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 שנותרה. 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 והושווה לעדויות על צבע התכלת בדברי חז״ל, בכתובות עתיקות ובממצאים 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 מדם 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 תנחומא[2] (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 שבדגים אנחנו סומכים על

* תודה ליואל גוברמן, אייל פישלר ואגודת ״פתיל תכלת״ עבור יעוץ ומימון המחקר. תודה לעקיבא הופמן שהכין חלק מיורות התסיסה. תודה לניסים גרתי על המקום במעבדה שלו. תודה לישראל זיידרמן שסיפק ברומואינדיגוים סינתטיים.

1 מנחות מד ע״א.

2 מדרש תנחומא, במדבר, שלח, סי׳ ט״ו.

3 י׳ א. הלוי הרצוג, בתוך ״שי לישעיה — ספר יובל לר׳ ישעיהו וולפסברג״, העורך י׳ תירוש, הוצאות המרכז לתרבות הפועל המזרחי, תל-אביב, תשט״ז.

4 ערוך השולחן סעיף פ״ה סימן י״ר.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.
© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

הסימנים. כאשר גילו את תרנגול ההודו באמריקה עלתה שאלת הכשרות, למרות שהיו בו כל הסימנים, משום שלא הייתה מסורת. בתחילה סברו שמקורו בהודו, לכן שאלו הרבנים את יהודי הודו האם הם אוכלים תרנגולות. מאחר שההודים אוכלים תרנגולות, הכשירו את תרנגול ההודו. כעבור שנים רבות התגלתה הטעות, אך הרבנים אמרו שמאחר שכבר חודשה מסורת, זה כשר.[5] יוצא אם כן 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 תתגלה לקראת ביאת המשיח. ללא ספק התכלת שייכת לסוג המסורות שניתן לחדש, ולכן פעלו רבים לגילוי התכלת מחדש.

כמפורט להלן, חילזון ארגמון קהה-קוצים הוא המתאים ביותר להפקת התכלת לציצית.[6] אמנם מאחר שפסקה המסורת, זיהוי התכלת מבוסס על ראיות נסיבתיות ותהליך הייצור המודרני משתמש בחומרים כימיים חדישים 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 חדישים, שיטה זו נקראת יורת תסיסה.[7]

גדר החיוב להטיל פתיל תכלת

הרב ש. אריאל[5] 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 בתורה[8] 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 אריאל[5] מוכיח שיש להטיל פתיל תכלת אפילו אם זיהויו בספק. שאלה דומה יש לגבי התכלת של חסידי ראדזין המופקת מדיונון וכן לגבי כל צבע כחול סינתטי (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? ויש הטוענים

5 מאורות הדף היומי גיליון 121.
6 ש. אריאל, "תכלת בציצית – מצוה מן המובחר או חיוב גמור?" תחומין, כ"א, 475–485 (תשס"א).
7 הרב נ. א. רבינוביץ' http://ybm.org.il/Admin/uploaddata/LessonsFiles/Pdf/3956.pdf, **2010**.
8 במדבר ט"ו, כ"ח.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.
© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

שאם לא ניכר הבדל בין גוון כחול זה לבין 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 חוטים 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 חוטים 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 כשרות. קיימות דעות רבות בקשר למספר הכריכות והקשרים אך הכריכות והקשרים אינם מעכבים.[14]

מקורות לזיהוי החילזון

אף שהתכלת צריכה להתאים לסימנים המוזכרים בדברי 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 ובריתו דומה לדג ועולה אחד לשבעים שנה ובדמו צובעין תכלת לפיכך דמיו יקרים".[1]

במאמרים רבים[14,18] נידונה באריכות מידת ההתאמה של חלזונות שונים לתיאור זה ולתיאורים אחרים במקורות. כך לדוגמה נידונה השאלה האם החילזון חייב להיות דומה לַיָּם או לקרקעית הַיָּם, האם גופו חייב להיות דומה לַיָּם או ציפוי קליפתו חייב להיות דומה לַיָּם. צבע החילזון דומה לַיָּם או לרקיע[19] 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 בבא מציעא סא ע"ב.
10 רמב"ם משנה תורה, הלכות ציצית א, ו.
11 רש"י על מנחות לח ע"א ד"ה "התכלת".
12 נ. א. רבינוביץ', דרשה בנושא "ציצית וברכתה", אלול תש"ע.
13 מנחות ל"ח 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 Comtemp. Soc., **43** (2002).
16 M. E. Singer, "Understanding the Criteria for the Chilazon", J. Halacha Comtemp. 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 השווה מסכת ציצית פרק א', הלכה י' ותלמוד בבלי מנחות מ"ד ע"א.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.
© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

לחפש חילזון דומה לדג לפי ההגדרה המודרנית, ואם הוא חי בַּיָם די בכך. עלייתו מהַיָם פעם בשבעים שנה (ויש גורסים "שבע שנה"[19]) מתייחסת לעובדה שהוא נמצא בקרקעית הים ורק לעתים נדירות עולה חי משָם. לכן תיאורו מתאים לארגמון קהה-קוצים.[20,15,14]

קלא אילן

קלא אילן[9] הוא צבע המזוהה היום כאינדיגו, המופק מן הצומח[21] ומכיל גם מעט מן התרכובת הנקראת אינדירובין (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 אז 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"[9] כלומר מי שמכריז שקלא אילן הוא תכלת הוא שקרן. ועוד אמרו חכמים "גזירה משום קלא אילן ולא יהא 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 הגמרא[24] צבע התכלת דומה לרקיע כלומר קרוב לכחול וכן פירש רמב"ם בהלכות ציצית.[25] עם זאת בתרגומים היווניים מתורגמת המילה "תכלת" ל"הייקינתוס" (υακινθος) שהוא גוון יותר קרוב לסגול מאשר כחול.[27,26] משום כך היו שסברו שהתכלת היא סגולה.[28,20] 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. Hauptheil, "Dei etymologie des wortes 'Purpur' in naturwiessenschaftlicher beleuchtung", in *Ein Beitrag zur Purpurkunde* ed. A. Dedekind, I, 18-97 (1898).
28 I. I. Ziderman, "The biblical dye *Tekhelet* and its use in Jewish textiles", Dyes Hist. Archaeo., 21, 36-44 (2008)
29 מנחות מב ע"ב.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.
© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

בתוך שכבה קפואת-עד בסיביר, בקבר פזיריק, התגלתה חתיכת בד ארגמן מקושטת בבד כחול. מקור הבד 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 בחילזונות ים, נמצא שזהו בד ארגמן ותכלת.[32,31] לאחרונה נמצא במצדה אריג קטן מאוד של תכלת על בד 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:

"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".[24]

לפי הדעה הראשונה לא ניתן להבחין ביניהם והדעה השנייה סבורה שניתן להבחין. הבדיקה דומה ליורת תסיסה: לוקחים אלום ($NaAl(SO_4)_2$), מיץ תלתן ושתן תוסס, ומכניסים את הצמר הצבוע לתוך התמיסה. אם הצבע דועך זהו קלא אילן. כדי שבדיקה כזאת תעבוד, צורת פעולת הצביעה בקלא אילן צריכה להיות שונה מהותית מזאת של תכלת אמיתית.

