

רוי עמנואל הופמן

זיהוי התכלת: ממצאים חדשים

הסוד של צבע התכלת אבד לפני זמן רב. ניסיונות בעבר לגלות אותו מחדש הובילו לטעויות, ולכן הסמכויות הרבניות זהירות מאוד בקבלת חידוש התכלת. במאמר זה נביא ממצאים חדשים המפריכים את ההתנגדות העיקרית שנתרה. טענת המתנגדים נובעת מכך שתהליך הצביעה נעשה ע"י חומרים כימיים מודרניים, שלא ידעו אבותינו. במאמר זה נסקור תהליך צביעה ע"י שימוש בחומרים שהיו ידועים בעולם העתיק, תוך השוואה לשיטות צביעה דומות. הצבע שיוצר נותח והשווה לעדויות על צבע התכלת בדברי חז"ל, בכתובות עתיקות ובמצאים ארכיאולוגיים. כמו כן נדון בהשלכות ההלכתיות של הממצאים החדשים המדווחים כאן.

חשיבות חידוש התכלת

בזמן בית המקדש השתמשו בצבע התכלת הן לצביעת ציצית הן לצביעת בגדי כהונה, בדים ויריעות. התלמוד מציין שהתכלת מופקת מדרם חילזון.¹ הרב הרצוג טוען שייצור התכלת נפסק לאחר כיבוש חוף הארץ בידי הערבים בשנת 638 לספירה. הוא מגיע למסקנה זאת מכך ששימוש בתכלת מוזכר בתלמוד, שנכתב לפני כן, בעוד שבמדרש תנחומא² (שנכתב בערך בשנת 850 לספירה) נכתב: "עכשיו אין לנו אלא לבן, שהתכלת נגנז".³

בלא התכלת התקיימה מצוות ציצית לאורך הדורות בחוטים לבנים בלבד. התכלת חסרה לנו מעל אלף שנה מה שמקשה על חידושה. דרך הכנת הצבע והצביעה בו בסוד, והמסורת של הצביעה בתכלת אבדה.

ההלכה נמנעת בדרך כלל מלחדש מסורת. הדוגמה המפורסמת היא המסורת על כשרות החגב שאבדה ולכן מקובל ברוב עדות ישראל, פרט ליהודי תימן שמחזיקים במסורת, שאין לאכול כל חגב למרות שכל הסימנים כתובים בתורה.⁴ יש לציין שברגים אנחנו סומכים על

* תודה ליואל גוברמן, אייל פישלר ואגורת "פתיל תכלת" עבור יעוץ ומימון המחקר. תודה לעקיבא הופמן שהכין חלק מיורות החסיסה. תודה לניסים גרתי על המקום במעבדה שלו. תודה לישראל זיירמן שסיפק ברומאינדיגים סינתטיים.

1 מנחות מד ע"א.

2 מדרש תנחומא, במדבר, שלח, סי' ט"ו.

3 י. א. הלוי הרצוג, בתוך "שי לישעיה" – ספר יוכל לר' ישעיהו וולפסברג, העורך י. תירוש, הוצאת המרכז לתרבות הפועל המזרחי, תל-אביב, תשס"ו.

4 ערוך השולחן סעיף פ"ה סימן י"ד.

הסימנים. כאשר גילו את תרנגול הזהודו באמריקה עלתה שאלת הכשרות, למרות שהיו בו כל הסימנים, משום שלא הייתה מסודרת. בתחילה סברו שמקורו בהודו, לכן שאלו הרבנים את יהודי הודו האם הם אוכלים תרנגולות. מאחר שההודים אוכלים תרנגולות, הכשירו את תרנגול הזהודו. כעבור שנים רבות התגלתה הטעות, אך הרבנים אמרו שמאחר שכבר חורשה מסודרת, זה כשר.⁵ יוצא אם כן שיש מצוות שמחייבות מסודרת, יש מצוות שאינן מחייבות מסודרת, ויש מקרים שבהם ניתן לחדש מסודרת. מאחר שהתכלת נגנזה, אבדה המסודרת של הכנתה, ויש אומרים שהיא תתגלה לקראת ביאת המשיח. ללא ספק התכלת שייכת לסוג המסודרות שניתן לחדש, ולכן פעלו רבים לגילוי התכלת מחדש.

כמפורט להלן, חילוץ ארגמון קהה-קוצים הוא המתאים ביותר להפקת התכלת לציצית.⁶ אמנם מאחר שפסקה המסודרת, זיהוי התכלת מבוסס על ראיות נסיבתיות ותהליך הייצור המודרני משתמש בחומרים כימיים חרישים שלא ידעו אבותינו. ולפיכך נראה שבתקופה העתיקה לא היה ניתן להפיק תכלת מן הארגמון קהה-קוצים, לכן יש פוסקים שממליצים לא להטיל בתכלת שמופקת ממנו.⁷ המחקר שעליו מבוסס מאמר זה מציג ייצור תכלת בשיטה קדומה המופקת מן הארגמון קהה-קוצים, ללא בשר בעלי חיים נוספים וללא חומרים חרישים, שיטה זו נקראת יורת תסיסה.⁷

גדר החיוב להטיל פתיל תכלת

הרב ש. אריאל⁸ מברר במאמרו מה בדיוק כלול בציווי להטיל תכלת: כשהתכלת מצויה, האם קיימת חובה להטילה בציצית או שמא רק הידור מצווה? להלכה נפסק שהתכלת אינה מעכבת את הלבן כלומר שגם ציצית בלא תכלת כשרה, אלא שיש טוענים כי כאשר יש ציצית צבועה בתכלת חייבים להשתמש בה. ויש הטוענים כי תמיד ניתן לקיים את המצווה בלבן, ויש הטוענים שהתכלת היא רק הידור מצווה, למרות הציווי הכתוב בתורה⁹ להטיל פתיל תכלת. הרב אריאל דוחה את הטענות הללו ופוסק שחובה להטיל תכלת, כשיש תכלת אפילו אם זיהויה מוטל בספק. מה הדין כשזיהוי התכלת מסופק וייתכן שאין זו התכלת של התורה? יש הטוענים שבתכלת מסופקת אין מצווה והיא אף עלולה לפסול את הציצית מאחר שהתלמוד מזהיר אותנו משימוש ב"קלא אילן" המזוהה עם אינדיגו מהצומח וכשם שציצית שצבועה בקלא אילן פסולה, כך בכל צבע אחר. הרב אריאל⁸ מוכיח שיש להטיל פתיל תכלת אפילו אם זיהויה בספק. שאלה דומה יש לגבי התכלת של חסידי ראדזין המופקת מריונון וכן לגבי כל צבע כחול סינתטי (כפי שנהוג אצל הקראים). אין היא קלא אילן הנוכח בתלמוד כתכלת מזויפת ואף אינה התכלת האמיתית. האם ניתן להחשיב גוון כחול כזה כצבע סתם, כמו הלבן, או שהוא נחשב לתכלת מזויפת? ויש הטוענים

5 מאורת הרף היומי גיליון 121.

6 ש. אריאל, "תכלת בציצית - מצוה מן המובחר או חיוב גמור?" תחומין, כ"א, 475-485 (תשס"א).

7 הרב ג. א. רבינוביץ' 'רבינוביץ' <http://ybm.org.il/Admin/uploaddata/LessonsFiles/Pdf/3956.pdf>, 2010.

8 במדבר ט"ז, כ"ח.

שאם לא ניכר הברל בין גוון כחול זה לכיין התכלת האמיתית, ובמיוחד אם אדם לובש ציצית צבועה בכחול כזה וטוען שזו התכלת האמיתית, אזי יש מקום לומר כי הוא נכנס בגדר של "מי שתולה קלא אילן בבגדו ואומר תכלת היא" שהגמרא אומרת כי הקב"ה עתיד להיפרע ממנו.⁹ גם אם זיהוי התכלת נכון, עדיין יש לשאול: כמה חוטאים יש לצבוע ואיך לקשור אותם. כולם מסכימים, שבציצית יש שמונה פתילים (ארבעה כפולים) והמחלוקת היא כמה מהם חייבים לצבוע. לדעת הרמב"ם יש לצבוע פתיל אחד מתוך השמונה;¹⁰ לדעת הראב"ד בהשגותיו על הרמב"ם ואחרים, יש לצבוע חוט שלם, כלומר שני פתילים מתוך השמונה; ולדעת רש"י, יש לצבוע ארבע חוטאים מתוך שמונה.¹¹ לכאורה, אם נצבע יותר מדי פתילים נעבור על "בל תוסיף",¹² ואם נצבע מעט מדי פתילים נעבור על "בל תגרע". ואולם, הואיל וכתוב "התכלת אינו מעכב את הלבן; והלבן, אינו מעכב את התכלת",¹³ לכן גם אם נצבעו כל שמונת פתילי הציצית בתכלת, הציצית מותרת. לפי זה, אין במספר הפתילים הצבועים משום "בל תוסיף" ולא "בל תגרע", וכל השיטות הכוללות תכלת ולבן כשדות. קיימות דעות רבות בקשר למספר הכריכות והקשרים אך הכריכות והקשרים אינם מעכבים.¹⁴

