



## כל מה שרצית לדעת על עופרת

**אסתי זמלר**, מורה לכימיה, אורט רמת יוסף בת-ים ואורט ע"ש ביסטריצקי רמלה



**irresistible**

במסגרת פרויקט irresistible (irresistible-project) נדרש צוות הפרויקט במכון ויצמן לפתח יחידת הוראה אשר תעסוק בפיתוח מוצר

מדעי תוך שילוב דיון בהיבטים חברתיים-אתיים-סביבתיים הקשורים בתהליכי הפיתוח של המוצר וביישומיו (בלונדר, שחם, & זמלר, 2016). כך למעשה התוודענו לסיפורה המרתק של העופרת ולמגוון האירועים שבהם נקשר השימוש בעופרת כבעל השפעה שלילית על בריאותו של האדם. אחד מהם, אשר פורסם אך לאחרונה, מזהיר מפני השימוש במכונות קפה מדגמים מסוימים, בשל חשש לזליגת עופרת מן הצינורות המתכתיים שבמכונות, אל מי השתייה הזורמים בהם לצורך הכנת המשקה. עיסוק בכותרות חדשותיות הוא כלי חינוכי רב ערך. פרסומים מסוג זה הם הזדמנות טובה לחבר את הכימיה לחיי היום יום, להדגיש את הרלוונטיות שלה לחיינו ולהדגים לתלמידים הלכה למעשה כיצד כתבה חדשותית "משעממת" לכאורה הופכת להיות מעניינת ומעשירה, כשמבינים ומעמיקים בכימיה שעומדת מאחוריה. במאמר זה נפליג למחזות השימוש בעופרת ע"י האדם.

הסוחר מוונציה הוא מחזה שנכתב ע"י ויליאם שייקספיר בין השנים 1594-1597. בסניו, אציל ונציאני צעיר, יוצא לבקש את ידה של פורציה, צעירה יפה, עשירה ורבת מחזרים. בצוואתו מורה אביה של פורציה כי על כל מחזר שמעוניין בבתו, לבחור בין 3 תיבות - תיבת זהב, תיבת כסף ותיבת עופרת. רק מי שיבחר בתיבה הנכונה, יזכה בבתו. המחזרים שבחרים בתיבות הכסף והזהב טועים בבחירתם, ורק בסניו שבחר בתיבת העופרת זוכה לשאת את פורציה. בתחתית התיבה נמצא דיוקנה של פורציה והכתובת: "מי שבחר בי מחויב לסכן את כל אשר לו". מדוע בחר שייקספיר דווקא בתיבת העופרת כבחירה הנכונה? מה מסתתר מאחורי המילים הכתובות? האם מדובר בבחירה הטומנת בחובה סכנה, ממש כשם שהעופרת רעילה ומסוכנת? האם היה בכך רמז למורכבותם של חיי הנישואין, הטומנים בחובם מחויבות ארוכת ימים כשם שהעופרת שנקשרת בגופו של האדם לא נחלצת ממנו לאורך שנים? האם אכן ידע שייקספיר על סכנותיה של העופרת כבר במאה ה-16, בעוד שמדינות וממשלות באירופה ובארה"ב הבינו זאת רק לפני כ-25 שנים?

נעמוד על טיבו, סגולותיו ומיגבלותיו של החומר המתכתי הזה. נציג את אירוע מכונות הקפה, ואת הדרך שעושה העופרת מן הסגסוגת שמרכיבה את מכונת הקפה, ועד למים שמשמשים להכנתו. נציג אירועים נוספים כגון שימוש בצבעי עופרת או בדלק מועשר בעופרת, שבגינם עופרת מצאה את דרכה לגוף האדם. עוד נספר את סיפורה של העופרת עוד משחר ההיסטוריה האנושית. כל סיפור וכל אירוע הם כר פורה לעיסוק בכיתת הלימוד בהיבטים המדעיים ובהיבטים החברתיים-ערכיים שבהם.

## תכונות העופרת

העופרת היא מתכת בצבע אפרפר-תכלכל. בהיותה מתכת רכה וקלה לריתוך ולהלחמה, ניתן לעבד אותה בקלות ולייצר ממנה מגוון כלים. העופרת ידועה באינרסיות כימית עקב היווצרות תחמוצות, תרכובות כלור ותרכובות גפרתיות על שטח הפנים שלה. כלי עופרת אשר באים במגע עם האוויר מוגנים מפני שיתוך (קורוזיה), בזכות שכבת תחמוצת העופרת ( $PbO_{(s)}$ ) אשר נוצרת כתוצאה מתגובה בין השכבה החיצונית של העופרת והחמצן שבאוויר. איזוטופים של עופרת הם תוצר הדעיכה הסופי של יסודות רדיואקטיביים רבים כגון אוראניום (U), רדיום (Ra), פולוניום (Po) ותוריום (Th). העופרת בעלת מוליכות חשמלית ומוליכות חום נמוכות, וצפיפותה הגבוהה הופכת אותה למגן יעיל מפני קרינה מייננת.

## עופרת בטבע

נדיר למצוא בטבע עופרת בצורתה הטהורה, אך היא נפוצה בעפרות לצד מתכות כגון זהב, כסף, אבץ ונחושת. עפרת העופרת הנפוצה ביותר היא הגלנה ( $PbS$ ) - (Galena). עפרות אחרות הן:

אנגליזיט (anglesite) -  $PbSO_4$

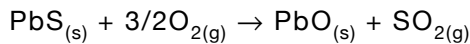
צרוסיט (cerussite) -  $PbCO_3$

מינים ( $Pb_3O_4$  - (minim) (תערובת של  $PbO$  ו- $PbO_2$  ביחס של 1:2)

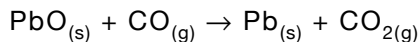
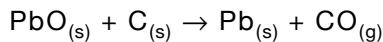
## הפקתה של העופרת

העופרת מופקת מעפרותיה ובעיקר מגלנה.

את הגלנה ( $PbS$ ) מחממים (קלייה באוויר) לצורך הפרדת הגפרית מהתרכובת:



את התחמוצת המתקבלת שורפים עם פחם (קוקס) לקבלת עופרת טהורה:



## שימושים בעופרת

לעופרת שימושים רבים בעבר ובהווה: היא משמשת ללוחות בתוך מצברים ובחלק מהסוללות, כציפוי עמיד לקורוזיה, כמשקולות ליולונות ולדייג וכן לציפוי כבלי חשמל הודות לרכותה ולעמידותה. העופרת משמשת גם לציפוי ובניית קליעים לרובים. לאטומי עופרת יכולת לחסום קרינה רדיואקטיבית מסוג  $\alpha$  ו- $\beta$  וקרינת רנטגן, והיא משמשת כציוד מגן בפני קרינה מייננת בבדיקות רנטגן ובכורים גרעיניים. בעבר השתמשו בעופרת בצנרות להובלת מים, בתעשיית הצבעים, בתעשיית הלכות והמוצרים הקוסמטיים ובתעשיית תוספי הדלק. חיילי עופרת היו צעצוע נפוץ לילדים ופחיות עופרת שימשו לשימור מזון ויין.

