



גיליון מספר 35 | כתב העת למורי הכימיה
תמוז תש"ף | יוני 2020



המחלקה להוראת המדעים



מינהלת מל"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי
על-שם עמוס דה-שליט



המרכז הארצי
למורי הכימיה

משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף א' מדעים
הפיקוח על הוראת הכימיה





מינהלת מלי"מ
המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי
על-שם עמוס דה-שליט

משרד החינוך
המזכירות הפדגוגית
אגף א' מדעים
הפיקוח על הוראת הכימיה



עורכת אחראית: ד"ר דבורה קצביץ

dvora.katchevich@weizmann.ac.il

מערכת:

- ד"ר רחל ממלוק-נעמן, מנהלת המרכז הארצי למורי הכימיה, קבוצת הכימיה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע
- ד"ר דורית טייטלכאום, מפמ"ר כימיה, המזכירות הפדגוגית אגף א' מדעים
- פרופ' רון בלונדר, ראש קבוצת הכימיה, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

יעוץ מדעי: פרופ' גלעד הון

עריכה לשונית: ענבל גיל

גרסת אינטרנט: ד"ר שלי ליבנה

עריכה: אבי טל

עיצוב גרפי: ציפי עובדיה

כתובת המערכת: המרכז הארצי למורי הכימיה, מכון ויצמן למדע, רחובות 76100

תמונת השער: מאתר שטרסטוק - Shutterstock

איורים ותמונות המשולבים בעיתון זה נלקחו באישור מאתר שטרסטוק - Shutterstock

הפרויקט מבוצע עפ"י מכרז 09/07.13 עבור המזכירות הפדגוגית, משרד החינוך.

© כל הזכויות שמורות - משרד החינוך

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אלקטרוני, אופטי או מכני או אחר כל חלק שהוא מהחומר שבחבורת זו. שימוש מסחרי מכל סוג שהוא בחומר הכלול בחוברת זו אסור בהחלט אלא ברשות מפורשת בכתב מהמוציא לאור.

תוכן העניינים

3	דבר המערכת
4	דבר המפמ"ר - דורית טייטלבוים
6	150 שנה לגילוי חוק המחזוריות של היסודות - אליק גרויסמן
20	יש טבלאות מחזוריות אחרי מנדלייב... - מרים כרמי
23	כיצד נוצרו היסודות? - מרים כרמי
25	יסודות מתכלים - מרים כרמי
27	טלפון חכם - כימיה חכמה - דבורה קצביץ
32	תפקיד הפלואור בחיינו - שלמה רוזן
35	הגרסה העברית של שיר היסודות - אבי סאייג
38	חדר בריחה בנושא הטבלה המחזורית: עשו זאת בעצמכם - ורד אדלר, חגית לוי, ענבר חיימוביץ, שלי רפ ומלכה יאיון
43	פרס המורים המצטיינים לשנת 2019, החברה הישראלית לכימיה

דבר המערכת

גיליון 35 של כתב העת "על כימיה" שונה מהגיליונות הקודמים. כל הכתבות בגיליון עוסקות בנושא משותף, הוא הטבלה המחזורית.

מאז היווסדה ב-1869, עמדה הטבלה המחזורית במרכזם של דיונים רבים, והיא נחשבת כיום לאחד ההישגים החשובים והמשפיעים ביותר במדע המודרני. במלאת 150 שנה להיווסדה הכריז האו"ם על 2019 כשנה הבינלאומית של הטבלה המחזורית שפיתח לראשונה המדען הרוסי דמיטרי איבנוביץ' מנדלייב. הכרזת האו"ם מעלה את המודעות לכך שהכימיה יכולה לספק פתרונות לאתגרים גלובליים בתחומי החקלאות, החינוך, האנרגיה והבריאות.

הטבלה המחזורית אינה רק עיטור קיר ייצוגי בכיתות מדע בתיכון, אלא גם כלי עבודה עבור מדענים, אשר מאפשר להם להבין ואף לחזות את המאפיינים של כל היסודות.

במהלך שנה זו עסקו בתי הספר, מוסדות להשכלה גבוהה וארגונים רבים בנושא הטבלה המחזורית, ובחרנו אפוא לסכם את הנושא בגיליון מרכז.

הגיליון פותח בכתבת עומק של ד"ר **אליק גרויסמן**, אשר חקר רבות את עבודתו של מנדלייב ואת חוק המחזוריות שגילה. בכתבה פרטים הנוגעים לעבודתו של מנדלייב, לחייו הפרטיים ולתחביביו.

ד"ר **מרים כרמי** מתארת טבלאות מחזוריות נוספות על הטבלה של מנדלייב. כמו כן היא מסבירה כיצד נוצרו היסודות המופיעים בטבלה, כולל היסודות המלאכותיים. מרים מציינת היבט נוסף הנוגע ליסודות בעקבות השימוש של בני האדם בהם - יסודות מתכלים.

פרופ' **שלמה רוזן** בחר להרחיב על היסוד פלואור, שכן שילובו של פלואור בתרכובות אורגניות שונות נעשה נפוץ בזכות הקשר החזק שקיים בין פלואור לפחמן. אטום שפלואור משולב בתרופות רבות כמו פרוזק וסטטינים.

ד"ר **מלכה יאירן וצוותה** פיתחו לכבוד שנה זו חדר בריחה בנושא הטבלה המחזורית. בסדנאות חשיפה שערכו למורים בנו יחד איתם את חדר הבריחה, וכל מורה יצא עם ערכה מוכנה לבית ספרו.

ד"ר **אבי סייג** וצוותו ממכון דוידסון הפיקו סרטון של שיר היסודות בעברית. הסרטון סוקר את כל היסודות ומרחיב על אודות השימוש בהם.

לסיום, מורים אשר ערכו בבתי הספר פעילויות מעניינות, סיורים או כנסים, ורוצים לשתף את קהילת המורים, מוזמנים ליצור קשר עם המערכת בהקדם, כדי שנוכל לפרסם את הדברים בגיליון הבא.

מערכת "על-כימיה"





דבר המפמ"ר

ד"ר דורית טייטלבוים מנהלת תחום דעת כימיה, המזכירות הפדגוגית, משרד החינוך

מורים יקרים,

אנו חותמים את שנת הלימודים תש"ף לאחר שנה מאתגרת, בצל מגיפת הקורונה. אלו היו ימים מורכבים לכולנו. עבדנו קשה מאד, כל אחד בתחומו. המורים לימדו מרחוק, המדריכים הדריכו, יעצו, כיוונו, הכינו מתכונות לטובת המורים והתלמידים, ואנוכי, שליוויתי אתכם בשוטף, באתגרים המיוחדים, בהכנות לבחינת הבגרות ובהכנות לקראת שנת הלימודים הבאה. כולנו היינו אינסוף שעות וימים בזום, בווטסאפ, במיילים, בטלפונים, במוודל, ביוניקו, בגוגל קלאסרום ועוד ועוד. כולנו עבדנו ימים ולילות.

יישר כוח לכל אחת ואחד מכם המורים לכימיה!

ברצוני לשתף אתכם בכמה סיפורי הצלחה שהיו לנו השנה:

כנס הסיום של התכנית "יש לנו כימיה" התקיים השנה מרחוק, בזום. כ-1400 הצעות ראשוניות לביצוע פרויקטים הוגשו השנה. כ-120 תלמידים עלו לשלב הגמר והשתתפו עם מוריהם בכנס הסיום. בכנס השתתפו גם אנשי תעשייה, מדענים, חברי קבוצת הכימיה, במכון ייצמן למדע ומדריכי הכימיה. הכנס היה חגיגה אמיתית של שמחה והנאה.

תודה רבה לד"ר דבורה (דידי) מרצ'ק, מנהלת התכנית, ולצוות המוביל: אורית מולוויזון, דבורה ברוט, עירית רן, ד"ר מירי קסנר.

בחינת הבגרות המתוקשבת התקדמה השנה כמה צעדים משמעותיים קדימה. הסימולטור הכימי אשר פותח במט"ח עבור הבחינה המתוקשבת בכימיה הפך את חוויית הכתיבה בשפה כימית, בשרטוט גרפים, בחישובים סטויכיומטריים, בקביעת דרגות חמצון, בהצגת תהליכי חמצון חיזור ועוד, לחוויה המקלה מאד על התלמידים את ההיבחות במחשב. אני מקווה כי מספר הנבחנים בבחינת הבגרות המתוקשבת יעלה השנה ובע"ה גם בהמשך הדרך. אני סומכת עליכם המורים שתגלו עניין בבחינה המתוקשבת, שכן העתיד בנושא דרכי ההיבחות די ברור כיום - בחינות ארציות מקוונות.

תודה רבה למדריכות המובילות את ההשתלמויות והטמעה של הבחינה המתוקשבת עדינה שינפלד, ענת פלדנקרייז.

השנה, לראשונה מאז ומתמיד, הכנו שלוש בחינות מתכונות ארציות למורי הכימיה. המטרה הייתה לסייע לכם המורים בזמן המורכב של מגיפת הקורונה, לבצע בצורה מיטבית את בחינות המתכונות. המדריכים ואני עמלנו ימים רבים על כתיבת שלוש המתכונות. המשוברים שהתקבלו מכם חיממו את הלב. התודות וההערכה לעבודת המדריכים היו חשובים מאד. יש ביניכם מורים שביקשו כי גם בעתיד נמשיך בכיוון זה. עלינו לשקול זאת בכובד ראש מכמה סיבות. ההחלטה תיפול בהמשך ונעדכן כמובן.

תודה רבה לכל צוות המדריכים לכימיה.

השנה קיים כל אחד מהמדריכים סדרת **מפגשים מסוג "מדריך ומוריו"**, שלושה מפגשים פנים אל פנים ומפגש אחד מקוון, בתקופת הקורונה. אני מקווה שהשתתפתם במפגשים אלו. אם לא השתתפתם, אתם מוזמנים להגיע בשנה הבאה.

המפגשים נועדו לעדכן ולהתעדכן בנושאים שונים כגון: חוזר מפמ"ר, מעבדות חקר, מימונויות חקר, הכנת בחינת מתכונות משותפות בקבוצות קטנות, דיונים על תכנים של ההוראה ועוד. אם ברצונכם להשפיע על תוכן המפגשים אתם מוזמנים לשתף את המדריכים שלכם ברעיונות, והם יקדמו את הרעיונות שלכם במפגשי המדריכים שאנו מקיימים מעת לעת.

תודה רבה לכל צוות המדריכים לכימיה.

מיני מחקר רמה 3 צובר תאוצה ומורים נוספים השתלבו השנה בהוראה בתחום זה. הוראת החקר במיני מחקר הינה חוויה מסוג אחר. התלמידים בכיתה י"ב עסוקים במהלך כל השנה במחקר מעמיק בנושא מסוים שאותו הם בוחרים. הם לומדים את הרקע המדעי הרלוונטי, שואלים שתי שאלות חקר, מתכננים ניסויים, מבצעים אותם, מנתחים את התוצאות ומסיקים מסקנות. החוויה נצרכת אצל



התלמידים ופעמים רבות תהליך החקר משתלב בהווי המשפחתי של התלמידים. אתם מוזמנים לברר את הפרטים עם המדריכים. השנה קיימנו את הכנס הראשון בנושא מיני מחקר רמה 3. בכנס השתתפו כ- 60 מורים ומדריכים. תודה רבה לצוות המיני מחקר: יונת שמאי, עדינה שינפלד, ענת פלדנקרייז, שלומית וינטר. תודה מיוחדת לד"ר תהילה בן גיא, מנהלת חמד"ע, תל אביב, ולד"ר אלה ליבשיץ, רכזת הכימיה בחמד"ע, על אירוח הכנס הראשון. איחולי פרישה נעימה לתהילה, והצלחה רבה לאלה בכניסתה לתפקיד מנהלת חמד"ע, תל אביב.

הקלטות של שיעורי כימיה בכל הנושאים של תכנית הלימוד בהיקף 5 יח"ל. ההקלטות התקיימו באולפנים והם ישודרו במערכת השידורים הלאומית. מהלך זה החל בתקופת הקורונה, ביוזמת מנכ"ל משרד החינוך, מר שמואל אבואב. מורי כימיה התנדבו להקליט שיעורים בנושאי לימוד שונים על פי הסילבוס בהיקף 5 יח"ל. כל ההקלטות יעלו למערכת השידורים הלאומית. השידורים פתוחים לקהל הרחב: תלמידים, מורים, הורים, חובבי כימיה, נבחנים אקסטרנים ונבחני משנה ועוד ועוד.

אני רוצה להודות באופן אישי, לכל המורים שהתנדבו והתגייסו למהלך חשוב זה ולימדו בערבית ובעברית. תודות נוספות למדריכות לכימיה: ניהאל נאסר, עדינה שינפלד, רים סאבא, על הובלת וארגון המהלך.

פתיחת תכניות להסבת אקדמאים להוראת הכימיה. השנה מתקיימות שלוש תוכניות ייחודיות להסבת אקדמאים ותכנית אחת להרחבת הסמכה להוראת הכימיה בחטיבה העליונה. הסטודנטים נבחרו על פי התאמתם בשני ממדים: (1) לימודי התואר הראשון - התארים המתאימים הוגדרו **בחוזר מנכ"ל בנושא רישיונות הוראה בכימיה**, שפרסמנו לפני שנתיים; (2) מוטיבציה ומבחני קבלה.

אני מאמינה כי המוסכים ישתלבו בבתי הספר בהוראת הכימיה בחטיבה העליונה, יתקדמו ויצליחו בעבודתם. בהצלחה רבה למוסכים כולם!

אני רוצה להודות למדריכה פרידה טראב, ולצוותי ההוראה של המתודיקה והדידקטיקה בכימיה במוסדות האקדמיים בהן התקיימו השנה התוכניות:

אוניברסיטת בר אילן - איריס שנער, ערן שמואל, ד"ר צביה פונד.

סמינר הקיבוצים - ד"ר דנה שחייני, ד"ר רחל צימרוט.

אוניברסיטת אריאל - ד"ר ורדה כספי, יונת שמאי.

כימיה ברשת, התיכון הווירטואלי בכימיה שמטרתו בימים של שיגרה לאפשר לכל תלמיד בישראל ללמוד את מקצוע הכימיה בהיקף 5 יחידות לבגרות. בתקופת הקורונה, פורסמו כל המצגות בעזרתן מלמדים כימיה בתכנית. כמו כן, מדי יום ועד למועד בחינת הבגרות בכימיה, התקיימו שיעורים מקוונים מיוחדים שהיו פתוחים לכל תלמידי הכימיה בארץ. בשיעורים אלו השתתפו לאורך כל התקופה אלפי תלמידים.

אני רוצה להודות למדריכה אורית וינשטוק, לאנשי מכון דוידסון, מכון ויצמן למדע, על היוזמה והביצוע - ד"ר ירדן בן חורין, ד"ר מרב גבע, צוות המורים והמתרגלים.

תודה מיוחדת לאנשי משרד החינוך, אגף א' חינוך על-יסודי, המינהל הפדגוגי - דסי בארי, חנה הקסטר, תמר פיזנטי.

אני מאחלת לכולנו המשך עשייה טובה ופוריה בשנים הבאות!





150 שנה לגילוי חוק המחזוריות של היסודות

ד"ר אליק גרויסמן

"האמת היא אחת, אבל יש דרכים רבות למצוא אותה."

(דמיטרי מנדלייב, המוטיבציה של השיטה המדעית.)

ב-1899 ביוזמתו של מנדלייב. התקשרתי למנהל מוזיאון-ארכיון של מנדלייב פרופסור איגור דמיטרייב. אחרי פגישה איתו חשבתי מחדש על התגלית העיקרית בחייו של מנדלייב, הבנתי את אופיו המורכב של מנדלייב כמדען, כאדם, את יחסיו עם עמיתים, יחסיו ליהודים, את המיתוסים על אודותיו שקיימים בספרות ובאינטרנט. התרגשנו מאוד (עם אשתי אולגה, שגם סיימה את האוניברסיטה הכימית טכנולוגית על שמו של מנדלייב במוסקבה) לראות את מקום חייו ועבודתו של מנדלייב. זה היה השיא של הנסיעה שלנו לסנקט פטרסבורג במאי-יוני 2019. המצאות רבות, אוספי ספרים, מפות מצוירות ביד, דפי ניסויים ודיוקנאות של חברים ועמיתים הוצגו. פרופסור דמיטרייב הסב את תשומת ליבנו לעובדה שמנדלייב גילה את חוק המחזוריות ולא את הטבלה המחזורית. מדענים רבים לפני מנדלייב הציעו צורות שונות של

מבוא

שני אירועים היו משמעותיים במהלך כתיבת המאמר הזה. הראשון היה החניכה של האקדמיה הרוסית למדע והכרזה של אונסקי"ו (ארגון החינוך, המדע והתרבות של האו"ם) על השנה הבינלאומית של הטבלה המחזורית של יסודות כימיים (2019 IYPT). טקס הפתיחה התקיים בפריז ב-29 בינואר [1-3] 2019. האגודה הישראלית להנדסה כימית וכימאים ארגנה את הכנס בעברית ב-5 במרס 2019 בתל אביב [4]. כתב העת "על-כימיה" ביקש ממני לכתוב מאמר על תגליתו של מנדלייב. האירוע השני היה ביקורי בסנקט פטרסבורג, העיר שבה מנדלייב למד, עבד, חי וגילה את החוק המחזורי ב-1869. כשהמאמר היה כמעט מוכן, הגעתי לסנקט פטרסבורג שברוסיה כדי ללמד קורס קורוזיה באוניברסיטה הפוליטכנית על שם פיטר הגדול שנוסדה

* ד"ר אליק גרויסמן, הטכניון חיפה www.alecgroysman.com alecgroysman@gmail.com

כיצד גילה מנדלייב את חוק המחזוריות של היסודות הכימיים?

ב-1867, כאשר מנדלייב היה בן 33, הוא החל להרצות על כימיה אי-אורגנית לסטודנטים בקורס המבוא [11]. מנדלייב העביר את הקורס עד שעזב את האוניברסיטה בשנת 1890. בתוך כך היה עליו להמליץ על ספרי לימוד כימיה לסטודנטים, וכשלא מצא את הספר המתאים החליט לכתוב את ספרו "יסודות הכימיה" (Osнови Chimii - Основы Химии - Principles of Chemistry). במהלך עבודתו על ספר זה בשנים 1867-1871 גילה מנדלייב את חוק המחזוריות של היסודות הכימיים. שישים ושלושה יסודות כימיים היו ידועים עד אז, ונרכש די ידע על היסודות הכימיים, על המאפיינים שלהם ועל היישומים שלהם. בכל סיטואציה מדעית, הצטברות של נתונים חדשים מצריכה סיווג, וכך קרה עם היסודות הכימיים. נקדיש רגע לזכור את שמות המדענים ואת תרומתם למיון היסודות כימיים (טבלה 1).

האם ידע מנדלייב על כל קודמיו? נראה כי ידע לפחות על חלקם, שכן התייחס אליהם בעבודתו. למנדלייב לא היה ידע על מבנה האטום. המודל הפלנטרי של האטום שהציג ארנסט רתרפורד



איור 2. השער של הספר "עקרונות הכימיה" שכתב מנדלייב, 1869

טבלאות הכוללות את היסודות הכימיים. לכן הכותרת שהוכרזה על ידי אונסק"ו אינה ממש נכונה. פרופסור דמיטרייב שלח לי את כל פרסומיו הרבים (רובם ברוסית) ותמונות הקשורות למנדלייב. קריאת מאמריו [16-5] עזרה לי לכתוב מאמר זה בצורה חדשה. בתוך כך ניתחתי פרסומים רבים באנגלית, ברוסית ובעברית. עכשיו אני מזמין אתכם להיסטוריה המדהימה של גילוי חוק המחזוריות של היסודות הכימיים על ידי מנדלייב.

סיפור אישי

כאשר נכנסתי בפעם הראשונה לכיתה לימוד הכימיה בבית הספר בגיל ארבע-עשרה, נדהמתי מהטבלה הצבעונית שהתנוססה על קיר הכיתה. ולצידה התבונן אליי איש עם זקן (ראו איור מס' 1). הייתי בטוח שזהו משה רבנו אשר הוביל את עם ישראל לארץ כנען, מסיפורי הסבתא פרימה שלי. הוא הסתכל עליי כל שיעור כימיה. זה היה דמיטרי מנדלייב אשר "דיבר" איתי כל השיעור. כך נוצר "קשר כימי הדוק", ולאחר ארבע שנים התקבלתי לאוניברסיטה לטכנולוגיה כימית על שמו מנדלייב במוסקבה. בכניסה הביטו בי אותן פנים, והכיתוב: "זריעה מדעית תגדיל את הקציר הלאומי". אלו היו מילות הפרידה של מנדלייב לכל אדם שמתחיל ללמוד כימיה.

