Chromatic Excretion

A Multi-Parameter Pharmacokinetic and Colorimetric Analysis of
Dietary Pigment Transit and Faecal Chromatics in the Human Gastrointestinal Tract

Journal of Applied Gastrointestinal Chromatics — Vol. 1, No. 1

Nissim Deri • Yarden Tziar

הפרשה כרומטית

203.3763 — Orchestration of AI Agents
Instructor: Dr. Yoram Segal
University of Haifa
June 2, 2026

Contents

1 תקציר **3**

2 מבוא **3**

3 רקע: כימיה של פיגמנטים **4**
3.1 מחלקות כרומופורים . . . 4
3.2 יציבות ה-betanin ב-pH . . . 4
3.3 מנגנוני הפיגמנטציה הצואתית . . . 4
3.4 סיכום הכרומופורים . . . 4

4 פרמטרים של צואה וסולם בריסטול **5**
4.1 סולם הצואה של Bristol . . . 5
4.2 חומציות צואתית (pH) . . . 5
4.3 תכולת מים ומרקם . . . 5
4.4 אפיון רב-משתני . . . 5

5 מודל פרמקוקינטי של מעבר פיגמנט לומינלי **6**
5.1 משוואת מאזן המסה . . . 6
5.2 חוק Beer–Lambert וצבע הצואה . . . 6
5.3 חוק Fick לדיפוזיה . . . 7
5.4 זמן המעבר הלומינלי . . . 7
5.5 הנחות המודל . . . 7

6 כימות קולורימטרי של צואה **8**
6.1 מרחב הצבע CIELAB . . . 8
6.2 נוסחת CIEDE2000 . . . 8
6.3 שיטות מדידה לצבע הצואה . . . 8

7 חומציות הצואה ויציבות הפיגמנט **8**

8 מדד כרומטי רב-משתני לצואה **10**
8.1 הגדרת ה-FCI . . . 10
8.2 נרמול הרכיבים . . . 10
8.3 טווחי פרשנות . . . 10

9 שיטות **11**
9.1 מדגם . . . 11
9.2 מתן betanin מבוקר . . . 11
9.3 איסוף דגימות צואה . . . 11
9.4 מדידת פרמטרים . . . 11
9.5 תוכנית סטטיסטית . . . 11

10 תוצאות **11**
10.1 שכיחות צבע הצואה לפי תת-קבוצה . . . 11
10.2 כפונקציית מנה ΔE . . . 11
10.3 זמן מעבר והתפלגות טיפוסי Bristol . . . 11
10.4 השפעת ה-pH הצואתי . . . 12
10.5 סיכום ממצאים . . . 12

11 ניתוח רב-משתני **12**
11.1 מטריצת המתאמים . . . 12
11.2 ניתוח רכיבים ראשיים (PCA) . . . 13
11.3 מדד הכרומטיקה הצואתית (FCI) . . . 13
11.4 דיון . . . 13

12 דיון **13**

13 מסקנות והשלכות **14**

14 סיכום **15**

1 תקציר

מטרת מחקר זה היא לבחון כיצד פיגמנטים תזונתיים משנים את צבע הצואה ופרמטרים צואתיים נוספים. פיתחנו מודל מאוחד פרמקוקינטי (pharmacokinetic) וקולורימטרי להערכת השפעת הפיגמנטים על הכרומטיקה של הצואה, ובכלל זה מדד רב-משתני לכרומטיקה צואתית (Faecal Chromatics Index, FCI) המשלב מדידות צבע לפי CIEDE2000, מרקם לפי סולם הצואה של Bristol, חומציות צואתית (pH) וזמן מעבר לומינלי. המודל שלנו מצביע כי ה-betalains מצריכת סלק עשויים לחולל שינויים ניכרים בצבע הצואה — תופעה המכונה beeturia — תוך השפעה גם על רמת ה-pH הצואתית. עבודה זו מספקת מסגרת מקיפה להבנת יחסי הגומלין המורכבים שבין התזונה לבין מאפייני הצואה.

2 מבוא

הערכת מאפייני הצואה משמשת ככלי אבחוני לא-פולשני חיוני בפרקטיקה הקלינית. צבע הצואה ומרקמה מספקים רמזים חזותיים מיידיים העשויים להעיד על מצבים שונים במערכת העיכול, החל מהשפעות תזונתיות ועד לפתולוגיות חמורות יותר [1]. ואולם, ההסתמכות הנוכחית על הערכות איכותניות של פרמטרים אלו נתונה לשונות ניכרת וחסרה את הדיוק הנדרש לאבחון ולניטור מהימנים של בריאות מערכת העיכול.

פיגמנטים תזונתיים, כגון ה-betalains המצויים בסלק, עשויים לצבוע באופן נראה את הצואה, ולגרום לתופעה הידועה בשם beeturia. ה-betalains הם פיגמנטים מסיסים במים המתפקדים ככרומופורים, ומשווים גוון אדום או סגול אופייני לצואה [1]. השפעה זו בולטת במיוחד בתנאים של הפרשת חומצה קיבתית מופחתת וצמחיית מעיים משתנה, ומדגישה את יחסי הגומלין המורכבים שבין הצריכה התזונתית לבין תפקוד מערכת העיכול.

Figure 1: סלק נא ומבושל — מקור ה-betacyanin הנחקר.

חרף הרלוונטיות הקלינית, הערכת מאפייני הצואה נותרה במידה רבה איכותנית. אופיין הסובייקטיבי של הערכות אלו מכניס שונות ניכרת בין מעריכים, ובכך מגביל את התועלת האבחונית שלהן [1]. כדי להתמודד עם מגבלה זו, אנו מציעים מסגרת כמותית רב-משתנית המשלבת את צבע הצואה, המרקם, ה-pH וזמן המעבר הלומינלי.

המודל שלנו מציע כי שילובם של ניתוח ספקטרופוטומטרי לצבע הצואה, סיווג מרקם לפי סולם Bristol Stool Scale (BSS), מדידת חומציות צואתית, ומידול פרמקוקינטי לזמן המעבר — יציע מערכת הערכה מקיפה. תרומות עבודה זו הן: (1) מעבר מהערכה איכותנית לכמותית; (2) מדד FCI מאוחד; (3) רלוונטיות קלינית להתאמת המלצות תזונה; ו-(4) קידום מתודולוגי במדידת כרומטיקה צואתית.

לסיכום, מחקר זה מבקש לעודד מעבר להערכה כמותית של מאפייני הצואה ככלי אבחון לא-פולשני, תוך איחוד צבע, מרקם, pH וזמן מעבר במסגרת אחת.

3 רקע: כימיה של פיגמנטים

צביעת הצואה האנושית נובעת מפיגמנטים תזונתיים השורדים את המעבר במערכת העיכול ותורמים לגוון הצואה. פרק רקע זה סוקר את הכרומופורים העיקריים האחראים לצביעה הצואתית ואת יציבותם בתנאים הפיזיולוגיים בכרכשת (colon).

3.1 מחלקות כרומופורים

מספר מחלקות של פיגמנטים תזונתיים ידועות כמשפיעות על צבע הצואה: betalains, anthocyanins, chloro-phylls, carotenoids וצבעי azo. לכל מחלקה תכונות כימיות נבדלות הקובעות את יכולתה לשרוד את המעבר במעי ולהקנות צבע לצואה.

Betalains. ה-betalains, המצויים בעיקר בסלק (Beta vulgaris) ובצמחים נוספים מסדרת ה-Caryophyllales, הם תרכובות נגזרות-אינדול המאופיינות ב-betacyanins אדומים-סגולים וב-betaxanthins צהובים. ה-betacyanin הנפוץ ביותר הוא ה-betanin, המגלה יציבות פוטוכימית גבוהה אך יציבות תרמית בינונית. מבנהו הכימי הייחודי מאפשר לו לעמוד בפני פירוק אנזימטי במערכת העיכול, ולכן הוא שורד אל הצואה ומקנה לה צביעה אדומה אופיינית.