## רעילות העופרת

העופרת היא מתכת רעילה, ובצורתה היונית היא בעלת השפעה מזיקה על מערכת העצבים, הדם והמוח. רבות מן התופעות הנזירותוקסיות מיוחסות ליכולתם של יוני

| עופרת          |              |
|----------------|--------------|
| Pb             | סימול כימי:  |
| 82             | מספר אטומי:  |
| 207.21 גר"/מול | מסה מולרית:  |
| מוצק           | מצב צבירה    |
| 327°C          | בטמפ' החדר:  |
| 1749°C         | טמפ' היתוך:  |
| 180 פיקומטר    | טמפ' רתיחה:  |
| 119 פיקומטר    | רדיוס אטומי: |
| 11.34 גר"/סמ"ק | רדיוס יוני:  |
|                | צפיפות:      |

כגון צבעים לצביעת קירות ביתיים ולצביעת ריהוט כגון מיטות ילדים ועריסות, תעשיית צעצועי הילדים, ציפוי כלי אוכל, מוצרי קוסמטיקה ואיפור כגון שפתונים, לקים ועוד.

## העופרת בראי ההיסטוריה האנושית

### מבוא

העופרת נחשבת לאחת המתכות הראשונות שבהן השתמש האדם, והיא ידועה לאנושות עוד מימי קדם. חפצי עופרת ראשונים מלפני כ-8,000 שנה נתגלו בטורקיה, עיראק ודנמרק, ורובם מאופיינים כחפצי נוי. חפצי עופרת בני כ-6,000 שנה היו בשימוש במצרים העתיקה, וביניהם מוטות עופרת דקים ששימשו לכתיבה על פפירוסים (ומכאן מקורו של הבלבול בין עופרת לגרפיט), ופסלוני עופרת קטנים. אבקת הכחל ששימשה לאיפור סביב העיניים הופקה מטחינת גרגרי גלנה (עפרת Galena מכילה PbS), ונשות מצרים העתיקה ייחסו לה סגולות הגנה על העיניים מפני השמש ומפני דלקות (Wikipedia, 2017). השימוש בכחל היה מקובל גם בתרבות היהודית, ולמרות רעילותו הרבה הוא נמצא בשימוש גם היום בקרב מגוון תרבויות בהודו, באפריקה ואף בקרב בני העדה הדרוזית בגליל (בר-מאיר).

## עופרת בתקופת האימפריה הרומית

כל מערכת הביוב והובלת המים של האימפריה הרומית (ששלטה באירופה ובארצות הים התיכון מהמאה הראשונה לפני הספירה ועד לנפילתה בשנת 476 לספירה), הייתה עשויה מעופרת. הצבעים בקירות הבתים היו צבעי עופרת, והרומאים אף נהגו לצבוע את השיער לשחור עם תרכובות עופרת (PbS - שצבעה שחור). כלי האוכל, המכלים לשימור המזון וכוסות היין - כולם היו עשויים עופרת. אך נראה שהדרך העיקרית שבה מצאה העופרת את דרכה לגופם של תושבי האימפריה הייתה באמצעות הממתיק הידוע בשם סאפה (Sapa). תושבי רומי נהגו להרתיח יין שהחמיץ בכלי עופרת. הסופר הרומי פליני (Pliny - 79-23 לספירה) מספק מתכון להכנת סאפה ומדגיש שחובה להכינה בכלי עופרת. חימום עופרת מתכתית באוויר מייצר עופרת חמצנית (PbO - litharge), שמגיבה בתגובת סתירה עם החומצה האצטית ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) שביין (תוצר תהליך תסיסה של אתאנול). התוצר שהתקבל נקרא "סוכר עופרת" (עופרת אצטט -  $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ) - מלח קל תמס שהלך והתגבש ככל שהאריכו בחימום היין. טעמו המתקתק ומראהו של סוכר העופרת הוא כשל הסוכרוז שבו אנו משתמשים כיום

העופרת לחקות את יוני הסיידן המצויים ברבים מן האנזימים בגוף (Bressler & Goldstein, 1991). יוני העופרת יכולים להחליף את יוני הסיידן במבנה האנזים, וכתוצאה מכך מאבד החלבון את פעילותו הביולוגית, כלומר, פעילות האנזים נפגמת. מעניין לציין בהקשר זה שוויטרינרים נוהגים להזריק לתוכים שסובלים מהרעלת עופרת את הקומפלקס  $\text{CaEDTA}$ . הטיפול מבוסס כפי הנראה על הדמיון בין שני היונים - מתרחשת החלפה של יוני עופרת ביוני סידן, והמבנה הנושא את העופרת הרעילה מסולק מגוף התוכי דרך הכליות או המעינים.

החלפת הסיידן בעופרת, בתעלות הסיידן המאפשרות מעבר אותות עצביים, גורמת להפרעות קוגניטיביות בבני אדם. ילדים מתחת לגיל 6 רגישים יותר להרעלות עופרת משום שבגילאים אלו יכולה העופרת לחדור את המחסום דם-מוח. באופן דומה היא יכולה לחצות את השיליה ולגרום להרעלה בעוברים בזמן ההיריון. הרעלת עופרת בשלבים אלו עלולה לגרום לירידה במנת המשכל (IQ), לפיגור שכלי ולבעיות קשב וריכוז (סלע, 2017).

רוב מלחי העופרת הם קשי תמס. תרכובות כגון עופרת גפרית (PbS), עופרת גפרתית ( $\text{PbSO}_4$ ) ועופרת פחמתית ( $\text{PbCO}_3$ ) עלולות לשקוע בגוף למשך עשרות שנים, שכן לא קיימים בגוף מנגנונים לסילוקן.

הרעלת עופרת אופיינית במיוחד לעובדי תעשייה העוסקים בהתכת עופרת ועיבודיה, בתעשיית הרדיאטורים, המצברים (פרידלנדר, 2005), הצבעים, הבנייה והשיפוצים. כן נחשפים לעופרת טכנאי תעשיית אלקטרוניקה שעובדים בסביבת אדי הלחמה. עם השנים התעוררה דרישה להפחית בשימוש בעופרת, וחברות נדרשו לבנות פסי ייצור וחדרי עבודה נקיים מעופרת (Lead free). גם בסביבת מטווחים המשמשים לאימונים, להנפקת רישיונות לנשק ולתחרויות קליעה, קיימת סכנה להרעלת עופרת בשל החשיפה לכדורים העשויים מעופרת.

מקורה של חשיפה ביתית לעופרת היא בעיקר מכלי אוכל ישנים מחרסינה וקרמיקה, שהציפוי שלהם מכיל עופרת, ממוצרים המכילים צבעים מבוססי-עופרת ומצנרות מים ישנות המכילות עופרת. במסגרת התחקיר שנערך לצורך מאמר זה נמצא כי בקרב קהילות יהודיות מסוימות נהוג היה טקס ביתי להסרת עין הרע באמצעות התכת כדורי עופרת (המוזיאון למורשת יהדות בבל, 2013). תהליך התכת העופרת חושף את השותפים לטקס לאדי עופרת רעילים.

בשל רעילותה של העופרת, הוגבל השימוש בתרכובות עופרת במוצרים אשר באים במגע ישיר ותכוף עם האדם

1922: נאסר השימוש בעופרת לבנה לצבעים ביתיים ביוון.  
 1926: נאסר השימוש בעופרת לבנה לצבעים ביתיים בשווייץ  
 ובבריטניה.  
 1931: נאסר השימוש בעופרת לבנה לצבעים ביתיים בספרד.