למדתי על איזוטופים, איך להפריד ולייצר אותם. בסוף הלימודים, ב-1973, רשמתי פטנט על ייצור האיזוטופ ^{48}Ca בשיטה חדשה של אמלגמה-כרומוטוגרפית [17]. איזוטופ זה "משחק" תפקיד חשוב בייצור וגילוי של יסודות על-כבדים "אחרונים" 113-118 בטבלה מחזורית של מנדלייב. זה היה פרויקט של המדען הרוסי גיאורגי פליוורוב לסינתזת יסודות על-כבדים. היסוד מספר 114 שייצרו לראשונה ב-1998 על ידי הפצצת ^{244}Pu באיזוטופים של ^{48}Ca בעיר דובנה שברוסיה קיבל את שמו, "פלורוביום" [18, 19].

בשנת 1969 השתתפתי בחגיגות "100 שנה לחוק המחזוריות של מנדלייב". השנה אנו חוגגים 150 שנה. מה השתנה?

האירוע הזה הוא באמת יוצא דופן וממשי. אנחנו חוזרים שוב ושוב לגילוי של מנדלייב לפני 150 שנה, אשר נתן את הבנת המחזוריות של תכונות ואפשרות חיזוי של יסודות כימיים חדשים.



איור 1. דימטרי מנדלייב (1869), השנה שגילה את חוק המחזוריות

טבלה 1. צעדים היסטוריים במיון יסודות כימיים

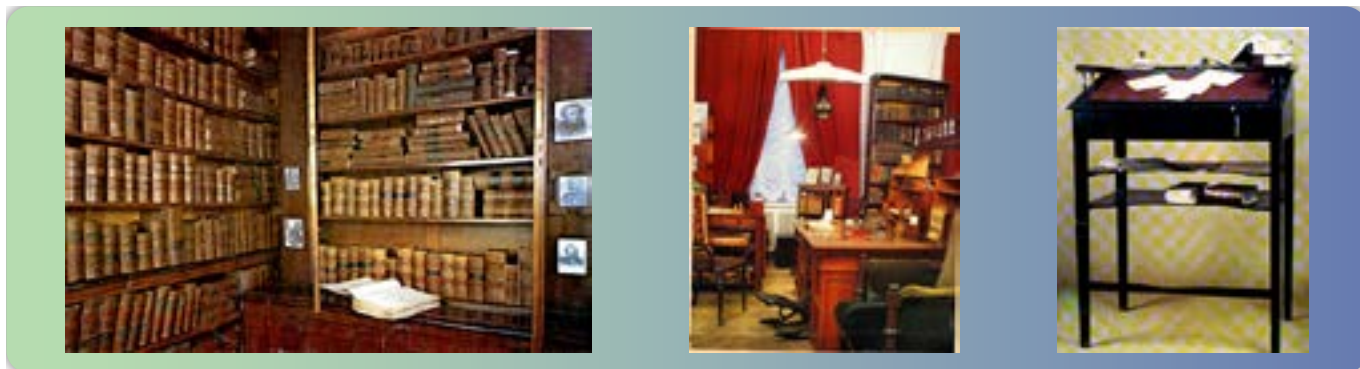
התורם	שנה	תרומה
אנטואן-לורן דה לבואזיה (1743-1794)	1789	יצר רשימה של 33 יסודות כימיים שהיו ידועים באותה עת וקיבץ אותם לגזים, מתכות, אל-מתכות ונמצאים באדמה [20, 21].
ג'ון דלטון (1766-1844)	1803, 1808, 1827	חישב את המשקל* היחסי הראשון של האטומים [22].
יוהאן וולפגנג דוברינר (1780-1849)	1817, 1829	סיווג את היסודות לשלוש - חוק השלוש [20, 22].
לאופולד גמלין (1788-1853)	1827, 1843	יצר קשרים מעבר לשלושיות [22, 23]
פול קרמר	1852, 1858	השווה בין יסודות בשני כיוונים: אופקי ואנכי [20, 21].
ג'ון האל גלדסטון (1827-1902)	1853	סידר את כל היסודות הידועים לפי משקלם האטומי [24, 25].
ג'וסאיה פרסונס קוק (1827-1894)	1854	מאמרו על משקל אטומי היה המבשר לחוק המחזוריות שגילה מנדלייב [26, 27].
ארנסט לנסן	1857	ניסה להבהיר את המשקלים האטומיים הממוצעים או את ה"שלוש" [21, 22, 28].
מקס יוזף פון פטנקופר (1818-1901)	1858	דחה את תיאוריית ה"שלוש" והרחיב את הקשר בין היסודות לקבוצות גדולות יותר. את עבודותיו ציטט מנדלייב בבניית הטבלה המחזורית של היסודות [26, 29, 30].
ז'אן-באפטיסט אנדרה דומא (1800-1884)	1857, 1859	התרחק מרעיון ה"שלוש" והתמקד במקום במציאת מערכת של משוואות מתמטיות שיכולות להסביר את העלייה במשקל אטומי בקרב כמה קבוצות של יסודות דומים כימית [20, 21, 26].
אדולף שטרקר (1822-1871)	1859	מצא את הדימיון בין היסודות שנמצאים בקבוצת הברזל [31].
ויליאם אודלינג (1829-1921)	1857, 1864-1865	הכין טבלה שהיתה דומה להפליא לטבלה שהפיק מנדלייב [32, 33].
אלכסנדר-אמיל בגויה דה שנקורטואה (1820-1886)	1862	סיווג את היסודות לפי העלייה במשקלים האטומיים שלהם (ספירלה סביב גליל - 'בורג טלוריק') [33, 34].
ג'ון אלכסנדר ריינה ניולנדס (1837-1898)	1863-1865	גילה את המחזוריות בצורת "חוק האוקטבות" (מכיוון שתכונות היסודות חזרו על כל יסוד שמיני, כמו תווי הסולם המוזיקלי) [26]. הוא לא השתמש במונח "מחזוריות" [16].
גוסטבוס דטלף הינריכס (1836-1923)	1855, 1867	לטבלה שלו הייתה צורה של ספירלה והיסודות סודרו בה בהתאם למשקלם האטומי [35, 36].
ג'וליוס לותר מאייר (1830-1895)	1864, 1869 (דצמבר)	סיווג 28 יסודות לשש משפחות לפי הערכיות שלהם [37]. בשנת 1869, כמה חודשים לאחר מנדלייב, פרסם מאייר גרסה מתוקנת ומורחבת של הטבלה שלו משנת 1864, שהיתה דומה לזו שפרסם מנדלייב** [37].
דמיטרי אייונוביץ' מנדלייב (1834-1907)	1869	הודיע על תגליתו שלפיה, "תכונות היסודות הן תכונה מחזורית של משקלם האטומי" [11, 16, 26]. היתרון בטבלה של מנדלייב על פני ניסיונות קודמים היה בכך שהיא הציגה דמיון לא רק ביחידות קטנות כמו השלוש, אלא הראתה קווי דמיון ומחזוריות ברשת שלמה של מערכות יחסים אנכיות, אופקיות ואלכסוניות.

* המושג המקובל היום הוא "מסה אטומית", אך נתייחס למושג בטרמינולוגיה הנהוגה בנקודת מבט היסטורית.

** מנדלייב שלח את הטבלה שלו לרבים מהכימאים שהיו ידועים בימיו, ובהם גם מאייר, כנראה. אין מידע אמין שלפיו הגיליון עם ההסבר לטבלה נשלח למייר. מאייר ראה רק את התקציר הגרמני למאמרו הראשון של מנדלייב על חוק המחזוריות. (פורסם ב: Zeitschrift Fur Chemie, N. F., 1869. Bd. 5. S. 405-406). בשנת 1882 קיבלו גם מאייר וגם מנדלייב את מדליית דיווי מידי החברה המלכותית באנגליה, כהוקרה על עבודתם בנושא חוק המחזוריות.

ו"גוף פשוט". יסוד יכול להתקיים בטבע בצורות שונות. לדוגמה, היסוד פחמן יכול להתקיים בצורת גופים פשוטים, כמו יהלום, גרפיט וכו'. מנדלייב סיווג את היסודות ולא את הגופים הפשוטים [5, 15]. באמצעות דוגמת היסודות הקלים (עם משקלים אטומיים מ-1 עד 40) מנדלייב השתכנע לא רק כי התכונות של היסודות "מתבטאות... במשקלם האטומיים", אלא גם בעובדה שכאשר היסודות מסודרים בסדר עולה של משקלם האטומי, נצפתה "מחזוריות של תכונות". כך גילה מנדלייב את חוק המחזוריות. בתחילת 1869 פרסם אפוא את מאמרו, "ניסיון של מערכת

ומודל האטום על פי נילס בוהר הופיעו 42 שנים לאחר גילוי של מנדלייב. ב-1913 הוציע הנרי מוזלי את העיקרון המארגן של הטבלה המחזורית הכוללת את היסודות הכימיים לפי מספר אטומי (שווה למטען גרעיני) במקום משקלים אטומיים, וכך הוסברו חריגות בטבלה המחזורית (לדוגמה: Te - I, Ni - Co). נתקדם לפי דרך חשיבתו של מנדלייב שהובילה אותו לגילוי חוק המחזוריות. הרעיון הבסיסי הראשון שמנדלייב הסתמך עליו היה קשור להשפעת מסת הגוף על התכונות הפיזיקו-כימיות שלו. נוסף על כך, מנדלייב הבין את הצורך להבדיל בין המושגים "יסוד"



איור 3. שולחנות עבודה במשרדו של מנדלייב וכן הסיפריה בחדרו

העיקריים של המדע בסוף המאה ה-19 עד ראשית המאה ה-20. הוא דחה את המחשבה המדעית של אותה תקופה כי "מבולבל ביונים ובאלקטרונים" [16]. גילוי חוק המחזוריות לא היה תהליך פשוט. ראשית, חלק מהמידע שנגע למשקלים האטומיים היה לא מדויק. שנית, הייתה סתירה בין משקלים אטומיים של יסודות לבין הסדר של שלושת הזוגות של יסודות (לדוגמה: Te - I). שלישית, נדרש הסבר לגורמים הפיזיים של המחזוריות מאחר שתכונות היסודות היו תלויות מעת לעת במשקלים האטומיים שלהם, מנדלייב ניסה להבין את טבע "המשקל האטומי" ואת תכונות המדיום המשדר את הכבידה, דהיינו את "האתר היקומי" ("Universal ether"). לדברי מנדלייב, אחת הדרכים להוכיח את קיומו של "אתר" יכולה להיות מחקר של גזים בלחצים נמוכים מאוד (rarefied gases). הוא אף חשב שהאתר הוא היסוד הקל ביותר, והיה צריך להופיע לפני המימן בטבלה המחזורית (ראו איור 4).

גילוי חוק המחזוריות לא הוכר מיידית על ידי הקהילה המדעית. אחת הסיבות לכך הייתה כי סיווג היסודות הכימיים לא נחשב לבעיה עיקרית, ולכן נתפס כלא ראוי לתשומת לב מדעית רצינית. כך, למשל, הנשיא הראשון של האגודה הכימית הרוסית, פרופסור ניקולאי זינין (1812-1880) אמר לאחר דיווחו של מנשוטקין שנזכר לעיל: "דמיטרי איונוביץ', הגיע הזמן להתחיל לעבוד" [16].

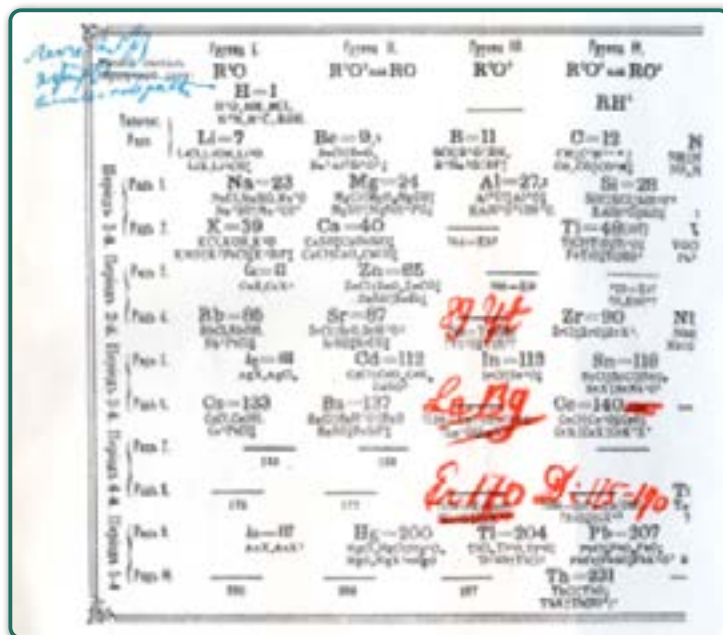
ואכן אנו יודעים כי תגליות במדע לא תמיד מתקבלות מייד. לפעמים נדרשות עשרות שנים כדי שמדענים יבינו ויעריכו תגלית כלשהי. דוגמה לכך היא הקוואזי-גבישים שגילה פרופסור דן שכטמן לראשונה ב-1982 ופרס הנובל שניתן לו רק ב-2011, כעבור 29 שנה! מנדלייב היה בר מזל, ותגליתו קיבלה הכרה לאחר שנים ספורות. יחסם של המדענים לטבלה המחזורית החל להשתנות רק עם גילוי היסודות הכימיים שחזה מנדלייב.

יסודות המבוססת על המשקל האטומי שלהם והדמיון הכימי".

יום גילוי חוק המחזוריות (17 בפברואר 1869)

(התאריכים הקשורים לרוסיה של המאה התשע-עשרה עד תחילת המאה העשרים מובאים בסגנון הישן. אפשר להוסיף 13 יום על מנת לקבל את התאריך המודרני.)

מנדלייב השתמש בְיומן ושמר אותו. לכן אנו יודעים היום הרבה מהשיקולים וההערות שליוו את עבודתו. הוא עבד כל היום על אֶסוֹף (טבלה) "ניסיון של מערכת היסודות" ("Attempt of the System of Elements"). בערב הזה שלח עותק של הטבלה המעודכנת לבית הדפוס. ב-20 בפברואר הוא עבד על מאמרו "יחסי תכונות עם משקל אטומי של יסודות" המכיל את הרעיונות הראשונים של התיאוריה של המחזוריות. בהמשך מסר את מאמרו לעמיתו ניקולאי מנשוטקין (1842-1907); אתם בוודאי זוכרים את התגובה בכימיה אורגנית הנקראת על שמו) לצורך פרסום ב"יומן של האגודה הרוסית לכימיה" ולצורך דיווח על התקדמותו בפגישה הקרובה של האגודה. ב-1 במרס 1869 שלח מנדלייב את דפי "הניסיון" לכימאים רבים ברוסיה ומחוץ לה. ב-6 במרס, דיווח מנשוטקין מטעם מנדלייב על "הניסיון של מערכת היסודות" בישיבה של האגודה הרוסית לכימיה [5]. היה זה מקרה חסר תקדים. מנדלייב ביקש מחברו להעביר את ההודעה הציבורית הראשונה על חוק המחזוריות בקרב קהל מקצועי של עמיתים כימאים. באותו זמן, הוא עזב את סנקט פטרסבורג ונסע לערוך בדיקות במפעלים לייצור גבינה. מדוע? אין הסבר. אנו יכולים רק לנחש. ההיסטוריה של גילוי חוק המחזוריות ויצירת המערכת המחזורית של היסודות הכימיים הינה רבת פנים ועדיין משמשת נושא לדיון בקרב מומחים [5, 15]. מנדלייב לא האמין בתיאוריה האטומית, וזה היה הפרדוקס העיקרי בתגליתו. עובדה זו מנעה ממנו לקבל את הגילוי של רדיואקטיביות, אלקטרונים ומההישגים



איור 4. דף מתוך העותק האישי של מנדלייב של "Natural System of Chemical Elements" עם הערותיו. בפינה השמאלית העליונה מול סמל המימן ישנו תיעוד של ה- "Universal ether"

מי היה מנדלייב?

דמיטרי אייונוביץ' מנדלייב נולד ב-27 בינואר 1834, הילד האחרון אחרי שישה-עשר ילדים במשפחתו. אביו היה איבן פבלוביץ' מנדלייב (1783-1847), מנהל הגימנסיה הקלאסית בעיר טובולסק (סיביר, רוסיה). אימו, מריה דמיטרייבנה לבית קורנילייבה (1793-1850), היתה בת למשפחת סוחרים מפורסמת בסיביר. דמיטרי לא היה תלמיד טוב, ובעיקר התקשה בלימודי הלטינית והגרמנית. הוא סיים את הגימנסיה ב-1849. אימו לקחה אותו למוסקבה ואחר כך לסנקט פטרסבורג. מאחר שמנדלייב הצעיר לא הרגיש עדיין שיש לו ייעוד מסוים, הוא חיפש אוניברסיטה מתאימה לפי שאיפות אימו, שהתעניינה בעיקר בחדשנות של המוסד הלימודי [5]. בסופו של דבר, ולא בנקל, הפך מנדלייב לסטודנט מן המניין במכון הפדגוגי הראשי בסנקט פטרסבורג. אימו נפטרה בספטמבר 1850, ומנדלייב נשאר לבד. הוא ידע שיכול לסמוך רק לעצמו.

למנדלייב היו יכולות טבעיות ונטייה חזקה למדעי הטבע, בעל סמפרנט ופינוק שנבע מההרגל לעשות רק מה שרצה ומה שמעניין בעיניו [10].

התכונה החשובה ביותר של מנדלייב ביחס ללימודיו באוניברסיטה היא היותו פולימאת, כלומר אדם בעל יכולת יוצאת דופן המתבטאת בין היתר ברבגוניות. עבודותיו של מנדלייב מכסות את הספקטרום הרחב ביותר: החל באווירונאוטיקה וחישוב הצורה האופטימלית של שובר קרח, דרך תיאוריה של תנודות משקולות, ועד עבודותיו הכימיות, הפיזיקו-כימיות והכימיות-טכנולוגיות [5]. התכונה השנייה של מנדלייב הנוגעת לסגנון המדעי היתה

התמקדותו בבעיות גלובליות מדעיות הקשות ביותר בעולם. מנדלייב היה פילוסוף טבעי (natural philosopher), שכן בעיניו להגיע למטרה לא היה הדבר החשוב ביותר, אלא לראות כמה שיותר בדרך.

ב-1859 יצא מנדלייב לשנתיים התמחות באוניברסיטת היידלברג בגרמניה (שעבדו בה מדענים מפורסמים, כמו רוברט בוזן, גוסטב קירכהוף ואמיל ארלנמאייר). במעבדה של בוזן מנדלייב לא היה יכול לעבוד בגלל הריח הרע של הגופרית, ולעומת זאת באותם זמנים נהג לטייל עם המלחין לימים והכימאי אלכסנדר בורודין ועם הפיזיולוג איבן סצ'נוב, והשתתף בכינוס הבינלאומי הראשון לכימיה בקרלסרוהה, גרמניה. ב-1861 חזר לסנקט פטרסבורג והקדיש הרבה מזמנו בהוראה בחמישה מכונים חינוכיים שונים. הדעות על מנדלייב כמרצה ומורה בקרב בני זמנו היו מגוונות, ועם זאת אפשר להעיד כי תמיד נכחו בשיעוריו תלמידים רבים [5].

בשנת 1865, לאחר הגנה מוצלחת על התזה בדוקטורט שלו, "על תערובות של אלכוהול עם מים", קיבל מנדלייב את התואר פרופסור לכימיה באוניברסיטת סנקט פטרסבורג. במהלך תקופה זו באחוזת בולובו שרכש ב-1865 (במחוז מוסקבה), ערך מחקרים באגרוכימיה ובחקלאות. העניין של מנדלייב בבעיות החקלאות היה עמוק כל כך עד שלא נחלש אף במהלך התפתחות תיאוריית מחזוריות היסודות הכימיים. מנדלייב היה נטורליסט מלומד וכלכלן מעמיק [9]. עבודתו של מנדלייב מתפלגת לתחומי הידע הבאים [16]: כימיה (29%), תעשייה (17%), כלכלה (14%), מטרולוגיה (11%), ניווט אווירי (9%), חקלאות (7%), פיזיקה (5%) ואחרים (8%). פעילותו כללה:



איור 5. פסלו של מנדלייב מוצב ליד הטבלה המחזורית (על הקיר) במוסד הרוסי למטלורגיה. הפסל גינצבורג הינו ידו של מנדלייב

בנוגע למקור השם מנדלייב, ובניהן אף הסברה שהוא צאצא של משפחת מנדל, או שסבו היה יהודי שהוטבל. אך בפועל, אביו של מנדלייב, איבן פבלוביץ', היה בנו של כומר רוסי בשם פאבל מקסימוביץ' סוקולוב. לפי המנהג של אותה תקופה, ארבעת בניו של האיש קיבלו שמות משפחה שונים. איבן פבלוביץ' קיבל את שמו של השכן בעל הקרקעות, מנדלייב [5]. אם לא כן, היה עלינו לכתוב את הטבלה המחזורית בשם "הטבלה של סוקולוב".

