

## איך לשלוט על תסכול בחומרים

Yair Shokef\*

בית הספר להנדסה מכנית, אוניברסיטת תל אביב, תל אביב, ישראל

### סוקרת צעירה

TAMAR

גיל: 9.5



מְטָא-חומרים מכניים הם מבנים גמישים המודפסים במדפסות תלת-ממד, עשויים יחידות קטנות יותר המאורגנות בתבניות החוזרות על עצמן. צורת התבניות והאופן שבו הן מסודרות במרחב קובעים איך החומר יתנהג כאשר נלחץ עליו. אם כל היחידות בחומר מאורגנות לפי הכללים התואמים לאופן שבו הן רוצות לשנות צורה, החומר יוכל להתעוות בקלות כאשר נלחץ עליו. לעומת זאת, אם היחידות מסודרות כך שלא כולן יכולות לשנות צורה בו זמנית באופן שבו שהן היו רוצות, החומר מתוסכל, ויהיה קשה יותר לעוות אותו. על ידי תכנון המבנה של מטא-חומרים ביכולתנו לשלוט במידת התסכול שלהם, ואפילו לעצב חומרים שיתעוותו לכדי כל תבנית שנבחר! בחומרים המתוכננים להתעוות בצורה מסוימת ניתן להשתמש לפיתוח טכנולוגיות חשובות חדשות שיוכלו לסייע לאנשים רבים. טכנולוגיות אלה עשויות אף להפחית את השימוש שאנו עושים במשאבי הטבע היקרים של כדור הארץ.

### כיצד חומר יכול להיות מתוסכל!?

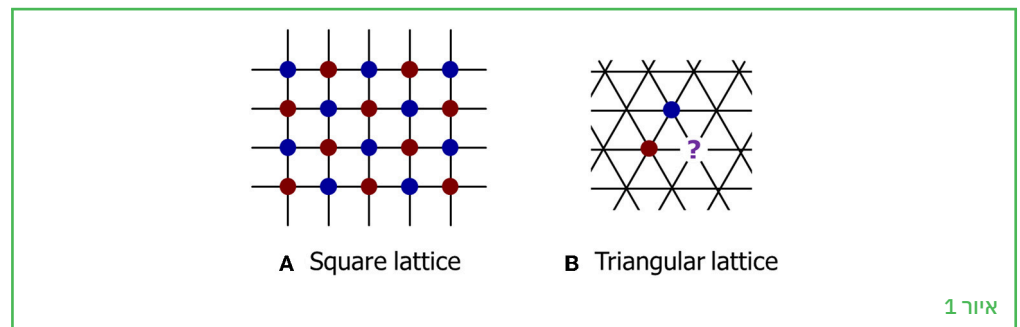
כאשר אתם שומעים את המילה **תסכול**, ודאי מתעוררת בכם מחשבה לגבי תחושת הכעס או העצבנות המציפה אתכם כשאתם מתקשים בביצוע משימה כלשהי, כמו לסיים את שיעורי הבית במתמטיקה, או להתקדם שלב במשחק מחשב מאתגר. אבל האם ידעתם

### תסכול (Frustration)

חוסר היכולת למלא בו זמנית כמה דרישות סותרות.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Geometrical\\_frustration](https://en.wikipedia.org/wiki/Geometrical_frustration).

כי ישנם חומרים דוממים היכולים אף הם לחוות תסכול? יתרה מזו, באפשרותנו להשתמש בתסכול הזה בשביל לתכנן חומרים בעלי תכונות מעניינות ומיוחדות ביותר!

חומרים רבים בטבע הם **גבישים**, כלומר החלקיקים המרכיבים אותם מסודרים במבנה שחוזר על עצמו, כמו למשל ב**סריג הריבועי** (איור 1A). לעיתים קרובות, חלקיקים סמוכים רוצים להיות במצבים מנוגדים – לדוגמה, מטענים חשמליים חיוביים ושלייליים, או קיטוב מגנטי המצביע צפונה או דרומה. בסריג הריבועי המוצג באיור, הכדורים האדומים והכחולים מייצגים את שני המצבים המנוגדים האלה. ניתן לוודא בקלות שאין שני כדורים סמוכים באותו הצבע כאשר ממקמים אותם לסירוגין, כמו סידור המשבצות הלבנות והשחורות בלוח שחמט. לעומת זאת, בסריג משולש (איור 1B), אחרי שמיקמנו שני כדורים בעלי צבעים שונים במשולש בודד בסריג, הכדור השלישי שנמקם יהיה מתוסכל, בגלל שהוא לא יכול לקיים את הכללים. הוא ירצה להיות כחול כדי להיות שונה מהשכן האדום שלו, אך גם ירצה להיות אדום, כדי להיות שונה משכנו הכחול! לא משנה עד כמה אנו (או חוקי הטבע) ננסה לרצות את כל החלקיקים הללו, בסריג משולש גדול, תמיד יהיו הרבה חלקיקים מתוסכלים [1, 2].