אליס המילטון (ויקיפדיה)

ממש באותה התקופה שבה מדינות אירופה מתחילות להגביל את השימוש בצבעי עופרת, תעשיית הצבעים בארצות הברית משגשגת. בשנת 1910 חוקרת אליס המילטון, רופאה אמריקנית אשר הביאה לעולם את המושג רפואה תעסוקתית, את מצבם הבריאותי של מהגרים

אירופאיים שעובדים בתעשיית העופרת. היא מפרסמת דו"ח על 23 מפעלים לייצור עופרת לבנה במדינת אילינוי, שבהם אותרו למעלה מ-350 מקרים של הרעלת עופרת. מנהלי המפעלים נהגו להאשים את העובדים בהרעלה וטענו שאינם שוטפים ידיים כהלכה ואינם גוזרים ציפורניים. המילטון מצדה מתריעה שמקור ההרעלה אינו עובר דרך הידיים אלא שמדובר באבק עופרת שנכנס לגוף העובדים בתהליך הנשימה (Hamilton, 1910).

בדומה לאירופה, גם בארה"ב מתחילים להתפרסם דיווחים על הרעלות עופרת בילדים שנגסו במעקה העריסה, ושל אחרים שקססו ציפורניים שבהן היו לכודים חלקיקי צבע מן הקירות. למרות המידע המצטבר בדבר הרעלות עופרת שמקורן בצבעים, מגבירה תעשיית הצבעים האמריקנית את השימוש בתרכובות עופרת ("עופרת לבנה") בצבעים המיועדים לצביעה ביתית, פנימית וחיצונית. קירות חיצוניים ופנימיים של בתים, רהיטים, אביזרי עץ, דלתות, משקופים ועריסות לתינוקות - כולם נצבעו בצבעי עופרת. תוספת העופרת לצבעים משווקת כציפוי מגן איכותי לצבע, אשר מקנה לצבע ברק שמדגיש את יופיו וגם מזרז את תהליכי הייבוש של הצבע.

במשך מספר עשורים מנהלות חברות הצבעים מסעות פרסום ושיווק המדגישים את יתרונותיהם וסגולותיהם של צבעי העופרת, ומפיצות את השקר שלפיו צבעי עופרת הם מוצר בטוח. הן מחלקות דרך העיתונות חוברות צביעה לילדים ושולחות לילדים תחפושות של הילד

להמתקת המזון (בתקופת האימפריה הרומית לא היה מוכר עדיין הסוכרוז. קני הסוכר נמצאו בפולינזיה, והשימוש בו החל באירופה רק בסביבות שנת 800 לספירה), והוא שימש כממתק במאכלים וכחומר משמר ליין (Emsley, 2005).

דר' ג'רום נאריאגו, מדען קנדי, מייחס את שקיעתה של האימפריה הרומית לנזק הנוירולוגי שנגרם לתושביה בכלל ולבני האצולה בפרט, כתוצאה מחשיפה לעופרת. מסקירה שערך בתקופה שבין 30 לפני הספירה ועד 250 לספירה נמצא שכשני שלישים מקיסרי האימפריה, ובכלל זה הקיסרים קלאודיוס, קליגולה ונירון צרכו תזונה מזוהמת בריכוזים גבוהים של עופרת וסבלו משיגדון (Gout - דלקת מפרקים כרונית) ומהרעלת עופרת כרונית. קיסרי האימפריה הרומית היו ידועים כחובבי יין וצרכו דברי מתיקה ספוגי עופרת, ונראה כי ניתן לייחס את ההתנהגות המנטלית המשוונה שאפיינה חלק מהם להרעלת עופרת (Nriagu, 1983). בהקשר זה מעניין לציין כי היו שייחסו להרעלת עופרת את התואר "מחלה של עשירים" - ריכוזי עופרת שנמצאו בשרידי קבורה של רומאים עשירים, גבוהים בהרבה מאלו שנמצאו בשרידי קבורה של פשוטי העם. על העוסקות במקצוע העתיק בעולם באימפריה הרומית מסופר שהיו נוהגות לאכול סאפה בכפיות גדושות. ריכוזי העופרת הגבוהים בגופן גרמו לעורן להיראות לבן (חיורון שנגרם מאנמיה), שיבשו את פעולתה התקינה של מערכת הרבייה (ושימשו בכך אמצעי מניעה "יעיל"), ובמקרה של היריון - גרמו להפלות (Emsley, 2005).

## עופרת בתעשיית הצבעים

במשך שנים רבות היה מקובל בתעשיית הצבעים השימוש בתרכובות עופרת. את קירות הבתים, מעקות, רהיטים ועריסות ילדים נהגו לצבוע בצבעי עופרת לבנה ( $PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$ ). משנתגלו אירועים של הרעלת עופרת, הלך והתפשט באירופה ובאוסטרליה האיסור על שימוש בצבעים מכילי עופרת לשימוש ביתי (Bochynska, 2013) כמפורט כאן:

1892: הפעם הראשונה שבה מדווחת הרעלת עופרת בקרב ילדים. ההרעלה אירעה באוסטרליה, והממצא המשותף לכל הילדים שחלו היה צבעי עופרת שבהם נצבעו מעקות המדרגות בבתיהם.

החל משנת 1904: הולך ומצטבר מידע המצביע על הרעלות עופרת בילדים.

1909: בצרפת, בלגיה ואוסטריה נאסר השימוש בעופרת לבנה לצבעים ביתיים.

1914: אוסטרליה מגבילה את השימוש בצבעי עופרת לבנים.

קשיים בלמידה ובהתנהגות ועיכוב בהתפתחות השכלית. בשנת 1955 נחקק חוק להגבלת ריכוז העופרת בצבעים ל-1%, ורק בשנת 1971 נחקק בארה"ב חוק אשר מגביל את השימוש הביתי בצבעי עופרת.

עם התפתחות החקיקה והתקינה בדבר החשיפה לעופרת, משתנים גם ערכי החשיפה המותרים כמפורט להלן:

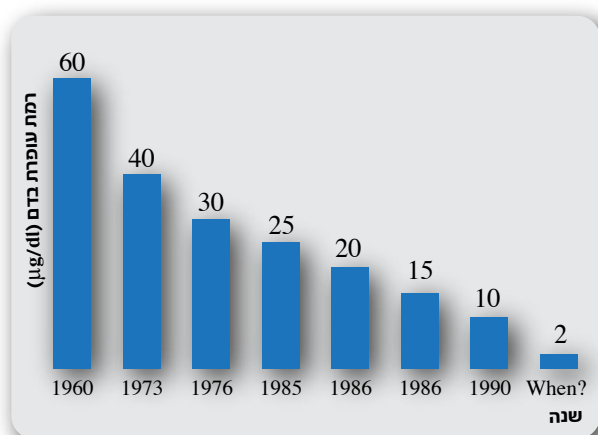
1971: ריכוז נמוך מ-40 מיקרוגרם/דציליטר עופרת בדם של ילדים עדיין לא נחשב כהרעלת עופרת.

1975: ריכוז של 30 מיקרוגרם/דציליטר עופרת בדם של ילדים כבר נחשב כהרעלת עופרת.

1978: ארה"ב אוסרת שיווק והפצה של צבעי עופרת לשימוש ביתי.

1985: ריכוז של 25 מיקרוגרם/דציליטר עופרת בדם של ילדים נחשב כהרעלת עופרת.

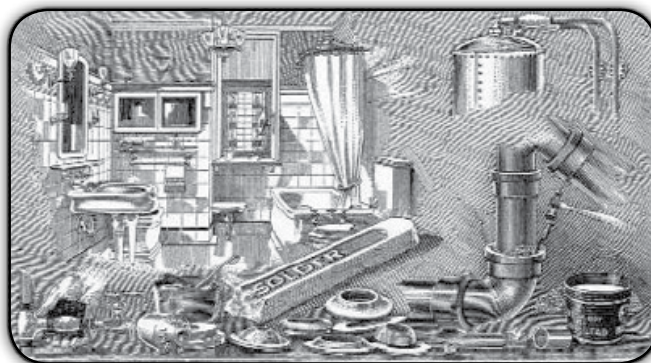
החל משנת 1991 מוגבל ריכוז העופרת המותר בדם של ילדים לעד 10 מיקרוגרם/דציליטר. כל ריכוז מעל לערך זה מהווה חשש להרעלת עופרת. כיום יש הגורסים כי כל ריכוז עופרת שעולה על 2 מיקרוגרם/דציליטר מהווה הרעלת עופרת (Gilbert & Weiss, 2006).



