

זיהוי התכלת: ממצאים חדשים

מאת רוי עמנואל הופמן

המכון לכימיה, קמפוס אדמונד י. ספרא, האוניברסיטה העברית בירושלים, ירושלים 91904.
טל' 026585327, פקס 026585084, דוא"ל royh63@gmail.com

The identity of *teckelet* (Biblical blue dye): New findings

by Roy Emanuel Hoffman

*Institute of Chemistry, Edmond J. Safra Campus, Givat Ram, The Hebrew
University of Jerusalem, Jerusalem 91904. Tel. 026585327, Fax 026585084,
Email royh63@gmail.com*

תקציר

הסוד של צבע התכלת אבד לפני זמן רב. ניסיוניות בעבר לגלות אותו מחדש הובילו לטעויות ולכן הסמכויות הרבניות זהירות מאוד לקבל את חידוש התכלת. במאמר זה דווח על ממצאים חדשים שמפריכים את ההתנגדות העיקרית שנותרה. ההתנגדות היא שתהליך הצביעה לא שוחזר ללא חומרים כימיים מודרניים, שלא ידעו אבותינו. במאמר זה מפורט תהליך הצביעה בשימוש בחומרים ידועים לאבותינו והשווה לשיטות צביעה דומות. והצבע שיוצר נותח והשווה לדברי חז"ל, כתבות עתיקות וממצאים ארכאולוגיים. דנים בהשלכות ההלכתיות של הממצאים החדשים המדווחים כאן.

Abstract

The secret of the *teckhelet* (Biblical blue) dye was lost long ago. Attempts to rediscover it have led to mistakes in the past so religious authorities are very wary of accepting its reintroduction. In this work new findings are reported that resolve the remaining major objection. The objection being that the dying process had not been reliably reproduced without resorting to modern chemicals, unknown in ancient times. A description is given of the dying process using chemicals used in ancient times and comparisons are made with similar dying techniques. The resulting color is analyzed and compared with ancient writings and archaeological artifacts. The ramifications for religious law of the new findings reported here are discussed.

השיבות חידוש התכלת

בזמן הבית השתמשו בצבע התכלת לא רק לציצית אלא גם לבגדי כהונה ובדים ויריעות בבית המקדש. בתלמוד מובא שהתכלת מופקת מדם חלזון.¹ הרב הרצוג טוען שייצור התכלת נפסק לאחר כיבוש חוף הארץ בידי ערבים בשנת 638 אחה"ס, הוא מגיע למסקנה זאת מאחר ששימוש בתכלת מוזכר בתלמוד שנכתב לפני כן, בעוד שבמדרש תנחומא (שנכתב בשנת 850 אחה"ס, בערך) לא נזכר ייצור התכלת.^{2,3}

בלי התכלת המשכנו לקיים את מצוות הציצית עם חוטים לבנים בלבד, התכלת חסרה לנו מעל אלף שנה מה שמקשה על חידושה. הצבעים שמרו את מתכונתם בסוד והמסורת של הצביעה בתכלת אבדה. בדרך כלל לא מחדשים מסורת, לדוגמה: בכשרות החגב לאכילה, חוץ מיהודי תימן, המסורת אבדה ולמרות שכל הסימנים כתובים בתורה, אנחנו לא בקיאים בסוגי החגבים הכשרים ולכן אנו לא אוכלים חגבים.⁴ לעומת זאת לגבי דגים אנחנו סומכים רק על הסימנים. כאשר גילו את תרנגול ההודו באמריקה עלה השאלה בכשרותו, למרות שהיה לו כל הסימנים, משום שלא היה מסורת. בתחילה פשטו השמועה שמקורו בהודו לכן שאלו את יהודי הודו האם הם אוכלים תרנגולות. מאחר שהיהודים אוכלים תרנגולות הכשירו את תרנגול ההודו. כעבור שנים רבים התגלה הטעות אך הרבנים אמרו שמאחר שכבר חודש מסורת, זה כשר. מכאן אנחנו רואים שיש מצוות שמחייבות מסורת, יש מצוות שאינן מחייבות מסורת ויש מקרים שבהם ניתן לחדש מסורת. מאחר שהתכלת נגנזה, אבדה המסורת של הכנתה ויש אומרים שהיא התגלה לקראת ביאת המשיח, התכלת היא בוודאות מסוג המסורת שניתן לחדש ולכן רבים פעלו לגילוי התכלת מחדש.

כמפורט להלן, ארגמון קהה הקוצים הוא החילזון המתאים ביותר לתיאור מקור התכלת, לפי דעות רבות התכלת שמופקת ממנו כשרה.⁵ אמנם מאחר שפסקה המסורת, זיהוי התכלת מבוסס על ראיות נסיבתיות ותהליך הייצור המודרני משתמש בחומרים כימיים חדישים שלא ידעו אבותינו. לכן קיים חשד שלא היו מסוגלים להפיק תכלת מארגמון קהה הקוצים בתקופה העתיקה וכתוצאה מכך יש שלא ממליצים להשתמש בתכלת.⁶ מאמר זה בא להשלים את התמונה על ידי ייצור תכלת בשיטה קדומה שמופק מארגמון קהה קוצים ללא בשר בעלי חיים נוספים וללא חומרים חדישים, שיטה שנקראה יורת תסיסה.⁶

מידת החיוב להטיל פתיל תכלת

במאמר של הרב אריאל⁵ דנים בשאלה: כשהתכלת מצויה, האם התכלת היא חובה או שמא היא רק הידור מצווה? להלכה נפסק שהתכלת אינה פוסלת את הלבן אלא שנטען כי כאשר יש ציצית צבועה בתכלת חייבים

להשתמש בה. בניגוד לכך יש הטוענים כי תמיד ניתן לקיים את המצווה בלבן ואפילו יש טוענים שהתכלת היא רק הידור מצווה, אף על פי שכתוב במפורש בתורה⁷ שיש להטיל פתיל תכלת. הרב אריאל דוחה את הטענה ופוסק שחובה ללבוש תכלת אפילו אם זיהויו בספק.⁵

אם יש טעות בצבע האם זה פוסל את מצוות הציצית לגמרי? יש חילוקי דעות מאחר שהתלמוד מזוהר אותנו נגד שימוש בקלא אילן שמזוהה עם אינדיגו מהצומח. אם ציצית צבועה בקלא אילן פסולה יש שסוברים שציציות צבועות בצבע אחר פסולות. ייתכן שצביעה בצבע ממקור שגוי גם פוסלת את הציצית, לעומת זאת יש הסוברים שציצית צבועה בכל צבע פרט לתכלת נחשבה כציצית לבנה כשרה. לפי דעת הרב אריאל⁵ יש להטיל פתיל תכלת אפילו אם זיהויו בספק. שאלה מתעוררת לגבי התכלת של רדז'ין ולגבי כל צבע כחול סינטי (כפי שנהוג אצל הקראים): אין היא קלא אילן הנזכר בתלמוד כתכלת מזויפת ואף אינה התכלת האמיתית. האם ניתן להחשיב גוון כחול כזה כצבע סתם, כמו הלבן, או שהוא נחשב לתכלת מזויפת? אם לא ניכר ההבדל בין גוון כחול זה לבין התכלת האמיתית, ובמיוחד אם אדם לובש ציצית צבוע בכחול כזה ביודעין וטוען שזו התכלת האמיתית, אזי הוא עובר על העברה של הגאווה שמוזכרת בגמרא.¹³

גם אם זיהויו התכלת נכון, עדיין יש לשאול: כמה חוטים 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;⁸ לדעת הראב"ד ואחרים, יש לצבוע חוט שלם, כלומר שני פתילים מתוך השמונה; ולדעת רש"י, יש לצבוע ארבע חוטים מתוך שמונה.⁹ לכאורה, אם נצבע יותר מדי פתילים נעבור על "בל תוסיף",¹⁰ ואם נצבע מעט מדי פתילים נעבור על "בל תגרע". ואולם, הואיל וכתוב שניתן לקיים את מצוות ציצית בין בלבן ובין אם הם צבועים בתכלת, לכן גם אם נצבעו כל שמונת פתילי הציצית בתכלת, הציצית מותרת. לפי זה, מספר הפתילים הצבועים אינו משנה לגבי קיום המצווה ואין עבירה לא על "בל תוסיף" ולא אל "בל תגרע", לכן כל השיטות כשרות. קיימות דעות רבות במספר הכריכות והקשרים אך הכריכות והקשרים לא מעקבים.³