במאמרים הנזכרים לעיל[16,15] מובאת בדיקה המופיעה ברמב"ם[34] ובפירוש רש"י לתלמוד[35] שמבדילה בין תכלת לקלא אילן. אם הם מכילים אותם חומרים ולכן זהים מבחינה כימית, אין הגיון שההבחנה הזאת אפשרית. להערכתי, לפי תוצאות המחקר המפורטות להלן, עלות תהליך הצביעה באינדיגו בעזרת חומרים קרומים דומה למחיר של דם החילזון ולכן לא סביר שטרחו 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 סטוקהולם.[36] צמר כזה ייראה בדיוק כמו תכלת כשרה, אלא שחלק מהצבע יורד בעת שפשוף

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

31 Н. В. Полосьмак, Л.П. Кундо, Г.Г. Ьалакина, В.И. Маматюк, В.Г. Васильев, Е.В. Карпова, В.В. Малахов, А.А. Власов, И.Л. Краевсиая, Л.С. Довлитова, Е.А. Королю к, Е.Г. Царева "Текстиль из «замерзших» могил горного алтая 1у-н1 вв. до н.э. (опыт междисциплинарного исследования)" Новосибирск Излательство Сибирского Отделения Российской Акалемии Наук, Россия (2006).

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

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

34 רמב"ם משנה תורה, הלכות ציצית ב, ה.

35 רש"י על מנחות מד ע"א.

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

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

וכביסה. אם נכניס את הצמר הצבוע ליורת תסיסה של שתן (המַחזר את האינדיגו, כלומר גורם לתגובה כימית להבהרת ותמיסת הצבע) לזמן קצר, הצבע יתמוסס משום שהוא אינו 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 החילזון על פי כתבי אריסטו

אריסטו מזהה את מקור הארגמן כ-αλουργεζ.[37] לפי התרגום לאנגלית הוא ה-*Murex*,[38] כלומר ארגמונים למיניהם. הספר המקורי של אריסטו לא נמצא, אך העתקות שלו נעשו בגרסאות שונות.[38] הספר תורגם לאנגלית לאחר שהארגמון זוהה[37] 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 לחדש את התכלת בעידן המודרני היה של האדמו"ר מראדזין (הרב גרשון 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.[26,39-41] למרות זאת חסידי ראדזין וחסידי ברסלב וגם חלק מתלמידי קרליבך משתמשים בתכלת של ראדזין. הזיהוי השגוי בניסיונו של האדמו"ר מראדזין מוכיח את הצורך בזהירות רבה בחידוש מסורת התכלת.[26]

הרב הרצוג סיכם את מסקנות שלו, והגיע למסקנה שמקור התכלת הוא חילזון אחר בשם 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.[14] מחקרו נשאר תיאורטי, ולא ידוע אם הוא אי פעם ניסה להפיק צבע מארגמון קהה-קוצים.

הארגמן והתכלת באים ממקור דומה. על־סמך ממצאים אָשׁוּריים, הגיעו חוקרים למסקנה שגוון התכלת הוא כחול ושל הארגמן הוא אדום ושני הצבעים הופקו ממקור דומה.[27,42] המחקר ההיסטורי, גילה שלושה סוגים של חלזונות ים (תרשים 1) ששימשו להפקת ארגמן: ארגמון חד־קוצים (*Bolinus brandaris*, ידוע גם בשמות *Murex brandaris*, purple dye murex

37 Αριστοτελογζ Περι Χρωματων IV, c. 330 BCE

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

39 ג. לרנר, "מאמר פתיל תכלת", דפוס חיים קעלטער, ווארשה, פולין, תרמ"ה.

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

41 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)

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

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

ארגמון קהה־קוצים (שידוע גם בשמות *Murex trunculus*, *Hexaplex trunculus* ו־spiny dye murex) וארגמונית אדומת־פה (שידועה גם בשמות *Thais haemastoma* ו־*Purpura haemastoma*) ו־banded dye-murex).[43-45] באיזור צור שבלבנון נמצאו ערימות קונכיות של ארגמון קהה־קוצים לבד וערימות נפרדות של תערובות של ארגמון חד־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 קהה־קוצים



ארגמונית אדומת־פה



ארגמון חד־קוצים



סגולית



דיונון הרוקחים

43 H. de Lacaze-Duthiers and A. Dedekind, "Lettres de Henri de Lacaze-Duthiers: adressees au Alexander Dedekind," Schleicher Freres, Paris, France, 1902

44 A. Dedekind, "Ein Beitrag zur Purpurkunde" **III**, 1908

45 W. Born, "Purpura Shell-Fish" *Ciba Rev.*, **1(4)**, 106-117 (1937)

46 A. Dedekind, "La pourpre verte et sa valeur pour l'interprètation des écrits des anciens" *Arch. Zool. Exp. Gén.*, **26**, (1898)

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

אדמת ארץ ישראל ברובה היא גירית, המגיבה בצורה אלקלינית (בסיסית — ההפך מחומצית) בעוד שחומצות תוקפות בעיקר מתכות, בסיסים או חומרים אלקליניים תוקפים חומרים אורגניים שונים ובכללם צמר). צמר מותקף, ניזוק 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

בארגמון קהה-קוצים נמצאים תחילונים (מחוללי ריאקציה) אינדוקסילים מהסוגים הבאים: אינוקסיל סולפט, 2-S-מתילאינדוקסיל סולפט, 6-ברומואינדוקסיל סולפט וכן 2-מתילסולפונט-6-ברומואינדיגוסולפט ביחס 4.5:0.5:3:2 (סכמה 1).[48] כתוצאה מכך כמחצית התחילונים כוללים ברום.[49] בתגובה עם אנזימים הנמצאים בבלוטה 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 משתנות[50-52] בגלל הבדלים בין החלזונות או בגלל בדיקת שרידי יורת התסיסה. ייתכן שהשינויים בכמות הברום ובצבע בין ארגמוני קהה־קוצים נובעים מגורמים שונים כמו גודל, מין, עונה או מקום מוצא.

בנוסף מיוצרים קצת אינדירובינים (סכמה 3).[53] לעומת זאת, ארגמון חד־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-ברומואינדיוגו נותן צבע סגול שהופך לכחול לאחר מספר חודשים בטמפרטורת החדר או מיד עם חימום.[54] בנוסף נמצאים כמויות קטנות של חומרי צבע אינדירובין[55-57] ותרכובות ברומואינדירובין.[58,59] לאינדירובינים

47 י. ידין "החיפושים אחר בר כוכבא" ע' 84-85, הוצאות ויידנפלד 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-preformance liquid chromatographic analysis of an ancient Tyrian purple dyeing vat from Israel", *Isr. J. Chem.*, **35**, 117-124 (1995)

52 J. Wouters and A. Verhecken, "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

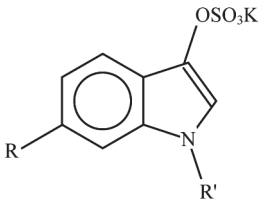
55 Z. C. Koren, "HPLC analysis of the natural scale insect, madder and indigoid dyes", *J. Soc. Dyers Colour.*, 110, 273-277 (1994)

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

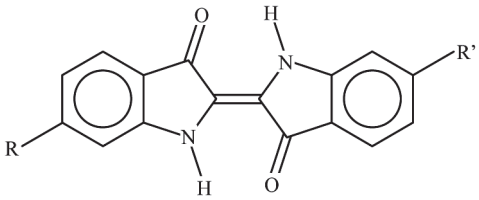
צבע אדום, אך בכמויות קטנות תרכובות אלה משפיעות רק מעט על הצבע הכללי.