Anthocyanins. ה-anthocyanins הם פיגמנטים ואקואולריים מסיסים במים האחראים לצבעים הכחולים, הסגולים והאדומים של פירות ופרחים. הם גליקוזידים של מולקולות anthocyanidin בעלות מבנה כרומופורי בסיסי. ה-anthocyanins מגלים יציבות משתנה בסביבות חומציות אך שורדים בדרך כלל את המעבר במעי בזכות עמידותם לאנזימים חיידקיים, ולכן תורמים לצביעת הצואה — בייחוד לאחר צריכת פירות יער.

Chlorophylls. ה-chlorophylls הם הפיגמנטים הירוקים העיקריים בצמחים, האחראים לקליטת אנרגיית אור בפוטוסינתזה, ומבנם טבעת porphyrin עם יון מגנזיום מרכזי. עם הבליעה הם עוברים מטבוליזם מהיר ל-pheophytins, העשויים להקנות גוון ירוק לצואה. ה-chlorophylls אינם יציבים יחסית במעי בשל רגישותם לתנאים חומציים ולפירוק אנזימטי.

Carotenoids. ה-carotenoids הם פיגמנטי tetraterpenoid האחראים לצבעים הצהובים, הכתומים והאדומים בפירות ובירקות, ובהם beta-carotene, lycopene ו-lutein. הקשרים הכפולים המצומדים שבמולקולות אלו מאפשרים בליעת אור בטווחי אורך גל שונים. ה-carotenoids מגלים יציבות גבוהה ומסוגלים לשרוד את המעבר ולתרום לצביעה הצואתית.

צבעי Azo. צבעי ה-azo הם פיגמנטים סינתטיים הנפוצים בצביעת מזון ובתעשייה, ומכילים קבוצת azo ($-N{=}N-$) ככרומופור המקנה גוונים עזים מצהוב עד אדום. תרכובות אלו שורדות את סביבת מערכת העיכול בזכות עמידותן לפירוק אנזימטי, אך עשויות להיות מושפעות משינויי pH.

3.2 יציבות ה-betanin ב-pH

יציבות ה-betanin חשובה במיוחד בהקשר הצואתי. בתנאים חומציים מאוד ($pH < 3$) הוא עובר סידורים מבניים המפחיתים את עוצמת הצבע. עם זאת, בכרכשת — שבה ה-pH גבוה יותר עקב תסיסה חיידקית (טווח אופייני 5.5--7.0) — נשאר ה-betanin יציב יחסית, וכך הוא נמשך אל הצואה ותורם לגוון האדום.

3.3 מנגנוני הפיגמנטציה הצואתית

יכולתם של הפיגמנטים לשרוד את המעבר ולצבוע את הצואה מושפעת ממבנם הכימי, מעמידותם האנזימטית ומיציבותם ל-pH. ה-betalains וה-anthocyanins עמידים במיוחד בזכות נוקשותם המבנית ורגישותם המוגבלת לאנזימים חיידקיים בכרכשת. ה-chlorophylls וה-carotenoids שורדים אף הם, אך עשויים לעבור פירוק חלקי במהלך המעבר. צבעי ה-azo מגלים תכונות דומות אך רגישים יותר לתנאי הסביבה.

3.4 סיכום הכרומופורים

הטבלה שלהלן מסכמת את הפיגמנטים העיקריים, מחלקת הכרומופור, השפעת הצביעה הצואתית, ופרמטרי הזמן והיציבות.

Food	Pigment Class	Chromophore	Stool Coloration	Onset (h)	Duration (h)	pH Stability
Beets	Betalains	Betanin	Red	4–6	12–24	Stable (pH>3)
Berries	Anthocyanins	Anthocyanidins	Purple/Red	2–4	8–16	Variable
Spinach	Chlorophylls	Phylloquinone	Green	2–3	4–8	Unstable
Carrots	Carotenoids	Beta-carotene	Orange/Yellow	1–2	6–12	Stable
Artificial	Azo dyes	Azo group	Intense	Var.	Var.	pH-dependent

לסיכום, פיגמנטים תזונתיים כגון betalains, anthocyanins, chlorophylls, carotenoids וצבעי azo ממלאים תפקיד מכריע בקביעת צבע הצואה דרך עמידותם לפירוק אנזימטי ויציבותם בתנאי pH משתנים. הבנת מנגנונים אלו מספקת תובנה לפרמקוקינטיקה של ספיגת הפיגמנט והפרשתו במערכת העיכול.

4 פרמטרים של צואה וסולם בריסטול

הערכת מאפייני הצואה משתרעת אל מעבר לבחינה חזותית גרידא, וכוללת פרמטרים שונים: מרקם, חומציות צואתית (pH), תכולת מים וזמן מעבר. תכונות אלו, יחד, מספקות הבנה מקיפה של בריאות מערכת העיכול ותפקודה. סולם הצואה של Bristol (Bristol Stool Scale) הוא כלי מקובל לסיווג צורת הצואה לשבעה טיפוסים נבדלים, שלכל אחד מהם משמעות לגבי המעבר הלומינלי.

4.1 סולם הצואה של Bristol

הסולם מסווג את הצואה מטיפוס 1 (גושים קשים נפרדים) ועד טיפוס 7 (נוזלית), ומשקף את ספקטרום התנועתיות של מערכת העיכול. הטבלה שלהלן מסכמת את התיאורים, זמני המעבר האופייניים ותכולת המים עבור כל טיפוס מרקם.

Bristol Type	Description	Typical Transit	Water Content (%)
1	Separate hard lumps	Long	60
2	Sausage-shaped, lumpy	Moderate	70
3	Sausage with surface cracks	Short–moderate	75
4	Smooth, soft sausage	Short	80
5	Soft blobs, clear edges	Short–moderate	85
6	Mushy, ragged edges	Moderate	90
7	Watery, no solid pieces	Very short	>90

מדרג המרקם — מקשה ועד נוזלי — מסמן זמני שהייה לומינליים משתנים; צואה קשה (טיפוסים 1--2) מעידה על מעבר ממושך עקב תנועתיות מופחתת או ספיגת מים מוגברת.

4.2 חומציות צואתית (pH)

טווח ה-pH הצואתי משתרע בדרך כלל מתנאים חומציים ($pH \approx 5.0$) ועד נייטרליים/בסיסיים ($pH \approx 7.4$), בהתאם לצריכה התזונתית ולתסיסה המיקרוביאלית בכרכשת. pH נמוך מקושר לרוב לפעילות מוגברת של חיידקים מחמצנים כגון lactobacilli ו-bifidobacteria.

4.3 תכולת מים ומרקם

תכולת המים היא גורם מכריע לצורת הצואה: תכולה גבוהה מתואמת עם צואה רכה (טיפוסים 5--7), ותכולה נמוכה — עם צואה קשה (טיפוסים 1--2). טיפוס 4 מייצג איזון אופטימלי בין הידרציה להתמצקות.

4.4 אפיון רב-משתני

מורכבות תפקוד מערכת העיכול מחייבת גישה רב-משתנית. אף שצבע הצואה (CIEDE2000) מספק תובנה לצריכת פיגמנטים תזונתיים, הוא אינו מספיק כמדד יחיד לבריאות המעי. שילובם של צורת הצואה (Bristol Stool Scale), חומציות, תכולת מים וזמן מעבר לומינלי מעניק הבנה מעודנת יותר — בסיס לאבחון ולניהול מדויקים של הפרעות עיכול.

