

יאיר פרנק, לביא שילר ודרור פיקסלר

הניסויים המדעיים לבחינת שאלת בליעה ופליטה בכלים

מבוכה גדולה קיימת בדורנו ביחס לשאלת בליעה ופליטה בכלים בני ימינו. לכאורה ניכר לעין שהמציאות אינה מתאימה להגדרות ההלכתיות. נראה שבכלים שלנו חבליעה אין בה כדי נתינת טעם, שכן פעמים רבות אנו משתמשים באותו סיר, ונדיר מאוד שטועמים בו אפילו טעם מועט של התבשיל הקודם. ברם, שאלה זו נותרה ללא הערכה מצד המדידות המדעיות. כותבי מאמר זה ביצעו עבודת מחקר וסידרת מדידות על מנת לבחון שאלה זו. הניסויים כוללים בדיקת משקל ובדיקת בליעה ופליטה של אטומים יונים לצד ניסוי חדש עם מולקולות פלואורסצנטיות. הראינו כי קיימת בליעה ופליטה בדגמים שנבדקו, ומכאן עולה כי גם מתכות וזכוכית המיוצרים כיום בולעות ופולטות. אמנם, שלושת הניסויים הראו כי שיעור הבליעה והפליטה בכל הדגמים קטן מאוד, למעט החרס שבה השיעור משמעותי וניכר. ברם, מהניסויים שבוצעו ניתן להסיק שהפליטה בכלי הבישול הרגילים היא קטנה מאוד, ואינה מתקרבת לשיעור אחד בשישים.

ישנם מישורים שבהם הדין נקבע על פי הגדרות הלכתיות בלבד ואין למדע מקום להתערב בהם כלל, ויש מישורים שבהם הדין נקבע על פי הגדרות הלכתיות ועם כל זה לברר את המציאות עד היכן שדינו מגעת.¹ הלכות הכשרת כלים נמנות עם ההלכות השייכות למישור השני וחז"ל בכל הדורות ערכו ניסויים על מנת לברר מעמדו ההלכתי של כלי חדש.² בין חכמי דורנו, קבע הרב דב ליאור: "אם יקבע על ידי המומחים שהמתכות שכימינו אינם בולעות, כמו זכוכית לשיטת חכמי ספרד, לא יהיה דין של טעם. חכמים דיברו על מציאות מסוימת שבה הכלים בולעים, אם המציאות שונה, הרי שעל זה הם לא דיברו". וחזר על דבריו: "מן הראוי שמדענים יבדקו עניין זה מבחינה מדעית, ואם הם יקבעו בצורה חד משמעית על סוגי כלים מסוימים שהם אינם בולעים – דינם יהיה כדין זכוכית. אולם זה צריך לבוא על

1 ראה מאמריהם של מ"ד הרב נחום אליעזר רבינוביץ, הערכה מדעית כיסוד לפסיקת הלכה, בספרו עיונים במשנתו של הרמב"ם, מעליות תשנ"ט עמ' קנד-קסא; פורסם קודם לכן בתחומין ת (תשמ"ז) עמ' 435-445; הרב יעקב אריאל בספרו "הלכה בימינו", מכון התורה והארץ תש"ע, בפרק "הלכה, מדע וטכנולוגיה" ובמאמרו בעניין בליעה ופליטה בכלים, המעין נגב, (תשע"ג), עמ' 90-93; ובמאמרו שימוש באופטיקה מודרנית בראיית הירח החדש, תחומין כג (תשס"ג) עמ' 298-309.

2 בפסחים ל, ב הגמרא דנה בכלים חדשים (מאגי דקוניא) שעל מנת לענות על השאלה האם ניתן להשתמש בהם בפסח אמימר בתן את הרכב הכלי וביצע בו ניסוי; ביחס למחלוקת בדין כלי זכוכית הרשב"א בהן את השאלה מהצד המעשי (שו"ת הרשב"א חלק א סימן רלג); הרדב"ז נשאל מה דינם של כלי חרסינה (פורצלן). על מנת לענות הוא ביצע שני ניסויים (שו"ת הרדב"ז חלק ג סימן תא); ועוד.

ידי קביעה חד משמעית ולא על ידי שמועות שונות מפה לאוזן.³ כותבי מאמר זה ביצעו עבודת מחקר וסידרת מדידות על מנת לברר האם יש בליעה ואם כן באיזו מידה, במגוון כלים שבשימוש בדורנו.⁴ הניסויים היו חזרה על ניסויים קודמים (משקל⁵ ויונים⁶) וכן ניסוי חדש עם מולקולות פלואורסצנטיות.

תכנון הניסויים

הדרך הישירה לבחון בליעה היא על ידי שינוי במשקל. בניסוי זה יש לקחת כלי חדש, שלא נעשה בו שימוש מעולם, ולבשל בו מאכל. אחר כך לרוקן את המאכל, לנקות את הכלי היטב, ולבחון האם השתנה המשקל של הכלי. אם הכלי עלה במשקלו הרי שהוא בלע. כך ניסת את מבנה הניסוי הרדכ"ז (שור"ת הרדב"ו חלק ג סימן תא): "הלבנתי אותה יפה ודקדקתי משקלה והשלכתי אותה לתוך קדריה של תבשיל עד חצי שעה ורחצתי אותה וניגבתי אותה יפה והשבתי אותה במשקל והוסיפה על משקלה הראשון כל דהו וזה ודאי מורה שהוא בולע".

מעבר לניסוי המשקל יש מקום לבחון בליעה בשיטות חדשות.

תהליכי הבליעה בלשון חז"ל, הדירת חומר אחד (נוזל או מוצק) לתוך חומר מוצק אחר, נקראים בשפה המדעית של היום דיפוזיה (פעפוע). אלא שלמעשה יש להכדיל בין שלושה סוגים של חדירה: (1) חדירה פוריית – חילחול של אטומים ומולקולות קטנות וגדולות לתוך חריצים מיקרוסקופיים קטנים בין הגבישונים מהם מורכבת דופן הכלי; (2) דיפוזיה תוך גבישית של אטומים לתוך הגבישים עצמם; (3) חדירה לתוך חריצים ופגמים של הכלי. יש להניח שרוב ככל הבליעה עליה דברו חז"ל עוסקת בסוג הראשון (חדירה פוריית), שכן היא כוללת אטומים ומולקולות גדולות יותר, תוך זמן חדירה קצר, וכן עומק חדירה גדול יותר

3 התשובה הראשונה נמצאת ב-<http://www.yeshiva.org.il/ask/?id=71715> והשנייה ב-<http://www.yeshiva.org.il/ask/?id=56591>. תמיכה עקרונית בכיוון זה ניתן למצוא במאמרו של הרב שאול בר אילן, המעין נד, ב (תשע"ד) עמ' 28-42.

4 הדברים פורסמו כעבודת מחקר לתואר שני, הרב יאיר פרנק, בחינת העקרונות ההלכתיים בבליעה ופליטה בכלים תוך השוואה לראליה, אוניברסיטת בר-אילן, רמת גן תשע"ג. המסקנות ההלכתיות העיקריות של העבודה פורסמו בתחומין לד (תשע"ד) "בליעה ופליטה בכלים לאור תוצאות המבחן המדעי" עמ' 113-129.

5 ניסיון של הרדב"ו לעיל הערה 2.

6 ניסוי של פרופ' מרדכי קניגסבוך יחד עם ש' שקורביאק מאוניברסיטת בר-אילן. תוצאות הניסוי הוצגו בהרצאה בע"פ בכנס הבינלאומי של אגודת אנשי מדע שומרי תורה ירושלים בסיון תשכ"ה. שנתיים לאחר מכן, הודפס מאמר שכותרתו – 'בליעה ופליטה', בחוברת הראשונה של האגודה הני"ל לקראת הכנס באב תשל"ל, ובה תמצית ההרצאה. כעבור למעלה מארבעים שנה, פרסם הרב ד"ר ישראל לוינגר מאמר באותו שם (המעין תשרי תשע"ג) ובו הביא את עיקרי הניסוי, בצירוף תוספות ומסקנות משלו. ניסוי נוסף שנערך על ידי הרבנים רועי סיטון ונריה גליק שבדקו TOC- Total Organic Carbon בכלי נירוסטה חכוכית. ניסוי זה עדיין לא פורסם ברבים ואנו למדנו ממנו מתוך שיחה עם עורכי הניסוי והמכתב שהם כתבו לרב דב ליאור, המכתב מתאריך טו אייר תשע"ג.

7 ראה W. Jost, *Diffusion in Solids, Liquids, Gases*, Academic Press, N.Y., 1962. וכן הרב ד"ר מרדכי הלפרין "האם ניתן להעזר בחוקי דיפוזיה במוצקים לזיהוי שרידי המזבח?", חידושי תורה @ NDS חוברת מס' 5 (תשס"ה) עמ' 12-25.