סכמה 1. מבנה אינדוקסילים, תחילוני התכלת והארגמן שנמצאים בחילזון



אינוקסיל סולפט: R = R' = H
2-S-מתילאינדוקסיל סולפט: R = H, R' = SMe
6-ברומואינדוקסיל סולפט: R = Br, R' = H
2-מתילסולפונט-6-ברומואינדיגוסולפט: R = Br, R' = SO_2Me

סכמה 2. מבנה האינדיגוים



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

56 C. J. Cooksey, "Tyrian purple: 6,6' -dibromoindigo and related compounds", *Molecules*, 6, 736-769 (2001)

57 I. I. Ziderman, "Revival of Biblical Tekhelet Dyeing with Banded dye-Murex (Ph. trunculus): Chemical Anomalies", Dyes Hist. Archaeo. 16/17 87 (2001)

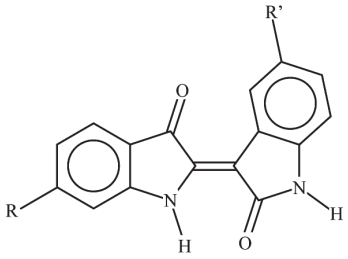
58 Z. C. Koren, "Archaeo-chemical analysis of Royal Purple on a Darius I stone jar", *Microchim.* Acta., 162, 381 (2008)

59 Z. C. Koren, "A new HPLC-PDA method for the analysis of Tyrian purple components", *Dyes Hist. Archaeo.*, 21 26-35 (2008)

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

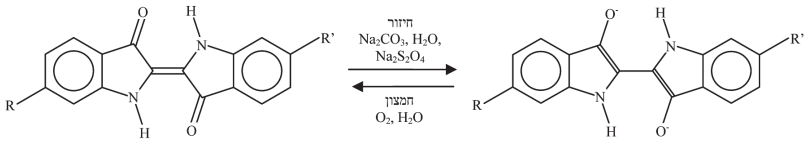
סכמה 3. מבנה האינדירובינים



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 אינו צובע חזק בתמיסה מימית. כל מתכון איכותי לצביעה באינדיגו מחזר (מוסיף אלקטרונים למולקולה) אותו ללוקואינדיגו, המעבד את הצבע ומתמוסס במים עם 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

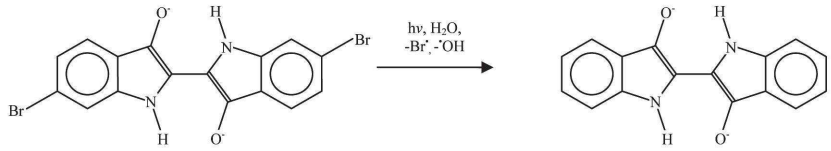
ברומואינדיגו הוא בגוון סגול ואינדיגו בגוון כחול. לצורך הפקת תכלת, כאשר נמצא הרבה ברומואינדיגו בצבע, יש להוציא את הברום מהמולקולה שבאה מהחילזון, וכך מקבלים גוון כחול במקום סגול. במצב המחוזר, ברומולוקואינדיגו מאבד את אטומי הברום שלו בחשיפה לאור חזק, תהליך שנקרא פוטודיברומינציה (סכמה 5).[60,61]

60 L. A. Driessen, “Über eine charakterische Reaction des antiken Purpurs auf der Faser”, *Melliand Textilberichte*, 26, 66 (1944)

61 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)

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.
© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author’s use and distribution only.

סכמה 5. פוטודיברובינציה של 6,6′-דיברומולוקואינדיגו



בגלל הכמות המוגבלת של הברום, הצבע המופק מארגמון קהה-קוצים כחול יותר מאשר זה המופק מארגמון חד־קוצים ומארגמונית אדומת־פה[40] 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 *Purpura persica*,[43] *Murex erinaceus*,[48] *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 ביורה

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 מהַיָם ותכולת בלוטות הצבע חשופה לאוויר.[65,64] בשיטה התעשייתית[66] 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

62 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

63 I. I. Ziderman, “Purple dyes made from shellfish in antiquity”, *Rev. Prog. Coloration*, 16, 46-53 (1986).

64 H. Fouquet and H.-J. Bielig, “Biological Precursors and Genesis of Tyrian-Purple”, *Angew. Chim. Int. Ed.*, 10, 816-817 (1971).

65 I. I. Ziderman, “Biblical dyes of animal origin”, *Chem. Brit.*, 22, 419-421 (1986).

66 E. Stein, *private communication*.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.
© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

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 שוויטרוויוס 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 ומונע חיזור. למרות זאת ניתן לחזר כמויות קטנות פי 3000 מהמנה התעשייתית מתחת לאטמוספרה של ארגון.[70]

לפי מתכון אחר[71] לאינדיגו ממיסים 6 ג׳ נתרן הידרוקסיד ו-9 ג׳ נתרן דיטיוניט טרי בליטר מים, מחממים לכ-55ºC 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-55ºC 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 שנזכר לעיל. בגלל שמשתמשים 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 7.5-9. אם הוא נמוך (חומצי) 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 ($Na_2S_2O_4$) שלא היו ידועים בעבר מעלה את השאלה איך צבעו את התכלת בימי קדם. תהליך הצביעה מתואר בגמרא:

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

68 B. Sterman, “The Meaning of Tekhelet”, *B’Or Hatorah*, XI, 185-195 (2001).

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

70 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)

71 J. N. Liles, “The art and craft of natural dying”, University of Tennessee Press, Knoxvile, TN, USA, 1990

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author’s use and distribution only.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

"אמר ליה אביי לרב שמואל בר רב יהודה: הא תכילתא היכי צבעיתו להה? אמר ליה: מייתינן דם חלזון וסמנין ורמינן להו ביורה [ומרתחינן ליה], ושקלינא פורתא בביעתא וטעמינן להו באודרא, ושדינן ליה ההוא ביעתא וקלינן ליה לאודרא".[72]

הגמרא מתארת יורת תסיסה שמוסיפים לתוכה חומרים ובודקים אם הצבע מוכן ע"י טעימה.

עתה נסקור את תהליך הפקת תכלת מארגמון קהה־קוצים בלבד בשיטות הקדומות כפי שמתוארות בספרות.[73,62,1] פלייני מתאר את תהליך הכנת הארגמן[74] שדומה להכנת התכלת. לשיטתו משתמשים בבלוטות של ארגמון 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 לתיאוריה שהיו משתמשים בארגמון קהה־קוצים לטבילה הראשונה וארגמון חד־קוצים ו/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 יורות 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 בד 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.lx.125-lxii.135 c 78.

74 Pliny, "Naturalis Hisotiæ" 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. 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)

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)

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

ג׳ נתרן פחמנט, 40 ג׳ סידן הידרוקסיד, 30 ג׳ פואת הצבעים יבש 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 הקדום 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 קורן[79] 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 חד־קוצים.[80] יש דעות שהצבע הסגול של קורן הוא הארגמן,[73] יש דעה שהוא התכלת[42,28,20] ויש דעה שהוא שלב ראשון לצביעה בארגמן. קורן[79] סבר שאם חושפים את הנוזל לאור, הצבע יהפוך לתכלת. למרות זאת כבר כמה שנים מנסים לייצר תכלת בתהליך הקדום 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 אלקלינית המעודדת חיידקים אלקאלופיליים (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 מיובש ובשר של שלושה *Nucella lapillus* או תערובת ארגמון קהה־קוצים וארגמון חד־קוצים לליטר מים. מוסיפים אלקאלי כדי להגיע ל-pH 9 ומחממים ל-50ºC למשך 10 ימים. הוא גילה שחשיפת היורה לאור אינה גורמת לשינוי הגוון, אבל אם מוציאים את הצמר לאור השמש, הצבע בחלק 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-הקוצים ומשאירים אותו 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-50ºC. בעבר השתמשו בבורית שהופקה