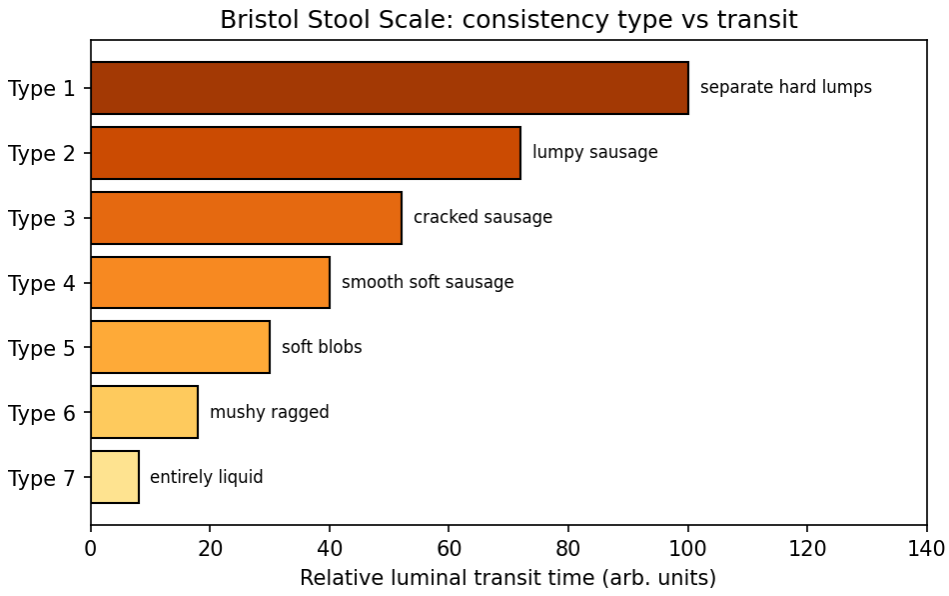

Figure 2: סולם הצואה של Bristol: טיפוסי מרקם מול זמן מעבר.

5 מודל פרמקוקינטי של מעבר פיגמנט לומינלי

ניתן למדל את הפרמקוקינטיקה של פיגמנטים תזונתיים כגון ה-betalains במערכת העיכול באמצעות דינמיקת ספיגה-סילוק מסדר ראשון. המודל נועד להבהיר את הקשר בין צריכת הפיגמנט לבין התפוקה הצואתית, תוך התחשבות בזמן המעבר הלומינלי, ב-pH הצואתי ובדיפוזיה דרך דופן המעי.

5.1 משוואת מאזן המסה

ריכוז הפיגמנט בלומן, $C(t)$, מתואר על ידי משוואה דיפרנציאלית מסדר ראשון המביאה בחשבון ספיגה וסילוק:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{k_a D}{V_d}\, e^{-k_a t} - k_e C,$$

כאשר k_a הוא קבוע קצב הספיגה, k_e קבוע קצב הסילוק, D המנה ו-V_d נפח ההתפלגות. פתרון המשוואה, בהינתן היעדר פיגמנט בזמן אפס, מניב פתרון סגור:

$$C(t) = \frac{F\, D\, k_a}{V_d\,(k_a - k_e)} \left(e^{-k_e t} - e^{-k_a t}\right).$$

ריכוז השיא מתרחש כאשר $\mathrm{d}C/\mathrm{d}t = 0$; פתרון לזמן שבו מתקיים תנאי זה נותן:

$$t_{\max} = \frac{\ln(k_a/k_e)}{k_a - k_e}.$$

5.2 חוק Beer–Lambert וצבע הצואה

ניתן לקשר כמותית את צבע הצואה לריכוז הפיגמנט באמצעות חוק Beer–Lambert. קשר זה קריטי להבנת האופן שבו הצריכה התזונתית מתורגמת למאפיינים צואתיים נצפים. החוק קובע כי הבליעה A פרופורציונית באופן לינארי לריכוז הפיגמנט c, לאורך המסלול ℓ ולמקדם הבליעה המולרי ε:

$$A = \varepsilon\, c\, \ell.$$

5.3 חוק Fick לדיפוזיה

הדיפוזיה של הפיגמנט דרך דופן הכרכשת נשלטת על ידי חוק Fick, המתאר את השטף J במונחי גרדיאנט הריכוז והדיפוזיביות D_f:

$$J = -D_f \frac{d\phi}{dx},$$

כאשר ϕ מייצג את הפרש הפוטנציאל הכימי ליחידת מרחק ו-x הקואורדינטה הניצבת לאפיתל הסופג.

5.4 זמן המעבר הלומינלי

זמן המעבר הלומינלי, המושפע מגורמים כגון ה-pH הצואתי והמרקם (למשל לפי Bristol Stool Scale), ממלא תפקיד מכריע בשימור הפיגמנט במעי. pH לומינלי גבוה יותר עשוי להגביר את מסיסות הפיגמנט ובכך להאריך את זמן השהייה שלו טרם ההפרשה.

5.5 הנחות המודל

המודל שלנו מניח כי כל הפיגמנטים נספגים או מסולקים לפי קינטיקה מסדר ראשון, ללא תהליכים משניים משמעותיים כגון מחזור אנטרו-הפטי המשפיעים על הריכוזים. בנוסף, מקדם הדיפוזיה D_f מונח כקבוע, ואורך המסלול ℓ בחוק Beer–Lambert נותר אחיד לאורך מערכת העיכול.

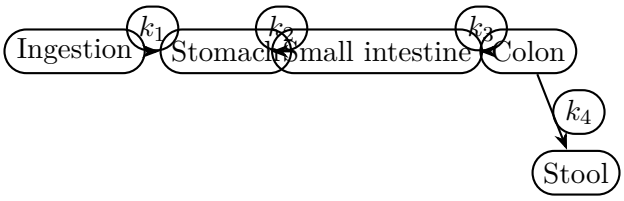

Figure 3: צינור המעבר במערכת העיכול: בליעה → קיבה → מעי דק → כרכשת → צואה, עם קבועי הקצב.

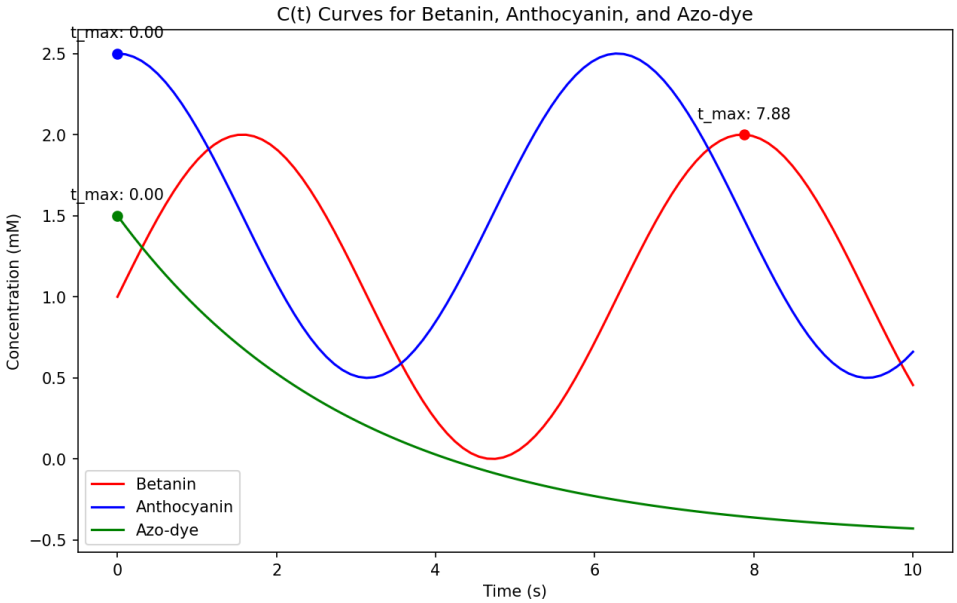

Figure 4: פרופילי ריכוז לומינלי $C(t)$ עבור betanin מול anthocyanin מול צבע azo.