2. הטבלה המחזורית נראתה למנדלייב בחלום כמו השראה במהלך השינה: ראשית, מידע זה נמסר בפעם הראשונה על ידי עמיתו וידידו של מנדלייב, הגיאולוג הרוסי אלכסנדר אלכסנדרוביץ' אינוסטרנצב (1843-1919), בזיכרונותיו כפי שסיפר אותם כשהיה בן 76, כלומר, 50 שנה לאחר האירועים. שנית, מנדלייב, שאהב לספר סיפורים משעשעים מחייו, מעולם לא הזכיר את החלום הנפלא הזה. שלישית, הרישומים של המערכת המחזורית של היסודות שהגיעו אלינו אינם מאפשרים לנו לחשוף את ההשפעה של תובנה פתאומית. אינוסטרנצב סיפר עוד כי למנדלייב היה הרגל לשמור כל מה שכתב, כל דבר קטן, והוא ארגן בעצמו את הארכיון שלו. והנה, משום מה, מכל החומרים שהיו קשורים להיסטוריה של המערכת המחזורית, הציל מנדלייב רק חמישה דפים בכתב ידו [16].

3. מנדלייב הוא היוצר של הוודקה הרוסית: בשנת 1865 הגן מנדלייב על התזה בדוקטורט שלו, "על תערובות של אלכוהול עם מים". העבודה הוקדשה לחקר הצפיפות של תמיסות מים ואלכוהול, כתלות בריכוז ובטמפרטורה. נסיבות אלה היו הבסיס לאגדה שלפיה "מנדלייב הפך ליוצר של הוודקה הרוסית 40 מעלות" [39]. והנה, גם בפתקי העבודה של מנדלייב וגם בעבודת הדוקטורט עצמה לא מופיע אף לא רמז אחד לכך שהוא התעניין בתמיסות של אלכוהול במים שלפחות מתקרבות לריכוז של "הוודקה האידיאלית" (33.4% משקלי; כלומר 40° לפי

- בחינת הגורמים למשבר בתעשיית הפחם והנפט הגולמי.
- השתתפות בעבודה על עדכון תעריף המכס.
- יצירת אבקה ללא עשן (לצרכים צבאיים).
- הדפסים מחדש של "יסודות הכימיה" המתוקנים (שמונה מהדורות ראו עד 1906).
- השתתפות בפרויקט "שובר קרח".
- השתתפות במשלחת לאוראל (רוסיה) במטרה לשפר את תעשיית המתכות (תעשייה מטלורגית).
- הצעה לנקוט אמצעים של שימוש נרחב יותר בנפט גולמי, במוצרי נפט וייצור תרכובות יקרות ערך.
- בזמנו, כ-75% מהנפט נשרף כדלק. הביטוי המפורסם שלו, "אפשר לשרוף שטרות" [38] נחשב לאקטואלי גם היום.
- חיפוש עתודות נפט באזור באקו (הים הכספי); התנגד למס על נפט ותמך בבניית קו הנפט הטרנסקווקאזי.

מנדלייב סבר כי, "התפתחותה של החברה אפשרית רק באמצעות התקדמות התעשייה, המדע והחינוך". הוא היה חדור מטרה בהקשר של רעיון תיעושה של רוסיה האגררית. את מרב מרצו השקיע מנדלייב ביישום רעיונותיו. אחד המתנגדים העיקריים שקמו לו היה הסופר הרוסי לב טולסטוי, אשר ברומנים שלו תיאר רכבת כ"סמל לרע".

כאזרח ישראלי אני רוצה לציין את יחסו של מנדלייב ליהודים, כפי שבא לידי ביטוי בדבריו: "יהודים הם יהירים ובטוחים בעצמם". הוא הציע להם להתבולל ברוסיה, ונראה שהיה "אנטישמי מביתו". ועם זאת הדבר לא הפריע לו להתיידד עם פסל יהודי בשם גינצבורג שהקים פסל מעניין של מנדלייב העומד בסנקט פטרסבורג עד היום (ראו איור מס' 5) [9]. ראוי לציין כי הרעיון האנטישמי של מנדלייב היה גם נחלת רוב ההנהגה הסובייטית.

מיתוסים על מנדלייב

באחרונה קראתי הרבה על מנדלייב ונתקלתי בסיפורים משעשעים עליו ועל חייו. כמה מהם הותירו בי רושם, כמו העובדה שהוא נהג לייצר מזוודות ואפילו מכר אותן; שיחק סולייטיר; כתב את כל 63 היסודות הכימיים על כרטיסים אשר עזרו לו לגבש את חוק המחזוריות; גילה את החוק בזמן שינה; יצר את הוודקה הרוסית; עסק בריגול תעשייתי באמריקה ובצרפת; והיה בן למשפחה של יהודים מוטבלים. כל כך הרבה אגדות על מדען אחד! רק הפגישה עם פרופסור איגור דמיטרייב ביוני 2019 וקריאת מסמכים מפורטים ומאמרים אנליטיים עמוקים שכתב, אפשרו לי להבין דברים, לחדד הבנות ולפזר כמה מהמיתוסים הנוגעים למנדלייב. להלן כמה מההסברים החשובים הנוגעים לכמה מהמיתוסים הללו.

1. מקור שם המשפחה מנדלייב: קיימות כמה וכמה גרסאות

הדו"ח השנתי של חברת הרכבת על תנועת הסחורה, ומצא את היחס הנכון של החומרים הכלולים בייצור אבק שריפה". ואולם בזיכרונותיו של הבן מופיעים אי-דיוקים רבים. מיומנו של מנדלייב ומכתביו עולה תמונה ברורה שלפיה הוא לא עסק בנתונים סטטיסטיים כלשהם הנוגעים לרכבת כדי לזהות את סודות אבק השריפה בצרפת. כל זה מטיל ספק על עדות בנו של מנדלייב, אשר ב-1890 היה בן שש בלבד. המסקנה של מנדלייב הייתה ברורה: "אף אחד מהסוגים המוכרים של אבק שריפה חסרת עשן לא עמד בכל הדרישות לשימוש" [7].

הוזה והרהורים על עתיד הטבלה המחזורית

"נראה שהעתיד אינו מאיים על חוק המחזוריות אלא מבטיח התפתחות וארגון נוסף".
(מנדלייב, 1905).

עוד בתקופת חייו של מנדלייב, יחס עמיתיו לחוק המחזוריות היה מגוון. חלק מהמדענים ראו בכך חוק יסוד של הטבע. אחרים (קקולה, בונזן, ברתלוט) היו ספקנים לגבי גילויו של מנדלייב. הרעיון המרכזי של מנדלייב היה לפתח את הידע הקיים על מחזוריות. הוא ראה במשקל האטומי כתכונה העיקרית של היסודות, ועם זאת, הוא ניחש כי יש להחליף קובלט וניקל, יוד וטלוריום - בהתאם לאופי השינוי בתכונותיהם, והפער בשינוי במשקלים האטומיים נחשב לאנומליה [45].

בתחילת המאה העשרים הופיע רעיון חדש - על המחזוריות בשל המבנה האלקטרוני של אטומים. בשנות העשרים של המאה העשרים הושגה הבנה מעמיקה יותר של חוק המחזוריות וקשריו ברמות האלקטרוניות של האטומים. בשנות השמונים התבררה לבסוף התיאוריה על אודות המבנה הכימי של החומר, אשר בסיסו נקבע לפי היבטים בטבלה המחזורית.

אנו מדברים על אירוע חשוב ויוצא דופן [19], המתרחש רק לעיתים רחוקות: גילוי שנעשה לפני 150 שנה הרלבנטי עד ימינו. המרכזים הגרעיניים הגדולים ביותר של רוסיה, ארצות הברית, גרמניה, יפן, צרפת וסין כוללים בתוכניות העיקריות שלהם את הסינתזה ואת המחקר של היסודות הכימיים החדשים, בדיון בגבולות הטבלה המחזורית ובגבולות תחולתו של חוק המחזוריות. בהקשר זה חשוב להתעכב על הרעיונות המרכזיים של פרופסור יורי אוגאנסיאן (שעל שמו נקרא יסוד מספר 118) כפי שבאו לידי ביטוי בריאיון שנערך עימו על הממצאים מחקר תכונותיהם של יסודות על-כבדים ועל החזון שלו בעבודתו העתידית הנוגעת למפעל יסודות על-כבדים, וכן בהרצאתו באונסק"ו ב-29 בינואר 2019 [2, 19].

נפח). מנדלייב התעניין בטווחים שונים לחלוטין של ריכוז, מעל 40% משקלי, ואלה היו במוקד תשומת ליבו, ובהתאם בוצעו רוב המדידות והחישובים שלו [5, 6, 14, 40]. מנדלייב גילה כי תמיסה עם ריכוז אלכוהול של כ-46% משקלי הייתה דחוסה ביותר. 40° נפחי, כמו הגבול התחתון של כוח וודקה (מבוסס על המלצתו של המדען הרוסי הס אבל לא על ידי מנדלייב!) הוצג על ידי ממשלת רוסיה ב-1866 [6].

4.1. מנדלייב היה מרגל תעשייתי רוסי: ב-1876 נשלח מנדלייב לארצות הברית כדי לבצע "משימה עדינה של ריגול תעשייתי" על מנת לגלות סוד של חידושים טכנולוגיים בתעשיית הנפט [41-44]. והנה, בקריאת בספרות שצינתי, נראה שהרושם ההפוך הוא כי מנדלייב השתמש רק במקורות רשמיים ובנתונים שקיבל מהבעלים של מפעלי הנפט האמריקניים.

בשנות השבעים של המאה התשע-עשרה, הנפט טרם זכה לערכים האסטרטגיים הצבאיים שקיבל במאה העשרים. מכל מקום, נשאלת השאלה, מדוע נשלח מנדלייב לארצות הברית ב-1876? ובכן, בשנים 1874-1875 פרץ משבר הנפט ברוסיה. מחירי הנפט והקרוסין ירדו, המפעלים החלו להיסגר בעשרות, ועלה צורך להבין את הסיבות למשבר. משרד האוצר הרוסי שלח את מנדלייב לקבל מידע על מצב תעשיית הנפט באמריקה. עם שובו ממסע העסקים הציג מנדלייב דו"ח מפורט לשר האוצר ופרסם את הספר "תעשיית הנפט במדינת צפון פנסילבניה ובקווקז". מנדלייב כתב שהאמריקאים סיפקו בחפץ לב את המידע הדרוש, והוא השתמש רק במקורות רשמיים [7]. המסקנה של מנדלייב הייתה כי למשבר הנפט באמריקה הייתה סיבה כלכלית: עודף היצע ("יצור) על פני הביקוש.

בדיוק ב-1876, המדען האמריקאי ג'וסיה וילארד גיבס פרסם באמריקה את מאמרו המפורסם, 376 עמודים על "אנרגיה חופשית" שאפשרה לפתור את בעיית הזיקה הכימית תיאורטית ולחשב כיוון של תגובות כימיות ספונטניות. אילו פגש מנדלייב את גיבס באותה שנה באוניברסיטת ייל באמריקה, אני סבור שהמדענים הרוסים ידעו על התרמודינמיקה הכימית קודם לכן.

4.2. יחד עם גניבת סודות הנפט האמריקניים, מנדלייב חשף עוד סוד חשוב של הפקת אבקה חסרת עשן [42]:

אבקה חסרת עשן הומצאה באמריקה רק ב-1895, עשרים שנה לאחר ביקורו של מנדלייב. ומנדלייב היה מעורב במחקר על אבקה ללא עשן רק ב-1890, השנה שבה נסע לאנגליה ולצרפת בשל העיסוק באבקה ללא עשן. שם קיבל מנדלייב בצורה רשמית את הדגימות הדרושות ואת הרכב האבקה ללא עשן, לרבות מידע על אופן הייצור שלה. נשאלת השאלה, מאין הגיעה השמועה? בזיכרונותיו של בנו של מנדלייב (איבן דמיטריביץ'), שנכתבו עשרים שנה לאחר מות אביו, נאמר כי "אבא לקח את

אוגאנסיאן מצוין עוד כי היו ניסיונות רבים לייצג באופן גרפי צורות שונות (מעל 400!) של הטבלה המחזורית [47, 48]. כך לדבריו זהו עניין של "עיצוב" הטבלה, ואילו את המהות שלה - את המחזוריות של מאפייני היסודות הכימיים - איש לא הצליח לשנות באופן יסודי [45, 49].

מדוע אנו צריכים להמשיך למלא את הטבלה המחזורית? פרופסור אוגאנסיאן משיב כי "אנו בוחנים ובכך לומדים את חוק הטבע שגילה מנדלייב לפני 150 שנה. אנו כבר מרגישים שהתקרבו לרגע שבו חוק זה מתחיל להשתנות, ולהשתנות במהירות. ידעת כל שינוי בחוקי הטבע (למשל, המחזוריות של תכונות היסודות הכימיים) היא מהותית" [19]. אני יכול רק להוסיף כי זו גם דרך להכיר את היקום שלנו.

מנדלייב, טבלה מחזורית ואומנות

"לאומנות ולמדעי הטבע שורשים משותפים,

חוקי התפתחות כלליים, משימות ומטרות

זהות". (מנדלייב, 1880).

ישנו קשר כמעט ישיר, ומעניין, בין מדע ואומנות, בין מדענים ואומנים. אומנות מפתחת דמיון, יצירתיות, מחשבות לא טריוויאליות, אנלוגיות וניגודים, מערכות סמלים, סימטריה ואסימטריה, הייררכיות, ועוד דברים רבים שמדענים יכולים להשתמש בהם לעבודה פורייה.

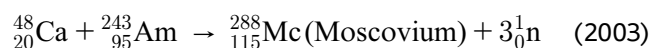
ומה בין מנדלייב ואומנות?

כאמור, כאשר מנדלייב היה סטודנט, הוא הכיר את המלחין והכימאי אלכסנדר בורודין. אשתו שנייה של מנדלייב, אנה פופובה, למדה לנגן בפסנתר בקונסרבטוריון ואחר כך למדה



איור 6. ציור של מנדלייב הצייר הרוסי איליה רפין, 1885

"פיזיקה גרעינית ואטומית נותנים לנו תשובה כמה יסודות יכולים להיות בטבלה המחזורית. אטום (יסוד) קיים כל עוד קיים גרעין עם זמן מחצית חיים של לפחות 10^{-14} . המודל המיקרוסקופי של הגרעין חוזה את קיום היציבות של יסודות על כבדים באזור. יסודות הממוקמים על האי הזה (עד $Z = 118$) כבר מסונתזים לאחרונה. יסודות 119 ו-120 חייבים להתקיים גם כן. לייצירת יסודות 118-113, שימשו יוני סידן עשירי נויטרונים (איזוטופים ^{48}Ca). בתערובת טבעית של שישה איזוטופים של סידן, איזוטופ זה (עשיר בנויטרונים) קטן פי 500 (0.187% חלק מולי) מהאיזוטופ הראשי ^{40}Ca הקיים בסידן טבעי על כדור הארץ [19]. הדבר יוצא דופן במספר נויטרונים עבור גרעינים קלים. כיום, האיזוטופים ^{48}Ca מופקים על ידי הפרדה בשדה מגנטי בוואקום גבוה. רק במקום אחד בעולם מייצרים ^{48}Ca : מתקן רוסי בעיירה לסוני, כ-250 ק"מ מהעיר יקטרינבורג. לכן, איזוטופ ^{48}Ca הוא נדיר מאוד ויקר: \$ 500,000 עבור 2 גרם בלבד. ייצורו מסתכם ב-10 גרם בשנה, 2 כפיות [46]. אפשר לרשום מספר תגובות עם ההשתתפות של איזוטופ ^{48}Ca לייצור יסודות על-כבדים:



כעת מנסים להשתמש באיזוטופים של יוני טיטניום (^{50}Ti) כדי לקבל יסודות שמספרם האטומי הוא 119 ו-120. נוסף על כך חשוב מאוד להראות אם היסוד ^{118}Og הוא גז אצילי דומה אנלוגי לקבוצה ה-18 בטבלה המחזורית. "זה גם סביר כי תימצא קפיצה של תכונות כימיות של יסוד מספר 119. יש סיבה להאמין כי עם העליית מספר אטומי עבור יסודות 121-123, ההבדלים הקבוצתיים כמעט ייעלמו. בעיקרו של דבר, המחזוריות בשינוי התכונות הכימיות של היסודות תיעלם. הטבלה המחזורית 'הישנה' תוחלף בטבלה 'החדשה', ותשונה מאוד בתחילת השורה ה-8 (period). לאחר גילוי יסודות על כבדים, כמו מתוך תיבת פנדורה, הופיעו בעיות רבות. לחלק מהן אין עדיין פתרון" [2, 19]. כאשר מומחים מייצרים תרכובת כימית שאינה קיימת, זה בלתי אפשרי להכין אותה ללא הטבלה המחזורית, המהווה כלי שימושי. כימאים שעסקו בסינתזה של חומרים חדשים הצביעו על שני חסרונות משמעותיים בטבלה המחזורית [45]. ראשית, לעיתים קרובות הם זקוקים ליסוד כימי ש... אינו קיים, למרבה הצער. שנית, תכונות של יסודות כימיים משתנות בקפיצות, עם הבדלים גדולים בין יסודות שכנים בשורה (period). איננו יכולים "להערים" על חוק היסוד של הטבע רק כדי להפוך את השינויים האלה באופן הדרגתי יותר.



איור 7. דיוקן של מנדלייב שצויר ע"י הצייר הרוסי איבן קרמסקוי, 1878

הטבלה המחזורית של מנדלייב העניקה השראה לא רק לכימאים, אלא גם לסופרים, משוררים, מלחינים, זמרים ואדריכלים, אשר יצרו יצירות אומנות בעקבותיה. בתחילת שנות השישים ראו אור סיפורים על יסודות כימיים, כלומר, על סוגי האטומים שמהם בנויים כוכבי הלכת והכוכבים, האדמה, המים, האוויר, הצמחים, בעלי החיים ואנחנו עצמנו [53]. פְּרִימוֹ מִיקֶלָה לוי כימאי וסופר איטלקי יהודי, ניצל אושוויץ, אשר כתב את הספר "הטבלה המחזורית" ב-1975 [54], ובו סיפורים קצרים אנלוגיים לשמות היסודות הכימיים. ב-2006 בחר המכון המלכותי הבריטי בספר "הטבלה מחזורית" לספר הטוב ביותר אי פעם [55, 56].

הטבלה המחזורית הגדולה ביותר בעולם נמצאת על בניין הפקולטה לכימיה באוניברסיטת מורסיה בספרד (ראו איור 8); והקטנה ביותר - באוניברסיטת נוטינגהאם באנגליה [57]. האחרונה בוצעה בעזרת חרוט על שטח שבב סיליקון בשיטת ליתוגרפייית קרן אלקטרונים.

יש אינספור תיאורים ערמומיים ואומנותיים של הטבלה המחזורית [58]. הטבלה המחזורית בעבודת מקרמה של ג'יין סטיוארט, אשר השקיעה 350 שעות בקשירת 200,000 קשרים בחוטים צבעוניים לרגל חגיגת 150 שנה לחוק המחזורי של מנדלייב (ראו

לצייר באקדמיה הרוסית לאומנויות. מנדלייב היה קמצן, אבל קנה ב-30 רובל (!) את התמונה שציירה אשתו אנה עם סיום לימודיה באקדמיה לאומנויות, "היום האחרון של פומפיי" (העתק ציורו של הצייר קרל ברילוב). תמונה זו נמצאת עד היום על קיר דירתו של מנדלייב, שהפכה למוזיאון.

כמו כן, מנדלייב ארגן פגישות בביתו מדי יום רביעי, ובהם התכנסו אומנים, מדענים, סופרים ומלחינים שפעלו בסנקט פטרסבורג, מ"מיטב" אנשיה של התרבות הרוסית.

בביתו ביקרו הציירים הרוסים המפורסמים, איליה רפין, איבן קרמסקוי, ניקולאי יארושנקו, ארכיפ קוינג' ואיוואן שישקין. בזכות שלושת הראשונים, יש לנו היום דיוקנאות של מנדלייב (ראו איורים מס' 6 ו-7). דיוקנאות שציירו רפין ויארושנקו נמצאים בגלריית טרטיאקוב במוסקבה. אף מדען רוסי לא זכה לתשומת לב כזאת בקרב ציירים לאורך חייו.

בין כל האומנויות מנדלייב אהב ביותר את תחום הציור. אף שהבנתו בציור הייתה מצוינת, מעולם הוא לא פרסם דבר בנושא זה. היוצא מן הכלל היחיד בהקשר זה הוא מאמר הנוגע לתמונתו של קוינג', "ליל הירח על הדניפר". המאמר נקרא "לפני תמונתו של קוינג'" (על הסיבה להשפעת הנוף על הצופה; 1880) [52 - 50]. ומנדלייב כתב בו על הקשר בין אומנות למדע.

מנדלייב החל לאסוף יצירות אומנות מ-1880. הוא חקר יצירת צבעים ארוכי טווח, ונתן הרצאות לפני קהל ציירים על כימיה ופיזיקה של צבעים. ב-1884 מנדלייב אף נבחר לאקדמיה הרוסית לאומנויות. אך לאקדמיה הרוסית למדעים לא בחרו בו!