79 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)

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

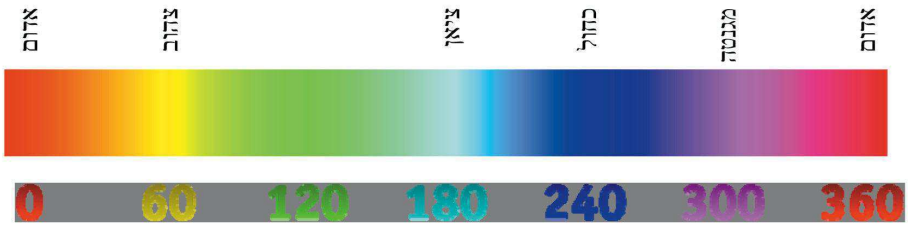
© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

משריפת אפר עצים. ניתן היה להשתמש בסיד או בנטרון שנמצא בתחתית אגמים יבשים במצרים, אך אפר נוצר מחימום היורה, ולכן סביר להניח שהשתמשו בו.[80] בעבר היו מעריכים את האלאקליות (דהיינו 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 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 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 במרחב הצבע HSB (גוון-הרוויה-בהירות).[81] הגוון נמדד במעלות כאשר ציאן הוא 180º, כחול הוא 240º, מגנטה הוא 300º, אדום הוא 0º (או 360º) וצהוב הוא 60º (תרשים 2). צביעה בעזרת דיתיונט עם תרכובות אינדיגו סינתטיות (תרשים 3) נותנת את הגוונים הבאים: ?203 עבור אינדיגו, 249º עבור 6-מונוברומואינדיגו (233º לאחר חימום, שינוי צבע שידוע מהספרות[54]) ו-318º עבור 6,6'-דיברומואינדיגו. גוון דגימה של תכלת תעשייתית המיוצרת ב-'פתיל תכלת' מארגמון קהה־קוצים הוא 203º, זהה לאינדיגו, כלומר, קצת יותר ציאן מצבע השמים. לשם השוואה, גוון התכלת של ראדזין הוא 206º, מאוד דומה לאינדיגו למרות היותו חומר שונה לגמרי. צבע היעד עבור תכלת הוא זה של השמים שמשתנים במשך היום. להלכה, לפי רבי יהודה בהקשר לראיית נגעים, בודקים צבעים בשעות זמניות ארבע, חמש, שמונה ותשע.[82] גוון השמים בשעות אלה הוא בין 208º ל-222º (בין ציאן וכחול). מדידת גוון הצמר באור יום בשעות אלה ומבזק אלקטרוני של מצלמה דומים לדיוק של 2º. לעומת זאת אור פלואורסנטי מסיט את הגוון בכ-15º.

תרשים 2. הזווית המיוחסת לגוונים במרחב צבע HSB



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

82 משנה נגעים ב,ב.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

תרשים 3. צבעי צמר עם אינדיגוים שונים



ביצענו כמה ניסיונות ביורת תסיסה עד שהצלחנו לצבוע צמר בתכלת.

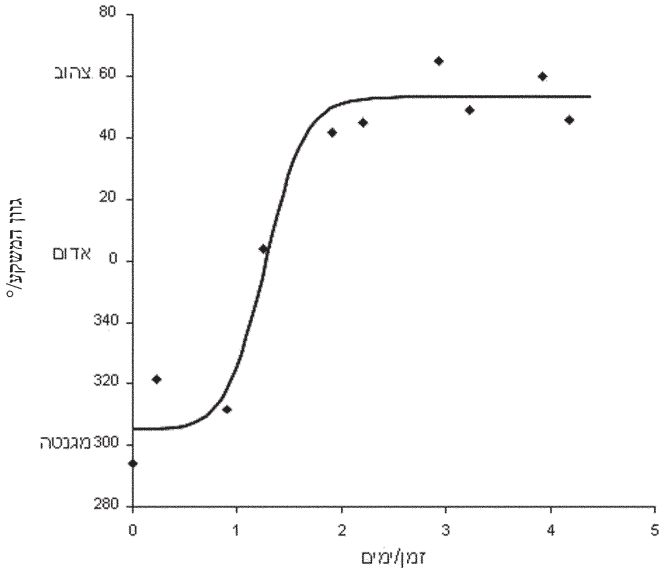
ניסוי 1. הוכנס דם חילזון מיובש (270 מ״ג המכילה כ-10% צבע מעורב בחומרים אחרים כמו בשר חילזון) לתוך 200 סמ״ק מים בטמפרטורה של 50°C, הוסיפו נתרן פחמנת לשמור על pH 9. אחרי ארבעה ימים לא היה כל שינוי וגם לא לאחר הוספת סוכר, בדומה למתכון ליורת איסטיס, בניסיון להפעיל תגובה ביולוגית. המסקנה היא שבשר חילזון מיובש 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 יום 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 2½ 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 מדיברומואינדיגו 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, שמנדף אינו מונע לגמרי מהסירחון להתפשט במעבדה).

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.
© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

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



[א]יורת התסיסה צולמה באור פלואורסנטי. הדגמה של דגימה בתמונות שונה כדי שאורך הגל הירוק תהיה 50%.

תרשים 5. יורת תסיסה של דם חילזון מחוזר מניסוי 2



© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.
© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

תרשים 6. צמר סגול מניסוי 2

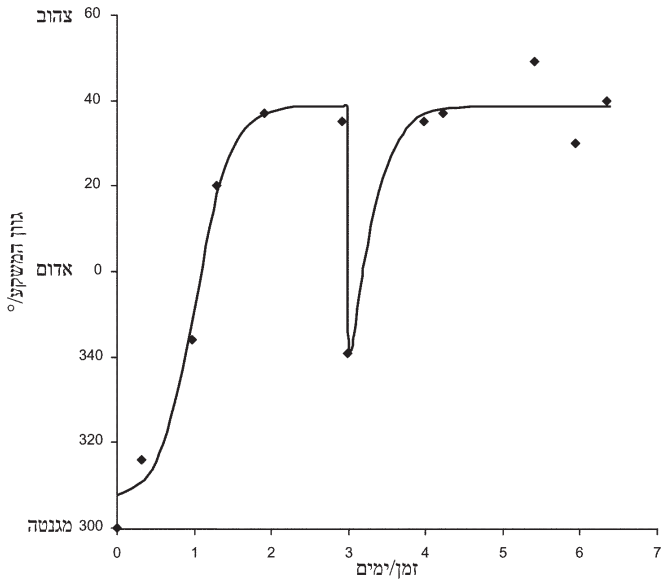


ניסוי 3. בשר 5 חלזונות (36 ג׳) וכ-15 בלוטות (27 ג׳) הוכנסו למים (250 סמ״ק) בטמפרטורה של 50°C. חשפו את התערובת לשמש ישירה לפחות 6 שעות ביום. הפעם השתמשו בכוס כימית רגילה עם כיסוי ניילון. הוסיפו תמיסה רוויה של נתרן פחמנת כדי להביא את ה-pH ל-9.0. פעמיים ביום הוסיפו תמיסה של נתרן פחמנת כדי לשמור על רמת ה-pH.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

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

תרשים 7. גוון[א] 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.