בכמה וכמה סדרי גודל מאותם פרמטרים (גודל, משך זמן הפעפוע ועומק הדירה) בתהליך הדיפוזיה התוך גבישית. כמו כן, החדירה הפורית יכולה להישטף ולהיעלם בקלות-יחסית (ובזה עוסק הכלל 'כבולעו כך פולטו'), לעומת דיפוזיה בה החומר התודר נשמר זמן רב יחסית בתוך הגבישים אליהם חדר, ואינו גפלט כמעט החוצה. בחדירה מן הסוג השני לוקח כמה עשרות שנים על מנת לחדור מ"מ בודד. הסוג השלישי תלוי בכלי. לא מצאנו שחז"ל חילקו בין כלי חדש וחלק לישן ומחורץ ולכן עלינו להניח כי מדובר בחדירה פורית.

על פי האמור כאן יש לבחון בליעה של אטומים או יונים בודדים (ואלו הניסויים שבוצעו בדורנו והוזכרו לעיל הערה 6) אך יש מקום לומר כי אין להתעלם מן המשמעות והמטרה שבהלכות ואפשרות יישומן. כלל גדול נקטו הפוסקים "התורה לא ניתנה למלאכי השרת". זאת אומרת, שהדרישה היא לשער את המציאות כפי יכולתם של בני אדם ואפילו כדורות הקדמונים. למשל, איסור שרצים ודאי שלא חל לפנים על חידקים שאינם נראים לעינים. ממילא גם היום, אף על פי שניתן לראותם במיקרוסקופ, עדיין מותרים הם כי מעולם לא נאסרו.⁸ כמו כן, אין לפסול תפילין של דורות הראשונים בגלל שמדידה מיקרוסקופית מגלה שאינם מרובעות בדיוק. על כרחך שההלכה למשה מסיני שתהיינה תפילין מרובעות אינה אלא שתהיינה להם זוויות כפי הנראה לעינים. ברם הניסויים שלעיל לא נעשו במולקולות גדולות אלא באטומים בלבד. גם בניסוי ה-TOC מבצעי הניסוי הניחו כי הפחמן הנמדד מבטא מדד לאחוז החומר הנבלע. אך בסופו של דבר מה שנמדד היה אחוז אטומי הפחמן, וזה אטום בודד שיתכן שהתפרק מהחומר שהתבשל ונבלע כאטום בכלי הבישול. יש מקום לטעון שכלל אין להתחשב בהם כשאלת הבליעה. לכן אנו ביקשנו מעבר לחזרה על ניסויי קודמינו להוסיף ולבחון גם מולקולות גדולות. במחקר זה בדקנו מולקולות ארומטיות מכיוון שמולקולות הטעם הן ארומטיות, ומכיוון שהיתה בידנו האפשרות לעשות להן הדמיה אופטית ישירה. למעשה בדקנו שהמולקולות נבלעו ונפלטו בשלמותם ולא התפרקו.

כיום ידועים שישה טעמים בסיסיים, כאשר כל אחד מהם מבוטא ע"י קבוצה או קבוצות של מולקולות בעלות תכונות מסוימות: (1) מתוק - ע"י מולקולות מהקבוצה הכימית של סוכרים. המולקולה שבחרנו דומה במבנה הכימי שלה לסוכרים, כך שדימינו בליעה של טעם מתוק (ראה לקמן ליד תרשים 6); (2) מלוח - ע"י מולקולות שכאשר הן מומסות בתמיסה הן מתפרקות ליונים. בעיקר נחרן כלוריד $NaCl$ (יונים קריטים בתפקוד תאים, לא רק נוירונים). בנוסף, גם קטיונים אחרים (כמו אשלגן או ליתיום) יכולים להעלות את תחושת המליחות, בעוצמה קצת פחות חזקה. ניסויי ה-pH שעשינו דימו טעם מלוח; (3) חמוץ - ע"י מולקולות שכאשר הן מומסות בתמיסה הן מתפרקות ליונים, שאחד מהם הוא מימן (כלומר, תמיסת עם ריכוז גבוה של מימן) - חומצות. ניסויי ה-pH שעשינו דימו טעם חמוץ; (4) מר - ע"י קבוצות חומרים שונות, בעיקר אלקלואידים, שכוללים מולקולות חנקן;

8 ראה למשל ערוך השלחן יורה דעה פד, לו; תפארת ישראל עבודה זרה פרק ב בועז אות ג; וכינת האדם שער או"ה לד. ועיין גם בקונטרס אחרון לטוב טעם ודעת מה"ת על הל' טריפות להר"ש קלוגר ז"ל לסימן נו תשובה נג; ו"אגרות משה" י"ד חלק ב סימן קמו עמ' רמח.

(5) **אוממי (Umami)** – בעיקר ע"י התומצה האמינית גלוטמט MSG⁹ (משמשת לסיתוזת של חלבונים), וחומצות אמינו אחרות. על כן הטעם משמש לזיהוי של חלבונים. MSG נמצא בעיקר במוצרים המגיעים מבעלי חיים – בשר, גבינה. לכאורה היה מקום לחפש מולקולות אלה שהן המאפיינות חלב/בשר¹⁰; (6) **שומני (Fat)** – ע"י חומצות שומניות. למעשה כיסונו שלושה סוגי טעמים (1-3) בניסויים שביצענו.

מבוא לניסויים המדעיים

הניסוי הראשון כלל בדיקה של בליעה ופליטה ע"י רמת pH בתמיסה מימית. הניסוי השני בחן את הבליעה והפליטה של חומר פלואורסצנטי. בשני הניסויים נעשתה גם בדיקת משקל לפני ואחרי הבליעה (כעין ניסוי של הרדב"ו)¹¹ שהיא למעשה ניסוי שלישי. על מנת לפשט את הכתיבה, הובאו שלבי ניסוי השקילה ותיאור תוצאותיו יחד עם שני הניסויים לעיל, כפי שגם בוצע בפועל, אך על מנת להדגיש את השוני בין החומרים איחדנו את כל תוצאות המשקל בגרף אחד. הניסויים בוצעו בתומרים המרכיבים כלים שימושיים כיום, בלא לנסות לשחזר את הכלים בהם דנו חז"ל.¹² לפני כל ניסוי הבאנו את הרקע המדעי להבנתו.

- 9 חומצה גלוטמית מקנה למזונות טעם נוסף על ארבעת הטעמים הבסיסיים 1-4. כשגולוטמט מרכיב עם יון נתרן מתקבל מונוסודיום גלוטמט (Monosodium Glutamate) בראשי תיבות: MSG.
- 10 שאלה שנותרת פתוחה היא מה מגדיר את האוכל מלהיות בשרי/חלבי, האם התומצות האמינו? האם החלבונים? שאלה זו משמעותית מאוד בתחום ההנדסה הגנטית. האם ניתן לקחת גן מתיה טמאה ולהכניס לצמח? ראה 'ילקוט יוסף' מצוות התלויות בארץ חלק ג, הלכות כלאים סימן רצה בהערה כ; אליעזר גולדשמידט ואריה מעוז, הנדסה גנטית בצמחים - רקע מדעי והיבטים הלכתיים, אסיא סה-סו (תשנ"ט).
- 11 לעיל הערה 2.
- 12 הרב איתם הנקין בתגובתו "האמנם יש משמעות לבריקות ולניסויים כעניין בליעה ופליטה בכלים בימנו", המעין נד, ב (תשע"ד) עמ' 89-94, טען שכל עוד לא בורקים שיש בליעה בכלים של חז"ל משמעות הניסויים שלנו מוגבלת. ראשית, מציאת הרכב החומרים כפי שהיו בזמן חז"ל מורכבת, ובכל מקרה לא תצא מגדר השערה. אנו ברקנו את הכלים בימינו, ע"פ כללי ההלכה הידועים לנו מדורי דורות, ואין לדין אלא מה שענינו רואות. הספק שהובא במאמר ש-"השתנו הטבעיים" ואדם כיום אינו חש טעמים כבעבר, אינו אלא השערה וספק בעלמא. יתרה מזאת, לו יצויר שהדברים נכונים, אכן יהיה לכך גם השלכה הלכתית, שהרי גדר האיסור הוא אכן טעם, וכפי שאדם חש אותו (אך כאמור, לדעתנו מדובר בספק בעלמא, ופשוט שהניסוי הראשוני שערך הרב הנקין בקרב בני משפחתו לא יכולה להוכיח זאת). עוד כתב הרב הנקין שיש פוסקים שהסתייגו מבחינת הכלים בעזרת החוש. אכן דבריו נכונים, ובעבודתנו הוצג כבר הנושא בהרחבה, אולם מסקנת הדברים שם הייתה שיש פוסקים רבים, ובכלל זה גם בדורות האחרונים, שראו בדרך בחינת הכלים על ידי החושים, ואף על ידי ניסויים, דרך הלכתית ראויה, ואין כאן המקום להציע את מלוא רוחב הדברים, והרצעה ייקחנו משם. גם הפוסקים שהתנגדו לכך, אפשר שכיום יסכימו, שכן אצל חלקם החשש היה שניסוי בכלי מסוים לא יכול לתת הכרעה חד משמעית ביחס לכלי אחר, שיוצר בארץ אחרת, ואפשר שהוא מורכב מתומרים אחרים (כך כתב בפירושו השדי חמד, וכפי שכתב כבר הרדב"ו בתמצית). כיום, התחום של ייצור החומרים והרכבם הוא הרבה יותר מסודר ושקוף, ויש תו תקן מדויק לכל חומר וחומר, וממילא חשש זה כמעט שאינו קיים. למרות האמור בתחילת הערה זו, כבוננתו, בהמשך למחקר זה, אכן לערוך ניסוי השוואתי בין תומרים כפי שהיו בזמן המקרא וחז"ל לבין החומרים בימינו, בעזרתם של מדענים מתחום המטלורגיה (=חקר תהליכי עיבוד והפקת מתכות במהלך הדורות), והמקבילה לכך ביחס לזכויות וחרס, ועוד חזון למועד.
- ביחס למחקרים שעסקו בכלי חז"ל ראה פרופ' יהושע בראנד, כלי החרס בספרות התלמוד, ירושלים

