד, או כוח עבודה? פתרון מבטיח אחד יכול להיות הדפסה בתלת-ממד.

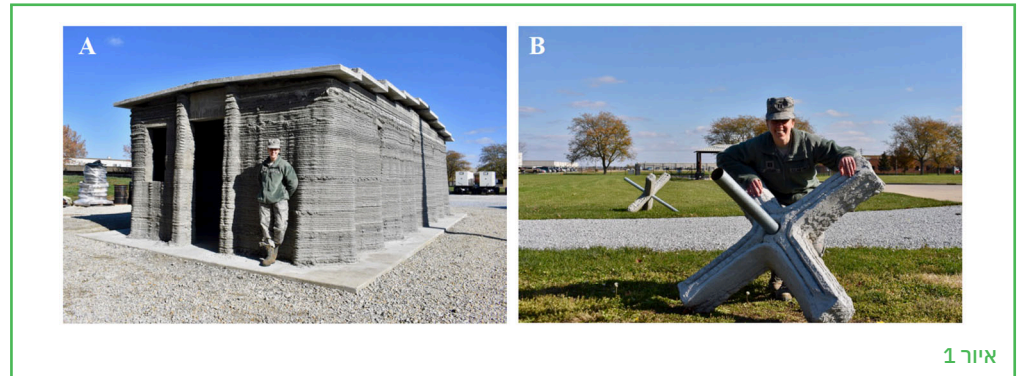
### מהו מבנה שמודפס בתלת-ממד?

ייתכן ששמעתם על הדפסה בתלת ממד – דרך חדשה לייצר דברים שאנו משתמשים בהם ביומיום. הדפסה בתלת-ממד יכולה לשמש ליצירת צעצועים, מזון, איברים אנושיים ועוד! מדפסות תלת-ממד מזריקות החוצה שכבות של חומר כמו למשל פלסטיק, מתכת, או עץ, כדי ליצור אובייקט תלת-ממדי. האם ידעתם שהדפסה בתלת-ממד משמשת גם לבניית בתים, משרדים, ובניינים אחרים? השיטה של בנייה באמצעות הדפסה בתלת-ממד הומצאה בשנת 1998, אך התפתחה מאוד בחמש השנים האחרונות. בנייה באמצעות הדפסת

תלת-ממד מזריקה חומרי בניין כמו בטון כדי ליצור קירות; רכיבים כמו למשל קורות ועמודים, ואפילו בניינים שלמים. אין גבול לסוגים ולצורות של מבנים שאפשר ליצור באמצעות הדפסה בתלת-ממד (איור 1).

### איור 1

שתי דוגמאות לבנייה באמצעות הדפסה בתלת-ממד, כאן על כדור הארץ. (A) אחד מכותבי המאמר עומד ליד מבנה צבאי שנהג לאכלס חיילים בשירות. קירות המבנה הודפסו במדפסת תלת-ממד בתוך פחות מ-48 שעות! (B) אחד מכותבי המאמר עם מחסום קיפוד – סוג של מחסום לכלי רכב שמסייע לאבטח בסיסים צבאיים ולהגן עליהם. כפי שאתם רואים, בנייה באמצעות הדפסה בתלת-ממד יכולה להיות שימושית עבור סוגי מבנים שונים.



איור 1

ישנם מדענים שמעוניינים לבסס מושבות ומבנים קבועים בחלל, למקרה שהמשאבים על פני כדור הארץ ייגמרו. מבנים שעשויים להיות שימושיים בחלל כוללים מקלטים, האנגרים של מעבורות, כבישים, משטחי נחיתה והמראה וקירות שמגינים מפני פיצוצים [1]. ככל שבני אדם ישוהו זמן רב יותר בחלל, עשויים להידרש מבנים מורכבים יותר לרבות מעבדות מחקר, מחסנים, חממות ומבנים ארוכי-טווח אחרים.

להדפסה בתלת-ממד בחלל יש שני יתרונות משמעותיים בהשוואה לבנייה מסורתית. ראשית, ניתן להדפיס בניינים באמצעות חומרים שנמצאים בחלל, כמו אבנים מרוסקות ואבק. שנית, הדפסה בתלת-ממד מצריכה מספר קטן של עובדים, אם בכלל. משמעות הדבר היא שמושבות יכולות להיות מוכנות לכניסתם של אסטרונאוטים אפילו לפני הגעתם לחלל.