שינויים בתקן האמריקני לרמות העופרת בדם החל משנת 1960 (Gilbert & Weiss, 2006)

## עופרת בתעשיית תוספי הדלק

בשנת 1921 החלה חברת ג'נרלס מוטורס האמריקנית (GM) להוסיף לדלק תרכובת עופרת (TetraEthyl Lead - TEL) את ה-TEL בודד תומס מידג'לי, מהנדס צעיר בחברה, אשר עפ"י עדותו חקר כל תרכובת אפשרית, החל מחמאה מומסת וכלה באלומיניום כלורי וקמפור (תרכובת אורגנית ריחנית המופקת מעץ הקמפור) במטרה לפתור את



מוצרים המכילים עופרת תחת הכותרת: "עופרת מסייעת לשמור על בריאותך" - מודעת פרסומת משנת 1923 מ-National Geographica

ההולנדי - סמל המותג של חברת הצבעים - לכבוד חג ה-Halloween (Hallowen, 2013). הן אפילו מדגישות את טעמם הטוב של צבעי עופרת (כזכור, ליוני העופרת טעם מתקתק. זוכרים את טעמו של היין ואת ממתקי העופרת מן התקופה הרומית?).



מודעת פרסומת המדגישה את טעמם הטוב של צבעי העופרת

בשנת 1921 מודה החברה הלאומית האמריקנית שמוצרי עופרת על שלל צורותיהם מהווים רעל (עופרת פחמתית, תחמוצת עופרת, סולפאטים וסולפידים של עופרת וכו'), אך רק עשרות שנים מאוחר יותר מוטל בארה"ב איסור על שימוש בצבעי עופרת לבנים לשימושים ביתיים (כאמור, בניגוד לרבות ממדינות אירופה שהקדימו לעשות זאת עוד בתחילת המאה ה-20).

בשנות ה-40 וה-50 של המאה העשרים מתגלים מקרים רבים של הרעלות עופרת בילדים. כולם קשורים לחשיפה לצבעי עופרת ומאופיינים בתופעות של הפרעות נוירולוגיות,

Standard Oil ו-GM בשנת 1923 את תאגיד האתיל (Ethyl Corporation) (Wikipedia, 2016) - חברה לייצור תוסף הדלק טטרה-אתיל-עופרת (TEL).

במקביל חוקר מעבדה בשירות האמריקני לבריאות הציבור (USPHS) כותב מכתב ובו הוא מזהיר כי ייצור ה-TEL מהווה איום מהותי על בריאות הציבור, וכבר אותו מספר מקרים של הרעלת עופרת בקרב עובדי המפעל שהשתתפו בתהליך ההרצה (Pilot) לייצור ה-TEL. עוד הוא מציין במכתבו, שכל שרפה של כ-4 ליטר דלק תשחרר לסביבה 4 גר' של גרגרי אבק של תחמוצת העופרת  $PbO_{(s)}$ . הגרגרים יתפזרו באוויר, ינחתו על הקרקע, וריכוזם יגיע במהרה לרמות מסוכנות - במיוחד במנהרות. בעקבות המכתב מתבקשת המחלקה הפרמקולוגית לערוך מחקר בנושא. תגובת מנהל המחלקה הייתה שאין בידיהם הזמן הדרוש לניהול המחקר, והוא מציע לקבל נתונים מהמפעל המייצר. החל מרגע זה ולמשך כארבעה עשורים כל המחקרים המדעיים העוסקים ב-TEL - ובכלל זה בהשלכות הבריאותיות על הבאים במגע עם החומר - נכתבו ונחתמו ע"י תאגיד ה-Ethyl, והוא הפך להיות הסמכות המקצועית הבלעדית בנושא. כלומר, הגוף שאמור להיות תחת פיקוח, מפקח למעשה על עצמו.



מודעת פרסומת לתוסף הדלק TEL משנת 1933 - המילה עופרת אינה מוזכרת כלל

בעיית הנקישות במנוע. התוספת באה לפתור את בעיית ההצתה העצמית של תערובת הדלק המשמשת להנעת המכונית.

בזמן דחיסת הדלק למנוע מתרחש תהליך של הצתה עצמית אשר פוגם ביעילות פעולת המנוע וגורם לנקישות. הסיבות לכך נעוצות בשורה של תגובות שרשרת שבהן נוצרים רדיקלים חופשיים (מכון ויצמן - המחלקה להוראת המדעים, 1986). מולקולות TEL לוכדות את הרדיקלים אשר מתחילים את תגובת השרשרת ומונעות בכך את ההצתה העצמית ואת בעיית הנקישות במנוע. אלא שכתוצאה מכך נוצרת תחמוצת עופרת  $PbO$  אשר שוקעת במנוע וגורמת לסתימות. לשם כך נהגו להוסיף לדלק גם EDB - אתילן דו ברומי - אשר מגיב עם  $PbO$  ופותר את בעיית הסתימות (קסנר, 1993). אך אליה וקוץ בה, שכן כתוצאה מכך נוצרות תרכובות עופרת נדיפות ורעילות כגון  $PbBr_2$  ו- $PbBr_4$ .

תרכובת העופרת TEL התגלתה לראשונה עוד בשנת 1854 ע"י כימאי גרמני אך לא נעשה בה כל שימוש מסחרי משום שכבר אז היה ידוע כי מדובר בחומר קטלני אשר עלול לגרום לקשיי נשימה, הזיות, טירוף ואף מוות. למעשה, מידג'לי הצעיר הכיר היטב תרכובת אחרת שהייתה בשימוש גם כחומר דלק וגם כתוספת לבנזין - האתאנול (Wikipedia, 2017). יתר על כן, הוא מצביע על האתאנול כבעל יתרונות עצומים - תהליך השרפה אינו כרוך בפליטת מזהמים, יעילות המנוע עולה, ואין בעיה של נקישות. אלא שכפי שמיטיב לתאר זאת העיתונאי האמריקני ג'יימי קיטמן (Kitman, 2000), חברת GM לא יכלה להשלים עם כך שעל אתאנול אי אפשר להכריז בעלות, שכן אתאנול היא תרכובת טבעית, וככזו - לא ניתן לרשום אותה כפטנט. בנוסף לכך כל אדם יכול לייצר בקלות יחסית אתאנול בביתו. לעומת זאת, TEL נרשמה כפטנט, שווקה כתוסף הדלק האידאלי והגדילה את רווחי החברה. זאת ועוד, תאגיד הנפט לא אהבו את יצרני האתאנול והוטרדו מכך שתשתיות הפקת הדלק שלהן יתחרו בחברות שישווקו אתאנול כחומר דלק. ל-GM היה אינטרס כלכלי לשמור על יחסים תקינים עם תאגיד הנפט ובעיקר עם חברת Standard Oil (מוכרת היום כחברת הדלק Esso). במקביל שלטה חברת דו פונט (Du Pont) - חברה לייצור כימיקלים - בחלק ממניות GM והתעניינה בהגדלת רווחיה ע"י ייצור חומרים הקשורים לתעשיית הנפט שהלכה וגדלה. על תרכובת ה-TEL כתב אחד ממנהלי החברה, עוד בטרם החלו לייצר אותה, כי מדובר ב"נוזל חסר צבע בעל ריח מתקתק ובעל כושר ספיגה דרך העור, הגורם להרעלת עופרת מידית". כל זה לא הפריע לנוגעים בדבר להתמקד באופן מובהק באינטרס הכלכלי, ותוך כדי התעלמות מוחלטת מן הסיכונים הכרוכים בייצור ובשימוש ב-TEL, מקימות

