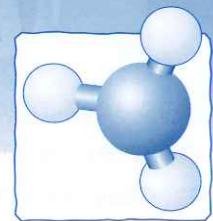


# בחינות הבגרות כמקדם נושא למידה

(הערכותיו של מעריך בחינות הבגרות)

יוסף ליבנה



יש להתייחס לעובדה שמדובר בצבר. לפיקח, השוואת בין חזק הקשר הימני או חזק הקשר המותכתי לבין קשרן קוולנטי תורן מולקולרי הינה מטעה וمبرבלת. ניתן לומר מכך:

עליה שהוא השווה בין מין לשאינו מין.

נתונים מסווג אנטלפיית אטומיזציה ואנטלפיית סריג מייצגים לא את האנרגיה הדורשה לפירוק הקשר בין זוג חלקיקים אלא את סך כל האנרגיה הדורשה לפירוק הצבר/הסריג לחלקיקים בודדים\*.

## כוחות בין-מולקולריים

כוחות אלה גם הם כוחות של הצבר, ונitin לאמוד את עצמתם על פי האנרגיה הדורשה לפירוק הקשר למולקולות בודדות. בחומרים המולקולרים שבהם ניכרת התופעה של קישור מימני, לא קיים כוח יחיד האחראי ליציבות הצבר בין זוגות של מולקולות. תופעת הדימריזציה הקיימת בין מולקולות של חומצה אצטית היא תופעה אופיינית למצב הצבירה הגזי. במצב הנזול יש כמעט לכל אחת מן המולקולות קשרים מימניים עם יותר ממולקולה אחת סמוכה. אל מלא כן, לא היה נוצר צבר.

זאת ועוד, במצב נזולי מולקולה נתונה אינה נשארת קשורה בכוח בין-מולקולרי למולקולה **ספציפית** אחרת לאורך זמן. מתרחשים שיחלופים, והתനgesיות בלאטי פוסקים המביאים לשינויים מתרחדים במרקם הקשרים הבין-מולקולריים. זאת הסיבה של נזולים אנטרופיה מולרית גבוהה משל המוצקים.

## "יחודם" של קשרי המימן

קיימים שני סוגים של חומרים מולקולרים: כאלה הבנויים ממולקולות בעלות דו-קוטב קבוע וכאלה הבנויים מכ מולקולות שאין בעלות דו-קוטב קבוע. לא

בעת קריאת מחברות בחינת הבגרות השנה, שנת תשס"ג, גיליתי שיש לתלמידים קשיים רבים במיוחד בסוגיות הנוגעות לנושא "מבנה וקיים". מצאתי בלבול רב בקרב התלמידים ביחס למשמעותם של מושגים וחוסר "معدיות" באופן הננקה. הקשיים בלטו, למשל, בתשובות לשאלת 2 בשאלון 918651 (3 יח"ל) ובשאלת 7 בשאלון 37203 (השלמה מ-3 ל-5 יח"ל).

זהו שנים אנו ערים לקשיי ההתנסחות של תלמידינו במבחןים בכלל ובמיוחד בנושא "מבנה וקיים". בדוגמה להקל עליהם "הசרנו" בבדיקה הבדיקות דרכי הננקה שאינן עלות תמיד בקנה אחד עם התורה המדעית המדוקיקת. כאשר מלוות הננקות כאלה בחשיבה פשטנית וניסוח עילג, אנו נאלצים לעיתים לקבל תשובות בלתי מתקינות על הדעת.

בעמודים הבאים אתייחס לביעיותם באופן הוראת נושא הקשרים הבין-מולקולרים ב��ה הספר היום ואציג מצע ראשוני לדין בשיפור דרכי ההוראה של נושא לימוד זה.