## חומרים בחלל: אבן ירח ועוד

מעבורות חלל ורקטות חלל מכילות מקום מוגבל למטען, ואינן משוגרות לעיתים קרובות, לכן שליחת אספקה לחלל היא יקרה. למעשה, העלות של שליחת אספקה למאדים מגיעה עד מיליון דולר לקילוגרם אחד [2]! מסיבה זו, בנייה באמצעות חומרים מהחלל יכולה לחסוך מיליארדי דולרים. שלושה חומרים שכיחים בחלל הם רגוליט, בזלת וגופרית (איור 2). מדענים עובדים על פיתוח טכנולוגיה שתוכל לאסוף את החומרים האלה, ולעבדם לצורכי בנייה.

רגוליט היא שכבה של אבן מרוסקת ואבק, שמוצרת על פני השטח של הירח אחרי מאות שנים של פגיעות מיקרו-מטאוריטים. היא החומר הפשוט והשכיח ביותר שמשמש בבנייה באמצעות הדפסת תלת-ממד בחלל. בזלת היא אבן געשית, כלומר נוצרה במהלך זרימה של לבה. היא מרכיבה כ-26% מפני השטח של הצד הקרוב של הירח. בזלת עמידה בפני קרינת השמש, ויכולה לשמש לבניית מבנים שמופעל עליהם לחץ. גופרית היא חומר שכיח על מאדים. לעיתים היא משמשת בבטון כדי לסייע לרכיבים אחרים להידבק טוב יחד.

### רגוליט

(Regolith)

האבן המרוסקת והאבק שמיוצרים על פני השטח של הירח אחרי מאות שנים של פגיעות מיקרו-מטאוריטים.

### בזלת

(Basalt)

אבן געשית שנמצאת בשפע בחלק הקרוב של הירח, עמידה בפני קרינת השמש.

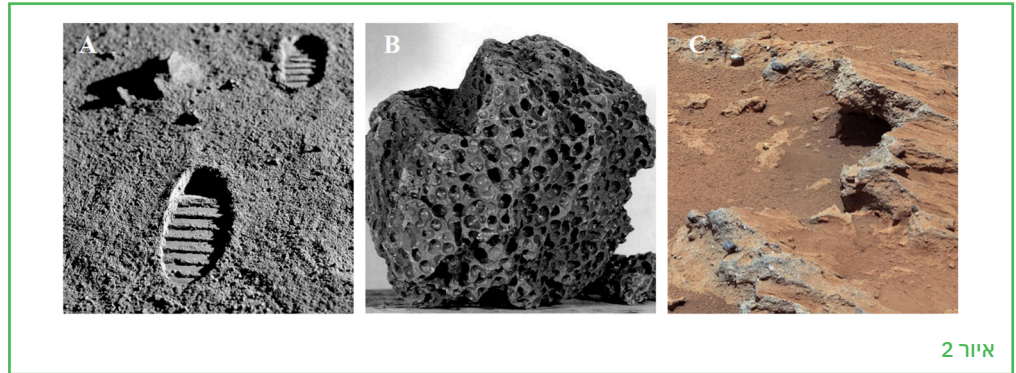
### גופרית

(Sulfur)

חומר שכיח במאדים, משמש לסייע לרכיבים של תערובת בטון להידבק יחד.

**איור 2**

חומרים שנמצאים בחלל. (A) רגולית, האבן המרוסקת שמכסה את פני השטח של הירח. (B) בזלת, אבן געשית שנמצאת על הירח. (C) האבק על מאדים, מכיל גופרית.



איור 2

**כוח מתיחה (Tension)**

הכוח המופעל על הקורה כשהיא מתארכת.