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

ניסוי 4. הוסיפו לאותה יורת תסיסה של ניסוי 3 בשר 5 חלזונות, 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 עוד 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 לדברומינציה 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 דיברומואינידיגו 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.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

תרשים 8. תוצאות הצביעה בניסוי 4 ו-5



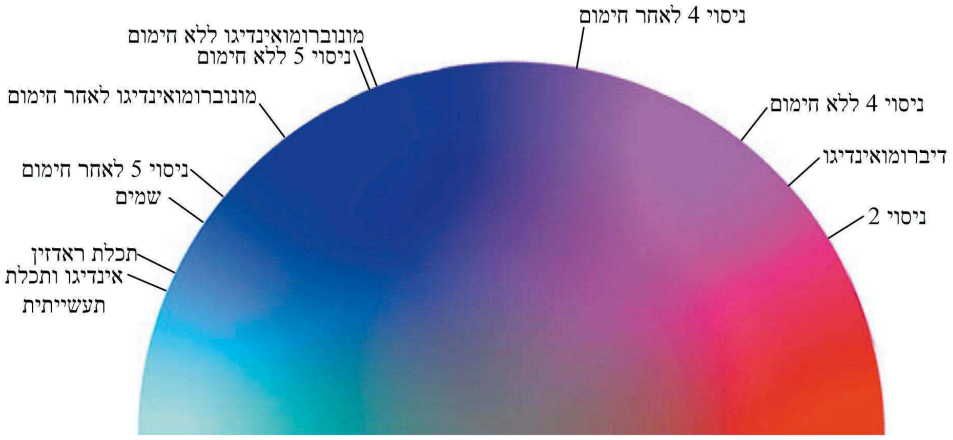
טבלה 1. גווני הצביעה

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

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.

© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

תרשים 9. מיקום גווני הצביעה על מעגל הצבע



ניסוי 5. הכניסו עוד 0.5 גר׳ צמר למשך 14 דקות, הוא יצא כחול אך לאט לאט הפך לגוון 248º (תרשים 8), קרוב לכחול עם קצת סגול, אחרי שטיפה וחימום באדי מים (קיטור) הצמר הפך לגוון 220º בין כחול וציאן. תרשים 10 מראה השוואה בין הצמר, צמר תכלת תעשייתית (גוון 203º) והשמים. בבדיקה בעין, הצבע דומה לשמים כדי להיחשב כפתיל תכלת כשר.[83,12] המסקנות: כדי לצבוע תכלת צריך להפחית את זמן הצביעה או/ו 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 שיורת 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.[54] לאור זה סביר להניח שצבע התכלת מכיל מונוברומואינדיגו והיו מחממים אותו כדי לקבל צבע כחול יציב.

יש דעות שהשימוש בטבילה שנייה פוסל את התכלת[84] אבל יש דיווחים שחילזונות 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 ד״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.

© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.
© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

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 ״יוהרא״ (גאווה) וכמו שהגמרא מציינת בקשר לתולה קלא אילן בבגדו ואומר תכלת היא[9] 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, לעניות דעתי, הגילוי מחדש של תהליך יורת התסיסה שדווח 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 צווי ישיר מהתורה כמו כל מצווה אחרת.

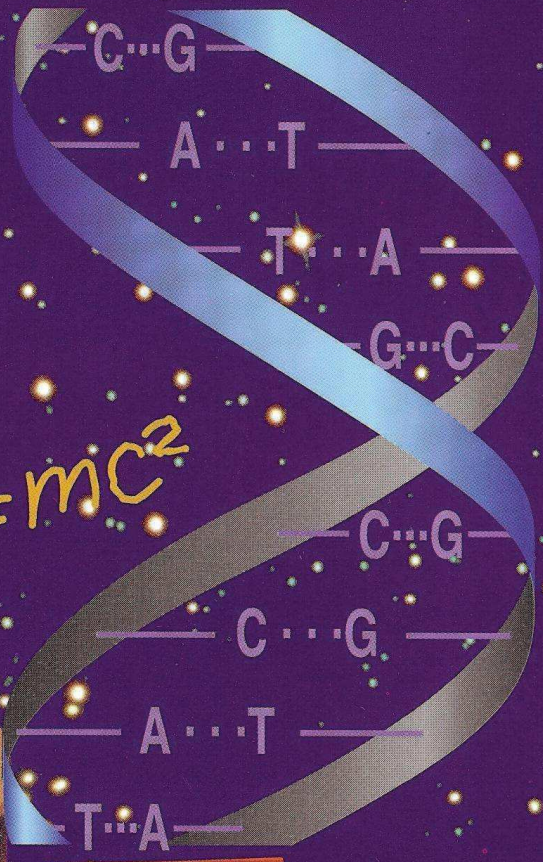
© הוצאת אוניברסיטת בר-אילן 2013. כל הזכויות שמורות. קובץ זה מיועד למחבר בלבד ורק הוא רשאי להעבירו או להפיצו.
© Copyright Bar-Ilan University Press 2013. All rights reserved. This PDF is for the author's use and distribution only.

בדד

בכל דרכיך דעהו

כתב־עת לענייני תורה ומדע





$E=mc^2$



27
אדר תשע"ג

הוצאת אוניברסיטת בר־אילן



כתב־עת לענייני תורה ומדע

חוב׳ 27 - אדר תשע״ג

עורך
עלי מרצבך

הוצאת אוניברסיטת בר־אילן, רמת־גן

עורך: עלי מרצבך, המחלקה למתמטיקה, אוניברסיטת בר־אילן

עורכי משנה: דניאל שפרבר, המחלקה לתלמוד, אוניברסיטת בר־אילן
יהודה פרידלנדר, המחלקה לספרות עם־ישראל, אוניברסיטת בר־אילן

עורך קודם (גליונות 1-16): יחיאל דומב ז״ל

מערכת:

ישראל אומן — המרכז הבין־תחומי לחקר הרציונליות, האוניברסיטה העברית בירושלים
אהרן אנקר — הפקולטה למשפטים, אוניברסיטת בר־אילן
יוסף בודנהיימר — בית־ספר גבוה לטכנולוגיה (מכון לב), ירושלים
דניאל הרשקוביץ — הפקולטה למתמטיקה, הטכניון, חיפה
ארי זיבוטפסקי — המרכז הרב תחומי לחקר המוח על שם לסלי וסוזן גונדה (גולדשמיט), אוניברסיטת בר־אילן
יהושע ליברמן — בית־הספר למינהל עסקים, המכללה האקדמית נתניה
דוד לייזר — המחלקה לפסיכולוגיה, אוניברסיטת בן־גוריון בנגב
שוברט ספירו — היחידה ללימודי יסוד, אוניברסיטת בר־אילן
שמואל ספרן — המחלקה לחומרים ופני שטח, מכון ויצמן, רחובות
זהר עמר — המחלקה ללימודי ארץ־ישראל, אוניברסיטת בר־אילן
הלל פורסטנברג — המחלקה למתמטיקה, אוניברסיטת בר־אילן
דרור פיקסלר — הפקולטה להנדסה, אוניברסיטת בר־אילן
אריה פרימר — המחלקה לכימיה, אוניברסיטת בר־אילן
משה קופל — המחלקה למדעי המחשב, אוניברסיטת בר־אילן
אלכסנדר קליין — היחידה לסטטיסטיקה, אוניברסיטת בר־אילן
מנחם קלנר — המחלקה למדעי היהדות, אוניברסיטת חיפה
שבתי אברהם הכהן רפפורט — המכון הגבוה לתורה, אוניברסיטת בר־אילן
מאיר שוורץ — אגודת אנשי מדע שומרי תורה
יעקב שכטר — מכון הרב יוסף סולובייצ׳יק, בוסטון
שמואל שפרכר — המחלקה לכימיה, אוניברסיטת בר־אילן