## חזק הקשרים קוולנטיים

ניתן לקבוע את הכוח הקשור שני אטומים בקשר קוולנטי דו-אטומי על פי תדריות הבליעה הדורשה לפירוק אותו קשר. ערכיהם אלה ידועים ומופיעים בטבלאות נתונות מקורות שונים. כאשר מתייחסים למולקולות גדולות יותר (בנייה יותר משני אטומים), המערכת מורכבת יותר. במקרים אלו ערך חזק הקשר נקבעים על פי מדדיות וחישובים תרמודינמיים. בכל מקרה הערכים מתייחסים אך ורק למולקולות מבודדות במצב גז.

## חזק הקשרים בחומרים לא מולקולרים

עבור חומרים שבאופן רגיל נמצאים במצב מוצק או נזול, כאשר דנים בחזק הקשר המחזק את האטומים יחד,

\* ניתן למדוד ולהحسب חזק קשר יוני (בין שני יונים), אך הדבר כרוך באמצעות טכנולוגיות מורכבות. כמו כן יש להתחשב במבנה בתא היחידה.



**קשר מימני\*** הוא כוח משיכה בין אטום A למוקולו במולקולה אחת לשוג אלקטرونים בלתי קשורים על אטום שכן (במולקולה אחרת או באותה מולקולה) מסוג N, O או F מוקוטב, למשל. אטום המימן עשוי להיות הקשור לאטום שונה מ-NOF (לאטום IC למשל) ועדיין ליצור קשר מימי עם מולקולה אחרת. הכוונה בקביעה זו היא שבדרך כלל רבת יותר האנרגיה הדרישה לאידיוי חומרים שמקיימים קשרי מימי ביןיהם מאשר לאידיוי חומרים בעלי מולקולות דומות בגודלן אך ללא קשרי מימי ביניהן.

### מדדים לעצמת הכוחות הבין-מולקולריים ( $\Delta H_{\text{פ}}^{\circ}$ )

המדד האמתי לעצמת הכוחות הבין-מולקולריים הוא אנטילפיית האידיוי של נוזל ( $\Delta H_{\text{פ}}$ ) כפי שנמדדת בטמפרטורת הרתיחה שלו ( $\Delta H_{\text{פ}}$ ). ההנחה כאן היא שתהליכי האידיוי גורם לנזוק מוחלט של הכוחות הבין- מולקולריים.

משמעותו של חומרים, לאו דווקא מולקולריים, דומים בשינויו של מבנה הקשר שלהם במהלך נוזל  $\rightarrow$  גז. כתוצאה לכך יש לחומרים רבים ערכי אנטרופיית אידיוי ( $\Delta S_{\text{פ}}$ ) דומים מאוד.

נקודות הרתיחה היא הטמפרטורה שבה שורר שוויון משקל בין הנוזל לבין אידיוי, טמפרטורה שעבורו  $\Delta H_{\text{פ}} = \Delta G_{\text{פ}}$ , ובהתאם לכך:  $\Delta S_{\text{פ}} = \frac{\Delta H_{\text{פ}}}{\Delta G_{\text{פ}}} = 0$ . אם קיימים לחומרים שניים ערכיהם דומים של  $\Delta S_{\text{פ}}$ , קשר זה יוצר יחס ישיר לכאורה בין  $\Delta H_{\text{פ}}$  לבין  $\Delta G_{\text{פ}}$ .

"יחס ישיר" (לכארה) מוצג במקרים רבים על ידי תרשימים ובו מופיעים חומרים רבים בעלי ערכים דומים של  $\Delta S_{\text{פ}}$  ("קרובים לכאן") לצד חומריםחריגים ("רחוקים מהכאן"). תרשימים כאלה שימושו גם בסיס לשאלות בגרות בעבר (מ"ט/8, נ"ו/1).

קשה להבין את מקורות של כוחות התאהזה בצביר המורכב מחומרים קוטביים: דו-קוטב קבוע מושך דו-קוטב שכן בכוח חשמלי.