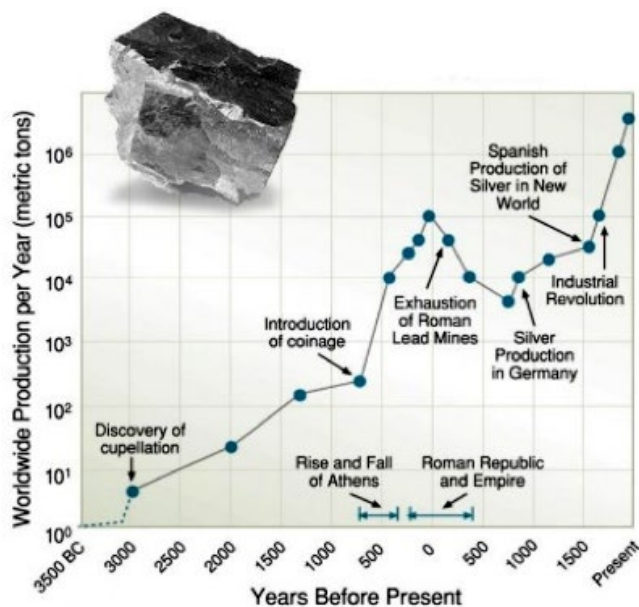
התבסס על חישוב שיעורי דעיכת האורניום בסלעי הזירקון ועל מדידת ריכוזי העופרת בסלעים אלו. תוך כדי המחקר הופתע פטרסון לגלות שריכוזי העופרת הטבעיים במעמקי האוקיאנוסים ובסביבות בתוליות כגון אנטרטיקה, נמוכים בהרבה מאלו הקיימים במים רדודים ובאזורים מתועשים. פטרסון יוצא עם משלחת מחקר לקוטב ומגלה שבשכבות קרח קדומות נמצאו ערכי עופרת ממוצעים של 0.5ppt (Part Per Trillions). בתקופת האימפריה הרומית עלו ערכי העופרת ל-2ppt, אך צנחו חזרה לאחר נפילת האימפריה. אלא שהמספרים המדהימים נמדדים דווקא בשכבות הקרחונים העליונות - אלו שמאפיינות את תחילתה של המהפכה התעשייתית ואילך: בין השנים 1750 ל-1940 עולים ערכי העופרת מ-10 ל-80ppt. וב-25 השנים הבאות עולה הערך למספר המדהים של 200ppt (Emsley, 2005). פטרסון מגיע למסקנה שמקורות העופרת שהוא מדד במחקריו אינם טבעיים, והם נעוצים בתרכובות העופרת הנפלטות ממנועי המכוניות. בשנת 1963 מתפרסם מחקרו (patterson & tatsumoto, 1963), ופטרסון פותח בכך מאבק ממושך כנגד תאגיד ה-Ethyl. הוא ממשיך לפרסם מאמרים המצביעים על תעשיית הדלק כאחראית להרעלות עופרת ולזיהום האוויר, האדמה ומי השתייה. התאגיד אשר רווחי הענק שלו עומדים בסכנה, שוכר מצדו את הרופא ד"ר רוברט קיהו אשר עושה הכול על מנת לערער את אמינות מחקריו של פטרסון, ומפזר ספקות בדבר הקשר בין ריכוזי העופרת הגבוהים לבין תוספי הדלק והרעלות עופרת. סיפורו של ד"ר פטרסון ומאבקו בתאגיד מובא בפרק "החדר הנקי" של סדרת הסרטים קוסמוס (7). לאחר שנים רבות של מאבק

כך מקבל התאגיד חופש פעולה ומשווק את תוסף העופרת כמוצר שמשפר את פעילות המנוע, למרות שבפועל תוצרי תהליך הבעירה גרמו ליצירתן של תרכובות העופרת הרעילות  $PbO$  ו- $PbBr_4$ : הראשונה שוקעת במנוע ומשבשת את פעולתו, והשנייה נדיפה, נפלטת דרך צינור הפליטה ומזהמת את האוויר. מקרים של הרעלת עופרת ומוות בקרב עובדי המפעלים לייצור TEL הוסתרו (Ganzel, 2007), בין היתר בזכות העובדה שחלק מאמצעי התקשורת היו בבעלותה של חברת Du Pont. מסמכים המשבחים את השימוש ב-TEL פורסמו ללא כל הפרעה וללא כל פיקוח על אמינות המידע. על רקע סיפורה של תעשיית הצבעים עלתה המודעות בקרב הציבור לרעילותה של העופרת. בתגובה לכך נמנעו היצרנים באין מפריע מלהזכיר במודעות הפרסומת ל-TEL שיש עופרת בתוספי הדלק. את התרכובת טטרה אתיל עופרת הם מפרסמים בקיצור בשם אתיל.

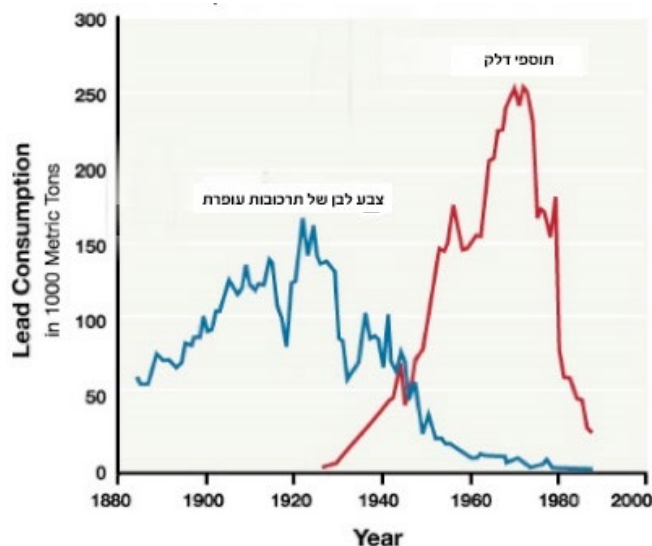


קלייר פטרסון (ויקיפדיה)

ואז הגיע קלייר פטרסון - גאוכימאי אשר חקר את גיל כדור הארץ (Wikipedia, 2017). פטרסון חקר את המינרל זירקון ( $ZrSiO_4$ ), אשר מכיל ריכוזים זעירים של אורניום ותוריום (יסודות רדיואקטיביים אשר עוברים שורה של דעיכות רדיואקטיביות עד לעופרת).



5,000 שנים של ייצור עופרת



צריכה של עופרת בארה"ב

■ צריכה של דלק מכל עופרת (בטונות) לכל 3,000 איש  
 ■ פשעים אלימים ל-100,000 איש



חשיפה לתרכובות עופרת ומספר התקיפות האלימות בארה"ב בין השנים 1941-2010 (casciani, 2014)

השימוש בדלק מכל עופרת, ובין השנים 1970-1987, עם הירידה בשימוש בדלק מכל עופרת, ירדו מדי שנה רמות העופרת בדם בקרב 2 מיליון ילדים. עוד נמצא כי קיים קשר בין רמות החשיפה לעופרת לבין התנהגות אלימה. מחקרים רבים שנערכו בארה"ב הצביעו על קשר בין רמות חשיפה גבוהות לתרכובות עופרת באוויר ולמים מזוהמים ביוני עופרת לבין מספר עבירות פליליות כגון תקיפה והריגה (Stretesky & Lynch, 2004).