ISSN 0793-3894

©
כל הזכויות שמורות לאוניברסיטת בר־אילן, רמת־גן

אין להעתיק חוברת זו או קטעים ממנה בשום צורה ובשום אמצעי אלקטרוני, מגנטי או מכאני (לרבות צילום, מיזעור והקלטה) ללא אישור בכתב מהמו״ל

נדפס בישראל תשע״ג
דפוס אלפא, ת״א

תוכן העניינים

7 **רוי עמנואל הופמן:** זיהוי התכלת: ממצאים חדשים

29 **צבי וינברגר:** טהרת איל המושק וטהרת משפחת האיילונים — הצעה לזיהוי הארנבת והשפן

39 **יוסי זיו:** קרחה למת לאור מנהג ביתא ישראל

63 **ערן רביב:** לוח 213 ראשים

77 **אלכס טל:** למיון עדי הנוסח של התלמוד הבבלי — היבטים סטטיסטיים חדשים

101 **שלמה א׳ גליקסברג:** הרחקת מטרדים מודרניים — קריטריונים ותקנים

123 **יוסף קליין:** תרומתם של אמצעים חישוביים לליבון נוסח התנ״ך

תגובות

129 **מיכאל אברהם:** עוד בעניין תערו של אוקהאם

151 **מתן בנימין:** תגובה למיכאל אברהם

155 **אריאל כהן:** נקודת העיקר של הרמב״ם בהלכות קידוש החודש

163 **אריאל כהן:** תגובה להערותיו הנוספות של י׳ י׳ איידלר

165 תקצירים בעברית

חלק אנגלי

7 **גרשון אהרונוב:** הוכחה מתמטית לכדאיות צמצום ההוצאות בימי חול על מנת לאפשר יותר בשבת ״וקראת לשבת ענג לקדוש ה׳ מכבד״

17 **יוסף יצחק איידלר:** המהפכה הגריגוריאנית של הלוח העברי

הצגת ספרים

77 **יוסף יצחק איידלר:** הדפסה וירטואלית של שלושה ספרים של רפאל הלוי מהנובר

תגובות

93 **יוסף יצחק איידלר:** תגובה למאמר של אריאל כהן

99 **יוסף יצחק איידלר:** תגובה לתשובה של אריאל כהן

101 תקצירים באנגלית

רשימת המשתתפים

מיכאל אברהם, המכון הגבוה לתורה, אוניברסיטת בר־אילן

גרשון אהרונוב, המרכז האוניברסיטאי אריאל בשומרון

יוסף יצחק אוידלר, (מהנדס אזרחי) 141/3 chaussé de Charleroi, 1060 Brussels, Belgium

מתן בנימין, ישיבת הר עציון

שלמה א׳ גליקסברג, מכללת אפרת, מכון לנדר והפקולטה למשפטים, אוניברסיטת בר-אילן

רוי עמנואל הופמן, המכון לכימיה, האוניברסיטה העברית בירושלים

צבי וינברגר, בית הספר הגבוה לטכנולוגיה בירושלים

יוסי זיו, מכללת הרצוג ומכללת אורות ישראל

אלכס טל, החוג למחשבת ישראל, אוניברסיטת חיפה

אריאל כהן, המכון למדעי כדור-הארץ, האוניברסיטה העברית בירושלים

יוסף קליין, בית הספר לחינוך, אוניברסיטת בר-אילן

ערן רביב, המחלקה למתמטיקה, אוניברסיטת בר־אילן

הוכחה מתמטית לכדאיות צמצום ההוצאות בימי חול על מנת לאפשר יותר בשבת

וקראת לשבת ענג לקדוש ה׳ מכבד

גרשון אהרונוב

אנו מוכיחים בצורה מתמטית — במודל כלכלי של עקומת הביקוש בשיפוע שלילי — כי טוב יותר לצרכנים לצמצם צריכת אוכל בימי חול כדי שתהיה אפשרות לצרוך יותר אוכל בשבת! בכך אנו מקיימים וקראת לשבת ענג לקדוש ה׳ מכבד (ישעיהו נ״ח, י״ג) וגם ״למי שהשעה דחוקה לו ביותר על כן צריך לצמצם בשאר ימים כדי לכבד השבת״ (שו״ע אורח חיים סימן רמ״ב).

התיזה של המאמר באה מכתבי כלכלן אמריקאי פרופ׳ ג׳ון מ. קלרק (1884–1963) שאומר שכלכלנים צריכים להמליץ על דרכים לגרום להגברת השיא של מחזורי עסקים.

במודל במאמר קיימות שתי קבוצות: ספקים (יצרנים) וצרכנים (משקי בית). הצרכנים קונים סלים תקניים של אוכל, סל לאדם ליום, אוכל טרי כמו בשר, דגים, לחם, גבינות, ירקות, פירות, ושתייה — מיום ראשון עד יום חמישי — וביום שישי מנה נוספת לשבת. זה דומה למן שירד מן השמים לעם ישראל ארבעים שנה במדבר, עומר לגולגולת, מיום ראשון עד יום ששי כולל תוספת מנה ביום שישי. ירד מן ליומים ביום שישי ולא ירד מן בשבת שכתוב ראו כי ה׳ נתן לכם השבת על כן הוא נתן לכם ביום הששי לחם יומים שבו איש תחתיו אל יצא איש ממקמו ביום השביעי (שמות ט״ז כ״ט).

במודל יש שתי עקומות הביקוש: של ימי חול ושל שבת. עקומת הביקוש מראה מחיר מקסימלי שהצרכנים מוכנים לשלם בעבור כל מיני מספר סלי קניות ליום. עקומת הביקוש של שבת יותר גבוהה (לימין) משל עקומת הביקוש של ימי חול היות ולא עובדים בשבת וכל בני המשפחה אוכלים שלוש סעודות ביחד בבית בשבת.

במודל הצרכנים קונים סלי אוכל בשוק ומשלמים מחיר אחיד ליום לסל, מיום ראשון עד יום חמישי. ביום שישי יש מחיר לסל ליום שישי ומספר סלי קניות ליום שישי וגם מחיר לסל לשבת ומספר סלי קניות לשבת. הצרכנים רגישים למחירים במובן שבמחיר גבוה קונים מספר סלים נמוך יותר, ובמחיר נמוך קונים מספר סלים גדול יותר.

אנו מניחים במודל, שמחיר השוק לשבת יותר גבוה ממחיר השוק בימי חול כי עקומת הביקוש לשבת יותר גבוהה מעקומת הביקוש לימי חול. במודל אנו מעלים את המחיר בימי חול

(כדי שיהיה צמצום קניות בימי חול) ומורידים את המחיר לשבת (כדי שתהיה תוספת קניות לשבת).

קיימות שתי הנחות בסיסיות להוכחת המודל: שלפני ואחרי השינויים במחירים הצרכנים משלמים אותן הוצאות ומקבלים אותו מספר סלים בסך הכול בשבוע. אנו מוכיחים שהשיטה של הוספה למחיר של ימי חול והפחת למחיר של שבת עדיפה לצרכנים, שהיא נותנת יותר מרווח לצרכן, יותר הפרש בין מחיר שוק ועקומת הביקוש.

הוכחנו במודל שצרכנים מעדיפים צמצום אוכל בימי חול שגורם לתוספת אוכל לשבת באותם התשלומים בסך הכול בשבוע. אספקת היתר בשבת, השיא של המחזור, קובע ולא חשוב ששיא המחזור יום בשבוע כמו שבת או חודש אחד בשנה או שנה אחת בעשר או יותר שנים. הפוקוס תמיד צריך להיות על האספקה בזמן השיא.