**דחיסה (Compression)**

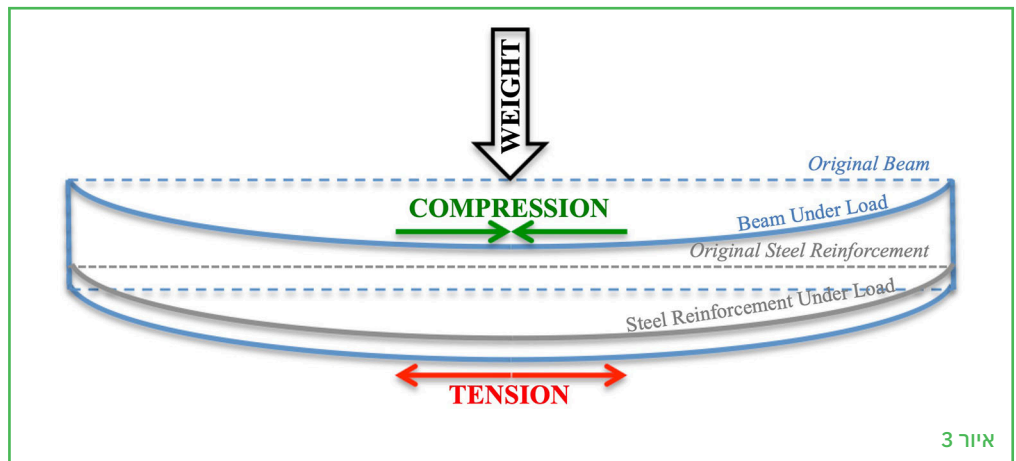
מצב של קורה כשהיא לחוצה ודחוסה תחת מטען.

ישנם הרבה חומרי בנייה פוטנציאליים בחלל. אולם, חומרי חיזוק כמו למשל פלדה, אינם שכיחים בחלל. על כדור הארץ, פלדה מספקת לבניינים כוח נוסף שמסייע להם לעמוד בפני **כוחות מתיחה**. בלי פלדה, מבני בטון עלולים להיסדק ולהישבר. במטרה להפחית את הצורך בפלדה, אפשר לעצב בניינים כך שיתבססו על **דחיסה** [3]. דחיסה היא ההפך ממתחה. היא מתרחשת כאשר בטון מועמס במשקל ונדחס (נלחץ על ידי המטען). שתי דוגמאות לעיצובים מבוססי דחיסה הן קשתות וכיפות.

**איור 3** מראה כיצד קורת בטון מחוזקת יכולה לחוות גם דחיסה וגם מתיחה. קורות הן חלק בסיסי בבניינים רבים, והן תומכות במשקל, כמו רצפות, גגות ואנשים. מאחר שכוח הכבידה של הירח חלש ב-83% מכוח הכבידה של כדור הארץ, מבנים בחלל חשופים לכוחות מתיחה ודחיסה פחותים יותר. זה מאפשר למהנדסים להדפיס מבנים קלים ודקים יותר, ולהשתמש בכוחות חומרים [3].

**איור 3**

משקל מייצר גם דחיסה וגם מתיחה בקורות בטון מחוזקות. הקורה המקורית (קווים כחולים מקווקווים) היא ישרה. כאשר מניחים משקל על הקורה, היא מתכופפת תחת העומס (קווים כחולים מלאים). חלקה העליון של הקורה מתקצר (נדחס) בעת הכיפוף – זה יתרון מאחר שבטון עמיד בפני דחיסה. חלקה התחתון של הקורה מתארך ונמתח בעת הכיפוף (מתחה) – זהו קושי מאחר שבטון פחות עמיד בפני מתיחה ועלול להישבר. הוספה של מוט פלדה מחזק בתחתית הקורה (קו אפור) מסייעת לשלוט במתיחה.



איור 3

**בנייה באמצעות מדפסות, לטובת בני האדם**

הדפסה בתלת-ממד יכולה לשמש לבנייה מראש של מושבות על הירח ועל מאדים, אפילו לפני הגעתם של בני אדם לשם, באופן שמסייע להגן על אסטרונאוטים בהגיעם לחלל. לדוגמה, בניינים מגינים על אסטרונאוטים מפני קרינת שמש ופסולת חלל. מבנים דחוסים יכולים לשמש לאסטרונאוטים מקום לחיות ולעבוד בו, בלי להזדקק לחליפות החלל שלהם.

שלא כמו פועלים אנושיים, מדפסות אינן זקוקות לאוויר, למים, או למזון – זה חוסך כסף ומקל על בנייה בחלל. מדפסות אף לא צריכות לעצור כדי לנוח, ולכן הדפסה בתלת-ממד יכולה להסתיים מהר יותר מבנייה רגילה. בהשוואה לבני אדם, מדפסות הן גם יותר אמינות ועקביות. כאשר הן מתוכננות כראוי, מדפסות מפחיתות טעויות, מגבירות בטיחות ומשפרות את איכות הבנייה. המשמעות היא פחות זמן וכסף שמבזבזים על תיקון דברים שלא בוצעו כהלכה בפעם הראשונה.

