



## מַלַח כַתחֲלִיף לַמְלֶטָה?

Daniel Mandler\*

המכון לכימיה, הפקולטה למתמטיקה ולמדעי הטבע, האוניברסיטה העברית, ירושלים

### סוקרים צעירים

YOUTH  
COUNCIL,  
FRONTIERS  
FOR YOUNG  
MINDS,  
ISRAEL  
גיל: 12-16



בימינו, תעשיית המַלְט נחשבת למזהם השני בגודלו בעולם, הואיל והיא אחראית לפליטה של כ-8% מכלל פליטת הפחמן הדו-חמצני (CO<sub>2</sub>) שמקורו בפעילות האדם. מתחוויר כי יש צורך דחוף להחליף את המלט בחומר אחר, 'ירוק' יותר, שאינו מהווה סכנה לסביבה ובד בבד הוא זמין ומחירו אינו עולה על זה של מלט. האם מלח הבישול יכול לשמש כתחליף? במכון לכימיה שבאוניברסיטה העברית חושבים שכן, ואף הוכיחו זאת במעבדה של פרופ' דני מנדלר. לְבַנֵי בניין העשויות 95% מלח שמקורו בעודפי המלח העצומים בים המלח, הוכנו בתהליך פשוט ו'ירוק' – האם יביאו את הבשורה?

### מהו מלט?

לְמַלְט, שהוא תוצר ידי אדם, היסטוריה עתיקה מאוד. חומר זה התפתח עקב הצורך לחבר אבנים ומרכיבי בניין אחרים במטרה להקנות למבנה חוזק מְכַנֵי ותכונות נוספות. עם אלה נמנית עמידות בפני פגעי מזג האוויר, כמו גשם למשל. במהלך ההיסטוריה האנושית – ככל הנראה מראשיתה, לפני מיליוני שנה, פותחו מגוון חומרי חיבור של אבני בניין, לצד חומרי הצמדה וציפוי. אולם התמריץ המשמעותי לפיתוח המלט והבָטוֹן כפי שאנו מכירים

אותם כיום, החל עם המהפכה התעשייתית, במאה ה-18. הכימיה של מלט מוכרת היטב, ומשמשת עדיין כשדה מחקר חשוב [1]. המלט הנפוץ ביותר כיום, מלט פּוֹרְטְלַנְד, הקרוי על שם אבן הבנייה שנחצבה באי פורטלנד באנגליה, פותח במאה ה-19 ומורכב מכמה חומרים כמו סידן פחמתי ( $\text{CaCO}_3$ ) וסיליקטים (תחמוצות סיליקון, Si). אלה מחוממים לטמפרטורה של 1,450 מעלות צלזיוס, ליצירת מגוון תרכובות המכילות בעיקר סידן, צָרָן (סיליקון) וחמצן. תעשיית המלט העולמית מייצרת בשנה יותר מ-4 גיגהטון, שהם 4,000 מיליון טונות מלט. זה מספר כה גדול שקשה להמחישו. הוא שקול למשקל המים שהיו מְכֻסִים פוטנציאלית את כל מדינת ישראל בשכבה של 20 ס"מ בערך!

## ייצור המלט תורם לשינויי האקלים

למרות החשיבות העצומה של המלט, ואכן קשה היה לתאר את העולם בלעדיו, בהיבט קְיָמוּת וסביבה, זו אינה המצאה כל כך מופלאה. זאת כיוון שייצור המלט אחראי באופן ישיר לכ-8-9% מכלל פליטת הפחמן הדו-חמצני בעולם. בהיותו **גז חממה** משמעותי מאוד, פחמן דו-חמצני מגיע לאטמוספירה, וגורם באופן ישיר לשינויי האקלים [2]. תעשיית המלט מוכרת כמזהם השני בגודלו בעולם כיום, בְּנָשֶׁל שני טעמים. ראשית, תהליך הכנת מלט מתרחש בטמפרטורה גבוהה מאוד, ולצורך כך נדרשת כמות עצומה של אנרגיה. שנית, בתהליך זה, סידן פחמתי מחומם לקבלת סידן חמצני ( $\text{CaO}$ ), הוא הסיד, מה שגורם לפליטה ישירה של פחמן דו-חמצני. סיכומו של דבר, ליצירה של מ"ק בטון נדרשת האנרגיה המצויה בכ-40% של חבית נפט!