מקורות לזיהוי החילזון

התכלת חייבת להתאים לסימנים שמובאים בהלכה אבל היא לא חייבת להתאים לכל מדרש או אגדה שבא להאיר על דבר אחר ולא בא לפסוק הלכה.¹¹ לכל הפחות החילזון חייב להתאים לתיאור בגמרא "חלזון זה גופו דומה לים ובריותו דומה לדג ועולה אחד לשבעים שנה ובדמו צובעין תכלת לפיכך דמיו יקרים"¹¹ בארבע מאמרים^{14-12,7} דנו באריכות במידת ההתאמה של חלזונות שונים לתיאור זה ולתיאורים אחרים במקורות. במאמרים דנו בשאלה האם החילזון חייב להיות דומה לים או לקרקעית הים, האם גופו או ציפוי קליפתו חייב להיות דומה לים. צבע החילזון דומה לים או לרקיע¹⁵ כאשר הוא נמצא חי בטבע מאחר שקליפתו מצופה בצמח ירוק-כחול. ההגדרה של דג בלשון הגמרא מתייחסת לבעל חיים שחי במים. לכן החילזון לא חייב להיות דומה לדג לפי ההגדרה המודרנית אלא רק להראות כמו בעל חיים רגיל בים. עלייתו מהים פעם בשבעים שנה (ויש גורסים "שבע שנה"¹¹) מתייחס לעובדה שהוא נמצא בקרקעית או על קרקעית הים ומאוד נדיר שהוא עולה חי מהים. לכן תיאורו מתאים לארגמון קהה הקוצים.^{16,3,7}

קלא אילן

קלא אילן¹⁷ הוא צבע המזוהה עם אינדיגו המופק מן הצומח¹⁸ ומכיל גם מעט מן התרכובת הנקראת אינדירובין (ראה להלן – סכמה 3). ניתן לייצר אינדיגו מכמה צמחים אך הנפוץ ביותר בתעשייה הוא *Indigofera tinctora* והוא נקרא קלא אילן. בתהליך ההכנה משרים את העלים במים פושרים ונותנים לתערובת לתסוס למשך כ-14 שעות. אחר מכן מחדירים אוויר לתערובת על ידי ערבוב חזק. האינדיגו שוקע ומוכן אז לשימוש לצביעה.¹⁹ קלא אילן נראה כמו תכלת והשתמשו בו כתחליף זול לתכלת. אומנם נפסק שקלא אילן פסול למצוות התכלת. "אני הוא שעתידי ליפרע ממי ... שתולה קלא אילן בבגדו ואומר תכלת הוא"¹³ זאת אומרת שמי שמכריז שקלא אילן הוא תכלת הוא שקרן. ועוד מובא "גזירה משום קלא אילן ולא יהא אלא לבן"²⁰ כלומר, מי שמתמשש בקלא אילן, כאילו שהוא לובש רק לבן ויש מחלוקת האם עוברים על איסור שעטנז בציצית צמר של קלא אילן על בגד פשתן.

גוון התכלת

צבע התכלת דומה לרקיע²¹ כלומר קרוב לכחול. לפי הגמרא "ר' מאיר אומר מה נשתנה תכלת מכל מיני צבעונין מפני שהתכלת דומה לים וים דומה לרקיע ורקיע לכסא הכבוד."²² לכאורה, הגוון הכחול לא מתאים לתרגומים היהודיים של התנ"ך ליוונית, כי המילה "תכלת" תורגמה כ-"הייקינתוס" (θακυθος) שהוא גוון יותר קרוב לסגול מאשר כחול.^{24,23} לכן יש דעה שהתכלת היא סגולה^{12,25} דעה זו יש להפריך בנימוקים הבאים: (1) גוון סגול אוני 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.²⁶

בתוך שכבת קפאת-עד בסיביר בקבר פזיריק התגלתה חתיכת בד ארגמן מקושטת מסביב בבד כחול. מקור הבד מפרס מלפני כ-2400 שנה. לפי בדיקה כימית כרומטוגרפיה (שאמינותו שנוי במחלוקת²⁷), שהצבע מכיל אינדיגו ותרכובות ברומואינדיגו, ומאחר שברומואינדיגו מופיע בטבע רק בחילוונות ים, מדובר בבד ארגמן ותכלת.^{29,28} הרי אינדיגו מהצמח אינו מכיל ברומואינדיגו לכן נוכחות ברומואינדיגה מעיד שמקור הצבע הוא מחילוון. לאחרונה מצאו עריג קטן מאוד של תכלת על בד במצדה מתקופת הורדוס.^{30,23} הגוון שלו קרוב לכחול אך קצת סגול. אם הממצאים באמת תכלת אזי צבע התכלת חייב להיות כחול או קרוב לכחול.

ההבדלה בין תכלת לקלא אילן

לגבי ההבדלה בין תכלת לבין קלא אילן כתוב בגמרא²² "ותכלת אין לה בדיקה והא רב יצחק בריה דרב יהודה בדיק ליה מייתי מגביא גילא ומיא דשבלילתא ומימי רגלים בן ארבעים יום ותרי לה בגווייהו מאורתא ועד לצפרא איפרד חזותיה פסולה לא איפרד חזותיה כשרה." יש שתי דעות, האחת שאי אפשר לבדוק והאחת שאפשר לבדוק. הבדיקה דומה לזו של תסיסה. לוקחים אלום $(\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2)$, מיץ תלתן ושתן תוסס. מכניסים את הצמר הצבוע ואם הצבע דועך אזי הוא קלא אילן. כדי שבדיקה כזו יבדיל, ייתכן שמדובר בתהליכים שונים של צביעה בקלא אילן ותכלת אמיתית.

מובא במאמרים הנזכרים לעיל^{8,7} בדיקה שמופיעה בפירושו של הרמב"ם³¹ ושל רש"י על התלמוד³² שמבדילה בין תכלת לקלא אילן אם הם אותו הדבר אין הגיון שההבחנה הזאת אפשרית. להערכתך, לפי תוצאות המחקר המפורסות להלן, עלות תהליך הצביעה בעזרת חומרים קדומים דומה למחיר של דם החילוון ולכן לא סביר שטרחו לצבוע כהוגן עם קלא אילן. יש להניח שטחנו את האינדיגו לאבקה דקה והכינו תרחיף בריכוז גבוה במים ובם צבעו את הצמר כמו שהיו עושים במצריים העתיקה לפי המתואר הפפירוס סטוקהולם.³³ צמר כזה יראה בדיוק כמו תכלת כשרה, אלה שחלק מהצבע ירד בעת שפשוף וכביסה. אם יכניס את הצמר הצבוע לזרחה תסיסה של שתן (שמחזר את אינדיגו, כלומר גורם לתגובה כימית להבהרת ותמיסת הצבע) לזמן קצר הצבע יתמוסס משום שהוא לא קשור כימית לצמר ולא יחזור לעוצמתו המקורית לאחר ההוצאה מהיורה. לעומת זאת תכלת כשרה תאבד את הצבע בתמיסה אך תחזור לעוצמתה המקורית לאחר ההוצאה מהיורה.

זיהוי החילוון על-סמך כתבי אריסטו

אריסטו מזהה את מקור הארגמן כ-*αλουργες*³⁴ לפי התרגום לאנגלית הוא ה-*Murex*³⁵, כלומר ארגמונים למיניהם. הספר המקורי לא נמצא, אך העתקות שלו נעשו בגרסאות שונות.²⁹ בנוסף לכך הספר תורגם לאנגלית לאחר שהארגמן זוהה³⁴ כמקור הארגמן. לכן ספק אם ניתן לסמוך על הזיהוי של אריסטו.

זיהוי החילוון בעידן המודרני

הניסיון הראשון לחדש את התכלת בעידן המודרנית היה של האדמו"ר מרדז'ין (הרב גרשון לרנר) בשנת 1888. הוא זיהה את דיונון הרוקחים (*Sepia officinalis*, תרשים 1) כ"חלזון" והפיק ממנו ציניות כחולות לאלפי חסידיו, אך דעתו לא התקבלה ברבים. הצבע זוהה על ידי הרצוג ככחול פרוסי, אשר נוצר כתוצאה מהחומרים שהוסיפו בתהליך הפקת הצבע ואין מקורו מהדיונון עצמו.^{38-36,19} למרות זאת חסידי רדז'ין וחסידיו ברסלב וגם חלק מתלמידי קרליבך משתמשים בתכלת של רדז'ין. הזיהוי השגוי בניסיונו של האדמו"ר מרדז'ין מוכיח את הצורך בהירות רבה בחידוש מסורת התכלת.³⁰

הארגמן והתכלת באים ממקור דומה. על-סמך ממצאים אֶשוריים, הגיעו למסקנה שלתכלת הוא גוון כחול וארגמן הוא גוון אדום ושני הצבעים הופקו ממקור דומה.^{39,20} לפי מחקר היסטורי, גילו שלושה סוגים של חלזונות ים (תרשים 1) ששימשו להפקת ארגמן: ארגמן חד קוצים (*Bolinus brandaris* ידוע גם בשמות *Murex brandaris*, purple dye murex ו-spiny dye murex), ארגמן קהה קוצים (שידוע גם בשמות *Murex trunculus*, *Hexaplex trunculus* ו-banded dye-murex) וארגמונית אדומת פה (שידועה גם בשמות *Thais haemastoma* ו-*Purpura haemastoma*).⁴²⁻⁴⁰ נמצאו בצור, לבנון ערימות של קונכיות של ארגמן קהה קוצים לבד וערימות נפרדות של תערובות של ארגמן חד קוצים וארגמונית אדומת פה. לפני יותר ממאה שנה הגיעו למסקנה שארגמן קהה קוצים היה המקור לתכלת מאחר שבאתר ארכיאולוגי בצור גילו שהפרידו בין ארגמן קהה קוצים והחלזונות האחרים ששימשו להפקת ארגמן.⁴³