ומציור - למוזיקה. מנדלייב היה מעריץ של מוזיקה קלאסית. אהבה מיוחדת הייתה לו ליצירותיו של המלחין הגרמני בטהובן, במיוחד אהב להקשיב ולשיר את הפתיחה לאופרה "לאונורה" ("פידליו"), ועל כן זכה לכינוי "לאונורה". המלחין והכימאי בורודין, שככל הנראה חש מוטרד מכך שמנדלייב לא האזין ליצירותיו, אלא לאלה של בטהובן, סיים את מכתבו לחברו במילים "שלום, לאונורה". כמו כן, תמונות של בטהובן והמלחין הרוסי מיכאיל גלינקה היו תלויות על הקיר בחדר עבודתו של מנדלייב.

מנדלייב אהב את הבלט של פיוטר צ'יקובסקי "אגם הברבורים", את האופרה של גלינקה "החיים של הצאר" ("איבן סוסנין"), את שירו של ג'ורג' בירון "החושך" ואת שירו של פיודור טיטוצ'ב "שתיקה".

מנדלייב גרס כי אומנות ומדע הם "שני צדדים של שאיפתנו ליופי, להרמוניה נצחית, לאמת הגבוהה ביותר" [52]. מנדלייב שאף לקרב אנשי מדע ואומנות, ולכן בתחילת 1870 יזם בסנקט פטרסבורג, יחד עם הצייר קרמסקוי, חברה לאחדותם של מדענים, אומנים וסופרים.



איור 8. הטבלה המחזורית הגדולה ביותר בעולם. אוניברסיטת מורסיה, ספרד

יותר מאשר את המטרה. אני ממליץ לקרוא יצירות אנליטיות, מפורטות ומדעיות מבריקות של פרופסור איגור דמיטרייב ואת כל המאמרים בכתב העת הרוסי "פריורה" (Nature; מספר 2, 2019) בנוגע למנדלייב ולחוק המחזוריות.

כך הגעתי לסוף המסע שלנו לעבר, להווה ולעתיד של חוק המחזוריות, בתקווה שמצאתם הרבה דברים מעניינים ושתמצאו אף יותר מכך בספרות המומלצת.



איור 10. הטבלה המחזורית היקרה ביותר בעולם, עשויה מסרט כסף עם חיבורי זהב, פלטינה, פלדיום ויהלום

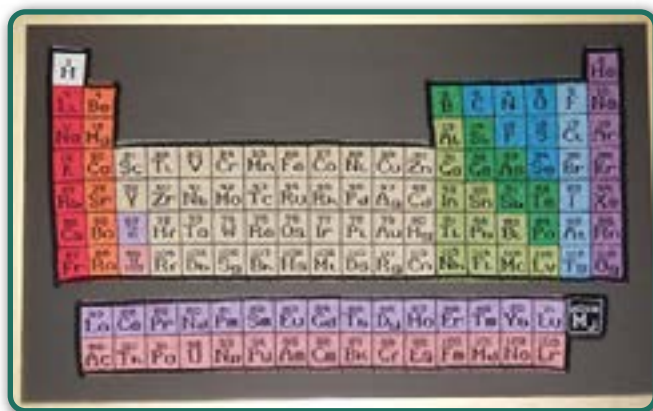
איור 9) [57]. הטבלה המחזורית היקרה ביותר בעולם נמצאת כנראה באוניברסיטת קיימברידג' (ראו איור 10). היא עשויה מסרט כסף עם חיבורי זהב, פלטינה, פלדיום ויהלום.

הטבלה המחזורית העניקה השראה גם מוזיקאים וזמרים, אשר יצרו שירים [59-62], אשר מעבר להיותם יפים ונעימים לאוזן הם מסייעים בחינוך והגברת המידע והידע על הטבלה המחזורית של היסודות הכימיים.

לסיכום, חוק המחזוריות משמעותי לא פחות מחוק הכבידה של ניוטון ומתורת היחסות של איינשטיין [45]. שפת הכימיה היא בינלאומית. זוהי שפה אוניברסלית ושיטתית של ידע, כלי מחקר וחינוך. הטבלה המחזורית מתפתחת באופן דינמי.

חוק המחזוריות ודימויו הגרפי בצורת הטבלה המחזורית של היסודות הכימיים אפשרו לפתח שפה אוניברסלית הדומה למוזיקה או למפה גיאוגרפית למטיילים. הטבלה המחזורית מקשרת אנשי מקצוע הפותרים בעיות מורכבות בתחומי הכימיה, הפיזיקה, האסטרופיזיקה, הקריסטלוגרפיה, הגיאוכימיה, הביוכימיה, הביולוגיה, הרפואה ועוד. תפקידה וחשיבותה של הטבלה המחזורית נותרו אפוא גדולים: כלי שיטתי של ידע במדע.

התחלתי לכתוב מאמר זה במרס 2019 וחשבתי שאסיים אותו בתוך חודש. במהלך הכתיבה בשלושת החודשים האחרונים הבנתי שאי אפשר לכסות את כל מה שקשור לחוק המחזוריות ולמנדלייב. המידע על נושא זה מזכיר לי כדור שלג, וכנראה שלעולם אינו מסתיים. בדומה למנדלייב, אני אוהב את הדרך



איור 9. הטבלה המחזורית בעבודת מקרמה של ג'יין סטיוארט

A handwritten manuscript page by Dmitri Mendeleev. It shows an early version of the periodic table with handwritten notes and corrections. The table is organized into groups and periods, with elements written in both Cyrillic and Latin characters. The handwriting is dense and shows signs of being a working draft.

**ОПЫТ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ,
ОСНОВАННОЙ НА ИХ АТОМНОМ ВЕСЕ
И ХИМИЧЕСКОМ СХОДСТВЕ**

	Тl=30	Зr=80	Ƴ=180.		
	V=51	Nb=94	Ta=182.		
	Cr=52	Mo=95	W=186.		
	Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4		
	Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.		
	Ni=59	Pd=106,6	Os=192.		
	Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.		
	Zn=65,2	Cd=112			
II = 1	Ba=9,4	Mg=24	Ƴ=68	U=110	Au=197?
	B=11	Al=27,4	Ƴ=70	Sn=118	Bi=210?
	C=12	Si=28	As=75	Sb=122	Tl=204.
	N=14	P=31	Se=78,4	Ta=128?	Pb=207.
	O=16	S=32	Br=80	J=127	
	F=19	Cl=35,5	Rh=85,4	Ce=133	
	Li=7	Na=23	K=39	Ra=87,6	Ba=137
			Ca=40	Ƴ=45	Ce=92
			Ƴ=50	La=94	
			Ƴ=60	Di=95	
			Ƴ=75,6	Th=110?	

D. Mendeleev.

איור 12. אחת הגרסאות של הטבלה המחזורית מהתאריך 17.2.1869

איור 11. אחת מההצעות של מנדלייב שנשלחה לעמיתיו הרוסים בסוף 1869

ЕСТЕСТВЕННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. МЕНДЕЛЕЕВА.

A detailed printed version of Mendeleev's periodic table from 1870. The table is organized into groups (I-VII) and periods. Each element cell contains its chemical symbol, atomic weight, and name in Cyrillic. The table is framed with decorative borders and includes a small note in the center: "The vacant spaces, unoccupied in each place, correspond to other elements." To the right of the main table is a vertical list of elements grouped by properties.

איור 13. הטבלה המחזורית של מנדלייב בסוף 1870

הכרה

לאשתי **אולגה**, על דיון מפרה וקריטי ועל ביקורת בונה.

לפרופסור **איגור דמיטרייב**, אשר נתן לי באדיבותו את עבודותי [16-5] ותמונות (איורים 13-1), ועל מפגש מקצועי ומרתק, שיחות וביקור במוזיאון-ארכיון של מנדלייב באוניברסיטה הממלכתית בסנקט פטרסבורג.

1. www.iypt2019.org – 30.3.2019.
2. http://webcast.unesco.org/live/vod/2019/sc/20192901_sc_room-01/en/ - 30.3.2019
3. The United Nations Proclaims the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements, <https://iupac.org/united-nations-proclaims-international-year-periodic-table-chemical-elements/> - 30.3.2019.
4. 5 March 2019, www.engineers.org.il
5. I. S. Dmitiriev, The soul's despairing cry, Biographical sketch of D. I. Mendeleev, SCIENCE First Hand, 2012. Vol. 32, № 2. pp. 52-71.
6. I. S. Dmitiriev, National Legend, In: The Man of the Era of Change, by I. S. Dmitiriev. Essays on D. I. Mendeleev and his time. Publisher: Khimizdat, SPb, 2004, pp. 459-474. (in Russian).
7. I. S. Dmitiriev, Special Mission of Mendeleev, Arguments and Facts, In: The Man of the Era of Change, by I. S. Dmitiriev. Essays on D. I. Mendeleev and his time. Publisher: Khimizdat, SPb, 2004, pp. 475-498. (In Russian).
8. I. S. Dmitiriev, Boring History, In: The Man of the Era of Change, by I. S. Dmitiriev. Essays on D. I. Mendeleev and his time. Publisher: Khimizdat, SPb, 2004, pp. 397-458. (In Russian).
9. I. S. Dmitiriev, Socio-economic topic in creation by D.I. Mendeleev, In: The Man of the Era of Change, by I. S. Dmitiriev. Essays on D. I. Mendeleev and his time. Publisher: Khimizdat, SPb, 2004, pp. 262-395. (In Russian).
10. I. S. Dmitiriev, Protected Space of the Man of Science: A Historical Aspect (Career Trajectories of M. V. Lomonosov and D. I. Mendeleev), Publishing house "Nestor-Historia", Sociology of Science and Technology, 2018, Vol. 9, No. 3, pp. 30-50. (In Russian).
11. I. S. Dmitiriev, Mendeleev: The Way to the Law (On the history of the discovery of the Periodic Law). In press. (In Russian). <https://sochisiri.ru/uploads/files2/chem-201904-dmitiriev-mendeleev.pdf> 7.7.2019.
12. I. S. Dmitiriev, Laboratory Space - Displayer and Killer, In Press. (In Russian).
13. I. S. Dmitiriev, Effective Mendeleev (World Ether, Artillery, and Art of Fundraising), Scientific effectiveness at work: tool or weapon, Ed. L.V. Shipovalova, St. Petersburg: Foundation for the Development of Conflictology, 2017, pp. 162-194. (In Russian). http://philosophy.spbu.ru/userfiles/kathedras/scitech/Shipovalova/effectiveness_research/monografii%20nauka2.pdf 7.7.2019.
14. I.S. Dmitiriev, National Legend: Was D.I. Mendeleev the creator of the Russian "monopoly" vodka? Questions of the history of science and technology, 1999, № 2, pp.177- 183. (In Russian).
15. I. S. Dmitiriev, Scientific discovery in statu nascendi, Man of the era of change. Essays on D.I. Mendeleev and his time. SPb, Himizdat, 2004, pp. 90-207. (In Russian).
16. I.S. Dmitiriev, The Discovery of the Periodic Law: Three Puzzles and a Legend, Priroda, 2019, No. 2, pp. 34-43. (In Russian).
17. D.A. Knyazev, K.I. Sakodinski, A. Groysman, The separation of lithium and calcium isotopes by means of amalgamo - chromatographic method. A.S., 1975, SU.
18. <https://en.wikipedia.org/wiki/Flerovium> - 7.7.2019.
19. "We Have Come Close to the Limits of Applicability of the Periodic Law", Interview with Yu. Ts. Oganessyan, Priroda, 2019, No. 2, pp. 4-11. (In Russian).

20. Eric R. Scerri, The Evolution of the Periodic System, Scientific American, January 21, 2011. <https://www.scientificamerican.com/article/the-evolution-of-the-periodic-system/> - 7.7.2019.
21. <https://www.metafilter.com/178916/The-Chemical-Table-An-Open-Dialog-between-Visualization-and-Design> - 8.5.2019.
22. Eric R. Scerri, The Past and Future of the Periodic Table. Scientific American, January–February 2008, 96(1): 52-58.
23. https://en.wikipedia.org/wiki/Leopold_Gmelin. - 8.5.2019.
24. <https://www.encyclopedia.com/science/dictionaries-thesauruses-pictures-and-press-releases/gladstone-john-hall> - 8.5.2019.
25. J. W. van Spronsen, In: The Periodic System of Chemical Elements, Amsterdam, 1969, pp. 76–78.
26. William B. Jensen, Periodic Law and Table. Written for Britannica on Line, Encyclopaedia Britannica: Chicago, IL, 2000, but never published. 11 p.
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Josiah_Parsons_Cooke - 9.5.2019.
28. Melissa Yost, Timeline of the Periodic Table. <https://www.sutori.com/story/timeline-of-periodic-table--cBr1GUy-4EupkEWJPTSGofeLi> - 8.5.2019.
29. Eric R. Scerri, The Periodic Table: Its Story and Its Significance, Oxford University Press Inc., New York, 2006, 2008 p.
30. https://en.wikipedia.org/wiki/Max_Joseph_von_Pettenkofer#cite_note-Oxford_University_Press_Inc-4 - 9.5.2019.
31. Adolph Strecker, Theorien und Experimente zur Bestimmung der Atomgewichte der Elemente, Vieweg, 1859, 146 p.
32. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_periodic_table#William_Odling - 6.5.2019
33. Heinz Cassebaum and George B. Kauffman, The Periodic System of the Chemical Elements: The Search for Its Discoverer, The University of Chicago Press Journal, Autumn, 1971, 62(3): 314-327.
34. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_periodic_table#Alexandre-Emile_B%C3%A9guyer_de_Chancourtois - 6.5.2019
35. https://en.wikipedia.org/wiki/Gustavus_Detlef_Hinrichs 19.04.2019.
36. Gustavus Detlef Hinrichs, Contributions to Molecular Science or Atomechanics, IOWA-CITY, United States, 1868.
37. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_periodic_table#Julius_Lothar_Meyer - 7.5.2019.
38. D.I. Mendeleev, On oil matters (Article one. Introduction and about kerosene), Vol. 10. Oil. L.-M., 1949. pp. 387-478; p. 463. (In Russian).
39. V.V. Pokhlebkin, Mendeleev and Vodka, Ogonyok (Огонек), 1997, № 50, pp. 4-5. (In Russian).
40. D.I. Mendeleev, Discourse on the combination of alcohol with water. D.I. Mendeleev, Works: In 25 volumes, L., 1937. (In Russian).
41. A.N. Itzkov, Russia - United States: attempts of convergence, In: Essays on the history of Russian foreign

- intelligence, Vol. 1, From ancient times to 1917, Editor Academician E.M. Primakov, Publisher International Relationships (Mezhdunarodniye Otnosheniya), Moscow, 1995. (In Russian).
42. Arguments and Facts, 1996. № 10 (803). p. 16. (Weekly newspaper in Russian).
43. Sergey Chertoprud, Scientific - technical intelligence from Lenin to Gorbachev, Olma-Press Obrazovaniye, Moscow, 2002, 447 p. (In Russian).
44. Anatoly Dienko, Intelligence and counterintelligence in persons. Encyclopedic dictionary of the Russian special services. Russki Mir, Moscow, 2002, p. 328. (In Russian).
45. E.V. Antipov et al., Chemists on the Periodic Table: A Professional Tool, a Scientific Icon, or an Open Book? Priroda, 2019, No. 2, pp. 17-33. (In Russian).
46. <https://www.sciencealert.com/this-calcium-isotope-is-so-rare-it-costs-500-000-for-just-2-grams> - 7.7.2019.
47. E.G. Mazurs, Graphical Representations of the Periodic System During One Hundred Years, Alabama, University of Alabama Press, USA, 1974, 224 p.
48. J. Bouma, An Application-Oriented Periodic Table of the Elements, J. Chem. Ed., 1989, 66 (9), p. 741.
49. Mendeleev to Oganesson: A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table. Scerri E., Restrepo G. (eds.). Oxford University Press, 2018, 328 p.
50. <https://subscribe.ru/group/pole-chudes/5161966/> 13.07.2019
51. <http://www.prom-front.ru/pered-kartinoyu> 13.07.2019
52. http://vivovoco.ibmh.msk.su/VV/JOURNAL/NATURE/02_07/DIM.HTM 13.07.2019
53. P.R. Taube, E.I. Rudenko, From Hydrogen to ... Nobelium? Publisher "Visshaya Shkola", Moscow, 1961, 332 p. (In Russian).
54. פרימו לוי, הטבלה המחזורית, הוצאת הקיבוץ המאוחד, 1987, 174 עמ'.
55. James Randerson, Levi's memoir beats Darwin to win science book title, The Guardian, 21 October 2006.
56. <https://davidson.weizmann.ac.il/online/sciencehistory/> 14.07.2019
57. <https://www.chemistryworld.com/news/ten-periodic-tables-you-really-should-know-about-/3010359.article> 14.07.2019
58. <https://www.artlebedev.com/mendeleev-table/> 14.07.2019
59. <https://www.youtube.com/watch?v=kuQ0Um4Wcz0> 14.07.2019
60. https://www.youtube.com/watch?v=1PSzSTilu_s 14.07.2019
61. https://www.youtube.com/watch?v=rz4Dd1I_fX0
62. https://www.youtube.com/watch?v=k_9KTww6DiU



יש טבלאות מחזוריות אחרי מנדלייב...*

ד"ר מרים כרמי**

הכימאי אוטו תיאודור בנפיי (Otto Theodor Benfey) היה יליד גרמניה אשר הוברח לאנגליה לפני מלחמת העולם השנייה ובה למד לפני שעבר לחיות בארצות הברית והחל לעסוק בתחום ההיסטוריה של הכימיה. בשנת 1964 הוא העלה הצעה לארגן את היסודות הכימיים בטבלה בצורת חילזון, כאשר המימן הוא המרכז ונקודת ההתחלה. כל ספירלה היא מקבילה למחזור בטבלה המסורתית. הטבלה צבעונית וברורה. היא מציגה יפה את ההבדל בין מחזורים שונים בטבלה ונותנת מקום ליסודות חדשים, כגון סופר אקטינידים (ראו איור 2).

אולם תקוותו של המחבר שטבלה זו תהיה נגישה ושימושית מאוד בקרב הכימאים, התבדתה. הטבלה אינה נותנת מידע רב על היסודות ומראה את ההיערכות האלקטרונית של יסודות ברמה f-d בלבד.

את הטבלה המחזורית המוצגת באיור 3 הציג הכימאי ג'יימס

הגישה המקובלת היא שטבלת היסודות המחזורית המוכרת כיום לכימאים היא בעצם הטבלה של מנדלייב (1869) בשינויים קלים ובתוספת של יסודות חדשים שהתגלו. אולם, בחינת היוזמות וההצעות למבנה מתאים של טבלה מחזורית, לאחר מנדלייב, מציגה תמונה מעניינת ויצירתית להפליא.

בכתבה זו נציג כמה הצעות מעניינות לטבלאות מחזוריות חלופיות.

בשנת 1949 פרסם ירחון Life Magazine חוברת שלמה אשר יועדה לנושא [האטום](#). בחוברת (עמוד 81) הוצגה טבלה מחזורית המבוססת על הרעיון של הכימאי ג'ון קלרק, אשר הציג (ב-1933) טבלה מחזורית הנראית כמו מסלול מרוצים. בטבלה זו היסודות מסודרים באופן ספירלי על פי המספר האטומי שלהם, כך שיסודות הדומים בתכונותיהם יוצרים קבוצות הצבועות בגוונים דומים (ראו איור 1).

* מבוסס על המאמר [table periodic the of Shapes](#)

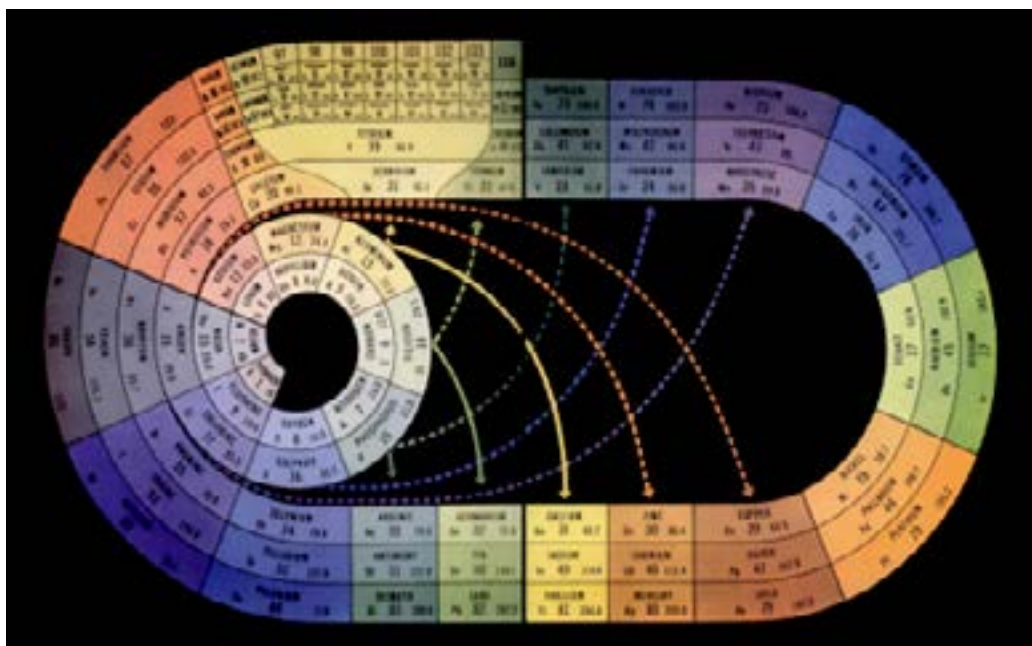
** ד"ר מרים כרמי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

ארבעת המספרים [הקוואנטיים](#) של ההיערכות האלקטרונית: n, l, m_l, m_s .