היום כבר ברור כי אין די במְעָבָר לאנרגיות מתחדשות, כמו אנרגיית השמש ואנרגיית הרוח. מוטלת עָלֵינוּ גם החובה לשנות את החומרים שבהם נעשה שימוש מוגבר וצורכים כמויות אנרגיה עצומות, או לחלופין הם בעלי **טביעת רגל פחמנית** גבוהה, דוגמת מלט, פלדה ואחרים. אך כיצד עושים זאת? מתקבל על הדעת כי העולם לא יחליף חומר בחומר אלא אם יתלווה לצעד כזה רווח כלכלי, או לחלופין אם המחוקק יחייב לעשות כן. באופן דומה, מכוניות חשמליות לא היו נוסעות היום ברחבי העולם, לולא המחוקק (בתחילה בקליפורניה שבארצות הברית ולאחר מכן במקומות אחרים) היה מחייב את הכנסתן לשימוש. בכך יצר המחוקק גם כוח מניע כלכלי שגרם לְחִבְרוֹת בתעשיית הֶרְכָב לפתח טכנולוגיות מתאימות.

כמו כן, חשוב להבין כי חומר שהשימוש בו הוא כה תכוף ובהיקף נרחב, כאשר עלות החומר נמוכה מאוד (מחיר המלט בארץ נכון לאוגוסט 2022 עמד על קרוב ל-400 ש"ח לטוֹנָה), מחייב החלפה בחומר דומה. הכוונה היא לחומר זמין בהיקפים דומים, שניתן לְסַפְקוֹ בקלות, ושמחירו אינו שונה בהרבה מזה של החומר המקורי. בנקודה זו מתחיל סיפורנו...

## עודפי מלח אדירים מים המלח

לפני כמה שנים נתקלתי בפרסום מטעם משרד הַפְּנִים<sup>1</sup>, שבו הציבור התבקש להציע רעיונות לפתרון הבעיה של עליית מפלס המים בחלק הדרומי של ים המלח. ים המלח מחולק כיום לשניים – החלק הצפוני העמוק (עומקו מגיע ליותר מ-300 מטר) שמפלסו הולך ויורד, והחלק הדרומי (הישראלי והירדני כאחד) שמפלסו עולה מִדֵּי שנה בכ-20 ס"מ. עלייה זו נובעת מתהליך שבמסגרתו שוקעת כמות עצומה של מלח בישול, נתרן כלורי, המוערכת

### גז חממה

#### (Greenhouse gas)

גזים שונים שמקורם בפעילות אנוש, או בתהליכים המתרחשים בטבע, המגיעים לאטמוספירה ומובילים לאפקט חממה. כלומר, הם מונעים מִחֶלֶק מקרינת השמש המגיעה לכדור הארץ להיפלט חזרה לחלל, ובכך גורמים לעלייה בטמפרטורה העולמית.

### טביעת רגל פחמנית

#### (Carbon footprint)

ביטוי המתאר את ההשלכה הסביבתית של תהליך כלשהו, בעיקר מההיבט של שחרור גזי חממה.

<sup>1</sup>לחצו כאן לקריאת כתבה על אודות פרסום זה.

ב-20 מיליון טונות בשנה בצד הישראלי. כדי להפיק מים המלח את המינרלים שניתן למכור בכל העולם, דהיינו, חומרי הגלם המיועדים בעיקר לייצור אשלגן (K), נותנים למים להתנדף בבריכות ענק. בתהליך זה קודם שוקע מלח הבישול, ורק לאחר מכן מעבירים את המים לבריכות אחרות שבהן מתגבש הקרנליט  $3 [KMgCl_3 \cdot 6(H_2O)]$  – מקור עיקרי להפקת אֶשְׁלָג. מלח הבישול ששוקע יוצר שכבה אשר גורמת לעלייה במפלס המים. תופעה זו הביאה לכך שכיום המים מגיעים למלונות בחלקו הדרומי של ים המלח.