תרשים 1. חיות ים שחשבו שהם מקור התכלת והארגמן.
ארגמון קהה קוצים



סגולית



ארגמונית אדומת פה



דיונון הרוקחים



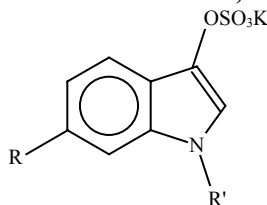
אדמת ארץ ישראל היא ברובה גירית, המגיבה בצורה אלקלינית (הפוכה לחומצית); בעוד שחומצות תוקפות בעיקר מתכות, בסיסים או חומרים אלקליניים תוקפים חומרים אורגניים שונים ובכללם צמר). צמר מותקף, ניזוק ונמס בתנאים אלקליניים. לכן אחרי יותר מאלף שנים הצמר נבלע באדמה ונאלם. כתוצאה מכך ארכיאולוגים לא מצאו ציצית מתכלת כשרה. במערות בר-כוכב בלבד מצאו ציציות הצבועות בקלא אילן.⁴⁴

הכימיה

בארגמן קהה הקוצים נמצאים תחילונים (מחוללי ריאקציה) אינוקסילים מהסוגים הבאים: אינוקסיל סולפט, S-2-מתילאינדוקסיל סולפט, 6-ברומואינדוקסיל סולפט ו-2-מתילסולפונט-6-ברומואינדוקסיל סולפט ביחס 4.5:0.5:3:2 (סכמה 1).⁴⁵ כתוצאה מכך כמחצית התחילונים כוללים ברומ.⁴⁶ בתגובה עם אנזימים שנמצאים בבלוטה ואוויר כאשר פוצעים את הקונכייה הם עוברים דימריזציה והופכים לתערובת של אינדיגו, 6-ברומואינדיגו ו-6',6-דיברומואינדיגו (סכמה 2) ביחס 1:2:1, אולם התוצאות בספרות משתנות⁴⁷⁻⁴⁹ בגלל הבדלים בין החלזונות או מבדיקת שרידי יורת תסיסה. ייתכן שהשיניים בכמות הברום וכתוצאה מכך הצבע בין ארגמוני קהה קוצים נובעים מגורמים שונים כמו גודל, מין, עונה או מקום מוצא.

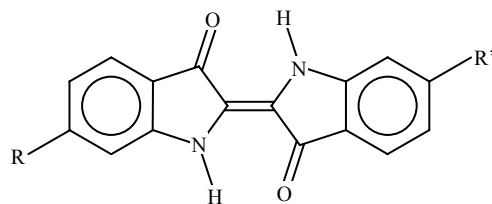
בנוסף מיוצרים קצת אינדירובינים (סכמה 3).⁵⁰ לעומת זאת, ארגמן חד קוצים וארגמונית אדומת פה מכילים ברומ כמעט בכל האינדוקסילים ולכן נוצר בעיקר 6',6-דיברומואינדיגו. הצבע של אינדיגו הוא כחול ושל 6',6-דיברומואינדיגו הוא סגול. 6-ברומואינדיגו נותן צבע סגול שהופך לכחול לאחר מספר חודשים בטמפרטורת החדר או מיד עם חימום.⁵¹ בנוסף נמצאים כמויות קטנות של חומרי צבע אינדירובין⁵²⁻⁵⁴ ותרבות ברומואינדירובין.^{55,56} לאינדירובינים צבע אדום אך בכמויות קטנות תרכובות אלא רק משפיעים קצת על הצבע הכללי.

סכמה 1. מבנה אינדוקסילים, תחילוני התכלת והארגמן שנמצאים בחילזון.



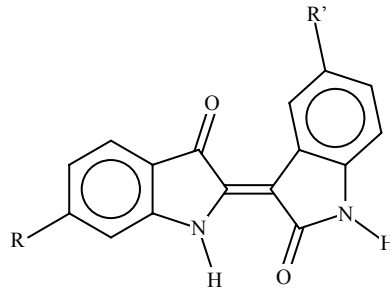
R = R' = H: אינוקסיל סולפט
 R = H, R' = SMe: S-2-מתילאינדוקסיל סולפט
 R = Br, R' = H: 6-ברומואינדוקסיל סולפט
 R = Br, R' = SO₂Me: 2-מתילסולפונט-6-ברומואינדוקסיל סולפט

סכמה 2. מבנה האינדיגוים



R = R' = H: אינדיגו
 R = Br, R' = H: 6-ברומואינדיגו
 R = R' = Br: 6',6-דיברומואינדיגו

סכמה 3. מבנה האינדירובינים



אינדירובין: $R = R' = H$

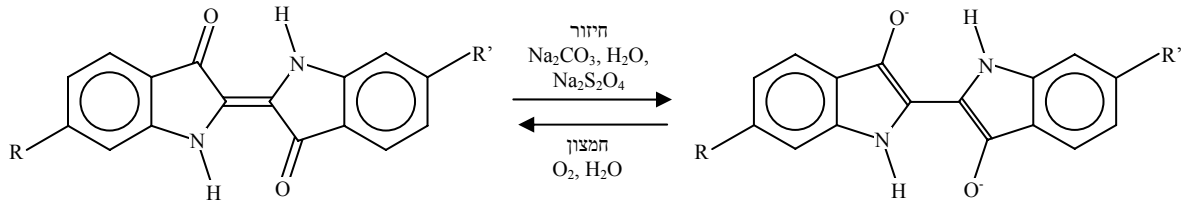
6-ברומואינדירובין: $R = Br, R' = H$

6'-ברומואינדירובין: $R = H, R' = Br$

6,6'-דיברומואינדירובין: $R = R' = Br$

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

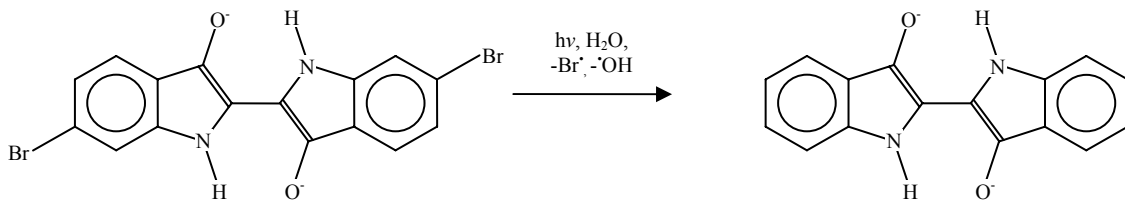
סכמה 4. חיזור אינדיגו ללוקואינדיגו



$R, R' = H, Br$

ברומואינדיגו הוא בצבע סגול ואינדיגו בצבע כחול. לצורך תכלת מבקשים להוציא את הברום מהמולקולה שבאה מהחילזון כך שמקבלים צבע כחול במקום סגול. במצב המחזור ברומולוקואינדיגו מאבד את אטומי הברום שלו בחשיפה לאור חזק, תהליך שנקרא פטודיברומינציה (סכמה 5).^{58,57}

סכמה 5. פטודיברומינציה של 6,6'-דיברומולוקואינדיגו



כתוצאה מהכמות המוגבלת של הברום, הצבע שמופק מארגמון קהה הקוצים יותר כחולה מאשר מופק מארגמון חד הקוצים ומארגמונית אדומת הפה³⁰ אפילו ללא חשיפה לאור. בכל זאת הגמרא מזהירה אותנו מלהשתמש בקלא אילן ולא מחילזון אחר, לכן יש מקום להכשיר תכלת שמופקת מכל אחד משלושת המינים אך יהיה קל יותר לצבוע תכלת מארגמון קהה קוצים. לכאורה ניתן להפיק תכלת ממינים אחרים כמו *Purpura persica*³⁴, *Murex erinaceus*⁴², *Purpura pansa*⁴⁴ או *Nucella lapillus* (ידוע גם בשם *Purpura lapillus*)⁴⁴ שנמצאים במקומות אחרים בעולם אלה שהם לא ממלאים את התנאי שחייבים למצוא אותם בחופי ישראל.

הרצוג בדוקטורט שלו סיכם את מסכנות מחקרו, אך הגיע למסקנה שמקור התכלת הוא חלזון אחר בשם סגולית (Janthina, תרשים 1)³⁰ למרות שלא הצליחו לייצר צבע כחול ממנו. סיבה סבירה לטעות היא שהגמרא מזכירה חלזון בצבע דומה לים. הרצוג לא אסף חלזונות בעצמו אלא קבל אותם אחרי שניקו אותם מהצומח הכחול-ירוק שמצפה את החלזון החי בים.³ מחקרו נשאר תיאורטי ולא ידוע אם הוא אי פעם ניסה להפיק צבע מחלזון קהה הקוצים.