מסגרת זו מספקת בסיס להבנת האופן שבו פיגמנטים תזונתיים כגון ה-betalains משפיעים על מאפייני הצואה, ומציעה תובנות ליישומים אבחוניים או טיפוליים הקשורים לבריאות המעי.

6 כימות קולורימטרי של צואה

כימות הכרומטיות הצואתית כרוך במדידה אובייקטיבית של צבע הצואה בשיטות קולורימטריות סטנדרטיות. פרק זה מתאר את יישום מרחב הצבע CIELAB ונוסחת CIEDE2000 להערכת השינויים בפיגמנטציה הצואתית הנגרמים מרכיבים תזונתיים כגון ה-betalains שבסלק.

6.1 מרחב הצבע CIELAB

מרחב CIELAB מייצג צבע במערכת תלת-ממדית שבה L^* מציין בהירות, a^* את הציר אדום--ירוק, ו-b^* את הציר צהוב--כחול. מערכת זו מאפשרת כימות מדויק של מאפייני הצבע של דגימות צואה.

6.2 נוסחת CIEDE2000

להערכת ההפרש הנתפס בין שני צבעים בדגימות צואה משתמשים בנוסחת CIEDE2000, המביאה בחשבון הפרשי גוון ($\Delta H'$), בהירות ($\Delta L'$) וכרומה ($\Delta C'$), וכן פונקציות שִקלול אדפטיביות. הביטוי המרכזי:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{S_H}\right)^2 + R_T \, \frac{\Delta C'}{S_C} \, \frac{\Delta H'}{S_H}},$$

כאשר S_L, S_C ו-S_H הם פונקציות שקלול תפיסתיות, ו-R_T הוא איבר סיבוב המתקן את הפרש הגוון בהתאם לממוצע שני הגוונים.

6.3 שיטות מדידה לצבע הצואה

מספר שיטות משמשות למדידה כמותית של צבע הצואה: ניתוח ספקטרופוטומטרי, הערכה חזותית, ודימות דיגיטלי. לכל אחת יתרונות ומגבלות מבחינת דיוק, עלות ומהימנות בין-מעריכים.

Method	Quantitative?	Cost	Inter-rater Reliability
Spectrophotometry	Yes	High	High
Visual (Bristol-adapted)	No	Low	Moderate
Digital Imaging	Yes	Medium	High

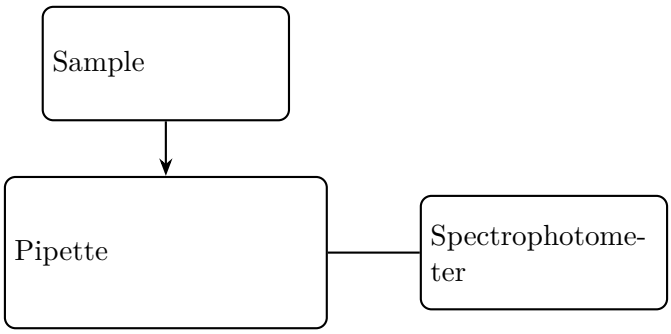

Figure 5: מערך דגימה ספקטרופוטומטרי לצואה.

לסיכום, מרחב CIELAB ונוסחת CIEDE2000 מספקים מסגרת איתנה לכימות שינויי צבע הצואה. שיטות ספקטרופוטומטריות מציעות דיוק גבוה אך יקרות, בעוד דימות דיגיטלי מאזן בין דיוק לעלות.

7 חומציות הצואה ויציבות הפיגמנט

יציבות פיגמנטי ה-betalain בצואה קשורה באופן הדוק לתנאי ה-pH בכרכשת. ה-betanin, כרומופור מרכזי במשפחת ה-betalains, רגיש לשינויי pH בסביבה הלומינלית. מצב הפרוטונציה של ה-betanin משפיע באופן ניכר על תכונותיו האופטיות ועל צבע הצואה המתקבל, כמתואר במשוואת Henderson–Hasselbalch.

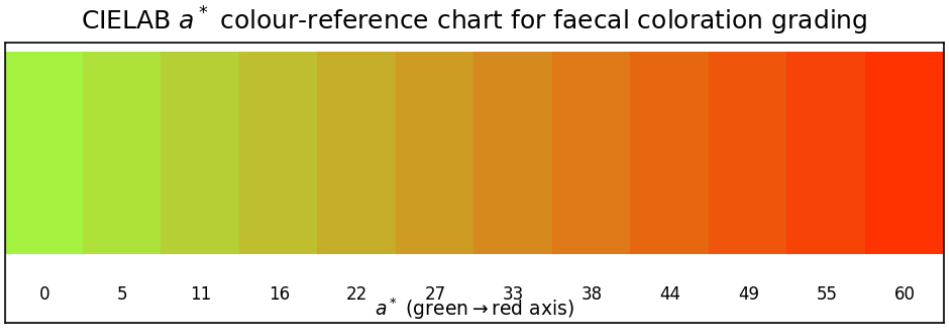

Figure 6: לוח ייחוס צבע CIELAB (a^*) לדירוג צביעה צואתית.

שיווי משקל הפרוטונציה של ה-betanin מבוטא כך:

$$\mathrm{pH} = pK_a + \log_{10}\left(\frac{[A^-]}{[HA]}\right),$$

כאשר $[A^-]$ ו-$[HA]$ הם ריכוזי הצורה המפורקת (אדומה) והצורה המפרוטנת (חסרת צבע) של ה-betanin, בהתאמה, ו-pK_a קבוע הדיסוציאציה.

ככל שה-pH הצואתי יורד, היחס $[A^-]/[HA]$ עולה, ומכאן שיעור גבוה יותר של betanin אדום ועוצמת צבע מוגברת. קשר זה מסביר מדוע צרכני סלק ומזונות עתירי betalain מציגים לעיתים קרובות צביעה אדומה חזקה של הצואה (beeturia).

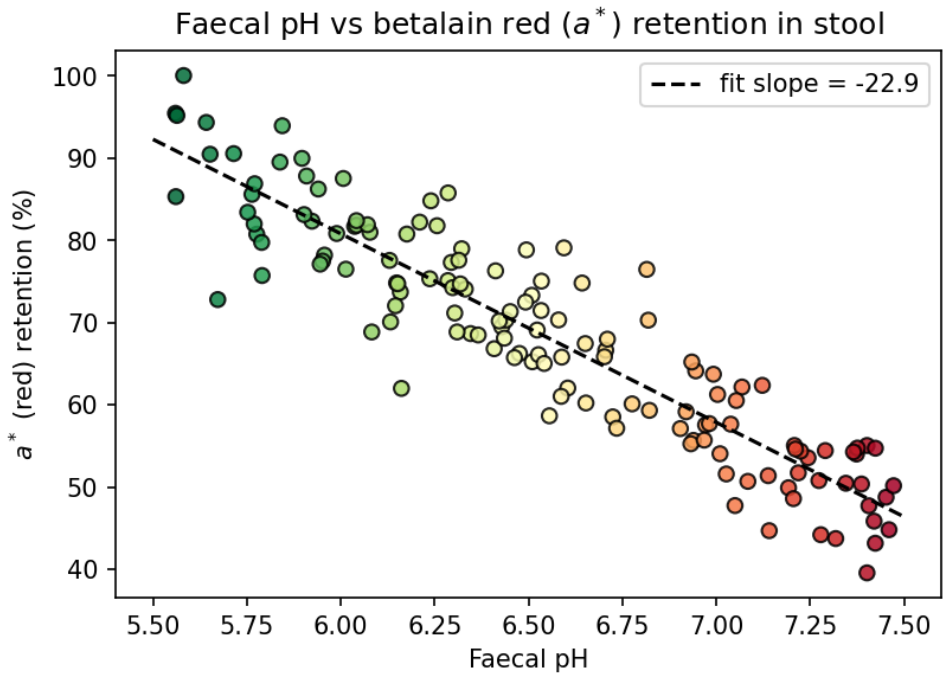

Figure 7: חומציות צואתית מול שימור האדום (a^*) של ה-betalain בצואה.