מקורות לזיהוי החילזון

אף שהתכלת צריכה להתאים לסימנים המוזכרים ברברי חז"ל, אין היא צריכה להתאים לכל מדרש או אגדה שאינם הלכתיים.¹⁵ סימני החילזון שממנו יש להפיק תכלת על פי הגמרא הם: "גופו דומה לים וברייתו דומה לדג ועולה אחד לשבעים שנה וברמו צובעין תכלת לפיכך דמיו יקרים".¹

במאמרים רבים^{16,14} נידונה באריכות מירת ההתאמה של חלזונות שונים לתיאור זה ולתיאורים אחרים במקורות. כך לרוגמה נידונה השאלה האם החילזון חייב להיות דומה לים או לקרקעית הים, האם גופו חייב להיות דומה לים או ציפוי קליפתו חייב להיות דומה לים. צבע החילזון דומה לים או לרקיע¹⁹ כאשר הוא נמצא חי בטבע, מאחר שקליפתו מצופה בצמח ירוק-כחול. לגבי הגדרתו כדג בלשון הגמרא, נראה שחז"ל התכוונו לומר שהוא חי במים כדג, לכן לא צריך

9 בכא מציעא סא ע"ב.

10 רמב"ם משנה תורה, הלכות ציצית א, ו.

11 רש"י על מנחות לה ע"א ד"ה "התכלת".

12 נ. א. רבינוביץ, ררשה בנושא "ציצית וברכתה", אלול תש"ע.

13 מנחות ל"ה ע"א.

14 מ. בורשטיין, התכלת, ספרייתי, ירושלים 1990.

15 B. Sterman, "A response to Dr. Singer's review of *murex Trunculus* as the source of *tekhelet*", J. Halacha Contemp. Soc., 43 (2002).

16 M. E. Singer, "Understanding the Criteria for the Chilazon", J. Halacha Contemp. Soc., 42 (2001)

17 M. E. Singer, J. Halacha Contemp. Soc., 44 (2002)

18 M. Epstein, "Has tekhelet been found?", *Hakirah, Flatbush J. Jewish Law Thought*, 165-180

19 השוה מסכת ציצית פרק א', הלכה י' ותלמוד בבלי מנחות מ"ד ע"א.

לחפש חילוון דומה לרג לפי ההגדרה המורדנית, ואם הוא חי בים די בכך. עלייתו מהים פעם בשבעים שנה (ויש גורסים "שבע שנה"¹⁹) מתייחסת לעובדה שהוא נמצא בקרקעית הים ורק לעתים נדירות עולה חי משם. לכן תיאורו מתאים לארגמון קהה-קוצים.^{20,15,14}

קלא אילן

קלא אילן? הוא צבע המוזהה היום כאינדיגו, המופק מן הצומח²¹ ומכיל גם מעט מן התרכובת הנקראת אינדרירובין (ראה להלן – סכמה 3). ניתן לייצר אינדיגו מכמה צמחים אך הנפוץ ביותר בתעשייה הוא *Indigofera tinctora*. בתהליך ההכנה משרים את העלים במים פושרים ונותנים לתערובת לתסוס למשך כ-14 שעות. אחר כך מחדירים אוויר לתערובת על ידי ערבוב חזק. האינדיגו שוקע ומוכן או לצביעה.²² קלא אילן נראה כמו תכלת והשתמשו בו כתחליף זול לתכלת. אמנם נפסק שקלא אילן פסול למצוות התכלת. "אני הוא שעתיד ליפרע ממי ... שתולה קלא אילן בבגדו ואומר תכלת הוא"²³ כלומר מי שמכריו שקלא אילן הוא תכלת הוא שקרן. ועוד אמרו חכמים "גוירה משום קלא אילן ולא היא אלא לבן כיון דאפשר במינן לא"²³ כלומר, קלא אילן נחשב כצבע לבן, וכשמטיל חוטי צמר בצבע קלא אילן בבגד פשתן עובר על איסור שעטנז בציצית.

גוון התכלת

על פי הגמרא²⁴ צבע התכלת דומה לרקיע כלומר קרוב לכחול וכן פירש רמב"ם בהלכות ציצית.²⁵ עם זאת בתרגומים היוונים מתורגמת המילה "תכלת" ל"הייקינתוס" (*υακινθός*) שהוא גוון יותר קרוב לסגול מאשר כחול.^{27,26} משום כך היו שסברו שהתכלת היא סגולה.^{28,29} דעה זו יש להפריך בנימוקים הבאים: (1) גוון סגול אינו דומה לים או לרקיע. (2) ניתן להבחין בקלות בין גוון זה לבין קלא אילן, בעוד שלפי התלמוד הייתה ההבחנה קשה מאוד, אם לא בלתי אפשרית.²⁹

20 י. י. זידרמן, "לחידוש מצות תכלת בציצית", תחומין ט, 427-431.

21 י. פליקס "עולם הצמח המקראי" מסדה, רמת גן, 1968.

22 J. Balfour-Paul, "Indigo", British Museum Press, London, UK, 1998.

23 מנחות מ ע"א.

24 מנחות מ"ג ע"ב

25 רמב"ם, משנה תורה, הלכות ציצית ב, א.

26 I. Hertzog, "The Royal Purple and the Biblical Blue", PhD Thesis, London Univ., 1911; reprinted in 1987 by A. Shpneir

27 E. Haupttheil, "Dei etymologie des wortes 'Purpur' in naturwissenschaftlicher beleuchtung", in *Ein Beitrag zur Purpurkunde* ed. A. Dedekind, I, 18-97 (1898).

28 I. I. Zideman, "The biblical dye *Tekhelet* and its use in Jewish textiles", *Dyes Hist. Archaeo.*, 21, 36-44 (2008)

29 מנחות מב ע"ב.

בתוך שכבה קפואת-עד בסיביד, בקבר פזיריק, התגלתה התיכת בר ארגמן מקושטת בבר כחול. מקור הבר מפרס מלפני כ-2400 שנה. לפי בדיקה כימית שנקראת כרומטוגרפיה (שאמינותה שנויה במחלוקת)³⁰ התגלה שהצבע מכיל אינדיגו ותרכובות ברומואינדיגו, ומאחר שברומואינדיגו מופיע בטבע רק בחילוונות ים, נמצא שזוהו בר ארגמן ותכלת.^{31,32} לאחרונה נמצא במצדה אריג קטן מאוד של תכלת על בר מתקופת הורדוס.^{33,30} הגוון שלו קרוב לכחול וקצת סגול. אם הממצאים הארכיאולוגיים הללו הם באמת "תכלת" אזי צבע התכלת חייב להיות כחול או קרוב לכחול.

ההבחנה בין תכלת לקלא אילן

לגבי ההבחנה בין תכלת לבין קלא אילן כתוב בגמרא:

"תכלת אין לה בדיקה? והא רב יצחק בריה דרב יהודה בדיק ליה: מייתי מגביא גילא ומיא דשכלילתא ומימי רגלים בן ארבעים יום ותרי לה בגווייהו מאורתא ועד לצפרא – איפרד חזותיה פסולה, לא איפרד חזותיה כשרה."³⁴

לפי הדעה הראשונה לא ניתן להבחין ביניהם והדעה השנייה סבורה שניתן להבחין. הבדיקה דומה לירות תסיסה: לוקחים אלום ($(\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2)$), מיץ תלתן ושמן תוסס, ומכניסים את הצמר הצבוע לתוך התמיסה. אם הצבע דועך זהו קלא אילן. כרי שבדיקה כזאת תעבור, צורת פעולת הצביעה בקלא אילן צריכה להיות שונה מהותית מזאת של תכלת אמיתית.