מתכונים לצביעה בירה

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

השיטה המודרנית לייצור של תכלת מארגמון קהה הקוצים פותחה ב-1985 בשימוש בחומרים מודרניים^{60,59,43} וניתן לצבוע תכלת בשיטה זו בזמן קצר של דקות עד שעות. לעומת זאת, התהליך הקדום לוקח ימים כמפורט בהמשך. התהליך המודרני פותח לייצור תעשייתי לציצית בעמותת פתיל תכלת. הצבע מופיע כשפוצעים את החלזונות מיד אחרי למוציאים אותם מהים ותכולת בלוטות הצבע חשופים לאוויר.^{62,61} בשיטה התעשייתית⁶³ המודרנית משתמשים בדם חלזון מיובש שמכיל בין 5-10% צבע. רוב השאר הוא חלבון עם חומרים אחרים כמו קליפה. למנה תעשייתית מחממים ל-70°C תמיסה של 10 ג' נתרן הידרוקסיד ו-20 ג' נתרן דיתיוניט תרי (יותר אם הוא ישן) בליטר אחד מים. מוסיפים 75 ג' דם חלזון מיובש מערבבים וממתנים עד שהוא הופך לצהוב בהיר, בערך רבע שעה. אם צובעים בה בשלב זה מקבלים צבע ארגמן בגלל נוכחות דיברומואינדיגום. כדי לקבל תכלת יש לחשוף את התמיסה לקרינה אולטרה-סגולה (שנצמא באור יום) שמוציאה את הברום (סכמה 5).^{55,54} ייתכן שידעו על השפעת כמות האור בימי קדם מפני שוויטריוס הזכיר רגישות הצבע לעונות השנה^{65,64} אך לא ברור אם זה בגלל כמות האור שנכנס ליורה או בגלל שינויים עונתיים בכמות הברום בתוך החלזון.^{66,56} ממשיכים בתהליך ומוציאים את התמיסה לאור השמש למשך לפחות שעה וחצי כדי לגרום לדברומינציה (סכמה 5). מוסיפים 70 ג' אמוניום סולפט שמשמש 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.⁶⁰

ניתן לצבוע עם כמויות קטנות יותר אך בכמויות קטנות מאוד, האוויר נכנס לתמיסה, מנצה את הדיתיוניט ומנוע חיזור. למרות זאת ניתן לחזור כמויות פי 3000 קטנות מהמנה התעשייתית מתחת לאטמוספירה של ארגון.⁶⁷

לפי מתכונת אחרת⁶⁸ לאינדיגו ממיסים 6 ג' נתרן הידרוקסיד ו-9 ג' נתרן דיתיוניט תרי בליטר מים, מחממים לכ-55°C ומוסיפים שתי כפיות אינדיגו טחון דק. לצביעה בתכלת יש להשתמש בכ-110 ג' דם חלזון יבש וטחון במקום אינדיגו. התמיסה אמורה להפוך לצהובה בהירה בתוך זמן קצר ולא יותר משעה. ניתן להוסיף נתרן דיתיוניט אם החיזור אינו מלא.

מחממים לכ-55°C תמיסה שנייה של 2 ג' נתרן הידרוקסיד ¼ כפיות 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 ולתת קצת זמן לוודא שהתמיסה נשארת צהובה.

לצביעה יש להרטיב 450 ג' של צמר (כדי לא להוסיף אוויר), לטבול ולערבב קצת כמו שנזכר לעיל. בגלל שמשמשים בפחות הידרוקסיד אין צורך להוסיף אמוניום סולפט.

בשיטה השנייה משתמשים בפחות אלקאלי בלי בופר. מאחר שלא משתמשים בבופר מומלץ למדוד את ה-pH שחייב להיות בין 7.5 ו-9. אם הוא נמוך (חומצי) מדי הלוקואינדיגום ישקעו ולא יצבעו את הצמר. אם הוא גבוה (אלקאלי) מדי יינזק הצמר. ה-pH המיטיב הוא 8.3.

העובדה שהתהליך התעשייתי משתמש בחומרים כמו נתרן דיתיוניט (Na₂S₂O₄) שלא היו ידועים בעבר מעלה את השאלה איך צבעו את התכלת בימי קדם. תהליך הצביעה מתואר בגמרא "אמר ליה אביי לרב שמואל בר רב יהודה הא תכילתא היכי צבעיתו לה אמר ליה מייתנין דם חלזון וסמנין ורמינן להו בירה

[ומרתחין ליה] ושקלינא פורתא בביעתא וטעמינן להו באודרא ושדינן ליה לההוא ביעתא וקלינן ליה לאודרא.⁶⁹ הגמרא מתארת יורת תסיסה שמוסיפים אליו חומרים ובודקים אם הוא מוכן עם דגימות. פלייני מתאר את תהליך הכנת הארגמן⁷⁰ שדומה להכנת התכלת. לשיטתו משתמשים בבלוטות של ארגמן חד קוצים, מוסיפים מלחים ונותנים לבלוטות 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 עם התיאוריה שהיו משתמשים בארגמן קהה הקוצים לטבילה הראשונה וארגמן חד קוצים ו/או ארגמן אדומת פה לטבילה שנייה כדי ליצור ארגמן.

אומנם שיטת הצביעה שמוזכרת לעיל אבדה אך יש עוד כמה סוגים של יורת תסיסה לצביעה באינדיגו שלא אבדו וניתן ללמוד מהם. מתכונני צביעה שהיו ידועים בעבר הרחוק כוללים יורת תסיסה של שתן ושל איסטיס (woad).

ליורת שתן,^{71,65} מחממים כ-8 ליטר שתן לכ-35°C. אחרי יומיים מכניסים כ-20 ג' אינדיגו טבעי תחון דק (שווה לכ-200 ג' דם חילזון) בתוך שקית בד סגורה. פעמיים ביום משפשפים את השקית כדי לשחרר את האינדיגו לתמיסה ואחרי כמה ימים האינדיגו מתחזר ומתמוסס. מרטיבים ומכניסים את הצמר 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 תסיסה בהוספת שתן ואינדיגו לפי הצורך.⁶⁵ מוציאים את הצמר לאוויר בסחיטה ותולים אותו להתחמצן למשך כ-20 דקות, אחר כך שוטפים עם חומץ דליל ומים. אם יעילות התמיסה יורדת, ניתן להוסיף שורש רוביה, תמרים וכדומה להאיץ אותו.

ליורת איסטיס,⁷⁴⁻⁷² משרים איסטיס יבש במים למשך כמה שעות ואז מוסיפים לכ-20 ליטר מים בטמפרטורה של 70°C. נותנים לתמיסה להתקרר לכ-48°C. מוסיפים 20 ג' סובין, 35 ג' נתן פחמנט, 40 ג' סידן הידרוקסיד, 30 ג' פואת הצבעים יבש ו-20 ג' אינדיגו טבעי תחון דק ואחרי יומיים האינדיגו אמור להתחזר. אם התסיסה פעילה מאוד יש להוסיף כ-5 ג' סידן הידרוקסיד.⁶⁵ צובעים את הצמר בצורה דומה ליורת תסיסה של שתן.

הפקת תכלת מיורת תסיסה

פה מסופר על הניסוי הראשון בעידן המודרני שהצליח להפיק תכלת מארגמן קהה הקוצים בלבד לפי הדרכים הקדומות שמתאימות לתיאורים הקדומים.^{75,61,1} התהליך הקדום לצביעת התכלת מבוסס על תסיסה ביוכימית דומה לזה ששימשו לצביעה איכותית באינדיגו (קלא אילן). השיטה הקדומה לצביעה בתכלת דומה. במקום שתן או איסטיס השתמשו בבשר החילזון ואפר. בעידן המודרני הצליחו להפיק צבע סגול מארגמן קהה הקוצים בשיטה הקדומה של יורת התסיסה⁷⁶ וצבע כחול בהוספת בשר *Nucella lapillus* או תערובת של בשר ארגמן קהה קוצים וארגמן חד קוצים.⁷⁷ יש דעות שהצבע הסגול של קורן הוא הארגמן,⁷³ יש דעה שהוא התכלת^{12,21,37} ויש דעה שהוא שלב ראשון לצביעה בארגמן. קורן⁷³ לא ניסה להכין תכלת אך סבר שאם חושפים את הנוזל לאור, הצבע יהפוך לתכלת. למרות זאת כבר כמה שנים מנסים לייצר תכלת בתהליך הקדום בשימוש אך ורק בארגמן קהה קוצים ורק במאמר הזה דווחו על תוצאות חיוביות.

