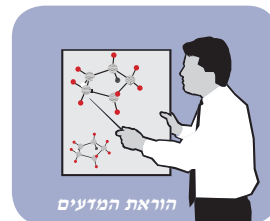


# פעילות לתלמיד מתוך דגם הוראה: מיומנות ההשוואה בכימיה אורגנית מתקדמת



זיהוי חומרי נפץ ע"י תגובות כימיות  
| אריאלה וינר, חיה פרומר, רחל צימרוט\* |

הפיצוץ. במקרה כזה אוספים חומר וחפצים (שברי עצמות, אדמה) ממוקד הפיצוץ ומסביבתו. דגימות אלה עוברות במעבדה תהליכי מיצוי וריכוז. כך נשארות בידי החוקר טיפות אחדות של תמיסה המכילה כמות זעירה ביותר של חומר הנפץ המקורי בנוסף על חומרי לוואי רבים. במעבדות המחלקה לזיהוי פלילי במשטרת ישראל פותחה סדרה של בדיקות-טיפין, המאפשרת לגלות נוכחות כמויות זעירות של רוב חומרי הנפץ המצויים, במהירות רבה וברגישות גבוהה. מערכת הבדיקה מכונה ETK (Explosive Testing Kit) ובעזרתה ניתן לקבל תגובות צבע אופייניות כמעט עם כל חומרי הנפץ.

## המפתח לתהליך הזיהוי הוא תגובתם של חומרי נפץ עם בסיס.

TNT, כמו יתר החומרים מקבוצת פולי-ניטרו-ארומטיים (תרכובות המכילות בנזן שיש להן קבוצות ניטרו  $\text{NO}_2$ ), מגיב עם בסיס ויוצר תגובת צבע חזקה ומידית. התוצר הסגול-חום מכונה "תצמיד מייזנהיימר" (Meizenheimer Complex).

לעומתו חומרי נפץ אחרים, השייכים לקבוצת הניטריטים האורגניים (כאשר אין בנזן בשלד הפחמני, לדוגמה: ניטרוגליצרין), עוברים בהשפעת בסיס תהליך כימי אחר, שאינו מביא ליצירת צבע אלא לקבלת יוני ניטריט ( $\text{NO}_2^-$ ) חסרי צבע.

## קראו את המאמר: זיהוי חומרי נפץ

להלן קטע מעובד מתוך המאמר: "זיהוי חומרי נפץ" מאת פרופ' אלמוג, "מדע", ל"ג, 1

בשני העשורים האחרונים גבר השימוש הבלתי-חוקי בחומרי נפץ ע"י עבריינים וקבוצות טרור למיניהן. אלה כמו אלה משיגים את חומרי הנפץ בדרכים שונות: גניבה, רכישה תמימה לכאורה (האפשרית בארצות מערביות אחדות), הברחה ממדינות תומכות טרור וגם ייצור עצמי. המשטרה נדרשת לזהות חומרי נפץ מסויבות שונות ומגוונות: כראיה לבית המשפט, לצורך הכוונת חקירה ולצרכים מודיעיניים.

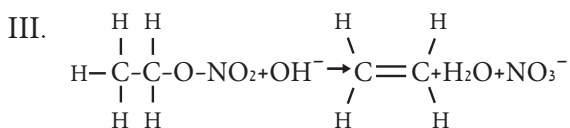
במעבדה המשטרתית מזהים חומרי נפץ במצבים הבאים: זיהוי חומר חשוד כחומר נפץ וקביעת הרכבו המדויק, גילוי שרידי חומר נפץ אחרי ההתפוצצות וזיהויו, גילוי עקבות חומר נפץ על גופם של חשודים, בכליהם או באתריהם. שיטות רבות המקובלות בכימיה אנליטית ניתנות להתאמה גם לזיהוי חומרי נפץ, אם כי אחדות מהן אינן מעשיות בגלל תכונותיהם של החומרים הללו, כמו רגישות לטמפרטורה גבוהה או חוסר נדיפות. תהליך הזיהוי קשה שבעתיים אחרי שאירע פיצוץ. אמנם רוב התוצרים של הפיצוץ הם גזים, אך כמויות זעירות של החומר המקורי שלא עבר את התהליך, עשויות בכל זאת להימצא באזור

\*אריאלה וינר, חברת צוות המרכז הארצי למורי הכימיה, האוניברסיטה העברית בירושלים.