במאמרים הנזכרים לעיל^{16,15} מובאת בדיקה המופיעה ברמב"ם³⁵ ובפירושו רש"י לתלמוד³⁶ שמבדילה בין תכלת לקלא אילן. אם הם מכילים אותם חומרים ולכן זהים מבחינה כימית, אין הגיון שההבחנה הזאת אפשרית. להערכתנו, לפי תוצאות המחקר המפורטות להלן, עלות תהליך הצביעה באינדיגו בעזרת חומרים קדומים דומה למחיר של דם החילוון ולכן לא סביר שטרוהו לצבוע כהוגן עם קלא אילן. יש להניח שטחנו את האינדיגו לאבקה דקה והכינו תרחיף בריכוז גבוה במים ובהם צבעו את הצמר, כמו שהיו עושים במצרים העתיקה לפי המתואר בפפירוס טוקהולם.³⁶ צמר כזה יראה בריוק כמו תכלת כשרה, אלא שחלק מהצבע יורד בעת שפשוף

Z. C. Koren, "Announcing the Discovery of the First Authentic Biblical-Blue Tekhelet from Ancient Israel After a Millennium and a Half of Disappearance", *International Edelstein Color Symposium*, Ramat Gan, February 2011. 30

Н. В. Полосьмак, Л.П. Кундо, Г.Г. Балакина, В.И. Маматюк, В.Г. Васильев, Е.В. Карлова, В.В. Малахов, А.А. Власов, И.Л. Краевская, Л.С. Довлятова, Е.А. Королюк, Е.Г. Царева "Текстиль из «замерзших» могил горного алтая 1у-н1 вв. до н.э. (опыт междисциплинарного исследования)" Новосибирск Издательство Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Россия (2006). 31

Н. В. Полосьмак, Л.Л. Баркова "Костюм и текстиль пазырыкцев алтая (IV-III вв. до н.э.)" Инфолио, Новосибирск, Россия (2005) 32

New York Times, February 28, 2011, p. A7. 33

רמב"ם משנה תורה, הלכות ציצית ב, ה. 34

רש"י על מנחות מד ע"א. 35

E. R. Caley, "The Stockholm Papyrus: An English Translation with brief notes", *J. Chem. Ed.* IV:8 : 979-1002 (1926) 36

וכביסה. אם נכניס את הצמר הצבוע ליורת תסיסה של שתי (המחזור את האינדיגו, כלומר גורם לתנובה כימית להבהרת ותמיסת הצבע) לזמן קצר, הצבע יתמוסס משום שהוא אינו קשור כימית לצמר ולא יחזור לעוצמתו המקודית לאחר ההוצאה מהיורה. לעומת זאת תכלת כשרה תאבד את הצבע בתמיסה אך תחזור לעוצמתה המקודית לאחר ההוצאה מהיורה.

זיהוי החילזון על פי כתבי אריסטו

אריסטו מזדה את מקור הארגמן כ- $\alpha\lambda\omicron\upsilon\pi\rho\gamma\epsilon\zeta$.³⁷ לפי התרגום לאנגלית הוא ה-*Murex*,³⁸ כלומר ארגמונים למיניהם. הספר המקורי של אריסטו לא נמצא, אך העתקות שלו נעשו בגרסאות שונות.³⁹ הספר תורגם לאנגלית לאחר שהארגמן זוהה⁴⁰ כמקור הארגמן והיה ניתן לתאם את התרגום עם דעות קודמות. לכן ספק אם ניתן לסמוך על הזיהוי של אריסטו.

זיהוי החילזון בעידן המודרני

הניסיון הראשון לתרש את התכלת בעידן המודרני היה של האדמו"ר מראדזין (הרב גויון ליינר) בשנת 1888. הוא זיהה את דיונון הרוקחים (*Sepia officinalis*, תרשים 1) כ"חילזון התכלת" והפיק ממנו ציציות כחולות לאלפי חסידיו, אך דעתו לא התקבלה ברבים. הצבע שהתקבל זוהה על ידי הרב הרצוג ככחול פרוסי, אשר נוצר כתוצאה מהחומרים שהוסיפו בתהליך הפקת הצבע ואין מקורו מהדיונון עצמו.^{41-39,26} למרות זאת חסידיו ראדזין וחסידיו ברסלב וגם חלק מתלמידי קרליבך משתמשים בתכלת של ראדזין. הזיהוי השגוי בניסיונו של האדמו"ר מראדזין מוכיח את הצורך בהזירות רבה בחידוש מסורת התכלת.²⁶

הרב הרצוג סיכם את מסקנות שלו, והגיע למסקנה שמקור התכלת הוא חילזון אחר ובשם סגולית (*Janthina*, תרשים 1)²⁶ אף על פי שלא הצליחו לייצר ממנו צבע כחול. סיבה סבירה לטעות היא שהגמרא מזכירה חילזון בצבע דומה לים. הרב הרצוג לא אסף חלזונות בעצמו אלא קיבל אותם אחרי שניקו אותם מהצומח הכחול-ירוק המצפה את החילזון החי בים.⁴⁴ מחקרו נשאר תיאורטי, ולא ידוע אם הוא אי פעם ניסה להפיק צבע מארגמן קהה-קוצים. הארגמן והתכלת באים ממקור דומה. על-סמך ממצאים אשוריים, הגיעו חוקרים למסקנה שגון התכלת הוא כחול ושל הארגמן הוא אדום ושני הצבעים הופקו ממקור דומה.^{42,27} המחקר ההיסטורי, גילה שלושה סוגים של חלזונות ים (תרשים 1) ששימשו להפקת ארגמן: ארגמן חד-קוצים (*Bolinus brandaris*, ידוע גם בשמות *Murex brandaris*, *Murex purple dye murex*)

37 $\text{Aristoteles} \text{ } \Pi\epsilon\rho\iota \text{ } \chi\rho\omicron\mu\alpha\tau\omega\upsilon\upsilon\upsilon$, c. 330 BCE

38 W. S. Hett, "Aristotle minor works", Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 1936.

39 ג. לרנר, "מאמר פחיל תכלת", רפוס חיים קעלטער, ווארשה, פולין, תרמ"ה.

40 ג. לרנר, "מאמר עין התכלת", רפוס ר' מאיר יחיאל האלטער, ורשה, פולין תרנ"ב.

41 I. I. Zideman, "Blue thread of the Tzitzit – was the ancient dye Prussian Blue or Tyrian Purple",

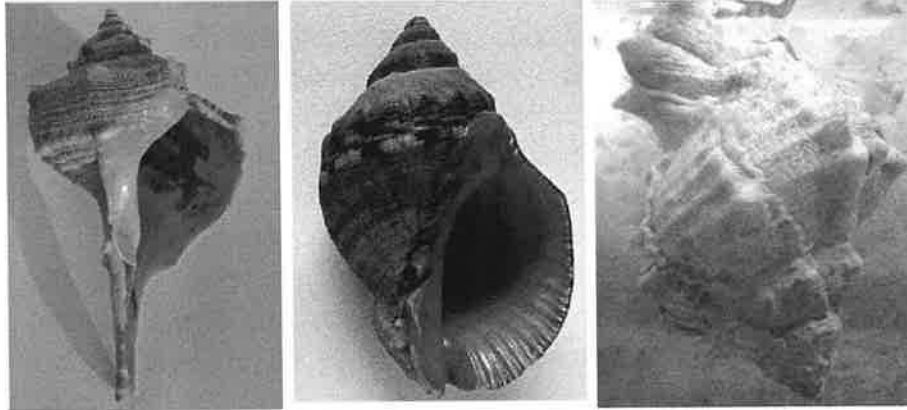
J. Soc. Dyers Colourists, 97, 362-364 (1981)

42 A. Dedekind, "Privatissimum für Purpurforscher", II, 1906.

זיהוי התכלת: ממצאים חדשים

ו-*spiny dye murex*), ארגמון קהה-קוצים (שירוע גם בשמות *Hexaplex*, *Murex trunculus* ו-*banded dye-murex*) וארגמונית אדומת-פה (*Thais trunculus* ששמות *Thais* ו-*haemastoma* ו-*Purpura haemastoma*).⁴⁵⁻⁴³ באיזור צור שבלבנון נמצאו ערימות קונכיות של ארגמון קהה-קוצים לכד וערימות נפרדות של תערובות של ארגמון חר-קוצים וארגמונית אדומת-פה. המסקנה מהפרדה זו היא שארגמון קהה-קוצים היה המקור לתכלת והאחרים ששימשו להפקת ארגמן.⁴⁶

תרשים 1. חיות ים שחשבו שהן מקור התכלת והארגמן



ארגמון חר-קוצים

ארגמונית אדומת-פה

ארגמון קהה-קוצים



דינון הרוקחים



סגולית

- H. de Lacaze-Duthiers and A. Dedekind, "Lettres de Henri de Lacaze-Duthiers: adressees au 43
Alexander Dedekind," Schleicher Freres, Paris, France, 1902
A. Dedekind, "Ein Beitrag zur Purpurkunde" III, 1908 44
W. Born, "Purpura Shell-Fish" *Ciba Rev.*, 1(4), 106-117 (1937) 45
A. Dedekind, "La pourpre verte et sa valeur pour l'interpretation des écrits des anciens" *Arch.* 46
Zool. Exp. Gén., 26, (1898)

אדמת ארץ ישראל כרוכה היא גירית, המגיבה בצורה אלקלינית (בסיסית – ההפך מתומצית) בעוד שחומצות תוקפות בעיקר מתכות, בסיסים או תומרים אלקליניים תוקפים תומרים אורגניים שונים ובכללם צמר). צמר מותקף, ביוזק ונמס בתנאים אלקליניים. אחרי יותר מאלף שנים הצמר נבלע באדמה ונעלם ולכן ארכיאולוגים לא מצאו ציצית צבועה בתכלת כשרה. אמנם במערות בר-כוכבא נמצאו ציציות הצבועות בקלא אילן.⁴⁷

הכימיה

בארגמן קהה-קוצים נמצאים תחילונים (מחוללי ריאקציה) אינדוקסילים מהסוגים הבאים: אינדוקסיל סולפט, S-2-מתילאינדוקסיל סולפט, 6-ברומואינדוקסיל סולפט וכן 2-מתילסולפונט-6-ברומואינדוקסיל סולפט ביחס 2:3:0.5:4.5 (סכמה 1).⁴⁸ כתוצאה מכך כמחצית התחילונים כוללים ברום.⁴⁹ בתגובה עם אנזימים הנמצאים בכלוטה ואוויר הנכנס כאשר פוצעים את הקונכייה, התחילונים עוברים דימריזציה והופכים לתערובת של אינדיגו, 6-ברומואינדיגו ו-6',6'-דיברומואינדיגו (סכמה 2) ביחס 1:2:1. התוצאות בספרות משנת 1950-52 בגלל הבדלים בין החלזונות או בגלל בדיקת שרידי יורת התסיסה. ייתכן שהשינויים בכמות הברום ובצבע בין ארגמני קהה-קוצים נובעים מגורמים שונים כמו גודל, מין, עונה או מקום מוצא.

