

המסע בעקבות צבע התכלת האבוד



| שלומציון כהן* |

כימאים, רבנים ויזמים. מסענו בעקבות צבע התכלת התחיל בשנה שעברה, כאשר ביקרנו במפעל "פתיל תכלת" הנמצא בכפר אדומים. במפעל זה נעשה ניסיון לחדש את מצוות התכלת ולבצע צביעה של פתילי צמר המיועדים לקשירה על ציצית או טלית על פי ההלכה היהודית. בביקורנו זה נחשפנו הן להיבטים ההלכתיים והן להיבטים הכימיים של תהליך צביעת הצמר בצבע התכלת.

צבע התכלת בהיסטוריה

התכלת היתה הצבע האהוב והמועדף על מלכים, כוהנים ועשירים בעולם כולו. גם אצלנו נמצאה התכלת בבגדי הכוהן הגדול אשר לבש מעיל "כליל תכלת" בעבודתו בבית המקדש. כמו כן, במגילת אסתר אנחנו קוראים על מרדכי שיצא לבוש בבגדי "חור כרפס ותכלת". לכן אין להתפלא שאדם שבבגדו אפילו פתיל תכלת בודד, הרגיש כאדם חשוב.

סוד הפקת התכלת אבד עם הגלייתם של היהודים מירושלים ומארץ ישראל, לאחר חורבן בית המקדש. עזיבתם את ארץ ישראל הרחיקה אותם מהים ששם היה מקור התכלת - החילזון.

החילזון הוא המקור ההכרחי לקיום מצוות התכלת בציצית. ההלכה היהודית קובעת: "תכלת אין כשרה אלא מן החילזון, שלא מן החילזון פסולה".² הגמרא מסבירה שהתכלת הופקה מחיית ים הנקראת חילזון. למרות

אחת התעלומות שמלוות את חיי העם היהודי מאז יציאתו לגלות, שלתוכה נסחפנו, תלמידות כיתת י"ב במגמת כימיה באולפנת צבייה מעלה אדומים ואני, היא הפקת צבע התכלת לצורך קיום "מצוות התכלת" הקשורה לבגדיהם של היהודים.

פעמיים ביום קורא היהודי את "קריאת שמע" ובין מילותיה: "ונתנו על ציצית הכנף פתיל תכלת". אם נסתכל סביבנו במהלך התפילה, נבחין בטליתות בגדלים שונים ובעיטורים שונים, אבל את הפתיל האבוד לא נמצא. לאן נעלם פתיל התכלת? מדוע בטליתות של רוב רובו של עם ישראל הוא איננו נמצא?¹



תמונה 1 פתיל תכלת המחובר לציצית או לטלית

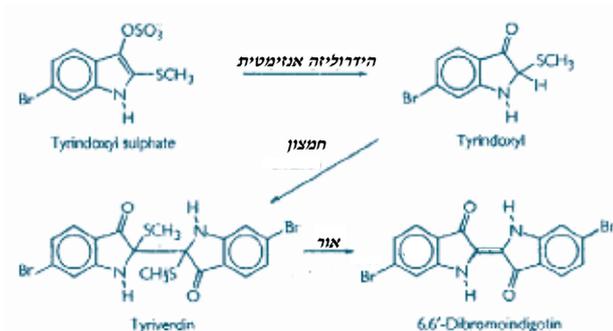
ב"מסע" שערכנו, כיתתי ואני, "בעקבות התכלת", ביקרנו במקומות שונים ומגוונים ונפגשנו עם אנשים שונים ומרתקים. חיפשנו את הקשר שבין חילזון, צמח, צבע הג'ינס, תהליכי חמצון-חיזור וצביעת בדים בשיטות עתיקות ומודרניות, והתוודענו לאנשים מתחומים שונים:

*שלומציון כהן, מורה לכימיה באולפנת צביה לבנות, מעלה-אדומים.

1. סרטון עמותת פתיל תכלת - תעלומת התכלת

2. תוספתא: מנחות פרק ט' הלכה ו'

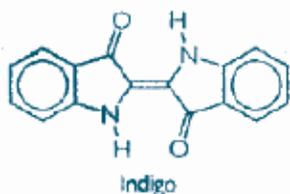
בצבע הארגמן⁵.