## השלים גדול מסף חלקיו, או – מלח במקום מלט?

הסוגיה שהועלתה בפרסום של משרד הפנים לעיל, היא מה ניתן לעשות עם כמויות עצומות של מלח בישול. במאמר מוסגר נציין כי את מלח הבישול שאנו אוכלים מפיקים מהים התיכון. טעמו של המלח מים המלח מר, בְּשָׁל ריכוזים נמוכים של אשלגן כלוריד. בזמנו, כאשר קראנו את המודעה, שאלנו את עצמנו היכן נעשה שימוש בכמויות חומר עצומות, ומצאנו כי התשובה היא בענף הבנייה. השאלה הבאה ששאלנו את עצמנו הייתה האם ניתן להשתמש במלח בישול להכנת לבני בניין? על פניו הרעיון נשמע מעט הזוי, שכן ידוע כי מלח בישול הוא מְסִיס מים. למען האמת, רעיון זה אינו חדש לגמרי. במקומות שונים בעולם, כמו במדבריות הסהרה או הסאלאר (Salar, מדבר המלח בבוליביה, **איור 1**) בונים מבנים ממלח, ואחת לכמה שנים, כאשר יורד גשם, בונים מחדש. מבחינה מעשית, אין זה בדיוק הפתרון שאפשר ליישם במדינתנו או במדינות מתקדמות אחרות. מאחר ואנו עוסקים רבות בציפויים שונים, חשבנו שאם נדחס את המלח ונְצַפֶּה אותו בציפוי שאינו חדיר למים, נצליח להכין לבנת מלח שתוכל לשמש לבנייה. להפתעתנו הרבה הסתבר כי אין צורך מהותי בציפוי. אפשר לדחוס את המלח, לאחר טחינתו והוספה של כמה מרכיבים פשוטים יחסית, לקבלת לבנת מלח חזקה בצורה בלתי רגילה. בה בעת לבנה זו פחות מסיסה משמעותית בהשוואה למסיסותה הגבוהה ללא הדחיסה.

### איור 1

שימושים בלבי מלח. מימין: אבני מלח שנכרות במדבר סהרה ומשמשות לבנייה; משמאל: בנייה ממלח בסאלאר שבבוליביה.

### תהליך ירוק

(Green process)

תהליך כימי או פיזיקלי שאינו גורם כמעט לפליטת גזי חממה.

### שיתוך

(Corrosion, קורוזיה)

תהליך כימי שבו מתכת מגיבה עם חמצן מהאוויר, לרוב בנוכחות מים, וכתוצאה מכך מאבדת את תכונותיה המתכתיות.



איור 1

התהליך כולו פשוט מאוד וכולל שלושה שלבים: יצירת התערובת, כלומר, ערבוב כל החומרים הנדרשים – 95% מלח מים המלח והשאר מרכיבים שונים; טחינה – אשר תקבע עד כמה פני הלבנה יהיו חלקים, ודחיסה בלחץ של  $2 \text{ סמ}^2/\text{ר}^2$  טונות. יתרונה המרכזי של השיטה הוא שמדובר בתהליך 'ירוק', בעל טביעת רגל פחמנית נמוכה ביותר. הכול מבוצע בטמפרטורת החדר, והלבנה מוכנה מיידית. הדחיסה מתבצעת בתבנית עשויה פלדת אל-חלד, היות שהמלח גורם לַשְׁתוּךְ (קורוזיה) של מתכות כמו ברזל. באיור 2. תוכלו להתרשם מהלבנים השונות שהכנו, כאשר המחקר כולו מומן על ידי משרד החדשנות.

## איור 2

מגוון לבני מלח – תוצרי השיטה שפיתחנו. מימין: אובייקטים שונים של מלח שהוסף להם (לפני הדחיסה) צבע מאכל בצבעים שונים; באמצע: גודל הלבנים הוא  $3 \times 5 \times 10$  (בס"מ); משמאל: אריחי מלח שהוכנו בשלב אחד על ידי דחיסה כנגד משטחים בעלי מבנה תלת-ממדי.