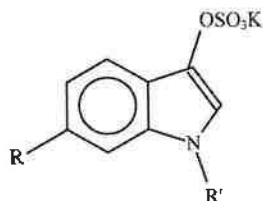
בנוסף מיוצרים קצת אינדירובינים (סכמה 3).⁵³ לעומת זאת, ארגמן חר-קוצים וארגמונית אדומת-פה מכילים ברום כמעט בכל האינדוקסילים ולכן נוצר בעיקר 6',6'-דיברומואינדיגו. הצבע של אינדיגו הוא כחול ושל 6',6'-דיברומואינדיגו הוא סגול. 6-ברומואינדיגו נותן צבע סגול שהופך לכחול לאחר מספר חודשים בטמפרטורת החדר או מיד עם חימום.⁵⁴ בנוסף נמצאים כמיוות קטנות של תומרי צבע אינדירובין⁵⁵⁻⁵⁷ ותרכובות ברומואינדירובין.^{58,59} לאינדירובינים

- 47 י. ירין "החיפוישים אחר בר כוכבא" ע' 84-85, הוצאת ויינפלד וניקולסון, ירושלים, 1971.
- 48 H. Fouquet and H.-J. Bielig, "Biological precursors and genesis of Tyrian-purple", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 10, 816-817 (1971)
- 49 O. Elsner, "Solution of the enigmas of dyeing Tyrian purple and the biblical Tekhelet", *Dyes Hist. Archaeo.* 10, 11-16 (1991)
- 50 C. J. Cooksey, "Tyrian purple: 6,6'-dibromoindigo and related compounds", *Molecules* 6, 736-739 (2001)
- 51 Z. C. Koren, "High-performance liquid chromatographic analysis of an ancient Tyrian purple dyeing vat from Israel", *Isr. J. Chem.*, 35, 117-124 (1995)
- 52 J. Wouters and A. Verheeken, "Composition of Murex dyes", *J. Soc. Dyers Colourists*, 108, 404 (1992)
- 53 Z. C. Koren, "HPLC analysis of the natural scale insect, madder and indigoid dyes", *J. Soc. Dyers Colourists*, 110, 273-277 (1994)
- 54 I. I. Ziderman, "Bathochromic Effect of Heat on 6-Bromoindigo", 22nd Annual Meeting on Dyes in History and Archeology, Riggisberg, Switzerland, Oct. 2003
- 55 Z. C. Koren, "HPLC analysis of the natural scale insect, madder and indigoid dyes", *J. Soc. Dyers Colour.*, 110, 273-277 (1994)

זיהוי התכלת: ממצאים חרשים

צבע ארום, אך בכמויות קטנות תרכובות אלה משפיעות רק מעט על הצבע הכללי.

סכמה 1. מבנה אינדוקסילים, תחילוני התכלת והארגמן שנמצאים בחילוץ



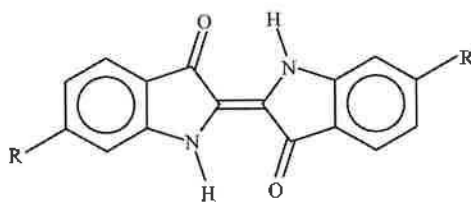
R = R' = H: אינדוקסיל סולפט

R = H, R' = SMe: מתילאינדוקסיל סולפט-S-2

R = Br, R' = H: 6-ברומואינדוקסיל סולפט

R = Br, R' = SO₂Me: 2-מתילסולפונט-6-ברומואינדיגוסולפט

סכמה 2. מבנה האינדיגים



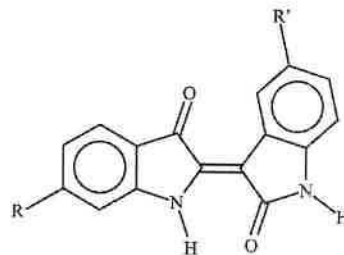
R = R' = H: אינדיגו

R = Br, R' = H: 6-ברומואינדיגו

R = r' = Br: 6,6'-דיברומואינדיגו

- C. J. Cooksey, "Tyrian purple: 6,6'-dibromoindigo and related compounds", *Molecules*, 6, 736-769 (2001) 56
- I. I. Zideman, "Revival of Biblical Tekhelet Dyeing with Banded dye-Murex (Ph. trunculus): Chemical Anomalies", *Dyes Hist. Archaeo.* 16/17 87 (2001) 57
- Z. C. Koren, "Archaeo-chemical analysis of Royal Purple on a Darius I stone jar", *Microchim. Acta.*, 162, 381 (2008) 58
- Z. C. Koren, "A new HPLC-PDA method for the analysis of Tyrian purple components", *Dyes Hist. Archaeo.*, 21 26-35 (2008) 59

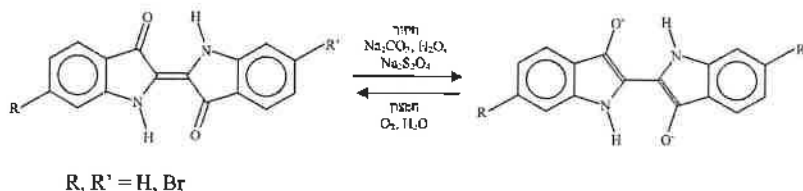
סכמה 3. מבנה האינדירובינים



R = R' = H: אינדירובין;
 R = Br, R' = H: 6-ברומואינדירובין;
 R = H, R' = Br: 6'-ברומואינדירובין;
 R = R' = Br: 6,6-דיברומואינדירובין;

אינדיגו כמעט ולא מתמוסס במים ולכן אינו צובע חזק בתמיסה מימית. כל מתכון איכותי לצביעה באינדיגו מחזור (מוסיף אלקטרונים למולקולה) אותו ללוקואינדיגו, המעבד את הצבע ומתמוסס במים עם תוספת אלקאלי. בתמיסה הוא נקשר טוב לחלבונים בצמד דרך קשרי מימן. כאשר מוציאים את הצמר לאוויר, האינדיגו מתחמצן (נותן אלקטרונים בחזרה לחמצן באוויר) ונותן את הצבע (סכמה 4).

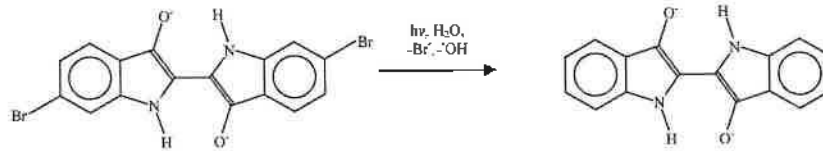
סכמה 4. חיזור אינדיגו ללוקואינדיגו



ברומואינדיגו הוא בגוון סגול ואינדיגו בגוון כחול. לצורך הפקת תכלת, כאשר נמצא הרבה ברומואינדיגו בצבע, יש להוציא את הברום מהמולקולה שבאה מהחילזון, וכך מקבלים גוון כחול במקום סגול. כמצב המחזור, ברומולוקואינדיגו מאבד את אטומי הברום שלו בחשיפה לאור חזק, תהליך שנקרא פוטודיברומינציה (סכמה 5).^{61,60}

- L. A. Driessen, "Über eine charakterische Reaction des antiken Purpurs auf der Faser", *Melliand Textilberichte*, 26, 66 (1944) 60
- J. Van Alphen, "Remarks on the action of light on several substances, most of them containing halogen, in particular several indigo dyes, in a reducing medium", *Rec. Trans Chim. Pays-Bas*, 63, 95-96 (1944) 61

סכמה 5. פוטו־דיברובינציה של 6,6'-דיברומולוקואינירגו



בגלל הבמות המוגבלת של הברום, הצבע המופק מארגמון קהה-קוצים כחול יותר מאשר זה המופק מארגמון חר-קוצים ומארגמונית אדומת-פה⁴⁰ אפילו ללא חשיפה לאור. הגמרא מזהירה אותנו מלהשתמש בקלא אילן ולא מזהירה אותנו משימוש בחילזון אחר, ולכן יש מקום להכשיר תכלת המופקת מכל אחד משלושת המינים, אך יהיה קל יותר לצבוע תכלת מארגמון קהה-קוצים. לכאורה ניתן להפיק תכלת ממינים אחרים כמו *Murex erinaceus*⁴³, *Purpura persica*⁴⁶, *Purpura pansa*⁵⁰ או *Nucella lapillus* (ידוע גם בשם *Purpura lapillus*)⁵⁰ הנמצאים במקומות שונים בעולם, אלא שהם אינם ממלאים את התנאי, שחייבים למצוא אותם בחופי ישראל.