הניסויים המדעיים לבחינת שאלת בליעה ופליטה בכלים

על מנת לפשט את ביצוע הניסויים ולהגדיל את הדיוק בתוצאות, הניסויים לא בוצעו בכלים שלמים, אלא ב'דגמים' (קופונים), קרי – טבליות של החומרים השונים, בדרך כלל ברוחב ואורך של כ-3 ס"מ ובעובי של כ-3 מ"מ. במסגרת הניסוי נבחנו תשעה דגמים של חומרים (תמונת הדגמים להלן בתמונה 1 והערכים שלהם בטבלה 1 שבנספח):

(1) נחושת אלקטרוליטית UNS C11000 – נחושת מסחרית אשר עוברת תהליך זיקוק כימי חשמלי באלקטרוליזה לקבלת לוחות המכילות 99.9% נחושת. בתמונה 1 מסומן C.

(2) פליו C37700 – סגסוגת נחושת המכילה קרוב ל-40% Zn (אבץ) ו-2% Pb (עופרת). מסומן בתמונה 1 כ-CZ.

(3) פלדה פחמנית DIN ST-37 – פלדת¹³ מבנים בעלת חוזק בינוני מכילה פחמן בריכוז של עד 0.2%. מסומן בתמונה 1 כ-ST.

(4) פלדה בלתי מחלידה¹⁴ AISI 304 – שימושית מאוד בהכנת סירים וכלי בישול, מכילה כרום בריכוז 18%-20% ניקל בריכוז 8%-10.5% ומנגן בריכוז של כ-2%. מסומן בתמונה 1 כ-304.

(5) פלדה בלתי מחלידה¹⁵ AISI 316 – פלב"מ ממשפחת הנירוסטות האוסטיניטיות, מכילה כרום בריכוז 18%-16.5% ניקל בריכוז 12%-10.5% ומנגן בריכוז של כ-2%. בעלת תוספת של כ-3%-2 מוליבדניום. מסומן בתמונה 1 כ-316.

(6) אלומיניום. מסומן בתמונה 1 כ-A.

(7) זכוכית פיירקס¹⁵, נמצא בתמונה 1 למטה בצד שמאל.

(8) זכוכית רגילה¹⁶. נמצא בתמונה 1 למטה בצד ימין.

תשי"ג; כלי זכוכית בספרות התלמוד, ירושלים תשל"ח; פרופ' יוסף בורנהיימר, מטלורגיה של תקופת התלמוד: הברזל במקורות התלמודיים, בד"ד 4 (תשנ"ז) עמ' 21-6. ביחס למחקרים שעסקו בכלי מחכות וכלי חרס בתנ"ך ראה:

Martin Cooper, *Gold Silver Copper and Iron in the Old Testament*, Ann Arbor 1980;
James Kelso, *The Ceramic Vocabulary of the Old Testament*, New Haven 1948

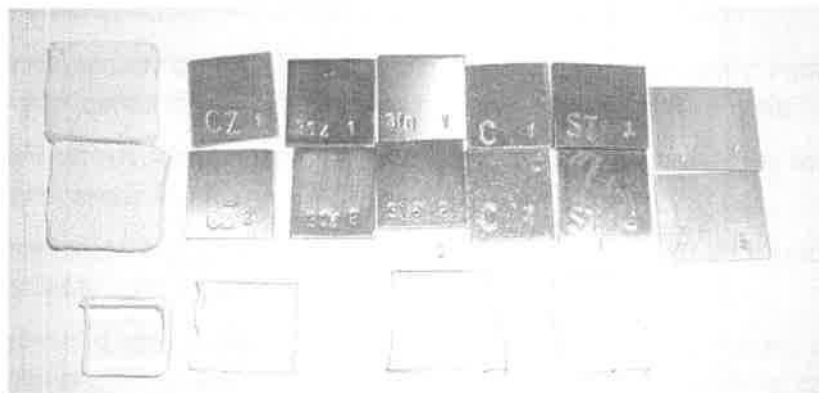
13 כל סוגי הפלדה הינם תרכובת שעיקרה ברזל (Fe), אחוזי פחמן (C), ועוד חומרים נוספים.

14 כלים מפלדה בלתי-מחלידה/ אל חלד (מכונים 'נירוסטה', שהוא בעצם שמו המסחרי של אחד מהסוגים שלה, וקיצור של פלב"מ בגרמנית) עוברים תהליך מיוחד המונע שתוך (קורוזיה). הם עשויים מסגסוגת ברזל אשר מכילה כרום (בכמות של לפחות 11.5% ממשקלה) היוצר שכבת פסיבציה של תלת-תחמוצת הכרום (Cr_2O_3) כאשר הכרום נחשף לחמצן. שכבה זו חדרה פחות למים ואוויר ממתכות אחרות, ולכן מגנה על המתכת שמתחתיה. להרחבה: <http://davidson.weizmann.ac.il/online/askexpert/> chemistry – איך מונעים מנירוסטה (פלדת אל חלד) להחליד.

15 כלי פיירקס/זורלקס (זכוכית בורוסיליקטית). זכוכית בורוסיליקטית מכילה חומרים נוספים, ובעיקר – תחמוצת בורון (B_2O_3) בכ-10% ממשקלה (ומכאן שמה), היוצרים יציבות גדולה יותר לחום. ועל כן, בניגוד לכלי זכוכית רגילים, ניתן להשתמש בזכוכית זו לבישול, ואף לאפייה.

16 בדגם זה נעשה ניסוי משקל וניסוי בבליעת ופליטת פלואורסצנציה בלבד.

9 חרס. בדגמים שנבדקו הרכב החרס היה - Cornish stone ;Lead bisilicate 62% ;China clay 3% ;Calcium Carbonate (Whiting) 5% ;30% נמצא בתמונה 1 למעלה מצד שמאל.



תמונה 1 – הדגמים

בשורה העליונה משמאל לימין (בסוגריים המספר ברשימה לעיל) – חרס (9), פליז (2), פלב"מ (AISI 304) (4), פלב"מ (AISI 316) (5), נחושת (1), פלדה (3), אלומיניום (6). בשורה התחתונה – זכוכית פיירקס (7), זכוכית רגילה (8).

בדיקת משקל - רקע מדעי

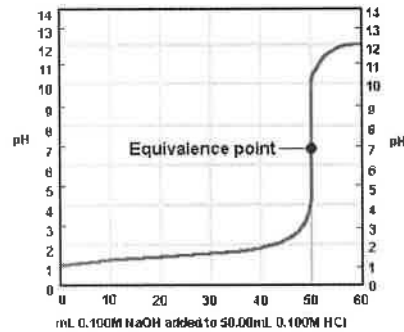
בניסוי זה נעשה שימוש במכשיר שקילה דיגיטלי, של חברת Sartorius (בניסוי הראשון דגם CP224S, ובניסוי השני דגם CPA225D). רמת הדיוק היא 0.1 מילי גרם (אחד חלקי העשרת אלפים של הגרם).