איור 2

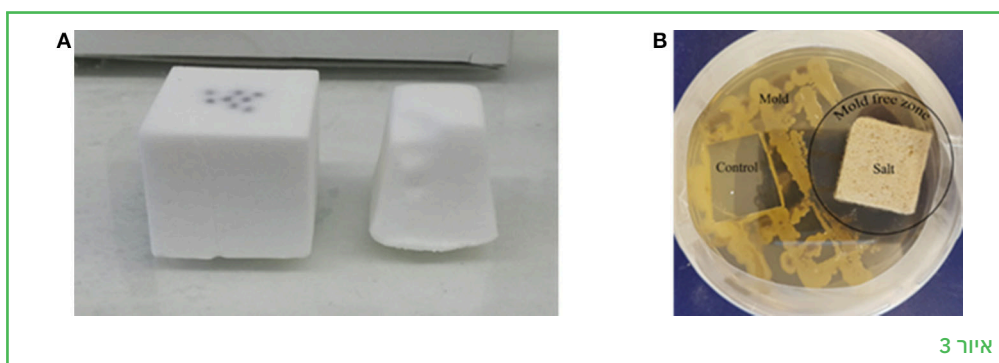
נוסף על הכנת הלבנים, ערכנו מספר רב של ניסויים שנועדו לבדוק את התכונות של לבנת מלח. בין התכונות שבדקנו: עמידות הלבנה בתנאי לחות וטמפרטורה משתנים; חוזק הלבנה; היכולת לקדוח בה; חיבור של לבנים ועוד. דוגמה לכך מוצגת באיור 3, אשר בו מתועדות תצפיות שערכנו ומדידות שביצענו. ניתן להתרשם עד כמה הדחיסה ותוספת קטנה יחסית של חומרים (5%), משנות את מסיסות הלבנה. חשיפת הלבנה לתנאי לחות גבוהים גורמת לספיגת הלחות, אולם כאשר מורידים את הלחות בסביבה, הלבנה פולטת את הלחות. לכן, הקדר שצידו הפנימי יצופה בלבני מלח, ישמור על לחות נמוכה וקבועה יחסית. לבני המלח מונעות גידול של **בקטריות**. המלח גורם למיצוי המים מתוך התא החי ובכך מונע את גדילה של תאים מכל סוג שהוא על פניו. יישום אפשרי של תכונה זו של המלח הוא ציפוי קירות פנים בבתי חולים, למניעת גידול חיידקים עליהם.

## בקטריות (Bacteria)

חיידקים, יצורים חד-תאיים הנפוצים מאוד על פני כדור הארץ.

## איור 3

תצפיות ומדידות שביצענו לברינת תכונות לבנת המלח. מימין: צלחת פֶּטְרִי שבה נזרעו חיידקים. ניתן לראות שסביב קוביית המלח (Salt) לא גדלו מושבות של חיידקים; משמאל: שתי קוביות מלח לאחר 30 דקות טבילה במים – בצד שמאל של התמונה: קוביית מלח שהוכנה בתהליך המתואר לעיל, בצד ימין של התמונה: קוביית מלח שלא הוכנה בתהליך זה.



איור 3

## מה הלאה?

המחקר שערכנו מעלה שאלות רבות: האם אכן ניתן להחליף את הלבנים המבוססות על מלט בלבני מלח? האם המְסִיסוּת של לבני המלח מספיק נמוכה? כמה עולה לייצר את לבני המלח? האם יש מספיק מלח בארץ ובעולם? כיצד אפשר לְדַרְבֵּן חברות בתעשיית הבנייה להחליף לבנים המצויות בשימוש זה יותר מ-150 שנה?

ובכן, עודפי המלח בארץ ובעולם הם עצומים. אותם 20 מיליון טונות מלח השוקעים מדי שנה באגן הדרומי של ים המלח, יכולים לספק את כל צריכת הבטון בישראל (צריכת המלט השנתית בארץ עומדת על כ-7 מיליון טונות, ומספיקה להכנת כ-25 מיליון טונות בטון על כל סוגיו). ישנם עודפי מלח הנובעים מפעילות תעשייתית שונה, כמו התְפִלַת מים. כתוצאה מהליך זה, מוזרם רֶכֶז מלח לים, אשר גורם לפגיעה סביבתית. זאת בניגוד לאמנת ברצלונה

## מסיסות (Solubility)

כמות החומר שמתמוססת בנוזל מסוים ליחידת נפח. זהו תהליך פיזיקלי שבו המַמְס גורם לפירוק החומר ליחידות הבסיסיות שלו, שגודלן קטן מאוד, ולכן מתקבלת תמיסה צלולה.

## פעילות אנתרופוגנית (Anthropogenic activity)

פעילות שנובעת ממעשה ידי אדם, כמו תהליכים תעשייתיים.