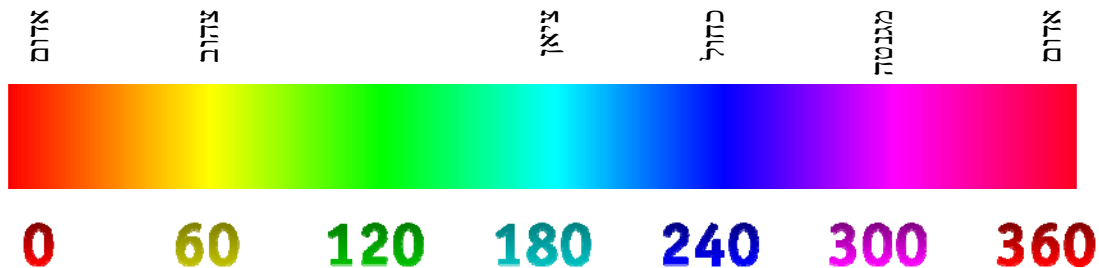
התהליך המודרני מהיר ונותן חיזור מלא של הצבע בשניות עד דקות. לעומת זאת הצביעה הקדומה ביורת התסיסה לוקחת כמה ימים כדי לחזור את החומר. ביורת תסיסת שתן, השתן שומר על סביבה אלקאליני שמעודדת חיידקים אלקאולופיליים (אוהב-אלקאלי) בעיקר *Clostridium istadis*.⁷⁰ יש כמה הבדלים ביו תהליכי התסיסה של אינדיגו מהצמח לבין זה של ארגמן מהחילזון.

לפי המתכון של אדמונדס,⁷⁴ מכניסים גרם של דם חילזון מיובש ובשר של שלושה *Nucella lapillus* או תערובת ארגמן קהה קוצים וארגמן חד קוצים לליטר מים. מוסיפים אלקאלי כדי להגיע ל-pH 9 ומחממים ל-50°C למשך 10 ימים. הוא גילה שחשיפת היורה לאור לא גורם לשינוי צבע אבל אם מוציאים את צמר לאור השמש הצבע בחלק החיצוני של הצמר עובר דברומינציה והפך לכחול כאשר הצמר הפנימי הופך לסגול. הוא גם גילה שצביעה שנייה באותו יורה יצוא כחול אפילו ללא חשיפה לאור אך הוא לא הסביר את הסיבה לכך. ידוע שדיברומואינדיגו מתקשר עם צמר בעדיפות לאינדיגו.^{3,36} צביעה שנייה באותו יורה של צמר חדש ייתן צבע כחול יותר מהצביעה הראשונה. השיטה נקרה צביעה הפרשית (differential dyeing).

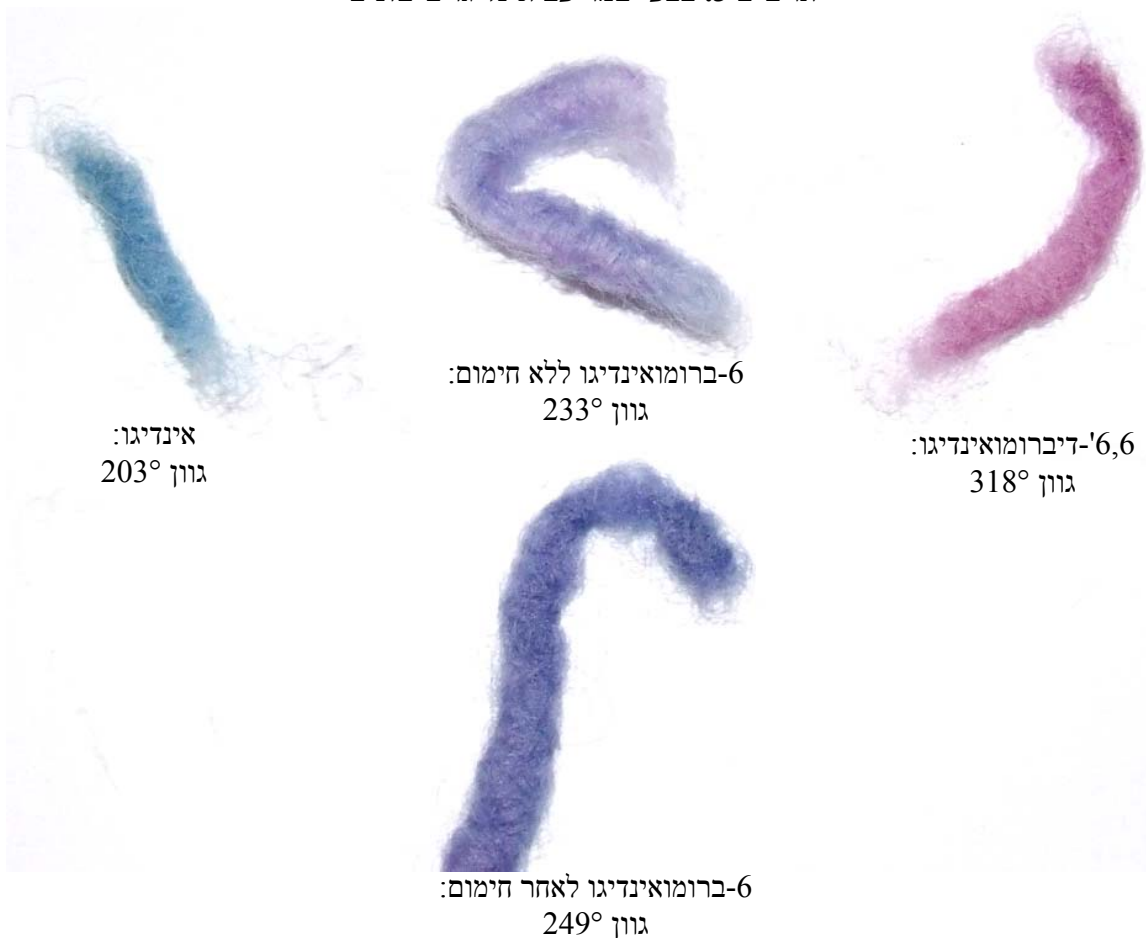
במתכון של קורן, פוצעים את ארגמוני קהה הקוצים ומשאירים אותם כמה שעות עד שלושה ימים ליצירת הצבע. מוסיפים מים לשלושה חלזונות עד לנפח כולל של 200 סמ"ק. מוסיפים נתרן פחמנת עד שמגיעים ל-pH 9.0 ומחממים ל-50°C. בעבר השתמשו בבורית שהפיקה משטיפת אפר עצים. ניתן היה להשתמש בסיד או בנטרון שנמצא בתחתית אגמים יבשים במצריים אך האפר מצוי מחימום היורה ולכן סביר להניח שהשתמשו בו.⁷⁴ בעבר היו מעריכים את האלאקליות (דהיינו את ה-pH) לפי תחושה או טעם התמיסה. תמיסה רירי ומר אלקאלי מדי. שיטות אלה מסוכנות. התמיסה מזיקה לאור ומכילה חיידקים שיכולים להיות מסוכנים. כל יום מוסיפים נתרן 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 בצבע סגול.⁷³ סביר להניח שהחיידק שמבצע את החיזור הוא תרמופיל (אוהב-חום) בנוסף לאלקאלופיל (אוהב-אלקאלי) שדומה ל-*Clostridium istadis*.⁷⁴

הצבע של התכלת אמור להיות דומה לזה של השמיים, ניתן לבדוק זאת בעין וכן זו בדיקה שחייבים לעשות כדי לאמת כל מדידה של צבע. הצבע נמדד במרחב הצבע HSB (גוון-הרוויה-בהירות).⁷⁸ הגוון נמדד במעלות כאשר ציאן הוא 180°, כחול הוא 240°, מגנטה הוא 300°, אדום הוא 0° (או 360°) וצהוב הוא 60° (תרשים 2). צביעה בעזרת דיתיונט עם תרכובות אינדיגו סינתטיות (תרשים 3) נותנת הגוונים 203° עבור אינדיגו, 249° עבור 6-מונוברומואינדיגו (233° לאחר חימום, שינוי צבע שידוע מהספרות⁴⁸) ו-318° עבור 6,6'-דיברומואינדיגו. גוון דגימה של תכלת תעשייתית שמוצר ב-'פתיל תכלת' מארגמן קהה קוצים הוא 203°, זהה לאינדיגו, כלומר, קצת יותר ציאן מצבע השמיים. להשוואה גוון התכלת מרדג'ין הוא 206°, מאוד דומה לאינדיגו למרות היותו חומר שונה לגמרי. צבע היעד עבור תכלת הוא זה של השמיים שמשתנים במשך היום. להלכה, לפי רבי יהודה בהקשר לראיית נגעים, בודקים צבעים בשעות זמניות ארבע, חמש, שומה וטשע.⁷⁹ גוון השמיים בשעות אלה נמדד בין 208° ו-222° (בין ציאן וכחול). מדידת גוון הצמר באור יום בשעות אלה ומבזק אלקטרוני של מצלמה דומים לדיוק של 2°. לעומת זאת אור פלואורסנטי מסית את הגוון בכ-15°.

תרשים 2. הזוויות המיוחסות לגוונים במרחב צבע HSB.