תמונה 4 הפיכת חומר המוצא המצוי בבלוטת החילזון לדיברומואינדיגוטין בזמן חשיפה לאוויר ולאור

אך מה הקשר בין צבע הארגמן הנ"ל לצבע התכלת המבוקש על ידינו?

ניסויים שנערכו בצבע הארגמן גילו שעל ידי חשיפתו לשמש בשלב הצביעה, מתרחש תהליך נוסף שבו יוצאים אטומי הברום מהמולקולה, מתקבלת המולקולה אינדיגו, וצבע החומר הופך לתכלת.



תמונה 5 נוסחת מבנה של מולקולת האינדיגו, צבע תכלת

מולקולות האינדיגו מוכרות לנו מתעשיית הצביעה, כצבע של הג'ינס. המולקולות לתעשייה זו הופקו בעבר משיח הנקרא Indigofera Tinctoria - "קלא האיילן" בלשון הגמרא, האסור לשימוש, כאמור, לצביעת פתיל התכלת של ציצית או טלית. על פי חז"ל, צבע פתיל התכלת חייב להיות מופק מהחילזון.

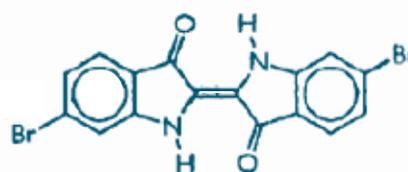
צביעת הפתיל בצבע האינדיגו - תכלת

לאחר שסיימנו ללמוד במסגרת שיעורי הכימיה את הנושא חמצון-חיזור, ביקרנו במפעל "פתיל תכלת"

שבמקרא הובאו מספר מאפיינים מזהים, הם אינם ייחודים דיים בכדי שהדורות המודרניים יוכלו לזהות בצורה חד משמעית באיזו חייית ים מדובר. בחפירות ארכאולוגיות בחוף דור נמצאו שרידים לתעשיית הצביעה העתיקה מלפני 3000 שנה: שרידי קונכיות וכדי צבע המכילים את הצבע פורפור - ארגמן. שרידים אלה לימדו אותנו על זהותו הכימית של צבע עתיק זה.

זהותו הכימית של צבע התכלת

ההרכב המולקולרי של צבע הארגמן, צבע סגול ששימש לצביעת בדים בעת העתיקה³, הוא למעשה המולקולה 6,6' - די ברומואינדיגוטין (6,6' - Dibromoindigotin).



תמונה 2 נוסחת מבנה של 6,6' - די ברומואינדיגוטין צבע הארגמן העתיק שנקרא בעבר פורפור

צבע זה היה מופק מבלוטות של החילזון ארגמון קהה הקוצים, השוכן לאורך חופי הים התיכון, בעיקר באזור הצפון⁴.



תמונה 3 ארגמון קהה קוצים

בחיפתה של בלוטת החילזון לאור, מתרחש תהליך הכולל כמה שלבים, ובמהלכם הופך החומר הנמצא בבלוטה לדיברומואינדיגוטין - החומר ששימש לצביעה

3. Koren.Z.C "The First Optimal All Murex All Natural Purple Dyeing in the Eastern Mediterranean in a Millennium and a Half", Dyes in History and Archaeology 20, pp.136-149, Color Plates 15.1-15.5

4. רענן, מ, תש"ח, "היבטים מדעיים וכלכליים בגידול חלזונות לצביעת פתיל תכלת", על אתר - ביטאון לענייני א"י במקורות, גיליון ו', שבט תש"ח.

