



כימיה כללית ופיזיקלית לרפואה, מס' קורס 124507

חברת הכנה לקורס 'כימיה כללית ופיזיקלית לרפואה'

מהדורה שנייה, ספטמבר 2024

מאת: ד"ר גלית פרברי

הפקולטה לכימיה ע"ש שוליון, הטכניון

דבר המחברת:

סטודנטים/ות יקרים/ות, ברוכים/ות הבאים/ות לקורס!

חוברת זו נועדה לסייע לכם להתכונן לקורס, שיפתח בסמסטר הסתיו הקרוב. חלקכם מגיעים עם רקע מסוים בתחומי הכימיה (כגון לימודים בהיקף של 5 יחידות בגרות בכימיה בתיכון) ואילו עבור אחרים מכם ייתכן וזוהי חשיפתכם הראשונה לכימיה. חוברת זו נועדה לסייע לכם להשלים פערים בידע המקדים שלכם, אם ישנם, עבור פרקי הקורס הראשונים.

חשוב לי להבהיר שחוברת זו אינה מנסה ואינה מתיימרת להוות ספר לימוד ו/או להיכנס לעומקם ולרוחבם של המושגים המוצגים בה. מטרתה לאפשר לכם "ליישר קו" על חומר הרקע ולהגיע עם הבסיס המינימלי ההכרחי על מנת להתמודד עם תחילת הקורס שלנו.

השתדלתי לשבץ תרגילי הדגמה בכל פרק (או תת פרק), ואני מעודדת אתכם לנסות לפתור אותם בעצמכם (מבלי להיעזר במהלך הפתרון בתשובות המופיעות בנספח הסיום). כאשר נתחיל את הקורס, צוות הקורס יניח כי אתם יודעים את החומר הנלמד בחוברת זו, ולכן חשוב שתשלטו בו היטב. בנוסף, אתם מוזמנים להיכנס לקישורים (לינקים) המופיעים בהערות השוליים על מנת להעשיר את ידיעותיכם בנושאים שיוצגו. מי שמעוניין בכך, יכול גם להיעזר באחד מספרי הלימוד של הקורס – General Chemistry מאת Petrucci, Herring, Madura, Bissonete, בהוצאת Pearson Canada (Toronto).

ללא קשר לרקע הקודם שלכם בתחום, אני מאחלת לכם הנאה רבה מלימודי הכימיה על כל רבדיה (גם אלה המופיעים כאן וגם אלה שתלמדו בהמשך הדרך) ומקווה שיהיו לכם הרבה הצלחה וסיפוק בלימודיכם האקדמיים.

תודתי נתונה לד"ר מרב גבע ומר יובל זרטל מהפקולטה לכימיה, על תרומתם לשיפור החוברת.

מאחלת קריאה נעימה ולימוד מועיל!

גלית (ספטמבר 2024)

תוכן עניינים:

הקדמה – מה היא כימיה, תתי-תחומים של כימיה.....	עמ' 3
פרק א – חומרים, אטומים, תרכובות.....	עמ' 4
פרק ב – איזוטופים, מסות, ומושג המול.....	עמ' 12
פרק ג – תגובות כימיות, סטויכיומטריה, איזון משוואות תגובה.....	עמ' 19
פרק ד – ניצולת, מציאת נוסחה אמפירית מאנליזת שריפה, גורם מגביל.....	עמ' 23
פרק ה – תערובות, תמיסות, ריכוזים.....	עמ' 28
נספח: פתרונות לתרגילים.....	עמ' 31

הקדמה – מה היא כימיה?

כימיה היא ענף של מדעי הטבע, העוסק במבנה, תכונות ותגובות של חומרים. כמובן, שלשם שלמותה של הגדרה הזו תצטרכו הגדרה עבור חומרים (מטה), אבל בהקשר של הקורס הנוכחי, כימיה היא המדע העומד מאחורי היכולת להבין לא רק את הגוף החי ומרכיביו (ההבדל בין חלבונים לפחמימות וכו') אלא גם השינויים העוברים עליהם, בין אם לאורך הזמן, ובעקבות חשיפה לתנאים ולחומרים שונים. היכולת להבין את תפקודו של תא, למשל, מצריכה ידע עמוק בתחומי הביוכימיה, הנשענת בתורה על כימיה. כאשר אתם שואפים חמצן ונושפים פחמן דו חמצני, התהליכים בגופכם (ומדוע הם נדרשים לחיים) מוסברים על ידי כימיה. כאשר, בהמשך הדרך, תרשמו למטופל תרופה, הכימיה היא זו שתאפשר לכם להבין את ההבדל בין התרופה שרשמתם לבין תרופה אחרת, והכימיה היא זו שעומדת מאחורי ההסבר כיצד תרופה זו משפיעה על הגוף. כימיה מסבירה כיצד תפרים נמסים, ומדוע דבקים רפואיים מצליחים להדביק יחד רקמות, וכימיה עומדת מאחורי ההסברים של הולכה עצבית, אופן הכיווץ של שרירים, ועוד ועוד.

אבל מעבר לכך, כימיה היא מדע בסיסי, המאפשר לעוסק בו (והלומד אותו) לקבל תובנות רבות על העולם שסובב אותו. כל חומר שאתם פוגשים (מתכת, זכוכית, עץ, פלסטיק, אוויר וכו') וכל שינוי בו (שריפה, החלדה וכו') מוסבר ע"י כימיה, והכימיה מאפשרת ליצור חומרים חדשים באופן מלאכותי (פולימרים חדשים, תרופות). מניסיוני עם קורסי מבוא אחרים לכימיה, סטודנטים רבים שטרם נחשפו לכימיה לפני הקורס, מדווחים בסוף הקורס שהם רואים את סביבתם באופן שונה ומעמיק יותר, ואני מקווה ומאחלת לכם, הקוראים, חווייה דומה. בתקווה, קורס זה, שמספק רק "אשנבים" מצומצמים למספר תחומים בכימיה, יעורר את סקרנותכם להתעמק בהם הלאה.

דוגמאות לחלק מן התחומים בהם עוסקת כימיה:

1. כימיה פיזיקלית (Physical Chemistry) – תחום רחב בכימיה המתבסס על תופעות והסברים מעולם הפיזיקה, כגון קינטיקה (תנועת מולק/אטומים וקצב של תגובות) ותרמודינמיקה (מצבים של מערכות והאנרגיות הכרוכות בהן, מעברי אנרגיה בין רכיבי המערכת וממנה לסביבה ועוד). זהו תחום עשיר מאוד שכולל גם מחקר של פאזות של החומרים (מוצק/נוזל וכו'), תופעות פני שטח ועוד.
2. כימיה אורגנית (Organic Chemistry) – כימיה בה הדגש מושם על חומרים המכילים את יסוד הפחמן (נגיע בהמשך להגדרתו). השם "אורגני" הוא שם מסורתי שנגזר מכך שבעבר חוקרים האמינו שהמקור של חומרים אלה היה רק ביצורים חיים (בעלי חיים, צמחים וכו'). כיום זהו כבר אינו המקרה, וכימאים אורגנים מכינים חומרים אורגניים מגוונים מאוד – עליהם נמנים גם פולימרים ותרופות.
3. כימיה אי-אורגנית (Inorganic Chemistry) – כימיה בה הדגש מושם על משפחות אחרות של חומרים, כגון חומרים המשלבים בתוכם מתכות. דוגמאות לחומרים מעולם הכימיה האי-אורגנית הם למשל חומרים בסוללות נטענות (למשל לטלפונים ניידים, לרכבים חשמליים ועוד), לוחות סולריים, זרזים לתגובות כימיות חשובות בעולם התעשייתי ועוד.
4. כימיה אנליטית – תחום שבו נחקרים ומפותחים כלים ויכולות לנתח את ההרכב של מערכות מסוימות ברמת דיוק גבוהה, זיהוי וכימות חומרים בהרכבים נתונים. לדוגמה, איתור של חומרים רעילים (כגון עופרת, או כספית) במקווי מים.
5. כימיה תיאורטית וחישובית – פיתוח מודלים ותיאוריות להסברת התופעות הנצפות בעולם הכימיה. מודלים אלה מצריכים העמקה רבה ושימוש בכלים פיזיקליים ומתמטיים מתקדמים ונבחנים אל מול ההתנהגות הנצפית/נמדדת של המערכות עבורן היא מפותחת. חשיבותם של מודלים אלה אינו רק בהסבר התופעות הנצפות אלא גם ביכולת לצפות מראש התנהגות מערכות. אחת ההתפתחויות החשובות ביותר במאה השנים האחרונות הייתה השימוש במודלים הקוונטיים להבנת תכונות אטומים ומולקולות, ובעשורים האחרונים הכימיה התיאורטית מנצלת היטב את יכולות המחשוב ההולכות ומתפתחות.

ישנם עוד תחומים רבים ויפים הנחקרים בכימיה, אך בחוברת זו קצרה היריעה מלכסות אותם.

פרק א – חומרים, אטומים, תרכובות

1.א. חומרים, אטומים ומרכיביהם

חומר (material) הוא כל דבר שיש לו מסה¹ ותופס נפח במרחב. כשם שאבן היא חומר, כך גם מים הם חומר, ומרק, ואוויר. מכאן גם נובע שחומר יכול להיות מורכב מחומרים אחרים. דוגמה לכך מעולם התעופה היא חומרים מרכיבים, למשל אלומיניום שבתוכו ישנם סיבים ננומטריים של פחמן. בעלי חיים גם הם כמובן מורכבים מחומרים, כגון עצמות ודם (שהוא בעצמו תערובת נוזלית המכילה מגוון גדול של חומרים).

אם ניקח גוש בגודל כלשהו של חומר, נוכל לחצות אותו לשניים. נעשה זאת שוב ושוב. בשלב כלשהו החתיכות כבר יהיו קטנות מדי מכדי שנוכל לראות אותן בעין, אבל ניעזר במיקרוסקופ ונבצע שוב, חיתוך ועוד חיתוך וכו'. בסוף נגיע לחלק הקטן ביותר של חומר – שנקרא אטום² (atom).

אטום (atom) הוא היחידה הבסיסית ביותר שמרכיבה חומר. אטומים מורכבים, בתורם, משלושה סוגי חלקיקים תת-אטומיים (sub atomic particles):

פרוטון (proton) – חלקיק תת אטומי בעל מטען חשמלי חיובי, המצוי בגרעין האטום.

נייטרון (neutron) – חלקיק תת אטומי שאינו בעל מטען חשמלי (ומכאן שמו – "נייטרלי"), המצוי בגרעין האטום.

אלקטרון (electron) – חלקיק תת אטומי בעל מטען חשמלי שלילי, המצוי ב"מעטפת" שמסביב לגרעין.

המטען החשמלי של פרוטון, שהינו בקירוב $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, מסומן כ-"1+" בסימול כימי כללי. המטען החשמלי של אלקטרון זהה למטען הפרוטון והפוך לו בסימן (כלומר הינו בקירוב $-1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb), והוא מסומן כ-"1-". בסימול כימי כללי. מכאן, נובע שאם לאטום כלשהו יש את אותו מספר של אלקטרונים ופרוטונים, אזי הוא יהיה נייטרלי (בעל מטען חשמלי 0). אם לאטום מסוים יש אלקטרון אחד יותר מאשר כמות הפרוטונים שלו, "עודף" המטען יהיה מהאלקטרון, ולכן האטום יהיה טעון במטען של -1. אם לאטום מסוים יש עודף של שני פרוטונים לעומת כמות האלקטרונים שלו, המטען שלו יהיה +2, וכך הלאה.

אטום שאינו נייטרלי חשמלית (כלומר, המטען שלו אינו 0) נקרא **יון (ion)**. נהוג לפרט אם היון הינו חיובי או שלילי:

אטום בעל מטען חיובי נקרא **קטיון (Cation)**. ניתן לציין את "ערכיות" היון, כלומר כמה מטען חיובי יש לו, ולכן "קטיון דו ערכי" הינו בעל מטען של +2, "קטיון תלת ערכי" הינו בעל מטען של +3 וכו'.

¹ מסה (mass) היא המונח שבו אשתמש לאורך החוברת והקורס. אלה מכים שלמדו פיזיקה בעבר, בוודאי יקשרו את המונח מסה למשקל (weight), אשר מתקבל כאשר מכפילים את המסה בתאוצת הכובד המתאימה (ואז יש לדווח אותה ביחידות מתאימות כגון ניוטון N). אלא אם אכתוב אחרת, אתייחס להיות המסה המדוברת על כדור הארץ, וארשה לעצמי להשתמש ביחידות של ק"ג גם עבור משקל. כך, אומר שחפץ בעל מסה של 1 ק"ג הינו בעל משקל של 1 ק"ג (במקום לומר 10N). על הירח, אותו החפץ (עדיין בעל אותה מסה, 1 ק"ג) יהיה בעל משקל של בערך שישית מכך, כלומר 0.16 ק"ג (במקום לומר 1.6N). להסבר נוסף: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/guides/z77mbdm/revision/1>

² מתוך השם היווני, atomos. הקידומת "א" ביוונית היא ניגודית, כלומר "בלתי" או "לא", ו"טומוס" היא פעולת חיתוך. כלומר, "בלתי ניתן לחיתוך". המושג הומצא ע"י פילוסופים יוונים לפני כ-2,500 שנה, ולהעשרה: <https://www.britannica.com/science/atom/Development-of-atomic-theory>

אטום שיש לו מטען שלילי נקרא **אניון (Anion)**. גם כאן נהוג לציין את הערכיות שלו, ולכן אניון חד ערכי הינו בעל מטען 1- . יצוין, כי במקרים רבים, הסיומת של שם האניון תהיה "יד"/"ide", וכך למשל אטום פלואור שהוא טעון שלילית, במטען חד ערכי, ייקרא "פלואוריד" (fluoride).

רבים מהקטיונים והאניונים בטבע נמצאים בתוך מלחים. **מלח (salt)**, הוא חומר המורכב מאניונים ומקטיונים אך שמטענו החשמלי הכללי הינו 0, וזאת בשל היות סכום המטענים של מרכיביו 0 (ניתן לומר שמטעני האניונים והקטיונים "מבטלים" זה את זה. למשל, על כל קטיון דו ערכי נמצאים במלח גם שני אניונים חד ערכיים). רבים מן המלחים הם חומרים גבישיים (crystalline materials), כלומר חומר בעל סידור מחזורי של מרכיביו. לחומרים כאלה יש **תא יחידה (Unit cell)**, שהוא מבנה גיאומטרי שחוזר על עצמו ברחבי הגביש. יש בו (יחסית) מעט אטומים עם סידור מסוים ביניהם (מרחקים, זוויות) אשר ניתן לשכפל בתלת מימד כדי לשחזר את מבנה הגביש כולו. האניונים ו/או הקטיונים במלחים יכולים להיות אטומים בודדים או מולקולות (ואז הקטיון או האניון הוא יון מולקולרי – פרטים בתת הפרק הבא).

לא כל האטומים זהים, מה שמקנה לעולם הכימיה את המגוון והעושר האדירים שלו. השוני הוא במספר הפרוטונים שבאטום. בשל משיכה חשמלית בין הפרוטונים שבגרעין לבין האלקטרונים (הם כאמור בעלי מטענים הפוכים), כמות הפרוטונים שבגרעין גם משפיעה על תכונות ה"מעטפת" שיוצרים האלקטרונים. השפעה זו, יחד עם כמות האלקטרונים (שהיו באטום נייטרלי, בכמות זהה לכמות הפרוטונים) קובעת את אופיה של המעטפת, שהיא בתורה קריטית לסוגי וכמות הקשרים הכימיים, והתגובות הכימיות שאטום זה יוכל לעשות (כפי שנראה בפרקים המתקדמים יותר בקורס).

האטום עם מספר הפרוטונים הקטן ביותר הוא אטום המימן (Hydrogen), ויש לו פרוטון אחד בלבד בגרעין. אחריו, עם שני פרוטונים בגרעין, הוא אטום הליום (Helium), ואחריו ליתיום (Lithium, 3 פרוטונים), בריליום (berilium, 4 פרוטונים), בור (Boron, 5 פרוטונים), פחמן (Carbon, 6 פרוטונים), חנקן (Nitrogen, 7 פרוטונים), חמצן (Oxygen, 8 פרוטונים), פלואור (Fluorine, 9 פרוטונים) וניאון (Neon, 10 פרוטונים). כל אחד מהאטומים הללו נקרא **יסוד (element)**. יסוד מוגדר חד-חד ערכית על ידי כמות הפרוטונים שבגרעין שלו. כמות זו נקראת **המספר האטומי (atomic number)**, ונהוג לסמנו באות Z.

לכל יסוד ישנו **סימול (symbol)**, שהינו אות או שתיים באנגלית, מתוך שמו. כך, הסימול למימן הינו H, לחנקן הינו N, לחמצן O ולפחמן C. עוד תפגשו בהמשך דרככם (בקורס זה ובקורסים אחרים) יסודות נוספים שכדאי להכיר את שמם ואת סימולם: כלור (Cl, Chlorine), ברום (Br, Bromine), יוד (I, Iodine), נתרן (Na, Sodium), אשלגן (K, Potassium), סידן (Ca, Calcium), מגנזיום (Mg, Magnesium), ברזל (Fe, Iron), גופרית (S, Sulfur) וזרחן (P, Phosphorus).

הטבלה המחזורית של היסודות (Periodic Table of the Elements) מפרטת את היסודות לפי המספר האטומי שלהם (Z, שלם ועולה לאורך הטבלה) ומספקת במרכז המשבצת של כל אטום את הסימול שלו³. בהמשך הקורס, נלמד מדוע הטבלה המחזורית מסודרת כפי שהיא, משמעות השורות (periods) והטורים (groups) ועוד מידע רב לגביה.

³ אתם מוזמנים לבקר באתר <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/#property=GroupBlock>

שם תמצאו טבלה מחזורית אינטראקטיבית, עם יותר פרטים ולשונית המאפשרת שכבות מידע נוספות כגון שם היסוד, שנת גילויו ועוד. פרמטרים נוספים שנלמד בקורס – כגון רדיוס ואן דר ואלס של האטום, אלקטרושליליות ועוד גם מופיעים שם ותוכלו לצפות בהם במהלך הקורס.

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period ↓	1 1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

איור 1 – טבלה מחזורית בגרסה הפשוטה ביותר (לקוח מתוך Wikipedia.org).