החומרים הלא קווטביים מציגים תופעה בלתי צפואה של כוחות תאהזה העשויים להיות חזקים מאוד, כמו למשל בשעווה או בפולימרים סינטטיים. הכוחות הללו הם תולדה של היוציארות דו-קוטב זמנימושר על ידי דו-קוטב זמני שכן. מי שפיתח תיאוריה מתמטית לתיאור הכוחות הללו היה פ. לונדון, והשם המדעי לכוחות אלה הוא "כוחות פיזור U" (London Dispersion Interaction<sup>1,10</sup>). כוחות לונדון פועלים אףלו בין אטומים כדורים של גזים קטנים עצמתם גוברת ככל שהגバラ השפעת הכוח המושר של המולקולות השכנות על הען האלקטרוני של החלקיקים. השפעה זו תלואה במספר האלקטרונים שבען האלקטרוני ובשטח הפנים שלו. בכיתה נהוג לפשט את הדיוון ולומר שקיימת תלות של עצמת הכוחות במספר המולריות של החלקיקים. אבל אין תלות כזו באמת. נהוג זה מביא תלמידים רבים להסביר באופן שגוי את כוחות התאהזה הקיימים בפולימרים על פי המשנה המולרית של קבוצות הצד שלהם. תפקידנו כמורים למצוא כיצד ניתן ללמוד את הנושא כך שייהי מובן מהצד אחד, בלי להוביל להפרשנות-יתר מהצד השני.

לכל הכוחות הבין-מולקולריים צריך לקרוא "כוחות דין-ולס" לכבודו של המדען ההולנדי שפיתח תיקון מתמטי למשוואת הגזים האידיאליים. תיקון מתחשב בהנחה שבין מולקולות, אףלו במצב גזי, קיימים כוחות משיכה כלשהם. המושג "כוחות דין-ולס" כולל יותר מהמושג "כוחות לונדון" בכך שהוא כולל גם את הכוחות הקיימים בין מולקולות בעלות קוטביות קבועה ( $\text{F}_3\text{CH}$  ו- FCI, לדוגמה).

\* מגדירים קשר מימי באופן מדויק יותר בצורה הבאה: קשר מימי הנה הוכונה של אלקטرونים מסווגים לאטום מימן (שקיים בצד אחד לאטום כבד) ולאטום כבד X: ---H - Z. אלקטرونים אלה יהיו בדרך כלל אלקטرونים לא קשורים של חנקן, חמצן או פלאור.



להלן נתונים עבור ארבעה נזלים בעלי מולקולות איזואלקטרוניות (בכולם 10 אלקטרונים):<sup>9</sup>

ממדם דאלטורי	$\Delta H_b$ (kJ/mol)	$\Delta S_b^\circ$ (J/mol•K)	$T_b^\circ$ (K)	
1.8	40.5*	109	373	H <sub>2</sub> O
1.98	7.5	25.7	293	HF
1.46	27.8	116	240	NH <sub>3</sub>
0	8.2	73.2	112	CH <sub>4</sub>

ההידרידים הללו ערוכים בסדר יורד של נקודות רתיחה.  
האם יש לסדר זהה משמעות כלשהי?

התשובה החד-משמעות היא שלילית.

לש למימן יהוד: מולקולות המים מאופיינות בשני אנטיבים חיובים (המייננים) ובשני קטבים שליליים (זוגות האלקטרוניים הלא קשורים של חמצץ) היוצרים ביניהם היררכיות טריהדרלית. כתוצאה לכך נוצרם במוחק צברים בעלי מבנה דמו-יהלום<sup>4</sup> שבהם כל מולקולה קשורה לארכט שכך, הקשורות בעצםו לארבע ארכט ומי

לאربע שכנותיה, הקשורות בעצמן לארבע אחרות וכו'.  
בעת הייתך הקרה מסתננות מולוקולות מים בודדות  
לתוכה החללים הקיימים ב- "סרג' דמי-יהלום, ו"תוספה"  
המולוקולות מורידה את הנפח המולרי ומעלה את  
הכפיפות של מים בייצור תופעת "האנומליה של  
הטמונ".