## הדפסה בתלת-ממד – אתגרים ופתרונות

בשנת 2015, נאס"א הזמינה קבוצות מכל רחבי העולם לתחרות של **הדפסה בתלת-ממד**. התחרות נקראה "אתגר סביבת המחיה בהדפסת תלת-ממד" (3D-Printed Habitat Challenge), והיא חילקה פרסים בשווי 2.5 מיליון דולר. התחרות כללה שלושה שלבים: ראשית, כל קבוצה הגישה את תכנון סביבת המחיה. לאחר מכן, הקבוצות פיתחו חומרים להדפיס איתם בהתבסס על מה שזמין בחלל. לבסוף, הקבוצות הדפיסו בתלת-ממד את עיצוביהן באמצעות החומרים שלהן. מטרת התחרות הייתה לשפר את האופן שבו נאס"א תבנה מבנים בחלל. חלק מהרעיונות היו מוצלחים יותר מאחרים, אך כל אחד מהרעיונות סייע לנאס"א להבין מה עשוי לעבוד או לא לעבוד בחלל. לדוגמה, עיצובים של כיפה ובועה נראים מבטיחים. קבוצות הצליחו במשימתן באמצעות שימוש בחומרים מהחלל ובאשפה ממוחזרת בתערובות ההדפסה שלהן. אתגר גדול שנאס"א תצטרך להתמודד איתו בעתיד הוא סקילביליות (עלייה בסדר הגודל), או היכולת ליצור מבנים בגודל מלא. מהנדסים יודעים כי עיצובים שפועלים טוב במודלים לא תמיד פועלים טוב באותה מידה כשהם נבנים בגודל מלא. נאס"א וחברות כמו "מיייד אין ספייס" (Made in Space) עובדות על שיפור הסקילביליות של בנייה בהדפסת תלת-ממד.

גישה אפשרית אחרת להדפסה בתלת-ממד בחלל היא שיטה שנקראת **הדפסת קווי-מתאר**. שיטה זו ראשית מזריקה חומר בשכבות. לאחר מכן, היא משתמשת בכלי פיזור שמוטמעים בתוכה – מְרִיזוֹת – כדי לעצב את השכבות למשטחים חלקים. תהליך ההשטחה מאפשר ליצור מבנים באיכות גימור גבוהה יותר. הדפסת קווי-מתאר תפסה את תשומת ליבה של נאס"א בשל שלוש סיבות עיקריות: ראשית, היא אחת משיטות ההדפסה בתלת-ממד המבוססות והאמינות ביותר על כדור הארץ; שנית, היא יכולה לשמש להדפסת המבנים הנדרשים בבטחה ובצורה זולה; שלישית, הדפסת קווי-מתאר פועלת עם חומרים שיש בחלל, כמו רגוליט.

אחד מצוותי המחקר רוצה לשלב הדפסה בתלת-ממד עם מערכת רובוטית שנקראת "חוקר חוצני כל-משטחי בעל שש גפיים" (ATHLETE [4]) – ראשי תיבות של "All-Terrain Hex-Limbed Extra-Terrestrial Explorer". המערכת היא "כל-משטחית" מאחר שהיא יכולה להתקדם על פני משטחים שאינם חלקים של הירח ושל כוכבי לכת; "בעלת שש גפיים" – כלומר יש לה שש זרועות. זרועות אלה מאפשרות למערכת להשתמש בכמה כלים כדי לנווט ולבנות רכיבים. משמעות המונח "חוצני" היא שהמערכת מעוצבת במטרה להיות בשימוש בחלל. היא קולטת אנרגיה מהשמש ומשתמשת בה בתור מקור לאנרגיה מתחדשת. לפיכך היא לא צריכה להיות מחוברת לחשמל, ולא נדרש לספק לה דלק כדי שתפעל.

### הדפסה בתלת-ממד (3D-Printing)

תהליך של ייצור פריטים ומבנים, או בנייתם, באמצעות הדפסתם בשכבות עוקבות.

### הדפסת קווי-מתאר (Contour Crafting)

שיטה של הדפסה בתלת-ממד שבה החומר מוזרק בשכבות, ואז נמרח החוצה על ידי מְרִיזוֹת רובוטיות.