## הסוואת צוללות באמצעות צבעי עופרת במלחמת העולם השנייה (The University of Nottingham).

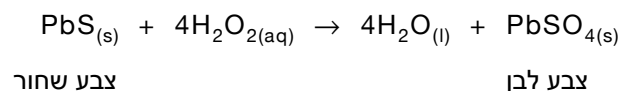
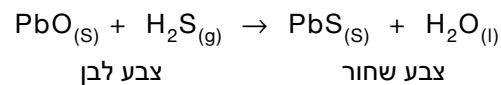
בתקופת מלחמת העולם השנייה השתמש הצי הבריטי בצבעי עופרת להסוואת צוללות. ההנחה הייתה שכשהצוללת נמצאת במרחק גדול מהחוף, עליה להיות צבועה בלבן, וכך על רקע השמיים היא תוסווה ולא תתגלה. לעומת זאת, אם עליה להתקרב לחוף למשימה חשאית בשעת לילה - עליה להיות צבועה בשחור. הצוללת אכן נצבעה בתרכובת עופרת חמצנית שצבעה לבן, אך בטרם התקרבה לחוף, יצאו החיילים ומרחו אותה בתמיסה שיצרו ממי הים ומגופרית. התמיסה הגיבה מיד עם תחמוצת העופרת ליצירת PbS - תרכובת בעלת צבע שחור. משהתרחקה שוב מהחוף, נמרחת הצוללת בשנית, אך הפעם בתמיסת מי חמצן שיצרה

זכה פטרסון לגיבויו של סנטור אמריקני בשם אדמונד מאסקי אשר פעל למען איכות הסביבה. המאבק נשא פרי, ובתחילת שנות ה-70 החלו בארה"ב להפחית בהדרגה את השימוש בדלק המכלי TEL. בשנת 1988 ירד שיעור הדלק המועשר בעופרת ל-1% משיעורו בשנת 1970, ובשנת 1996 הופסק לחלוטין השימוש בדלק המכלי עופרת. ברוב מדינות העולם הוטל האיסור על שימוש בדלק מכל עופרת רק בשנת 2007. בשנות ה-70 של המאה העשרים מגיעים ערכי העופרת בדגימות הקרחונים למספר מקסימלי של 300PPT, ובעקבות מאבקו של פטרסון, הפחתת השימוש ב-TEL באה לידי ביטוי גם בערכי העופרת שמתחילים להראות מגמת ירידה. עם זאת גם היום ערכי העופרת עדיין גבוהים בהרבה מאלו שאפיינו את שנת 1800.

מחקרים שעקבו אחר תופעות של הרעלת עופרת מצביעים על הלימה בין מידת הצריכה של תרכובות עופרת לבין תפוצתן של תופעות בריאותיות ומנטליות הקשורות להרעלת עופרת. כך לדוגמה, מחקר של EPA (USA Enviromental Protection Agency) משנת 1985 קבע שלפני הפסקת השימוש בדלק מכל עופרת מתו מדי שנה 5,000 אמריקנים ממחלות לב הקשורות בהרעלת עופרת. בשנת 1988 דווח לקונגרס האמריקני ע"י הסוכנות לחומרים רעילים כי בין השנים 1927-1987 נחשפו כ- 67 מיליון ילדים צעירים לרמות רעילות של עופרת עקב

מיד  $\text{PbSO}_4$  שצבעה לבן.

תגובות אפשריות:



## עופרת בכלי בדולח

כלי קריסטל הם דוגמה לכלי בדולח המורכבים מ- $\text{SiO}_2$  ומעופרת חד-חמצנית ( $\text{PbO}$ ). תכולת העופרת הגבוהה הופכת את הזכוכית לרכה ולנוחה יותר לחיתוך. המשטחים החתוכים מקנים לכלים את הברק והנצנוץ. אלא שלא מומלץ לשתות מהם משקאות כגון יין, קולה או מיץ תפוזים הנמזגים לתוכם, וגם לא לאכול סלט המכיל חומץ או לימון. בכל אלו מצויות חומצות אשר יגיבו, כאמור, בתהליך סתירה עם ה- $\text{PbO}$  ויספגו לתוכם תרכובות עופרת רעילות.

מעניין לציין שנהוג לשמור משקאות חריפים כגון וויסקי בבקבוקי קריסטל. "יודעי דבר" מעידים על כך שזה משפר את הטעם. ייתכן שגם במקרה זה "שימור/שיפור" הטעם נעוץ בתגובת הסתירה בין תחמוצת העופרת לבין החומצה האצטית אשר מחד מביאה לירידה בחומציות המשקה, ומאידך - לזליגת יוני עופרת למשקה ולעלייה במתיקותו.

## אירועי הרעלות עופרת בתקופתנו

למרות התפתחות התקינה והחקיקה בכל הנוגע לשימוש בעופרת, מתגלים מדי שנה עוד ועוד אירועים של הרעלות עופרת ברחבי העולם, כמפורט כאן.

ניגריה שנת 2008 (פאגוטו, 2013)

איבריהם אבובקאר, תושב זמפארה שבניגריה חשב ששנת 2008 היא שנת התפנית בחייו. הוא החל לעבוד ככורה במרבצי הזהב שבאזור. תמורת הזהב שהפיק זכה לסכומי עתק ששיפרו פלאים את יכולתו לפרנס את משפחתו. אלא שלילה אחד החל בנו בן השנה וחצי לסבול מעוויתות וחומו עלה. למחרת בבוקר הוא מת, ואתו 7 פעוטות נוספים שסבלו מתסמינים זהים.

במשך תקופה של כשנתיים הורעלו למעלה מ-5,000 ילדים בני פחות מחמש מהרעלת עופרת. 460 מהם מתו. התושבים ייחסו את הסיבות למוות לקללה שהטילה עליהם רוח רעה. רופאים שהגיעו לאזור מצאו שסיבת המוות היא הרעלת עופרת שמקורה במכרות הזהב.

מרבצי הזהב באזור אינם מכילים זהב טהור כי אם עפרות זהב אשר הכילו בין היתר גם תחמוצות עופרת. על מנת להפיק את הזהב מן העפרות, יש לכתוש אותן לאבקה. האבק שמתפזר תוך כדי הכתישה נספג בגופם של התושבים דרך מערכת העיכול ומערכת הנשימה וגורם להרעלת עופרת ולנזקים בלתי הפיכים למוח ולמערכת העצבים, בעיקר בקרב ילדים. אם רמת העופרת המותרת בדם היא עד 10 מיקרוגרם לדציליטר, ומעל 40 מיקרוגרם לדציליטר מתחיל להתפתח נזק מוחי - הרי שבקרב ילדי הכפרים בזמפארה נמצאו רמות עופרת של 700 מיקרוגרם לדציליטר.

ארה"ב (פלינט משיגן - Flint Michigan) - שנת 2017 (Wikipedia, 2017)

בשנת 2014 עברה עיריית פלינט שבמישיגן ארה"ב להשתמש במי הנהר פלינט כמי שתייה. התושבים התלוננו על מי ברז עכורים, על ריח רע שעולה מן המים ועל טעמים הרע. בבדיקות דם שנערכו נמצא כי מספר הילדים אשר בדמם נמצאו רמות עופרת גבוהות מן התקן המותר הוכפל בשנה שבה החלו לשתות ממי הנהר. הסתבר שמי הנהר מזוהמים בעופרת.