5. Clark R.J.H, Cooksey C.J, Daniels M.A.M, Withnall R, 1996, "Indigo Red White and Blue", Education in Chemistry, 33 (1), 16-19



לאחר שהתלמידות התנסו בצביעת סיבי הצמר בצבע ארגמן ותכלת, חזרנו לאולפנה וחשבנו שסיימנו (עייפות אך מרוצות) את מסענו בעקבות התכלת. אך, כעבור זמן מה הסתבר לנו שטעינו. בתחילת שנת הלימודים הנוכחית, פנה אלי מר יואל גוברמן, ממקימי עמותת "פתיל תכלת" בהצעה מעניינת. עמותת "פתיל תכלת" פנתה לראש ישיבת "ברכת משה" במעלה אדומים - הרב נחום רבינוביץ' שליט"א, בבקשה לקבל פסק הלכה שיכריע האם צביעת פתיל התכלת בשיטה הנ"ל יכולה להיחשב כמצוות פתיל התכלת המקורית. במהלך הבירור ההלכתי ביקש הרב, כתנאי מקדים לפסיקה, לבצע את צביעת פתיל התכלת בדרך הטבעית, העתיקה, ללא שימוש בחומרים שלא ידוע אם היו זמינים בעת ההיא.

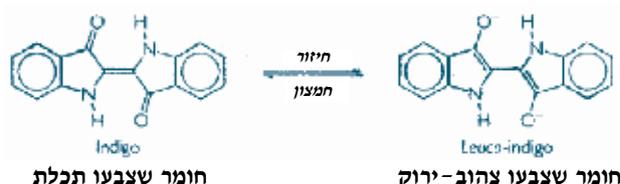
עמותת "פתיל תכלת" פנתה אלינו בהצעה לנסות ולשחזר ניסוי של צביעה עתיקה שנערך ע"י ג'ון אדמונד⁶ באנגליה ולאחר מכן ע"י פרופסור צבי קורן⁷, מנהל מרכז אדלשטיין לחקר ממצאים עתיקים ב"שנקר" ברמת גן, כימאי המתמחה בצביעה בעת העתיקה. מדובר בניסוי שבו תהליך החיזור של מולקולת האינדיגו למצב של לוקו-אינדיגו נעשה באמצעים טבעיים בלבד.

בניסוי מחליף פרופ' קורן את תפקיד המחזור $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ בתהליך הריקבון של בשר החילזון. ריקבון זה נמשך כמה ימים ובמהלכו יש לשמור על מספר משתנים קבועים כגון: טמפרטורה, pH, חשיפה לאור וחמצן. נענינו לאתגר וערכנו בכיתתנו ניסוי של צביעת פתיל צמר בצבע התכלת, באמצעים טבעיים בלבד, מהחילזון החי ועד לפתיל הצבוע.

במהלך ימי הניסוי היה לנו הכבוד לארח בכיתתנו את הרב רבינוביץ' שבא לצפות בניסוי ואף שוחח עם הבנות על חשיבות לימוד מדעי הטבע. הרב ציין בפני הבנות שדרך ההתבוננות בנפלאות הטבע וחשיפת חוקי הטבע, מגלה האדם את חוכמת ה' הגנוזה במציאות. מתוך כך נמצא שהאדם העוסק במדעים ומבקש לגלות ולדעת את חוכמת ה', אף הוא נחשב כעוסק בתורה. במהלך הניסוי היינו בקשר גם עם פרופ' צבי קורן ונועצנו בו לגבי התקדמות הניסוי.

במטרה להיפגש עם יישום הנושא במציאות. בעזרת דפי מידע וניסויים שערכו התלמידות⁶, התוודענו לבעיה העומדת בפני מי שרוצה להשתמש בצבע האינדיגו לצביעת בדים.

מולקולות האינדיגו אינן מסיסות במים. לכן, כדי שיתאפשר להשתמש בהן לצביעת הסיב, יש לגרום להן להתמוסס במים וכך לחדור לעומק הסיב. שינוי זה אפשרי אם מחזרים את המולקולות בעזרת $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ לקבלת לוקו-אינדיגו.