כאשר מפורט סימול היסוד ופירוט הטעינה שלו (בד"כ תיכתב בפינה הימנית עליונה), נוכל לדעת בדיוק כמה פרוטונים יש בגרעין (לפי הסימול) וכמה אלקטרונים יש לאטום (לפי ההפרש הנדרש לקבלת הטעינה המוצהרת). יש לשים לב, שאת המטען נקבל אך ורק ע"י שינוי מספר האלקטרונים, ולא נשנה את מספר הפרוטונים. כך, למשל, על מנת לתאר את האטום הטעון H^+ , אנו יודעים שישנו פרוטון אחד בגרעין, ואפס אלקטרונים. מדוע? כי מימן, כיסוד, מכיל פרוטון אחד, ועל מנת שהוא יהיה חיובי עלינו להסיר את האלקטרון הבודד שהיה אילו המימן היה נייטרלי, על מנת לקבל את הטעינה למטען חיובי אחד. אסור לנו לטעון שיש שני פרוטונים ואלקטרון אחד, כי אחרת שינינו את זהות היסוד, ואז היה לנו He^+ . על מנת להתאמן על כך, נסו לפתור את התרגיל הבא:

תרגיל 1

השלימו את הטבלה הבאה: (מומלץ להיעזר בטבלה מחזורית, השורה הראשונה פתורה כדוגמה)

מספר סעיף	סימול ומידת טעינה	שם היסוד באנגלית	שם היסוד בעברית	כמות פרוטונים	כמות אלקטרונים
1.	Li^+	Lithium	ליתיום	3	2
2.	I^-	Iodine			
3.	Mg^{2+}				
4.	C^0				6
5.	S^{2-}				
6.				19	18
7.	Fe^{3+}				
8.				79	78
9.	U^{3+}				

על כמות הנייטרונים בגרעין ואופן סימולם נדון בפרק הבא (ב') בחוברת זו.

א.2. מולקולות ונוסחאותיהן

מתברר, שבטבע אמנם ניתן למצוא אטומים "בודדים" (במיוחד במקרה של גזים אצילים, noble gasses, עליהם נדון בקורס), אבל רבים מאוד מהאטומים נמצאים במצב שבו הם קרובים מאוד זה לזה, ונדרשת השקעת אנרגיה לשם הרכבתם – תופעה שאנו קוראים לה **קשר כימי (chemical bond)**. ישנם מספר סוגי קשרים כימיים (גם עליהם נדון בקורס), אבל כאשר נבחן צבר של אטומים המחוברים ביניהם בסוג מסוים של קשרים, נאמר על הצבר הזה שהוא **פרודה (molecule)**. המונח פרודה, או מולקולה, מתייחס לכל צבר ללא קשר לזהות האטומים שבו. אם האטומים הינם יסודות שונים, הפרודה תיקרא **תרכובת (compound)** (כי היא מורכבת, compounded, מיסודות שונים). לצורך הקורס הנכחי (וחוברת זו), לא נדקדק בשונות שמות זו, ונקרא לכל צבר, ללא תלות בזהות היסודות שבו והאם הם שונים זה מזה, בשם מולקולה, או בקיצור מולק'. חומר שמורכב מאטומים אשר קשורים זה לזה בתוך מולקולות, ייקרא "חומר מולקולרי".

בוודאי יצא לכם להיתקל בחומרים מולקולריים, בשמם. למשל, כאשר אתם שותים מים, הנוזל אותו אתם שותים מורכב מכמות רבה (מאוד) של מולקולות מים. בכל מולקולה כזו ישנם שלושה אטומים: שני אטומי מימן, ואטום אחד של חמצן. מולקולות אלה קיימות גם בקרח – פאזה מוצקה של מים, ושם הן יחסית קרובות זו לזו וקשורות זו לזו די חזק, בקשרים בין-מולקולריים (הקשרים שמחזיקים מולקולות קרובות זו לזו). חימום הקרח יוביל לשבירתם של חלק מקשרים אלה, ונקבל מים נוזליים. כאשר נמזג את המים לקומקום ונרתיח אותם, נקבל אדי מים. גם זה חומר, המורכב ממולקולות מים, אך הן רחוקות זו מזו ויש להן הרבה פחות קשרים זו עם זו – זוהי הפאזה הגזית של המים. אבל אם נבדוק את החלקיקים עצמם נוכל לראות שגם בהם יש שלושה אטומים – שני מימנים וחמצן אחד, כלומר שהמולק' עצמה נותרה בעלת אותו מבנה והרכב בסיסי. כמובן שלא נדרשת הרתחה בקומקום כדי למצוא אדי מים – בכל יום קיץ חם, במיוחד במישור החוף, ישנם אדי מים באוויר, בקרב שאר המולקולות המרכיבות את האוויר. וכאשר אתם נושמים חמצן מהאוויר (או מגישים למטופל שלכם אוויר מועשר בחמצן לנשימה), למעשה מה שמכונה "חמצן" ונכנס לריאותיו הוא מולקולות דו-אטומיות של חמצן, כלומר מולקולות שכל אחת מהן מכילה שני אטומי חמצן קשורים זה לזה. כאשר נושפים החוצה, האוויר מועשר בפחמן דו חמצני. כשמו כן הוא – זהו חומר שהמולקולות שלו מכילות שלושה אטומים – אחד של פחמן, ושניים של חמצן. עוד נלמד בקורס מה הוא המבנה של המולקולות הללו (כיצד האטומים מסודרים זה ביחד לזה, אילו סוגי קשרים יש ביניהם, מהן התכונות של המולקולה השלמה), אבל לבינתיים חשוב להכיר את הסימול המוסכם למולקולות: את המולקולה מייצגת נוסחה, שבה מופיעים סימולי היסודות ומספר קטן מימנים המייצג כמה אטומים של יסוד זה נמצאים במולקולה. הנוסחה הזו, שנקראת **נוסחה מולקולרית (molecular formula)**, נקראת משמאל לימין והיא אחת מתיאורי הכתיבה הנפוצים ביותר בכימיה. נתבונן בנוסחאות המולקולריות של החומרים שתוארו לעיל:

H₂O – water

שימו לב, שאם לא מופיע מספר אחרי יסוד מסוים, המשמעות הינה שהאטום מיסוד זה מופיע רק פעם אחת במולקולה. מכיוון שאטום הוא יחידה בדידה (שלמה), לעולם לא יקרה שהמספר המפרט את כמות היסוד במולק' יהיה מס' לא שלם.

O₂ – (molecular) oxygen

אם לא צוין אחרת, כל פעם שנאמר "חמצן" הכוונה היא חמצן מולק' כמו זה המופיע כאן. כאשר ירצו ליידע אותנו שמדובר על אטום חמצן בודד, יכתבו לנו oxygen atom. כנ"ל לגבי חנקן מולקולרי, או בשמו הכללי חנקן, N₂.

CO₂ – carbon dioxide

ישנן גם כמובן מולקולות גדולות ומורכבות הרבה יותר. למשל, גלוקוז הוא בעל הנוסחה המולקולרית הבאה:

C₆H₁₂O₆ – glucose

וישנן גם מולקולות בעלות מאות אלפי (או יותר) אטומים, כגון חומרים פולימריים (polymeric materials). פולי/mer משמעותו "רב", מר/mer משמעותו יחידה, כלומר מולקולה שמורכבת מהרבה יחידות (ברוב המקרים, היחידה היא קבוצה קטנה של אטומים) שמחוברות זו לזו. לעיתים היחידות החוזרות אחת על השנייה יהיו זהות – כמו במקרה של פוליאתילן (שמוכר לחלקנו משקיות אריזת הקניות שלנו) או ניילון, ולעיתים היחידות יהיו שונות זו מזו – כמו בחלבונים או בחומר תורשתי כגון דנ"א.

בעבר, כאשר היו עורכים אנליזה (analysis, חקר/ניתוח) ראשונית למולקולות, למשל ע"י שריפה (פירוט בפרק ד), לא היו מוצאים מיידית את הנוסחה המולקולרית. אלא, הייתה מתקבלת נוסחה פשוטה יותר, שבה היו מופיעים רק היחסים בין האטומים מהיסודות השונים בה. יחסים אלה היו שלמים, והיסוד המופיע בכמות הקטנה ביותר היה מקבל ערך של 1 (אלא אם הדבר גורם לכמויות האחרות להיות לא שלמות). נוסחה זו נקראת **נוסחה אמפירית** (אמפירי, empirical = ניסיוני, כלומר מופק מתוך ניסוי) והיא בהכרח מכילה פחות מידע מנוסחה מולקולרית, כי היא איננה מאפשרת לדעת כמה אטומים מכל יסוד ישנם בפועל במולקולה בודדת של החומר. כך, למשל, עבור גלוקוז, הנוסחה האמפירית הינה CH₂O. אולי תופעתו לגלות שנוסחה אמפירית זו היא למעשה הנוסחה המולקולרית של החומר הרעיל פורמלדהיד (formaldehyde), שתמיסתו המימית, המכונה פורמלין (formalin) משמשת בין היתר גם לשימור גופות ואיברים. אבל ישנו גם חומר נוסף, המשמש בעולם המזון, בעיקר, שגם הוא בעל נוסחה אמפירית זו – חומצה אצטית (acetic acid), הנקראת גם חומצת חומץ. נוסחתה המולקולרית הינה C₂H₄O₂. מכאן, אנו לומדים שנוסחה אמפירית אחת יכולה להיות משותפת למספר חומרים, שהינם בעלי נוסחאות מולקולריות שונות. אני מקווה שאתם משתכנעים כעת מדוע כימאים מעדיפים לעבוד בעיקר עם נוסחאות מולקולריות (ולא אמפיריות).

מולקולה יכולה להיות נייטרלית מבחינה חשמלית, אך יכולה גם להיטען במטענים חיוביים או שליליים – ואז היא נקראת **יון מולקולרי (molecular ion)** (או לפעמים, בקצרה, פשוט יון). במקרה שבו מולקולה טעונה במטען חיובי, היא תיקרא קטיון מולקולרי, ואם היא טעונה במטען שלילי היא תיקרא אניון מולקולרי. סימון המטען וערכו (למשל, 2+) יכתב בצידה הימני עליון של הנוסחה המולקולרית, כפי שנהוג לכתוב באטומים. גילויים בפיזיקה של חשמל ומגנטיות והמצאה מלפני כ-100 שנה הולידו תחום מדידות שנקרא ספקטרומטריית מסות (mass spectrometry), המאפשר את מדידת המסה של יונים מולקולריים⁴. מן המסה, אם היא מתקבלת באופן מספיק מדויק, ניתן לחלץ את הנוסחה המולקולרית (פרטים על כך בפרק הבא). כיום, כלי זה משמש רבות בכימיה אנליטית על מנת לאפיין מגוון מולקולות, כולל מולקולות בעלות חשיבות ביולוגית רבה.

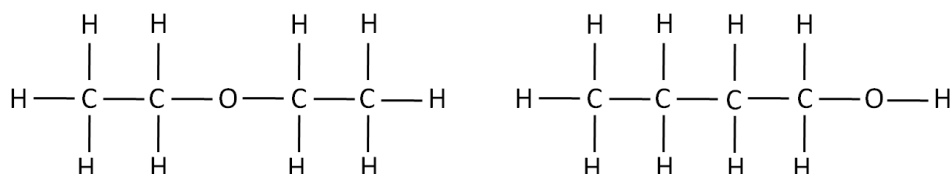
האם לכל חומר בהכרח תהיה נוסחה מולקולרית שונה מחומר אחר? או במילים אחרות, האם לכל חומר נוסחה מולקולרית חד-חד ערכית לו? התשובה היא לא. ישנם חומרים שונים שיש להם את אותה הנוסחה המולקולרית. במקרה כזה, אנו אומרים על החומרים הללו שהם **איזומרים (isomers)**, (iso = שווה או שווי ערך, mer – יחידה). כלומר, הם שווים זה לזה מבחינת היסודות (וכמותם) מהם הם מורכבים. אבל, מכיוון שמדובר על חומרים שונים, בהכרח יש להם תכונות שונות, אז כיצד ייתכן הדבר? ההסבר נעוץ בכך שמה שקובע את התכונה של חומר מולקולרי הוא אופן הסידור של האטומים שלו אחד ביחס לשני.

מכיוון שישנן כל מיני דרכים לסדר את האטומים שבמולקולה אחד ביחס לשני, נוכל לקבל יותר איזומרים ככל שהנוסחה המולקולרית מכילה יותר אטומים. **איזומרים מבניים (structural isomers)** מתקיימים כאשר המבנה

⁴ השיטה מתבססת על התופעה הפיזיקלית לפיה עצמים טעונים ינועו, בשדה מגנטי, ברדיוס שתלוי במסה שלהם. כך, פי המעוף של המולקולה בשדה מגנטי, ניתן למדוד מה היה הרדיוס שבו היא נעה ולחשב מכך מה הייתה המסה שלה. להרחבה: <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/massspec/masspec1.htm>
https://www.premierbiosoft.com/tech_notes/mass-spectrometry.html

החיבורי של האטומים הוא שונה בין חומרים. כלומר, בחומר אחד (איזומר מבני אחד) האטומים מחוברים זה לזה באופן אחד ובחומר אחר (איזומר מבני אחר) הם מחוברים באופן אחר. הנה דוגמה פשוטה לכך: הנוסחה המולקולרית של מים מפרטת שעל המולקולה להכיל שני אטומי מימן ואטום חמצן. ניתן להרכיב מולקולה שבה החמצן נמצא באמצע ומשני צידיו מחוברים המימנים (אחד בכל צד): H-O-H. שימו לב, שהקו בין האטומים נועד לייצג קשר כימי ביניהם. זה יהיה איזומר מבני ראשון. אבל, תיאורטית, ניתן היה גם להציע איזומר מבני שבו מימן מחובר לעוד מימן, והחמצן מחובר אליו ונמצא בקצה (H-H-O). עוד נראה בקורס, כאשר נלמד יותר על קשרים כימיים וכמות הקשרים המקובלת לכל אטום, מדוע חומר מעין זה לא מתקיים.

דוגמה נוספת לאיזומרים מבניים מופיעה בתמונה מטה (איור 2), בה ניתן לראות שני חומרים אורגניים פשוטים שיש להם את אותה הנוסחה המולקולרית, $C_4H_{10}O$, אבל המולקולות שלהם הן בעלות מבנים שונים:



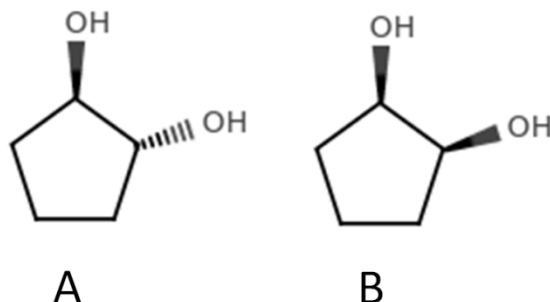
דיאתיל אתר

1 - בוטאנול

איור 2 – נוסחאות המבנה של שני חומרים אורגניים שהינם איזומרים מבניים: דיאתיל אתר (diethyl ether), אשר שימש שנים רבות בעבר כחומר הרדמה; ו-1-בוטאנול (1-butanol), כהל פשוט (כהל הוא חומר שמכיל הידרוקסיל שקשור לפחמן).

הצלחנו להבחין בהבדלים בין שני החומרים הללו כי באיור 2 ניתן לנו פירוט של מבנה המולקולות. למעשה, מה שמופיע באיור 2 הוא **נוסחת מבנה (structural formula)** לכל אחד משני החומרים. בנוסחת מבנה האטומים מופיעים בסימול הכימי שלהם (כך שניתן מידע לגבי זהות היסוד) והקשרים המחברים ביניהם מסומנים בד"כ בקו. מטענים חשמליים יסומנו אף הם אם האטום אינו נייטרלי. כימאים רבים מעדיפים לעבוד עם נוסחת מבנה (כאשר היא ידועה), בשל שכבת המידע הנוספת בנוסחאות אלה.

ישנם מקרים, שחלקם מאוד רלוונטיים לביולוגיה (ועוד תפגשו אותם בקורסי כימיה אורגנית וביוכימיה) שבהם האיזומרים מכילים את אותו חיבור מבחינת "מי מחובר למי" בין האטומים, והשוני בין האיזומרים מתבטא במבנה המרחבי, כלומר בתלת מימד. במקרה כזה, נאמר על האיזומרים שהינם **סטראואיזומרים (stereoisomers)**. (סטראו=מרחבי). דמיינו למשל טבעת (שמורכבת מאטומים מחוברים זה לזה), שאליה מחוברים שני אטומים. הטבעת יוצרת מישור, ושני האטומים יוצאים מהמישור הזה. אם שניהם פונים לאותו כיוון (נניח, שניהם פונים מעלה, או ששניהם פונים מטה), החומר שמתקבל יהיה שונה מאשר חומר שבו שני האטומים פונים לכיוונים הפוכים זה מזה (אחד למעלה ואחד למטה). אלה הם איזומרים, כי הם אינם אותו החומר – הם שונים זה מזה מרחבית, ולכן הם סטראואיזומרים. דוגמה לכך מובאת באיור 3 מטה.



איור 3 – דוגמה לשני סטראואיזומרים. במקרה זה, הטבעות הן מחומשות (מורכבות מפחמנים, בקודקודי המחומש, שאינם כתובים כאן במפורש – עוד תכירו את הכיתוב הזה בקורס כימיה אורגנית), ונמצאות על מישור הדף. קו מתעבה (wedge) מייצג יציאה ממישור הדף/מסך לכיוון הצופה. קו מקווקו (dashed) מייצג כניסה לתוך הדף ("מתרחק" מהצופה). זוג האטומים חמצן-מימן (OH) נקרא בשם הידרקסיל (hydroxyl). לכן, בחומר A ההידרוקסילים פונים בכיוונים הפוכים זה לזה (אחד יוצא ממישור הדף, שעליו נמצאת הטבעת, ואחד נכנס). חומר זה מקבל את הקידומת "טרנס", trans. בחומר B ההידרוקסילים פונים לאותו כיוון (שניהם "יוצאים" אל הצופה), וחומר זה מקבל את הקידומת "ציס", cis. מכאן נובע שהחומרים A ו-B הם סטראואיזומרים אחד של השני – מכילים את אותה הנוסחה המולקולרית, אבל שונים זה מזה (רק) במבנה המרחבי שלהם.

במילים אחרות, אם השוני בין איזומרים ניתן לאבחנה ע"י ציור דו מימדי של האטומים במולקולה וחיבוריהם, הם איזומרים מבניים; אם נדרש מידע תלת מימדי כדי לאבחן את השוני בין איזומרים, אזי הם סטראואיזומרים.