מתכונים לצביעה בירה

ארגמון קהה-קוצים הוא החילזון המתאים ביותר לתיאור בהלכה למקור התכלת, מאחר שבמחקר שארך מעל מאה שנה לא זיהו מין חילזון מתאים יותר. אבל בתהליך המודרני לצביעה משתמשים בנתרן דיתיוניט, חומר שהמציאו רק לפני כ-200 שנה. נותר רק להוכיח שניתן היה להפיק את התכלת מהחילזון בחומרים שהיו ידועים לאבותינו.

השיטה המודרנית לייצור של תכלת מארגמון קהה-קוצים פותחה ב-1985 בשימוש בחומרים מודרניים.^{63,62,49} בשיטה זו ניתן לצבוע תכלת בתוך זמן קצר. לעומת זאת, התהליך הקדום לוקח כמה ימים, כמפורט בהמשך. התהליך המודרני פותח לייצור תעשייתי לציצית ע"י עמותת "פתיל תכלת". הצבע מופיע כשפוצעים את החלזונות מיד אחרי שמוציאים אותם מהים ותכולת בלוטות הצבע חשופה לאוויר.^{65,64} בשיטה התעשייתית⁶⁶ המודרנית משתמשים בדם חילזון מיובש המכיל 5%-10% צבע, חלבון וחומרים אחרים כמו קליפה. לצורך ייצור מנה תעשייתית מחממים ל-70°C תמיסה של 10 ג' נתרן הידרוקסיד ו-20 ג' נתרן דיתיוניט טרי בליטר אחד מים. מוסיפים

- O. Elsner and E. Spanier, "The dyeing with Murex extracts. An unusual dyeing method of wool to the biblical sky blue", 7th International Wool Textile Research Conference, Sept. 1985, Tokyo, Japan 62
- I. I. Ziderman, "Purple dyes made from shellfish in antiquity", *Rev. Prog. Coloration*, 16, 46-53 (1986). 63
- H. Fouquet and H.-J. Bielig, "Biological Precursors and Genesis of Tyrian-Purple", *Angew. Chim. Int. Ed.*, 10, 816-817 (1971). 64
- I. I. Ziderman, "Biblical dyes of animal origin", *Chem. Brit.*, 22, 419-421 (1986). 65
- E. Stein, *private communication*. 66

75 ג' דם חילזון מיובש, מערבבים וממתינים עד שהוא הופך לצהוב בהיר, בערך רבע שעה. בצביעה של צמר בשלב זה יתקבל צבע ארגמן, בגלל נוכחות דיברומואינדיגוים. כדי לקבל תכלת יש לחשוף את התמיסה לקרינה אולטרה-סגולה (שנמצאת באור יום) המוציאה את הברום (סכמה 5).^{61,60} ייתכן שגם בעבר ידעו על השפעת כמות האור מפני שווטרוריוס הזכיר רגישות הצבע לעונות השנה.^{68,67} אך לא ברור אם זה בגלל כמות האור שנכנס ליורה או בגלל שינויים עונתיים בכמות הברום בתוך החילזון.^{69,62} אח"כ חושפים את התמיסה לאור השמש, למשך שעה וחצי לפחות כדי לגרום לדברומינציה (סכמה 5). מוסיפים 70 ג' אמוניום סולפט המשמש כחומר בולם (בופר) ומדללים עם 6 ליטר מים. מעבירים את התמיסה לכלי מיוחד לצביעה. מכניסים פקעת צמר באורך 335 מ' (כ-300 ג' חוט רגיל או 400 ג' חוט עבה) ומזיזים את החוט. כך מקבלים חשיפה אחידה ולאחר שעה מוציאים את החוט לאוויר, שוטפים ומייבשים את הצמר.⁶⁶ ניתן לצבוע כמויות קטנות יותר, אך בכמויות קטנות מאוד, האוויר נכנס לתמיסה, גובר על הדיתיונט ומנוע חיזור. למרות זאת ניתן לחזור כמויות קטנות פי 3000 מהמנה התעשייתית מתחת לאטמוספירה של ארגון.⁷⁰

לפי מתכון אחר⁷¹ לאינדיגו ממיסים 6 ג' נתרן הידרוקסיד ו-9 ג' נתרן דיטיוניט טרי בליטר מים, מחממים לכ-55°C ומוסיפים שתי כפיות אינדיגו טחון דק. לצביעה בתכלת יש להשתמש בכ-110 ג' דם חילזון יבש וטחון במקום אינדיגו. התמיסה אמורה להפוך לצהובה בהירה בתוך זמן קצר, לא יותר משעה. ניתן להוסיף נתרן דיטיוניט אם החיזור אינו מלא.

מחממים לכ-55°C תמיסה שנייה של 2 ג' נתרן הידרוקסיד, 3/4 כפית מתחלב (כמו נוזל כלים) ו-9 ג' נתרן דיתיוניט בכ-20 ליטר מים. לאחר כרבע שעה מוסיפים את התמיסה על ידי טבילה של כלי לתוך כלי כדי לא להוסיף אוויר. יש לערבב קצת ולחכות מעט זמן כדי לוודא שהתמיסה נשארת צהובה.

לצביעה יש להרטיב 450 ג' של צמר (כדי לא להוסיף אוויר), לטבול ולערבב קצת כמו שנוכר לעיל. בגלל שמשמשים בפחות הידרוקסיד אין צורך להוסיף אמוניום סולפט. בשיטה השנייה משתמשים בפהות אלקאלי בלי בופר. מאחר שלא משתמשים בבופר מומלץ למדוד את ה-pH שחייב להיות בין 7.5-9. אם הוא נמוך (תומצי) מדי הלוקואינדיגוים ישקעו ולא יצבעו את הצמר. אם הוא גבוה (אלקאלי) מדי הצמר יינזק. ה-pH המיטבי הוא 8.3.

העובדה שהתהליך התעשייתי משתמש בחומרים כמו נתרן דיתיוניט ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) שלא היו ידועים בעבר מעלה את השאלה איך צבעו את התכלת בימי קדם. תהליך הצביעה מתואר בגמרא:

Vitruvius, "De Architectura", Libra VII, Ch. 13., c 25 BCE. 67

B. Sterman, "The Meaning of Tekhelet", *B' Or Hatorah*, XI, 185-195 (2001). 68

R. J. Huxtable, "The mutability of blue", *Mol. Intervent.*, 1, 141-144 (2001). 69

R. C. Hoffman, R. C. Zilber and R. E. Hoffman, "NMR spectroscopic study of the Murex trunculus dying process", *Magn. Reson. Chem.*, 48, 892-895 (2010) 70

J. N. Liles, "The art and craft of natural dyeing", University of Tennessee Press, Knoxville, TN, USA, 1990 71

"אמר ליה אביי לרב שמואל בר רב יהודה: הא תכילתא היכי צבעיתו לה? אמר ליה: מייחנין דם חלזון וסמנין ורמינן להו ביורה וימרתחנין ליה, ושקלינא פורתא בביעתא וטעמינן להו באורדא, ושדינן ליה לההוא ביעתא וקלינן ליה לאורדא"⁷².

הגמרא מתארת יורת תסיסה שמוסיפים לתוכה חומרים וכוורקים אם הצבע מוכן ע"י טעימה. עתה נסקור את תהליך הפקת תכלת מארגמון קהה-קוצים בלבד בשיטות הקדומות כפי שמתארות בספרות.^{73,62,1} פלייני מתאר את תהליך הכנת הארגמן⁷⁴ שרומה להכנת התכלת. לשיטתו משתמשים בכלוטות של ארגמון חד-קוצים, מוסיפים מלחים ונותנים בכלוטות להירקב שלושה ימים. אחר כך מחממים רחוק מהתנור (כלומר חימום קל) לעשרה ימים. צובעים את הצמר פעמיים למשך חמש שעות כל פעם. פלייני מזכיר שאפשר להשתמש בשני סוגים של ארגמן, דבר שמתאים לתיאוריה שהיו משתמשים בארגמון קהה-קוצים לטבילה הראשונה וארגמון חד-קוצים /או ארגמונית אדומת-פה לטבילה שנייה כדי ליצור ארגמן.