\*חיה פרומר, עורכת משנה של העיתון "על-כימיה", חברת צוות המרכז הארצי למורי הכימיה, האוניברסיטה העברית בירושלים.

\*ד"ר רחל צימרוט, מנהלת המרכז הארצי למורי הכימיה בירושלים בשנים: תשס"ח-תשס"ט, מרצה בחוג להכשרת עובדי הוראה ובחוג להוראת המדעים באוניברסיטה העברית ומורה לכימיה בבית ספר קלעי, גבעתיים.

נתייחס לניסוח הכללי של התהליכים<sup>1</sup>:

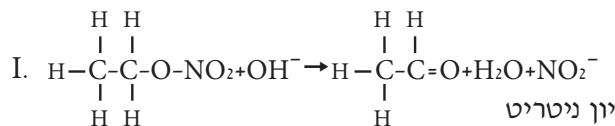


בדרך כלל מתקיימים שלושת המסלולים בו-בזמן שכן התגובות מתחרות.

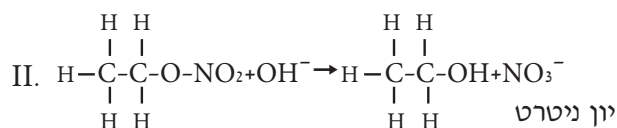
לצורך הזיהוי הפלילי רצוי לעודד את התגובה במנגנון היוצר יוני ניטריט ( $\text{NO}_2^-$ ) כי הוא ניתן לגילוי בתגובה המייצרת צבע. כדי לקבל מעט ניטרט ( $\text{NO}_3^-$ ) והרבה ניטריט ( $\text{NO}_2^-$ ) מוסיפים חומר מתון (מתון - כדי שלא יחזר את הניטריט לחנקן).

שיטת ה-ETK היא פשוטה, קלה לביצוע ומהירה. יתרונה הגדול הוא בכך שהיא מאפשרת בדיקה מהירה מאוד לנוכחות חומרי הנפץ גם בתנאי שדה (מחוץ למעבדה). מאידך גיסא, בדיקה זו לא נועדה אלא להתריע על מציאות אפשרית של חומר נפץ (גם חומרים שאינם חומרי נפץ, השייכים לקבוצת הניטראטים האורגניים או לקבוצת הניטרו-אמינים, יגיבו באופן דומה אך הללו נדירים למדי).

זיהוי סופי ומוחלט נעשה במעבדה המשטריתית ומחייב שיטות בדיקה מתוחכמות יותר.



בסביבה כימית מתאימה, יוני ניטריט ( $\text{NO}_2^-$ ) מסוגלים לגרום לתגובת צבע מהירה וברורה שבה מתקבל תוצר בצבע וורוד. תגובה זו נקראת "תגובת גרייס". הבעיה היא שבסביבה בסיסית עשויות להתרחש גם שתי תגובות אחרות המייצרות יוני ניטרט ( $\text{NO}_3^-$ ) במקום יוני ניטריט ( $\text{NO}_2^-$ ). יוני ניטרט קשים יותר לזיהוי.



### עבדו בקבוצות.

מטרת הפעילות: זיהוי היון המשתחרר.

בחומרי נפץ נפוצים יש קבוצות ניטרו ( $\text{NO}_2$ ) הקשורות לשלד פחמני. כפי שקראתם במאמר, כדי לזהות את רוב חומרי הנפץ, מבצעים תגובות "המעודדות" את שחרור יון הניטריט, ואותו מזהים בבדיקות צבע. עליכם לערוך השוואה בין תגובות I, II, III כדי להבין בצורה מעמיקה את התהליכים שמתרחשים בזיהוי חומרי הנפץ הנ"ל, מבחינת סוג התגובה וכן סוג המנגנון של התגובה. הבנה זו תאפשר לכם גם להציע פתרונות לבעיות הקשורות לנושא זה.

איך תבצעו את ההשוואה?