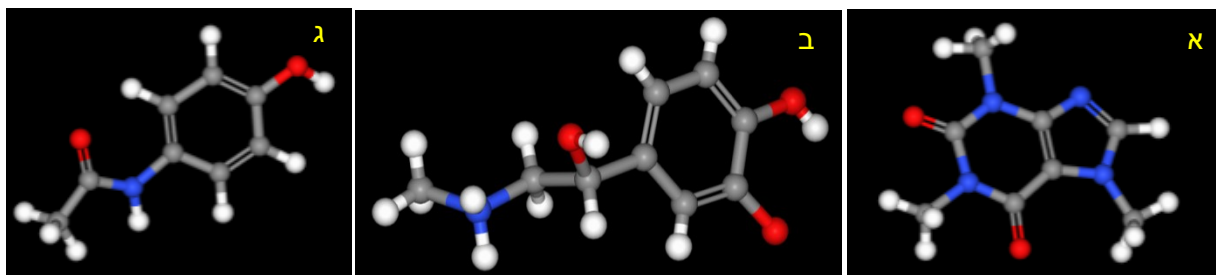
בשלב זה יצוין כי בימינו נעשה שימוש רב בתוכנות ממחשבות על מנת להציג מבנים מולקולריים, שחלקם מפוענחים ישירות ממדידות מבנה (כגון פיענוח מבנה גבישי, crystalline structure determination אשר מספקות את הגיאומטריה של תא היחידה של הגביש)⁵. במקרים כאלה, התצוגה הממוחשבת מאפשרת התבוננות תלת מימדית נוחה יחסית (וניתן אף "לסובב" את המולקולה המוצגת במספר אופנים). לעיתים קרובות, האטומים יוצגו ככדורים והקשרים ביניהם כקווים (ball and stick model) ומתוך מוסכמה, ברוב המקרים האטומים יפורטו לפי הקוד הבא של מתאם של בין צבע ליסוד (בטבלה מפורטים היסודות הנפוצים במולקולות אורגניות):

היסוד	צבע תצוגה
H	לבן/אפור בהיר
C	אפור כהה/שחור
O	אדום
N	כחול
S	צהוב

כעת, אתם מצידים בידע הנדרש לפיענוח הנוסחה המולקולרית של החומרים הבאים:

⁵ טכניקה זו מהווה את אחת מפריצות הדרך המדעיות החשובות ביותר בכימיה ביכולתם של כימאים לקבוע מבנים של מולקולות. היא מבוססת על כך שאור באורכי גל מסוימים (כגון X-ray) יכול לעשות אינטראקציה עם המולקולות עצמן, ובעקבות אינטראקציה זו לעבור שינוי בתבניות שלו (התוצאה נקראת תמונת התאבכות, diffraction). מפיענוח תבנית ההתאבכות ניתן להסיק מה היה המבנה המרחבי של המולק' שגרמה לתבנית זו. הבעיה היא שפוטון בודד של x-ray ומולק' בודדת מייצרת שינוי קטן מאוד שקשה מאוד למדוד. לכן, יש "לצבור" את השינוי על פני אינטראקציות רבות, וניתן לעשות זאת ע"י שימוש בגביש (crystal) של המולק' הרצויה לפיענוח. שני מדענים ישראלים, פרופ' עדה יונת ופרופ' דן שכתמן, זכו בפרסי נובל על עבודתם הקשורה לתחום זה. לקריאה נוספת:

https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_crystallography



איור 4 – מבניהם המרחביים (לאו דווקא לפי הסדר) של מולקולות של: אצטאמינופן (פאראצטמול, paracetamol, חומר פעיל בתרופות להורדת חום ושיכוך כאבים), קפאין (caffeine, חומר ממריץ המופק מצמחים מסוימים), ואדרנלין (adrenaline, epinephrine, חומר המופק בבלוטות אדרנליות וניתן גם כתרופה).⁶

תרגיל 2

השלימו את השיור של המבנים המופיעים באיור 4 לחומרים המתאימים להם, לפי הנוסחה המולקולרית הנתונה עבורם, בטבלה הבאה:

מספר סעיף	שם החומר	נוסחה מולקולרית	מבנה מתאים באיור 4
1.	אצטאמינופן	$C_8H_9NO_2$	
2.	קפאין	$C_8H_{10}N_4O_2$	
3.	אדרנלין	$C_9H_{13}NO_3$	

סימול **פאזת החומר (phase of the material)**, הוא סימול אופציונלי, שמוסף לעיתים בסוגריים עם אות או שתיים מצד ימין של החומר, אשר נועד לציין בפני הקורא מה היא הפאזה של החומר. למרות שישנן הרבה מאוד פאזות אפשריות, הפאזות הראשיות והנפוצות ביותר הן גז (g), נוזל (l), ומוצק (s). ישנם חומרים שיש להם כמה סוגים שונים של פאזות מוצקות, כלומר דרכים שונות שבהן האטומים מסודרים במוצק – הם נקראים **אלוטרופים (allotropes)**, או שבהן המולקולות מסודרות במוצק – הם נקראים **פולימורפים (polymorphs)**. פולימורפיה, התכונה של חומר שבה המוצק שלו יכול להסתדר בכמה מוצקים שונים (עם תאי יחידה שונים), יכולה להיות חשובה מאוד בתרופות, שם סוג המבנה הגבישי יכול לקבוע את מידת זמינות המולקולות של החומר הפעיל להמסה ולאינטראקציה עם חומרים ביולוגיים בגוף.⁷

מכיוון שרובכם תעסקו בהרחבה בהמשך הדרך בביוכימיה, ומכיוון שמערכות ביוכימיות (לפחות ככל הידוע כיום, על כדור הארץ) הן מבוססות מים, יש גם סימון שמראה המסה של חומר בתוך מים, שהוא (aq.), קיצור של aqueous. לכן, למשל, מלח שולחן (שמורכב מיונים של סודיום, Na^+ , ושל כלוריד, Cl^-), יסומן בתור $NaCl_{(s)}$ כל עוד שהוא בגבישים בתוך המלחיה, אבל בתור $Na^+_{(aq.)} + Cl^-_{(aq.)}$ כאשר הוא הומס בתוך המים, מכיוון שהיונים כעת מוקפים במולקולות מים.

⁶ תמונות המבנים לקוחות ממנוע צפייה תלת מימדי באתר Cambridge Crystallographic Database דרך עמוד החיפוש בלינק: <https://www.ccdc.cam.ac.uk/structures/?> ותוכלו להשתמש בו לחפש מבנים של מולקולות נוספות שאולי תרצו לצפות בהן.
⁷ לקריאה נוספת: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7022426/>

פרק ב – איזוטופים, מסות, ומושג המול

ב.1. איזוטופים ומסות

בפרק א' ראינו שלכל יסוד ישנה כמות מסוימת, ומוגדרת בהכרח לפי זהות היסוד, של פרוטונים בגרעין האטום שלו. אבל, מתברר שאם ניקח מס' אטומים שהם אותו היסוד, לא בהכרח כולם יהיו זהים לזה מבחינת הרכב הגרעין שלהם: בעוד שלכולם יהיה את אותו מס' הפרוטונים בגרעין (בהכרח, אחרת הם לא אותו יסוד), לחלקם יהיו יותר (או פחות) נייטרונים בגרעין. אטומים שהם מאותו היסוד אבל שונים זה מזה בכמות הנייטרונים שלהם נקראים בשם **איזוטופים (Isotopes)**⁸.

עיקר המסה של האטום נובעת מפרוטונים ונייטרונים, וביחס אליהם מסת האלקטרון זניחה – היא מהווה פחות מאלפית המסה של פרוטונים ונייטרונים, כמפורט בטבלה הבאה:

חלקיק תת אטומי	מסה בקירוב, בגרם (grams)
פרוטון	$1.67 \cdot 10^{-24}$
נייטרון	$1.67 \cdot 10^{-24}$
אלקטרון	$9.11 \cdot 10^{-28}$

נהוג להתייחס למסה של הפרוטון ושל הנייטרון כאל יחידות המסה שיוצרות את מסת האטום, ולכן משתמשים במושג ה- **atomic mass unit, a.m.u.** $1 \text{ a.m.u.} = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ g}$, ולכן, מכיון שהוא קרוב מאוד למסתו של נייטרון או של פרוטון, נוח להשתמש בו לתיאור המסה בכיתוב מקוצר (ולאורך הקורס, נשתמש בקירוב זה כאילו היה חליפי למסת הפרוטון או הנייטרון).

בהכרח, לאיזוטופים שונים תהיה מסה אטומית שונה. אם נסתכל על איזוטופים של אטום המימן, אזי האיזוטופ שבו יש בגרעין רק פרוטון (איזוטופ זה נקרא בשם "פרוטיום", protium), יהיה בעל מסה של 1 a.m.u. (בקירוב). לעומת זאת, באיזוטופ אחר של מימן, שמכיל בגרעין גם פרוטון וגם נייטרון (איזוטופ זה נקרא בשם "דאוטריום", deuterium) המסה של האטום תהיה 2 a.m.u. (בקירוב). לאיזוטופ נוסף של מימן, המכיל פרוטון ושני נייטרונים בגרעין (הנקרא בשם "טריטיום", tritium, איזוטופ פחות יציב) תהיה מסה של 3 a.m.u. (בקירוב).

כיצד נוכל לסמן שמדובר על איזוטופים שונים? לשם כך נשתמש ב- **מספר המסה (mass number)**. מספר המסה הוא סכום כמות הפרוטונים והנייטרונים בגרעין האטום. הוא מסומן מעל סימול האטום ומפרט מה היא המסה, ביחידות של a.m.u., שיש לאטום זה. כך, הסימונים הבאים⁹ יתאימו לשלושת האיזוטופים שנידונו מעלה (ציון המס' האטומי בצד שמאל הוא אופציונלי, בהינתן שהסימול ליסוד, H, כבר מופיע):

$^1\text{H}^1$ – protium

$^2\text{H}^1$ – deuterium

$^3\text{H}^1$ – tritium

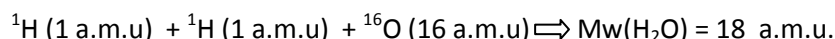
⁸ מתוך יוונית: iso = שווה, topos = מקום, כי הם נמצאים באותה המשבצת בטבלה המחזורית (סוגים שונים של אותו היסוד).
⁹ שתי הערות: א. ספציפית, לאיזוטופים של מימן נהוג גם להשתמש באות לייצוג האיזוטופ, וכך דאוטריום מסומל ע"י האות D וטריטיום מסומל ע"י האות T. ב. ישנן טבלאות שונות עם אופני סימון שונים, בהן לעיתים מס' המסה יופיע במקומות שונים (למשל פינה ימנית עליונה לעומת פינה שמאלית עליונה). כיצד נדע מה הוא המס' האטומי ומהו מס' המסה? המס' האטומי תמיד יעלה בערך של אחד במעבר ממשבצת למשבצת בטבלה (ומס' המסה לא), המס' האטומי תמיד יהיה מספר שלם (ומס' המסה לא – ראו דיון על פילוג איזוטופים בהמשך הפרק), ולבסוף – מס' המסה תמיד יהיה שווה או גדול (בהכרח) מהמס' האטומי (שמייצג רק את כמות הפרוטונים).

תרגיל 3השלימו את הטבלה הבאה עבור איזוטופים של אטום הפחמן¹⁰:

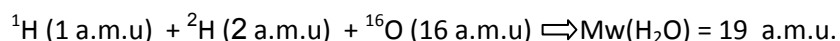
סעיף	סימול האיזוטופ	כמות פרוטונים באטום	כמות נייטרונים באטום	מסת האטום בגרמים
1	¹² C			
2	¹³ C			
3	¹⁴ C			

מולקולות מורכבות מאטומים, ולכן המסה של מולקולה תהיה זהה לסכום מסות האטומים המרכיבים אותה. מסה זו נקראת **מסה המולקולרית (molecular mass)**, ומסומנת לעיתים גם בתור Mw (שהינו קיצור של Molecular weight). המסה המולקולרית תלויה אם כך לא רק בסוג היסודות ובכמותם, אלא גם באיזוטופים הספציפיים של היסודות. ניקח למשל מים ונבחן את מסתם לאור הרכב איזוטופים שונים של מימן:

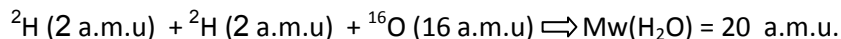
אפשרות ראשונה: שני אטומי המימן הם איזוטופ פרוטיום:



אפשרות שנייה: אחד מאטומי המימן הוא איזוטופ פרוטיום והשני איזוטופ דאוטריום:



אפשרות שנייה: שני אטומי המימן הם איזוטופ דאוטריום:



אנו קוראים למים במקרה השלישי הזה בשם "מים כבדים" (heavy water, בד"כ מיוצגים כימית בתור D₂O) מכיוון שכל מולקולה שלהם היא אכן בעלת מסה גדולה יותר מזו של מים "רגילים".

אם נבוא לנחל, או לאגם, ונדגום לעצמינו מולקולה אחת (נניח שיש לנו איך לבודד מולקולה אחת), מה הוא הסיכוי שבמקרה נקבל מים כבדים? לשם כך, עלינו לדעת מה היא השכיחות בטבע של איזוטופ הדאוטריום לעומת איזוטופ הפרוטיום. ליסודות שונים ישנה שכיחות (prevalence/abundance) איזוטופים שונה בטבע, כלומר פילוג אוכלוסיית האטומים של היסוד בין האיזוטופים היציבים השונים שלו תהיה שונה. למשל, במקרה של פחמן, כ-99% מהאטומים יהיו האיזוטופ ¹²C, וכ-1% מהאטומים יהיו האיזוטופ ¹³C. שימו לב, שלא כללנו כאן את האיזוטופ ¹⁴C, בשל הרזולוציה הנמוכה שהשתמשנו בה לאחוזים. לעומת זאת, עבור כלור, הפילוג בין שני האיזוטופים

¹⁰ לאיזוטופים אלה חשיבות רבה מאוד בעולמות הארכיאולוגיה, גיאולוגיה, פלאונטולוגיה ועוד. איזוטופ ¹⁴C הוא פחות יציב מאשר שני האיזוטופים האחרים, ומתפרק עם זמן מחצית חיים (half life) של כ-5,700 שנים (כלומר, אם ניקח 100 אטומי ¹⁴C, לאחר זמן זה חצי מהם יתפרקו). איזוטופ זה נוצר באטמוספירה, בקצב יחסית קבוע, בעקבות תגובות בין נייטרונים לבין חנקן. צמחים צורכים אותו מתוך CO₂ בפרוטוסינתזה, וכך שכיחות איזוטופ זה בהם (ובבעלי חיים שניזונים מהם או אחד מהשני) נותרת קבועה יחסית לאורך חייהם. עם זאת, ברגע שהם מתים, וכבר אינם מבצעים אספקה שוטפת של איזוטופ זה לתוך רקמותיהם, כל שנותר למאגר של האטומים מסוג איזוטופ זה הוא להתפרק. לכן, בהינתן רקמה מסוימת, ניתן למדוד מה הוא אחוז ה-¹⁴C שבה. ככל שהוא קטן יותר, כך עבר זמן רב יותר מאז שהצמח/יצור מת. ניתן לכמת את הערכים לתקופה המתאימה שעברה, וכך לקבל את האפשרות לבצע תיארוך, carbon dating, מאות, אלפי, ועשרות אלפי שנים אחורה לתוך ההיסטוריה. להרחבה:

<https://science.howstuffworks.com/environmental/earth/geology/carbon-14.htm>

הנפוצים והיציבים שלו הינו כ- 76% של ^{35}Cl , וכ- 24% של ^{37}Cl (שוב, ישנם איזוטופים נוספים של כלור, כגון ^{36}Cl , אבל ברזולוציית האחוזים כאן הם אינם מצוינים). ואם נחזור לשאלה מעלה, לגבי דאטריום, השכיחות שלו היא בערך 0.016% מכלל אטומי המימן (שמרביתם המכרעת הינם איזוטופ הפרוטיום)¹¹, או במילים אחרות ישנו אטום דאטריום אחד על כל כ- 6,400 אטומי פרוטיום. מכאן, נובע שהסיכוי למצוא מלק' מים כבדים יהיה אחד חלקי $6,400^2$ (או, אחד לבערך 41 מיליון).

אז כמה שוקל אטום מימן? מהי **המסה האטומית (atomic mass)**, או (Aw, atomic weight) שלו? ובכן, אם נבחר אטום מימן אחד, הוא בהכרח יהיה אחד האיזוטופים, ותייה לנו תשובה מוחלטת. אבל אם ניקח מיליון אטומי מימן, אזי פילוג האיזוטופים יבוא לידי ביטוי¹², ונקבל מספר שמהווה את הממוצע המשוכלל, המתחשב בכמות האיזוטופים ובמסתם, ונקרא standard atomic weight (ובפועל לאורך הקורס נתייחס אליו פשוט כאל מסת האטום, או המסה האטומית, או המשקל האטומי).

זו הסיבה שבגינה, כאשר נסתכל בטבלה המחזורית, נראה שמס' המסה איננו מספר שלם. הנה מספרי מסה (בקירוב) עבור שלושת היסודות שצוינו מעלה:

יסוד	מס' מסה (standard atomic weight) (מטבלה מחזורית)	הערות
H	1.008 a.m.u	השכיחות המאוד נמוכה של האיזוטופים הכבדים באה לידי ביטוי בתיקון המזערי של הערך כלפי מעלה.
C	12.011 a.m.u	האיזוטופ ^{13}C מהווה בקירוב אחוז אחד מסך הפילוג, והאיזוטופ ^{12}C מהווה כמעט 99% משאר האוכלוסיה.
Cl	35.45 a.m.u	פילוג האיזוטופים של רבע לטובת האיזוטופ הכבד יותר בשתי יחידות a.m.u (^{37}Cl) מובע דרך ממוצע משוכלל בעלייה של כחצי a.m.u מעל מסת האיזוטופ הנפוץ יותר (^{35}Cl).

אם כך, מה תיהיה המסה המולקולרית (Mw) של מים, כחומר (המכיל ריבוי מולקולות, ולא מולקולה בודדת)? את המסה המולקולרית מחשבים לפי סכום המסות האטומיות, ולכן הפילוג האיזוטופי של היסודות מתבטא גם במסה המולקולרית. מכאן, נובע שהמסה המולקולרית של מים הינה:

$$Mw(\text{H}_2\text{O}) = 2 * Aw(\text{H}) + 1 * Aw(\text{O}) = 2 * 1.008 \text{ a.m.u.} + 1 * 15.999 \text{ a.m.u.} = 18.015 \text{ a.m.u.}$$

דוגמה נוספת: המסה המולקולרית של גלוקוז הינה:

$$Mw(\text{glucose}) = 6 * Aw(\text{C}) + 12 * Aw(\text{H}) + 6 * Aw(\text{O}) = 6 * 12.011 \text{ a.m.u.} + 12 * 1.008 \text{ a.m.u.} + 6 * 15.999 \text{ a.m.u.} = 180.156 \text{ a.m.u.}$$

¹¹ יש לשים לב, שמה שמסבך את הנושא הוא שהפילוג האיזוטופי אינו אחיד בכל האתרים על כדור הארץ (ומחוצה לו) ומכל המקורות. קרינות מסוגים שונים יכולות להשפיע על יצירת איזוטופים שונים בחומרים הנחשפים אליהן. למשל, פחמן שמקורו במגמה (magma) מעומק כדור הארץ יכיל פחות איזוטופ ^{14}C מאשר פחמן שמקורו בעץ רענן.