## חקירת חומרים מתוסכלים

חומרים מתוסכלים מתנהגים באופן שונה מאוד מחומרים שאינם מתוסכלים, והיינו מעוניינים להבין טוב יותר מדוע. באופן כללי, קשה לנו לחקור את ההתנהגויות של חלקיקים בודדים בחומר נתון, כיוון שחלקיקים אלה, הנקראים **אטומים**, הם זעירים. בדרך כלל, המרחקים בין אטומים סמוכים בחומר מוצק הם מסדר גודל של אנגסטרם (Å) אחד, שהוא עשירית המיליארדית של המטר! כלומר, במטר אחד ישנם 10,000,000,000 אנגסטרמים.

למרבה המזל, האטומים הרבים שמרכיבים חומר רגיל מתנהגים בדרך כלל בצורה דומה מאוד זה לזה. לכן, לרוב ניתן להבין את ההתנהגות של חומרים גם בלי לראות את המצב המדויק של כל חלקיק וחלקיק בתוכם. בשביל לחקור בקלות רבה יותר מה מתרחש בתוך חומרים, אנו יוצרים מבנים בהדפסת תלת-ממד העשויים 'חלקיקים' גדולים, שניתן לראות בקלות. במבנים אלה המרחקים בין 'חלקיקים' שכנים הם סנטימטרים, ולא אנגסטרמים. אנו מכנים את המבנים האלה **מטא-חומרים**, בגלל שאפשר לחשוב עליהם כחומר העשוי מחומר. העבודה שלנו לא רק מסייעת בהבנת חומרים מתוסכלים; היא גם מאפשרת לנו לתכנן מטא-חומרים בעלי תכונות מיוחדות ונשלטות, שעל אודותיהם נפרט בהמשך המאמר.

### גביש

#### (Crystal)

חומר מוצק שמרכיביו מאורגנים בצורה מסודרת.  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Crystal>

### סריג

#### (Lattice)

מבנה חזרתי ששומר על מראהו גם לאחר שמזיזים אותו בכיוונים שונים.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Bravais\\_lattice](https://en.wikipedia.org/wiki/Bravais_lattice)

### איור 1

השוני בין סריג ריבועי לסריג משולש, A. בסריג ריבועי, ניתן לרצות את כל החלקיקים על ידי הקפת כל חלקיק בחלקיקים במצב המנוגד (בדומה למטען חשמלי או לקיטוב מגנטי). B. לעומת זאת בסריג משולש, לאחר שנרצה שני חלקיקים, החלקיק השלישי שנמקם יהיה מתוסכל, משום שלא יוכל להיות במצב שונה משני שכניו.

### אטום

#### (Atom)

היחידה הקטנה ביותר של חומר רגיל שממנו עשוי יסוד כימי.  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Atom>

### מטא-חומר

#### (Meta-material)

חומר מלאכותי אשר תכונותיו תלויות בעיקר במבנה המהונדס של התאים המרכיבים אותו.  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>

## תא יחידה (Unit cell)

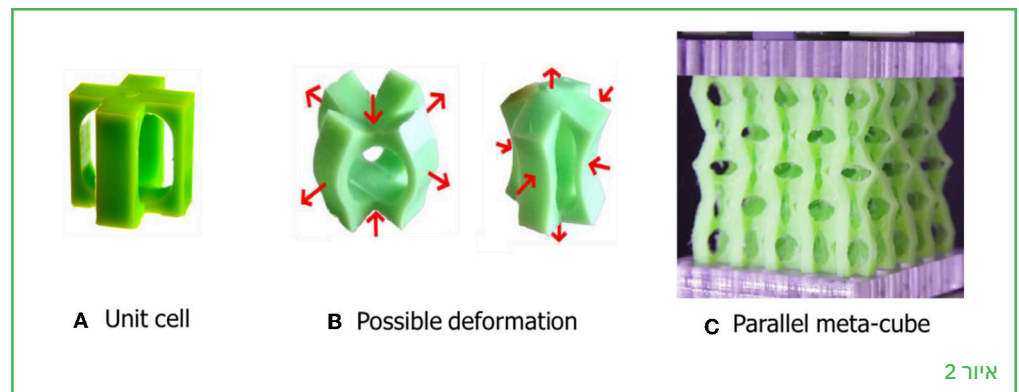
דפוס שחוזר על עצמו ומרכיב חומר גבישי.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Unit\\_cell](https://en.wikipedia.org/wiki/Unit_cell)

## מטא-קובייה (Meta-cube)

מטא-חומר הבנוי מ'לבינים' בצורת קוביות, שחוזרות על עצמן, ומנוחות בכיוונים שונים.