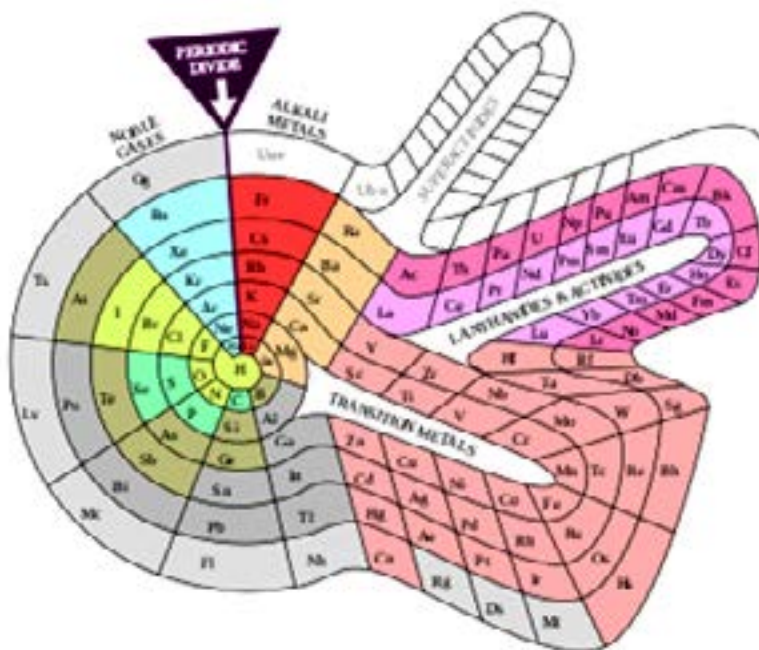
הטבלה המחזורית מציגה סידור מיוחד ובו לכל אלקטרון שנוסף בטבלה (המייצג אטום מסוג אחר, כלומר יסוד שונה) יש ארבעה מספרים קוונטיים שונים ולכן הוא מופיע במשבצת משלו.

הייד בשנת 1975. הייד עסק בתחום האורגנו-סיליקון ולכן במרכז הטבלה נמצא הצורן (סיליקון). קווים מקווקים קושרים את הצורן ליסודות אחרים.

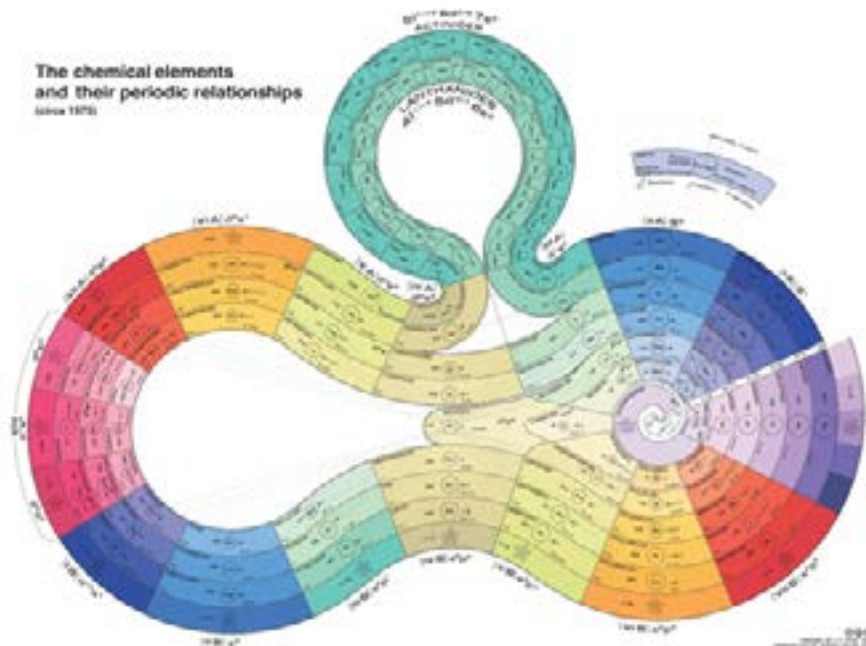
הטבלה המוצגת באיור 4 נקראת The Adomah Periodic Table (2006), וזכתה לשם "הטבלה המחזורית המושלמת" כפי שכונתה על ידי הממציא ולרי צימרמן. היסודות סודרו על פי



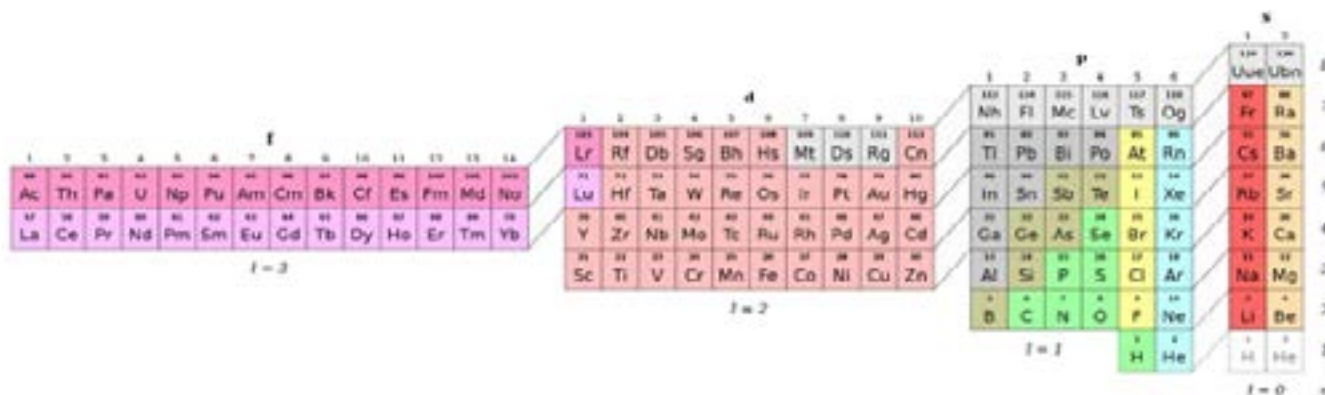
איור 1. בשנת 1949 פרסם ירחון Life Magazine טבלה מחזורית הנראית כמו מסלול מרוצים, המבוססת על הרעיון של הכימאי ג'ון קלרק, אשר הציג ב-1933



איור 2. הכימאי אוטו תיאודור בנפיי העלה הצעה לארגן את היסודות הכימיים בטבלה בצורת חילוון, (DePiep/Wikimedia/CC-BY-3.0)



איור 3. טבלה מחזורית אשר הציג הכימאי ג'יימס הייד בשנת 1975 ובמרכז הצורן.
(Rezmason/Wikimedia/CC-BY-3.0)



איור 4. The Adomah Periodic Table שהוצעה על ידי ולרי צימרמן 2006

כאשר $l=0$, אז $m_0 = 0$, כלומר: אורביטל אחד מסוג s.
 כאשר $l=1$, אז $m_1 = -1, 0, +1$, כלומר: 3 אורביטלים מסוג p.
ms - כיוון סיבוב האלקטרון סביב עצמו.
 בכל אורביטל יכולים להיות מקסימום שני אלקטרונים, המסומנים במספר $+1/2$ או $-1/2$. סיבוב האלקטרון הוא עם כיוון השעון או נגד כיוון השעון.
 לסיכום, אפשר לאפיין כל אלקטרון באטום על ידי ארבעת המספרים הקוואנטיים.

n - מס' רמת האנרגיה שבה נמצאים אורביטלים. $n=1, 2, 3, \dots$
 ככל ש-n הוא מספר גדול יותר, כך רמת האנרגיה האחרונה המאוכלסת באלקטרונים רחוקה מהגרעין.
 אורביטל הוא אזור במרחב שבו הסיכוי למצוא את האלקטרון הוא הגדול ביותר.
l - מציין את צורת האורביטלים $l=0, 1, \dots, (n-1)$. לכל מספר יש צורת אורביטל מאפיינת.
 לדוגמה: $l=0$ אורביטל s כדורי, $l=1$ אורביטל בצורת p שתי אליפסות.

מקור

<https://www.galchimia.com/shapes-of-the-periodic-table>

ml - מספר האורביטלים בכל רמת אנרגיה. $ml = -l, \dots, +l$ מתאר את מספר האורביטלים ברמת האנרגיה.

לדוגמה:

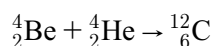
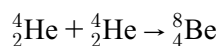
כאשר $n=2$, אז $l=0, 1$, כלומר, יש אורביטלים מסוג s ו-p.



כיצד נוצרו היסודות?

מרים כרמי*

בתוך כוכבים (כגון השמש) נוצרים אטומים כבדים יותר בתהליך הנקרא היתוך גרעיני (nuclear fusion). כגון היתוך גרעיני של אטומי מימן המתחברים ויוצרים גרעיני הליום, כפי שקורה בשמש שלנו. בכוכבים בוגרים יותר מהשמש הקרובה לנו, גרעינים של אטומי הליום עוברים היתוך גרעיני ויוצרים גרעיני בריליום, והיתוך גרעיני של גרעיני בריליום יוצר גרעין פחמן.



וכן הלאה עד שאטומים כבדים יוצרו אטומי ברזל. בשלב זה הכוכב אינו יכול ליצור אנרגיה בתהליכי היתוך והוא דחוס מאוד. זהו שלב שבו הכוכב מתפוצץ תוך כדי פליטת כמות אנרגיה אדירה (סופרנובה) המאפשרת לתהליכים גרעיניים נוספים להתרחש. בתהליכים אלו, אטומי ברזל הופכים לאטומי זהב, אטומי זהב הופכים לאטומי עופרת וכך הלאה עד ליצירת אטומי אורניום. אורניום הוא האטום (והיסוד) הכבד ביותר הנוצר באופן טבעי ביקום.

יסודות טבעיים

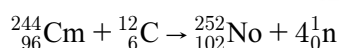
יסוד כימי הוא חומר הבנוי מאטומים בעלי אותו מספר של פרוטונים. מספר היסודות הידועים הוא כמספר סוגי האטומים הקיימים. מבחינים בין האטומים השונים על פי מספר הפרוטונים בגרעין האטום.

אפשר לחלק את היסודות המופיעים בטבלה המחזורית ליסודות טבעיים וליסודות מלאכותיים. כל סוגי האטומים הטבעיים (ולכן כל היסודות הטבעיים) נוצרו מהאטום הראשוני הפשוט ביותר, הוא אטום המימן. יצירת האטומים הכבדים התרחשה באופן טבעי במהלך מיליארדי שנים (13.8) של התפתחות היקום. רוב היסודות נוצרו בליבה של כוכבים (שמשות) רחוקים וכן בעת התפוצצותם של כוכבים אלו. היסוד הכבד ביותר שנוצר כך הוא האורניום.

האטומים הכבדים יותר מאורניום נוצרו בתהליכים גרעיניים במעבדות מעשי ידי אדם והם נקראים "יסודות מלאכותיים".

* ד"ר מרים כרמי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

טבלה מחזורית של היסודות

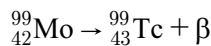


גרעיני אטומים שמספרם האטומי גדול, מעל 100, והם כבדים מאוד, מתפרקים בקלות רבה וזמן מחצית החיים¹ שלהם הוא קצר מאוד. הסיבה לכך היא שכלל שמספר הפרוטונים בגרעין עולה, גדל כוח הדחייה החשמלי ביניהם וגובר על הכוח החזק המחזיק יחד את גרעיני האטומים הכוללים פרוטונים ונייטרונים. השאלה היא, מהו המספר המקסימלי של פרוטונים שגרעין אטום יכול להכיל? על כך יש השערות ותיאוריות שונות.

טכנציום (43)

הטכנציום הוא יסוד מלאכותי בעל מספר אטומי קטן משל אורניום. הוא היסוד הראשון שהתגלה באופן מלאכותי, בשנת 1937. עקבות של טכנציום התקבלו בתהליכי ביקוע גרעיני (nuclear fission) של אורניום-238 ובתהליכי ההתפרקות הרדיואקטיבית של תוצרי הביקוע.

דרך נוספת ליצירת גרעיני טכנציום היא בתהליכי התפרקות של אטומי מוליבדן (42).



גילוי זה הבהיר את העובדה כי יסוד זה נמצא באופן טבעי על פני כדור הארץ במכרות של אורניום, בכמויות מזעריות, מכיוון שאינו יציב.

מקורות

<https://jeries.rihani.com/symmetry/index7.html>

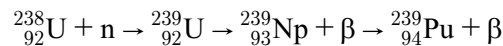
<http://www.ericscerri.com/>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Nobelium>

כל התרכובות המרכיבות אותנו עשויות מאטומים שנוצרו באופן טבעי ביקום ולכן אפשר לומר כי "אנחנו עשויים אבק כוכבים", כפי שאמר האסטרונום האמריקאי קרל סייגן.

יסודות מלאכותיים

עשרים ושישה היסודות בעלי מספר אטומי גדול משל האורניום, הנקראים היסודות הטרנס-אורניים, נוצרו בצורה דומה של תהליכים גרעיניים, אך לא בכוכבים, אלא במעבדות מעשי ידי אדם, כגון מאיצי חלקיקים או ריאקטורים גרעיניים. השיטה שנקטה הייתה הפצת אטומי אורניום על ידי נייטרונים והפיכתם לאטומים רדיואקטיביים לא יציבים המתפרקים תוך כדי פליטת קרינת בטא ויוצרים אטום (יסוד) חדש, בעל מספר אטומי גבוה מ-92. שיטה זו התאימה ליצירת אטומים כבדים בעלי מספר אטומי 100.



בשלב מאוחר יותר שונתה השיטה, ואטומים כבדים החלו להיות מופצצים על ידי חלקיקים אחרים שאינם נייטרונים, כגון הפצת אטומי איינשטייניום (מספר אטומי 99) בגרעיני הליום וקבלת גרעין חדש ובו 101 פרוטונים (מנדלביום) או הפצת אטומי אורניום (92) באטומי ניאון ליצירת אטומי נובליום (מספר אטומי 102). תהליכים נוספים היו הפצת אטומי עופרת (82) באטומי אבץ (30) ליצירת אטומי קליפורניום (112) או הפצת אטומי עופרת (82) באטומי סידן (20) ליצירת אטומי אונגואקטיום (118).

לדוגמה, תהליך יצירת היסוד שזכה בשם נובליום בשנת 1959 על ידי כימאים שוודים.

1 זמן מחצית חיים - הזמן הדרוש למחצית מהאטומים של איזוטופ רדיואקטיבי כדי לדעוך ולהפוך לאטומים של איזוטופ אחר.



יסודות מתכלים

מרים כרמי

כיום נדרשת מודעות לנושא, אשר תוביל לנקיטת אמצעים שונים למניעת הכחדתם של יסודות נבחרים. מוצרים אלקטרוניים שונים, כגון טלפונים חכמים, כוללים מגוון תרכובות של יסודות, ובהם רבים המצויים בסכנת הכחדה. חשוב אפוא לנקוט אמצעים מתאימים לצמצום הבעיה.

בשיח הנוגע לצמצום הבעיה מדברים על שלושת ה-R.

Reduce - צמצום השימוש ביסודות מתכלים (או בתרכובותיהם), על ידי חידוש ושדרוג מכשירים ניידים לעיתים רחוקות, ולא מדי שנה כמו שרבים עושים.

Reuse - שימוש מחודש במוצר האלקטרוני על ידי העברתו לאדם אחר.

Recycle - שימוש חוזר במוצר עצמו או ברכיב שהיסוד נמצא בו. העברת מכשירים אלקטרוניים [למרכזים](#) הקיימים בארצות השונות שנעשית בהם הפרדה והשבה של המרכיבים הנמצאים במוצר.

אנו מודעים לעובדה שמינים שונים בעולם החי והצומח נמצאים בסכנת הכחדה. ואולם אנחנו פחות מודעים לעובדה שגם יסודות כימיים עלולים להתכלות עקב השימוש הרב בהם או בתרכובותיהם.

מה פירוש יסוד בסכנת הכחדה?

חוק שימור החומר קובע כי אטומים אינם נהרסים או נוצרים, ולכן הם נשארים ללא שינוי, אלא אם כן הם איזוטופים רדיואקטיביים ולכן הגרעין שלהם מתפרק. אז למה הכוונה ב"סכנת הכחדה"?

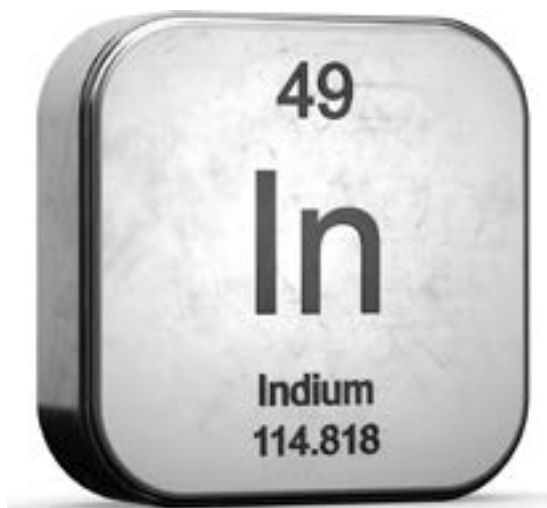
יסודות בסכנת הכחדה הם יסודות אשר נצרכים על ידי האדם (כיסודות או כתרכובות של היסוד) לשימוש והכנת מוצרים שונים (כגון מוצרים אלקטרוניים). לכן הזמינות של יסודות אלו על פני כדור הארץ יורדת. עקב השימוש ביסוד מסוים (או בתרכובתו) הוא נעשה פחות זמין להשבה, או שהדרך להשבתו נעשית לא כלכלית ומייקרת מאוד את המוצר, כך שנוצרת סכנה כי בתוך מאה השנים הבאות יהיה חוסר באספקתו.

* ד"ר מרים כרמי, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

הליום נמצא באופן טבעי במאגרים שונים מתחת לפני הקרקע, לדוגמה מאגר National Helium Reserve, הקיים בעיר אמרילו, מדינת טקסס בארצות הברית, ובו נפח של 109 מ"ק הליום. שימושי העיקריים של הליום הם: שימוש כנוזל מקרר למגנטים במכונות MRI (טמפרטורת הרתיחה שלו קרובה לאפס המוחלט), בידוד אטמוספרי בעת ריתוך וכן שימוש בספינות אוויר ובבלונים.

השימוש האחרון הוא העממי ביותר והמוכר לרבים. ראוי לזכור שכל בלון הנמלט לאטמוספירה לוקח איתו אטומי הליום שלא יחזרו אלינו לפני כדור הארץ, ולכן יש להמעיט בהרגל זה ככל שניתן.

אינדיום In



אינדיום הוא יסוד בסכנת רצינית בגלל התחמוצת שלו, In_2O_3 . תחמוצת זו היא חלק ממרכיבי המסכים החכמים המגיבים לנגיעת יד ונמצאים במכשירים אלקטרוניים רבים. צריכתו של היסוד ושל התחמוצת גדלה מאוד בשנים אחרונות וממשיכה לגדול. השבת התחמוצת מהמכשירים היא קשה ויקרה, וכיום מחפשים תחליפים שונים לשימוש ב- In_2O_3 . אחד מהתחליפים הללו הוא גרפן.



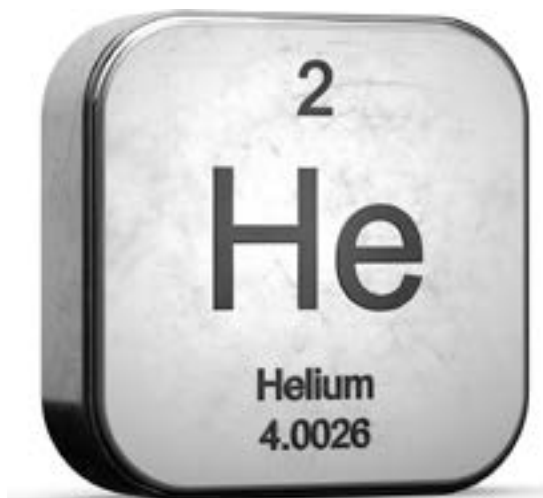
טבלאות מחזוריות שונות מדגישות את מידת הזמינות השונה של יסודות ואת הצורך לזכור שהשימוש ביסודות או בתרכובות מסוימות שלהם לא לתמיד יהיה אפשרי.

1. הטבלה המחזורית [הבאה](#) מספקת מידע על כל אחד מהיסודות מבחינת הסיכון להכחדתו (supply risk). על פי טבלה זו, זמינותם של יסודות רבים (39 במספר) מצויה בסכנה גדולה ביותר לזמינות.