תמונה 6 חיזור מולקולת האינדיגו ללוקו-אינדיגו

בתהליך זה משמש $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ כמחזור על פי התהליך:

$$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4(\text{aq}) \longrightarrow 2\text{Na}^+(\text{aq}) + 2\text{SO}_4^{2-}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$$

מולקולות האינדיגו ההופכות למצב לוקו - שהוא חומר יוני - מסיסות היטב במים, אך צבעם בתמיסה משתנה מתכלת לצהוב-ירוק. סיב הצמר הוא למעשה פולימר הבנוי מחומצות אמינו המחוברות זו לזו בקשר אמידי, ובין שרשרותיו מתקיימים קשרי מימן. כאשר הוא נטבל בתמיסת הלוקו-אינדיגו, הצבע נספג היטב בין שרשרות הפולימר. לאחר שהסיב ספוג בצבע, מחמצנים את מולקולות הלוקו-אינדיגו חזרה למולקולות האינדיגו (תמונה 6) ע"י חשיפה לאור או טיפול במי חמצן, והסיב משנה את צבעו לתכלת. מכיוון שמולקולות האינדיגו אינן מסיסות במים, צבע התכלת אינו נשטף מהסיב.



תמונה 7 יציאת הסיב המחומצן (תכלת) מתמיסת הלוקו-אינדיגו (צהוב-ירוק)

⁶ <http://www.tekhelet.com/redox>

⁷ Edmonds J., "The Mystery of Imperial Purple Dye", 2000, Historic Dyes Series No.7



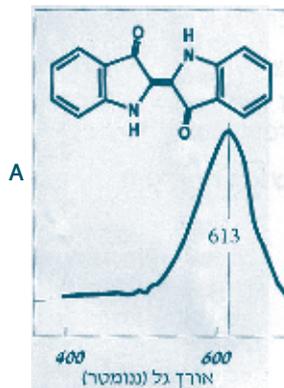
בעקבות צבע התכלת האבוד הוביל אותנו ללימוד נושאים שונים ולמפגש עם אנשים מגוונים. אין לי ספק שתהליך זה השאיר רושם על התלמידות, שחשו את האחריות והעניין שבהשתתפות בניסוי מחקר אמתי, שחשף אותן להשפעה ולתפקיד החשוב של מדע הכימיה, הרבה מעבר לגבולות הכיתה, וכן לשילוב המרתק שבין תורה למדע. תודתנו נתונה למר יואל גוברמן מעמותת "פתיל תכלת" שסחף אותנו למסע מרתק זה.

לאחר כשבוע של ניסוי, שבו עקבו התלמידות אחר התקדמות תהליך החיזור, הכנסנו פיסת צמר לתמיסה ולשמחתנו הצלחנו לצבוע אותה בצבע תכלת! המשימה הושלמה. בעקבות הניסוי המוצלח, ביצעו כמה תלמידות ניסוי חקר ברמה II, ע"י שינוי חלק מהגורמים שהיו קבועים בניסוי המקורי. כפי שציינתי בתחילה, המסע שערכנו תלמידותי ואני

לאוהבי חידות, סודות ורמזים:

בפרשת ציצית שבקריאת שמע נאמר, שראיית הציצית מביאה לזכירת כל מצוות ה'. רש"י על אתר מסביר, שהמלה "ציצית" עולה בגימטריא 600. ואם נוסיף את 8 החוטים ו- 5 הקשרים נקבל 613 – תרי"ג המצוות שבתורה. רמב"ן ומפרשים אחרים אינם מסכימים עם פירוש זה ומפרשים, כי "פתיל תכלת" לבדו משרת מטרה זו. צבע התכלת מעורר אותנו להתבונן בשמים ולזכור את כסא הכבוד וזה מביא אותנו לזכירת המצוות.

באופן מרתק, מגלה עבודת מחקר, שנערכה לאחרונה ע"י מדענים הולנדיים* על מאפייניה של מולקולת צבע התכלת, צירוף מקרים מדהים. צבעו של כל חומר נקבע על ידי יכולתו לקלוט ולהחזיר אור. לכל מולקולה יש התנהגות קרינה מסוימת (הנקרא ספקטרום ספיגת אורך-גל) היחודית לה הנמדדת ביחידות של ננומטרים. צבע התכלת, המופק משבלול הנמדדת ביחידות של ננומטרים, מתרומם לשיא חד בספקטרום שלו בדיוק ב- 613 ננומטרים.



* J. Wouters and A. Verhecken, JSDC Volume 107, July/August, 1991.

מתוך העלון של עמותת "פתיל תכלת".