בדיקת בליעה ופליטה ע"י רמת pH בתמיסה מימית – רקע מדעי

pH (או ערך הגבה, pondus Hydrogeni) הוא מדד לרמת חומציות של תמיסה, המתבסס על ריכוזם של יוני ההידרוניום בה. הערך $pH=7$ מתייחס לרמת החומציות של מים מזוקקים, או תמיסה נייטרלית אחרת, דהיינו שריכוז יוני ההידרוניום (H_3O^+), שווה לריכוז יוני ההידרוקסיד (OH^-). ערכי pH הגבוהים מ-7 הם בסיסיים יותר, בהם ריכוז ה- H_3O^+ נמוך מריכוז ה- OH^- . ערכים נמוכים מ-7 מייצגים חומציות, ובהם ריכוז H_3O^+ גדול מריכוז OH^- . סולם הדרגות שבו נמדד ה-pH הוא לוגריתמי, כלומר ההבדל בין $pH=1$ ל- $pH=2$ הוא יחס ריכוזים של פי עשר¹⁷. להלן תרשים 1 המתאר את התלות הלוגריתמית של ה-pH בריכוז המומס (מימן כלורי HCl):

17 מגזורולה, עמנואל. עקרונות הכימיה ב, עמ' 873, חולון תשנ"ח.

הניסויים המדעיים לבחינת שאלת בליעה ופליטה בכלים



תרשים 1 – רמות pH כפונקציה של ריכוז חומצת מימן כלורי

מד pH דיגיטלי מבוסס על שינוי התכונות החשמליות של התמיסה בתלות בחומציות, ומאפשר מדידה ברמת דיוק של מאית יחידת pH. במסגרת ניסוי זה נעשה שימוש במד pH של חברת Metrohm דגם 692pH/ion meter, ובאלקטרודת pH סטנדרטית 3MKCl של אותה החברה. כמו כן נעשה שימוש במד של חברת Hanna instruments דגם pH 211, microprocessor pH meter עם רזולוציה של 0.01.

הרעיון בבדיקה זו היה לבחון בליעה של אטומים ויונים בודדים בחומר בדומה לניסויים שקדמונו (תוארו לעיל הערה 6). נעשה שימוש בשני סוגים של תמיסות:

(א) תמיסה חומצית - לתוך 500gr מים מטופלים הוכנס 7.3070gr חומצת מלח HCl 33%. אחרי פעולה זו נמדד ערך pH של 0.98.

(ב) תמיסה בסיסית - לתוך 500gr מים מטופלים הוכנס 7.9163gr סודה קאוסטית 48%NaOH. אחרי פעולה זו נמדד ערך pH של 12.27.

בדיקת בליעה ופליטה ע"י רמת pH בתמיסה מימית — שלבי הניסוי

הניסוי כולל בדיקה 'דו-כיוונית' של בליעה ופליטה. קרי - בליעה של מים בסיסיים, ופליטה לתוך מים עם pH ניטרלי (בניסוי זה - 7.65), וכן להיפך, בליעה של מים חומציים ופליטה לתוך מים. לאחר הפליטה נמדדה רמת ה-pH במים, כדי לבחון האם היה שינוי ברמת החומציות, המלמד על פליטה מהבלוע בכלי. מכל חומר הוכנו 4 דגמים, 2 עבור חשיפה לתמיסה חומצית ו-2 עבור חשיפה לתמיסה הבסיסית. כל הדגמים גמדו ונשקלו טרם תחילת ניסוי החשיפה.

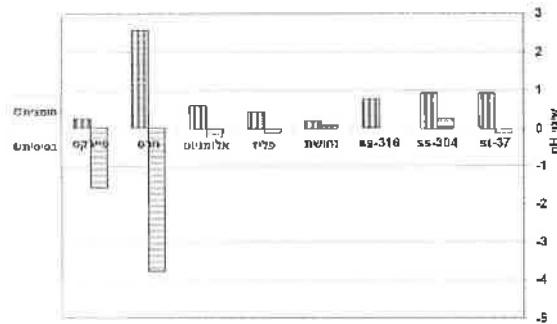
שלב א' - בליעה: לתוך כלי בישול מזכוכית הוכנסה התמיסה החומצית או הבסיסית וחוממה

תוצאות הניסוי — רמת ה-pH

השינוי ברמת ה-pH כפי שהתקבלה עבור הדגמים השונים מוצג בתרשים 3 (העמודה בצבע תכלת בקווים אופקיים עבור הדגמים אשר בושלו לפני כן בתמיסה החומצית, והעמודה בצבע בורדרו בקווים אנכיים עבור הדגמים אשר בושלו לפני כן בתמיסה הבסיסית). ה-pH של הסביבה לפני הפליטה היה 7.65.

מתוך התרשימים ניתן לראות כי קיים שינוי קל בלבד ברמת ה-pH עבור הדגמים אשר בושלו לפני כן בתמיסה החומצית. פרט לדגמי הפיירקס שהראו ירידה גדולה יותר ב-pH, דבר אשר מצביע על פליטה של חומר בלוע לתוך התמיסה הנקייה, וכל שכן דגמי החרס שהראו ירידה משמעותית ברמת ה-pH כתוצאה מפליטת חומר חומצי שהיה בלוע בדגמים.¹⁹

לעומת זאת, בכל הדגמים אשר בושלו לפני כן בתמיסה בסיסית ישנה עליה מובהקת ברמת ה-pH, כפרט - בשלושת דגמי הפלדה, וכל שכן בדגמי החרס שבהם נצפתה העלייה הגדולה ביותר. העלייה מצביעה על פליטה של חומר בסיסי שהיה בלוע בדגם.²⁰



תרשים 3 — שינוי pH בדגמים לאחר חשיפה לתמיסה חומצית ובסיסית

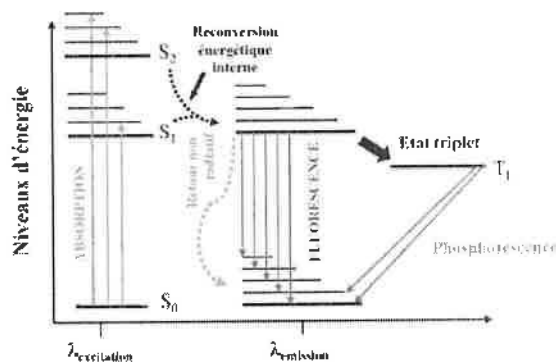
יש לציין את התוצאות של הנחושת וה-SS304 - שלמרות שהיו בסביבה חומצית הם הגיבו כבסיס. הדבר אינו מפתיע שכן חומרים אלו בעלי תכונה של תחמוצת (מוכרת כקורוזיה בחומר) ולמרות הסביבה החומצית במהלך הבליעה, הפליטה הייתה במים. המים היו בערך pH לא נטרלי אלא בסיסי (7.65) והחומר הגיב עם המים ופלט לכיוון הבסיסי. מכל מקום רואים כי הפליטה הבסיסית כאן נמוכה מהפליטה שהייתה כאשר החומר נבלע בתמיסה הבסיסית, הרי שהבסיס ניכר גם בניסוי זה. ניתן לבדוק את השערתנו בניסויים הבאים: (1) בדיקת הפליטה במים בעלי pH 7. במקרה זה אנו מצפים שלא תהיה פליטה לכיוון הבסיסי; (2) חזרה על הניסוי עם החומר ללא כל בליעה מוקדמת בסביבה חומצית. אנו נצפה לקבל פליטה בסיסית מכל מקום.

ניכר כי תמיסה בסיסית נבלעת ונפלטת יותר מחומצה, שנבלעת פחות, ככל הנראה בגלל העדפה מטענית של החומר. עובדה זו מסבירה את תוצאותיו של פרופ' מרדכי קניגסבוך (לעיל הערה 6) שלא זיהה פליטה, שכן החומר הרדיואקטיבי דומה ליוני H_3O^+ שלא ניכרת השפעתם באותה הצורה ליוני OH^- , והרי שהצלחנו ליישב את תוצאות ניסוינו, עם התוצאות שעלו ממחקר זה (קרינה רדיואקטיבית היא קרינת בטא. בניסוי בדק פרופ' קניגסבוך יוד, הפולט פוזיטרון - טעון חיובית).

התוצאות השונות בין התמיסות החומציות והבסיסיות אין בהם בכדי להפתיע ואלו למעשה שני ניסויים שונים.²¹

בדיקת בליעה ופליטה ע"י חומר פלואורסצנטי — רקע מדעי

קרינה פלואורסצנטית היא פליטה ספונטנית של אור ממולקולה הדועכת מהרמה המעוררת הראשונה לרמת היסוד (הרשים 4). בגלל המבנה המיוחד של מולקולת החומר יש הפרש אנרגיה בין הפוטון המעורר (הנקלט) לפוטון הנפלט. פלואורסצנציה היא האור הנפלט מהמולקולה כעקבות ערוור. הערוור גורם לאלקטרונים לעלות לרמת אנרגיה גבוהה ומסומן בתרשים כ- S_1), וכאשר הם יורדים חזרה לרמת היסוד (מסומן בתרשים כ- S_0), נפלט אור ברמת אנרגיה נמוכה מזו שקיבל האטום. על כן כשמאירים על חומר פלואורסצנטי באורך גל אחד - מוחזר אורך גל אחר, בדרך כלל גבוה יותר.