¹² שוב, עד כדי אי הוודאות בידיעת פילוג האיזוטופים המדויק. לטבלאות מידע פילוג איזוטופי ניתן להיעזר במקור:

<https://ciaaw.org/isotopic-abundances.htm>

תרגיל 4

השלימו את הטבלה הבאה עבור האיזוטופים הבאים (מומלץ להיעזר בטבלה מחזורית):

סעיף מספר	מס' פרוטונים	מס' נייטרונים	מס' אלקטרונים	ייצוג מפורט
1.				^{44}Ca
2.	7	8	7	
3.				$^{11}\text{B}^{+1}$
4.	14	14	11	
5.				$^{18}\text{O}^{-2}$
6.	56	82	54	

תרגיל 5¹³

נתון כי לליתיום, בעל מסה אטומית 6.941 a.m.u. ישנם שני איזוטופים טבעיים עיקריים, ^6Li ו- ^7Li , שמסתם הינה 6.0151 a.m.u. - 7.0160 a.m.u. בהתאמה. חשבו את השכיחות של שני איזוטופים אלה.

היכולת למצוא את הנוסחה המולקולרית של מולק', ע"י שימוש בספקטרוסקופיית מסות (מפרק א מעלה), תלויה בפילוג האיזוטופי של כל יסוד. אם מכשיר המס-ספקטרומטריה מסוגל להגיע לרזולוציות גבוהות, עם דיוק מסה של מס' ספרות אחרי הנקודה (בד"כ כארבע), ניתן להבחין בין שתי מולקולות שיש להן מסה דומה, אך הרכב יסודות שונה. לדוגמה:

לפרופאן (שמשמש כדלק בחלק מגזי הבישול) נוסחה מולק' של C_3H_8 . לאצטלדהיד נוסחה מולק' של $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$. סכימת מסות האטומים באופן גס (רזולוציה נמוכה) נותנת לשתייה $\text{Mw}=44 \text{ amu}$. אבל ברזולוציה גבוהה יותר, שלוקחת בחשבון את פילוג האיזוטופים ולכן מס' ספרות אחרי הנקודה העשרות, נקבל:

$$\text{Mw}(\text{propane}) = 44.063 \text{ amu}$$

$$\text{Mw}(\text{acetaldehyde}) = 44.026 \text{ amu}$$

לקראת סיומו של תת-פרק זה, אציין כי בעולם הביוכימיה נהוג לעיתים לעבוד עם חומרים "מסומנים איזוטופית". חלקם של חומרים אלה מתאפיינים בתהליכים גרעיניים¹⁴ ומלווים בקרינה (שלעיתים מאפשרת לאתר את החומר ברקמה או אברון מסוימים, או על פני מטריצת הרצה כגון ג'ל בעת הפרדה בין חומרים), ואילו חלקם מתאפיינים בתכונות שונות של המולקולה – כגון מסה ייחודית (למשל בעקבות החלפה של פרוטיום לדאוטריום כך שמהולק' מועשרת בדאוטריום הרבה מעבר ליחס שהיה אמור לו בפילוג טבעי) שניתנת לאיתור בספקטרומטריית מסות, כך שניתן לראות איזו סוג של מטבוליזה החומר עבר (למשל, אם הייתה מולקולה שבה הוא היה מוכל, והיא נחתכה, באיזה חלק מוכל הדאוטריום כעת). עולם האיזוטופים, במיוחד בהקשרי הביוכימיה והרפואה, הוא עשיר מאוד אך לא נרחב עליו בחוברת מצומצמת זו.

¹³ התרגיל לקוח מתוך האתר:

<http://chp090.chemistry.wustl.edu/~coursedev/Online%20tutorials/Plink/atommasskey.htm>

¹⁴ שינויים של הרכב הגרעין, ולכן גם שינוי היסוד, למשל הפיכה של נייטרון לפרוטון ואלקטרון וכו', ששייכים לתחום הפיזיקה הגרעינית ולא יידונו בקורס זה.

ב.2. מושג המול

בוודאי שמתם לב שבחלקו הראשון של הפרק הנוכחי עבדנו עם יחידות של a.m.u. עבור המסה. אבל, ביום-יום כימאים לא נוהגים לעבוד עם אטומים/מולקולות בודדים/ות, ובכל מקרה קשה (מאוד) למדוד מסות כ"כ קטנות. מטעמים פרקטיים, נוח הרבה יותר לעבוד עם מסות של גרמים בודדים (או מיליגרמים, או מיקרוגרמים).

ברור שאם נרצה להגיע לסדרי גודל של גרמים, נצטרך לקחת הרבה (מאוד) אטומים. מה יהיה יחס ההמרה (מכמות של בודד לכמות שתאפשר גרם)?

ניקח את האטום (והאיזוטופ) בעל המסה הכי קטנה שאנו מכירים – איזוטופ הפרוטיום. מסתו היא 1 a.m.u, או $1.66 \cdot 10^{-24}$ g. כעת נשאל את עצמנו – כמה אטומים כאלה עלינו לצבור על מנת להגיע למסה של 1 גרם?¹⁵

$$\text{number of } ^1\text{H atoms (for mass of 1 g)} = 1 \text{ g} / (1.66 \cdot 10^{-24} \text{ g}) = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ atoms}$$

מספר זה, שגם נקרא מספר אבוגדרו (Avogadro's number, מסומן כ- N_A), נקרא בשם יחידת **מול (Mole) או [mol]**. באופן רשמי, מגיעים אל המול דרך תחשיב פחמנים (כלומר, כמה אטומי פחמן ^{12}C ידרשו לקבלת מסה של 12 גרם), אבל נשחזר זאת כאן ונראה שמקבלים אותו באותו האופן:

$$\text{number of } ^{12}\text{C atoms (for mass of 12 g)} = 12 \text{ g} / (12 \cdot 1.66 \cdot 10^{-24} \text{ g}) = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ atoms}^{16}$$

הסימון המקובל ליחידה זו הינו n, כך שמול אחד יסומן בתור n=1, שני מולים יסומנו n=2 וכו'. כמות החלקיקים תסומן בד"כ כ- N, וכמותה תשתנה בהתאם לכמות המולים שישנם.

למשל, כאשר ישנם שני מולים יהיו $N = 2 \cdot 6.022 \cdot 10^{23} = 1.2044 \cdot 10^{24}$ חלקיקים.

המסה המולרית (Molar mass), היא המסה של מול אחד של חומר. היא ניתנת ביחידות של גרם למול, g/mol. המסה של מול אחד של אטומי פרוטיום תהיה 1 g, ומכאן נובע שהמסה המולרית של פרוטיום הינה 1 g/mol. המסה של מול אחד של אטומי פחמן תהיה 12.01 g, ומכאן שהמסה המולרית של פחמן הינה 12.01 g/mol. כלומר, שאם יהיו לנו 2.3 מול של אטומים אלה, נוכל למצוא מה תהיה המסה שלהם (היחידות מופיעות בסוגריים מרובעים):

$$m [\text{g}] = \text{Molar mass} [\text{g/mol}] \cdot n [\text{mol}]^{17}$$

$$m (2.3 \text{ mol carbon atoms}) = 12.01 \text{ g/mol} \cdot 2.3 \text{ mol} = 27.62 \text{ g}$$

(שימו לב לצמצום היחידות – כלומר במקרה הזה המולים הצטמצמו ונותרנו עם גרם בלבד).

¹⁵ למי שזקוק להסבר נוסף – בצעו "ערך משולש" – אטום אחד שוקל $1.66 \cdot 10^{-24}$ g, אנו מחפשים כמה אטומים צריך כדי

1 atom of H (assuming protium isotope) $\rightarrow$ 1 amu

להגיע ל-1g. ניתן לראות את הערך המשולש כך: $6.02 \cdot 10^{23} \text{ atoms of H} \rightarrow 1 \text{ gram}$

¹⁶ בפועל, המספר שמתקבל, אם עובדים בצורה יותר מדויקת מזו המופיעה בהסבר מעלה, עבור מול הינו:

1 Mol unit = Avogadro number of particles = $6.02214 \cdot 10^{23}$

אבל לצורך הקורס נעבוד ברזולוציות נמוכות יותר (עם דיוק של 2-3 ספרות אחרי הנקודה העשרונית).
¹⁷ ההיגיון כאן הוא שהמסה של חלקיקים תהיה מכפלת כמות החלקיקים במשקל העצמי של כל אחד מהחלקיקים הללו. רק שבמקום לקחת ישירות את הכמות, ניקח יחידת כמות – מול, ואת המסה ניקח לפי מסה למול.

מס' המסה שבטבלה המחזורית, שעד כה התייחסנו אליו ביחידות של a.m.u., ניתן גם לשימוש ביחידות של מסה מולרית! כלומר, המסה המולרית של חמצן הינה 15.999 g/mol, של מימן הינו 1.008 g/mol וכו'.

מס' נוסחאות שאולי יועילו לכם בהמשך, כולן מבוססות על אותו עיקרון הגדרתי, הינן:

$$n [\text{mol}] = m [\text{g}] / M_w [\text{g/mol}] ;$$

$$m [\text{g}] = n [\text{mol}] * M_w [\text{g/mol}] ;$$

$$M_w [\text{g/mol}] = m [\text{g}] / n [\text{mol}]$$

כיצד מוצאים ערך מספרי עבור המסה המולרית של מולקולה? על מנת לחשב אותה, ניקח בחשבון שמסת המולקולה הינה סכום מסות האטומים המרכיבים אותה. כפי שעשינו זאת מעלה ב- a.m.u., נוכל כעת לעשות זאת בגרם למול. הנה דוגמה עבור מים. מכיוון שמבוקשת מסה מולרית, נחשב תחילה את המסה עבור מול אחד של מים. מהי המסה עבור מול אחד של מים? במול אחד של מים יהיו שני מול של אטומי מימן, ומול אחד של אטומי חמצן. כל מול של מימן יהיה בעל מסה של 1.008 גרם, ומול של חמצן יהיה בעל מסה של 15.999 גרם. לכן, מול אחד של מים יהיה בעל מסה של:

$$m(\text{H}_2\text{O}, 1 \text{ mol}) = 2 * m(\text{H}, 1 \text{ mol}) + 1 * m(\text{O}, 1 \text{ mol}) = 2 * 1.008 \text{ g} + 1 * 15.999 \text{ g} = 18.015 \text{ g}$$

אם היה לנו למשל חצי מול, היינו מקבלים חצי ממסה זו (9.008 g בערך) ואם למשל היו לנו 10 מול, היינו מקבלים פי עשר ממסה זו. לכן, נכתוב את הביטוי המתאים למסה מולרית, ע"י חלוקת מסה זו במול אחד:

$$M_w (\text{H}_2\text{O}) = 18.015 \text{ g/mol}$$

וניתן גם לעשות זאת ישירות דרך יחידות של גרם למול לכל אחד מהיסודות המשתתפים וכמותם, מבלי לחשב מול אחד כצעד מקדים:

$$M_w(\text{H}_2\text{O}) = 2 * A_w(\text{H}) [\text{g/mol}] + 1 * A_w(\text{O}) [\text{g/mol}] = 2 * 1.008 \text{ g/mol} + 1 * 15.999 \text{ g/mol} = 18.015 \text{ g/mol}$$

תרגיל 6

כמה חלקיקים ישנם בשביעית מול?

תרגיל 7

קיבלתם במתנה צמיד כסף, שמשקלו 24 גרם. כמה אטומי כסף ישנם בצמיד? ניתן להניח שהצמיד עשוי מכסף טהור (כלומר, שאין בו אטומים מיסודות נוספים).

תרגיל 8

מה הוא הנפח (בליטר) של מים בטמפ' החדר (25 °C) שמכיל 0.14 מול של מולקולות מים? הניחו שהמים הם טהורים ונתון שצפיפותם של המים בטמפ' זו הינה 0.997 g/mL.

תרגיל 9

כמה מולים של אטרופין (atropine), נוסחה מולק' $\text{C}_{17}\text{H}_{23}\text{NO}_3$, ישנם במזרק המכיל 4.2g של תרופה זו?

האחוז המשקלי (percent by weight), (או גם mass fraction, מסומן בתור %w) של רכיב X מסוים מביע מה היא המסה של X מתוך הכלל, באחוזים.

מידעת הנוסחה המולק' והמסה האטומית של היסודות, נוכל לחשב מה הוא האחוז המשקלי של יסוד מסוים מתוך מסה נתונה של תרכובת כלשהי. למשל, נניח שמישהו מעוניין באטומי הפחמן שבגלוקוז (כי הוא מעוניין בהמשך להמיר אותם למולקולות של פחמן דו חמצני). ייתכן שהוא ישאל את עצמו, מהו האחוז המשקלי של הפחמנים בגלוקוז. כיצד ניתן לחשב זאת? אחת הדרכים היא להניח, ע"י "בניית עזר", שיש לנו 100 גרם של גלוקוז. במקרה כזה, אנו יודעים לחשב כמה מול של גלוקוז ישנם במסה זו:

$$n [\text{mol}] = m [\text{g}] / M_w [\text{g/mol}]$$

$$n (\text{glucose in } 100 \text{ g}) = 100 \text{ g} / 180.156 \text{ g/mol} = 0.555 \text{ mol}$$

אנו יודעים שכל מולק' של גלוקוז מכילה 6 אטומי פחמן, ומכאן נוכל בקלות למצוא כמה מולי אטומי פחמן ישנם ב- 100 גרם של גלוקוז:

$$n (\text{C atoms, in } 100 \text{ g glucose}) = 6 * n (\text{glucose molecules in } 100 \text{ g}) = 6 * 0.555 \text{ mol} = 3.330 \text{ mol}$$

ומכאן ניתן למצוא מה היא המסה של אטומי פחמן אלה:

$$m (\text{C atoms in } 100 \text{ g glucose}) = n (\text{C atoms, in } 100 \text{ g glucose}) * A_w (\text{C atom}) = 3.330 \text{ mol} * 12.011 \text{ g/mol} = 39.997 \text{ g}$$

מכיוון שביקשנו מאיתנו אחוז משקלי, וזהו ערך חסר יחידות (ושאינו תלוי בכמות הגלוקוז שבחרנו לישב עבורה), נותר לנו כעת לחלק את מסת אטומי הפחמן במסת המולקולה כדי למצוא את האחוז המשקלי:

$$\%w (\text{C atoms in glucose}) = (39.997 \text{ g} / 100 \text{ g}) * 100\% = \sim 40.0\%$$

האם ניתן היה לעשות זאת בדרך קצרה יותר? התשובה היא כן. במקום לעבוד דרך מסה, היינו יכולים להסתכל על מול אחד של גלוקוז. משקלו של הגלוקוז במקרה זה היה 180.156 גרם (לפי המסה המולרית). אנו יודעים שבמול של גלוקוז ישנם 6 מול של פחמן, ולכן מסת הפחמן במול גלוקוז הינה

$$m (\text{C atoms in } 1 \text{ mol glucose}) = n (\text{C atoms in } 1 \text{ mol glucose}) * A_w (\text{C atoms}) = 6 \text{ mol} * 12.011 \text{ g/mol} = 72.066 \text{ g}$$

וכעת ברשותנו המשקלים הרלווטיים שניתן לעשות ביניהם יחס ישיר ולקבל אחוזים:

$$\%w (\text{C atoms in glucose}) = (72.066 \text{ g} / 180.156 \text{ g}) * 100\% = \sim 40.0\%$$

תרגיל 10

מצאו את האחוז המשקלי של חמצן בחומצה אצטית (acetic acid) – נוסחה מולק' $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$.

תרגיל 11

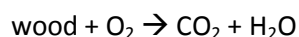
נתון חומר שמורכב רק מהיסודות פחמן ומימן. מצאו את נוסחתו האמפירית של החומר אם נתון שהאחוז המשקלי של המימן הוא 17.342%, ושל הפחמן הוא 82.658%.

פרק ג – תגובות כימיות, סטויכיומטריה, איזון משוואות תגובה

ג.1. תגובות כימיות

רבות מהתופעות המרתקות הנחקרות בכימיה הן **תגובות כימיות (chemical reactions)**. בתופעות אלה, חומר משנה את זהותו, והופך לחומר אחר. במסגרת תגובה כימית, החומר אשר היה בתחילת התגובה, וכמותו קטנה, נקרא בשם **מגיב (reactant)**. כתוצאה מהתגובה, נוצרה או גדלה כמות של חומר חדש, שנקרא בשם **תוצר (product)**. נהוג לסמן את התגובה במשוואות תגובה כימיות, כך שמהגיב נכתב מצד שמאל, חץ מסמן את התגובה הכימית – מוביל מן המגיב אל התוצר, והתוצר נכתב בצד ימין. במקרה של ריבוי מגיבים ו/או תוצרים, הם נכתבים יחדיו עם חיבור, בצד המתאים של חץ התגובה (מתחת לדוגמה הכללית נכתבה משוואת תגובה כימית של שריפת עץ, לדוגמה):

reactant → product



מה מתרחש בתגובה כימית? כיצד המגיב "נעלם" וכיצד נוצר התוצר? בעבר הרחוק, כאשר היו למשל שורפים עץ ורואים שהוא "נעלם" לעשן (ואדי מים), חשבו שהחומר של העץ "נעלם". אבל כאשר מודדים את מסת העץ, ואת מסת החמצן הנדרש לשריפתו (עץ לא יכול להישרף בואקום!), מגלים שמסה זו זהה למסת התוצרים מן השריפה (נדרש לשם כך איסוף הגזים, כלומר ביצוע השריפה בכלי סגור). **חוק שימור המסה (law of conservation of mass)** נכתב בעקבות ניסויים כאלה, והוא קובע שהמסה במערכת סגורה נשמרת לאורך התגובה הכימית. כלומר, אם התחלנו ממסה מסוימת של מגיבים (נניח 2 ק"ג), לאורך התגובה הכימית מסה זו תישמר, וגם בסיום התגובה (בין אם יש לנו כעת רק תוצרים, או בין אם יש לנו גם תוצרים וגם שאריות של מגיבים, כגון פחם במקרה של שריפת עץ), עדיין ניוותר עם אותה המסה (של 2 ק"ג). מה מצדיק את החוק הזה? אופיין הבסיסי של תגובות כימיות: בעת התרחשותן, אטומים אינם נעלמים ואינם נוצרים. בעת תגובה כימית, כמות וסוג היסודות שהיו במערכת (שבה מתקיימת התגובה הכימית, למשל מיכל, או חדר וכו') נשמרים. אז מה כן בתגובה כימית? כיצד "גוש" עץ הופך להיות מים ופחמן דו חמצני? התשובה נעוצה בכך שבעת תגובה כימית, האטומים משנים אופן קישורם זה לזה, וכך נוצרות מולקולות תוצר חדשות ונשברות מולקולות מגיב. אבל אבני הבניין שמהן המולקולות החדשות מורכבות הן אותן אבני הבניין – האטומים – שהיו במגיבים.