### שלב א'

**מצאו מאפיינים של כל אחת מהתגובות.** חלק מהמאפיינים ישמשו

התלמידים יפרטו ממה מורכבת כל תגובה ולאחר מכן יוכלו להכליל ולתת שם לכל מאפיין של התגובה. הטבלה להלן היא הצעה למורה.

**בקריטריונים להשוואה.**

כדי למצוא את הקריטריונים להשוואה פרטו את כל מאפייני התגובות ומרכיביהן, שמהם תגזרו את הקריטריונים הרלוונטיים להבנת התגובות. ערכו טבלה ובה רשמו בראשי הטורים את כל מאפייני התגובה (לדוגמה: הנוקלאופיל). מלאו את הטבלה לגבי שלוש התגובות.

1. נציין רק את הקבוצה הפונקציונלית ואטומי הפחמן הסמוכים לה העשויים לקחת חלק בתגובה.



| תגובה | חומר מוצא והשלד פחמני שלו | הנוקלאופיל המתקיף | תוצר עיקרי | תוצרים נוספים   | קבוצה עוזבת |
|-------|---------------------------|-------------------|------------|-----------------|-------------|
| I     | ניטרט ראשוני              | הידרוקסיל         | אלדהיד     | מים ויון ניטריט | ניטריט      |
| II    | ניטרט ראשוני              | הידרוקסיל         | כוהל       | יון ניטרט       | ניטרט       |
| III   | ניטרט ראשוני              | הידרוקסיל         | אלקן       | מים ויון ניטרט  | ניטרט       |

### שלב ב'

#### בצעו את ההשוואה בדרך הבאה:

רשמו מהן נקודות הדמיון בין שלוש התגובות.  
רשמו מהן נקודות השוני בין שלוש התגובות.

### למורה:

דמיון: חומרי המוצא זהים. הנוקלאופילים זהים. בתגובות השנייה והשלישית יון הניטרט הוא הקבוצה העוזבת.

שוני: תוצר עיקרי - בכל תהליך מקבלים תוצר שונה:

בתגובה II מתקבל כוהל.

בתגובה III מתקבל אלקן (קשר כפול בין פחמן לפחמן) וכן מים.

תגובה I לא מוכרת לתלמיד: יצא יון ניטריט ולא ניטרט וגם קיבלנו קשר כפול בין הפחמן לחמצן שאינו מוכר לנו עד כה בתגובות.

אנו מצפים שהתלמידים יזהו שתגובה II היא התמרה מסוג  $SN_2$  ותגובה III היא אלימינציה מסוג E2 ולכן יוכלו, בעזרת הידע הקודם שלהם, לסמן את מעברי האלקטרונים ולתאר את מצב המעבר.

לעומת זאת תגובה I אינה מוכרת להם, לא מבחינת התוצר שהתקבל ולא המנגנון לקבלתו.

פירוט המסקנות האפשריות:

- בתגובה II נכנס הנוקלאופיל במקום הקבוצה העוזבת ולכן מדובר בהתמרה. בתגובה III נוצר קשר כפול בין אטומי פחמן והשתחררו גם מים לכן הגיוני שזו אלימינציה.
- המאפיינים החשובים הם התוצרים: בודקים אם הנוקלאופיל נשאר קשור לתוצר העיקרי או שהוא נפרד ממנו כתוצר נוסף.

גם בתגובה I נוצר קשר כפול ולכן מדובר באלימינציה, אבל זהו קשר כפול בין C ל O, שהתלמידים לא הכירו במבנית ולכן זו כנראה אלימינציה מסוג אחר.

ייתכן שהתלמידים יגדירו את תגובה I כסוג חדש מכיוון שבספר הלימוד האלימינציה מוכרת כתגובה שבה נוצר קשר כפול בין שני אטומי פחמן ולא בין פחמן לחמצן.

### שלב ג'

#### נסחו את המסקנות שלכם מן השלבים א' ו-ב'.

רמז: העובדה שמגיבים זהים יוצרים תוצרים שונים מצביעה על כך שמדובר בתגובות מתחרות המתרחשות במסלולים שונים.