תרשים 3. צבעי צמר עם אינדיגוים שונים



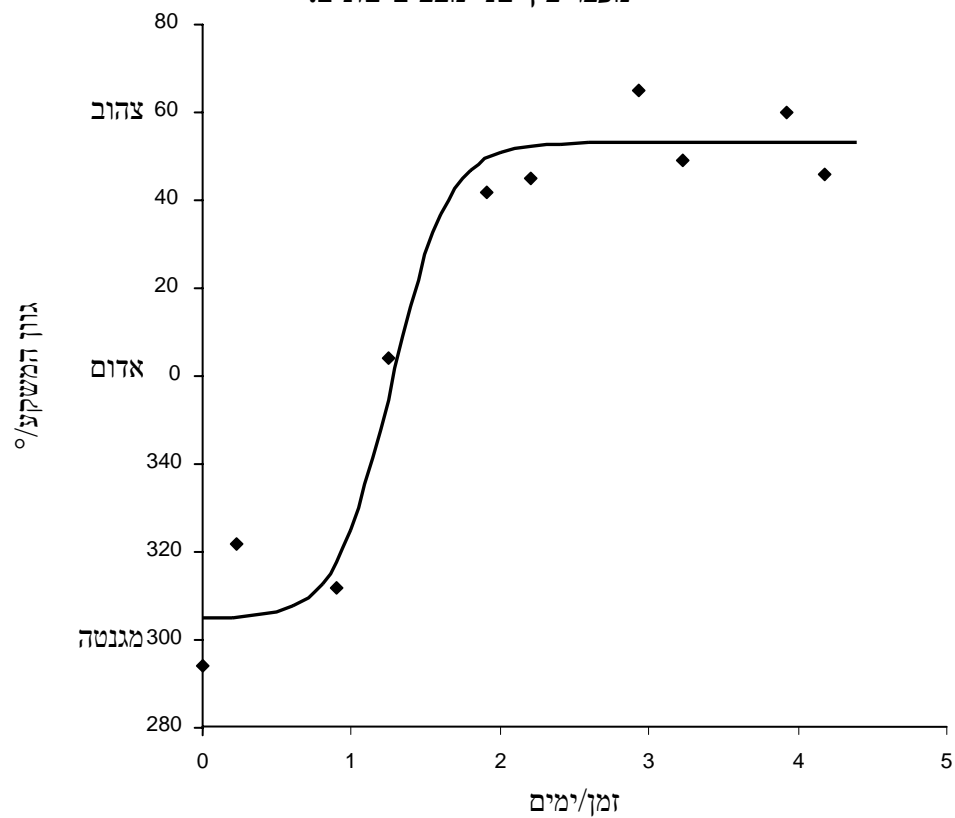
ביצענו כמה ניסיונות ביורת תסיסה עד שהצלחנו לצבוע צמר בתכלת.

ניסוי 1. הוכנס דם חילזון מיובש (270 מ"ג) לתוך 200 סמ"ק מים בטמפרטורה של 50°C והוסיפו נתרן פחמנת לשמור על pH 9. לא היה שינוי אחרי ארבעה ימים וגם לא לאחר הוספת סוכר, בדומה למתכון ליורת איסטיס, בניסיון להפעיל תגובה ביולוגית. המסקנה היא שבשר חילזון מיובש לא 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 יום הופיע קצת קצף, אחרי יומיים צבע המשקה נחלש (תרשים 4) והקצף נשאר ואחרי שלושה ימים הצבע הפך כולו צהוב והקצף נעלם (תרשים 5). שינוי גוון צבע המשקה (תרשים 4) עם הזמן מעיד על תגובה ביוכימית שמתחילה לאט ומאיצה עד שהיא מתקרבת לסיום. מאחר שסוגי האינדיגו אינם מתמוססים הרבה במים לא היה שינוי עקבי של גוון המים מעל המשקה. ניסיונות צביעה למשך שעה בדגימות של צמר נתנו צבעים חלשים.

הוציאו את היורה לאור השמש למשך $2\frac{1}{2}$ שעות ואחרי חמישה ימים הכניסו גרם של צמר לתמיסה למשך 20 שעות. בחשיפה לאוויר הצמר קיבל גוון של 328° כלומר הוא הפך להיות סגול (תרשים 6), הגוון יותר אדום מדיברומואינדיגו וכנראה מושפע מתרכובות אינדרובין בנוסף לדיברומואינדיגו. המסקנה היא שלא הייתה מספיק חשיפה לשמש והדפנות העבות של כלי הזכוכית הפחיתו את כמות ההקרנה. שימו לב שהתמיסה מסריחה כל כך שמנדף לא מונע לגמרי מהסירחון להתפשט במעבדה.

תרשים 4. גוון המשקע כפונקציה של זמן בניסוי 2. הנתונים מתאימים לפונקציה לוגיסטית שמעיד על מעבר בין שני מצבים שונים.



יורת התסיסה צולם בואר פלואורסנטי. הדגמה של דגימה בתמונות שונה כדי שעוצמת ערוץ הירוק היה 50%.

תרשים 5. יורת תסיסה של דם חילזון מחזור מניסוי 2.

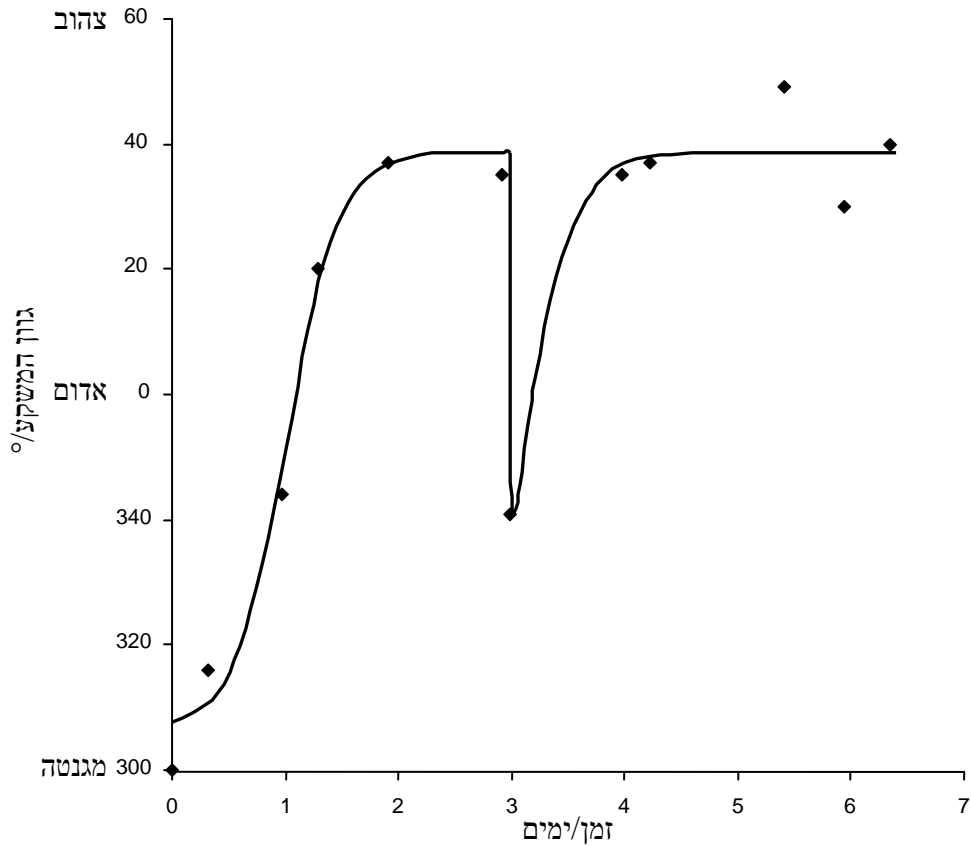


תרשים 6. צמר סגול מניסוי 2.



ניסוי 3. בשר 5 חלזונות (36 ג') וכ-15 בלוטות (27 ג') הוכנסו למים (250 סמ"ק) בטמפרטורה של 50°C . השאירו את התערובת בחוץ חשופה לשמש ישירה לפחות 6 שעות ביום. הפעם השתמשו בכוס כימית רגילה עם כיסוי ניילון. הוסיפו תמיסה רוויה של נתרן פחמנת כדי להביא את ה-pH ל-9.0. פעמיים ביום הוסיפו תמיסה של נתרן פחמנת כדי לשמור על pH של 9.0. אחרי יומיים הצבע של המשקע (תרשים 7) דעך ולתמיסה הירוקה הוכנס גרם של צמר למשך יממה, לאחר הוצאתו לאוויר ושטיפתו הוא הפך לירוק בהיר מאוד. המסקנות שטרם הגיעו לחיזור מלא, דעיכת הצבע אינה מספיקה וצריך להמתין יום נוסף לפחות. יכול להיות שדחיית הצבע מסמנת חיזור במצב מוצק של אלקטרון אחד והחיזור באלקטרון השני זה שנותן לצבע להתמוסס. ידוע מניסיונות בתמיסות בתערובות של אצטון ומים שהרדיקל (שמחוזר באלקטרון אחד בלבד) אינו צובע צמר.⁶⁴ התערובת מסריחה מאוד ומושכת זבובים.

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



*יורת התסיסה צולם באור היום מה שמסביר את ההסטה בגוון של כ-15°. ההדגמה של דגימה בתמונות שונה כדי שעוצמת ערוץ הירוק תהיה 50%.