אם נחזור לדוגמתנו של שריפת העץ, הפחמן הדו-חמצני, אחד מתוצרי השריפה, לא הגיע "יש מאין". אטומי הפחמן שבו הגיעו מהמולקולות האורגניות שבעץ, ואילו אטומי החמצן שבו הגיעו משני מקורות אפשריים – החמצן מהאוויר ששימש לשריפה, והחמצן שהיה בעץ עצמו. גם אם לא כל העץ נשרף, עדיין יהיה פילוג של אטומי הפחמן – חלקם יהיו בפחמן דו חמצני, חלקם אולי בתוצרים גזיים אחרים (כגון החומר הרעיל מאוד CO, פחמן חד חמצני, שגורם לחנק בבע"ח מכיוון שהוא נקשר להמוגלובין באופן תחרותי לחמצן ומפחית את יכולתו של הדם לשאת חמצן אל הרקמות השונות בגוף) וחלקם עדיין בעץ – אבל כמותם הכללית במערכת – שנקבעה לפי כמותם כפי שהייתה במגיבים, נותרה קבועה לאורך התגובה, וגם בסופה. למי שיתר קל לו לדמיין זאת – חשבו על ילד שמשחק בלגו. ייתכן שהוא יגיע לחדר עם קוספת לגו שבה ישנו בניין בנוי כלשהו. הבניין מכיל את כל החתיכות של הלגו שנתונות לילד למשחק. גם אם הילד יפרק כליל את הבניין, ויבנה ממנו מבנים חדשים (כגון רכב ומטוס), עדיין מבנים אלה נסמכים על אותן החתיכות – מבחינת כמותן וסוגיהן – שהיו נתונות לילד מלכתחילה. בהנחה שאף אחד לא נכנס לחדר עם חתיכות נוספות, ובהנחה שהילד לא זרק מן החלון חתיכות, כמות החתיכות וסוגן יישמר לאורך כל פעילותו של הילד בחדר, ללא קשר למה שיבחר לבנות איתן. ההקבלה כאן היא שהחתיכות הן האטומים (כמות וסוגי יסודות), הבניין בהתחלה הוא המגיב, והמטוס והרכב הם התוצרים.

לאורך נלמד הקורס שיקולים חשובים לגבי תגובות כימיות, כגון האנרגיות המעורבות בהן (איזה מבנה יהיה עדיף – בניין או רכב ומטוס? האם נצטרך להשקיע אנרגיה לצורך קבלת הרכב והמטוס מהבניין?) בפרק תרמוכימיה,

ומהירות התגובה (מה הוא קצב בניית המטוס?) בפרק קינטיקה. ישנן תגובות מהירות מאוד (כמו למשל המרה של חומר נפץ לתוצרים גזיים בעת פיצוץ) וישנן תגובות איטיות מאוד (למשל שינוי המבנה המחזורי של מוצקים, על פני מאות שנים – למשל הפיכה של גרפיט ליהלום). תגובות מסוימות אולי לא נראות מרשימות במיוחד כלפי חוץ, אך הן המאפשרות את התהליכים שנדרשים לחיים, ואחרות נראות אולי מרשימות למדי (החלפת צבעים בזהים) אך אולי הן פחות רלוונטיות לשימושים יום-יומיים. רבים מאתגרי מדע הכימיה כרוכים בניסיון לפענח את אופן התרחשות התגובות, אפיון החומרים המעורבים בהן, והאופן שבו פרמטרים שונים משפיעים עליהן.

בינתיים כאן בהקדמה נציין הערה טכנית: לשם כתיבת תגובה כימית, חשוב מאוד לדעת לאפיין אילו חומרים הם המגיבים ואילו חומרים הם התוצרים. אם אחד מאלה לא ידוע, לא ניתן לכתוב משוואת תגובה כימית מפורטת. ולשם כתיבה מועילה ומדויקת, יש לרשום את הנוסחה המולק' של החומרים, ולא כתיבה כללית (כפי שעשיתי מעלה כשכתבתי "עץ") של החומר.

תרגיל 12

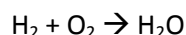
שף מבשל מנה אך היא נשרפת לו בטעות. הוא לחוץ כי הוא נמצא בחדר סגור והוא פוחד שהוא איבד בעקבות כך הרבה חמצן (שדרוש לו לנשימה). הוא יודע שהוא שם 34 גרם של חומר גלם (מזון לא מבושל) ושכוסף התהליך, שבו המנה נשרפה כליל ולא נותרו ממנה נזלים או מוצקים, הוא קיבל שני תוצרי שריפה בלבד – רק מים (כאדים) ו-פחמן דו חמצני, במסות של 21 גרם ו-15 גרם בהתאמה. כמה מולים של חמצן מולקולרי שימשו בתגובה השריפה?

2.ג. סטויכיומטריה ואיזון משוואות תגובה

מקור השם סטויכיומטריה הוא מיוונית (סטויכיון – יסוד, מטריה – מדידה) והתחשבות בסטויכיומטריה מאפשרת הפקה של ערכים כמותיים מתוך משוואות תגובות כימיות. אז מהי בעצם סטויכיומטריה? סטויכיומטריה היא תחשיב הלוקח בחשבון את כמות היסודות (וסוגם) על פני המגיבים והתוצרים. בעוד שמשוואת תגובה "כללית" מציינת מה היא הזהות של המגיבים והתוצרים, היא איננה מספקת לנו את היחסים הכמותיים בין המגיבים לבין התוצרים, או בין מגיב אחד לבין מגיב נוסף, אם ישנו יותר ממגיב אחד (וכנ"ל לגבי התוצרים). אבל כיצד נוכל לקבל יחס זה? התשובה טמונה בהתחשבות בכמות היסודות המופיעים בכל אחד מן המגיבים, ובתוצרים – תחשיב זה הוא ליבה של הסטויכיומטריה.

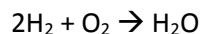
נדגים זאת ע"י בחינה מקרוב של שתי תגובות כימיות – הראשונה הינה יצירת מים מחמצן מולק' ומימן מולק', והשנייה הינה תגובת שריפה (חמצון) של גלוקוז.

נתבונן בתגובה בין מימן מולק' לבין חמצן מולק', ליצירת מים:

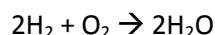


התגובה הזו חשובה מאוד למדענים המפתחים דלקים עתידיים, מכיוון שתגובה זו משחררת אנרגיה רבה אך בניגוד לשירפת דלק, היא אינה פולטת מזהמים כגון עשן אלא רק מים. עם זאת, כפי שהיא כתובה מעלה היא בעייתית – אם למשל התחלנו ממולק' אחת של מימן ומולק' אחת של חמצן, יש בידינו 2 אטומי מימן ו-2 אטומי חמצן, אבל בתוצר יש שני אטומי מימן ורק אטום אחד של חמצן. חסר לנו אטום חמצן! ואסור לנו "להעלים" אטומים בעת המעבר ממגיבים לתוצרים! כיצד נפתור את הסוגיה? הרי ידוע מהטבע (וממעבדות רבות) שאכן מימן מולק' מגיב עם חמצן מולק' ליצירת מים. אז לא נוכל להוסיף תוצר נוסף, למשל אטום חמצן בודד. מה עושים על מנת שהמשוואה בכל זאת תהיה נכונה, מבלי לשנות את זהות החומרים שבה? התשובה היא שמבצעים איזון סטויכיומטרי, על ידי הכפלה כמותית של חלק מהמגיבים או התוצרים. אנו רואים שבתוצר היחס בין יסוד המימן

ליסוד החמצן הוא 2 ל-1, ולכן נתקן את היחס הנדרש הזה, גם עבור המגיבים. כלומר, נוסיף **מקדם סטויכיומטרי** (**stoichiometric coefficient**), שיביע את היחסים הכמותיים בין החומרים המשתתפים בתגובה. המקדם נרשם כמספר (עדיפות לשלם) בצידה השמאלי של הנוסחה המולק'.

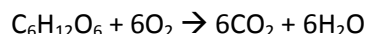


כך, טיפלנו ביחס שבין היסודות במגיבים כך שיתאים ליחס שאנו רואים בתוצרים, אבל אנחנו עדיין בבעיה – ישנם כעת ארבעה אטומי מימן במגיבים ושני אטומי חמצן במגיבים, אבל רק 2 אטומי מימן בתוצרים ורק אטום חמצן בתוצרים. נמשיך את הטיפול במשוואה ע"י הוספת מקדמים סטויכיומטריים מתאימים (תהליך שנקרא "איזון משוואה", (balancing the (chemical) equation):



כעת המשוואה נכונה ותקינה. ישנה אותו כמות וסוג של יסודות בשני "צידיה" – מגיבים ותוצרים. נאמר כעת על המשוואה שהיא מאוזנת. אנו לומדים מכך שעל מנת לבצע את התגובה נדרשים פי שניים מולים (או מולקולות) של מימן מולק' מאשר חמצן מולק', תובנה שלא היינו יכולים להסיק ללא ביצוע האיזון.

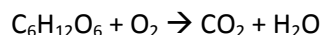
בדוגמתנו השנייה, נתבונן בתגובה יותר מסובכת אבל חשובה מאוד (אחת הקריטריות לקיום חיים בבע"ח) – שריפה (חמצון) של גלוקוז. נניח שמתקיימת שריפה מלאה (full/complete burn/combustion), כלומר התוצרים היחידים שיתקבלו הם רק מים ופחמן דו חמצני (ללא פיח, פחמן חד חמצני וכו'). בעוד שישנם חומרים שיכולים להישרף ללא חמצן מולק' מן האוויר (למשל, חומרים הודפים במנועים רקטיים), גלוקוז אינו יכול לעשות זאת כי הוא אינו יכול לספק מספיק חמצנים ליצירת פחמן דו חמצני מכל הפחמנים שבו: נוסחתו המולקולרית, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, מראה שלכל מולק' גלוקוז חסרים שישה אטומי חמצן על מנת לייצר את ששת המולק' של פחמן דו חמצני שנצפה לקבל אם כל אטומי הפחמן שבו יגיבו. אבל זוהי רק חצי צרה (בקירוב)! מה לגבי אטומי החמצן הנדרשים עבור המים שיופקו בשריפה? הרי בגלוקוז ישנם אטומי מימן, שלא מוצאים את דרכם אל הפחמן הדו חמצני, ולכן יהיו חייבים להיות חלק מהמים שיווצרו. מהיותה של כל מולק' מים מכילה שני אטומי מימן, יהיה עלינו להפיק, מכל מולק' גלוקוז, 6 מולקולות מים. אבל כל מולק' מים כזו דורשת גם אטום חמצן, כך שנצטרך להוסיף לאספקה החיצונית שאנו דורשים, עוד 6 אטומי חמצן. כלומר, נצטרך "להביא מבחוץ" (למולק' הגלוקוז) סה"כ 12 אטומי פחמן. מקורם של האטומים הללו יהיה בחמצן מולק' (מן האוויר), ולכן נצטרך 6 מולק' של חמצן. נרשום זאת באופן מסודר במשוואת התגובה, ע"י פירוט המקדם הסטויכיומטרי המתאים:



כעת יש בידינו משוואה מאוזנת (balanced equation), ונוכל לבדוק זאת ע"י תחשיב של סוג וכמות היסודות במגיבים לעומת סוג וכמות היסודות בתוצרים:

במגיבים יש לנו 6 אטומי פחמן, 12 אטומי מימן, ו-18 אטומי חמצן. בתוצרים, יש לנו 6 אטומי פחמן, 12 אטומי מימן, ו-18 אטומי חמצן. הכמויות והסוגים זהים במגיבים ובתוצרים ולכן המשוואה תקינה ומאוזנת.

שימו לב, שמשוואה ללא מקדמים סטויכיומטריים, כגון זו הכתובה מטה, נותנת לנו הרבה פחות מידע. איננו יודעים כמה מולים (ובהתאם לכך, מסה) אנו צריכים של המגיבים אחד ביחס לשני, וגם לא כמה מולים (ומסה) נקבל מכל אחד מהתוצרים:



נחזור לרגע להתבונן במשוואה המאוזנת של תגובה זו, ונשים לב לעקרון חשוב – בעוד שסוג היסודות וכמותם נשמרת במעבר ממגיבים לתוצרים, כמות המולים לאו דווקא נשמרת. במשוואת התגובה ניתן לראות שאם למשל

התחלנו מ-7 מול של מגיבים (בניח 1 מול של גלוקוז ו-6 מול של חמצן מולק), קיבלנו בתוצרים 12 מול! אין "חוק שימור של מולים" ואין שום טעם לשאוף אליו. ישנן תגובות בהן מולק' מתפרקות (ואז כמות המולים גדלה במעבר ממגיבים לתוצרים), וישנן תגובות בהן מולקולות של מגיב מתחברות זו לזו ליצירת תוצר חדש שהינו מולק' גדולה יותר (למשל בתגובות פולימריזציה) – במקרה זה כמות המולים תקטן במעבר ממגיבים לתוצרים.

שימו לב – כל משוואת תגובה שאתם רואים (בקורס וגם מחוצה לו) חשודה כלא מאוזנת. עליכם לאזן אותה (או לוודא שהיא מאוזנת) לפני שאתם מתחילים לעבוד איתה באופן כמותי. כלומר, אם כל שברצונכם לדעת מהמשוואה הוא "מי המגיבים, מי התוצרים?", אין צורך לאזן אותה. אבל אם אתם רוצים להסיק ממנה כמויות/מסות וכו', של מגיבים ביחס אחד לשני, או ממגיבים לתוצרים וכו', עליכם לאזן את המשוואה. אל תניחו שמשוואה שקיבלתם היא כבר מאוזנת. וודאו זאת!

תרגיל 13

פרופאן הוא חומר פחמימיני (כלומר, שמורכב רק מאטומי פחמן ומימן) שמשמש באופן נפוץ כ"דלק" בגז בישול ביתי. נוסחתו C_3H_8 . רשמו ואזנו את משוואת השריפה המלאה של פרופאן.

תרגיל 14

המתכת אלומיניום משמשת רבות כחומר הנדסי – משתמשים בה למכשור ולמבנים, כולל של כלי רכב (כגון מטוסים ומכוניות חשמליות). אלומיניום טהור מגיב עם חמצן מהאוויר, לקבלת תחמצות אלומיניום שנקראת אלומינה (alumina), שנוסחתה Al_2O_3 . אזנו את המשוואה הבאה ליצירת אלומינה.



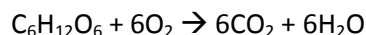
תרגיל 15

אחד הניסויים הנחמדים שניתן לעשות בבית, להפקת קצף ובועות, הוא לקחת סודיום ביקרבונאט ("סודה לשתייה"), $NaHCO_3$, ולהגיב אותו עם חומצת לימון (חומצה ציטרית, citric acid), $C_6H_8O_7$. כמוצקים, המגע ביניהם מצומצם ולכן התגובה תהיה איטית, אבל אם מערבבים שתי תמיסות מימיות שלהם (כלומר, אחרי שכל אבקה הומסה במים), מקבלים תגובה מהירה שבה נוצרים פחמן דו חמצני (ניתן לראות אותו כבועות גז), מים, ומלח סודיום ציטארט, $Na_3C_6H_5O_7$. רשמו משוואה עבור התגובה ואזנו אותה.

פרק ד – ניצולת, מציאת נוסחה אמפירית מאנליזת שריפה, גורם מגביל

ד.1. ניצולת

משוואת תגובה מאוזנת מציגה לנו את היחסים הכמותיים הפנימיים בין החומרים המשתתפים בתגובה. למשל, ניתן ללמוד ממנה שנדרשים פי שניים ממגיב כלשהו לעומת מגיב אחר, או שנקבל על כל מולק' של מגיב מסוים שלוש מולק' של תוצר מסוים וכו'. כמובן, שמדיעת המשקל המולק' של המגיבים והתוצרים, נוכל לחשב את המסות של החומרים המעורבים. לשם דוגמה, נשוב אל התגובה לשריפת גלוקוז שראינו בפרק הקודם:



אם ניקח כמות של 1 מול של גלוקוז, כלומר 180.156 g של גלוקוז, אנו אמורים לקבל, בתגובת שריפה מלאה (בהינתן שישנם גם 6 מול של חמצן מולק' כמגיב) 6 מול של מים, שמסתם:

$$m(\text{H}_2\text{O}) = n(\text{H}_2\text{O}) \cdot M_w(\text{H}_2\text{O}) = 6 \text{ mol} \cdot 18.015 \text{ g/mol} = 108.09 \text{ g}$$

בפועל, כאשר נבצע את התגובה, ונמדוד את מסת המים שמתקבלים, לא נקבל 108.09 גרם. תמיד נקבל פחות מכך. לעיתים נקבל מסה שהיא משמעותית קטנה יותר (אולי, למשל, רק חצי או עשירית מכך) ולעיתים נקבל מסה שהיא קרובה מאוד לכך, (למשל, 108.0899 גרם).

המונח שמגדיר כמה תוצר קיבלנו מהתגובה בפועל (כלומר, היכולת שלנו "לנצל" את התגובה לקבלתו) נקרא בשם **ניצולת (yield)** של התגובה. הניצולת התיאורטית (כי כאמור היא אף פעם לא מושגת במלואה), היא הניצולת שתתקבל לו כל המגיבים (עד המולקולה האחרונה שבהם) היו הופכים לתוצרים. הניצולת שמתקבלת בפועל (actual yield), כלומר מה בפועל קרה בתגובה הספציפית עליה אנו מסתכלים (למשל, כפי שהיא התרחשה בתא כלשהו אצל מטופל ספציפי בשעה כלשהי, או כפי שהיא התרחשה בכלי במעבדה בניסוי מס' 133 שערכנו לפני חודש ויומיים), תמיד תהיה נמוכה מהניצולת התיאורטית.

מדוע? ישנן שלל סיבות אפשריות לכך, וביניהן למשל חוסר ערבוב טוב בין המגיבים כך שהם לא תמיד "פוגשים" אחד את השני, חומרים שנותרו בכלי (למשל, היו מרוחים על הדפנות), תנאי תגובה לא מספיק אופטימליים (למשל, טמפ' לא מתאימה, או לא מספיק זמן לסיום התגובה), תגובות "חזרה" שבהן התוצרים הופכים חזרה למגיבים, 'יצירה של "תוצרי לוואי" על חשבון התוצרים שאותם אנו מודדים לצורך חישוב הניצולת ועוד ועוד.