בבחשואה בין המים לאמויה כל הנתונים מצביעים על כך שמלוקולות המים קוטביות יותר ו- "דיביקות" יותר. בעקבות האידוי האנטופיה של שני הנוזלים גדרה במידה כמעט שווה ( $+6\%$ ), אבל לצורך אידי המים דרישה החרבה יותר אנרגיה ( $+64\%$ ). מכאן גם הפער העצום בין המפרכונות ברכמיופ נשלט.



וונדר של EH ורעת מפעור הנומור כל כב של °AS. קשא" יותר לאודות מתאן מאשר EH: לאודי המתאן הרושה יותר אנרגיה (+7%). טמפרטורת הרתיחה הגבוהה

צריך להדגיש ש- "היחס הישר" איננו חוק פיזיקלי הקיים שני גדים, כי מדובר בערכים של  $T$  ו-  $H$  האופייניים לחומרים **שונים**. "התרשימים" אינם גրף דוגמת תרשימי אלינגהם אלא אמצעי גרפי המסכם הכללה המקיפה מקרים רבים: לחומרים רבים יש אנטropיות אידוי השווה ל-  $K_{mol}/J = 90$  לערך (במספר הנתונים של נופילד<sup>2</sup> ).

ניתן להשתמש בטמפרטורת הרתיחה כדי לעצמת הכוחות הבין-מולקולריים בנוزل רק אם יש לנו ידיעת שאנטרופיית האידיו של הנוזל היא "נורמלית". במובן זה הנוזלים שבהם פועלים קשרים מימן הם "א-נורמליים". במצב הנוזלי של חומרים אלה שורר סדר ורב יחסית לעומת חומרים מולקולריים אחרים. כתוצאה לכך המעבר למצב שבו כל מולקולה מבזודה מהאחרות מלאה בשינוי גודל במוחיך הינו:  $K = \text{אומ}/m^2 \geq 8.7$ .

להלן נתונים עבור שני נזלים בעלי טמפרטורות רתיחה דומות:<sup>3</sup>

$\Delta H_b$ (KJ/mol)	$\Delta S_b^\circ$ (J/mol•K)	T $_b^\circ$ (k)	
40.5*	109	373	H <sub>2</sub> O
32.1	91.8	350	CCl <sub>4</sub>

\* אנטלפיה האידי מושפעת מנמפרטורה: עברו מים ב-**K-273**  
השער הוא **43.8** ואילו **373-K** השער הוא **40.5**

כוחות התאחזה בין מולקולות המים חזקים מלה השוררים בין מולקולות ה- $\text{C}_4\text{Cl}_4$ . זאת למרות שכוחות זו דר ולס חזקים בהרבה בין מולקולות ה- $\text{C}_4\text{Cl}_4$  וחוזת לעוגנים אלקטרוניים בעצומים ואלטנו.

בין מולקולות המים במצב נוזלי קיימים יותר סדר לטוחה הבינוני מאשר בין מולקולות ה- $\text{CCl}_4$ , لكن העלייה באבטרופיה עקב אידוי גדילה יותר במים (+19%).

העובדת שטמפרטורות האידוי של שני הנזולים קרובות זו לזו נובעת במקורה מהדמיון ביחס  $\frac{\Delta H_b}{\Delta S_b}$ . אילו היו משווים רק בין טמפרטורות הרתיחה של שני הנזולים, היהינו עלולים לקבוע שיש לשני הנזולים כוחות בין- מולקולריים חזקיים (כטבוי) בוצמתם

פי צפיפות אדים זו המסה המולרית היא כ- 70 גר./מול, לכאורה, פי 3.5 מהmassה המולרית של הנוסחה HF.