בתחילת המאה ה-20 ועד שנות ה-80 שגשגו בפלינט מפעלים לייצור רכבים של חברת (General Motors) GM. מי נהר הפלינט שימשו את המפעלים לצורך קירור מנועים. בשנות ה-80 סגרה החברה את המפעלים (שסיפקו מקור תעסוקה לכ-30,000 תושבים) והקימה מפעלים במקסיקו. אחת הסיבות לכך הייתה עלויות השכר הנמוכות לעובדים במקסיקו. סברה אחרת תולה את הסיבה למעבר למקסיקו במי הנהר שהפכו עם השנים קורוזיביים מדי. העיתונאית ארין ברוקוביץ פרסמה מאמר שבו היא טוענת שמי הנהר זוהמו עד מאוד, ולצורך טיהורם נדרש טיפול מסיבי בחומרים שהפכו את המים לקורוזיביים, כמו עלייה דרמטית בריכוז יוני הכלור. חברת GM טענה שריכוז גבוה של יוני כלור פוגע בתהליכי הייצור ומזיק למנועים שהיא מייצרת.

כאשר הופסק השימוש במי הנהר לצרכים תעשייתיים, החלה כאמור עיריית פלינט לשאוב אותם לצורכי שתייה. עד אז נשאבו מי השתייה ממקור אחר. אחת הסברות גורסת שמי הנהר המכילים ריכוז גבוה של יוני כלור, מוזרמים בצינורות הביתיים הישנים המורכבים גם מעופרת, ויוני הכלור סופגים את העופרת למי השתייה (עופרת כלורית  $\text{PbCl}_{2(s)}$  היא מלח קשה תמס). כך מגיעים מי השתייה לגופם של התושבים, וייתכן שזו הסיבה לרמות העופרת הגבוהות שנמצאו בבדיקות הדם של ילדי העיר.

## העופרת ומכונות הקפה - החיבור המקומי

ב-17.1.2017 פרסם משרד הבריאות הודעה בזו הלשון:

למשרד הכלכלה והתעשייה ולמשרד הבריאות הגיע מידע שלפיו קיים חשש להימצאות עופרת במים שהופקו ממכונות קפה מוסדיות מדגמים מסוימים, שבהן נעשה שימוש בעיקר בעסקים כדוגמת בתי קפה, מקומות עבודה, בתי מלון וכיו"ב.

בחלק מן המכונות שנבדקו נמצאו רמות עופרת שעולות על המותר בתקן... בעקבות המידע שהצטבר... הוחלט על ביצוע בדיקות פרטניות לגילוי מתכות כבדות במים המופקים ממכונות הקפה... מכונה אשר במי השתייה שלה יימצאו חריגות ברמת העופרת, תיאסר לשימוש עד לתיקונה או להחלפתה... יצוין כי אין מדובר בסכנה מידית... יחד עם זאת ממליץ משרד הבריאות להפחית ככל שניתן בשתיית קפה ממכונות במהלך תקופת ביצוע הבדיקות, ולנשים בהריון מומלץ להימנע משתיית קפה ממכונות מוסדיות עד להודעה חדשה.

דבר זליגתה של עופרת למי השתייה ממכונות הקפה פורסם בגרמניה עוד בדצמבר 2013 (BFR Berlin). מכון המחקר הגרמני להערכת סיכונים (BFR- Berlin Federal Institute for Risk Assessment) קשר את זליגת העופרת למים, לחומרי הניקוי המשמשים לניקוי מכונות הקפה. החומרים לניקוי אבנית מכילים חומצות. החומרים המתכתיים שמהם בנויות מכונות הקפה הם סגסוגות המכילות עופרת. תחמוצות עופרת שנוצרות בחשיפה לאוויר כגון  $PbO$ , מגיבות עם חומצות להסרת אבנית בתכשירי הניקוי, ויוני עופרת ( $Pb^{2+}_{(aq)}$ ) זולגים למים שמהם מכינים את הקפה. על מנת להחליט אם ריכוזי העופרת שזלגו למים מהווים סיכון, חשוב לדעת מהם התקנים המגדירים רמות סיכון ומה משמעותם.

תקני השימוש בעופרת בישראל (המשרד להגנת הסביבה, 2014)

בישראל נאסר השימוש בעופרת כתוסף לדלק וכבסיס לצבעים לבית, אולם סביר להניח כי קרקעות סמוכות לצירי תחבורה ראשיים יהיו מזהמות בעופרת בשל שקיעה של חלקיקי עופרת מפליטות כלי רכב לאורך השנים הרבות. כמו כן סביב מפעלי תעשייה העוסקים במצברים, בעיבוד עופרת או בעיבוד מתכות ייתכן שיימצאו ריכוזי עופרת גבוהים באוויר ובקרקע. עופרת עלולה להתגלות במי השתייה כתוצאה מזליגת העופרת מהצנרת ומאביזרי מים ישנים לתוך המים. תקן ישראלי 5452, "בדיקת מוצרים הבאים במגע עם מי

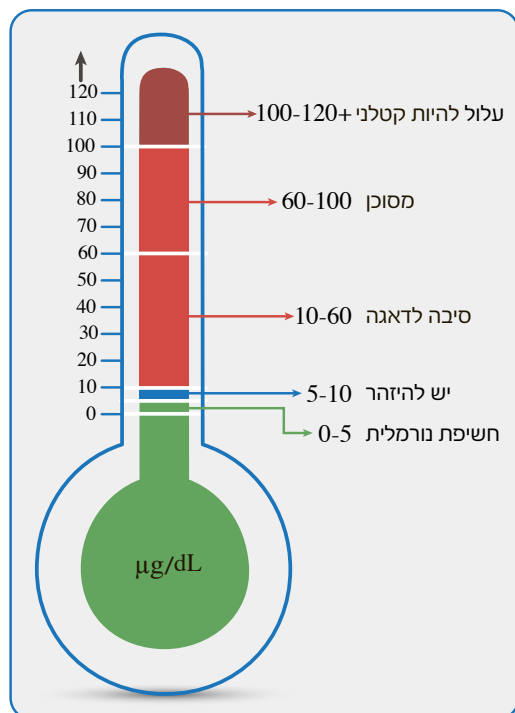
שתייה", מגדיר דרישות לגבי התאמתם לשימוש של מוצרים הבאים במגע עם מי שתייה, בהתייחס להשפעתם על איכות המים, כולל התייחסות לריכוז עופרת.

**באוויר:** ערכי היעד הבריאותיים (שמתחתיהם ככל הנראה אין השפעות בריאותיות שליליות) שנקבעו בחוק אוויר נקי לעופרת (בחומר חלקיקי), הם 2 מיקרוגרם למטר מעוקב (מק"ג/מ"ק) ליממה, ו-0.09 מק"ג/מ"ק לשנה, והם זהים לערכי הסביבה (ערכים שמעליהם קיימת הפרה של החוק). החשיפה התעסוקתית המרבית המותרת היא 300 מק"ג לכל מ"ק של אוויר. אישה שטרם מלאו לה 45 שנים לא תהיה חשופה לריכוז של עופרת באוויר העולה על 50 מק"ג/מ"ק (המוסד לבטיחות ולגהות).

**במי שתייה:** התקן הישראלי לעופרת במי שתייה עומד על 10 מיקרוגרם לליטר (מק"ג/ל) על בסיס התקינה האירופית והמלצת ארגון הבריאות העולמי. על-פי הסוכנות האמריקנית להגנת הסביבה, היעד לריכוז מקסימלי של מזהם זה הוא אפס. עם זאת משיקולי ישימות, התקן האמריקני הוא 15 מק"ג/ל.