- זהו את סוג התגובות II ו-III על פי המגיבים והתוצרים.
- ציינו מי מבין המאפיינים שהגדרתם ובעזרתם ביצעתם את ההשוואה, חשובים ביותר לצורך קביעת סוג התגובה.
- היעזרו בהשוואה שערכתם בין תגובות II, III כדי לקבוע באיזה מנגנון התרחשה כל אחת מהתגובות. (רמז: ידוע שכל אחת מהתגובות II, III מתרחשת בשלב אחד).
- נסחו ושרטטו את מנגנון התגובה בסיוע חיצים המתארים את מעברי האלקטרונים בשתי התגובות שזיהיתם.
- נסו להשוות בין המאפיינים החשובים (שאליהם הגעתם בהשוואה הקודמת) של תגובות II ו-III לבין תגובה I, כדי לסווג את תגובה I לסוג דומה לאחת התגובות, II או III. מהי מסקנתכם: לאיזה סוג דומה יותר תגובה I?

## למורה:

התלמידים יבדקו את התוצרים מבחינת קשרים ומתמרים הקשורים לשלד הפחמני. הנימוק: מכיוון שהמגיבים שווים ונוצר קשר כפול וגם מכיוון שהתוצר הנלווה היה מים, כנראה ישנם גורמים נוספים שמכוונים את התגובה למנגנון שונה.

התגובה החדשה היא אלימינציה מסוג α.

התלמידים יודרכו בסעיף 7 לחשוב (מטלה קוגניטיבית) על דרך ההשוואה שביצעו, ומהם השלבים שהובילו אותם למסקנה בדבר התגובה החדשה - תגובה I.

דוגמה: טמפרטורה, ממש, נוקלאופיל. בדרך כלל משתמשים בתגובות אלו בממס אתאנול או ב-DMSO.  
דומה: חימום ישפיע על התגובות I ו-III באותו אופן ויגדיל את כמות תוצרי האלימינציה בתערובת, בהשוואה לכמות המהול - תוצר ההתמרה.

שונה: ממש מימי יכוון את התגובה להתמרה. ממש כהלי יכוון את התגובה לאלימינציה.

6. שרטטו את מנגנון התגובה החדשה שלמדתם, זכרו: גם היא מתרחשת בשלב אחד.

הקפידו לשרטט את מעברי האלקטרונים והדגישו את הקבוצות והאטומים העוזבים את מולקולת המגיב.

7. האם מצאתם מאפיין חדש נוסף לתגובה זו? כיצד הייתם מכנים אותו?

## סיכום השיעורים:

א. פרטו את הפעולות שעשיתם כדי להכיר תהליך חדש, להבין את המנגנון שלו ולנבא את השפעתם של גורמים שונים עליו.

ב. הסבירו כיצד סייעו לכם השלבים בהשוואה לקבוע את סוג התגובה.

## שלב ד'

לפניכם משימה בעלת ערך מעשי: עליכם לכוון את התגובות המתרחשות לכיוון הרצוי - יצירת ניטריט, כדי שניתן יהיה לזהותו בקלות לפי תגובת הצבע.

1. חזרו למאמר והסבירו:

I. מדוע חשוב להגביר את קצב תגובה I באופן יחסי לתגובות II ו-III?

II. מדוע קשה לבצע זאת?

2. הציעו דרכים שבהן ניתן להגביר את תגובה I באופן יחסי לתגובות האחרות בהתחשב בקושי.

3. האם חסר לכם מידע שבעזרתו תוכלו לבסס את הצעתכם? ציינו מהו המידע ולאלו מסקנות אתם עשויים להגיע.

4. פרטו אילו גורמים (קריטריונים) חסרים לכם להמשך הדיון.

5. השוו בעזרת הקריטריונים החדשים שלמדתם: כיצד עשוי להשפיע כל גורם שבחרתם על כל אחת מהתגובות? וכיצד הוא מוביל לפתרון הבעיה?

## מאמרים בנושא:

שרינה ויזנר, זיהוי טביעת אצבעות על נייר בשיטות חדשניות, על כימיה, גיליון 9, מרץ 2006.  
שמואל ציטרון, קריטריונים לזיהוי תרכובות אורגניות במעבדה פורנזית, על כימיה גיליון 11, פברואר 2007.  
פרופ' אלמוג, זיהוי חומרי נפץ, "מדע", כרך ל"ג, מס' 1, 1989, תשמ"ט - המאמר המלא.