אם נחזור לדוגמה מעלה, נניח שמטיילת במדבר אומרת לנו שהיא החליטה לשרוף גלוקוז על מנת לייצר מים לחבריה הצמאים. אם היא אומרת לנו שהיא שרפה גלוקוז וקיבלה 100 גרם של מים, וכעת היא שואלת אותנו האם היא ביצעה את התגובה באופן מוצלח (כלומר, קיבלה ניצולת גבוהה של מים), מה נענה לה? האם 100 גרם של מים "נחשבים" לניצולת גבוהה או נמוכה, ובהתאמה, למסה רבה או מועטה? התשובה היא שזה תלוי כמה מים צפינו לקבל, לו התגובה הייתה מבוצעת במלואה. לשם כך, כמובן, עלינו לדעת עם כמה גלוקוז התבצעה התגובה. אם המטיילת השתמשה ב-100 מול של גלוקוז, וקיבלה רק 100 גרם של מים, הניצולת בפועל הייתה נמוכה מאוד. אם היא השתמשה ב-1 מול של גלוקוז, הניצולת בפועל היא די גבוהה כי מסת המים הגיעה קרוב למסה שהיינו מצפים לקבל בשריפה מלאה (של 1 מול גלוקוז). כיצד נענה לה? נשתמש בהגדרה המקובלת לדיווח ניצולת של תגובה, והיא, לפי אחוזים:

$$\% \text{yield} = (\text{actual yield} / \text{theoretical yield}) \cdot 100\%$$

אם המטיילת אומרת לנו שהיא אכן השתמשה ב-1 מול של גלוקוז, נוכל לחשב מכך את הניצולת התיאורטית (חושבה מעלה, 108.09 g) ולקבל את הניצולת לתגובה:

$$\text{yield of reaction} = (100 \text{ g water} / 108.09 \text{ g water}) * 100\% = 92.5\%$$

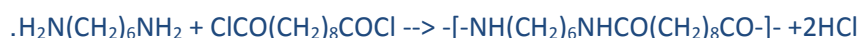
כאשר כימאים מבצעים תגובה שמטרתה הפקת תוצר, כמובן שהשאירה היא לקבל ניצולת גבוהות ככל הניתן. למרבה הצער, תגובות מועילות רבות (למשל, לייצור חומרים פעילים בתרופות מסוימות) אינן בעלות ניצולת גבוהות (לעיתים אפילו רק אחוזים בודדים), מה שמעלה את כמות המשאבים הנדרשים (והמחיר) לייצור התוצרים המבוקשים. אחד האתגרים של כימאים סינתטיקאים (כימאים שמייצרים חומרים) הוא לא רק להמציא דרכים לייצר חומרים חדשים, אלא גם לנסות להבין, כאשר הניצולות אינן גבוהות, מדוע ולמצוא פתרונות להעלאתן (כולל מציאת דרכי הכנה חלופיות, כלומר ייצור התוצר דרך תגובות כימיות אחרות).

תרגיל 16

תהליך הבר-בוש (Haber Bosch process) הוא אחת מפריצות הדרך החשובות בייצור דשנים לגידול כמויות מזון בהיקף נרחב. בתהליך זה, חנקן מהאוויר מגיב עם גז מימן לקבלת אמוניה (NH_3). חקלאי ביצע את התגובה במעבדה עם 10 ק"ג אוויר ומספיק מימן. הוא קיבל 0.8 ק"ג של אמוניה. מה הייתה הניצולת של התגובה שביצע החקלאי? נתון: האחוז המשקלי של חנקן באוויר הוא 77%.

תרגיל 17

אחת מהדרכים לייצר ניילון (אחד מסוגי הניילון) הינה ע"י תגובת דחיסה (יצירת קשר כימי לחיבור בין מולקולות) של מולקולה שיש לה שני קצוות אמינים (NH_2) שנקראת "דיאמין" (הסימול בסוגריים באמצע מראה שיש במולק' זו מספר יחידות מתילן, CH_2 , שחוזרות על עצמן) ושל מולקולה עם קצוות של אציל כלוריד (COCl) שנקראת "דיאציל הליד" לפי המשוואה הבאה:



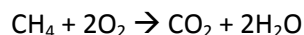
הסימול בתוך הסוגריים המרובעים הוא ליחידה שחוזרת על עצמה בתוך הפולימר. בתגובה ניתן לראות שקצה אמיני הגיב עם קצה אציל כלורידי ליצירת הקשר החדש בין שתי היחידות. ניתן לראות לפי משוואת התגובה שנוצרת חומצה כלורית (HCl) יחד עם הפולימר הנבנה, לכל חיבור בין דיאמין לבין אציל כלוריד. מהנדס כימי במפעל התבקש להיערך לקראת טיפול בשפכים החומציים שיווצרו. הוא שאל את הפועלים והם אמרו לו שהם הכניסו 220 ק"ג של דיאמין ועודף של דיאציל הליד לריאקטור (מיכל שבו מתרחשת תגובה כימית). בתגובות אלה הניצולת האופיינית במפעל המדובר הינה 70%. כמה ק"ג של חומצה כלורית צפויים להיווצר?

2.ד. מציאת נוסחה אמפירית מאנליזת שריפה

בפרק 2א ראינו נוסחאות מסוגים שונים, פוגשנו שם את הנוסחה האמפירית (תזכורת – נוסחה שבה ניתנים היחסים בין היסודות במולקולה של חומר מסוים). כיצד ניתן, באופן ניסיוני, לחשב את הנוסחה הזו? אחת הדרכים הנפוצות נקראת בשם **אנליזת שריפה (combustion analysis)**. אנליזה זו מבוססת על תגובת חמצון (בד"כ של חומרים אורגניים פשוטים יחסית) שבמסגרתה נשקלים הן המגיבים והן התוצרים של תגובה זו. ההנחה העומדת מאחורי האנליזה היא שמקור כל התוצרים שנאספו הוא במגיבים בלבד (ולכן המערכת סגורה, כלומר אין מעבר חומר מהסביבה אל המערכת ולהפך), ולכן כל מולי הפחמנים, מימנים, ולעיתים יסודות נוספים (כגון חנקן וכו') חומר מהסביבה אל המערכת ולהפך).

שיש בתוצרים היו צריכים להיות במגיבים. מידעת היחסים המוליים בין התוצרים, ניתן להסיק לגבי היחסים המוליים של היסודות בתוך המגיבים. הנה דוגמה:

נניח ששרפנו מתאן, CH_4 , ונניח גם שריפה מלאה (כלומר התוצרים הם רק פחמן דו חמצני ומים) ונניח גם ניצולת של ¹⁸ 100%. לאחר איזון, משוואת התגובה הינה:



ניתן לראות שהיחס המולי בין התוצרים הינו $\text{CO}_2:\text{H}_2\text{O}$ 1:2. מכיוון שכל מולק' פחמן דו חמצני כוללת אטום פחמן אחד, וכל מולק' מים כוללת שני אטומי מימן, נמצא שהיחס בין אטומי פחמן לבין אטומי מימן, $\text{C}:\text{H}$, הינו 1:4, וכך למעשה מצאנו את הנוסחה האמפירית (שמקרה הזה היא גם המולק') של המגיב האורגני שלנו. הערה טכנית – ברוב הניסויים של אנליזות שריפה לא נקבל ישירות את כמות המולים של התוצרים, אלא נצטרך להסיק אותם, למשל מתוך מסות, או מתוך נתונים אחרים (כגון לחצים, נפחים, וכו') – עליהם נלמד במהלך הקורס בפרק של 'גזים'.

תרגיל 18

נפתלן (naphthalene) הוא חומר אורגני המורכב מאטומי פחמן ומימן בלבד, אשר שימש בעבר להרחקת עשים מארונות בגדים. לכמות מסוימת של נפתלן בוצעה אנליזת שריפה, ובעקבותיה נמצא כי נוצרו 1.162 g של פחמן דו חמצני ו-0.190g של מים. מצאו את הנוסחה האמפירית של נפתלן.

תרגיל 19

תרכובת אורגנית כלשהי, שנוסחתה לא ידועה, מכילה רק את שלושת היסודות הבאים: פחמן, מימן וחמצן. טכנאי מעבדה החליט לבצע עבודה אנליזת שריפה. לשם כך הוא שקל מסה של 1.367 גרם שלה, ושרף אותה עם חמצן מהאוויר, בכמות לא ידועה. בעקבות השריפה, התקבלו 3.002 גרם של פחמן דו-חמצני, ו-1.640 גרם של מים. מה היא הנוסחה האמפירית של התרכובת האורגנית?

ד.3. גורם מגביל

כאשר נתונה לנו משוואת תגובה מאוזנת, היא נותנת לנו מידע על היחסים הפנימיים, הכמותיים, הנדרשים בין החומרים, או במילים אחרות על אופן התרחשות התגובה. למשל, אם כתוב לנו:



אנו לומדים מכך שעל כל יחידת חומר A שנרצה להגיב, נדרשות 2 יחידות של חומר B. כמובן, שהייצוג של A יכול להיות עבור מולק' אחת, עשר מולק', חצי מול ועשרה מול, ואז בהתאם נדרוש שתי מולק', עשרים מולקולות, מול ועשרים מול של B בהתאמה. משוואת התגובה המאוזנת נותנת לנו מידע מה נדרש ומה נקבל בהתאם למה שנדרש.

¹⁸ זוהי הנחה נוחה לצורך פתרון תרגילים, שנעבוד איתה אלא אם יאמר לנו אחרת, אך תמיד ניקח בחשבון שזוהי הנחה בלבד ומערכות אמיתיות אינן מתנהגות כך.

אבל, נניח לרגע שיש לנו כלי שאליו הכנסנו A אחד ו-B אחד. מה יקרה כעת? האם תתרחש תגובה? ובכן, אם הכנסנו מולקולה אחת של A, ומולק' אחת של B, התשובה היא לא, לא תתקיים תגובה (כי אין מספיק B כדי להגיב עם A). אבל, אם הכנסנו עשר מולק' של A, ועשר מולק' של B (כלומר, אנחנו עדיין תחת ההגבלה שניתנה בתחילת הסעיף – יחס של 1:1 בין A ל-B), האם תהיה תגובה? התשובה היא כן. לפי היחס הנדרש, בהנחה שהתגובה היא בעלת ניצולת של 100%, כל ה-B יגיב, ומכיוון שנדרשים רק חצי מכמות ה-B, חצי מכמות ה-A יגיב. כלומר, עשר מולק' B יגיבו, וחמש מולק' A יגיבו. כמה C נקבל? לפי המשוואה, אנו רואים שהמקדם של C זהה למקדם של A, ולכן תהיה לנו כמות של C שהיא כמו כמות ה-A שהגיב, כלומר נקבל 5 מולק' C. יש כאלה שנוח להם יותר לראות את ההסבר מעלה בטבלה, שמחולקת לפי מצב התחלתי (לפני שהתגובה יצאה לפועל), רישום (למשל עם X) של השינויים בעת התגובה, ושורה אחרונה למצב הסופי (בסיום התגובה). נרשום טבלה כזו לדוגמה הנידונה כאן:

	Molecules of A	Molecules of B	Molecules of C
Before reaction	10	10	0
Change (due to reaction)	-0.5x	-x (x=10 due to 100% yield)	+0.5x
Final state (after reaction)	5 (=10-0.5x)	0 (=10-x)	5 (=0.5x)

אם כעת יבוא אלינו מישור ויתלונן שאין מספיק C, לא נוכל להאשים בכך את הניצולת. אלא, מי שהגביל אותנו מלקבל עוד C הוא הכמות הנתונה של B: אין לנו מספיק B כדי לגרום לכל ה-A להגיב (ואכן נשאר לנו עודף מ-A). במקרה כזה, שבו היחסים בכלי הספציפי (או באברון ספציפי בתא וכו') של המגיבים אינם מתאימים באופן מדויק ליחסים הסטוכיומטרים של תגובה מסוימת שהם אמורים לבצע¹⁹, אנו נאמר על המגיב שגורם להגבלה זו ("שאינ ממונו מספיק", כמובן ביחס למגיבים האחרים תוך התחשבות במקדמים הסטוכיומטרים) שהוא ה**גורם המגביל** (**limiting factor/reactant**) בתגובה. מכאן נובע שלאחר ביצוע התגובה, יותרו שאריות של המגיבים האחרים. שימו לב שעל מנת לקבוע גורם מגביל במערכת נתונה כלשהי (זה תמיד ספציפי, לכל מערכת תגובה), עלינו לבצע את השלבים הבאים: 1. לאפיין מי המגיבים ומי התוצרים, ולרשום עבורם משוואת תגובה מתאימה. 2. לאזן את משוואת התגובה. המקדמים הסטוכיומטרים הם קריטיים לשלבי ההמשך. 3. במערכת הספציפית שעליה מדובר, למצוא את המולים של המגיבים הנתונים. 4. ע"י סעיפים 2 ו-3 למצוא האם קיים גורם מגביל, ואם כן, לציין מי הוא.

תרגיל 20

אחת מהצורות שבה ברזל (Fe) מוצק ניזוק ע"י עיכול כימי הינה ע"י תגובה עם חומצה כלורית, HCl. התוצרים המתקבלים מתגובה זו הינם ברזל דיכלוריד, FeCl₂, וגז מימן, H₂. יזם החליט להשתמש בברזל וחומצה כמגיבים ליצירת גז מימן (אותו ניתן אח"כ לחמצן עם חמצן לקבלת מים ושחרור אנרגיה, כפי שקורה ברכבים ממונעי מימן). אם יש ברשותו 2 גרם של ברזל, מה היא המסה המינימלית של החומצה הכלורית שעליו להגיב איתו על מנת להפיק את מירב המימן? אם הוא ייקח עוד חומצה, האם הוא יפיק יותר מימן?

¹⁹זוהי בד"כ יהיה המצב. בטבע בד"כ אין את היחסים המדויקים הנדרשים, וזאת לעומת מעבדות ו/או מפעלים בהם מוכנסים המגיבים כמה שיותר קרוב ליחסים המוכתבים ע"י המשוואה על מנת לנצל ככל הניתן את המגיבים ולצמצם את כמות השאריות.

תרגיל 21

דרך נוספת שבה נוצר נזק למבנים מברזל היא ע"י החלדה (rusting). אחת מהצורות שבה הברזל המוצק עובר החלדה היא בתגובה עם מים וחמצן מולק', לקבלת ברזל טריהידרוקסיד (Fe(OH)_3). למהנדס יש 0.1 Kg של ברזל מוצק (טהור). הוא יודע שהברזל יוטבל ב- 200 מ"ל מים והוא יהיה חשוף ל- 30 g של חמצן. האם כל הברזל יחליד באופן הנתון בשאלה זו? אם כן, מה ישאר בעודף (מים או חמצן)? ואם לא, מה יישאר יחד עם הברזל שלא החליד – מים או חמצן? הערה – ניתן להניח שצפיפות המים הינה 1 g/mL.

תרגיל 22

תערובת דלקים ששימשה בימיו המוקדמים של תחום הרקטות הינה הידרזין (N_2H_4) ו-Dinitrogen (N_2O_4 , tetraoxide). כאשר שני חומרים אלה מגיבים זה עם זה, נוצרים גז חנקן (N_2) ומים. במערכת מסוימת נתון כי הכניסו 100 גרם של הידרזין ו- 200 גרם של DNTO. כמה גרמים של גז חנקן צפויים להיווצר (בהנחת 100% ניצולת)?

פרק ה – תערובות, תמיסות, ריכוזים

רבים מאוד מהחומרים בטבע אינם מופיעים כ"גוש" רציף של יסוד אחד²⁰, או אפילו של מולקולה מסוג אחד. אלא, הצורה הנפוצה שבה מוצאים חומרים בטבע היא **כתערובות (mixtures)**, כלומר מסה/מערכת/תווך המכיל שני חומרים ויותר. תערובת יכולה להיות **הומוגנית (homogenous)**, כלומר שההרכב שלה (כמה חומר מסוג א, כמה חומר מסוג ב) הוא אחיד על פני התערובת כולה, או **הטרוגנית (heterogenous)**, כלומר שההרכב שלה (כמה חומר מסוג א, כמה חומר מסוג ב) משתנה כתלות במיקום הדגימה/מדידה בתווך.

דוגמה לתערובות כאלה ניתנת להכנה בבית – כאשר ניקח נפח של בערך כפית אחת של אבקת סוכר ונכניס לתוך כוס מלאה במים, נוכל לראות שבתחילה קיבלנו תערובת הטרוגנית. זאת, מכיוון שגרגרי הסוכר שוקעים לתחתית ואינם מומסים על ידי המים. אם נסיף קשית ונשאב נוזל מתחתית הכוס, יהיו אחוזים גבוהים של סוכר במים ששאבנו. לעומת זאת, אם נשאב באמצעות הקשית נוזלים מחלקה העליון של הכוס, יהיו אחוזים נמוכים של סוכר במים ששאבנו. הסוכר אינו מפולג באופן אחיד על פני כלל התווך. לעומת זאת, אם נערבב היטב את הנוזל, ו/או נחמם אותה, נוכל לראות שגרגרי הסוכר נעלמים מיכולתנו לראות אותם – וזאת מכיוון שמולקולות של סוכר נעטפות על ידי מולקולות מים – תהליך שנקרא **הסמה (solvation)**. כל מולקולת סוכר כזו, שיש לה מעטפת הסמה, solvation shell, כלומר אוסף מולקולות מים ש"עוטפות" אותה ומפרידות אותה ממולקולות סוכר אחרות (שאליהן היא הייתה קשורה בתוך גרגרי הסוכר), יכולה כעת לנוע (באופן רנדומלי) ברחבי התמיסה, ואם ניתן להתליך ההסמה מספיק זמן להתרחשות עד למלווא (או קרוב לכך) – כלומר שכל מולקולות הסוכר הופרדו זו מזו ועטופות בממס, נקבל פיזור אחיד (ורנדומלי) של מולקולות הסוכר בתווך של המים. כעת, לא משנה מאיזה אזור בכוס נשאב מים, תמיד נמצא (בממוצע) את אותה כמות של מולקולות סוכר. התערובת כעת היא הומוגנית.

תמיסה (solution), היא תערובת נוזלית. מכיוון שבד"כ בתערובות ישנו פילוג לא אחיד מבחינת כמות (או אחוזים משקליים) של החומרים המרכיבים אותה, נהוג לומר בתמיסה שהרכיב שמהווה את רוב החומר בתמיסה הינו **הממס (solvent)**, ואילו הרכיב שנמצא במיעוט הינו **המונח (solute)**. ברוב התמיסות, הממס יהיה נוזל. דוגמה לשיוכים אלה יכולה להינתן בעזרת תמיסת הסוכר שתוארה מעלה. במקרה זה, מולקולות הסוכר הן המומס (יש פחות מהן מאשר מולקולות המים), ומולקולות המים מהוות את הממס. כמובן, שניתן להכין מגוון עצום של תמיסות – עם הרבה מאוד ממסים, ועם הרבה מאוד מומסים (מסוגים שונים, וגם כמובן בכמויות שונות). הציטופלסמה, למשל, היא תמיסה מאוד מורכבת, מכיוון שבעוד שהממס העיקרי שלה הוא מים, יש בה הרבה מאוד סוגי מומסים (פחמימות, חלבונים, מינרלים ועוד) והם עצמם נמצאים בכמויות שונות.