## מסתכלים קדימה

הדפסה בתלת-ממד בחלל עומדת בפני אתגרים ייחודיים. קשה להדפיס בסביבה עם כוח כבידה חלש [1]. המדפסות צריכות להכיל חלקי חילוף מְבִנִים בתוכן למקרה שרכיבים מסוימים יתקלקלו. אם מתרחשות תקלות, המדפסות נדרשות להיות קלות לתיקון. המדפסות צריכות להיות עמידות מספיק כדי שתוכלנה לעבוד בטמפרטורות קיצוניות, בסופות אבק וברעידות אדמה [1]. לבסוף, אם המדפסות בלתי מאוישות, צריך לאפשר שליטה עליהן מכדור הארץ. משמעות הדבר היא שהן צריכות להיות מסוגלות לפעול ולתקשר על פני מרחקים גדולים, ללא עיכובים [3].

נכון להיום, בנייה באמצעות הדפסה בתלת-ממד נמצאת בשלב שנקרא "הוכחת היתכנות וולידציה" [1]. משמעות הדבר היא שמדענים עדיין מנסים ללמוד מה הדפסת תלת-ממד יכולה לעשות, ואם היא תעבוד בחלל. ליצירת קווים מנחים להמשך פיתוח של הדפסה מסוג זה, הוצבו כמה מטרות לעתיד: עד לשנת 2040, מדענים רוצים להתחיל להשתמש בבנייה באמצעות הדפסה בתלת-ממד כדי לבנות מושבות בחלל. עד לשנת 2065, מדענים מקווים שהדפסה בתלת-ממד בחלל תהיה מסוגלת לתמוך במושבות לטווח ארוך. לבסוף, מדענים מאמינים שעד לשנת 2115, בנייה באמצעות הדפסה בתלת-ממד בחלל תהיה בלתי תלויה לחלוטין בבני אדם ובמשאבים של כדור הארץ! [5].

בינתיים, פיתוח שיטות אמינות להדפסת תלת-ממד בחלל מסייע לשפר הדפסה כזו על כדור הארץ. לדוגמה, בניית מקלטים בחלל מלמדת אותנו על דרכים טובות יותר לבנות בתים איכותיים וזולים, כאן עברנו. על ידי מציאת דרכים לאסוף חומרים בחלל, אנו יכולים לשפר את האופן שבו אנו אוספים משאבים על כדור הארץ, בצורה שתומכת בבנייה זולה, מהירה ואיכותית יותר על כדור הארץ ובחלל כאחד. במילים פשוטות, בנייה באמצעות הדפסה בתלת-ממד היא מחוץ לעולם הזה!

## הסתייגות

הדעות שמוצגות במאמר הזה הן של הכותבים, ואינן משקפות את המדיניות או העמדה הרשמיים של חיל האוויר האמריקאי, משרד ההגנה האמריקאי, או ממשלת ארצות הברית.

## מקורות

1. Mueller, R. P., Sibille, L., Hintze, P. E., Lippitt, T. C., Mantovani, J. G., Nugent, M. W., et al. 2014. *Additive Construction Using Basalt Regolith Fines*. Available online at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84936748071&doi=10.1061%2F9780784479179.042&partnerID=40&md5=e6a74f7a3e2d91b587222c4a1d49d302>
2. Howe, A. S., Wilcox, B., McQuin, C., Mittman, D., Townsend, J., Polit-Casillas, R., et al. *Modular Additive Construction Using Native Materials*. Available online at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84936803844&doi=10.1061%2F9780784479179.034&partnerID=40&md5=09bf4e34736d6cc394505bd3f466ee62>

3. Leach, N., Carlson, A., Khoshnevis, B., and Thangavelu, M. 2012. Robotic construction by contour crafting: the case of lunar construction. *Int. J. Archit. Comput.* 10:423–38. doi: 10.1260/1478-0771.10.3.423
4. Howe, S. A., Wilcox, B. H., McQuin, C., Townsend, J., Rieber, R. R., Barmatz, M., et al. 2013. "Faxing structures to the moon: freeform additive construction system (FACS)," in *AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition* (San Diego, CA: American Institute of Aeronautics and Astronautics). doi: 10.2514/6.2013-5437
5. Mueller, R. P., Howe, S., Kochmann, D., Ali, H., Andersen, C., Burgoyne, H., et al. 2016. *Automated Additive Construction (AAC) for Earth and Space Using In Situ Resources*. Available online at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84995371337&doi=10.1061%2f9780784479971.036&partnerID=40&md5=c0311e7e39f28dca5d30dae283825e00>