תרשים 4 – תהליך הערוור והפליטה של קרינה פלואורסצנטית

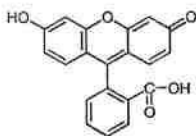
בתרשים 4 ציר ה-Y מבטא את רמת האנרגיה ביחס למצב היסוד של המולקולה. הקווים המלאים הצבעוניים (ירוק כחול ואדום) מתארים מעברים קרינתיים, כאשר הקווים הכחולים והאדומים מתארים פליטה של פוטון, והקווים הירוקים מתארים בליעה של פוטון. הקווים השבורים מתארים מעברים לא קרינתיים. משמאל: בליעה מרמת היסוד לרמות מעוררות. במרכז: מעבר מהמצב המעורר S_1 לרמת היסוד, המלווה בפליטת פוטון (תהליך הפלואורסצנציה). מימין: דעיכה מרמת טריפלט לרמת היסוד (תהליך פוספלואורסצנציה). תרשים זה מוכר בשם דיאגרמת יבלונסקי.²²

21 הערתו של הרב איתם הנקין (לעיל הערה 12) על הניסוי הנ"ל איננה נכונה. התוצאות אחידות ויש להשוות אותן ביחס אליהן ולא חומצה ביחס לבסיס. ראה מה שכתבנו בעניין באמונת עתיך 102 (תשע"ד) "האומנם אין בליעה בכלי גירוסטה?", עמ' 143-145.

22 Joseph Lakowicz. *Principles of Fluorescence Spectroscopy* (second edition). Kluwer Academic / Plenum Publishers, 1999.

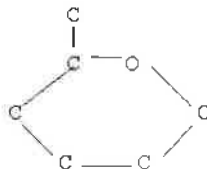
הניסויים המדעיים לבחינת שאלת בליעה ופליטה בכלים

במחקר זה נעשה שימוש בתמיסה פלואורסצנטית של פלואורסצאין²³ (Fluorescein) בריכוזי צבע שונים מננו מולר עד מילי מולר. נוסחת מולקולת הפלואורסצאין היא $C_{20}H_{12}O_5$, והמבנה שלה נתון בתרשים 5:



תרשים 5 – מבנה מולקולת הפלואורסצאין

מולקולת הפלואורסצאין היא מולקולה ארומטית והיא לא מולקולת שומן המאפינת מאכלים (גם בשר וגם חלב), אך הסיבות שבחרנו במולקולה זו הן: (1) מולקולת הטעם, שהיא עיקר העניין באיסורים, היא גם כן מולקולה ארומטית בדומה למולקולה שאנו כחרנו. לדוגמה בתרשים 6 ניתן לראות את התיאור הכימי של הגלוקוז בעל הטעם המתוק. המבנה שלו מאוד דומה למולקולת הפלואורסצאין (תרשים 5); (2) את מולקולת הפלואורסצאין ניתן לראות בכלים אופטיים בצורה ישירה; (3) רצינו לבדוק כי המולקולה נבלעת ונפלטת בשלמותה ולא מתפרקת תוך כדי התהליך. בכך שהיא המשכיכה לפלוט אור הרי שהיא נשארה בתפקודה גם אחרי הפליטה.



תרשים 6 – מבנה כימי של חד סוכר-גלוקוז

לצבע פלואורסצנטי זה יש רגישות ל-pH. רגישות זו באה לידי ביטוי גם בעוצמת הפלואורסצנציה וגם באורך גל הפליטה.²⁴ כך נוכל לבחון האם הוא נבלע/נפלט מהכלי, ובאיוזה ריכוז. הייחוד בניסוי זה הוא שהמולקולה הפלואורסצנטית גדולה בהרבה מהיונים

Dror Fixler. "Prelytic Stimulation of Target and Effector Cells Following Coujugation as Measured by Intracellular Fluorescein Fluorescence Polarization". *J. of Biomedical Optics*, 3:3 (1998) 312-325

Dror Fixler. "Influence of Fluorescence Anisotropy on Fluorescence Intensity and Lifetime Measurement: Theory, Simulations and Experiments". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 53, 6 June 2006

Dror Fixler. "Tracing apoptosis and Stimulation in Individual Cells by Fluorescence Intensity and Anisotropy Decay". *Journal of Biomedical Optics* 10(3), 034007 (May/June 2005).

במדירות רדיואקטיביות (שערך פרופ' מרדכי קניגסברך) ו-pH (שאנו ערכנו בסעיף הקודם). מולקולות אלה מדמות שומנים וחלבונים המצויים בחומרים שאנו אוכלים ומבשלים, וכך מדמים בצורה טובה יותר את שאלת הבליעה והפליטה בכלים. בעבודתנו בחנו את שינויי עוצמת הפלואורסצנציה ולא את שינוי אורך הגל (ניסוי שניתן להציעו כעבודת המשך). כמו כן בעקבות השימוש בחומר הפלואורסצנטי ניתן לבדוק האם מדובר בבליעה בכלי או רק בהיצמדות של החומר על פני דופן הכלי. על בסיס תכונת הזריחה של האור ניתן לבחון במיקרוסקופ פלואורסצנטי היצמדות של מולקולות על פני הכלי. קודם הניסוי נעשה כיוול של רמות עוצמת הפלואורסצנציה המוחזרת מפלואורסצאין. הכיוול התבצע בריכוזים שונים וידועים של פלואורסצאין, מרמה של 100% עבור ריכוז של 1mM עד רמה של 0.01% (ריכוז של 100 ננו מולר), כאשר בכל רמת ריכוז נבדקו ארבע עוצמות של קרינה שנמדדו על ידי הספקת הזרם מקור האור (DEL) – 100 mA; 250 mA; 0.5 A; 1 A. התמונות שצולמו נותחו בעזרת תוכנת Matlab, על ידי מטריצה אשר בדקה שש עשרה פעמים את עוצמת הקרינה²⁵ בתוך ריבוע של 4X4 פיקסלים, ומבין כולם הופק ממוצע. נמדדה קרינת 'רעש רקע', בעוצמה קרינה ממוצעת של 78 ± 2 , גם כאשר לא היה כלל חומר פלורסנטי. את טבלת הכיוול המפורטת ניתן למצוא בעבודה (לעיל הערה 4). יצויין כי התכונה הליניארית של הפלואורסצנציה הופיעה רק בריכוזי הצבע הנמוכים. בריכוזי הצבע הגבוהים, גם בעוצמת הארה נמוכה של 100 מילי אמפר וגם בעוצמת הארה גבוהה של 1 אמפר, העלאת ריכוז הצבע לא הגדילה את העוצמה באותו היחס.²⁶

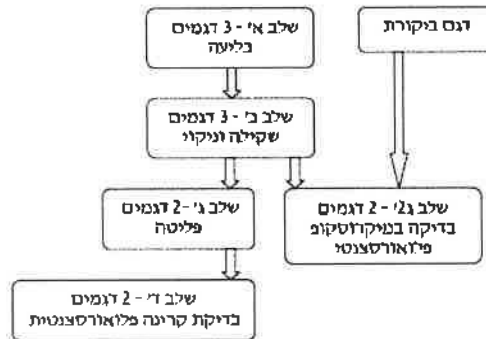
בדיקת בליעה ופליטה ע"י חומר פלואורסצנטי – שלבי הניסוי

מכל חומר מבנה הוכנו ארבעה דגמים. שלושה דגמים נמדדו ונשקלו טרם תחילת ניסוי. שלושת הדגמים עברו בליעה של החומר הפלורסנטי (שלב א') ושקילה (שלב ב'). שניים (מתוך השלושה) עברו בנוסף לכך פליטה לתוך מים מזוקקים (שלב ג'). המים נבדקו לאחר מכן לגילוי החומר הפלורסנטי על ידי קרינה פלואורסצנטית (שלב ד'). הדגם השלישי (שבלע ולא פלט) עבר במקביל בריקה היצונית על ידי מיקרוסקופ פלואורסצנטי המודד את עוצמת הפלואורסצנציה הנראית מהדגם עצמו (שלב ג'). הדגם רביעי לא עבר כל תהליך, שימש כדגם ביקורת, ונבדק אף הוא בעזרת המיקרוסקופ הפלואורסצנטי. תרשים 7 מסכם את שלבי הניסוי, ולאחריו תיאור מפורט של שלבי הניסוי.

25 עוצמת הקרינה נמדדת ביחידות שרירותיות (arbitrary units). כל פוטון שפוגע במצלמה מייצר זרם/מתח והיחידות הן שרירותיות מתוך מקסימום של מספר הביטים של המצלמה, במקרה זה מתוך 8 ביט (0-255). דיוק המדידה הוא 0.01.

26 על תופעה זו ראה מה שכתבנו בהרחבה: Aviram Gur, et al., "The Limitations of Nonlinear Fluorescence Effect in Super Resolution Microscopy System", *Journal of Fluorescence*, 21:3 (2011), 1075-1082.