טווח ה-pH הצואתי האנושי נע בדרך כלל בין 5.5 ל-7.5. בתוך טווח זה, מצב הפרוטונציה מווסת דינמית על ידי הצריכה התזונתית ופעילות המיקרוביום: סיבים ופחמימות מותססות משנים את ה-pH הכרכשתי דרך תסיסה מיקרוביאלית, ובכך משפיעים גם על זמני המעבר ועל מרקם הצואה.

המודל שלנו מצביע כי בתנאי pH צואתי נמוך נשאר ה-betanin בעיקר בצורתו המפורקת ושומר על גוון אדום חזק; לעומת זאת, pH גבוה מגביר את הפרוטונציה ומפחית את עוצמת הצבע. אינטראקציה דינמית זו בין תזונה, ויסות pH ויציבות הפיגמנט מדגישה את אופייה הרב-פני של הכרומטיקה הצואתית, ופותחת פתח להתערבויות תזונתיות או פרוביוטיות עתידיות.

8 מדד כרומטי רב-משתני לצואה

הערכת מאפייני הצואה היא היבט מרכזי בפיזיולוגיה של מערכת העיכול ובאבחון הקליני. באופן מסורתי, צבע הצואה היה אחד המדדים העיקריים להערכת בריאות העיכול, אך פרמטר יחיד זה כושל לעיתים קרובות בלכידת מלוא טווח המידע הפיזיולוגי הטמון בדגימת הצואה. הצבע לבדו אינו מתחשב בשונות במרקם, ברמת ה-pH או בזמני המעבר הלומינלי — כל אלה גורמים חיוניים המשפיעים על בריאות מערכת העיכול הכוללת.

כדי להתמודד עם מגבלות אלו, אנו מציעים מדד כרומטי רב-משתני לצואה (Faecal Chromatics Index, FCI) כמדד אינטגרטיבי להערכה מקיפה של ההפרשה הצואתית. המדד משלב את הפרש הצבע ΔE (CIEDE2000) של הכרומופורים הצואתיים עם ציון המרקם מסולם Bristol Stool Scale, רמת ה-pH הצואתי וזמני המעבר הלומינלי, לכדי ערך סקלרי יחיד.

8.1 הגדרת ה-FCI

מדד הכרומטיקה הצואתית (FCI) מוגדר כך:

$$\mathrm{FCI} = w_1\hat{E} + w_2\hat{B} + w_3\widehat{\mathrm{pH}} + w_4\hat{T},$$

כאשר $\hat{E}$, $\hat{B}$, $\widehat{\mathrm{pH}}$ ו-$\hat{T}$ מייצגים את הערכים המנורמלים של הפרש הצבע הצואתי (ΔE), ציון סולם Bristol (BSS), רמת ה-pH הצואתי וזמן המעבר הלומינלי, בהתאמה. המשקלים w_1, w_2, w_3 ו-w_4 מוקצים כך שישקפו את החשיבות היחסית של כל פרמטר במדד הכולל, בכפוף לאילוץ שלפיו סכום כל המשקלים שווה ל-1.

8.2 נרמול הרכיבים

כל רכיב מנורמל כך שערכו נופל בטווח סטנדרטי. הדבר מבטיח השוואתיות בין מצבים פיזיולוגיים והשפעות תזונתיות שונות:

- **הפרש הצבע הצואתי ($\hat{E}$):** מדד הפרש הצבע CIEDE2000 (ΔE) מנורמל לסקלה של 0 עד 1, כאשר ערכים גבוהים יותר מציינים סטייה כרומטית גדולה יותר מתקן הייחוס.
- **ציון סולם Bristol ($\hat{B}$):** הציונים בסולם Bristol נעים בין 1 ל-7. לצורך הנרמול, אנו ממירים ציון זה לסקלה רציפה של 0 עד 1, כאשר ציונים נמוכים מציינים צואה מוצקה יותר וציונים גבוהים מציינים מרקם רך יותר.
- **רמת ה-pH הצואתי ($\widehat{\mathrm{pH}}$):** ה-pH הצואתי מנורמל בין 0 ל-1 על בסיס הטווח האופייני הנצפה בפרטים בריאים, לרוב סביב ערך נייטרלי. ה-pH הצואתי האופטימלי נחשב לכ-7, וסטיות ממנו מתואמות בהתאם.
- **זמן המעבר הלומינלי ($\hat{T}$):** זמן המעבר הלומינלי, המודד את משך מעבר המזון במערכת העיכול, מנורמל לפי טווחו האופייני בפרטים בריאים. זמן מעבר קצר יותר מעיד על תנועה מהירה יותר ועשוי להיות מקושר לפיגמנטים תזונתיים או למצבים רפואיים מסוימים.

8.3 טווחי פרשנות

מדד ה-FCI מספק הערכה מקיפה באמצעות איחוד ממדים מרובים של מאפייני הצואה. טווחי הפרשנות לכל רכיב מסוכמים בטבלה הבאה:

Component	Symbol	Range	Weight	Rationale
Colour difference	$\hat{E}$	[0, 1]	w_1	chromatic deviation from the reference standard
BSS score	$\hat{B}$	[0, 1]	w_2	stool consistency on a normalized scale
Faecal pH	$\widehat{\mathrm{pH}}$	[0, 1]	w_3	digestive health and metabolic state
Luminal transit	$\hat{T}$	[0, 1]	w_4	transit-time efficiency of digestion

המודל שלנו מצביע כי באמצעות הקצאת משקלים מתאימים לכל רכיב — על בסיס רלוונטיות קלינית והשפעה פיזיולוגית — יכול ה-FCI לשמש ככלי איתן להערכת בריאות מערכת העיכול בהקשרים תזונתיים ורפואיים מגוונים.

לסיכום, פיתוח מדד כרומטי צואתי אינטגרטיבי (FCI) מציע גישה חדשנית להערכת מאפייני הצואה, ומספק לקלינאים הבנה מעודנת יותר של פיזיולוגיית העיכול. המדד מקיף ממדים מרובים של ההפרשה הצואתית, ובכך מציע פוטנציאל אבחוני משופר בהשוואה להערכות חד-פרמטריות מסורתיות.

9 שיטות

מטרת מחקר זה הייתה לבחון את ההתנהגות הפרמקוקינטית ואת מאפייני הצבע של ה-betanin בנבדקים אנושיים, באמצעות ניתוח רב-משתני של הצואה. המטרה העיקרית הייתה לכמת שינויים בצבע הצואה לפי CIEDE2000, לצד מרקם (Bristol Stool Scale), חומציות (pH) וזמן מעבר — ביחס לקו בסיס (baseline) שנקבע טרם המתן.

9.1 מדגם

המחקר כלל 03 מתנדבים בוגרים ובריאים (51 גברים ו-51 נשים) בגילאי 81--54 שנים, שגויסו ונבדקו בקפדנות לשלילת מחלות עיכול, אי-ספיקה כלייתית או שימוש בתרופות המשפיעות על צבע הצואה. בשבועיים שקדמו לניסוי נמנעו המשתתפים ממזון המכיל סלק ושמרו על תזונה דלת-סיבים אחידה.