2. [טבלה מחזורית מיוחדת](#) (EuChemS) מייצגת בצורה מקורית את 90 היסודות הטבעיים. מבנה הטבלה שונה, ליסודות יש צבעים שונים וכן שטח שונה בטבלה המחזורית המסורתית. שטח היסודות בטבלה מייצג את מספר האטומים לכל יסוד (על פני סולם לוגריתמי) וצבעי היסודות מורים על מידת הצריכה שלהם ועל הסכנה לזמינותם. על פי טבלה זו, 9 יסודות מצויים בסכנה רצינית להכחדה, 10 יסודות מצויים בסכנת הכחדה.

דוגמאות ליסודות בסכנת הכחדה

הליום He



הליום הוא היסוד היחיד שהכחדתו פירושה היעלמותו מכדור הארץ. בהיותו גז קל מהאוויר, שחרור הליום לאטמוספירה גורם להוצאתו ממנה, ולכן מבחינת האדם, אטומי הליום (שאינם נהרסים) אינם זמינים עוד ומספרם על פני כדור הארץ יורד.



טלפון חכם - כימיה חכמה

דבורה קצביץ*

החכם, ולא סתם נמצאים, אלא בעלי תפקיד! עיקר היסודות הם מתכתיים - 62 מתכות שונות. קבוצת מתכות מעניינת, הלנטנידים, משמשת תפקיד משמעותי, ונקראת גם קבוצת המתכות הנדירות (Rare-earth metals). אפשר למצוא כ-16 מתכות נדירות בכמה סוגי סמארטפונים. מתכות אלו לא בהכרח נדירות, אך כמותן מוגבלת והפקתן מורכבת. אחד האתגרים של יצרני הטלפונים הסלולריים היא למצוא להם תחליפים.

פירוט לגבי היסודות שמרכיבים את הטלפון הסלולרי ושימושיהם תמצאו באיור 1.

לכל אחד ואחת מאיתנו יש סמארטפון, אשר לעיתים קרובות מקבל התייחסות מייד כשאנחנו פותחים את העיניים, לפני כל דבר אחר. אחת לשנתיים-שלוש רבים מאיתנו משתדרגים בגרסה חדשה מעודכנת ומשוכללת, עם ביצועים רבים ומהירים יותר. מאחורי הביצועים ומגוון הפונקציות עומדת כימיה ענפה. בכתבה זו נתייחס למגוון היסודות שלוקחים חלק בטלפון החכם, ונתעמק בכימיה של המסך, נתייחס לאלקטרוניקה, ולסוללה.

בכמה יסודות נעשה לדעתכם שימוש בטלפון החכם?

70 מתוך 83 יסודות יציבים בטבלה המחזורית נמצאים בטלפון

* ד"ר דבורה קצביץ, המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע

היסודות בסמארטפון ושימושיהם

אלקטרוניקה

נחושת משמשת לחיווט הסמרטפון. נחושת, כסף וזהב הן המתכות העיקריות שמהן מיוצרים רכיבים מיקרואלקטריים.

טנטאלום (Ta) הוא המרכיב העיקרי של מיקרו קבלים.

29 Cu Copper	47 Ag Silver
79 Au Gold	73 Ta Tantalum

ניקל משמש במיקרופון וגם בשאר חיבורים החשמליים. סגסוגות המכילות פרסאודימיום, גדוליניום נאודימיום לוקחות חלק במגנט בתוך הספיקר והמיקרופון. ניאודימיום, טרביום ודיספרוסיום משמשים ביחידת הרטט.

28 Ni Nickel	66 Dy Dysprosium	59 Pr Praseodymium
65 Tb Terbium	60 Nd Neodymium	64 Gd Gadolinium

סיליקון משמש לבניית הציפ של הטלפון. אזורים מסוימים של הציפ שנועדו להיות מבודדים עוברים חמצון לסיליקון אוקסיד. יסודות שונים מוספים לסיליקון כדי להפוך אותו למוליך חשמל.

14 Si Silicon	8 O Oxygen	51 Sb Antimony
33 As Arsenic	15 P Phosphorus	31 Ga Gallium

בדיל ועופרת משמשים להלחמות בחיבורים האלקטרוניים. בטלפונים נטולי עופרת ההלחמה נעשית באמצעות תערובת של בדיל, נחושת וכסף.

50 Sn Tin	82 Pb Lead
-----------------	------------------

מארז

בדרך כלל המארז בנוי מסגסוגות של מגנזיום. ולעיתים מפלסטיק. כאשר מדובר בפלסטיק, הוא מכיל מעכבי בעירה שברובם מכילים ברום. כמו כן משולב במארז ניקל, המפחית הפרעות אלקטרומגנטיות.

6 C Carbon	12 Mg Magnesium
35 Br Bromine	28 Ni Nickel

מסך

אינדיום בדיל אוקסיד היא תערובת של תחמוצות המשמשות ליצירת הפילם השקוף שמוליך חשמל וחשוב להפעלה של מסכי המגע.

49 In Indium	8 O Oxygen
50 Sn Tin	

זכוכית המסך:
הזכוכית ברוב הסמרטפונים היא מסוג אלומיניום סיליקט המורכבת מתערובת של אלומיניום חמצני (Al_2O_3) וצורן חמצני (SiO_2). זכוכית זו מועשרת ביוני אשלגן שעוזרים לחזק הזכוכית.

13 Al Aluminium	14 Si Silicon
8 O Oxygen	19 K Potassium

מגוון תרכובות של מתכות נדירות ממשפחת הלנטינידים, אחראיות ליצירת הצבעים במסך הסמרטפון. חלק מהתרכובות גם מגינות מפני חדירה של קרני UV לתוך המכשיר.

39 Y Yttrium	57 La Lanthanum	65 Tb Terbium
59 Pr Praseodymium	63 Eu Europium	66 Dy Dysprosium
64 Gd Gadolinium		

סוללה

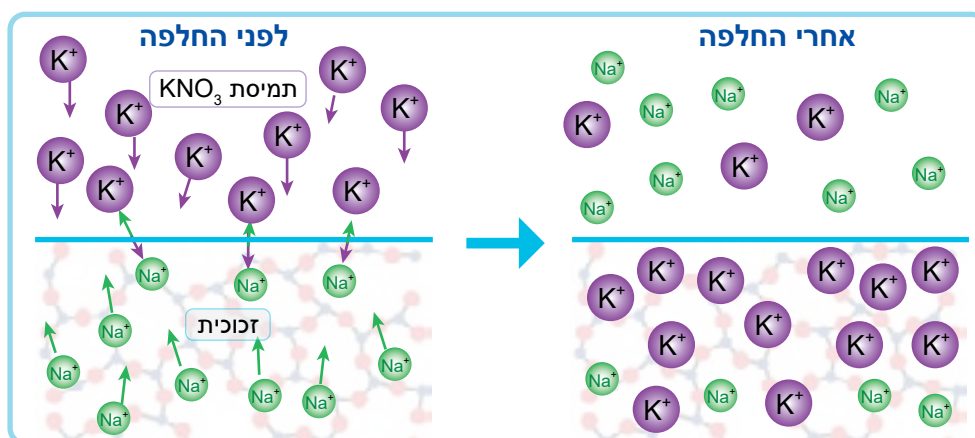
הסוללה בסמארטפון היא מסוג ליתיום יון. האלקטרודה החיובית בנויה מליתיום קובלט אוקסיד, $LiCoO_{2(s)}$, והאלקטרודה השלילית בנויה מגרפיט, C(s).

27 Co Cobalt	8 O Oxygen
6 C Carbon	13 Al Aluminium

איור 1. היסודות העיקריים בסמארטפון. מבוסס על www.compoundchem.com

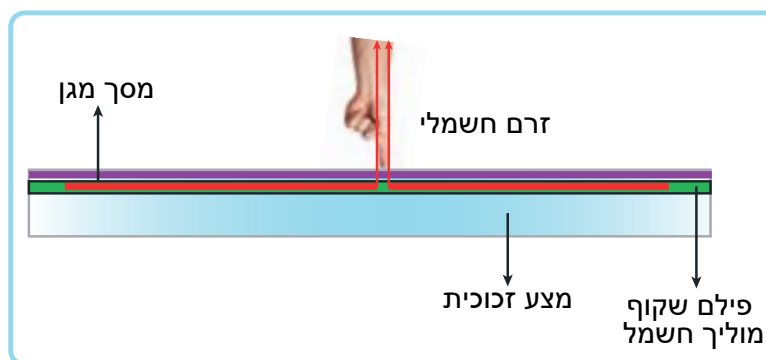
המסך והזכוכית

מסכי המגע מיוצרים בעיקר מזכוכית אלומיניום סיליקט, תערובת של תחמוצת אלומיניום וסיליקון דו-חמצני, אשר לאחר מכן מונחת באמבט חם של מלח מותר מסוג אשלגן חנקתי. מטרת פעולה זו היא לאפשר ליוני נתרן קטנים יותר לעזוב את הזכוכית וליוני אשלגן גדולים יותר לתפוס את מקומם. האחרונים תופסים מקום רב יותר ונלחצים זה לזה כאשר הזכוכית מתקררת, ובתוך כך נוצרת שכבה של לחץ דחיסה על הזכוכית המגבירה את חוזקה ועמידותה מפני נזק מכני. זכוכית זו חזקה מאוד ונקראת זכוכית גורילה.



איור 2. הכנת זכוכית גורילה

זכוכית, בהיותה מבודדת, אינה מוליכה חשמל. אף על פי שהזכוכית מכילה יונים, הם מאותרים במקומם ומונעים את זרימת החשמל. לכן יש לצבוע את מסך הזכוכית בשכבה שקופה דקה של חומר מוליך, לרוב תחמוצת בדיל אינדיום, אשר בדרך כלל מונחת בפסים דקים של שתי וערב כדי ליצור תבנית רשת. הרשת המוליכה הזאת פועלת כקבל, ומאחסנת מטענים חשמליים. כשנוגעים במסך, יש מעבר של מעט מטענים לאצבע. המסך רושם ירידת מתח כאשר מטען חשמלי זה נכנס לאצבע, ומיקום ירידת המתח מעובד על ידי תוכנה וזו מורה על הפעולה המתקבלת. הזרם החשמלי הזעיר הזה נכנס לאצבע מכיוון שהעור הוא מוליך חשמלי - בעיקר בשל השילוב של מלח ולחות בקצות האצבעות. כך הופך הגוף לחלק מהמעגל, שכן מעט חשמל זורם בגוף בכל פעם שאנחנו משתמשים במסך המגע בטלפון. כמה מהיסודות Rare earths נמצאים גם הם בשכבה הדקה. יסודות אלו נמצאים בכמויות קטנות מאוד. הם בולעים את האור נראה ופולטים את הצבעים המוצגים על המסך.



איור 3. מסך מדע קיבולי

האלקטרוניקה

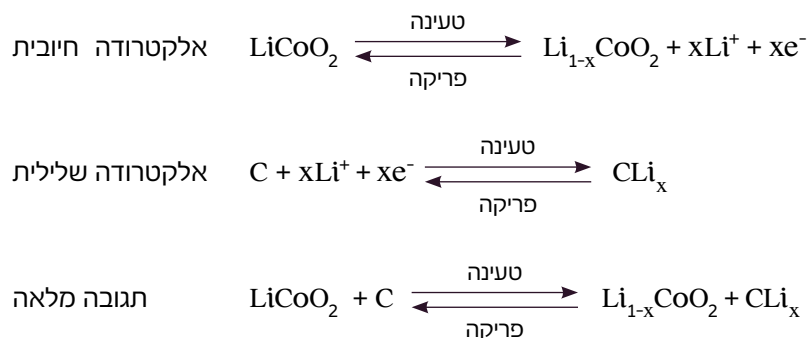
יש מגוון רחב של יסודות ותרכובות המשרתים את האלקטרוניקה של הסמארטפון. השבב, מעבד הטלפון, עשוי מסיליקון טהור, אשר נחשף לחמצן ולחום על מנת לייצר ציפוי של סיליקון חמצני על פני השטח. לאחר מכן מסירים חלקים משכבת הצורן החמצני כדי לאפשר מעבר של זרם. הסיליקון אינו מוליך חשמל בלי להיות "מסומם" ביסודות אחרים; תהליך זה כרוך בהפגזת הסיליקון על ידי מגוון יסודות,

כמו זרחן, אנטימון, ארסן, בורון, אינדיום או גליום. סוגים שונים של מוליכים למחצה (P או N) מיוצרים בהתאם ליסוד ש"סומם". הרכיבים המיקרו-חשמליים והחיווט בטלפון מורכבים בעיקר מנחושת, זהב וכסף. טנטלום משמש אף הוא כמרכיב עיקרי במיקרו-קבלים. להלחמה של הרכיבים האלקטרוניים משתמשים בשנים האחרונות בשילוב של בדיל, כסף ונחושת. המיקרופון והרמקול של הטלפון מכילים מגנטים, שהם בדרך כלל סגסוגות ניאודימיום-ברזל-בורון, אם כי לעיתים קרובות קיימים גם דיספרזיום ופריזודימיום בסגסוגת. אלה נמצאים גם ביחידת הרטט של הטלפון.

הסולה

סוללת ליתיום-יון תעשייתית מפעילה את רוב הסמארטפונים. היתרון שלה הוא צפיפות אנרגיה גבוהה מאוד, ויכולת לקיים מספר רב של מחזורי פריקה וטעינה.

בסוללה המורכבת מקתודת $\text{LiCoO}_{2(s)}$ ומאנודת גרפיט ($\text{C}_{(s)}$), בתהליך הפריקה, יוני הליתיום יוצאים מהגרפיט (אנודה), עוברים דרך האלקטרוליט שאינו מימי ונכנסים בין שכבות הקובלט אוקסיד. הקובלט משנה את דרגת החמצון שלו והקתודה הופכת לליתיום קובלט אוקסיד. תהליך זה מלווה במעבר אלקטרונים מהאנודה לקתודה דרך המעגל החיצוני ומאפשר הפעלת מכשיר כלשהו. בטעינה, יוני הליתיום יוצאים מליתיום קובלט אוקסיד וחוזרים דרך האלקטרוליט למבנה השכבתי של הגרפיט, תוך כדי שחרור אלקטרונים. למעשה, סוללת ליתיום-יון מבוססת על מחזורי אינטרקלציה (החדרה) ודה-אינטרקלציה (שחרור) של יוני ליתיום לתוך מבנה שכבתי. חצאי התגובות המתרחשות באנודה ובקתודה בטעינה ובפריקה מופיעים להלן:



סוללת ליתיום-יון זיכתה את המדענים אקירה יושינו, מייקל סטנלי ויטינגהם וג'ון גודאינף [בפרס נובל לכימיה לשנת 2019](#). בנימוקים לפרס נכתב בין היתר: "הם יצרו עולם נטען. הסוללה הקלה, הנטענת והעוצמתית הזו נמצאת כיום בשימוש בהכול, מטלפונים ניידים למחשבים ניידים ועד למכוניות חשמליות. היא יכולה גם לצבור אנרגיה רבה ממקורות סולריים ומאנרגיית רוח, ובכך מאפשרת חברה נטולת דלקים [...] הסוללות הללו חוללו מהפכה בחיינו מאז שנכנסו לראשונה לשוק ב-1991, הן הציבו את היסודות לחברה אלחוטית וחופשיה מדלקים ומהוות תרומה משמעותית למין האנושי [...]"

לסיכום, ללא ספק הטלפון החכם - סמארטפון - הוא מכשיר המנצל מגוון רחב של יסודות, ונמנה עם המכשירים שיכולים לפאר ולהלל את מקצוע הכימיה.

מקורות

<https://www.independent.co.uk/news/science/mobile-phones-elements-periodic-table-endangered-chemicals-st-andrews-a8739921.html>

<https://www.compoundchem.com/2014/02/19/the-chemical-elements-of-a-smartphone/>

<https://www.acs.org/content/acs/en/education/resources/highschool/chemmatters/past-issues/archive-2014-2015/smartphones.html>

<https://www.sciencealert.com/watch-the-chemistry-of-a-smartphone>

<https://www.calcalist.co.il/local/articles/0,7340,L-3710873,00.html>

<https://www.energy.gov/eere/articles/how-does-lithium-ion-battery-work>



F
Fluorine

תפקיד הפלואור בחיינו*

פרופ' שלמה רוזן**



אנרי מואסאן שהצליח לבודד את הפלואור וזכה על כך בפרס נובל

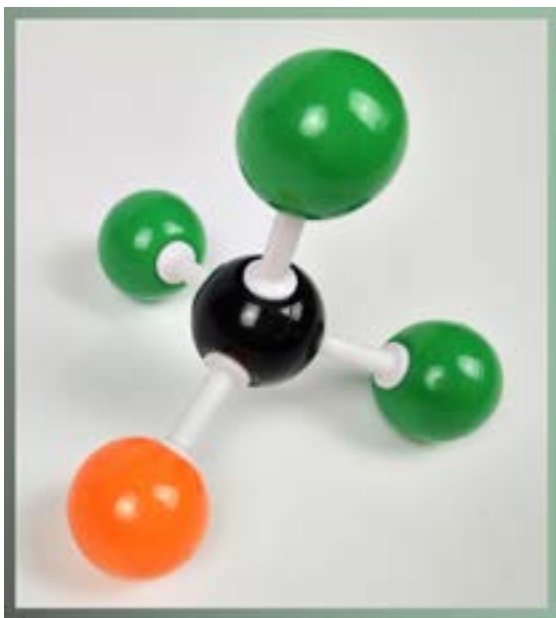
הפלואור היה ידוע עוד בימי הביניים, אך מלבד החומצה שלו (HF), שהשתמשו בה לצריבת זכוכית, לא נמצא לו שימוש. מהמעט שהיה ידוע עליו, מנדלייב, אבי המערכה המחזורית, צירף אותו לקבוצת ההלוגנים, והוא אכן הראשון במשפחה זו, יחד עם כלור, ברום ויוד. הוא גם היה ההלוגן היחיד שלא הצליחו לקבלו בצורתו החופשית. בסוף המאה התשע-עשרה הבין הכימאי הצרפתי אנרי מואסאן, שלא ניתן לבודד את היסוד באמצעים כימיים, ואכן היה הראשון לבודדו, תוך שימוש באלקטרוכימיה. על כך זכה בפרס נובל.

מהר מאוד התברר שהפלואור הוא יסוד ריאקטיבי מאוד, וכשניסו לרתום אותו לריאקציות כימיות אורגניות, שבוצעו בסגנון תחילת המאה העשרים, התוצאות היחידות היו הריסת כל חומר שבא במגע איתו. הדבר גרם לקיפאון בפיתוח הכימיה של הפלואור, ומעט מאוד כימאים טרחו להתעסק עם יסוד זה. הדבר הכמעט יחיד שעלה על הדעת באותה תקופה היתה העובדה שנגזרת

* מבוסס על הרצאה שניתנה בכנס המנהדסים והאדריכלים במרס 2019

** פרופ' שלמה רוזן, ביה"ס לכימיה, אוניברסיטת תל-אביב

בעלות פחמן אחד, שניים או שלושה הקשורים הן לאטומי פלואור והן לאטומי כלור, או ברום, כגון CFC-11 או CFC-12 (CFCl_2); CF_2Cl_2). נמצאו לא רעילות, לא דליקות, יציבות מאוד וזולות להכנה. חומרים אלו עמדו בבסיס פיתוח בתי קירור מודרניים, מקררים ביתיים, מזגנים לתעשייה, למגורים ולכלי רכב. נמצא להם גם שימוש רב בניפוח פולימרים והפעלת אירוסולים. בשנות השבעים של המאה שעברה, מכל מקום, החלו לחשוד במולקולות הנ"ל כי אלו חומרים הורסי אוזון. התברר שה"פושעים" היו אטומי הכלור או הברום, ואכן נכנסו לתמונה מולקולות חדשות שיש בהן רק פחמן, פלואור ולעיתים גם מימן. דוגמה לחומרי הקירור החדשים היא HFO-1234yf ($\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$) וחומרים דומים אחרים.