הגייסויים המדעיים לבחינת שאלת בליעה ופליטה בכלים



תרשים 7 – תרשים זרימה מסכם של שלבי הניסוי הפלואורסצנטי

שלב א' – בליעה

החומר הפלורוסנטי, פלואורסצאין, בריכוז של 1mM, הורתח בתוך כלי זכוכית חדש עד שבעבע (נמדדה רתיחה של כ-96 מעלות צלסיוס). כל הדגמים הוכנסו לחומר המבעבע, ושהו בתוכו כ-20 דקות. בתמונה 2 ניתן לראות את שלב הבליעה של דגמי החרס והזכוכית.



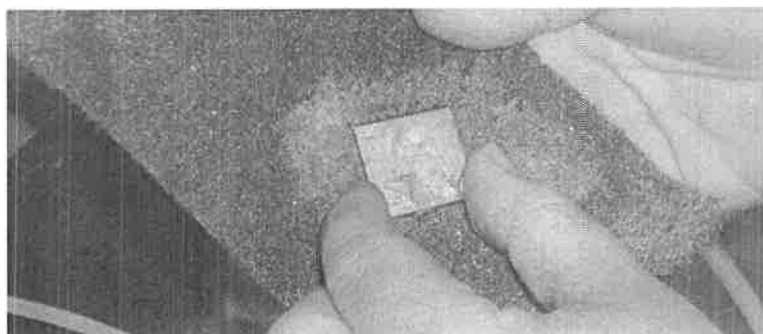
תמונה 2 – בליעה של החרס והזכוכית

שלב ב' – ניקוי ושקילה

הדגמים הוצאו מהכלי, נשטפו במים, נוקו בעזרת שפשוף בכרית לניקוי כלים (סקוצ') וסבון ביתית 27 לניקוי כלים של חברת סוד, ולאחר מכן נשטפו שוב במים מזוקקים. מיד לאחר מכן כל הדגמים נשקלו שוב. בתמונה 3 ניתן לראות את ניקוי דגם הפלדה הפחמנית.

27 בעשתה בדיקה מקדימה של הסבון עצמו ונמצא כי אין שום קרינה פלואורסצנטית ממנו.

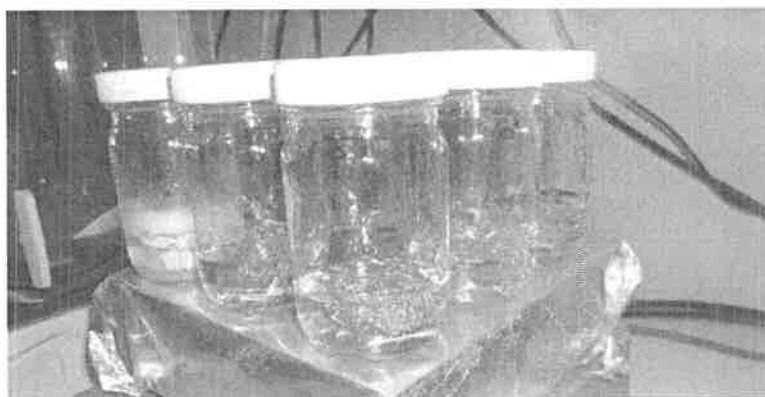
יאיר פרנק, לביא שילר ודרוד פיקסלר



תמונה 3 – ניקוי

שלב ג' – פליטה

שני דגמים מכל חומר הוכנסו לבקבוק זכוכית חדש (כל חומר לבקבוק אחר), ולתוכו הוכנסו 40 סמ"ק של מים מזוקקים (היחס בין נפח הדגמים למים הוא גדול הרבה יותר מכל יחס זהה בכלי בישול רגילים). המים הורתחו, והדגמים שהו שם תוך כדי רתיחה כ-20 דקות (תמונה 4).



תמונה 4 – פליטה

שלב ד' – בדיקת קרינה פלאורסצנטית

נלקחה דגימה מכל בקבוק (תמונה 5), אשר צולמה ברמות שונות של עוצמת הארה (עוצמת הזרם שנכנסה למקור האור): 250 mA; 100 mA; 0.5 A; 1 A. מקור האור היה LED של חברת ThorLabs באורך גל ערוור של 470 נ"מ דגם M470L2-C3. התמונות שצולמו על ידי מצלמת CCD דגם Dage MTI CCD72 שהייתה מחוברת למיקרוסקופ של חברת ניקון דגם Nikon eclipse TS100, נותחו בעזרת תוכנת Matlab, על ידי מטריצה אשר בדקה שש עשרה פעמים עוצמה של פיקסלים בתוך ריבוע של 4X4 פיקסלים, ומבין כולם הופק ממוצע.



תמונה 5 – בדיקת קרינה פלואורסצנטית

שלב ג' – בדיקה במיקרוסקופ פלואורסצנטי

הדגמים שעברו בליעה ללא פליטה (שלב א' וב' בלבד), וכן הדגמים שלא עברו כל תהליך (המשמשים כדגמי ביקורת) נבדקו תחת מיקרוסקופ פלואורסצנטי של חברת אולימפוס דגם IX-81 עם גלאי PMT רגיש במיוחד (HPD) Hybrid Photon Detectors של חברת Becker & Hickl דגם HPM-100-40, ונרשמה העוצמה הפלואורסצנטית הנראית מהדגם עצמו (במתכות וחרס - שטח הפנים, ובזכוכית שהיא שקופה גם מה שבתוכה).

תוצאות ניסוי השקילה של בדיקת בליעה ופליטה ע"י חומר פלואורסצנטי

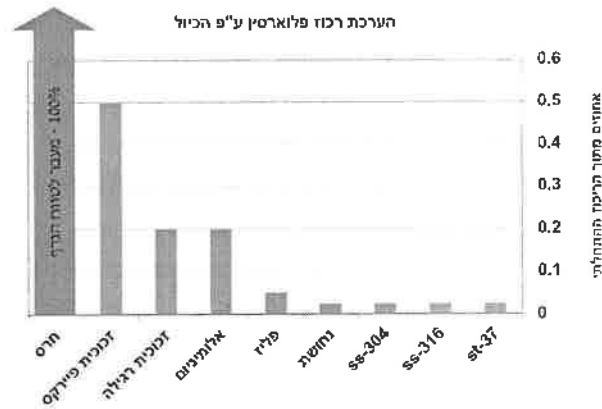
כל דגמי המתכות והזכוכית לא עברו שינוי משמעותי במשקלם לפני ואחרי הבליעה (הייתה ירידה מזערית במשקל, בערכים של פחות מאלפית הגרם, ככל הנראה מאיבוד חומר כתוצאה מהרתיחה). לעומת זאת, דגמי החרס עלו מאוד במשקלם, למעלה מ-1 גרם, כ-9%-10% ממשקלם המקורי. עלייה זו מבטאת באופן ברור בליעה. התוצאות הובאו לעיל בתרשים 2 עמודה צהובה. בטבלה 2 (שבנספח למאמר) מפורט ההפרש המשקלי (בגרמים).

תוצאות הניסוי – קרינה פלואורסצנטית

בדיקת שטח הפנים בעזרת המיקרוסקופ הפלואורסצנטי העלתה שאין שינוי בעוצמת הפלואורסצנציה בין דגמי המתכות שעברו בליעה, לבין אלו שלא עברו בליעה. הדבר מוכיח שהניקיון של דגמים אלו הועיל, וכי הם נקיים משאריות של פלואורסצאין עליהם. מאידך, בדגמי הזכוכית כן נרשמה עליה. עבור הזכוכית הרגילה: בדגם ביקורת ללא בישול 120 ± 5 פוטונים לשניה, ובדגם אחרי הבישול 150 ± 10 פוטונים לשניה. מדובר בעליה של 20%. עבור זכוכית פיירקס: בדגם ביקורת ללא בישול 130 ± 8 פוטונים לשניה, ובדגם אחרי הבישול 170 ± 12 פוטונים לשניה. עליה של כ-23%. כנראה הסיבה היא שהזכוכית שקופה ולכן מדידות אלה כוללות את הפלואורסצאין הבלוע בתוכה, וממילא השינוי מוכיח שאכן יש בליעה. הן דגמי המתכת והן דגמי הזכוכית חלקים, ואין סיבה שהניקיון הועיל במתכת ולא בזכוכית. עוד עולה שזכוכית פיירקס כולעת מעט יותר מזכוכית רגילה.

גם בדגמי חרס היה שינוי משמעותי: בדגם ביקורת ללא כישול 150 ± 20 פוטונים לשניה, ובדגם אחרי הבישול 260 ± 40 פוטונים לשניה. עליה של יותר מ-40%. חרס הינו חומר אטום לקרינה בתחום הנראה (אור), וממילא הבדל זה מורה על שאריות פלואורסצאין על פני הדגם. הסיבה היא שחרס הינו מחוספס, והניקיון שנעשה כנראה לא הוריד את שאריות הפלואורסצאין בצורה מיטבית.