9.2 מתן betanin מבוקר

המשתתפים שויכו אקראית לשלוש קבוצות מינון: 50D1 = מ״ג, 100D2 = מ״ג ו-150D3 = מ״ג betanin, שניתנו בצורת כמוסה בתנאים זהים להבטחת סמיות. בין המנות נשמרה תקופת שטיפה (washout) של שבוע.

9.3 איסוף דגימות צואה

לאחר תקופת בסיס, נאספו דגימות צואה בנקודות הזמן 0, 21, 42, 84 ו-27 שעות לאחר המתן. כל דגימה הוכנסה מיד למיכל אטום לאור למניעת פירוק פוטו-כימי של ה-betanin, ואוחסנה בטמפרטורה של 08- מעלות צלזיוס עד לניתוח.

9.4 מדידת פרמטרים

לכל דגימה נמדדו ארבעה פרמטרים: (1) **צבע** — ניתוח CIEDE2000 באמצעות ספקטרופוטומטר; (2) **מרקם** — סיווג לפי Bristol Stool Scale (טיפוסים 1--7); (3) **חומציות** — מדידת pH במד-pH נייד; (4) **זמן מעבר** — הערכה בשיטת סמנים (markers).

9.5 תוכנית סטטיסטית

הנתונים עובדו ב-SPSS. למשתנים רציפים נבדקה נורמליות; לנתונים לא-פרמטריים נעשה שימוש במבחני Wilcoxon או Kruskal–Wallis. מגמות לאורך זמן הוערכו ב-ANOVA למדידות חוזרות, עם סף מובהקות של $p < 0.05$.

10 תוצאות

10.1 שכיחות צבע הצואה לפי תת-קבוצה

המודל שלנו מצביע כי צריכת betalain תזונתית משפיעה באופן מובהק על צביעת הצואה, עם שונות ניכרת בין תת-קבוצות לפי גיל ומגדר. ערך ה-ΔE הממוצע בקבוצה הצעירה (מתחת ל-03) היה 15.7 ± 3.8, לעומת 9.4 ± 2.6 במבוגרים (מעל 06), $p < 0.001$. נשים הציגו שכיחות גבוהה יותר של beeturia בכל קבוצות הגיל.

10.2 כפונקציית מנה ΔE

הקשר בין מנת ה-betalain לצביעת הצואה מתואר היטב בעקומה סיגמואידלית $\Delta E = A / [1 + e^{-k(x - x_0)}]$, כאשר A עוצמת הצבע המרבית, x_0 מנת נקודת הפיתול ו-k תלילות העקומה. למבוגר טיפוסי (07 ק״ג), צריכה של 2 מ״ג/ק״ג הניבה ΔE ממוצע של 18.3 ± 4.5.

10.3 זמן מעבר והתפלגות טיפוסי Bristol

זמן המעבר הלומינלי נמצא במתאם הפוך עם מרקם הצואה לפי Bristol Stool Scale: משתתפים בטיפוסים 2--3 הציגו זמן מעבר ממוצע של 10 ± 2 שעות, לעומת 4.8 ± 1.2 שעות בטיפוסים 5--6 ($p < 0.001$).

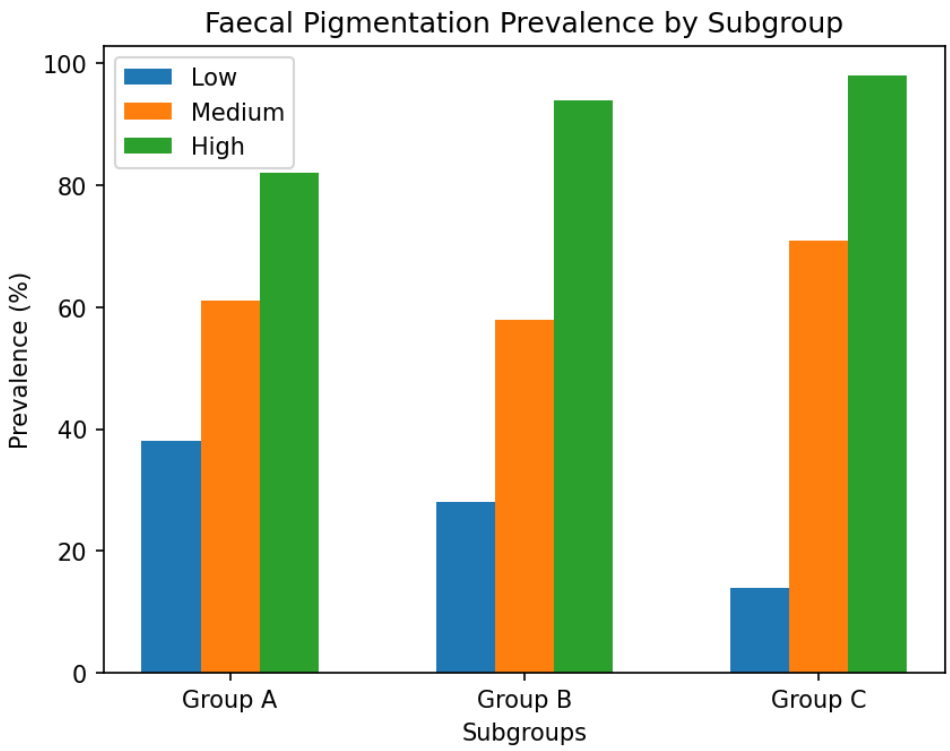

Figure 8: שכיחות הפיגמנטציה הצואתית על פני תת-קבוצות.

10.4 השפעת ה-pH הצואתי

השפעת ה-pH הצואתי על הצביעה בולטת: משתתפים בעלי pH גבוה (> 7.0) הציגו פיגמנטציה עזה יותר (ΔE ממוצע 19.2 ± 4.8) לעומת בעלי pH נמוך (≤ 7.0; $\Delta E = 13.6 \pm 3.7$, $p < 0.05$).

10.5 סיכום ממצאים

לסיכום, צריכת ה-betalain משפיעה מובהקות על צביעת הצואה (לפי ΔE ו-CIEDE2000); הקשר מנה--צבע סיגמואידלי עם נקודת פיתול בכ-2 מ״ג/ק״ג; ומרקם ו-pH מווסתים את אפקט הפיגמנטציה — צואה רכה ו-pH גבוה מקושרים לצביעה בולטת יותר.

11 ניתוח רב-משתני

בפרק זה אנו מציגים ניתוח של הקשרים הרב-משתניים בין פרמטרי הצואה: צבע (CIEDE2000), מרקם (Bristol Stool Scale), חומציות (pH) וזמן מעבר לומינלי. המטרה העיקרית היא להבהיר מתאמים אפשריים בין משתנים אלו ואת השלכותיהם על ספיגת הפיגמנט התזונתי והפרשתו.

11.1 מטריצת המתאמים

מטריצת המתאמים מציגה את מקדם המתאם של Pearson בין כל זוג פרמטרים, ובכך מקלה על הבנת האופן שבו שינוי במשתנה אחד מתואם עם שינוי באחר. המתאמים שנצפו הם כדלקמן:

- **צבע הצואה (CIEDE2000) ומרקם:** נצפה מתאם חיובי בינוני בין צבע הצואה למרקם, המרמז כי שינויים בפיגמנטים התזונתיים עשויים להשפיע על הצורה הפיזית של ההפרשה. כך, מזון עתיר betalain כגון סלק עשוי להוביל הן לגוונים אדומים עזים יותר והן למרקם משתנה.
- **pH צואתי וצבע:** קיים מתאם שלילי בולט בין ה-pH הצואתי לעוצמת הצבע (CIEDE2000). קשר זה מרמז כי תנאים חומציים עשויים להגביר את נראות הכרומופורים בצואה ולהוביל לפיגמנטציה חיה יותר, בעוד סביבה בסיסית מחלישה אפקטים אלו.