פורסם אונליין: 28 בפברואר 2023

עורך: Edward Gomez

מנחה מדעית: Nicole Ricker

**ציטוט:** Jagoda JA, Hoisington AJ and Schuldt SJ (2023) כוכב מלא אור, כוכב מלא הילה... בואו בונה בית על הירח הלילה! *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.546032-he

Jagoda JA, Hoisington AJ and Schuldt SJ (2020) Star Light, Star Bright... **תורגם והותאם מ:** Let's Build a House on the Moon Tonight! *Front. Young Minds* 8:546032 doi: 10.3389/frym.2020.546032

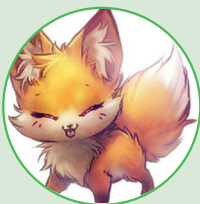
**הצהרת ניגוד אינטרסים:** המחברים מצהירים כי המחקר נערך בהעדר כל קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

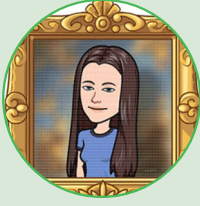
**COPYRIGHT** © 2020 © Jagoda, Hoisington and Schuldt. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

## סוקרים צעירים

**KATELYN, גיל: 11**

היי, קוראים לי Katelyn. אני בת 11 ואוהבת לקרוא ספרים. אני גם נהנית לכתוב סיפורי פנטזיה וליצור אנימציות. סוגי הספורט האהובים עליי הם קרלינג (החלקת אבני גרניט על פני משטח קרח) ובדמינטון, וגם כדורסל. המקצועות האהובים עליי הם מדעי החברה, מדע ואומנות ויזואלית.



**ROSE, גיל: 14**

שלום. אני בת 14, גרה בקנדה. אני אוהבת תפירה, סריגה וקריאה.

**הכותבים****JENEÉ A. JAGODA**

Jeneé A. Jagoda היא קפטנית בחיל האוויר האמריקאי, ובוגרת טרייה של מכון הטכנולוגיה של חיל האוויר. בחמש שנות השירות שלה, קפטן Jagoda ביצעה מגוון עבודות כמהנדסת אזרחית בבסיסים בקליפורניה, באנגליה, באוהיו ובדרום דקוטה. תזת מחקר המאסטר שלה העריכה את השימוש בטכנולוגיות הדפסה בתלת-ממד לצורכי בנייה כחלופה לשיטות בנייה קונבנציונליות הן בכדור הארץ הן בחלל. [enee.jagoda@us.af.mil](mailto:enee.jagoda@us.af.mil)\*

**ANDREW J. HOISINGTON**

Andrew Hoisington הוא סגן אלוף בחיל האוויר האמריקאי. ב-19 שנות השירות שלו, הוא היה מהנדס אזרחי שאחראי לבנות בסיסי חיל אוויר ולתחזק אותם. סגן אלוף Hoisington עבד בבסיסים בהוואי, בקולורדו, באוהיו, בפלורידה, בדרום קוריאה, בפורטוגל, באוזבקיסטן, בקטר ובעומאן. הוא גם לימד הנדסה במשך שש שנים באקדמיה של חיל האוויר האמריקאי, ושלוש שנים במכון הטכנולוגי של חיל האוויר.

**STEVEN J. SCHULDT**

Steven Schuldt הוא סגן אלוף בחיל האוויר האמריקאי, וכיום מלמד במכון הטכנולוגיה של חיל האוויר (AFIT) בבסיס חיל אוויר רייט-פטרסון, אוהיו. ב-13 שנות השירות שלו, סגן אלוף Schuldt ביצע מגוון תפקידים בתור מהנדס אזרחי של חיל האוויר. הוא עבד בבסיסים צבאיים בדרום קרוליינה, באוהיו ובאילינוי. הוא שירת מעבר לים באפגניסטן, בטג'יקיסטן, בקירגיסטן, בפינלנד, בשוודיה, בירדן וברפובליקת קוריאה.

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