המהפכה הגריגוריאנית של הלוח העברי

יוסף יצחק אייזדלר

הלוח העברי הוא לוח ירחי-שמשי. החודשים הם חודשים ירחיים בני 29 ו-30 יום והשנים הן בנות 12 ו-13 חודשים כדי לקרב, עד כדי שאפשר, בממוצע, את אורך השנה הטרופית.

בכל זאת, השנה היהודית הממוצעת ארוכה מהשנה הטרופית ב-6.658 דקות. ההפרש הקטן הזה הוא הסיבה להזזה איטית של הלוח העברי וחגיו ביחס לשנה השמשית ועונותיה לכיוון הקיץ.

אנחנו מוצאים, על בסיס של חקירה היסטורית, שהזזתו של הלוח העברי כבר הגיע היום ל-5.4 ימים. ההזזה הזאת היא חצי הזזתו של הלוח היוליאני בזמן המהפכה הגריגוריאנית בשנת 1582. לכן הזזתו של הלוח העברי ההולכת ומחמירה יכולה לעורר דאגה.

מטרת המאמר הזה היא להגיש שלושה פתרונות מספיקים כדי לשפר את הלוח העברי, לחקור אותם ביסודיות ולהשוות אותם ביניהם.

בנספח המתמטי אנחנו בודקים ומוכיחים את הנוסחאות היותר מתקדמות של הלוח העברי. אחרי-כן אנחנו מכלילים אותן כדי להרחיב שיטה מתמטית המאפשרת לחשב את קביעות השנים והקבלתן עם השנים הגריגוריאניות.

אנחנו צריכים לראות במאמר הזה ניתוח עיוני ומתמטי שעשוי לסייע לסנהדרין, כאשר תתחדש לפתור את בעית הזזתו של הלוח העברי.

המחקר הזה תואם את שיטתו של הרב בעל ה"חזון איש" הכותב על דברי רמב"ם בהלכות קידוש החודש (ה, ב) שאין להבין מתוך הרמב"ם שהלוח הנוכחי, עם כל פרטותיו, הוא בגדר הלכה למשה מסיני. אבל לחכמים יש רשות לעשות חשבון קבוע שעל פיו יסודרו השנים ויתאימו שנות החמה ושנות הלבנה.

BDD

Bekhol Derakhekha Daehu

Journal of Torah and Scholarship

No. 27 – March 2013

Editor

Ely Merzbach

BAR-ILAN UNIVERSITY PRESS, RAMAT GAN

Editor: Ely Merzbach, Mathematics Dept., Bar-Ilan University

Sub-Editors: Yehuda Friedlander, Dept. of Literature of the Jewish People, Bar-Ilan University
Daniel Sperber, Talmud Dept., Bar-Ilan University

Founding Editor: Cyril Domb, z"l

Editorial Board:

Zohar Amar	Dept. of Land of Israel Studies, Bar-Ilan University
Yisrael Aumann	The Center for the Study of Rationality, The Hebrew University of Jerusalem
Joseph S. Bodenheimer	Jerusalem College of Technology (Machon Lev)
Aharon Enker	Faculty of Law, Bar-Ilan University
Dror Fixler	Faculty of Engineering, Bar-Ilan University
Aryeh Frimer	Chemistry Dept., Bar-Ilan University
Hillel Furstenberg	Mathematics Dept., Bar-Ilan University
Daniel Hershkowitz	Mathematics Dept., Technion, Haifa
Menachem Kellner	Dept. of Jewish History and Thought, Haifa University
Alexander Klein	Statistics Unit, Bar-Ilan University
Moshe Koppel	Computer Science Dept., Bar-Ilan University
David Leiser	Dept. of Behavioral Sciences, Ben Gurion University of the Negev
Yehoshua Liebermann	School of Business Administration, Netanya Academic College
Shabtai Avraham Hacohen Rapaport	Institute for Advanced Torah Studies, Bar-Ilan University
Samuel Safran	Dept. of Materials and Interfaces, Weizmann Institute of Science, Rehovot
Jacob Schacter	Rabbi Joseph Soloveitchik Institute, Boston
Meir Schwartz	Israel Association of Orthodox Jewish Scientists
Shubert Spero	Basic Jewish Studies Dept., Bar-Ilan University
Milon Sprecher	Chemistry Dept., Bar-Ilan University
Ari Z. Zivotofsky	The Leslie and Susan Gonda (Goldschmied) Multidisciplinary Brain Research Center, Bar-Ilan University

ISSN 0793-3894

©

Copyright Bar-Ilan University, Ramat Gan

All rights reserved, including those of translation.
No part of this journal may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording, or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher.

Printed in Israel, 2013
Alpha Ltd., Tel Aviv

CONTENTS

7 **Gerald Aranoff:** A Mathematical Proof: *Call the Sabbath Delight, the Lord's Holy Day Honored* – Reducing Expenditure on Weekdays to Allow More for the Sabbath

17 **J. Jean Ajdler:** The Gregorian Revolution of the Jewish Calendar

Book Presentation

77 **J. Jean Ajdler:** Virtual Edition of Three New Books by Rafael Levi of Hanover Still in Manuscript

Comments

93 **J. Jean Ajdler:** Reaction to Ariel Cohen's Article, "How Maimonides Chose His Epoch. Clarifications Regarding the Astronomical Calculations in the Sanctification of the New Moon." (*B.D.D. 26*)

99 **J. Jean Ajdler:** A Reaction to Professor Cohen's Answer

101 English Abstracts

Hebrew Section

7 **Roy Emanuel Hoffman:** The Identity of *Tekhelet* (Biblical Blue Dye): New Findings

29 **Zvi Weinberger:** Identifying the Biblical *Arneveth* with the Musk-Deer and the *Shafan* with the Mouse-Deer: A Hypothesis

39 **Yossi Ziv:** Shaving the Head as Part of the Mourning Rites of the Beta Yisrael

63 **Eran Raviv:** 213-Row Table – A New Tool to Determine Type Percentages in the Hebrew Calendar

77 **Alex J. Tal:** Classification of Textual Witnesses of the Babylonian Talmud – New Statistical Aspects

101 **Shlomo E. Glicksberg:** Preventing Modern Nuisances – Criteria and Standards

123 **Joseph Klein:** Computational Tools for Identifying the Most Accurate Tenachic (Old Testament) Version

Comments

129 **Michael Abraham:** More on Okham's Principle

151 **Matan Benyamin:** A Reaction to Michael Abraham

155 **Ariel Cohen:** Maimonides' Main Point in his Laws of the Sanctification of the New Moon

163 **Ariel Cohen:** A Reaction to J. J. Ajdler's Additional Comments

165 Hebrew Abstracts

List of Contributors

Michael Abraham, Jesselson Institute for Advanced Torah Studies, Bar-Ilan University

J. Jean Ajdler, (civil engineer), 141/3 chaussé de Charleroi, 1060 Brussels, Belgium

Gerald Aranoff, Ariel University Center of Samaria

Matan Benyamin, Yeshivat Har Etzion

Ariel Cohen, Institute of Earth Sciences, The Hebrew University of Jerusalem

Shlomo E. Glicksberg, Michlelet Efrat, Lander Institute, and Department of Law, Bar-Ilan University

Roy Emanuel Hoffman, Institute of Chemistry, The Hebrew University of Jerusalem

Joseph Klein, School of Education, Bar-Ilan University

Eran Raviv, Department of Mathematics, Bar-Ilan University

Alex J. Tal, Department of Jewish Thought, University of Haifa

Zvi Weinberger, School of Engineering, Jerusalem College of Technology

Yossi Ziv, Herzog College, and Orot Israel Academic College of Education, Elkana-Rechovot

ENGLISH ABSTRACTS

THE IDENTITY OF *TEKHELET* (BIBLICAL BLUE DYE): NEW FINDINGS

Roy Emanuel Hoffman

The secret of the *tekhelet* (biblical blue) dye was lost long ago. Attempts to rediscover it have led to mistakes in the past, so that religious authorities are very wary of accepting its reintroduction. In this work, new findings are reported that resolve the remaining major objection, i.e. 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. We discuss the ramifications for religious law pertaining to the new findings reported here.