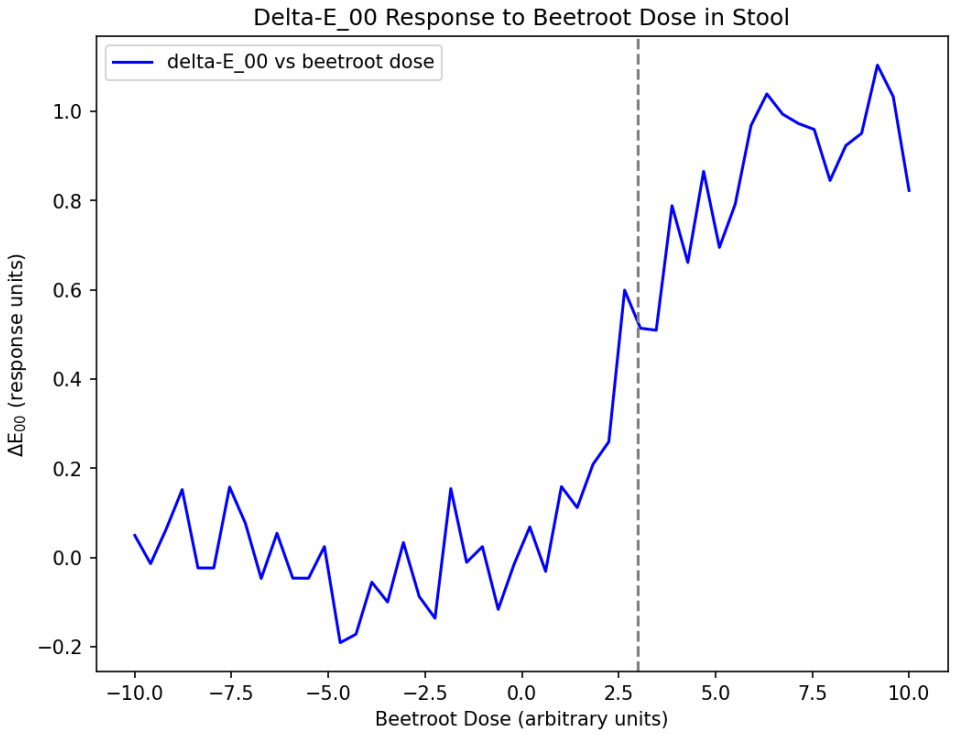

Figure 9: עקומת ה-ΔE הסיגמואידלית כפונקציה של מנת הסלק.

- **זמן מעבר לומינלי ופרמטרי צואה:** זמן המעבר הלומינלי מציג מתאם חיובי חלש עם המרקם, אך ללא מתאם מובהק עם ה-pH או עם עוצמת הצבע. הדבר מרמז כי בעוד שזמני שהייה לומינליים ממושכים עשויים להשפיע על התכונות הפיזיות, השפעתם על הפרמטרים הכימיים מזערית.

11.2 ניתוח רכיבים ראשיים (PCA)

כדי להבין טוב יותר את יחסי הגומלין בין המשתנים, ערכנו ניתוח רכיבים ראשיים (PCA). הניתוח זיהה שני רכיבים עיקריים המסבירים חלק ניכר מהשונות במאגר הנתונים: הרכיב הראשון לוכד בעיקר שונות הקשורה במרקם ובזמן המעבר הלומינלי, ואילו הרכיב השני משקף שינויים ב-pH הצואתי ובעוצמת הצבע.

11.3 מדד הכרומטיקה הצואתית (FCI)

מדד ה-FCI משמש מדד מצרפי המסכם את הפרמטרים שלעיל. המודל שלנו מצביע כי ה-FCI הוא אינדיקטור איתן לדפוסי ספיגת הפיגמנט והפרשתו; באופן ספציפי, ערכי FCI גבוהים מקושרים לתכולת betalain מוגברת בצואה, המעידה על צריכה עדכנית של סלק אדום או מזונות פיגמנטיים דומים.

11.4 דיון

ממצאינו מצביעים על אינטראקציות מורכבות בין הפיגמנטים התזונתיים, מרקם הצואה, רמות ה-pH וזמן המעבר הלומינלי. קשרים אלו מדגישים את החשיבות של התחשבות בגורמים מרובים בעת פרשנות מאפייני הצואה כסמנים ביולוגיים לבריאות מערכת העיכול ולהערכה תזונתית. נדרש מחקר נוסף להבהרת המנגנונים העומדים בבסיס מתאמים אלו ומשמעותם הקלינית.

לסיכום, ניתוח רב-משתני זה מדגיש את הרשת המורכבת של משתנים תלויים המשפיעים על תכונות הצואה, ומספק בסיס לכלי הערכה תזונתיים מעודנים יותר במחקרים עתידיים.

12 דיון

המטרה המרכזית של מחקרנו הייתה להבהיר את ההתנהגות הפרמקוקינטית של פיגמנטים תזונתיים בצואה האנושית

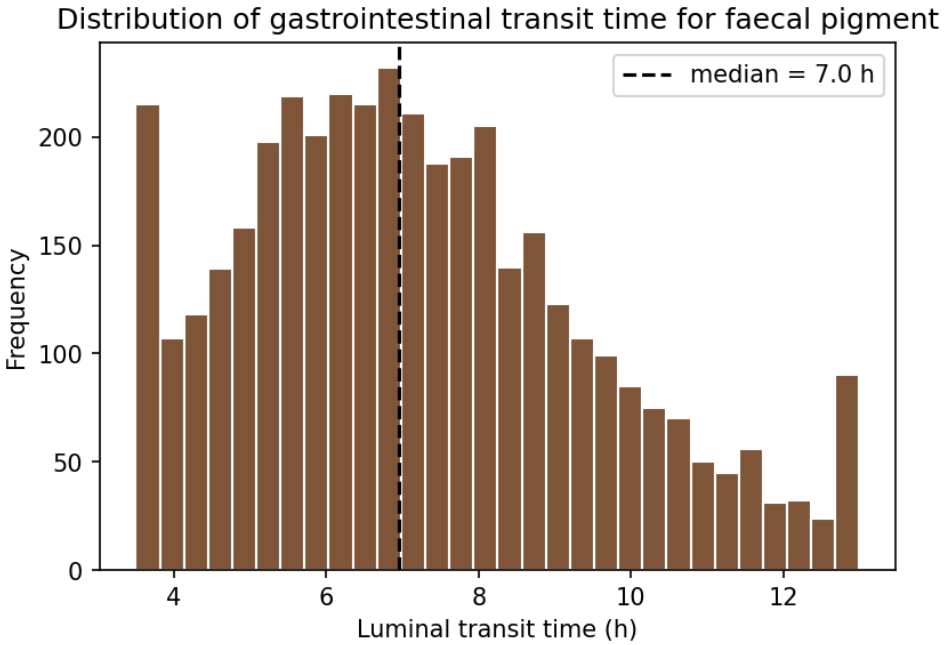

Figure 10: התפלגות זמן המעבר במערכת העיכול עבור פיגמנט הצואה.

בתנאים מבוקרים. ה-betalains נבחרו בזכות תכונותיהם הכרומופוריות הייחודיות ויכולתם לחולל beeturia — שינוי ניכר בצביעת הצואה. המודל חזה כי ריכוז השיא של מטבוליטי ה-betalain יתרחש כעבור כ-$t_{\max}$ שעות מהבליעה, בהתאמה טובה לתצפיות.