אחת התכונות החשובות ביותר של תמיסות היא **הריכוז (concentration)** של מומסים בתוכן. ריכוז, מסומן בקצרה כ-C, מוגדר בתור כמה חומר יש (כמות או מסה), מתוך התערובת כולה. ישנן מספר דרכים להגדיר ריכוז באופן מפורש, והנפוצה ביותר היא כמות החומר בתוך נפח התערובת (מסומן בד"כ כ-V, קיצור של volume). בהתאם, אחת היחידות הנפוצות והשימושיות ביותר לריכוז הינה המולר, Molar (מסומן בקצרה כ-M) המוגדר בתור כמות המולים של חומר בנפח 1 ליטר של תערובת.

$$C [\text{Molar}] = n [\text{mol}] / V [\text{Liter}]$$

למשל, אם ניקח בחשבון שבכפית הסוכר שלנו היו 3 גרם של גלוקוז, ושכוס המים שאליה הכנסנו אותו היו 180 מ"ל של מים (נניח שהמים מלכתחילה לא הכילו גלוקוז ושנפח התמיסה לא השתנה משמעותית בעקבות הוספת הסוכר), נוכל לחשב את הריכוז המולארי (molar concentration) של הגלוקוז בתמיסה:

²⁰ למשל, כמו ביהלום, שאם הוא טהור לחלוטין הוא אמור להכיל אטומי פחמן בלבד

$$n(\text{glucose}) = m(\text{glucose}) / M_w(\text{glucose}) = 3 \text{ g} / 180.156 \text{ g/mol} = 0.0167 \text{ mol}$$

$$C(\text{glucose solution}) = n(\text{glucose}) / V(\text{solution}) = 0.0167 \text{ mol} / 0.180 \text{ L} = 0.0925 \text{ M}$$

סוגים אחרים של ריכוזים הם למשל מסת המומס בנפח של תמיסה (ביחידות של g/L, למשל מיקרוגרם חלבון כלשהו למ"ל דם), כמות המולים במסה (במקום נפח) של תמיסה (יחידת ריכוז שנקראת מולל, molal, שיחידותיה הן mol/Kg), כמות המומס (או רכיב שמתעניינים בו) לכלל כמות של התערובת כולה (יחידות של יחידה למיליון – parts per million, או בקיצור ppm, או ביחידות של יחידה למיליארד, parts per billion, או בקיצור ppb) ועוד. ישנן דרכים אחרות להביע את הרכב התערובת, כגון אחוז משקלי (w%, שראינו בפרקים קודמים) ואחוז נפחי (v%, כלומר כמה נפח מתוך סך נפח התמיסה מקורו ברכיב שעליו מתמקדים – למשל, תמיסת אתנול עם מים, המשמשת לחיטוי משטחים וכלים, מוגדרת כ- 70% נפחי, כלומר 70% מנפחה הוא אתנול ו- 30% מנפחה הוא מים). לאורך הקורס נעבוד בעיקר עם מולר, ובהמשך הדרך בוודאי תיתקלו בגרסאות שונות של מולר (כגון מילימולר – millimolar, ומיקרומולר – micromolar) בלימודיכם ובספרות מקצועית שעוד תקראו.

הפרמטר של הריכוז הוא קריטי בביוכימיה בכלל וברפואה בפרט. למשל, אבחון מצבו של מטופל ע"י אנליזה כימית של הרכב הדם שלו יכול להעיד על מצב בעייתי בשל היות ריכוזים של חומרים מסוימים בדמו בעלי ערכים שסוטים מן הטווח התקין. דוגמה נוספת היא עבור היבטים טיפוליים – תרופות או חומרים מסוימים הניתנים בעת טיפול צריכים להיות בטווח ריכוזים מסוים על מנת להיטיב עם המטופל. ריכוז נמוך מדי עלול להיות לא אפקטיבי, ואילו ריכוז גבוה מדי עלול להיות מזיק ורעיל.

אחת התכונות הנוחות לעבודה בהיבט של ריכוזים הוא שאם בידינו תמיסה בנפח מסוים (נניח, גוף אדם עם מס' ליטרים של דם), איננו נדרשים לבצע אנליזה על כל התמיסה על מנת לקבוע את ריכוז החומרים שבה – בהינתן שהתמיסה היא הומוגנית, נוכל לדגום רק נפח קטן מתוך התמיסה ולבצע עליו את האנליזה לשם קביעת הריכוז (במקרה הנפוץ – דגימת דם של מס' מיליליטרים). ערך הריכוז שנקבל תקף לגבי התמיסה כולה, מכיוון שהריכוז מצביע על הרכב התמיסה והוא כשלעצמו אינו תלוי בנפח שלה.

נאמר על תמיסה שבה יש ריכוז גבוה של מומס כלשהו שהיא **מרוכזת (concentrated)**, ולעומת זאת אם ריכוז המומס בה הוא נמוך נאמר עליה שהיא **מהולה (diluted)**. כמובן שמונחים אלה הם תמיד יחסיים, כלומר תמיסה מסוימת הינה מהולה ביחס לתמיסה אחרת. כיצד ניתן לרכז תמיסה או למהול אותה?

אם נחזור לדוגמה מעלה של הכוס עם הגלוקוז, מצאנו שם ריכוז של 0.0925 M (או 92.5 mM). לצורך העלאת הריכוז נוכל להוסיף עוד גלוקוז לתוך התמיסה, או לחלופין להיפטר מחלק מהממס (והממס בלבד, למשל נידוף המים). באופן מקביל, נוכל למהול את התמיסה, כלומר להוריד את ריכוז הגלוקוז בה, בשתי שיטות – או להוציא (פיזית) מהתמיסה מולקולות של גלוקוז, מה שיקטין את המונה של שבר ביטוי הריכוז ולכן יקטין את הריכוז, או להוסיף מים (טהורים) ובכך להגדיל את המכנה של השבר ולהקטין את הריכוז. מטעמים פרקטיים, ברוב ההתערבויות הידניות קל יותר לבצע את האפשרות השנייה. אבל כמה ממס עלינו להוסיף על מנת להקטין את הריכוז לערך רצוי כלשהו?

לשם כך ישנה נוסחה פשוטה, שנקראת נוסחת יחס הריכוזים, שתוכל לסייע לנו. פיתוח הנוסחה נובע מהגדרת הריכוז. נעבוד עם הריכוז המולרי כדי שיהיה לנו נוח לפתח אותה:

$$C = n [\text{mol}] / V [\text{L}] \quad n = C * V$$

מספר המולים תלוי במכפלה של הנפח בריכוז. אם נשנה את תמיסתנו רק ע"י הוספה או הורדה של נפח התמיסה (למשל, תוספת של ממס או נידוף של ממס), כמות המולים של המומס לא תשתנה. אם למשל הוספנו

ממס, הרי שמהלנו את התמיסה ולכן הריכוז חייב לרדת בהתאם. כנ"ל לגבי נידוף (או דרך היפטרות אחרת שהיא רק מהממס ולא מהמומס) – הריכוז חייב לעלות (והתמיסה תהיה "יותר מרוכזת"). נוכל לראות זאת ע"י תמיסה שהיא בנפח התחלתי כלשהו V_1 וריכוז התחלתי כלשהו C_1 . אם נעשה שינויים בנפח הממס בלבד (להגדלה או להקטנה), נקרא לנפח החדש V_2 , והריכוז החדש יהיה C_2 . אם לא שינינו את כמות המולים, הרי שמפכלה זו נותרה קבועה:

$$n = C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

נוסחה זו שימושית מאוד לחישוב הריכוז ה"חדש" של תמיסה בעקבות שינויי נפח, או הנפח החדש (או הנדרש) אם רוצים קבל ריכוז מסוים, גם מבלי שנצטרך לחשב את כמות המולים. הנה דוגמה: נניח שיש לנו תמיסה שיש לה ריכוז של 2.4 מולר, בנפח 10 מ"ל. זוהי "תמיסת אם", שיש למהול אותה על מנת לקבל תמיסה טיפולית (למשל, להזרקה) בעלת ריכוז של 0.5 מולר (תמיסת האם מספיקה למס' מנות). לאיזה נפח נצטרך להביא את התמיסה המהולה לפני שנוכל להיא ממנה מנות להזרקה? נסמן את הנפח החדש בתור V_2 ונמצא אותו ע"י שימוש בנוסחת הריכוזים מעלה:

$$V_2 = C_1 \cdot V_1 / C_2$$

אנו יודעים שהריכוז של התמיסה המהולה צריך להיות 0.5 M, ונסמן אותו כ- C_2 (בהתאמה לנפח V_2). גם את ריכוז ונפח תמיסת האם אנו יודעים, נסמן אותם עם הספרה 1, ונציב:

$$V_2 = C_1 \cdot V_1 / C_2 = 2.4 \text{ [mol/L]} \cdot 0.01 \text{ [L]} / 0.5 \text{ [mol/L]} = 0.048 \text{ L}$$

כלומר, שנפח התמיסה החדשה יהיו 48 מ"ל. מכיוון שתמיסת האם הכילה את כל המולים של החומר הנדרש (המומס), נעביר אותה במלואה לתוך נפח חדש זה, ואז נשלים עוד 38 מ"ל של הממס הנדרש (בד"כ מים מזוקקים).

תרגיל 23

ביוכימאי עובד עם תמיסה מימית של גלוקוז של 0.075 M. הוא לקח 150 מ"ל של תמיסה זו והוסיף לה 30 מ"ל של מים מזוקקים. מה הוא הריכוז המולרי של תמיסת הגלוקוז החדשה שלו?

תרגיל 24

חובב דגים (כחיות מחמד) החליט לגדל דגים מהים התיכון. הוא בדק ומצא שריכוז המלח בים התיכון הינו 0.5M, וזהו הריכוז הדרוש לו עבורם. חברו נסע לים המלח והביא לו במתנה כוס בנפח 100 מ"ל מים המלח, המכילה 30.0 גרם של מלח בישול (NaCl). הניחו ששאר המלחים שנמצאים בכוס מים המלח אינם משפיעים על הדגים (לצורך התרגיל). כמה מים (נטולי מלח) צריך להוסיף חובב הדגים לאקווריום שאליו שפך את תוכן הכוס על מנת לקבל תמיסה שתתאים למחיתם?

תרגיל 25

רוקח התבקש ע"י פרמדיק לבדוק את תמיסת הנורמל סליין (normal saline) שהייתה לו בשקית 0.5L מערכת העזרה הראשונה הישנה. הרוקח בדק בספרות וראה שתמיסה זו מכילה 0.9 g מלח סודיום כלוריד (NaCl) לכל ליטר תמיסה, אבל לרוקח יש במעבדה רק מכשיר שיועד לדווח את הריכוז ביחידות מולר. הוא מדד וגילה שהתוצאה מהמכשיר היא 12.0 mM. האם הערך הזה תקין? אם לא, מה עליו לעשות על מנת "לתקן" את שקית הסליין של הפרמדיק? הציעו שתי דרכים שונות.

נספח: פתרונות לתרגילים

תרגיל 1.

מספר סעיף	סימול ומידת טעינה	שם היסוד באנגלית	שם היסוד בעברית	כמות פרוטונים	כמות אלקטרונים
1.	Li^+	Lithium	ליתיום	3	2
2.	I^-	Iodine	יוד	53	54
3.	Mg^{2+}	Magnesium	מגנזיום	12	10
4.	C^0	Carbon	פחמן	6	6
5.	S^{2-}	Sulfur	גופרית	16	18
6.	K^+	Potassium	אשלגן	19	18
7.	Fe^{3+}	Iron	ברזל	26	23
8.	Au^+	Gold	זהב	79	78
9.	U^{3+}	Uranium	אורניום	92	89

תרגיל 2.

מספר סעיף	שם החומר	נוסחה מולקולרית	מבנה מתאים באיור 4
1.	אצטאמינופן	$\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2$	ג
2.	קפאין	$\text{C}_8\text{H}_{10}\text{N}_4\text{O}_2$	א
3.	אדרנלין	$\text{C}_9\text{H}_{13}\text{NO}_3$	ב

תרגיל 3.

סעיף	סימול האיזוטופ	כמות פרוטונים באטום	כמות נייטרונים באטום	מסת האטום בגרמים
1	C^{12}	6	6	$1.99 \cdot 10^{-23}$
2	C^{13}	6	7	$2.16 \cdot 10^{-23}$
3	C^{14}	6	8	$2.32 \cdot 10^{-23}$

תרגיל 4.

סעיף מספר	מס' פרוטונים	מס' נייטרונים	מס' אלקטרונים	ייצוג מפורט
1.	20	24	20	^{44}Ca
2.	7	8	7	^{15}N
3.	5	6	4	$^{11}\text{B}^{+1}$
4.	14	14	11	$^{28}\text{Si}^{+3}$
5.	8	10	10	$^{18}\text{O}^{-2}$
6.	56	82	54	$^{138}\text{Ba}^{+2}$

תרגיל 5.

נסמן את השכיחות של ${}^6\text{Li}$ בתור x ואת השכיחות של ${}^7\text{Li}$ בתור $100-x$ בהתאמה (ניקח בחשבון שישנם רק שני איזוטופים שמהווים את השכיחות הכוללת). נפתור את המשוואה המובילה לממוצע המשוכלל שדווח בשאלה:

$$x \cdot 6.0151 \text{ amu} + (100-x) \cdot 7.0160 \text{ amu} = 6.941 \text{ amu}$$

נפתור עבור x ונקבל $x=7.5$ ולכן השכיחויות הן: 7.5% עבור ${}^6\text{Li}$ ו- 92.5% עבור ${}^7\text{Li}$.

תרגיל 6.

כל מול הינו $6.022 \cdot 10^{23}$ חלקיקים. שביעית מול תהיה שביעית מכמות חלקיקים זו:

$$1/7 \text{ of } 1 \text{ mol} = 1/7 \cdot 6.022 \cdot 10^{23} \text{ particles} = 8.602 \cdot 10^{22} \text{ particles}$$

תרגיל 7.

ראשית נחשב כמה מולים ישנם במסה הנתונה, תוך לקיחה בחשבון שמדובר על אטומי כסף (סימול Ag):

$$n(\text{silver}) = m(\text{bracelet}) / A_w(\text{silver}) = 24 \text{ g} / 107.868 \text{ g/mol} = 0.222 \text{ mol}$$

כעת נוכל למצוא כמה אטומים (חלקיקים) ישנם בכמות זו של מולים:

$$N(\text{silver atoms}) = n(\text{silver atoms}) \cdot N_A = 0.222 \text{ mol} \cdot 6.022 \cdot 10^{23} \text{ atoms/mol} = 1.337 \cdot 10^{23} \text{ atoms}$$

תרגיל 8.

נשתמש בנתון אודות המולים כדי למצוא את מסת המים, ואז באמצעות הנתון אודות הצפיפות ($\text{density}, d$) נחשב את הנפח (volume, V) הנדרש.

$$m(\text{water}) = n(\text{water}) \cdot M_w(\text{water}) = 0.14 \text{ mol} \cdot 18.015 \text{ g/mol} = 2.52 \text{ g water.}$$

$$d(\text{water}) = 0.997 \text{ g/mL}$$

$$V(\text{water}) = m(\text{water}) / d(\text{water}) = 2.52 \text{ g} / (0.997 \text{ g/mL}) = 2.53 \text{ mL} = 0.00253 \text{ L.}$$

תרגיל 9.

מהנוסחה המולק' נמצא את המשקל המולק', שהינו 289.4 גרם למול. כעת, נמצא כמה מולים ישנם במסה הנתונה לנו בשאלה:

$$n(\text{atropine}) = m/M_w(\text{atropine}) = 4.2 \text{ g} / 289.4 \text{ g/mol} = 0.0145 \text{ mol (or } 14.5 \text{ mmol)}$$

תרגיל 10.

הנוסחה המולק' נדרשת לפתרון התרגיל. מפרק א' 2 (עמוד 8) בחוברת זו, או מחיפוש באינטרנט, הנוסחה הינה $C_2H_4O_2$. המשקל המולק' יהיה:

$$Mw(\text{acetic acid}) = 2 \cdot Aw(C) + 4 \cdot Aw(H) + 2 \cdot Aw(O) = 2 \cdot 12.011 \text{ g/mol} + 4 \cdot 1.008 \text{ g/mol} + 2 \cdot 15.999 \text{ g/mol} = 60.052 \text{ g/mol}$$

ובהתאמה למול אחד של חומצה אצטית תהיה מסה של 60.052 g.

לפי הנוסחה המולק', כל מול של חומצה אצטית יכול 2 מול אטומי חמצן, שמשקלם יהיה:

$$m(2 \text{ mol O atoms}) = 2 \cdot Aw(O) = 2 \text{ mol} \cdot 15.999 \text{ g/mol} = 31.998 \text{ g}$$

נחשב אחוז מסה עבור 1 מול חומצה אצטית (אחוז זה יהיה נכון לכל כמות אחרת גם כן):

$$\%w (\text{O atoms in acetic acid}) = (31.998 \text{ g} / 60.052 \text{ g}) \cdot 100\% = 53.3\%$$

הערה – שימו לב שלמרות שמבחינה מספרית אטומי החמצן מהווים רק רבע מכלל האטומים במולק', יוצא (בשל מסתם האטומית הגדולה יחסית) שהם מהווים מעל 50% אחוז ממסתה של המולק'.

תרגיל 11.

נניח שיש בידינו 100 גרם של החומר הבלתי ידוע. לפי האחוזים המשקליים, יש בידינו 17.342 g של אטומי מימן ו-82.658 g של אטומי פחמן. נוסחה אמפירית (וגם מולקולרית) מצריכה מאיתנו מידע אודות **היחס המספרי** בין כמויות היסודות מכל סוג, ולכן עלינו למצוא כמה אטומים מכל יסוד (או, עבור נוסחה אמפירית, מה הוא היחס המספרי שלהם) ישנם במולקולה. לכן, נמיר את המסות של היסודות לכמויות היסודות, ונעבוד דרך יחידות מול כדי להימנע ממספרים גדולים מאוד:

$$n(\text{H atoms in 100 g sample}) = m(\text{H atoms in 100 g sample}) / Aw(\text{H atom}) = 17.342 \text{ g} / 1.008 \text{ g/mol} = 17.204 \text{ mol}$$

$$n(\text{C atoms in 100 g sample}) = m(\text{C atoms in 100 g sample}) / Aw(\text{C atom}) = 82.658 \text{ g} / 12.011 \text{ g/mol} = 6.882 \text{ mol}$$

על מנת למצוא את היחס ביניהם, נבצע חלוקה של אחד בשני (מולי פחמן חלקי מולי מימן) ונקבל יחס של 0.4 לפחמנים, כלומר 4 פחמנים על עשרה מימנים, או בצורה המינימלית ביותר (דרישה בנוסחה אמפירית) הנוסחה האמפירית הינה C_4H_{10} .

הערה – תרגיל זה נוסח על סמך המולק' בוטאן (המהווה גז בישול נפוץ) בעלת הנוסחה המולק' C_4H_{10} .

תרגיל 12.