## איור 2

המבנה המיוחד של מטא-קובייה. **A.** מטא-קוביות מורכבות מחלקים הנקראים תאי יחידה. **B.** תאי יחידה יכולים להתעוות בקלות באחד משני אופנים: כאשר מפעילים לחץ מלמעלה ומלמטה, או לחלופין, בהפעלת לחץ מהצדדים. **C.** כאשר כל תאי היחידה מאורגנים באותו כיוון, מתקבלת מטא-קובייה מקבילה, שבה תאי היחידה יכולים להתעוות לסירוגין בשני האופנים הללו (האיור אומץ מ-Coulais ושותפים [3]).



נתחיל עם מטא-קובייה מקבילה, שבה כל הלבנים מסודרות בכיוון המוצג באיור 2A. כאשר לוחצים על המטא-קובייה מלמעלה ומלמטה, הלבנים המרכיבות אותה מתעוותות לסירוגין לאחת משתי הצורות המוצגות באיור 2B. בכל פאה בתוך המטא-קובייה הדחוסה, לבנה אחת בולטת, ובלבנה השכנה נוצר נְשָׁקַע (איור 2C). מכך ניתן להסיק כי ישנה תְּאִימֹת בסידור של הלבנים המרכיבות את המטא-קובייה. אבל מה קורה אם המטא-קובייה לא מסודרת, כלומר כל לבנה מוצבת בכיוון אחר?

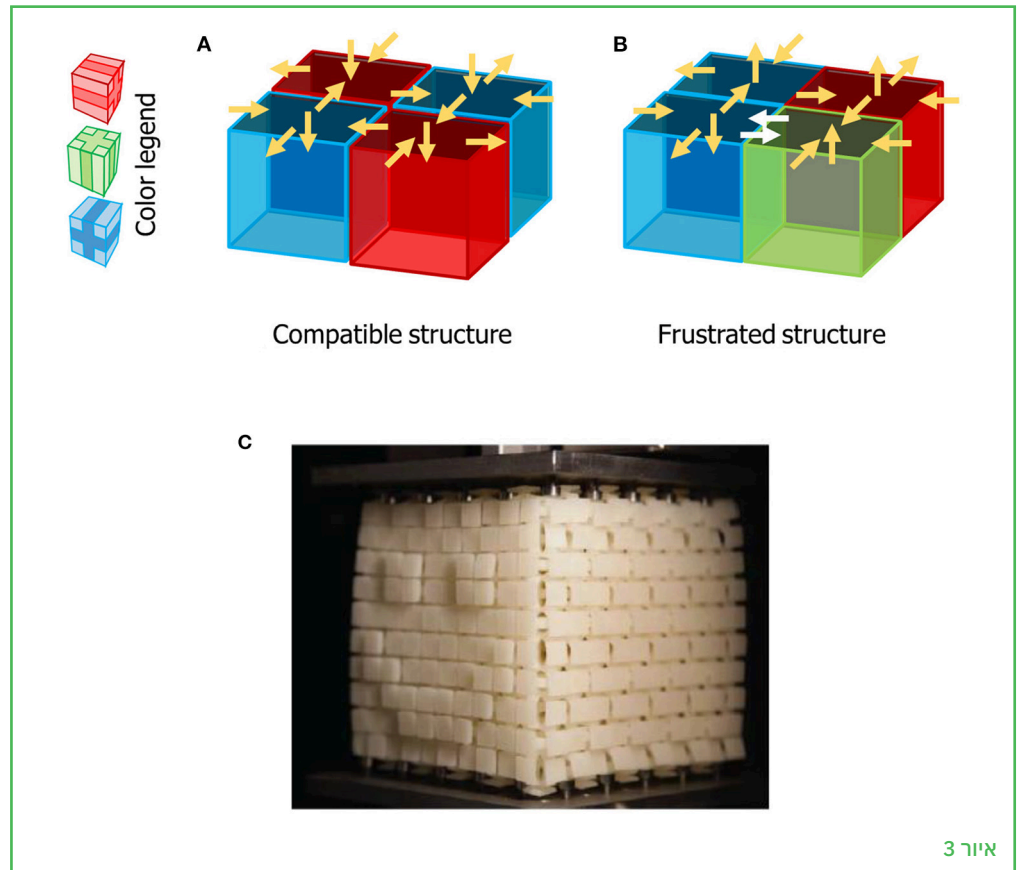
נסתכל על מבנה פשוט המורכב מארבע לבנים המוצמדות זו לזו בריבוע (איור 3A). כפי שניתן לראות במקרא הצבעים באיור 3, כל צבע מייצג את הכיוון שאליו הלבנה פונה בריבוע. אם אנו דוחפים פאה אחת בריבוע בן ארבע הלבנים הזה, או מושכים אותה, נוכל לבחון כיצד שאר הפאות מתעוותות. הריבוע המוצג באיור 3A לא מתוסכל. לעומת זאת לא משנה מאיזה כיוון נפעיל לחץ על הריבוע המוצג באיור 3B, תמיד תהיה לפחות פאה אחת מתוסכלת. הלבנה שבצד אחד של פאה נתונה רוצה שפאה זו תנוע לכיוון אחד, ואילו הלבנה שבצידה השני של אותה הפאה רוצה שהפאה תנוע בכיוון ההפוך. תסכול במטא-קובייה גורם לה להיות קשיחה יותר בהשוואה למטא-קובייה לא מתוסכלת, או תואמת, כיוון שיש להפעיל כוח רב יותר כדי להתגבר על התסכול ולעוות את המטא-חומר.