אמנם שיטת הצביעה המוזכרת לעיל אבדה, אך ישנם סוגים נוספים של יורת תסיסה לצביעה באינדיגו שלא אבדו וניתן ללמוד מהם. מתכוני צביעה שהיו ידועים בעבר הרחוק כוללים יורת תסיסה של שתן ושל איסטיס (woad).

ליורת שתן,^{75,71} מחממים כ-8 ליטר שתן לכ-35°C. אחרי יומיים מכניסים כ-20 ג' אינדיגו טבעי טחון דק (שווה לכ-200 ג' דם חילזון) בתוך שקית בר סגורה. פעמיים ביום משפשפים את השקית כדי לשחרר את האינדיגו לתמיסה ואחרי כמה ימים האינדיגו מתחזר ומתמוסס. מרטיבים את הצמר ומכניסים אותו למשך כמה דקות עד יומיים, 10 דקות נותנות ירוק בהיר לעומת זאת ארבע פעמים 12 שעות נותנות כחול כהה. אם הצבע לא מספיק כהה אפשר לחזור על הצביעה. ניתן לחזור ולהשתמש ביורת התסיסה בהוספת שתן ואינדיגו לפי הצורך.⁷¹ מוציאים את הצמר לאוויר, סוחטים ותולים אותו כדי שיתחמצן למשך כ-20 דקות, אחר כך שוטפים עם חומץ דליל ומים. אם יעילות התמיסה יורדת, ניתן להוסיף שורש רוביה, תמרים כדי להאיץ את התמיסה.

ליורת איסטיס,⁷⁶⁻⁷⁸ משרים איסטיס יבש במים למשך כמה שעות ואז מוסיפים אותו לכ-20 ליטר מים בטמפרטורה של 70°C. נותנים לתמיסה להתקרר לכ-48°C, מוסיפים 20 ג' סובין, 35

72 מנחות מב ע"ב.

73 Pliny, *Historia Naturalis*, IX.Ix.125-lxii.135 c 78.

74 Pliny, "Naturalis Hisotiae" Pompeii, Book IX, ch. 62, c. 78 CE

75 I. Grae, "Nature's Colors: Dyes from Plants", Macmillan, New York (1974).

76 A. N. Padden, V. M. Dillon, P. John, J. Edmonds and M. D. Collins, "Clostridium used in mediaeval dyeing", *Nature*, 396, 225 (1998)

77 A. N. Padden, V. M. Dillon, J. Edmonds, M. D. Collins, N. Alvarez and P. John, "An indigo-reducing moderate thermophile from a woad vat, *Clostridium istadis* sp. nov." *Int. J. System. Bacter.*, 49, 1025-1031 (1999)

78 A. N. Padden, P. John, M. D. Collings, R. Hutson and A. R. Hall, "Indigo-reducing *Clostridium* *isatidis* Isolated from a Variety of Sources, including a 10th-Century Viking Dye Vat" *J. Archeo. Sci.*, 27, 953-956 (2000)

ג' נתרן פחמנט, 40 ג' סידן הידרוקסיד, 30 ג' פואת הצבעים יכש ו-20 ג' אינדיגו טבעי טחון דק. אחרי יומיים האינדיגו אמור להתחזר. אם התסיסה פעילה מאוד יש להוסיף כ-5 ג' סידן הידרוקסיד.⁷¹ צובעים את הצמר בצורה דומה ליורת תסיסה של שתן.

הפקת תכלת מיורת תסיסה

התהליך הקרום לצביעת התכלת מבוסס על תסיסה ביוכימית דומה לזו ששימשה לצביעה איכותית באינדיגו (קלא אילן). במקום שתן או איסטיס השתמשו בבשר החילזון ואפר. בעידן המודרני הצליח קורן⁷² להפיק צבע סגול מארגמון קהה-קוצים בשיטה הקדומה של יורת התסיסה וצבע כחול בהוספת בשר *Nucella lapillus* או תערובת של בשר ארגמון קהה-קוצים וארגמון חדר-קוצים.⁸⁰ יש דעות שהצבע הסגול של קורן הוא הארגמון,⁷³ יש דעה שהוא התכלת^{42,26,20} ויש דעה שהוא שלב ראשון לצביעה בארגמן. קורן⁷² סבר שאם חושפים את הנוזל לאור, הצבע יהפוך לתכלת. למרות זאת כבר כמה שנים מנסים לייצר תכלת בתהליך הקרום באמצעות ארגמון קהה-קוצים ורק במחקר המתואר במאמר הנוכחי דווחו תוצאות חיוביות.

התהליך המודרני מהיר ונותן חיזור מלא של הצבע בשניות עד דקות. לעומת זאת בצביעה בשיטה הקדומה ביורת התסיסה חיזור החומר נמשך כמה ימים. ביורת תסיסה של שתן, השתן שומר על סביבה אלקאלינית המעודדת חיידקים אלקאליפיליים (אוהב-אלקאלי) בעיקר *Clostridium istadis*.⁷⁷ יש כמה הבדלים בין תהליכי התסיסה של אינדיגו מהצמח לשל ארגמן מהחילזון.

לפי המתכון של אדמונדס,⁸⁰ מכניסים גרם של דם חילזון מיוכש ובשר של שלושה *Nucella lapillus* או תערובת ארגמון קהה-קוצים וארגמון חדר-קוצים לליטר מים. מוסיפים אלקאלי כדי להגיע ל-pH 9 ומחממים ל-50°C למשך 10 ימים. הוא גילה שחשיפת היורה לאור אינה גורמת לשינוי הגוון, אבל אם מוציאים את הצמר לאור השמש, הצבע כחלק החיצוני של הצמר עובר דברומינציה והופך לכחול ובחלק הפנימי הופך לסגול. הוא גילה גם שצביעה שנייה באותה יורה נותנת גוון כחול אפילו ללא חשיפה לאור, אך הוא לא הסביר את הסיבה לכך. ידוע שדיברומואינדיגו נקשר לצמר, ביתר קלות מאשר לאינדיגו.^{45,14} צביעה שנייה באותה יורה של גוון חדש תיתן צבע כחול יותר מהצביעה הראשונה. השיטה נקראת צביעה הפרשית (differential dyeing).

במתכון של קורן, פוצעים ארגמון קהה-קוצים ומשאירים אותו כמה שעות עד שלושה ימים ליצירת הצבע. מוסיפים מים לשלושה חלזונות עד לנפח כולל של 200 סמ"ק. מוסיפים נתרן פחמנט עד שמגיעים ל-pH 9.0 ומחממים ל-50°C. בעבר השתמשו בבורית שהופקה

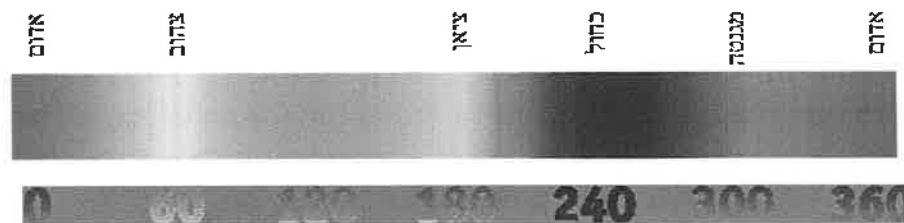
Z. C. Koren, "The First Optimal All-Murex All-Natural Purple Dyeing in the Eastern Mediterranean 79
in a Millenium and a Half", *Dyes. Hist. Archaeo.*, 20, 136-149 (2005)

J. Edmonds, "Tyrian or imperial purple dye", *Hist. Dyes Ser.*, 7 (2002) 80

משריפת אפר עצים. ניתן היה להשתמש בסיד או בנטרון שנמצא בתחתית אגמים יבשים במצרים, אך אפר גוצר מחימום היורה, ולכן סביר להניח שהשתמשו בו.⁸⁰ בעבר היו מעריכים את האלאקליות (רהיגו את ה-pH) לפי תחושה או טעם התמיסה. תמיסה רירית ומרה היא יותר מדי אלקאלית. שיטות אלה מסוכנות. התמיסה מזיקה לעור ומכילה חיידקים שעלולים להיות מסוכנים. כל יום מוסיפים נתון פחמנת כדי להביא את ה-pH ל-9.0. אחרי ארבעה ימים אין שינוי ב-pH והתמיסה ירוקה. מכניסים גרם של צמר למשך ארבע שעות ומוציאים לאוויר ליומיים להתחמצן ולהתייבש. אחר כך שוטפים עם מים והצמר מקבל גוון סגול.⁷⁹ סביר להניח שהחיידק שמבצע את החיזור הוא תרמופיל (אוהב-חום) בנוסף לאלקאלופיל (אוהב-אלקאלי) שדומה ל-*Clostridium istadis*.⁸⁰