**בקרקע:** עופרת נמצאת בקרקע באופן טבעי בתלות בסוג הקרקע והאזור בארץ. באזורי תעשייה ובאזורים בקרבת עורקי תחבורה ראשיים עלולים להיות ריכוזים גבוהים יותר. ערכי הסף של המשרד להגנת הסביבה לעופרת בקרקע הם 250 חלקיקים למיליון (ppm) לאזורי מגורים, 1,000 לאזורי מסחר או תעשייה ו-100 לקרקעות המשמשות לחקלאות.

**במזון:** משרד הבריאות קבע ערכים מרביים לריכוזי עופרת בסוגי מזון שונים.



רמות עופרת בדם ורמת הסיכון



מתוך תערוכה שהכינו מורים בנושא העופרת, במסגרת הקורס להערכה חלופית בהנחיית פרופ' רון בלונדר וד"ר אורית הרשקוביץ

כגון מי אחראי על כך ומדוע חשובה מעורבות ציבורית; סוגיות אתיות הנוגעות לגבולות המוסר בניהול חברה עסקית והדנות באחריות חברתית מצד גורמים עסקיים ובמהותו של פיקוח ממשלתי; ולבסוף סוגיות חברתיות באשר לאחריותו של הפרט על סביבתו, מידת מעורבותו ותפקידו של האזרח הקטן כיחיד בחברה האזרחית-דמוקרטית.

ואם במשאלת לב עסקינן, הרי סיפורה של העופרת הוא רק דוגמה אחת מיני רבות לחשיבות הטמונה בידע ובהבנה של הפרטים, בדרך לגיבושה של דעה בכל סוגיה מדעית-חברתית-ערכית באשר היא. מי ייתן ויעמוד לרשותנו הזמן והרצון לשאוף ולעשות כן בשלל האירועים המתרגשים עלינו בחיי היום יום.

## ביבליוגרפיה

Bressler, J., & Goldstein, G. (1991). Mechanisms of lead neurotoxicity. *Biochemical Pharmacology*, 479-484.

Kitman, J. (2000, 3). [The Secret History of Lead](#).

ROSNER, D., & MARKOWITZ, G. (2013, april). [Why It Took Decades of Blaming Parents Before We Banned Lead Paint](#)

The University of Nottingham. (n.d.). [lead](#).

7, C. e. (Director). (n.d.). *The clean room* [Motion Picture].

BFR Berlin. (n.d.). [פרסום של המכון הגרמני](#).

## טווח הערכים התקין של עופרת בדם:

בקרב ילדים - עד 10 מיקרוגרם לדציליטר;

בקרב מבוגרים - עד 20 מיקרוגרם לדציליטר;

בקרב נשים הרות - עד 5 מיקרוגרם לדציליטר;

בקרב עובדים בתעשייה שעושה שימוש בעופרת - עד 50 מיקרוגרם לדציליטר;

ריכוז שמוגדר כרעיל - מעל 100 מיקרוגרם לדציליטר/חשיפה ארוכת טווח ל-40-80 מיקרוגרם לדציליטר.

## סיכום ומשאלה

עד כאן סיפורה של העופרת. סיפור שיש בו גיבורים "טובים" ו"רעים". סיפור שמעורבים בו כסף ומזימות. סיפור שמציג בעיות ופתרונות. יש עלילה, יש הסתבכות ויש סוף... סוף לעת עתה... שהוא, מן הסתם, התחלה של סיפור חדש שעדיין איננו מכירים. היכרות מעמיקה של הסיפור חשובה לגיבושן של עמדות. היכרות עם מבנה החומר וניתוח התהליכים הכימיים שבהם מעורבת העופרת, מהווים כלי להבנתם של האירועים ההיסטוריים המושפעים מן השימוש בה. רק העמקה והבנת ההיבטים המדעיים תאפשר בחינה ביקורתית ומושכלת של הסיפור שסופר כאן. היכרות עם הסיפור על שלל היבטיו תסייע לעוסקים בו לנקוט עמדה מנומקת ולדון גם בהיבטים ערכיים הנוגעים לחייו של הפרט בחברה כגון: סוגיות אקולוגיות הנוגעות למודעות ולשמירה על איכות המים שאנו שותים ועל איכות האוויר שאנו נושמים; שאלות

- Social Behavior, 229-214.
- Wikipedia. (2016). [Ethyl Corporation](#).
- Wikipedia. (2017). [Clair Cameron Patterson](#).
- Wikipedia. (2017, may). [Flint water crisis](#).
- Wikipedia. (2017). [Kohl \(cosmetics\)](#).
- Wikipedia. (2017). [Timeline of alcohol fuel](#).
- בלונדר, ר', שחם, א', & זמלר, א'. (2015 יולי 2016). באילו תנאים נאפשר החלפה של חלונות בית הספר בתאים סולאריים מבוססי-פרובסקיט? על-כימיה (26), 26-32.
- בר-מאיר, א'. (אין תאריך). [עושים עיניים/ כחל - מסורת הולכת ונעלמת](#).
- המוזיאון למורשת יהדות בבל. (2013). [טקס ראסאס בקרב יהדות בבל](#).
- המוסד לבטיחות ולגהות. (אין תאריך). כרטיס [בטיחות לחומרים כימיים מס' 0052 - עופרת](#).
- [המשרד להגנת הסביבה](#). (2014).
- מכון ויצמן - המחלקה להוראת המדעים. (1986). חומר רקע לפרק העשירי. ב- כימיה לבית הספר התיכון כרך ב' (עמ' 110).
- סלע, ב' ע'. (2017). [עופרת - Lead](#).
- פאגוטון, מ'. (אפריל 2013). [הבהלה הניגרית לזהב והחיים האבודים](#).
- פרידלנדר, ב'. (מרץ 2005). [בטיחות בעבודה עם מצברי עופרת-חומצה](#).
- קסנר, מ'. (1993). עלייתו ונפילתו של ה-EDB. ב- הברום ותרכובותיו (עמ' 15-18). מכון ויצמן למדע- המחלקה להוראת המדעים.
- Bochynska, K. (2013). [Facts and Firsts of Lead](#).
- Casciani, B. n. (2014, april). [Did removing lead from petrol spark a decline in crime?](#)
- Emsley, J. (2005). *The Elements of Murder: A History of Poison*.
- Ganzel, B. (2007). [Oil vs. Ethanol](#).
- Gilbert, S., & Weiss, B. (2006). A rationale for lowering the blood lead action level from 10 to 2 µg/dL. *Neurotoxicology*, 693-701.
- Hamilton, A. (1910). "The Poisonous Occupations in Illinois": Physician Alice Hamilton Explores the "Dangerous Trades" at the Turn of the Century. Retrieved from history matters: <http://historymatters.gmu.edu/d/105/>
- irresistible-project. (n.d.). [Irresistible](#).
- lead. (n.d.). [Canadian enviromental health atlas](#).
- Nriagu, J. (1983). Saturnine Gout among Roman Aristocrats — Did Lead Poisoning Contribute to the Fall of the Empire? *the New England Journal of Medicine*, 660-663.
- patterson, C., & tatsumoto, m. (1963). Concentrations Of Common Lead In Some Atlantic And Mediterranean Waters And In Snow. *Nature*, 350-352.
- Stretesky, P. B., & Lynch, M. J. (2004). The relationship between lead and crime. *Journal of Health and*



פרטים המכילים עופרת