הבדיקה של המים המזוקקים שלתוכם התבצעה הפליטה מראה שבכל הדגמים הייתה פליטה של פלואורסצאין למים, כשיעורים שונים (למעט הפלדה הפחמנית, שבה הפליטה היא כבר קרובה לרעש הרקע, ואין פליטה מוכחת). השיעור הגבוה ביותר הוא של החרס. כמו כן, התגלה שבאופן כללי שני סוגי הזכוכית פלטו יותר מאשר המתכות, למעט אלומיניום שפלט בדומה לזכוכית הרגילה. הפליטה של המתכות האחרות היא קטנה מאוד (שכן אנו מודדים את הקרינה מעבר לרעש הרקע, שהוא כאמור לעיל 78) אך קיימת. לתוצאה זו אפשר לתת שני הסברים: ניתן להסיק מכאן שזכוכית אכן בולעת יותר מאשר מתכות גם בימינו. אולם, לאמתו של דבר אין הדבר מוכרח לגמרי, שהרי, אפשר ללמוד מבאן רק שזכוכית פולטת יותר בלבד, אך אפשר באופן תיאורטי לומר שהמתכות בולעות יותר אך פולטות פחות. על מנת לברר שאלה זו יש לבצע בדיקה בתוך המתכת. כמו כן, לאור תוצאות אלו נראה שזכוכית פיירקס פולטת מעט יותר מאשר זכוכית רגילה.²⁸ בנספח בטבלה 3 נתון שיעורי עוצמת הפלואורסנציה בכל הדגמים, ולצדם ההערכה של אחוז הפלוארסין מתוך ריכוז של 1 mM לפי מה שעלה בכיול. גרף של הנתונים מובא בתרשים 8 (יש לשים לב כי הריכוז בחרס הוא – 100%, פי כמה וכמה מכל השאר, אך הגרף הותאם לפי הערכים של רוב החומרים שנבדקו).



תרשים 8 – הערכת ריכוז פלוארסין

28 אמנם, נפח זכוכית הפיירקס בניסוי היה גדול יותר מהזכוכית הרגילה (זכוכית הפיירקס עבה יותר), ואפשר לתלות את ההבדל בכך, ולא בהבדל החומר.

כאמור לעיל, נפח הדגמים ביחס למים בניסוי הוא גדול הרבה יותר מכל כלי בישול רגיל. הנפח הממוצע של הדגמים הוא כ-2.7 סמ"ק לכל דגם. בניסוי הוכנסו שני דגמים (כ-5.4 סמ"ק) ל-40 סמ"ק מים, וממילא היחס הוא בערך אחד לשבע וחצי.²⁹ לעומת זאת, בכלי בישול ביתיים רגילים היחס בין נפח החומר לבין התכולה הוא בדרך כלל בין אחד לחמש עשרה לאחד לשלושים³⁰ (תלוי בעובי דפנות הסיר וגודלו). מהניסוי עולה שבכל הדגמים, למעט החרס, הפליטה הקיימת היא קטנה מאוד (כפי הגתונים שבטבלה 3 שבנספח), ועל כן יש להסיק שכל שכן שהפליטה בכלי הבישול הרגילים היא קטנה, ואינה מתקרבת כלל לשיעור אחד בשישים.

סיכום ומסקנות

מהניסויים עולה כי:

- א) הן ניסוי ה-pH (בייחוד החשיפה לתמיסה בסיסית) והן ניסוי הקרינה מראים כי קיימת בליעה ופליטה בדגמים שנוסו, ומכאן עולה כי גם מתכות וזכוכית המיוצרות כיום בולעות ופולטות.
- ב) אמנם, שלושת הניסויים הראו כי שיעור הבליעה והפליטה בכל הדגמים קטן מאוד, למעט החרס שבה השיעור משמעותי וניכר. ראשית, שני ניסויי המשקל, שכאמור היו מדויקים מאוד (אחד חלקי העשרת אלפים של הגרם), הראו שבעוד שהחרס העלה באופן ברור במשקלו (כ-9% ממשקלו), בשאר הדגמים לא היה שינוי משמעותי (ואדרכה הייתה בהם ירידה מינורית מהמשקל, ככל הנראה בגלל תהליך הרתיחה בדגמים חדשים שהוריד מעט מהחומר). גם בשני הניסויים האחרים, שכאמור בסעיף א' הראו שאכן קיימת פליטה מסוימת גם בשאר הדגמים, הראו שקיים הבדל משמעותי ביניהם ובין החרס.
- ג) בניסוי הקרינה (שיש בו יותר ללמד על אתווי הפליטה היחסיים) נפח הדגמים ביחס למים בשלב הפליטה היה גדול הרבה יותר מכל כלי בישול רגיל. אף על פי כן בכל הדגמים, למעט החרס, הפליטה הקיימת הייתה קטנה, והכילה פחות מאחוז מריכוז הצבע ההתחלתי, וברוב הדגמים הרבה פחות מכך (פחות מעשירית האחוז). ועל כן יש להסיק שכל שכן שהפליטה בכלי הבישול הרגילים היא קטנה מאוד, ואינה מתקרבת לשיעור אחד בשישים.
- ד) בניסוי הקרינה ובניסוי ה-pH (חשיפה לתמיסה חומצית) הזכוכית פלטה יותר באופן מובהק מסוגי המתכות השונים. אמנם, כחשיפה לתמיסה בסיסית המתכות, ובייחוד הפלדות השונות, פלטו יותר מהזכוכית.

29 בהנחה שרוב הבליעה היא בשטח הפנים הסמוך לחומר, הרי שנתון זה גדול עוד יותר. שכן בסיר רגיל רק הפנים הפנימיות חשופות באופן ישיר לגבלע שבתוכו. לעומת זאת, בניסוי הדגמים שהו בתוך החומר, ואף היו מחולקים לשני דגמים נפרדים. ועל כן, שטח הפנים שלהם היה גדול הרבה יותר משטח פנים בסיר תיאורטי בעל נפח תומר וזה.

30 מדובר בסירי מטבח ביתיים. בסירים גדולים, וכפרט המצויים במטבחים ציבוריים היחס יכול להיות גדול יותר.

המחקר המתואר לעיל הוא רק פתיחה לניסויים נוספים שיש לשקול לעשות. ניתן להציע את הניסויים הבאים:

(א) הגדרת בליעה/פליטה שאין לה חשיבות כלל מבחינה הלכתית: ניסוי שבו תהיה פליטה של בליעה לתוך כלי ממוצע, ולאחר מכן אידוי/הוצאת המים. האם הפליטה (=האיסור) נראית בעין?

(ב) כנ"ל: ניסוי שיבדוק את כמות הבליעה במאכל קר. לבליעה זו בוודאי אין משמעות הלכתית, שהרי חז"ל לא הצריכו הגעלה במאכל קר, אלא ניקוי בלבד (אם לא הייתה כבישה של מעט לעת).

(ג) ניסויים בכלי מתכות שהיו בזמן חז"ל והראשונים (ראה לעיל הערה 12), או דוגמתן, והשוואת תוצאות הניסויים בכלים בימינו.

(ד) ניסויים בחומרים נוספים של כלים שלא נבדקו, השכיחים במטבח המודרני. כגון: חרסינה מצופה בגלזורה, פלסטיק, סיליקון, טפלון וכיוצ"ב.

(ה) עריכת ניסויים מקבילים בכלים ישנים (ולא בקופונים חדשים) שיש בהם שריטות וכיוצ"ב. האם הבליעה משתנה בכלים אלו בצורה משמעותית? האם הבליעה משתנה כתוצאה מטופוגרפית פני השטח?

(ו) בחינת בליעה ופליטה של מולקולות שומן ולא מולקולות ארומטיות. יש לאתר שיטת גילוי למולקולות השומן, ולנסות באמצעות כלי זה לבדוק את מידת הבליעה והפליטה של מולקולות שלמות הנשארות פונקציונאליות גם אחרי תהליך הפליטה.

מכל מקום, אין בדברים הללו בכדי לקבוע עמדה הלכתית בנושא. את המחקר השלם הבאנו לפתחם של כמה מפוסקי ההלכה בדורנו והם חיוו את דעתם.³¹ יש שראו בכך דבר חדש גם מהצד ההלכתי³² ויש שטענו שאין בניסויים הללו בכדי לשנות משהו מעולם ההלכה³³, ואנו לא באנו אלא לפתוח את הנושא לדיון על בסיס העובדות שסיכמנו לעיל.

נספח – התוצאות בטבלאות

בנספח מובאות שלוש טבלאות בהן התוצאות שהתקבלו בניסויים השונים. טבלה 1 כוללת נתונים כללים של הקופונים עליהם בוצעו הניסויים וכן תוצאות ניסוי המשקל וה-pH. טבלה 2 מסכמת את ניסוי המשקל. טבלה 3 מסכמת את תוצאות מדידת הפלואורסנציה והערכת ריכוז הפלואורסצאין שנפלס לתמיסה.