הצבע של התכלת אמור להיות דומה לזה של השמים. כדי לבדוק זאת אפשר להשתמש בשיטת מדידת הצבע. הצבע נמדד כמרחב הצבע HSB (גוון-הרוויה-בהירות).⁸¹ הגוון נמדד במעלות כאשר ציאן הוא 180°, כתול הוא 240°, מגנטה הוא 300°, אדום הוא 0° (או 360°) וצהוב הוא 60° (תרשים 2). צביעה בעזרת ריתיונט עם תרכובות אינדיגו סינתטיות (תרשים 3) נותנת את הגוונים הבאים: 203 עבור אינדיגו, 249 עבור 6-מונוברומואינדיגו (233 לאחר חימום, שינוי צבע שידוע מהספרות⁸²) ו-318 עבור 6,6-דיברומואינדיגו. גוון רגימה של תכלת תעשייתית המיוצרת ב-'פתיל תכלת' מארגמון קהה-קוצים הוא 203°, זהה לאינדיגו, כלומר, קצת יותר ציאן מצבע השמים. לשם השוואה, גוון התכלת של ראזין הוא 206°, מאוד דומה לאינדיגו למרות היותו חומר שונה לגמרי. צבע היער עבור תכלת הוא זה של השמים שמשתנים במשך היום. להלכה, לפי רבי יהודה בהקשר לראיית נגעים, בורקים צבעים בשעות זמניות ארבע, חמש, שמונה ותשע.⁸² גוון השמים בשעות אלה הוא בין 208° ל-222° (בין ציאן וכחול). מדידת גוון הצמר באור יום בשעות אלה ומבזק אלקטרוני של מצלמה דומים לדיוק של 2°. לעומת זאת אור פלואורסנטי מסיט את הגוון בכ-15°.

תרשים 2. הזוויות המיחסות לגוונים במרחב צבע HSB



G. H. Joblove and D. Greenberg, "Color spaces for computer graphics", *Comp. Graph.*, 3, 20-25 (1978)

82 משנה נגעים ב.ב.

תרשים 3. צבעי צמר עם אינדיגרים שונים



ביצענו כמה ניסיונות בירות הטיסה עד שהצלחנו לצבוע צמר בתכלת.

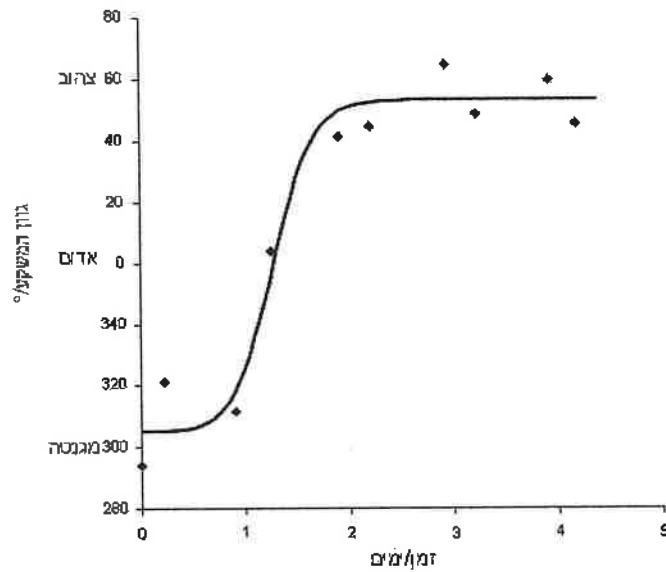
ניסוי 1. הוכנס דם חילוון מיובש (270 מ"ג המכילה כ-10% צבע מעורב בחומרים אחרים כמו בשר תילוזן) לתוך 200 סמ"ק מים בטמפרטורה של 50°C, הוסיפו נתון פחמנת לשמור על pH 9. אחרי ארבעה ימים לא היה כל שינוי וגם לא לאחר הוספת סוכר, ברומה למתכון לירות איסטיס, בניסיון להפעיל תגובה ביולוגית. המסקנה היא שבשר חילוון מיובש אינו מכיל את החיידקים הנדרשים לחיזור.

ניסוי 2. בשר 5 חלזונות (32.0 ג') וכ-15 בלוטות (25.4 ג') הוכנסו למים (250 סמ"ק) בטמפרטורה של 50°C. אחרי יוב הופיע קצת קצף, אחרי יומיים צבע המשקע נחלש (תרשים 4) והקצף נשאר, ואחרי שלושה ימים הצבע הפך לצהוב והקצף נעלם (תרשים 5). שינוי גוון צבע המשקע עם הזמן (תרשים 4) מעיד על תגובה ביוכימית המתחילה לאט ומאיצה עד שהיא מתקרבת לסיום. מאחר שסוגי האינדיגו אינם מתמוססים היטב במים, לא היה שינוי עקבי של גוון המים מעל המשקע. ניסיונות צביעה למשך שעה בדגימות של צמר נתנו צבעים חלשים.

הוציאו את היורה לאור השמש למשך 2 1/2 שעות, ואחרי חמישה ימים מתחילת הניסוי הכניסו גרם של צמר לתמיסה למשך 20 שעות. בחשיפה לאוויר, הצמר קיבל גוון של 328° כלומר צבע סגול (תרשים 6), הגוון יותר אדום מריברומואינדיגו וכנראה מושפע מתרכובות אינדירובין בנוסף לדיברומואינדיגו. המסקנה היא שלא הייתה מספיק חשיפה לשמש והדפנות העבות של כלי הזכוכית הפחיתו את כמות הקרינה (מצאנו שהתמיסה מסריחה כל כך, שמנרף אינו מונע לגמרי מהסירחון להתפשט במעבדה).

זיהוי התכלת: ממצאים חדשים

תרשים 4. גוף המשקע כסונקציה של זמן בניסוי 2. הנתונים מתאימים לסונקציה לוגיסטית המעידה על מעבר בין שני מצבים שונים.



יורת התסיסה צולמה באור פלואורסנטי. הרגמה של דגימה בתמונות שונה כדי שאורך הגל הירוק תהיה 50%.

תרשים 5. יורת תסיסה של דם חילוף מחוזר מניסוי 2

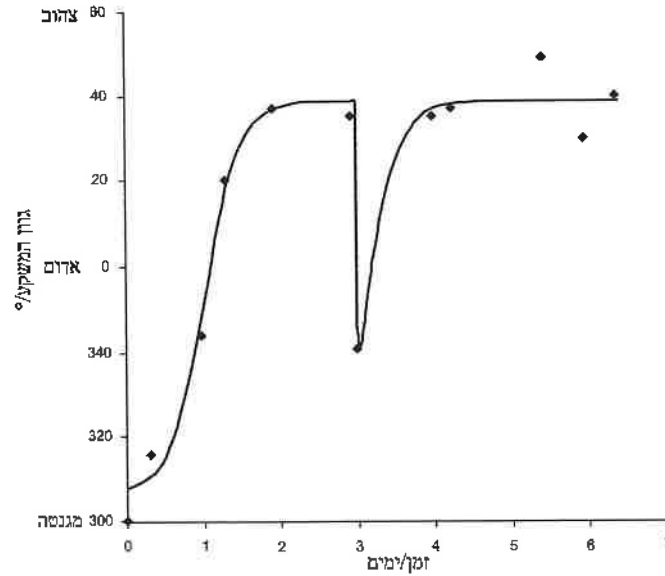


תרשים 6. צמר סגול מניסוי 2



ניסוי 3. בשר 5 חלזונות (36 ג') וכ-15 בלוטות (27 ג') הוכנסו למים (250 סמ"ק) בטמפרטורה של 50°C . חשפו את התערובת לשמש ישירה לפחות 6 שעות ביום. הפעם השתמשו בכוס כימית רגילה עם כיסוי ניילון. הוסיפו חמיסה רוויה של נתרן פחמנת כדי להביא את ה-pH ל-9.0. פעמיים ביום הוסיפו תמיסה של נתרן פחמנת כדי לשמור על רמת ה-pH. אחרי יומיים הצבע של המשקע (תרשים 7) דעך ולתמיסה הירוקה הוכנס גרם של צמר למשך יממה, לאחר הרצאתו לאוויר ושטיפתו הוא קיבל גוון ירוק בהיר מאוד. המסקנה שהוסקה היא שלא התבצע חיזור מלא, דעיכת הצבע אינה מספיקה יצריך להמתין יום נוסף לפחות. ייתכן שדחיית הצבע מטמנת חיזור במצב מוצק של אלקטרון אחד והחיזור באלקטרון השני הוא זה שנותן לצבע להתמוסס. ידוע מניסיונות בתמיסות בתערובות של אצטון ומים שהרדיקל (שמחזור באלקטרון אחד בלבד) אינו צובע צמר.⁷⁰ התערובת מסריחה מאוד ומושכת זבובים.