IDENTIFYING THE BIBLICAL *ARNEVETH* WITH THE MUSK-DEER AND THE *SHAFAN* WITH THE MOUSE-DEER: A HYPOTHESIS

Zvi Weinberger

The Torah identifies three animals that chew the cud but do not have split hooves: the camel, the *arneveth* and the *shafan* (Leviticus 11:4, 5, 6; Deuteronomy 12:7). Accepted translations of the Torah identify the *arneveth* with the hare and the *shafan* with the hyrax. However, neither hare nor hyrax chew cud in the ordinary sense. We propose that the biblical *arneveth* and *shafan* are not the animals known from contemporary parlance and common to modern Israel, but are rather animals not found in the Middle East.

We suggest that the *arneveth* corresponds to the musk-deer (Family *Moschidae*), native to Central Asia, and the *shafan* to the mouse-deer (Family *Tragulidae*), two genera of which are common to Southeast and South-Central Asia and a third to Central and West Africa. These animals are ruminants, and their feet have well-developed digits culminating in small individual hooves at the extreme of each digit, and not single split hooves on each foot.

The shape of a musk-deer resembles a large hare, and so does its running pattern. For these reasons, we associate the *arneveth* with the musk-deer. The mouse-deer, genus *tragulus*, finds shelter in rock crevices during the day – as attributed to the *shafan* in Psalms 104:18. For this reason, we associate the *shafan* with the mouse-deer.

However, our proposal has its own difficulties. If the musk-deer and mouse-deer were common in ancient biblical Israel, and have since become extinct, why have their skeletal remains not been discovered? Both families have an uncommon distinctive feature, large upper canine teeth. Climatic considerations also cast doubt on the existence of these families in ancient Israel. If the *shafan* was not common in Israel, why would David and Solomon have referred to the *shafan* in their verses if the mouse-deer had not been familiar to their audience in Israel? In spite of these difficulties, we advance our proposal that conforms to a straightforward interpretation of the Torah's description.

SHAVING THE HEAD AS PART OF THE MOURNING RITES OF THE BETA YISRAEL

Yossi Ziv

In the Beta Yisrael community (the Ethiopian Jews), it was customary for the relatives of the departed to shave their heads during the days of mourning. This custom is contrary to the explicit prohibition, written in the Torah and accepted as Jewish Law (Halakhah) in the rabbinical literature, of not removing one's hair as part of the mourning process. Nonetheless, a thorough reading of the sources reveals that there is considerable literary and archeological evidence that cutting the hair, in the context of mourning, was practiced by Jews and gentiles alike. Moreover, in many books of the Bible, as a minority opinion in the literature of the *Tana'im*, and as written by the commentators on the Bible who wrote in the Middle Ages, one finds explicit references to the custom of head-shaving as something well-known, permitted, and accepted.

It may be assumed that the Jewish People observed two opposing customs. The precise plucking of every hair on the mourner's head was a permitted and acceptable custom. The tearing out of hair from the scalp to the point of bleeding, in a frenzy of sorrow, is the custom prohibited by the Torah. When a person is beside himself with grief, the precise, careful plucking of hair can get out of control and become

an uncontrolled ripping of hair, scalp, and blood; the act proscribed by the Torah. For this reason, the rabbis put an end to this custom of plucking out the mourner's hair, and determined that the removal of the mourner's hair be prohibited in every way.

However, at the same time, Beta Yisrael had already been cut off from the main body of the Jewish people. They continued, therefore, to follow their ancient tradition: the careful removal of every hair on the mourner's head. In summary, we learn that acquainting ourselves with the customs of Beta Yisrael gives us new ways of understanding the development of Jewish Halakhah.

213-ROW TABLE – A NEW TOOL TO DETERMINE TYPE PERCENTAGES IN THE HEBREW CALENDAR

Eran Raviv

This paper is a continuation of an article that appeared in *B.D.D.* 22 entitled "Tablets and Tablet Shards – On *Molad* and their Characteristics." In the previous paper, we presented a new understanding related to the possibility of the *molad* of Tishre occurring in each of the *hakalim* of the week, which differs from the previous assumption.

As an addendum to the paper, we are presenting a new 213-row table, which can be used to create a *siman* for each type of year similar to that in the "61-row table." The new table adds an additional letter that indicates the type of *dechiya*.

The importance of this table is that it can be used as a precise and very accurate tool to calculate the prevalence and type of each *dechiya*.

We will analyze the table; explain the source of the number 213, and present additional implications of this new table.

CLASSIFICATION OF TEXTUAL WITNESSES OF THE BABYLONIAN TALMUD – NEW STATISTICAL ASPECTS

Alex J. Tal

Research on the textual variants of a classical text aspires to find genealogical relationships between extant witnesses and represent them in a stemmatic tree. Because of the great complexity of its creation and transmission history, it seems that this is not a realistic aim with regard to Talmudic literature. A more realistic aim is the exposure of mutual relationships between the textual witnesses and the discovery of different families of textual traditions.

This study is based on the textual variants of tractate Beitza from the Babylonian Talmud. Seven complete medieval manuscripts are extant for this tractate, and an equal number of partial ones that include more than ten percent of the complete text. Based on more than 850 variants, and aided by dedicated software, a distance matrix was constructed. A two-dimensional distance map was produced from this matrix by the MDS program PROXSCAL.

Analysis of this map led to the identification of a geographical axis, whose extremes represent the medieval Ashkenazi (German and French) and the Eastern textual traditions. Manuscripts with Spanish characterization are located between these two extremes. Parallel lines (simplex) were used to divide this map. In addition, it was found that a circumplex division is possible, and that the more complex – and therefore more original – manuscripts occupy the centers of the unconcentric circles. Thus, two facets were found – geographical and degree of complexity. Utilizing these new methods in the field of Talmudic philology is exceptionally challenging, in the way that it leads to new insights into the history of the textual traditions of the Babylonian Talmud.

PREVENTING MODERN NUISANCES – CRITERIA AND STANDARDS

Shlomo E. Glicksberg

Detailed laws regarding nuisances and how they should be prevented are included in the Mishnah. Throughout the generations, our scholars and decisors often dealt with changes to those nuisances, and with nuisances that for various reasons did not appear in the original collection. This article will investigate the different methodologies used in the past for making halakhic decisions regarding nuisances as new situations arose. These methodologies may lead the way today when approaching modern ecological hazards such as pollution and global warming.

COMPUTATIONAL TOOLS FOR IDENTIFYING THE MOST ACCURATE TENACHIC (OLD TESTAMENT) VERSION

Joseph Klein

Which versions of the Old Testament now in existence are most similar to the original? At what period did scholars arrange the internal division of the Pentateuch into five books, and the rest of the Old Testament into two sections? Without the original form, the textual differences between early versions have given rise to confusion. Today, attempts to find the correct form of the text are based on an examination of the early texts and the Massorah. The version based on the Aleppo Codex (*Keter Aram Zova*) and the Massorah is considered to be the most accurate. The present work discusses an independent computational method for determination of the period(s) in which the *Tenach* was divided into sections, books, and verses.