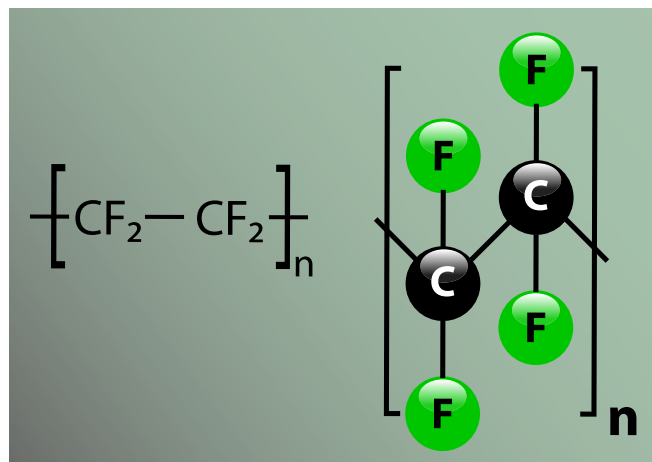
דוגמה לפראון CFCl_3

פריצה אדירה נוספת הקשורה באטום הפלואור ואשר אף היא השפיעה רבות על האנושות, התרחשה באמצע שנות החמישים של המאה העשרים. המדען היהודי יוסף פריד מאוניברסיטת שיקגו פרסם כי סטרואידים מסוימים, כגון קורטיזול, שהוכנסו בהם אטום פלואור אחד או יותר, פעילותם הביולוגית עולה לפחות פי 50! הדבר הוביל לזינוק אדיר במאמצים להכניס יסוד זה למגוון עצום של חומרים. נציין בודדים מהם, כמו 5-פלואור אורציל (5FU) המשמש בסיס לתרופות כימותרפיות רבות, אנטיביוטיקות מודרניות כגון משפחת הקווינולונים, תרופות אנטי-פסיכוטיות (פרוזק), כולסטרול אינהיביטור (ליפיטור), חומרים אנטי-דלקתיים (בטאמתאזון) ועוד ועוד. כיום, כ-30% מהתרופות החדשות המאשרות על ידי ה-FDA מכילות אלמנט זה. בחקלאות מספר זה אף גדול יותר, וממצאים מהתקופה האחרונה מראים ש-50% (!) מהחומרים החדשים המשמשים בשטחי החקלאות השונים מכילים אף הם פלואור.

הפלואור של חומצת החומץ (CH_2FCOOH) הינה רעילה מאוד והצדדים הלוחמים במלחמת העולם הראשונה שקלו להשתמש בה להרעלת בארות המים של האויב. דחיית הביצוע של תוכנית זו הצילה אלפי אנשים מכל הארצות הלוחמות.

עם התקדמות הכימיה והידע בתכונות הפיזיקליות של החומרים, התברר שהקשר פחמן-פלואור (C-F) הוא חזק מאוד, ועל כן במרכז הכימיה הגדול בעולם בעת ההיא - מעבדות דופונט בדלוור ארצות הברית - החלו לחפש דרכים ליצירת פולימרים וחומרים אחרים המכילים בעיקר פחמן ופלואור. החיפוש ערך שנים, אך בסוף, הודות לקצת מזל והרבה עקשנות, הצליחו במרכז זה ליצור את הטפולון הראשון ($[\text{CF}_2-\text{CF}_2]$) וחומרים אחרים הדומים לו. אלו נמצאו כחומרים יציבים ביותר הן מבחינה טרמית והן מבחינה כימית.

כידוע, בזמן מלחמת העולם השנייה החלה ארצות הברית בפרויקט אדיר שלא היה כמותו בהיסטוריה עד אז - פרויקט "מנהטן" - לפיתוח פצצת האטום הראשונה. הפיתוח הראשוני הצריך תרכובות נדיפות של אורניום, והיחידה שבאה בחשבון הייתה התרכובת הגזית אורניום הקסאפלואוריד (UF_6). תרכובת זו מכל מקום היתה מאוד קורוסיבית ואי אפשר היה להכניסה לתאי ואקום כי שום חומר לא עמד בפניה. הבעיה נפתרה בעזרת טפולון וחומרים הדומים לו שהיו היחידים שלא נפגעו מהקורוסיביות של האורניום הקסאפלואוריד.



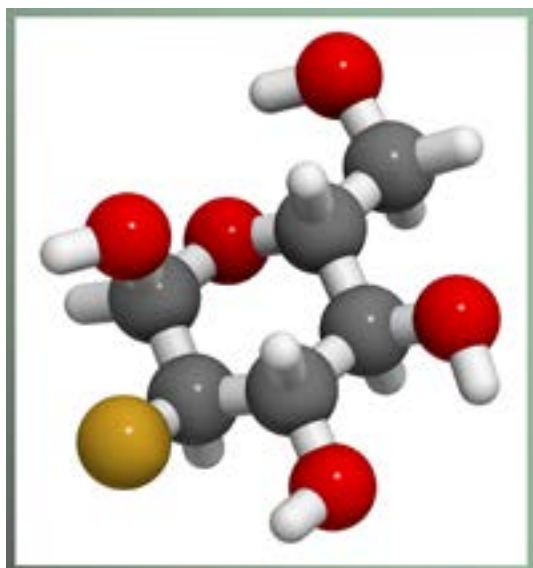
היחידה החוזרת ממנו בנוי הפולימר טפולון

אבל הפלואור מצא שימוש לא רק לצורכי מלחמה. אחד השימושים החשובים הראשונים ששינו את פני העולם ושיפרו את חיי האנושות ללא היכר היו הפראונים הראשונים, ששימשו בעיקר לקירור. בתי חרושת לקרח היו ידועים עוד במאה התשע-עשרה, אלא שהגזים ששימשו לקירור היו בעיקר אמוניה ודו-תחמוצת הגופרית (NH_3 ; SO_2). הבעיה הייתה שגזים אלו רעילים ובחלקם אף דליקים ואין ספור תאונות נגרמו בגינם וגבו את חייהם של אנשים רבים. שוב דופונט תרמה פתרון אדיר לאנושות. תרכובות

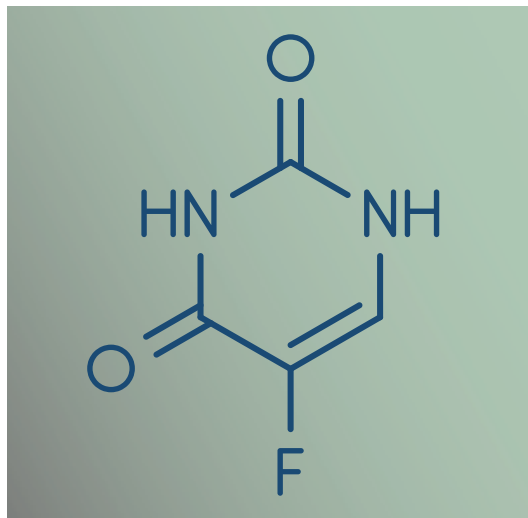
לפלאור תפקיד משמעותי מאוד גם במדע החמרים. קשה לדמיין מחשבים ללא מבודדים המבוססים על תרכובות פר-פלאור או לדמיין מנועים העובדים שנים רבות בלי הפסקה ללא שמנים המבוססים על חומרים המכילים יסוד זה. סיבים אופטיים ייחודיים (טפלו AF), חומרי שטח רבים, ציפויים ייחודיים, חליפות חלל וכולי וכולי - בכל אלה ניתן למצוא אטומי פלאור רבים. פולי או פרפלאורו פולימרים משמשים רבות גם בביתוחים, בעיקר כשיש צורך לעטוף או לחזק אברים פגועים כגון עורקים ראשיים או חלקי קיבה פגועים. היתרון האדיר של פולימרים אלו הוא שאינם רעילים, יציבים לכל החיים ולא גורמים לדחיייה על ידי הגוף.

נוכח מגבלות היריעה, נסיים רק באזכור שטח חדש, יחסית, המתפתח במהירות - הוא טומוגרפיית הפוזיטרונים (PET). אפשר כיום בעזרת ציקלוטרון להכין איזוטופ לא טבעי של פלאור שהמסה האטומית שלו היא 18. זהו איזוטופ לא יציב, המשחרר פוזיטרונים (אלקטרונים חיוביים) וזמן מחצית חייו כשעתיים. כשחומרים המכילים איזוטופ זה פוגשים חומרים טבעיים, הרי הפוזיטרון המשתחרר מתנגש באלקטרון, והתוצאה היא שחרור קרינת גמא ייחודית שניתן לגלות באמצעות דטקטורים מיוחדים. הדבר הוביל בין היתר למיפוי מפורט של מוח האדם וכן לגילוי תאי סרטן במקומות שקשה לגלותם אחרת. בארץ, המרכז ליצירת חומרים המכילים את איזוטופ ה-F-18 הוא בית החולים הדסה ירושלים, בהנהלת פרופסור אייל משעני, ומשם הם נשלחים לרוב בתי החולים במדינה.

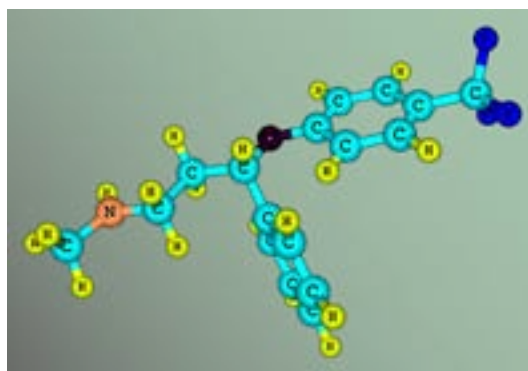
לסיום נציין כי ערכם של החומרים המכילים פלאור המיוצרים בעולם נאמד בלמעלה מ-200 ביליון דולר בשנה. אכן זהו נימוק משכנע לחשיבותו של יסוד זה הנמצא בפינה הימנית העליונה של הטבלה המחזורית.



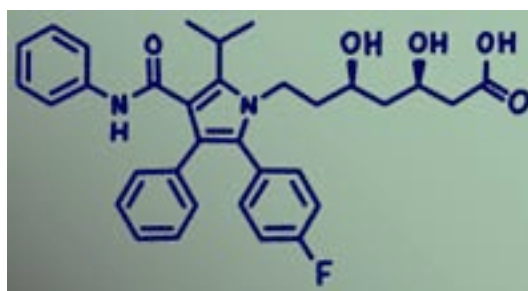
פלאורודאוקסי גלוקוז, משמש כחומר למיפוי המוח ולאבחון תאי סרטן שונים



5 פלאורו אורציל שמהווה בסיס להכנת תרופות כימותרפיות



תרופה אנטי פסיכוטית - פרזוק



ליפיטור, תרופה להורדת כולסטרול בדם.

תקצר היריעה מלפרט את כל הטכנולוגיות שמשמשות בפלאור, אך איננו יכולים שלא להזכיר את הדם המלאכותי (כגון פרפלאורו-דקליון), המאפשר העברת חמצן לתאים וסילוק הפחמן הדו-חמצני מהם. השימוש בחומרים אלו נעשה כשיש מחסור בדם מתאים, כגון בזמן ניתוחי חירום ובמקרים אחרים. ואם אנו נוגעים בביתוחים, הרי שחומרי ההרדמה היום, הבטוחים עשרות מונים יותר מחומרי ההרדמה של הדור הקודם, מכילים אטומי פלאור רבים (כגון איזופלאורן - $CF_3CHClOCHF_2$, דספלאורן - $CF_3CHFOCHF_2$).



הגרסה העברית של שיר היסודות

ד"ר אבי סאייג*

בני השישים שעדיין זוכים למיליוני השמעות בשנה, אם בכלל. ככל הנראה, כשם שהטבלה המחזורית נשארה רלבנטית 150 שנה לאחר המצאתה, גם שירים שנכתבו עליה אינם מתיישנים, ונשארים רלבנטיים עשרות שנים לאחר שיצאו.

שירו של לרר זכה לאזכורים תרבותיים רבים לאורך השנים. בסדרות כמו בנות גילמור והמפץ הגדול הדמויות שרות את השיר; השחקן דניאל רדקליף (מי שגילם את דמותו של הארי פוטר בסדרת הסרטים הידועה) דקלם את השיר בתוכנית אירוח, ועוד. לסקרנים אני ממליץ לחפש ביוטיוב את הביטוי: [the elements](#) לתרגום ליפנית (חפשו [The Elements song in Japanese](#)) ולהתרשם מרוחב ההתייחסויות. כמו כן, השיר זכה גם בליווי קליפ מרהיב עין.

לפני כארבע שנים, ערוץ היוטיוב המדעי [AsapSCIENCE](#) הוציא קליפ יסודות לפי הנעימה הקלאסית קאן-קאן של המלחין

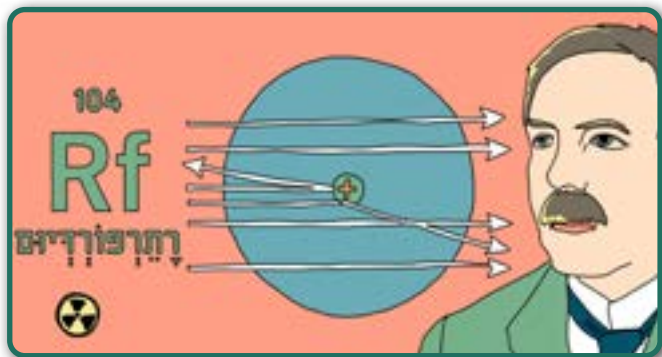
שירי יסודות בעולם

בשנת 1959 פרסם הזמר-יוצר האמריקאי טום לרר (Lehrer) שיר בשם "היסודות" (The Elements) שבו הוא מונה ברצף את כל היסודות המופיעים בטבלה המחזורית - לפחות אלו שהיו ידועים בזמנו. לרר כתב את מילות השיר לפי לחן של ויליאם גילברט וארתור סאליבן (לשיר האופרה "אני הוא המודל לתת-אלוף החדש"). שירו הסתיים ביסוד הנובליום (מספר אטומי 102). לרר היה חכם מספיק לסיים את השיר בשורה שלפיה אלו היסודות הידועים לנו היום, אבל בהחלט יכולים להיות רבים אחרים שטרם התגלו (ואכן, בימינו הטבלה מכילה 118 יסודות).

שירו של לרר זכה להצלחה רבה, ועודנו זוכה לה - גם לאחר 61 שנה אפשר למצוא ביוטיוב עשרות ביצועים וקליפים של השיר, וכל אחד מהם זוכה למיליוני צפיות מדי שנה. אין שיר אחר של לרר ששרד במידה כזאת את מבחן הזמן, ובכלל, מעטים השירים

* ד"ר אבי סאייג, היחידה לחינוך מדעי בדיגיטל, מכון דוידסון לחינוך מדעי

דמותו של רתרפורד ובנוסף איור הממחיש את הפרשנות שלו לניסוי עלה הזהב המפורסם (שגילה שהמטען החיובי באטום מתרכז במרכז, בגרעין).



רתרפורד והניסוי של עלי הזהב המייצגים את היסוד רתרפורדיום
איור: איילת אלכנדה

השיר כולל גם התייחסויות לקבוצת המתכות האלקליות, הגזים האצילים וההלוגנים - ועבור כל אחד מאלה הכנו הנפשה המתאימה למילות השיר. למשל, עבור מתכות אלקליות אפשר לראות באיור תגובה עם מים, כמו שתראו להלן.



ניסוי המדגים את התגובה של המתכות האלקליות עם מים
איור: נעמה זיו חיון

פרסום הסרטון ותגובות

הסרטון פורסם ברשת לקראת יום הולדתו של מנדלייב (8 בפברואר), וזכה לתגובות נלהבות, הרבה מעבר למה שציפינו. הוא זכה ליותר מ-59 אלף צפיות בפייסבוק (ושני בלבד לפרסום המצליח ביותר בתולדות פרסומי מכון דוידסון בפייסבוק). לשבעת-אלפים צפיות נוספות ביטיוב - נכון למרץ 2020 כחודש לאחר צאתו (ולסרטון הנצפה ביותר בערוץ באותו החודש מתוך מגוון של כאלף סרטים). בנוסף זכה הסרט ליותר מ-900 תגובות בפייסבוק (מי היה מאמין שהטבלה המחזורית תזכה ליותר תגובות מכתבות על בר רפאלי :-)), רובן ככולן מהללות. חלק מהגולשים גם הכירו את הרפרנס של שירי היסודות באנגלית והגיבו על כך, הנה מעט מהתגובות:

ז'אק אופנבך. הקליפ שמלווה את השיר כלל איורים פשוטים עבור חלק מהיסודות, שמציגים שימושים או המצאות של כל יסוד וזכה להצלחה רבה ברשת.

גרסה עברית

הרעיון להפיק גרסה עברית של שיר היסודות עלה במוחי כבר לפני מספר שנים, וכאשר מכון דוידסון הכריז בשנה שעברה על הטבלה המחזורית כתמה מרכזית - קפצתי על ההזדמנות להוציא את הרעיון אל הפועל. באופן כללי, רציתי לשלב בין השיר של לרר לבין הקליפים היפים הנמצאים ברשת.

יחידת הווידאו, שאני חלק ממנה, נרתמה למשימה (שרק בדיעבד הבנו כמה היא גדולה ומורכבת). תחילה פנינו לדניאל זיידימן, סטודנט במכון ויצמן שזכה בשנה החולפת בתחרות כישרונות של המכון המשלבת מדע ותרבות. ההנחיה עבורו הייתה לכתוב שיר שיכלול רצף של כל היסודות, כאשר מדי כמה יסודות מומלץ לשלב בית שיתייחס לקבוצות נבחרות בטבלה. דניאל נרתם למשימה ולאחר כמה שבועות תיקונים היו לנו שיר ולחן מקורי בליווי גיטרה (כך גם נמענו מבעיות של זכויות יוצרים).

ענה עברנו להנפשה. כל יסוד זכה לאיור מקורי המציג את הימצאותו בטבע או שימוש שנעשה בו, ובהיעדר שני אלו, איור הנקשר לשמו של היסוד. איילת אלכנדה, נעמה זיו-חיון ורונית צווייג נרתמו למשימה המפרכת של הכנת 118 איורים מקוריים. לנושאי האיורים הקפדתי לבחור לא רק במובן מאליו, אלא גם שימושים "חידתיים" ביסודות, המצריכים חיפוש או למידה קצרה ממי שירצה להבין את ההיגיון בבחירת האיור. כך למשל, יסוד ההליום הומחש גם על ידי צרור בלונים (מובן מאליו) וגם על ידי מכשיר MRI (הליום נוזלי משמש נוזל קירור של סליל האלקטרומגנט במכשיר, וזהו שימוש שאינו מוכר וידוע לכול).



דוגמה לשימושים של הליום איור: נעמה זיו חיון

ביסודות שאין בהם שימוש, ונקראו על שמות של מדענים חשובים, הקפדנו לאייר גם את הניסוי המפורסם או התגלית המפורסמת של אותו מדען. למשל, ביסוד רתרפורדיום מופיעה



הסרטון הוצב כאתגר לצופים, שהתבקשו לנסות להסביר את ההיגיון העומד מאחורי כל איור, וגולשים רבים נענו לאתגר וענו תשובות נרחבות מאוד, גם כאלה המצריכות חיפוש נרחב של מידע, כלומר, הסרט והחידות שבו גרמו לאנשים לפעול ממש, לחקור, לחפש מידע וללמוד, כמו בדוגמה שלהלן.



את הסרט מלווה כתבה באתר דוידסון, המרחיבה על כל יסוד ואיור המופיע בסרטון. כדי לחזק את האלמנט התרבותי של השיר (שכאמור, קיים בהרחבה בשיר באנגלית), אנו מכינים גם גרסת קריוקי לשיר שתעלה בקרוב לרשת; ובנוסף אנו מכינים טבלה מחזורית בעברית, עם איורי היסודות, כשם שהם מופיעים בקליפ (מרהיבת עין!). את הטבלה נדפיס בגודל פוסטר ונחלק למורים המבקרים במכון דוידסון כדי שיוכלו לתלות אותה בכיתות המדעים בבתי הספר.