ניסוי 4. הוסיפו לאותו יורת תסיסה שהיה בניסוי 3 עוד בשר 5 חלזונות, כ-15 בלוטות ו-200 סמ"ק מים, הוסיפו תמיסה רוויה של נתרן פחמנת כדי להביא את ה-pH ל-9.0 והמשיכו לשמור על ה-pH עוד שלושה ימים. שינוי הצבע היה יותר מהיר (תרשים 7), סביר להניח שזה בגלל כמות מוגברת של חיידקים, והפעם נתנו מספיק זמן לחיזור מלא. הכניסו 0.5 ג' צמר וכשהוציאו אותו הוא הפך לסגול (תרשים 8). מסקנה: התמיסה כהה מדי בשביל לתת לקרני השמש לגרום לדברומינציה מלאה. החשיפה לשמש השפיעה על גוון הצמר שהיה 308° (קרוב למגנטה) לעומת 328° (קרוב לאדום) בניסיון הקודם אבל זה לא מספיק. חימים באדי מים משנה את הגוון ל-280° (בין מגנטה לכחול, להשוואה בין הגוונים ראה טבלה 1 ותרשים 9). נשאר דוברומואינדיגו שממשיך להיות סגול בחימום אבל יש בו מונוברומואינדיגו ששינה צבעו בחימום. ייתכן שצביעה לפחות זמן או צביעה הפרשית^{36,3} תפחית את כמות הדיברומואינדיגו שנספג.

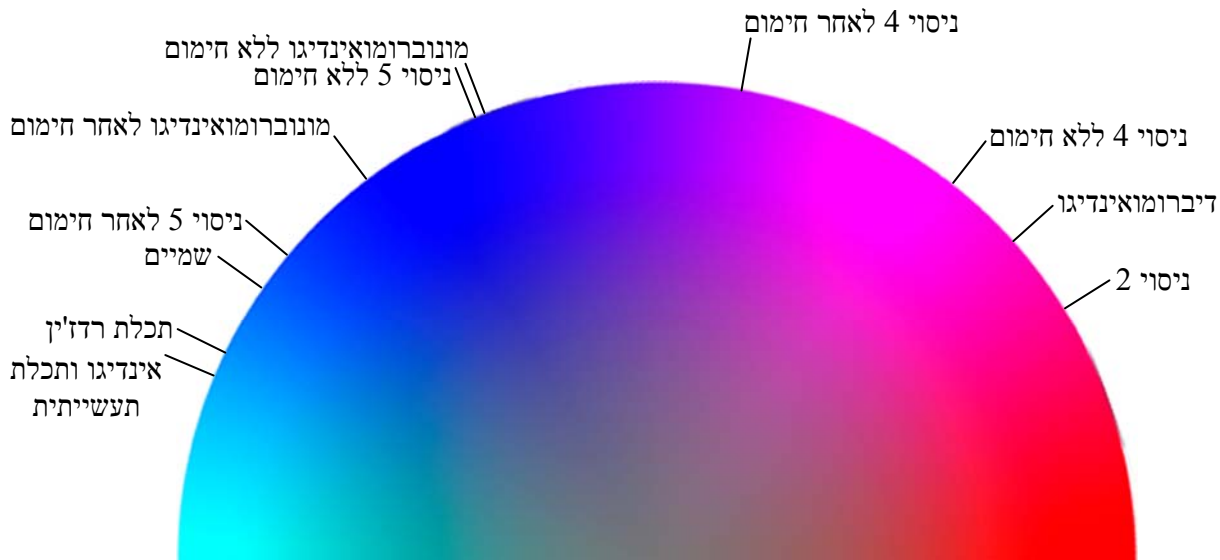
תרשים 8. תוצאות הצביעה בניסויי 4 ו-5.



טבלה 1. גווני הצביעה

גוון/%	צביעה	גוון/%	צביעה
206	תכלת של רדז'ין	216	שמיים
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-דוברומואינדיגו
220	ניסוי 5 לאחר חימום	203	תכלת תעשייתית מ-'פתיל תכלת'

תרשים 9. מיקום גווני הצביעה על מעגל הצב



ניסוי 5. הכניסו עוד 0.5 ג' 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 (קיסור) הצמר הפך לגוון 220° בין כחול וציאן. תרשים 10 מראה השוואה בין הצמר, צמר תכלת תעשייתי (גוון 203°) והשמיים. בבדיקה בעין הצבע מספיק דומה לשמיים כדי להיחשב כפתיל תכלת כשר.^{41,80} המסקנות: כדי לצבוע תכלת צריך להפחית את זמן הצביעה ו/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 שירות התסיסה יתחמצן מתגבר. בנוסף, ביורה תעשייתי גדול שלושה שבועות לא היה יכול להיות מספיק לדברומינציה. לכן צביעה הפרשית יותר סבירה וייתכן שהיו לוקחים את הצבע הסגול לטבילה נוספת ביורה של ארגמון חד קוצים או ארגמון אדומת פה כדי לייצר ארגמן. אם הצמר עדיין הופך לסגול מפני שהוא מכיל מונוברומואינדיגו יש לחמם אותו. צבע שהופך מסגול לכחול בחימום השינוי כתוצאה המצאות מונוברומואינדיגו.⁴⁸ לאור זה סביר להניח שהתכלת מכיל מונוברומואינדיגו והיו מחממים אותו כדי לקבל צבע כחול וציב.

תרשים 10. השוואת צבע הצמר עם צבע השמיים



מסקנות

הוכח שניתן לקבל צבע כחול בצביעה בדם חילזון מארגמון קהה קוצים בשיטה קדומה ללא צורך לחשף את התהליך לאור וגם שהחשיפה לאור אינה יעילה מחמת כהות היורה. הדעה של הרב נחום רבינוביץ' היא "זה לא 100% הוכחה שזה התכלת אבל יותר מזה לא ניתן להוכיח ... לפי זה נמצא שהצבע של התכלת ... הוא הכי קרוב שנוכל להגיע."⁴¹

איך אימות זיהוי 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 מהווה סימן גאווה כמו שמובא בגמרא בקשר לקלא אילן¹³ ולפי דעה זו אסור ללבוש תכלת מעל הבגדים ולא בטלית גדול שמא יתגאה שהוא יותר טוב מהאחרים גם אם התכלת אמיתית.⁴¹

קיימים הרבה ממצאים שמצביעים על זיהוי החילזון כארגמון קהה הקוצים כמקור התכלת. למרות מעל מאה שנות מחקר לא מצאו 'חילזון' יותר מתאים לתיאורים של חז"ל. מי שעדיין מתנגד לזיהוי גם לא מציע תחליף. לכן לעניות דעתי גילוי מחדש של תהליך יורת התסיסה שדווח במאמר זה מוסיף לטענה שמצאנו את החילזון ושגילינו את התכלת מחדש. התורה מצווה אותנו להטיל תכלת בציצית לכן עלינו לעשות זאת לדעה זו אי אפשר לומר שעוברים על איסור גאווה מאחר שרק ממלאים צווי ישיר מהתורה כמו כל מצווה אחרת.

תודות

תודה ליואל גוברמן ופתיל תכלת עבור יעוץ ומימון. תודה לעקיבא הופמן שעשה חלק מיורות התסיסה. תודה לניסים גרתי עבור מקום במעבדה שלו. תודה לישראל זיידרמן שסיפק ברומואינדיגום סינתטיים.

¹ מנחות מ"ד.