בחישוב תיאורטי<sup>8</sup> נמצא שבאדים של HF קיימים בעיקר טראמרים טבעתיים מעורבים ב מולקולות בודדות: נמצא זה גם توאמ את החישוב על פי צפיפות האדים: המסה המולרית המוחשבת גדולה פי 3.5 מהmassה המולרית של HF. אחרים טוענים<sup>1</sup> שבמצב הגזוי אין "מונומרים" בנמצא כלל, עדות לעצמתם האדרית של קשרי המימן של HF.

בספר שהוא מקובל בארה"ב לפני 30 שנה(!)<sup>9</sup> מופיע הסביר הבא: מולקולות מים יוצרות צברים דמיוי-יהלום. אין זה מצבם של HF ואמונייה. מולקולות אלה יוצרות שרשרות או טבעות שבתן כל מולקולה קשורה בקשרי מימן לשתי שכנות<sup>9</sup>. צברי המולקולות של אמונייה "מצופים" בעודף המטען החובי של אטומי המימן שאינם משתתפים בקשרו מייננו, וכך נוצרת דחיה חשמלית בין הצברים. התוצאה: נדיפות גבוהה לאמונייהיחסית למים.

צברי מולקולות ב-HF נזלי דומים לאלה של אמונייה אך שונים בכך שהם "מצופים" הפעם בטען השילי של זוגות האלקטרונים הלא-קשרים והלא-מנוצלים של ה-F. כמו באמונייה, המטען החשמלי מונע התלכדות הצברים ויצירה של מערכת קשרי מימן דמיוי-יהלום דומה לזה של המים.



איור 2 – HF<sub>(g)</sub> ב מבנים טבעתיים

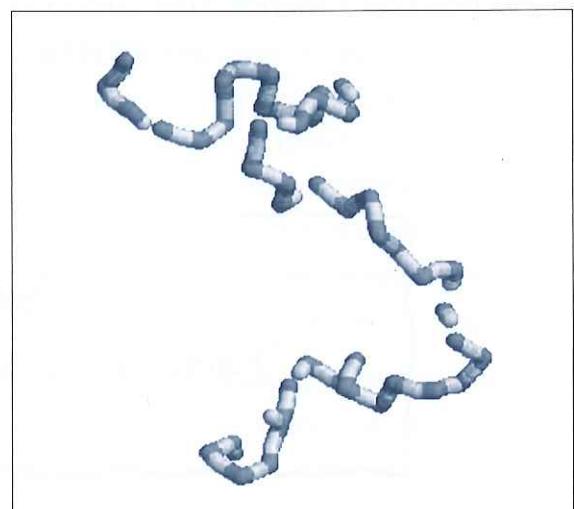
"קשה" יותר לאחד מים מאשר HF: דרישה הרבה יותר אנרגיה (פי 4.4). תוך כדי אידי אנטרופיית המים גדלה פי 4. את כל זה לא ניתן למדוד מהשוואה פשוטות רתיחה.

האם המשקנה מכך היא שकשי המימן במים חזקים יותר מאשר ב-HF? לדעתם של מומחים התשובה היא שלילית: ל-HF קשרי המימן החזקים ביותר מכון הידרידים אלה.

על פי הקבוע הדיאלקטרי של HF ובהתאם לקוטביות הקשרים שאatom F יוצר, קשרי המימן ב-HF הם חזקים ביותר.<sup>5</sup>

הסביר לאנטרופיית האידי הנמוכה של HF הוא, בדומה לתרcobות אחרות שבהן קיימים קשרי מימן חזקים במיוחד (דוגמת חומצה אצטית), שבעת אידי-HF ניתקים רק חלק מקשרי המימן שבין מולקולות ה-HF. לעומת, ניתן למצוא בין חלקיקי האדים של HF "מולקולות פולימריות" בעלות הנוסחה (HF)<sub>n</sub> מבנים שרשרתים

ואפילו טבעתיים<sup>12,9,7,5</sup>. ראה איור 1 ו- 2 בהתאם. כתוצאה לכך צפיפות האדים של מימן פלאורי בטמפרטורת הרתיחה שלו גבוהה פי 2.4<sup>6</sup> מזו של האוויר ולא כ-70 ממנה (29/20), כפי שניתן היה לצפות לפי המסה של מול מולקולות בודדות של HF. על