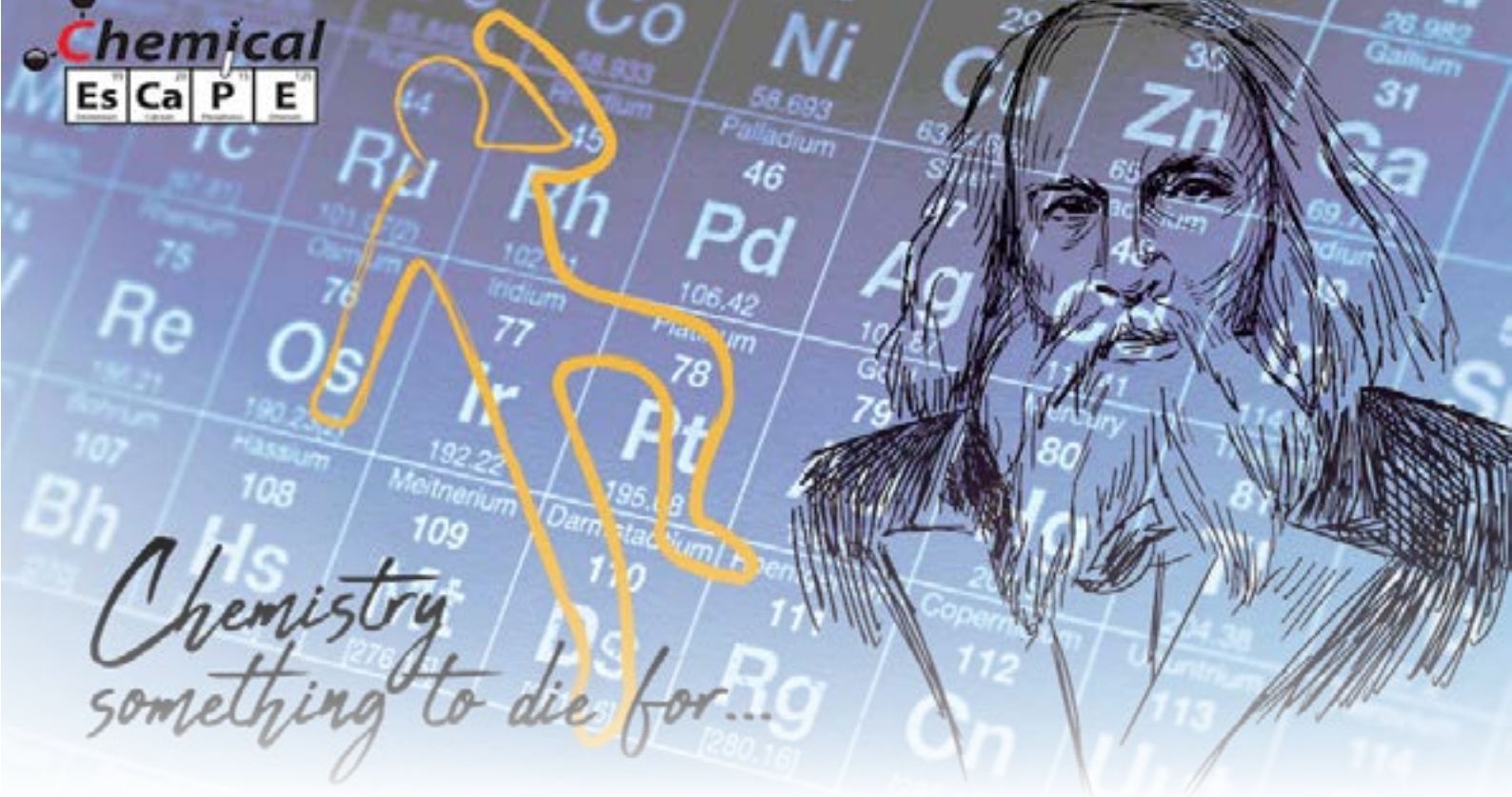
כדי להתרשם מהשיר חפשו: "המנון היסודות דוידסון",

בקה בקישור: <https://davidson.weizmann.ac.il/online/ptable>

או סרקו את הברקוד:

נציין לטובה גם את דנה פרל ושירה ברק מיחידת הווידאו במכון, שהיו אמנות על הפקת השיר.





חדר בריחה בנושא הטבלה המחזורית: עשו זאת בעצמכם

ורד אדלר, חגית לוי, ענבר חיימוביץ, שלי רפ ומלכה יאון

השימוש בד'אנר הפופולרי של חדרי בריחה, שבו אנחנו משתמשים בידע הכימי ובאינטואיציה וזקוקים לקצת מזל כדי לפתור את החידות, הפך לדרך מעניינת להגביר את המוטיבציה בקרב תלמידי הכימיה זה מספר שנים.



איור 1. חידה 1: גלו 3 יסודות במפה

נבדקה ויושמה בשיעורים נבחרים, הוסקו מסקנות מהמשוב שהתקבל ונוצרה גרסה משופרת של הפעילות.

בדרך כלל חדר בריחה בנוי בצורה רציפה: כל פאזל מוביל לאחר. המשמעות היא שאם מורה משנה אחת מהחידות, הדבר יוביל לשינויים בחידות האחרות בחדר. בגרסה של חדר זה כל אחת מהחידות היא עצמאית. אם מורה מבצע שינוי באחת מהחידות (או אפילו מבקש לא להשתמש בה), הדבר לא משפיע על תרחיש החדר כולו. עיקרון זה הוחל כאשר הצגנו את החדר בשלושה אירועים לא רשמיים: כנס ECSITE בדנמרק ב-2019, ב"מדע על הבר", ובליל המדענים והמדעניות כפי שיתואר בהמשך.



איור 2: תפאורה בחדר הבריחה במעבדה

סיפור המסגרת של חדר הבריחה מסופר מחוץ למעבדה, כאשר מתוכה בוקעת מוזיקה:

"הבוקר הגעתי למעבדה ונבהלתי נורא... אני כל כך מצטערת שאפשרתי לתלמידים לקיים כאן מסיבה! הם השאירו בלגן, אורות דולקים ומוזיקה רועשת... אבל כל זה שום דבר, כי בפנית החדר גיליתי... גופה! אתם חייבים לעזור לי לברר מה קרה כאן.

במעבדה המוזיקה מרעישה ובפנית החדר מוטלת "גופה" באזור סטרילי (איור 2).

התלמידים מקבלים ערכת חוקר הכוללת גם טבלה מחזורית שכתוב עליה: "אולי הטבלה תעזור לכם להגיע לאמת, סמנו 19 יסודות שתגלו. כדי להצליח במשימה עליכם לעבוד באופן יסודי ובשיתוף פעולה. בהצלחה - סומכת עליכם!"

היסודות מוחבאים בניסויים, בחידות ואפילו בשירים. על מנת לאפשר לכם לחוות, קצת מהחוויה של חדר הבריחה בנושא הטבלה המחזורית, פיזרנו חידות בכתבה. הקשיבו ל-[מוזיקה](#) שמתנגנת ברקע בחדר וגלו בה- 3 יסודות. את הפתרונות לחידות תמצאו בסוף הכתבה.

התיאור הטוב ביותר לפעילות זו מתואר במילותיו של תלמיד מתיוון הראשונים, הרצליה, שחווה את הפעילות:

"צוות כימיה אירגן חדר בריחה מטעם המגמה. הפעילות הייתה ממש מהנה! היא שילבה תחומים שונים שאנו לומדים בכימיה ולמעשה יישמנו את הידע שצברנו במהלך השנים במהלך הפעילות. הפעילות כללה לפתור חידות, לפרוץ מנעולים ולהכין דברים שונים (וגם משונים...). זה הוציא אותנו משגרת הלימודים וכמו שאומרים: 'זה בא בול בזמן'. אני רוצה לראות פעילויות שונות כאלה גם במקצועות אחרים כי זו דרך יפה לראות איך הידע שאנו צוברים מתממש בסופו של דבר ורואים את התוצאה על פני השטח."

חדר בריחה כימי הוא חדר בריחה לכל דבר ובנוסף עליו להתאים למסגרת של מערכת החינוך. עד כה פותחו שלושה חדרי בריחה מסוג זה, המופעלים בבתי ספר רבים בארץ (על ההתאמות שנעשו אפשר לקרוא [בכתבה בעיתון על-כימיה](#)). חשוב לציין כי נדרש מאמץ לא מועט מצד המורים והלבורנטים בהפעלת החדר בבית ספר: החל מהשתתפות בחשיפה במכון ויצמן, דרך הרשמה להשאלת הערכה, שינוע הערכה ממכון ויצמן ואליו, ועד פריסת הערכה וניקוי בתום כל שימוש, אך המאמץ משתלם! התגובות של התלמידים גורמות למורים להתאמץ שוב ושוב בהפעלת החדרים הללו.

חדר בריחה כימי לכל בית ספר - חדר "עשה זאת בעצמך"

צוות חדרי הבריחה במחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן חשב שצריך לחשוף הרבה יותר תלמידים לפעילות המוצלחת הזאת. לכן לכבוד אירוע חשוב שצוין בשנה שעברה (2019) - 150 שנה להמצאת הטבלה המחזורית על ידי דימיטרי מנדלייב - גיבשנו ועיצבנו חדר בריחה כימי בנושא "הטבלה המחזורית". בחדר בריחה זה המשתתפים מתבקשים לפתור תעלומה באופן יסודי מאוד! עליהם למצוא את הגורם למוות מסתורי. חדר זה שונה מקודמיו שפותחו עד כה, שכן זהו חדר בריחה שמורים יכולים לבנות לבד!

החדר נשאר בבית הספר ומורים לא צריכים להשאילו מהמכון. החידות כוללות עובדות מעניינות על היסודות, על השימוש שלהם, על תכונותיהם, כמו גם על מודל מבנה האטום. החדר מתאים לתלמידי כימיה בחטיבת הביניים ובתיכון וקל מאוד להתאימו לתוכן או אוכלוסייה אחרים.

פיתוח החדר התחיל במהלך השתלמות קיץ (2018) למורי כימיה, שם עיצבו מורים (רשימת המורים מופיעה בעמוד 41) את הגרסה הראשונה של החדר. לאחר מכן שופרו החידות על ידי צוות חדר הבריחה במחלקה להוראת המדעים, שהציג אותו לראשונה בפני קהילת המורים המובילים לכימיה, ואלה נתנו משוב. הפעילות



קו נקודה: חיבור בקו רק של היסודות בעלי מטען גרעיני עוקב.

יחשוף את היסוד ?

S. — Al. Na. C. N. H. He.

P. Si. Ne. O. Be. Li. He.

איור 3. חידה 2: חיבור בקו של היסודות בעלי מטען גרעיני עוקב יחשוף יסוד.

סדנאות לבניית חדר הבריחה

חדר הבריחה במהלך חופשת חנוכה. לאחר הצלחה גדולה של הסדנה ופנייה של מורים רבים הוחלט לקיים סדנאות נוספות בקהילות של מורים ברחבי הארץ (מכון ויצמן, מודיעין, חיפה, באר שבע, טירה, נצרת, כפר סבא ועוד).

בסדנה המורים מקבלים את החידות מודפסות ומכינים מספר חידות "רטובות", כך שיוצאים ממנה עם ערכה כמעט מוכנה.

כל ההוראות לבניית החדר והגרפיקה להדפסה פורסמו [באתר הארצי למורי הכימיה](#). מורים רבים יצרו את החדר. למרות ההתלהבות מחדר הבריחה, רוב המורים לא הצליחו להביא את החדר לידי ביצוע בפועל, בגלל עומסי ההוראה של שנת הלימודים. הוחלט אפוא לקיים סדנה להכנת ערכה אישית של



איור 4. שולחן עם הציוד שמורה מקבל בסדנה להכנת חדר הבריחה

הבריחה בנושא הטבלה המחזורית. לאחר שהתלמידות גילו את גורם הרצח ואכלו שוקולדים הן עברו לחדר אחר שהוכן מראש במיוחד עבור "טקס קבלת הטבלה המחזורית" (ותודה לערן שמואל ולקרן מנדה על הרעיון).

כל תלמידה ניגשה למורות, קיבלה טבלה מחזורית מנוילנת ששמה מודפס עליה ולחיצת יד. כמובן לא שכחנו להצטלם עם הטבלה המחזורית יחד ולחוד.

התלמידות התרגשו מהמעמד ושמוחו לקבל את הטבלה שתלווה אותן עד סוף כיתה י"ב. לסיכום: פעילות מומלצת להעצמת החוויה של חדר הבריחה.



איור 6. תלמידת מגמת כימיה בכיתה י' בתיכון אולפנת בני עקיבא "אורות מודיעין" הילה לוי מקבלת טבלה מחזורית בטקס לאחר חדר הבריחה

בטירה יזמו המורות לכימיה פאדיה חטיב וחנין בשארה מבית ספר עמל 1 על שם אברהמים קאסם, הפעלת חדר הבריחה בנושא הטבלה המחזורית לכיתות ט בשלושה בתי הספר בעיר. מטרת היוזמה הייתה לשווק את מגמת הכימיה בבית הספר בטירה. הפעילות היתה מעולה, התלמידים שחקו ונהנו ושתפו פעולה באופן יוצא מן הכלל ומקווים שהפעילות תיסע פרי.

החדר הופק והופעל במסגרות שונות

לחדר הבריחה בנושא הטבלה המחזורית הייתה גם חשיפה באירועים שאינם רשמיים, דהיינו, מחוץ לכיתה הלימוד. החדר הועבר ב"מדע על הבר", מסגרת שבה מדעני מכון ויצמן מעבירים לקהל הרחב הרצאות בברים ברחבי תל אביב. במסגרת ההרצאה באי הבר נחשפו לסיפור המקרה, הימצאות "גופה" בבר, והיה עליהם למצוא רמזים ולגלות מה התרחש. זו הייתה הפעם הראשונה שבה אנשים שאינם מתחום הדעת התנסו בחדר. לצורך כך הוכנסו רק חלק מחידות החדר, דבר שהתאפשר הודות



איור 5. מורות שהשתתפו בסדנה לבניית חדר הבריחה

המורה ענת ניר גנש מתיכון הרצוג בכפר סבא השתתפה בסדנה, בנתה את החדר, הפעילה אותו בכיתה, ומספרת,

"מחצית השנה הייתה בשבילי הזדמנות טובה לשבירת שגרה עם פעילות שמותאמת לתכנים הלימודיים בכימיה. שכבת יא זכתה לחדר בריחה 'הטבלה המחזורית', אליו נחשפתי, כמורה, ואף זכיתי להשתתף בסדנה להכנת חלק ממרכיבי החידות. חדר בריחה זה דורש אומנם שעות של הכנת חומרים (למינציות, הדבקות, תמיסת בורקס ועוד...), אך ניתן להפעילו באופן פשוט ביותר אחרי החשיפה והסדנה. התלמידים נהנו מאוד מהמשימות, מההבנה שיש צורך בשיתוף פעולה, בחיפוש רמזים ברחבי חדר המעבדה, כשברקע סיפור... הייתה התלהבות רבה מההשקעה שלי כמורה וקיבלתי מהתלמידים משוב מאוד חיובי על כך ועל כך שצריך למצוא עוד פעילויות יצירתיות מהסוג הזה להפגת רצף הלימוד האינטנסיבי. ממליצה בחום לכל מורה לכימיה לעבור חשיפה לכל חדרי הביחה המוצעים ולקחת חלק פעיל בהפעלתם."

הדים מהשטח: הפעלת החדר לשיווק המגמה וטקס קבלת טבלה מחזורית.


כחודש לאחר פתיחת מגמת כימיה בכיתה י' בתיכון אולפנת בני עקיבא "אורות מודיעין" הפעילו ורד אדלר וחגית לוי את חדר

וחטיבות ביניים. היה אפשר לראות את סקרנות המשתתפים ואת ההתלהבות מעצם החשיפה לחדר ואת הרצינות והדבקות במטרה להגיע לפתרון. ההצלחות שחוינו מחדרי הבריחה הלא רשמיים מעלים את רצוננו להמשיך ולפתח עוד חדרי בריחה כימיים וכן לחשוף חלק מהם גם בצורה לא רשמית, לקהל הרחב.

אין ספק שהכנסת חדרי הבריחה למגמת הכימיה יצרה אווירה חדשה ומיוחדת. אנחנו מקווים שמספר גדול של תלמידים יוכלו לחוות את החוויה המיוחדת וגם לגרום לתלמידים לחשוב על חידות שהם יצרו בעצמם!

לגמישות החידות וחוסר התלות ביניהן. החדר הופעל לכמות גבוהה יותר של משתתפים (כ-50 אנשים). הבר התמלא בשיחות על כימיה, שמות של יסודות ותכונות הועלו מכל עבר והיה אפשר לראות את ההתלהבות של באי החדר בכל פעם שחשפו יסוד או חיפשו רמזים לפתרון התעלומה.

מסגרת לא רשמית אחרת שבה הופעל חדר הבריחה הייתה "ליל המדענים והמדעניות". זהו פסטיבל שנתי המיועד לקהל הרחב ומאפשר הצצה לעולם המדע בגובה העיניים. גם כאן הותאמה הפעילות למשתתפים שאינם בהכרח בקיאים בנושא הטבלה המחזורית. רוב המשתתפים שהגיעו היו תלמידי תיכון



W

A

Z

E

סמנו על הטבלה המחזורית את מסלול הנסיעה, המסלול שתצטרך יגלה לכם את היסוד הנסוע. ?

אנחנו מוכנים סע בזהירות. הכל מוכן, בא מצא לדרך.

התחל מ: 2,7

הורד 2 פרוטונים

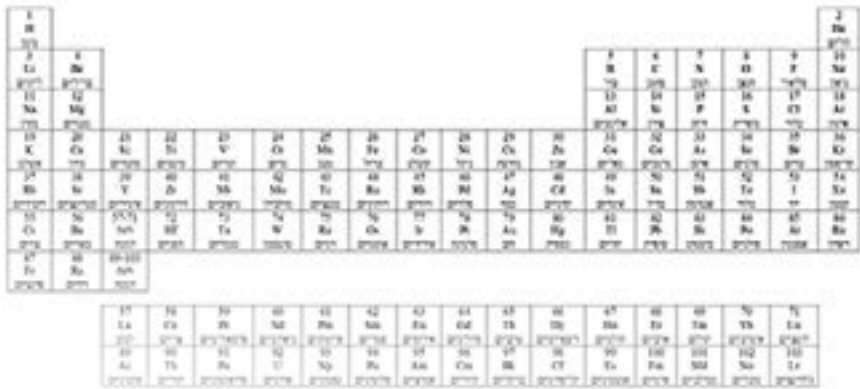
הוסף 2 רמות אנרגיה

סנה ימינה אל ההלוגן

בקר אנל ההלוגן הכבד ביותר

סנה ל- 83

הגעת ליעד, המסלול שציררת יגלה את היסוד ?



איור 7. חידה 3: סעו על פי ההוראות, המסלול יגלה את היסוד!

מורים שהשתתפו בקורס קיץ

ז'אנה אוסיפוב, אור איצקוביץ, פרידה אלול, עירית ארנן, שרילי ברקוביץ, אורית וינשטוק, דרורה ורדי, דפנה ים, עדנה כהן, בתיה ליפשיץ גולדרייך, סיגי מוסינזון, שושנה מנור, שולמית עצינו, ענת פלדנקרייז, ירדן קדמי, ורד שאנן, עדינה שינפלד, איריס שנער, בלה שקולניק ובאווה תמם.

1. על המפה: Fr, Ge, Po
2. חיבור בקר: Br
3. S: WAZE
4. Tl, Au, Ag: מוזיקה

טודיטה ורטט

פרס המורים המצטיינים לשנת 2019

החברה הישראלית לכימיה

הזוכים בפרסים ע"ש דליה צ'שנובסקי להצטיינות בהוראה מטעם החברה הישראלית לכימיה, לשנת 2019, הם: הפרס למורה הותיקה הוענק לגב' **מרים גלרמן** מבית הספר התיכון ע"ש קלעי בגבעתיים. זוכה הפרס למורה בתחילת דרכו הוא **יגאל לינקובסקי**, רכז מגמת הכימיה בבית הספר התיכון ע"ש הנשיא יצחק בן צבי, קריית אונו.



מרים גלרמן היא בעלת תואר ראשון בכימיה מאוניברסיטת בר אילן ובעלת תואר שני בהוראת המדעים בהצטיינות, גם הוא מאוניברסיטת בר אילן. מרים מלמדת כיום כמורה לכימיה בתיכון ע"ש קלעי בגבעתיים, לאחר שנים רבות של הוראה בתיכון הממלכתי-דתי צייטלין בתל אביב. מנהלי בתי הספר בהם עבדה, עמיתים לצוות ודורות של תלמידים, מעידים על על מקצועיות רבה, מסירות ויצירתיות. על תשוקה לחידושים ולהוראה מיטבית, ועל הרוח הצעירה לנסות אסטרטגיות הוראה חדשות ופדגוגיה חדשנית. במיוחד מודגשת תרומתה של מרים לקידום תלמידים חלשים ולהגעה להישגים, תוך עידוד ותמיכה של כל תלמיד, בכל רמה ובשעות נוספות מעבר לשעות ההוראה. מרים ניחנה באישות טובות לב, היא חייכנית, סבלנית ובעלת קסם אישי. מרים היא מופת למורה מקצועית לכימיה, המהווה גם דמות חינוכית משיכמה ומעלה. מרים היא מורה מלאת אנרגיות, אשר מרבה להתעדכן, לחדש ולהתחדש בכל הקשור בהוראת הכימיה. הפרס מוענק למרים גלרמן על מפעל חיים של 50 שנות הוראה בכימיה.

יגאל לינקובסקי מחזיק בתואר ראשון כפול בכימיה ובהוראת הכימיה מהטכניון ובעל תואר שני בכימיה ובילוגיה מבנית, גם הוא מהטכניון. יגאל משמש כרכז מגמת הכימיה בתיכון ע"ש הנשיא יצחק בן צבי, קריית אונו. הוא מורה צעיר המביא איתו אנרגיות חדשות ומוטיבציה גדולה להוראת הכימיה, מגלה מסירות רבה, מקצועיות ויצירתיות, להט אינסופי לגיון בהוראה ויצירת סביבה ייחודית ומעניינת. הוא מקורי, מחדש ומתחדש, ופועל רבות לקידום הכימיה בבית הספר מעבר לשעות ההוראה בכיתה. לדוגמא, הוא יוצר ערבי הקרנה של סרטים כימיים המלווים בהרצאות מדעיות הקשורות לסרטים, מועדד את התלמידים להשתתף בפרוייקטים ייחודיים כמו הכימיה והפרוייקט התחרותי "יש לנו כימיה". הוא הרוח הצעירה, החדשנית, מלא ההשראה והיוזמה בצוות הכימיה של בית הספר, מצליח לסחוף תלמידים ומורים כאחד, בזכותו קיים ביקוש גבוה בבית הספר למקצוע הכימיה ולמגמת הכימיה.