- ² מדרש תנחומה, במדבר, שלח
- ³ מ. בורשטיין, התכלת, ספרייתי, ירושלים 1990.
- ⁴ עורך השולחן סעיף פ"ה סימן י"ד
- ⁵ ש. אריאל, "תכלת בציצית – מצוה מן המובחר או חיוב גמור?" תחומין, כ"א, 475-485 (תשס"א).
- ⁶ הרב נ. א. רבינוביץ' <http://ybm.org.il/Admin/uploaddata/LessonsFiles/Pdf/3956.pdf>, 2010.
- ⁷ במדבר ט"ו, כ"ה
- ⁸ רמב"ם משנה תורה, הלכות ציצית א', ו'.
- ⁹ רש"י על מנחות ל"ה. ד"ה "התכלת".
- ¹⁰ נ. א. רבינוביץ', דרשה בנוסח "ציצית וברכתם", אלול תש"ע.
- ¹¹ B. Sterman, "A response to Dr. Singer's review of *murex Trunculus* as the source of *tekhelet*" *J. Halacha Contemp. Soc.*, **43** (2002).
- ¹² M. E. Singer, "Understanding the Criteria for the Chilazon" *J. Halacha Contemp. Soc.*, **42** (2001).
- ¹³ M. E. Singer, *J. Halacha Contemp. Soc.*, **44** (2002).
- ¹⁴ M. Epstein, "Has tekhelet been found?", *Hakirah, Flatbush J. Jewish Law Thought*, 165-180
- ¹⁵ מסכת ציצית
- ¹⁶ י. זידרמן, "לחיידוש מצות תכלת בציצית", תחומין ט', 427-431.
- ¹⁷ בבא מציעא ס"א:
- ¹⁸ י. פליקס "עולם הצמח המקראי" מסדה, רמת גן, 1968.
- ¹⁹ J. Balfour-Paul "Indigo", British Museum Press, London, UK, 1998.
- ²⁰ מנחות מ.
- ²¹ רמב"ם, משנה תורה, הלכות ציצית ב':א'
- ²² מנחות מ"ג:
- ²³ I. Hertzog, "The Royal Purple and the Biblical Blue" PhD Thesis, London Univ., 1911; reprinted in 1987 by A. Shpneir.
- ²⁴ E. Haupttheil, "Dei etymologie des wortes 'Purpur' in naturwiissenschaftlicher beleuchtung" in *Ein Beitrag zur Purpurkunde* ed. A. Dedekind, **I**, 18-97 (1898).
- ²⁵ I. I. Ziderman, "The biblical dye *Tekhelet* and its use in Jewish textiles" *Dyes Hist. Archaeo.*, **21**, 36-44 (2008).
- ²⁶ מנחות מב:
- ²⁷ Z. C. Koren, lecture
- ²⁸ Н.В. Полосьмак, Л.П. Кундо, Г.Г. Балакина, В.И. Маматюк, В.Г. Васильев, Е.В. Карпова, В.В. Малахов, А.А. Власов, И.Л. Краевская, Л.С. Довлитова, Е.А. Королюк, Е.Г. Царева "Текстиль из «замерзших» могил горного алтая Iy-nI вв. до н.э. (опыт междисциплинарного исследования)" Новосибирск Издательство Сибирского Отделения Российской Академии Наук, Россия (2006).
- ²⁹ Н.В. Полосьмак, Л.Л. Баркова "Костюм и текстиль пазырыкцев алтая (IV—III вв. до н.э.)" Инфолио, Новосибирск, Россия (2005).
- ³⁰ New York Times
- ³¹ רמב"ם משנה תורה, הלכות ציצית ב':ה'
- ³² רש"י על מנחות מ"ד.
- ³³ Caley, E. R. "The Stockholm Papyrus : An English Translation with brief notes" *J. Chem. Ed.* **IV**:8 : 979-1002 (1926).
- ³⁴ Αριστοτέλης "Περὶ Χρωμάτων" **IV**, c. 330 BCE.
- ³⁵ W. S. Hett, "Arstitle minor works", Harvard Univ. Press, Cambridge, MA, 1936.
- ³⁶ ג. לרנר, "מאמר פתיל תכלת", דפוס חיים קעלטער, ווארשה, פולין, תרמ"ה.
- ³⁷ ג. לרנר, "מאמר עין התכלת", דפוס ר' מאיר יחיאל האלטער, ורשה, פולין תרנ"ב.
- ³⁸ I. I. Ziderman "Blue thread of the Tzitzit – was the ancient dye Prussian Blue or Tyrian Purple" *J. Soc. Dyers Colourists*, **97**, 362-364 (1981).
- ³⁹ A. Dedekind "Privatissimum für Purpurforscher", **II**, 1906.
- ⁴⁰ H. de Lacaze-Duthiers and A. Dedekind, "Lettres de Henri de Lacaze-Duthiers: adresses au Alexander Dedekind" Schleicher Freres, Paris, France, 1902.
- ⁴¹ A. Dedekind, "Ein Beitrag zur Purpurkunde" **III**, 1908.
- ⁴² W. Born, "Purpura Shell-Fish" *Ciba Rev.*, **1(4)**, 106-117 (1937).

- ⁴³ A. Dedekind, "La pourpre verte et sa valeur pour l'interprétation des écrits des anciens" *Arch. Zool. Exp. Gén.*, **26**, (1898).
- ⁴⁴ . ידן "החיפושים אחר בר כוכבא"
- ⁴⁵ H. Fouquet and H.-J. Bielig, "Biological precursors and genesis of Tyrian-purple" *Angew. Chem. Int. Ed.*, **10**, 816-817 (1971).
- ⁴⁶ O. Elsner, "Solution fo the enigmas of dyeing Tyrian purple and the biblical *Tekhelet*" *Dyes Hist. Archaeo.* **10**, 11-16 (1991).
- ⁴⁷ C. J. Cooksey, "Tyrian purple: 6,6'-dibromoindigo and related compounds" *Molecules* **6**, 736-739 (2001).
- ⁴⁸ Z. C. Koren, "High-preformance liquid chromatographic analysis of an ancient Tyrian purple dyeing vat from Israel" *Isr. J. Chem.*, **35**, 117-124 (1995).
- ⁴⁹ J. Wouters and A. Verhecken, "Composition of Murex dyes" *J. Soc. Dyers Colourists*, **108**, 404 (1992).
- ⁵⁰ Z. C. Koren, "HPLC analysis of the natural scale insect, madder and indigoid dyes" *J. Soc. Dyers Colourists*, **110**, 273-277 (1994).
- ⁵¹ I. I. Ziderman "Bathochromic Effect of Heat on 6-Bromoindigo" 22nd Annual Meeting on Dyes in History and Archeology, Riggisberg, Switzerland, Oct. 2003.
- ⁵² Z. C. Koren, "PLC analysis of the natural scale insect, madder and indigoid dyes" *J. Soc. Dyers Colour.*, **110**, 273-277 (1994).
- ⁵³ C. J. Cooksey, "Tyrian purple: 6,6'-dibromoindigo and related compounds" *Molecules*, **6**, 736-769 (2001).
- ⁵⁴ I. I. Ziderman, "Revival of Biblical Tekhelet Dyeing with Banded dye-Murex (*Ph. trunculus*): Chemical Anomalies" *Dyes Hist. Archaeo.* **16/17** 87 (2001).
- ⁵⁵ Z. C. Koren, "Archaeo-chemical analysis of Royal Purple on a Darius I stone jar" *Microchim. Acta.*, **162**, 381 (2008).
- ⁵⁶ Z. C. Koren, "A new HPLC-PDA method for the analysis of Tyrian purple components" *Dyes Hist. Archaeo.*, **21** 26-35 (2008).
- ⁵⁷ L. A. Driessen "Über eine charakterische Reaction des antiken Purpurs auf der Faser" *Melliand Textilberichte*, **26**, 66 (1944).
- ⁵⁸ 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).
- ⁵⁹ 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.
- ⁶⁰ I. I. Ziderman, "Purple dyes made from shellfish in antiquity" *Rev. Prog. Coloration*, **16**, 46-53 (1986).
- ⁶¹ H. Fouquet and H.-J. Bielig, "Biological Precursors and Genesis of Tyrian-Purple" *Angew. Chim. Int. Ed.*, **10**, 816-817 (1971).
- ⁶² I. I. Ziderman "Biblical dyes of animal origin", *Chem. Brit.*, **22**, 419-421 (1986).
- ⁶³ E. Stein, *private communication*.
- ⁶⁴ Vitruvius, "De Architectura" *Libra VII*, Ch. 13., c 25 BCE.
- ⁶⁵ B. Sterman, "The Meaning of Tekhelet" *B'Or Hatorah*, **XI**, 185-195 (2001).
- ⁶⁶ R. J. Huxtable, "The mutability of blue" *Mol. Intervent.*, **1**, 141-144 (2001).
- ⁶⁷ 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).
- ⁶⁸ J. N. Liles, "The art and craft of natural dying" University of Tennessee Press, Knoxville, TN, USA, 1990.
- ⁶⁹ מנחות מ"ב:
- ⁷⁰ Pliny, "Naturalis Histotiae" *Pompeii*, Book IX, ch. 62, c. 78 CE
- ⁷¹ I. Grae, "Nature's Colors: Dyes from Plants", Macmillan, New York (1974).
- ⁷² A. N. Padden, V. M. Dillon, P. John, J. Edmonds and M. D. Collins, "Clostridium used in mediaeval dyeing" *Nature*, **396**, 225 (1998)
- ⁷³ A. N. Padden, V. M. Dillon, J. Edmonds, M. D. Collins, N. Alvareez and P. John, "An indigo-reducing moderate thermophile from a woad vat, *Clostridium istadis* sp. nov." *Int. J. System. Bacter.*, **49**, 1025-1031 (1999).

⁷⁴ 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).

⁷⁵ Pliny, *Historia Naturalis*, IX.lx.125-lxii.135 c 78.

⁷⁶ Z. C. Koren, "The First Optimal All-Murex All-Natural Purple Dyeing in the Eastern Mediterranean in a Millenium and a Half" *Dyes. Hist. Archaeo.*, **20**, 136-149 (2005).

⁷⁷ J. Edmonds, "Tyrian or imperial purple dye", *Hist. Dyes Ser.*, **7** (2002).

⁷⁸ G. H. Joblove and D. Greenberg, "Color spaces for computer graphics" *Comp. Grep.*, **3**, 20-25 (1978).

⁷⁹ משנה נגעים ב:ב'

⁸⁰ הרב נ. א. רבינוביץ, <http://ybm.org.il/Hebrew/Article.aspx?item=2920>