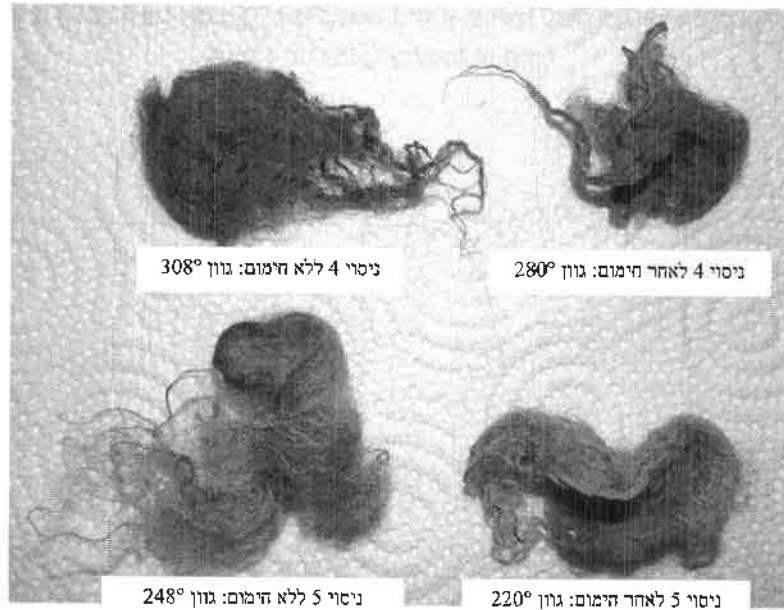
תרשים 7. גוון המשקה כפונקציה של זמן בניסויים 3 ו-4. הנתונים מתאימים לפונקציה לוגיסטית המעידה על מעבר בין שני מצבים שונים: הירידה לאחר 2.9 ימים היא תחילת ניסוי 4 עם הכנסת בלוטות חדשות.



⁸ יורת התסיסה צולמה באור היום מה שמסביר את ההסטה בגוון של כ-15°. ההרגמה בתמונות שונתה כדי שאורך הגל הירוק תהיה 50%.

ניסוי 4. הוסיפו לאותה יורת תסיסה של ניסוי 3 בשר 5 חלונות, כ-15 בלוטות, 200 סמ"ק מים, ותמיסה רוויה של נתרן פחמנת כדי להביא את ה-pH ל-9.0, והמשיכו לשמור על ה-pH עור שלושה ימים. שינוי הצבע היה מהיר יותר (תרשים 7), סביר להניח שזה בגלל כמות מוגברת של חיידקים, והפעם נתנו מספיק זמן לחיזור מלא. הכניסו 0.5 גר' צמר וכשהוציאו אותו הוא היה סגול (תרשים 8). מסקנה: התמיסה כהה מדי בשביל לתת לקרני השמש לגרום לדרומינציה מלאה. החשיפה לשמש השפיעה על גוון הצמר שהיה 308° (קרוב למגנטה) לעומת 328° (קרוב לאדום) בניסיון 2 אבל זה לא מספיק. חימום באדי מים משנה את הגוון ל-280° (בין מגנטה לכחול, להשוואה בין הגוונים ראה טבלה 1 ותרשים 9). נשאר דיברומואינדיגו הממשיך להיות סגול בחימום אבל יש בו מונוברומואינדיגו ששינה צבעו בחימום. ייתכן שצביעה בפחות זמן או צביעה הפרשית^{45,14} יפחיתו את כמות הדיברומואינדיגו שנספג.

תרשים 8. תוצאות הצביעה בניסוי 4 ו-5



טבלה 1. גוזני הצביעה

גוון/°	צביעה	גוון/°	צביעה
206	תכלת של ראדזין	216	שמים
328	ניסוי 2	203	אינדיגו
308	ניסוי 4 ללא חימום	249	6-ברומואינדיגו ללא חימום
280	ניסוי 4 לאחר חימום	233	6-ברומואינדיגו לאחר חימום
248	ניסוי 5 ללא חימום	318	6,6-דיברומואינדיגו
220	ניסוי 5 לאחר חימום	203	תכלת תעשייתית מ-'פתיל תכלת'

תרשים 9. מיקום גונוי הצביעה על מעגל הצבע



ניסוי 5. הכניסו עוד 0.5 גר' צמר למשך 14 דקות, הוא יצא כחול אך לאט לאט הפך לגוון 248° (תרשים 8), קרוב לכחול עם קצת סגול, אחרי שטיפה וחימום באדי מים (קיטור) הצמר הפך לגוון 220° בין כחול וציאן. תרשים 10 מראה השוואה בין הצמר, צמר תכלת חששיתית (גוון 203°) והשמים. בכריקה בעין, הצבע דומה לשמים כדי להיחשב כפתיל תכלת כשר.^{83,82} המסקנות: כדי לצבוע תכלת צריך להפחית את זמן הצביעה או/להשתמש בצביעה הפרשית בגלל שהיה שינוי גוון בין ניסיונות 2 ו-4, ייתכן שחשיפה לשמש למשך כשלושה שבועות הייתה גורמת למספיק דברומינציה ביורה של חצי ליטר, כדי לתת גוון תכלת לאחר חימום, אבל תהליך ארוך כל כך היה מייקר את הצביעה ללא צורך והסיכוי שיוורת התסיסה יתחמצן מתגבר. בנוסף, ביורה תעשייתית גדולה שלושה שבועות לא היו מספיקים לדברומינציה. לכן צביעה הפרשית יותר סבירה וייתכן שהיו לוקחים את הצבע הסגול לטבילה נוספת ביורה של ארגמון חד-קוצים או ארגמונית אדומת-פה כדי לייצר ארגמן. אם הצמר עדיין הופך לסגול מפני שהוא מכיל מונוברומואינדיגו יש לחמם אותו. השינוי בצבע שהופך מסגול לכחול בחימום הוא תוצאה של הימצאות מונוברומואינדיגו.⁸⁴ לאור זה סביר להניח שצבע התכלת מכיל מונוברומואינדיגו והיו מחממים אותו כדי לקבל צבע כחול יציב.

יש רעות שהשימוש בטבילה שנייה פוסל את התכלת⁸⁵ אבל יש דיווחים שחילוונות קהה-קוצים צעירים, כלומר קטנים, מכילים פחות ברומואינדיגו וניתן לצבוע בצבע כחול מהם בטבילה ראשונה.⁸⁵

83 הרב נ. א. רבינוביץ, <http://ybm.org.il/Hebrew/Article.aspx?item=2920>.

84 תוספות ו"ה "משום שנאמר כליל תכלת" על מנחות מ"ב ע"ב.

85 I. I. Ziederman, tekheletfoundation.com/en/tekheletfoundation.php based on private communications from J. Edmonds and I. B. Kanold.

תרשים 10. השוואת צבע הצמר עם צבע השמים



מסקנות

הוכח שניתן לקבל צבע כחול בצביעה בדם חילזון מארגמון קהה-קוצים בשיטה קדומה ללא צורך לחשוף את התהליך לאור וגם שהחשיפה לאור אינה יעילה מחמת כהות היורה. הרב נחום רבינוביץ' קבע: "זה לא 100% הוכחה שזה התכלת, אבל יותר מזה לא ניתן להוכיח ... לפי זה נמצא שהצבע של התכלת ... הוא הכי קרוב שנוכל להגיע."⁸³ איך אימות הזיהוי של התכלת משנה את ההלכה? לדעת מי שאומר שחייבים להשתמש בתכלת כאשר התכלת מצויה, עכשיו יש להשתמש בתכלת. לדעת מי שאומר שזה רק הידור, מותר להשתמש בו. לדעת מי שעדיין לא בטוח שמצאנו את התכלת, השימוש בו אסור משום "יזהרא" (גאווה) וכמו שהגמרא מציינת בקשר לתולה קלא אילן בבגדו ואומר תכלת היא? ולפי דעה זו אסור ללבוש תכלת מעל הבגדים ולא בטלית גדול שמא יתגאה שהוא יותר טוב מהאחרים גם אם התכלת אמיתית.¹²

קיימים הרבה ממצאים שמצביעים על החילזון כארגמון קהה-קוצים כמקור התכלת. למרות מעל מאה שנות מחקר לא מצאו 'חילזון' מתאים יותר לתיאורים של חז"ל. מי שעדיין מתנגד לזיהוי אינו מציע תחליף. לכן, לפניית דעתי, הגילוי מחדש של תהליך יורת התסיסה שרווח במאמר זה, מחזק את הטענה שמצאנו את החילזון ושגילינו את התכלת מחדש. התורה מצווה אותנו להטיל תכלת בציצית לכן עלינו לעשות זאת, אין כאן גאווה אסורה, מאחר שיש כאן קיום של צויר ישיר מהתורה כמו כל מצווה אחרת.