נשתמש בחוק שימור המסה. מסת התוצרים הינה $15 \text{ g} + 21 \text{ g} = 36 \text{ g}$, ומסה זו צריכה להיות שווה למסת המגיבים. מסת המגיבים מורכבת מהמזון הגולמי שנשרף, ועוד החמצן מהאוויר ששימש לשריפתו, כלומר

$$36 \text{ g} = m(\text{food}) + m(\text{O}_2 \text{ from air})$$

מכיוון שנתון שמסת המזון שנשרף הינה 34 גרם נוכל לחלץ את מסת החמצן מהאוויר ששימש לשריפה:

$$m(\text{O}_2 \text{ from air}) = 36 \text{ g} - m(\text{food}) = 36 \text{ g} - 34 \text{ g} = 2 \text{ g}.$$

מכיוון שנשאלנו כמה מול של חמצן מולק' הגיב, ולא כמה מסה, נמיר את המסה למולים:

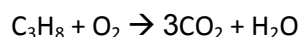
$$n(\text{O}_2) = m(\text{O}_2) / M_w(\text{O}_2) = 2 \text{ g} / 2 \cdot 15.999 \text{ g/mol} = 0.0625 \text{ mol}$$

תרגיל 13.

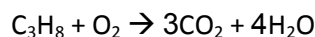
מכיוון שהתבקשנו לרשום משוואת שריפה מלאה, נוסיף חמצן מולק' לצד של המגיבים (השריפה נעשית עם חמצן) וכתוצרים נרשום פחמן דו חמצני ומים:



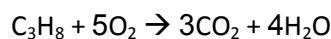
משוואת תגובה זו איננה מאוזנת, ולכן נתחיל מאיזון אחד היסודות – במקרה זה, נבחר בפחמנים (אתם מוזמנים להתחיל מהמימנים אם תרצו, פחות מומלץ להתחיל מהחמצנים כי החמצן המולק' הוא גורם "חופשי" שנוכל בסוף לרשום את המקדם שלו מבלי להשפיע על שאר הערכים). בצד של המגיבים ישנם 3 אטומי פחמן, ובצד של התוצרים רק אחד, אז נוסיף מקדם של 3 לפחמן הדו חמצני.



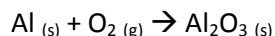
כעת, יש לטפל גם במימנים – בצד של המגיבים ישנם 8 אטומי מימן ובצד של התוצרים רק שניים, אז נוסיף מקדם של 4 למים:



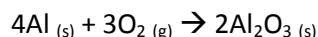
נתבונן בחמצנים: ישנם כעת 10 אטומי מימן בצד של התוצרים אבל רק 2 בצד של המגיבים. לכן, נוסיף מקדם של 5 לחמצן המולק' (במגיבים) וקיבלנו משוואה מאוזנת:



תרגיל 14.



המשוואה איננה מאוזנת – יש רק אטום (או מול, וכו') אלומיניום אחד במגיבים אבל שניים בתוצרים, וגם החמצן הוא מועט מדי המגיבים לעומת התוצרים. נשאיר את המקדם של האלומיניום במגיבים לסוף האיזון, כי הוא "איבר חופשי", ונתחיל מהחמצן. הגורם המשותף הנמוך ביותר לשני צידי המשוואה יהיה 6, ולכן נכפיל את האלומינה ב-2 ואת החמצן המולק' ב-3. כך יהיו 6 חמצנים בכל צד. המקדם של 2 עבור האלומינה מכתוב לנו שישנם 4 אטומי (או מולי, וכו') אלומיניום בתוצרים, ולכן נוסיף 4 כמקדם עבור האלומיניום הטהור בצד של המגיבים. נקבל:



תרגיל 15.

נתחיל מרישום משוואת תגובה עם המגיבים והתוצרים המתאימים:



המשוואה איננה מאוזנת (ניתן לראות זאת אפילו רק יסוד הסודיום, נתרן). אם נתחיל מהסודיום, נכפיל בצד המגיבים את הסודיום ביקרבונאט. נקבל כך 3 אטומי סודיום בכל צד של המשוואה, אבל המימנים אינם מאוזנים (11 במגיבים ו-7 בתוצרים), וכך גם החמצנים (16 במגיבים ו-11 בתוצרים) והפחמנים (9 במגיבים ו-7 בתוצרים):



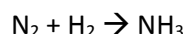
לכן, עלינו להגדיל את החמצנים והמימנים בתוצרים. נכפיל את המים ואת הפחמן הדו חמצני ב-3, על מנת לאזן אותם:



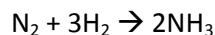
בסודיום כבר טיפלנו קודם לכן והשינוי האחרון הזה לא השפיע עליו, וכעת יש לנו 16 חמצנים במגיבים ו-16 חמצנים בתוצרים. יש לנו גם 11 מימנים במגיבים ו-11 מימנים בתוצרים. נשאר לנו רק לטפל בפחמנים, אך אם נבדוק את המשוואה שלנו מעלה נוכל לראות שהם כבר טופלו בעזרת המקדם שרשמנו לפחמן הדו חמצני: יש 9 פחמנים במגיבים ו-9 פחמנים בתוצרים.

תרגיל 16.

נתחיל מלרשום את משוואת התגובה:



התגובה אינה מאוזנת, נבצע איזון:



נמצא כמה מולים של חנקן שימשו כמגיב:

$$n(\text{N}_2) = 10,000 \text{ g} \cdot 0.77 / 28 \text{ g/mol} = 275 \text{ mol}$$

הניצולת התיאורטית (במולים) הינה:

$$275 \text{ mol} \cdot 2 = 550 \text{ mol} (\text{NH}_3)$$

שהינה:

$$m(\text{NH}_3) = 550 \text{ mol} \cdot 17 \text{ g/mol} = 9,350 \text{ g}$$

בפועל, החקלאי קיבל 0.8 Kg של אמוניה, אז נבצע את החישוב של הניצולת דרך המסות:

$$\text{yield} = (800 \text{ g} / 9350 \text{ g}) \cdot 100 = 8.6\%$$

הערה – ניתן גם לחשב את הניצולת דרך מולים. לשם כך נתרגם את המסה של האמוניה שהחלקאי קיבל למולים:

$$n(\text{NH}_3) = 800 \text{ g} / 17 \text{ g/mol} = 47.06 \text{ mol}$$

ונציב לחישוב הניצולת:

$$\text{yield} = (47.06 \text{ mol} / 550 \text{ mol}) * 100\% = 8.6\%$$

תרגיל 17.

הנוסחה המולק' של הדיאמין הינה $\text{C}_6\text{H}_{16}\text{N}_2$ ולכן המסה המולק' שלה הינה 116.21 g/mol . מכאן, נובע שב-220 ק"ג של חומר זה ישנם:

$$n(\text{diamine}) = 220,000 \text{ g} / 116.21 \text{ g/mol} = 1,893.29 \text{ mol}$$

לפי משוואת התגובה, נוכל לצפות כמה מול של חומצה כלורית היו אמורים להתקבל, ונכפיל זאת בניצולת של המפעל כדי לקבל ניצולת מעשית ולא תיאורטית:

$$n(\text{HCl}_{\text{expected}}) = 2 * 1,893.29 \text{ mol} * 0.7 = 2,650.51 \text{ mol}$$

וכעת נותר להמיר את המולים למסה, כפי שהתבקשה מהמהנדס:

$$m(\text{HCl}) = n * M_w = 2,650.51 \text{ mol} * 36.46 \text{ g/mol} = 96,641.24 \text{ g} = \sim 96.64 \text{ Kg}$$

תרגיל 18.

נמצא את מולי אטומי הפחמן (מקורם בתרכובת), מספרם יהיה זהה למולים של מולק' הפחמן הדו חמצני:

$$n(\text{C}) = n(\text{CO}_2) = 1.162 \text{ g} / (44 \text{ g/mol}) = 26.4 \text{ mmol}$$

מולים של אטומי המימן (מקורם בתרכובת) יהיו בכמות כפולה ממולי מולק' המים:

$$n(\text{H}) = 2 * n(\text{H}_2\text{O}) = 2 * 0.190 \text{ g} / (18 \text{ g/mol}) = 21.1 \text{ mol}$$

קיבלנו יחס של C:H שהינו 26.4:21.1. נחלק במספר הקטן ביותר כדי לקבל יחסים שמתאימים לנוסחה אמפירית:

C:H 1.25:1. מכיוון שלא אפשרי שיהיה אטום לא שלם במולקולה, נתקן ליחסים השלמים הקרובים ביותר:

C:H 5:4. כלומר, שהנוסחה האמפירית של נפתלן היא C_5H_4 .

הערה להעשרה – הנוסחה המולק' של נפתלן היא C_{10}H_8 .

תרגיל 19.

יש כאן אתגר מסוים, מכיוון שהתרכובת חמצן, אבל אטומי החמצן שבתוצרים יכולים להגיע או מהתרכובת או מהחמצן מהאוויר ששימש לשריפה. תיכף נטפל בכך. נתחיל ממצאת המולים שכן ידועים לנו – של אטומי הפחמן ושל אטומי המימן.

מולים של אטומי פחמן (מקורם בתרכובת) יהיו בכמות זהה למולים של מולק' הפחמן הדו חמצני:

$$n(C)=n(CO_2)=3.0 \text{ g} / (44 \text{ g/mol}) = 0.068 \text{ mol}$$

מולים של אטומי המימן (מקורם בתרכובת) יהיו בכמות כפולה ממולי מולק' המים:

$$n(H)=2*n(H_2O)=2*1.6 \text{ g} / (18 \text{ g/mol}) = 0.182 \text{ mol}$$

מכיוון שהתרכובת מכילה גם אטומי חמצן, לא נוכל לבצע יחסים מוליים על מנת למצוא את הנוסחה האמפירית שלה לפני שיהיו בידינו גם מולים של אטומי החמצן, שמקורם בתרכובת. לשם כך נשתמש בחוק שימור המסה: מסת התרכובת ידועה לנו, ולכן המסה שאיננה משויכת לאטומי הפחמן והמימן שמצאנו מעלה חייבת להיות משויכת לחמצן שהיה בתרכובת במקור.

$$m(\text{compound})=m(C)+m(H)+m(O)$$

$$m(O_{(\text{from org. compound})})=1.367 \text{ g} - (0.068 \text{ mol} * 12 \text{ g/mol} + 0.0182 \text{ mol} * 1 \text{ g/mol}) = 0.369 \text{ g}$$

$$n(O_{(\text{from org. compound})})=0.369 \text{ g} / (16 \text{ g/mol}) = 0.023 \text{ mol}$$

כעת נוכל למצוא את היחסים הכמותיים בין שלושת היסודות, הנדרשים לנוסחה האמפירית:

$$n(C):n(H):n(O) = 0.068:0.182:0.023$$

נחלק במספר הקטן ביותר כדי לקבל יחסים כלפי 1:

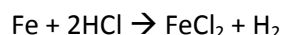
$$n(C):n(H):n(O) = 3:7.9:1$$

ידוע לנו שהכמות של האטומים בנוסחה האמפירית (ו/או המולק') חייבים להיות שלמים, ולכן נעגל את 7.9 למספר השלם הקרוב ביותר²¹. נקבל נוסחה אמפירית:



תרגיל 20.

נרשום את משוואת התגובה, ונאזן אותה:



בהינתן 2 גרם של ברזל, נחשב כמה מול ברזל יש ליזם:

²¹ מקרים כאלה, של צורך בעיגול למס' השלם הקרוב ביותר, הינם נפוצים באנליזות שריפה, בשל מגבלות מכשור – לא תמיד ניתן למדוד את המסות (או נפחים/לחצים וכו') במערכת באופן שהוא מספיק מדויק כדי לקבל מספרים "יפים" ושלמים.

$$n(\text{Fe}) = 2 \text{ g} / 55.85 \text{ g/mol} = 0.0358 \text{ mol}$$

מן המשוואה עולה שנדרשים פי שניים מכמות המולים של הברזל של החומצה, כלומר נדרשים:

$$n(\text{HCl}) = 2 * 0.0358 \text{ mol} = 0.0716 \text{ mol}$$

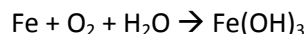
נמיר אותם למסה:

$$m(\text{HCl}) = 0.0716 \text{ mol} * 36.46 \text{ g/mol} = 2.61 \text{ g}$$

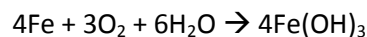
זוהי הכמות המינימלית הנדרשת של חומצה כלורית על מנת להגיב עם כל הברזל שיש ליזם. לא יעזור להוסיף עוד חומצה, כי לא יהיה עוד ברזל שיגיב – הברזל יהפוך להיות הגורם המגביל.

תרגיל 21.

נרשום משוואה לתגובה:



נאזן אותה:



כעת נמצא כמה מולים יש מכל מגיב:

$$n(\text{Fe}) = 100 \text{ g} / 55.85 \text{ g/mol} = 1.79 \text{ mol}$$

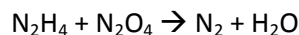
$$n(\text{O}_2) = 30 \text{ g} / 32.0 \text{ g/mol} = 0.94 \text{ mol}$$

$$n(\text{H}_2\text{O}) = (200 \text{ mL} * 1 \text{ g/mL}) / 18.0 \text{ g/mol} = 11.1 \text{ mol}$$

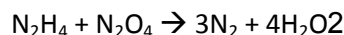
לפי היחסים הסטוכיומטרים נדרשים שלושת רבעי (0.75) של חמצן מולק' לכל ברזל. ניתן לראות שבפועל למהנדס אין מספיק חמצן – יש לו רק כחצי ממנו. החמצן הוא הגורם המגביל – רק חלק מהברזל יוכל להחליד איתו. בסוף התהליך (אם הניצולת היא 100%), לא יישאר חמצן, ויישארו ברזל ומים שלא הגיבו במלואם.

תרגיל 22.

ראשית, נכתוב את משוואת התגובה:



כעת, נאזן את המשוואה:



נחשב מולים של מגיבים במערכת הספציפית:

$$n(\text{N}_2\text{H}_4) = 100 \text{ g} / 32 \text{ g/mol} = 3.13 \text{ mol}$$

$$n(\text{N}_2\text{O}_4) = 200 \text{ g} / 92 \text{ g/mol} = 2.17 \text{ mol}$$

לפי היחסים הסטוכיומטרים, לתגובה נדרשים פי 2 מולים של הידרזין לעומת DNTO. בפועל, יש לנו רק 3.13 מול לעומת $2.17 \times 2 = 4.32$ מול, ומכאן נובע שההידרזין הוא הגורם המגביל. נחשב כמה תוצר נקבל בהינתן שההידרזין מגיב "עד הסוף". נעשה זאת דרך מולים (ע"י משוואת התגובה) ולאחר מכן נמיר את המולים הללו למסה, כפי שהתבקשנו בשאלה:

$$n(\text{N}_2) = 1.5 \cdot n(\text{N}_2\text{H}_4) = 1.5 \cdot 3.13 \text{ mol} = 4.70 \text{ mol}$$

$$m(\text{N}_2) = n(\text{N}_2) \cdot M_w(\text{N}_2) = 4.7 \text{ mol} \cdot 28 \text{ g/mol} = \mathbf{131.5 \text{ g}}$$

תרגיל 23.

נסמן את הנפח והריכוז המקוריים בספרה 1. הנפח החדש, שיסומן בעזרת V_2 , ניתן לחישוב (הנפח של התמיסה המקורית והתוספת שהוא הוסיף) ונמצא את הריכוז החדש, C_2 :

$$C_2 = C_1 \cdot V_1 / V_2 = 0.075 \text{ [mol/L]} \cdot 0.150 \text{ [L]} / (0.15 + 0.03) \text{ [L]} = 0.0625 \text{ M (or 62.5 mM)}$$

תרגיל 24.

נמצא קודם מהו ריכוז המלח בכוס מים המלח:

$$C_1 = n/V_1 = (m/M_w)/V_1 = (30 \text{ g}/58.44 \text{ g/mol})/0.1 \text{ L} = 5.13 \text{ M}$$

כעת נמצא את הנפח הנדרש של התמיסה עבור הדגים, בהינתן הריכוזים של תמיסת המקור (מים המלח) והריכוז הנדרש לדגים:

$$V_2 = C_1 \cdot V_1 / C_2 = 5.13 \text{ [mol/L]} \cdot 0.10 \text{ [L]} / 0.5 \text{ [mol/L]} = 1.026 \text{ L}$$

מכיוון שחובב הדגים כבר שפך לאקווריום את הנפח של 100 מ"ל (מהכוס), על מנת להשלים את הנפח הוא יצטרך להוסיף 1.026L-0.1L=0.926L, או 926 mL של מים (נטולי מלח).

תרגיל 25.

מכיוון שנתונות לנו כאן שתי יחידות שונות של ריכוז, נתחיל מלאחד אותן על מנת שנוכל להשוות בין הערך הספרותי המדווח לסליין תקין לבין התוצאות שהתקבלו במדידה. ריכוז הסליין הספרותי, במולר, הינו:

$$C = n/V = (0.9 \text{ g} / 58.44 \text{ g/mol})/1 \text{ L} = 0.0154 \text{ M}$$

המכשיר נותן תוצאה שהיא נמוכה יותר, כלומר התמיסה בשקית של הפראמדיק מהולה מדי (ואיננה תקינה). ניתן לתקן את התמיסה בשקית על ידי אחת משתי אפשרויות: א. נידוף מים מהשקית. ב. הוספה מלח לשקית (וערבוב פנימה להמסה מלאה לתמיסה הומוגנית).

א. נידוף מים: נבדוק מהו הנפח שעלינו להביא אליו את התמיסה על מנת להעלות את הריכוז בה לריכוז התקין:

$$V_2 = C_1 \cdot V_1 / C_2 = 0.0120 \text{ [mol/L]} \cdot 0.5 \text{ [L]} / 0.0154 \text{ [mol/L]} = 0.390 \text{ L}$$

כלומר שעליו לנדף 0.11L=0.5L-0.39L, או 110 mL, מים מן השקית.

ב. הוספת מלח: נבדוק מהי כמות המלח החסרה, במולים, ואז נתרגם אותה למסה שעליו לשקול ולהוסיף:

$$n_{\text{wanted}} = C \cdot V = 0.0154 \text{ mol/L} \cdot 0.5 \text{ L} = 0.0077 \text{ mol}$$

$$n_{\text{existing}} = C \cdot V = 0.0120 \text{ mol/L} \cdot 0.5 \text{ L} = 0.0060 \text{ mol}$$

$$n_{\text{missing}} = 0.0077 \text{ mol} - 0.0060 \text{ mol} = 0.0017 \text{ mol}$$

ומכאן שמסת המלח החסרה (הנדרשת להשלמה לתוך השקית של הפראמדיק) הינה:

$$m(\text{NaCl}) = n_{\text{missing}} \cdot M_w(\text{NaCl}) = 0.0017 \text{ mol} \cdot 58.44 \text{ g/mol} = 0.099 \text{ g}$$