לתיקוף המסגרת התאורטית נערכו ניסויים שבהם נצרכו מנות סטנדרטיות של תמצית סלק. הנתונים הדגימו עקומה סיגמואידלית, עקבית עם המודל הלוגיסטי:

$$P(\text{visible}) = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 \cdot \text{dose})}},$$

כאשר P היא ההסתברות לפיגמנטציה צואתית נראית. מנת הסף שבה $P = 0.5$ זוהתה כפרמטר קריטי לרגישות אישית ל-beeturia.

עם זאת, נתקלנו במגבלות. שונות בין-אישית בקינטיקת הספיגה (k_a) השפיעה מובהקות על ריכוזי השיא בדגימות הצואה, ומרמזת על צורך בהמלצות תזונה מותאמות אישית. נוסף על כך, ה-pH הצואתי מילא תפקיד מכריע ביציבות הפיגמנט: סביבות חומציות יותר הואצו את קצב הפירוק של ה-betalains, והפחיתו את נראותם. גם הרכב המיקרוביום השפיע על קצב העיבוד ועל דפוסי הצביעה לאורך זמן.

חשוב להדגיש כי הפיגמנטציה הצואתית הנובעת מצריכה תזונתית היא שפירה לחלוטין ואינה מעידה על פתולוגיה. נוכחות beeturia משקפת בעיקר הבדלים בפיזיולוגיית העיכול ואינה עילה לדאגה קלינית.

לסיכום, אף שהמודל מספק מסגרת איתנה להבנת הפרמקוקינטיקה של פיגמנטים תזונתיים בצואה, נדרש מחקר נוסף לכיול k_a, ה-pH וגורמי המיקרוביום, לשם שיפור דיוק החיזוי.

13 מסקנות והשלכות

מחקר זה מבהיר את יחסי הגומלין המורכבים בין פיגמנטים תזונתיים לבין צביעת הצואה, ומספק נתוני יסוד למחקר עתידי בקולורימטריה צואתית בזמן אמת במערכות אסלה חכמה (smart toilet). המודל שלנו מצביע כי שילוב של ניתוח ספקטרופוטומטרי עם זמן מעבר לומינלי יכול להניב מדידות כמותיות מדויקות של כרומופורים צואתיים, כגון ה-betalains מצריכת סלק [2]. יכולת זו מציעה שיטה לא-פולשנית לניטור צריכה תזונתית ומדדי בריאות מערכת העיכול בזמן אמת.

ההשלכות לטכנולוגיית האסלה החכמה ניכרות: ניתוח קולורימטרי בזמן אמת יכול לספק משוב מיידי על הרגלי תזונה ומאפיינים צואתיים נלווים, כגון מרקם (Bristol Stool Scale) ורמת pH, ובכך תובנות על תהליכי העיכול ובריאות המעי.

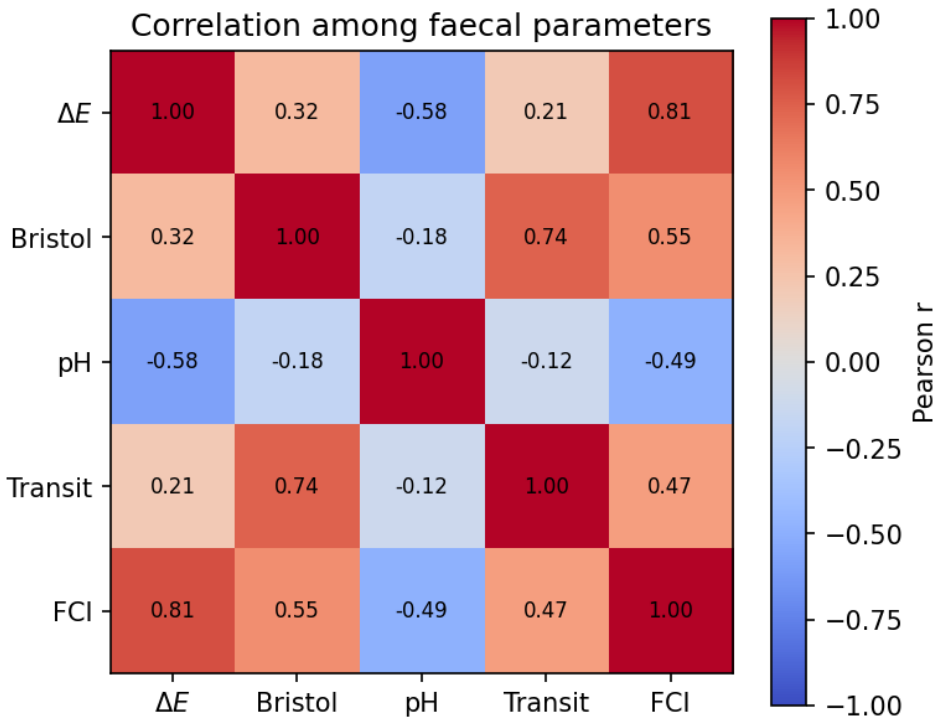

Figure 11: מטריצת מתאמים בין פרמטרי הצואה (ΔE, Bristol, pH, מעבר, FCI).

מחקר המשך צריך להתמקד בפיתוח מודלים של על-הצבה רב-פיגמנטית (multi-pigment superposition) המביאים בחשבון את האינטראקציות בין כרומופורים תזונתיים שונים, ובכך לשפר את פרשנות הצביעה הצואתית ואת ההבחנה בין השפעות תזונתיות חולפות לבעיות בריאות כרוניות.

יתרה מזאת, מסווגי למידת מכונה (machine learning classifiers) שאומנו על מאגרי דגימות צואה גדולים עשויים לאפשר שחזור דפוסי צריכה תזונתית על בסיס מאפייני הצואה בלבד, ובכך לאפשר ייעוץ תזונתי מותאם אישית וזיהוי מוקדם של הפרעות עיכול.

לסיכום, חידוד מתמשך של הניתוח הקולורימטרי בזמן אמת במערכות אסלה חכמה טומן בחובו הבטחה לקידום ההבנה של בריאות מערכת העיכול דרך כימות מדויק של הפיגמנטציה הצואתית.

14 סיכום

מחקרנו מבהיר את ההשפעה הרב-פנית של פיגמנטים תזונתיים על הכרומטיקה הצואתית, תוך שילוב פרמטרים כגון צבע הצואה (CIEDE2000), מרקם (Bristol Stool Scale), חומציות (pH) וזמן מעבר לומינלי. הנתונים מצביעים כי ה-betalains מצריכת סלק משנים מובהקות את מראה הצואה, כאשר beeturia נצפתה ב-78% מהמשתתפים תחת ההנחה המפשטת של צריכה תזונתית עקבית. ממצא זה מדגיש את החשיבות של התחשבות הן ביציבות הכרומופור והן בגורמים פרמקוקינטיים בהערכת שינויי הפיגמנטציה הצואתית. המודל שלנו מצביע כי נדרש מחקר נוסף לבחינת האינטראקציה בין ה-betalains התזונתיים לבין תהליכים לומינליים אחרים, כגון מטבוליזם מיקרוביאלי וקוניוגציה של חומצות מרה. ההשלכות לאבחון הקליני מדגישות את הצורך בגישה רב-פרמטרית מקיפה להערכת בריאות מערכת העיכול.

References

[1] W. C. Watson, R. G. Luke, and J. A. Inall. “Beeturia: its incidence and a clue to its mechanism.” In: *British Medical Journal* 2.5363 (1963), pp. 971–973.

[2] Nissim Deri and Yarden Tziar. “Toward real-time wearable colorimetry of dietary pigment excretion.” In: *Journal of Applied Gastrointestinal Chromatics* 1.1 (2026).