[3], שחלק גדול ממדינות הים התיכון חתומות עליה, ומטרתה להגן על הים התיכון מפני שינויים סביבתיים. במקומות רבים כמו גרמניה, ארצות הברית, ספרד ובלגיה ישנם הרי מלח שחלקם נוצרו כתוצאה מפעילות אנתרופוגנית, כלומר מעשה ידי אדם. מלח ולבני מלח מציעים יתרונות רבים: המלח אינו רעיל, אינו דליק או מסוכן. הוא בריא, וברחבי העולם לרבות בישראל ישנם חדרי מלח רבים המיועדים לשהייה של אנשים הסובלים מבעיות נשימה. מאחר שהתהליך שפיתחנו אינו כימי אלא פיזיקלי – מבוסס על טחינה ודחיסה – הטחינה מאפשרת לקבל חזרה את חומר הגלם, ובכך למחזר אותו בצורה פשוטה ויעילה.

אם כן, היכן הקושי? הוא טמון בשני היבטים עיקריים. ראשית, תעשיית הבנייה היא מטבעה שמרנית מאוד, וידוע כי הכנסת חומר חדש לענף זה אורכת שנים. שנית, כל עוד המחוקק אינו יוצר כוח מניע להחלפת המלט בחומר אחר כדוגמת מלח, הסיכוי שחברה תיקח זאת על עצמה הוא קלוש ביותר. בלתי סביר שחברה מסחרית תיכנס מיוזמתה לפרויקט שמטרתו לשמור על כדור הארץ, אלא אם יהיה לה תמריץ כלכלי לכך. כל עוד זה לא קורה, לבני המלח, מלהיבות ככל שיהיו, לא יחליפו את לבני הבטון.

## תודות

איור 1A נלקח מ <https://www.worldhistory.org/image/10161/salt-slabs-timbuktu/>  
איור 1B נלקח מ <https://www.flickr.com/photos/philliecasablanca/2052678622/>

## מקורות

1. Shi, C. J., Jimenez, A. F., and Palomo, A. 2011. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to Portland cement. *Cem. Concr. Res.* 41:750–63. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016
2. Andrew, R. M. 2018. Global CO2 emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data* 10:195–217. doi: 10.5194/essd-10-195-2018
3. Afrin, H., Huda, N., and Abbasi, R. 2021. An overview of eco-friendly alternatives as the replacement of cement in concrete. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1200:012003. doi: 10.1088/1757-899X/1200/1/012003

פורסם אונליין: 09 בינואר 2024

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Yael Zilbershtain Kra

ציטוט: Mandler D (2024) מלח כתחליף למלט? *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2023.1202557-he



תורגם והותאם מ: Mandler D (2023) Can Salt Be A Substitute For Cement? Front. Young Minds 11:1202557. doi: 10.3389/frym.2023.1202557

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

**זכויות יוצרים © 2023 © 2024 Mandler.** 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

**16–12 גיל: YOUTH COUNCIL, FRONTIERS FOR YOUNG MINDS, ISRAEL**

מועצת הנוער של פרונטירז מונה כ-15 נערות ונערים אוהבי מדע, סקרנים ובעלי מוטיבציה גבוהה. הם מגיעים אלינו ממקומות שונים ברחבי ישראל. מועצת הנוער נפגשת באופן מקוון אחת לחודש, ומייצעת בארץ שוטף לגבי פעילות כתב העת בישראל.

## הכותבים

**DANIEL MANDLER**

פרופסור לכימיה במכון לכימיה שבאוניברסיטה העברית בירושלים. נולד בארגנטינה, גדל בראשון לציון וכבר כילד התאהב בכימיה ונהג לערוך ניסויים רבים במעבדה שבנה לעצמו. לאחר שירותו הצבאי למד כימיה באוניברסיטה העברית, ובסיום הדוקטורט נסע לשנתיים לאוניברסיטת טקסס באוסטין. מאז חזרתו לארץ הוא חוקר באוניברסיטה העברית. תחומי עיסוקו מגוונים מאוד, וכוללים בין השאר: המרת אנרגיית שמש; אגירת אנרגיה חשמלית; ננוכימיה וננוטכנולוגיה; ציפויים למטרות שונות כמו שתלים רפואיים; אלקטרוכימיה; חיישנים לניטור הסביבה; כימיה פונקציונלית (משפטית) של טביעות אצבע, ועוד. פרסם כ-300 מאמרים מדעיים, והדריך עד כה יותר מ-75 תלמידי מוסמך ו-25 תלמידי דוקטור. קבוצת המחקר שלו כיום מונה כ-20 חוקרות וחוקרים. \*[daniel.mandler@mail.huji.ac.il](mailto:daniel.mandler@mail.huji.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**