איור 1 – HF<sub>(g)</sub> ב מבנים שרשרתים

## הזמןה לדין

- מקורות**
1. Intermolecular Forces, Leon L. Combs (<http://stern.kennesaw.edu/interfor/in01024.htm>)
  2. Nuffield Chemistry – Book of Data (1968), p. 109.
  3. Handbook of Physics and Chemistry, Chemical Rubber Company.
  4. Ab-initio Simulations of Hydrogen Fluoride,E. Schwegler,G. Galli,F. Gygi,F. Ree (<http://www-pat.llnl.gov/Research/qsg/research/fup/hf/>).
  5. Dynamical Properties of H-Bonded Liquids (Ph.D. Thesis in Physics)G. Garberoglio ([http://garmi.science.unitn.it/~gio/PhD\\_thesis/tesi.html](http://garmi.science.unitn.it/~gio/PhD_thesis/tesi.html))
  6. INEOS Fluor Fluorinated Feedstocks (<http://www.ineosfluor.com/feedstock/physprop.htm>)
  7. Analytical three-body interaction potentials and hydrogen bond dynamics of hydrogen fluoride aggregates (HF)<sub>n</sub>, n >= 3, M.Quack,J. Stohner,M.Suhm. (<http://www-suhm.uni-pc.gwdg.de/research.htm>)
  8. Vapor-liquid equilibria and heat effects of hydrogen fluoride from molecular simulation, D. Visco, D. Kofke. ([http://content.aip.org/JCP/SA6/v109/i10/4015\\_1.html](http://content.aip.org/JCP/SA6/v109/i10/4015_1.html))
  9. Chemical Systems, Chemical bond Approach Project (McGraw-Hill,1964), Chap. 8,18.
  10. General Chemistry, D.A. McQuarrie (WH Freeman, 1984), p.353.
  11. כימיה - מדע ניסויי, מכון ויצמן (1967), ע' 646.
  12. כימיה כללית (כרך א'), ז. נצר (1965), ע' 260-261.
  13. הכימיה - אתגר, ר. בן-צבי, י. זילברשטיין, מכון ויצמן (1985), ע' 303.

רוב ההסביר הזה היה קיים פעם בספר הלימוד המקובלם בישראל<sup>12,11</sup>. הייתה קיימת גם מודעות לקושי שהנוזל HF מציג; בספר הלימוד אשר שימש את רוב המורים בשני העשורים האחרונים<sup>13</sup> מופיעה השאלה הבאה : מהו המספר המרבי התיאורטי של קשרי מימן שבב מולקולה אחת של : HF, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>? האם בקבוקות הרתיחה של ארבעת החזידים תואמות לתשובתך?

על שאלה זו, כמו על שאלה 2 בשאלון 918651 השנה, ניתן לומר "שאלת טובה". אולם לא ברור מה עליינו לקבל כתשובה מספקת ברמה של 3 יח"ל וכיצד התלמידים אמורים להגיע לתשובה זו.

כמסקנה מהדברים שהבאתי במאמר זה אני מציע לפתח דין מחודש בין המורים על הנושא "כוחות בין- מולקולריים" ובעקבותיו להחליט לשתיית את ההוראה בתחום זה על יסודות עיוניים איתנים יותר, ככל שיאפשרו מתן הסברים מדעיים מקובלים ללא צורך - "עיגול פינות". שابتוי רקע מדעי משני מקורות שביחס ידי: מן האינטרנט ומספריו הלימוד הישנים הקיימים בביתך.

כמהות החומר הקים בנושא עצומה, ואין לבדוק זו אלא ניסיון לסכם חלק זעיר ממנו.

פנחים גאלו נשלק נזקי,  
נאנו גאלו כו ליזג צויגו כו נריכח'