## מטא-חומרים מתאימים: כשלוחצים במקומות הנכונים

בשביל לנתח את כל המטא-קוביות האפשריות, לרבות אלה המורכבות מהרבה יותר מארבע לבנים, נְיָנֵנו מודל מתמטי, המאפשר לנו לדעת אם מטא-קובייה נתונה היא מתוסכלת

## איור 3

מצבים אפשריים של מטא-קובייה. A. כאשר תאי היחידה מאורגנים במבנה תואם, ניתן לרצות את כולם בו בזמן, ונוצר מבנה אשר קל לדחוס אותו. ניתן לראות זאת באיור על ידי החיצים הצהובים, המצביעים על כיוון העיוות של כל פאה. B. אם תאי היחידה מאורגנים כך שלא ניתן לרצות את כולם בו זמנית לפחות פאה אחת במבנה תהיה מתוסכלת. מצב זה מוצג באיור על ידי החיצים הלבנים הכפולים, המדגימים תחרות בין שני כיוונים מנוגדים של העיוות. עקב כך החומר יהיה קשיח יותר. צבעי הקוביות מצביעים על הכיוון שבו כל תא יחידה ממוקם. C. עיצבנו מטא-קובייה שתעוות לצורה רצויה (פרצוף מחייך)<sup>1</sup>, כאשר מפעילים עליה לחץ (האיור אומץ מ-Coulais ושותפים [3]).



איור 3

או תואמת. המודל שפיתחנו איפשר לנו לזהות את כל המטא-קוביות התואמות, כלומר כאלו שיכולות להתעוות ללא תסכול באף אחד מתאי היחידה שבתוכן. באמצעות המודל הזה גילינו כי מספר המטא-קוביות התואמות הוא עצום! גדול כל כך, שביכולתנו לעצב מטא-קובייה שבה יתקבל על פאה אחת שלה כל דפוס עיוות שבו נחפוץ. לדוגמה, עיצבנו את המטא-קובייה המופיעה באיור 3C כך שכאשר נלחץ עליה מלמעלה ומלמטה, היא תתעוות עם בליטות ושקעים שייצרו פרצוף מחייך על חזיתה<sup>1</sup>. אם נלחץ על החזית שלה עם אותו דפוס מסוים של פרצוף מחייך, המטא-קובייה תתעוות יחסית בקלות. לעומת זאת אם נלחץ עליה עם דפוס אחר, כמו דפוס שטוח לדוגמה, יהיה קשה יותר לעוות מטא-חומר זה. המודל המתמטי שפיתחנו מאפשר לנו לנבא כיצד קשיחות המטא-קובייה תגדל כתלות בתסכול שנייצר על ידי דפוס הלחיצה בו נשתמש. במילים אחרות, הראינו כי היכולת לעוות מטא-חומר תלויה לא רק בכוח שאנו מפעילים עליו או בסוג הגומי שממנו המטא-קובייה יוצרה, אלא במידה רבה גם בתאימות שבין התבנית שעליה אנו לוחצים לבין המבנה הייחודי של אותה מטא-קובייה.