31 חוות הדעת פורסמו במאמרנו "בליעה ופליטה בכלים לאור תוצאות המבחן המדעי", לעיל הערה 4.

32 כך דעתם של מו"ד הרב נחום אליעזר רבינוביץ והרב דוב ליאור.

33 כך דעתם של הרב יעקב אריאל והרב אשר זליג וייס.

טבלה 1 - טבלת נתונים כללית ניסוי משקל ו-Hp

הפרש מתוצאות המים (7.65)	pH לאחר פליטה	חשיפה חומצי	הפרש באחוזים למשקל	ממוצע הפרש משקלי	הפרש משקלי	משקל אחרי [גרם]	משקל לפני [גרם]	עובי [מח"מ]	רוחב [מח"מ]	אורך [מח"מ]	מס' דגם	חומר
-0.11	7.54	חומצי	-0.162	-0.0273	-0.0346	21.3192	21.3538	2.9	31.03	30.54	ST 37 1	st-37
			-0.0923		-0.02	21.6525	21.6725	2.86	31.03	30.85	ST 37 2	
0.92	8.57	בסיסי	-0.0032	-0.0009	-0.0007	22.1107	22.1114	2.89	31.89	30.4	ST 37 3	
			-0.0049		-0.0011	22.5079	22.509	2.86	31.02	32.04	ST 37 4	ss-304
0.26	7.91	חומצי	-0.006	-0.0008	-0.0009	15.1178	15.1187	1.89	31.19	32.65	304L 1	
			-0.0049		-0.0007	14.1647	14.1654	1.86	30.81	31.19	304L 2	
0.5	8.15	בסיסי	-0.0008	0.0000	-0.0001	13.3237	13.3238	1.88	30.87	28.96	304L 3	ss-316
			0.0007		0.0001	14.5613	14.5612	1.87	30.8	31.69	304L 4	
0	7.65	חומצי	-0.0018	-0.0004	-0.0004	21.9384	21.9388	2.9	31.01	31.06	316L 1	
			-0.0019		-0.0004	21.31	21.3104	2.89	30.02	31.13	316L 2	נחושת
0.76	8.41	בסיסי	0.0005	0.0000	0.0001	21.8233	21.8232	2.88	30.84	30.78	316L 3	
			0		0	21.6734	21.6734	2.87	30.3	31.15	316L 4	
0.08	7.73	חומצי	-0.0031	-0.0007	-0.0008	25.4143	25.4151	3.01	30.91	31.59	C 1	נחושת
			-0.0024		-0.0006	25.4387	25.4393	2.97	31.15	31.11	C 2	
0.19	7.84	בסיסי	-0.002	-0.0008	-0.0005	25.3794	25.3799	3.04	30.74	31.62	C 3	
			-0.0039		-0.001	25.4395	25.4405	2.91	31.71	30.98	C 4	

הניסויים המדעיים לבחינת שאלת בליעה ופליטה בכלים

טבלה 1 - טבלת נתונים כללית ניסוי משקל ו-Hp (המשד)

תור	מס' דגם	אורך [מחמ]	רוחב [מחמ]	עובי [מחמ]	משקל לפני [גפ]	משקל אחרי [גפ]	הפרש משקל	הפרש משקל	ממוצע הפרש משקלי	התפרש באחוזים לתשקל	חשיפה	Hp לאחר פליטה	תפרש ממוצעות המים (7.65)	פליז	
														Z	הפרש
פליז	Z 1	30.74	30.43	2.9	23.0322	23.0301	-0.0021	-0.0014	-0.0091	חומצי	7.53	-0.12			
	Z 2	30.1	31.19	2.83	22.691	22.6903	-0.0007	-0.0031	-0.0031						
	Z 3	30.86	30.44	2.96	23.2642	23.2618	-0.0024	-0.0023	-0.0103	ביסי	8.09	0.44			
	Z 4	30.12	30.94	2.97	22.6961	22.6939	-0.0022	-0.0022	-0.0097						
אלומיניום	Al 1	29.94	31.46	2.13	5.0187	4.967	-0.0517	-0.0422	-1.0301	חומצי	7.43	-0.21			
	Al 2	29.7	29.9	2.05	4.7779	4.7452	-0.0327	-0.0327	-0.6844						
	Al 3	31.41	29.96	2.05	5.0209	4.8568	-0.1641	-0.1581	-3.2683	ביסי	8.25	0.61			
	Al 4	30.45	30.19	2.1	4.8679	4.7158	-0.1521	-0.1521	-3.1246						
תוס	A	31.32	30.93	5.24	8.6381	9.4299	0.7918	0.7372	9.1664	חומצי	3.87	-3.78			
	C	30.57	30	5.22	8.137	8.8196	0.6826	0.6826	8.3888						
	D	31.94	29.87	4.93	8.1332	8.8115	0.6783	0.6777	8.3399	ביסי	10.21	2.57			
	F	32.17	30.99	4.98	8.2859	8.9629	0.677	0.677	8.1705						
זכוכית	1	28.5	23.58	1.9	9.7058	9.7051	-0.0007	-0.0004	-0.0072	חומצי	6.07	-1.58			
	2	28.16	23.7	2.05	9.3281	9.3279	-0.0002	-0.0021	-0.0021						
	3	29.94	23.74	2.1	10.2423	10.0081	-0.2342	0.0005	-2.2866	ביסי	7.88	0.24			
	4	28.38	23.83	2.06	9.6495	9.65	0.0005	0.0005	0.0052						

יאיז פרנק, לבניא שילר ודרור פיקסלר

הניסויים המדעיים לבחינת שאלת בליעה ופליטה בכלים

טבלה 2 - הפרש המשקל

הפרש באחוזים מהמשקל	ממוצע	הפרש משקלי	משקל אחרי [g]	משקל לפני [g]	מס' דגם	חומר
-0.00051	0	-0.0001	19.4625	19.4626	ST 1	st-37
0		0	18.8901	18.8901	ST 2	
0.001058		0.0002	18.9099	18.9097	ST 3	
0	0	0	7.1902	7.1902	304 1	ss-304
-0.00157		-0.0001	6.3811	6.3812	304 2	
-0.00146		-0.0001	6.8676	6.8677	304 3	
0	0	0	13.5478	13.5478	316 1	ss-316
-0.00077		-0.0001	13.0294	13.0295	316 2	
0		0	12.5196	12.5196	316 3	
-0.00135	-0.0002	-0.0002	14.8611	14.8613	C 1	נחושת
-0.00199		-0.0003	15.1083	15.1086	C 2	
-0.00121		-0.0002	16.4992	16.4994	c3	
-0.00362	-0.0003	-0.0005	13.829	13.8295	CZ 1	פליז
-0.00074		-0.0001	13.6051	13.6052	CZ 2	
-0.00224		-0.0003	13.3982	13.3985	CZ3	
-0.00513	-0.0001	-0.0002	3.8995	3.8997	AI 1	אלומניום
-0.00761		-0.0003	3.9426	3.9429	AI 2	
0.002526		0.0001	3.9593	3.9592	AI3	
9.620069	1.1566	1.1255	12.825	11.6995	1	חרס
9.560845		1.0368	11.881	10.8442	2	
10.65909		1.3075	13.574	12.2665	3	
-0.00447	-0.0004	-0.0003	6.7087	6.709	1	פיירקס
-0.01128		-0.0005	4.4311	4.4316	2	
-0.01003		-0.0005	4.9866	4.9871	3	
0	-0.0001	0	1.5369	1.5369	1	זכוכית רגילה
-0.01346		-0.0002	1.4858	1.486	2	
-0.00588		-0.0001	1.6994	1.6995	3	

יאיר פרנק, לביא שילר ודרור פיקסלר

טבלה 3 - עוצמת הפלואורסנציה והערכת ריכוז הפלואורסצאין

הערכת ריכוז הצבע ע"פ הכיול	הערכת ריכוז פלואורסצאין ע"פ הכיול	100mA	250mA	500mA	1000mA	
250 ננו מולר	0.025% FI	80.69	80.75	80.69	81.69	st-37
250 ננו מולר	0.025% FI	82.19	83.12	84.56	91.56	ss-316
250 ננו מולר	0.025% FI	82.87	84	85.5	86.75	ss-304
250 ננו מולר	0.025% FI	80.56	81.81	81.81	84.69	נחושת
500 ננו מולר	0.05% FI	83.89	84.31	91.56	100.62	פליז
2 מיקרו מולר	0.2% FI	98	121.19	148.31	163.12	אלומיניום
2 מיקרו מולר	0.2% FI	100.87	129.31	151.25	158.25	זכוכית רגילה
10-5 מיקרו מולר	0.5-1% FI	121.44	167.44	181.31	187	זכוכית פיירקס
1 mM	100% FI	200.44	198.94	201.31	196.18	חרס