## שימושים אפשריים במטא-חומרים

המטא-קוביות שפיתחנו הן מערכת מעניינת, שבאמצעותה ניתן לחקור תאימות ותסכול המתרחשים בחומר. כאשר אנו משלבים 'לבנים' זהות בעלות דפוס חוזר המונחות בכיוונים שונים, כדי ליצור מטא-קוביות גדולות, אנו יכולים לתכנן חומרים שכל אחד מהם מתעוות באופן מסוים כאשר מופעל עליו לחץ. היכולת לשלוט על הצורה שבה החומר מתעוות,

<sup>1</sup>ראו בסרטון זה – תכנון קומבינטורי של מטא-חומרים מכניים מורכבים.

עשויה להיות שימושית למגוון סוגי טכנולוגיות. למשל, תְּאָרוֹ לַכֶּם רובוט שיוכל לכוון את קשיחות הזרוע שלו כדי לתפוס דברים ביעילות רבה יותר. לחלופין, מטא-חומרים יוכלו לְשַׁמֵּשׁ ליצירת שתלים רפואיים, או רגליים תותבות המותאמים בדיוק לגוף שאליו הם מוכנסים או מחוברים. השימוש במטא-חומרים עשוי גם להפחית את השימוש שאנו עושים במשאבי הטבע היקרים של כדור הארץ. כעת תוכלו להיווכח כי מטא-חומרים אינם רק חומרים מעניינים שיכולים ללמדנו על תסכול; הם עשויים גם לעזור לנו לשפר חיים של אנשים, ולסייע בשמירה על כדור הארץ!

## מימון

מחקר זה מומן באופן חלקי על ידי הקרן הלאומית למדע של ישראל, ועל ידי הארגון למחקר מדעי בהולנד.

## תודות

המחבר מודה ליערה שֶׁקֶף ולחביבה סִירוֹטָה על הערותיהן והצעותיהן המועילות בתהליך כתיבת מאמר זה והצגתו.

## מאמר המקור

Coulais, C., Teomy, E., de Reus, F., Shokef, Y., and van Hecke, M. 2016. Combinatorial design of textured mechanical metamaterials. *Nature*. 535:529–532. doi: [10.1038/nature18960](https://doi.org/10.1038/nature18960)

## מקורות

1. Wannier, G. H. 1950. Antiferromagnetism: the triangular Ising net. *Phys. Rev.* 79:357–364. doi: [10.1103/PhysRev.79.357](https://doi.org/10.1103/PhysRev.79.357)
2. Han, Y., Shokef, Y., Alsayed, A. M., Yunker, P., Lubensky, T. C., and Yodh, A. G. 2008. Geometric frustration in buckled colloidal monolayers. *Nature*. 456:898–903. doi: [10.1038/nature07595](https://doi.org/10.1038/nature07595)
3. Coulais, C., Teomy, E., de Reus, F., Shokef, Y., and van Hecke, M. 2016. Combinatorial design of textured mechanical metamaterials. *Nature*. 535:529–532. doi: [10.1038/nature18960](https://doi.org/10.1038/nature18960)

פורסם אונליין: 18 בינואר 2023

נערך על ידי: Idan Segev

מנחה מדעי: Idan Segev

ציטוט: Shokef Y (2023) איך לשלוט על תסכול בחומרים. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.773189-he

תורגם והותאם מ: Shokef Y (2022) How to Control Frustration in Materials. Front. Young Minds 10:773189. doi: 10.3389/frym.2022.773189

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

© 2022 © Shokef 2022. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **COPYRIGHT** (CC BY) **Creative Commons Attribution License**. השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחבר(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.

## סוקרת צעירה

**TAMAR, גיל: 9.5**

אני אוהבת מאוד לקרוא; לאתגר את עצמי במגוון דרכים, ולרקוד בכמה סגנונות – היפ הופ, בלט, ג'אז ומחול מודרני. מרגיע אותי ללטף חיות, במיוחד את החתולה שלי טופי. אני נהנית לנגן בצ'לו ולבצע תרגילי אקרובטיקה, לרבות גלגלון, עמידת ידיים וגשר. אוהבת מאוד להופיע בריקוד, שירה ומשחק.

## הכותב

**YAIR SHOKEF**

אני מתעניין במתמטיקה ובפיזיקה, ובמיוחד בהשפעה של מבנים מתמטיים על ההתנהגות הפיזיקלית של מגוון סוגי מערכות. השפעה זו משתרעת מתהליכים אקראיים ודינמיקה ועד מבנים מרחביים. מאז 2011 אני חבר סגל באוניברסיטת תל אביב. המחקר שאני מוביל כולל הבנה עיונית של חומרים תקועים ומתוסכלים, וכן של חומרים פעילים. <https://shokef.tau.ac.il>; [shokef@tau.ac.il](mailto:shokef@tau.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

