



הרחקת ביספנול-A על ידי צמחי אגן ירוק

ערן בינימיני¹, רגינה בורוכוב-שרפוב¹, יצחק בילקיס², אלישע תל-אור¹

¹ המכון למדעי הצמח וגנטיקה בחקלאות,

הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים

² המכון לביוכימיה ומדעי המזון ותזונה, הפקולטה לחקלאות,

מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית, האוניברסיטה העברית בירושלים

מבוא

תקציר

BPA הוא חומר כימי, המיוצר בכמות גדולה בתעשייה, ונצרך בעיקר בתור מונומר (אבן יסוד) בייצור חומרי פלסטיק שונים, המשמשים למוצרים מגוונים, כולל פוליקרבונט ושרף אפוקסי. החומרים הפלסטיים האלה משמשים לאריזות של מזון ושתייה, ציפוי של פחיות שימורים וכדומה.

BPA מוצא את דרכו אל גופי מים וקרקע בתהליכי הייצור, זליגה ממוצרי פלסטיק שונים או על ידי פירוק פיסיקלי או כימי של המוצרים. לפיכך, האדם והחי נחשפים בצורה מתמדת ומתמשכת ל-BPA, הגורם לשיבוש פעילות ההורמונלית של צורות חיים שונות. מקור החומר הוא מהתעשייה, ריכוזים גבוהים משתחררים בעיקר מתעשיית הפלסטיק, מתעשיית נייר ומתשטיפים ממטמנות (Yamamoto, Yashura, Shirishi, et al., 2001).

הרעילות של BPA נחקרה באופן נרחב על ידי התעשייה הכימית ועל ידי קבוצות מחקר ממשלתיות ואקדמיות. BPA שייך לקבוצה של חומרים המשבשים פעילות אנדוקרינית – Endocrine Disrupting compounds (EDC's). EDC's פוגעים בפעילות ההורמונלית של יונקים, של בני אדם, ושל דגים ודו-חיים, והם בעלי פוטנציאל להזיק לפעילות התקנית של יצורים חיים שונים. ככל שצורת החיים פחות מפותחת ובדרך כלל קטנה יותר, כך היא גם פגיעה יותר (Vandenberg, Hauser, Marcus et al., 2007).

ממצאי מחקר של המכון הלאומי למזון בדנמרק גילו השפעה של חשיפה לריכוזים נמוכים של BPA בחולדות (25µg/kg/day) במהלך ההיריון ולאחר הלידה. בזכרים, נמצאה ירידה בספירת הזרע (Hass, Christiansen, Boberg, et al., 2016). נמצא כי ריכוזים גבוהים של BPA בסביבה משפיעים על זוויגיות של דגים וחסרי חוליות (Oehlmann, Schulte-Oehlmann, Kloas et al., 2009). בבני אדם, BPA מוריד כמות ההורמונים החיוניים אצל נשים הרות ותינוקות ממין זכר. מסיבות אלה, חיוני לצמצם מקורות לזיהום ב-BPA, המצויים בשפכים ביתיים ותעשייתיים.

בעולם המודרני, מי שפכים ביתיים ותעשייתיים עוברים טיפול במתקן טיפול שפכים (מט"ש) לפני הזרמתם לסביבה.

בעידן המודרני ישנה עלייה חדה בכמות ובמגוון המזהמים אשר מגיעים לסביבה. מזהמים אלו הם בעלי יכולת לפגוע בסביבה וביצורים חיים. Bisphenol-A (BPA) הוא חומר ממקור אנדרופוגני ובעל יכולת לשיבוש מערכת אנדוקרינית (הורמונלית) ביצורים חיים. כיוון ש-BPA מגיע לסביבה באופן ישיר משפכי תעשיית הפלסטיק ובעקיפין דרך השפכים הביתיים, לכן יש חשיבות לצמצום הגעתו לסביבה.

במחקר זה נבחנה מערכת לטיפול במי קולחין. מערכת זו משפרת את איכות המים על ידי צמחים וחיידקים. גומא הפרקים וסמר חד נבחרו לעבודה במעבדה להרחקת המזהם BPA. רוב הניסויים התבצעו במערכת הידרופונית, על מנת לבחון את יכולת הצמחים בהרחקת המזהם. כמו כן אופיינו גם תוצרי הפירוק של ביספנול-A בתמיסה, על מנת לאשש פירוק החומר וסילוק הסכנה הטמונה בו לסביבה. נמצא קשר ישיר בין פעילות חיידקים בשורשי צמחים לפירוק BPA. נצפה הבדל משמעותי בקצב פירוק BPA בין גומא הפרקים לסמר חד. לדוגמה, בתמיסה המכילה חל"ב 200 BPA, פירוק החומר התרחש תוך יום אחד על ידי גומא הפרקים לעומת שלושה ימים על ידי סמר חד. גומא הפרקים הרחיק BPA מתמיסות בעלות ריכוזים בטווח 100 חל"ב - 10 חל"מ ביעילות רבה. בתמיסות בריכוזים של עד 2 חל"מ, כושר ההרחקה עמד על 100% בתוך 24 עד 72 שעות, ואילו בריכוזים 3-10 חל"מ ההרחקה עמדה על כ-95% תוך 24 עד 96 שעות. תוצר הפירוק העיקרי של BPA שנמצא היה 3-OH-BPA. תוצר זה פי 10 פחות פעיל מהחומר המקורי. במהלך המחקר זוהה, כי *Bacillus megaterium*, חיידק שורשי גומא הפרקים מסייע בהרחקת BPA. לסיכום, נמצא, כי גומא הפרקים הינו מועמד טוב להרחקת BPA ממים במערכת הידרופונית מלאכותית המדמה את האגן הירוק.

מילות מפתח: ביספנול-A (BPA), גומא הפרקים, סמר חד, חיידקי שורש, *Bacillus megaterium*, מערכת הידרופונית, אגן ירוק.



תמונה 1: אגן מספר 1 בתוך קומפלקס אגנים ירוקים בהוד השרון, המשמש לניקוי שלישוני של מי קולחים בטיפול ביולוגי, שבו משתמשים במיקרואורגניזמים ובצמחים הגדלים על מצע חצץ. במרכז נמצא צמח סמר חד, אחד הצמחים שנבחנו בעבודה זו, מסומן בחץ.

Picture 1: Wetland 1 – one of a wetland complex in Hod HaSharon, Israel, used to purify treated wastewater by biological treatment using microorganisms and plants growing on a bed of gravel. The arrow in the center marks *Juncus*, one of the wetland plants tested in this study.

בבסיסו ונדנים. גומא הפרקים מציג מופע של גבעולים ארוכים וחלקים ללא עלים, בעל תפוצה טרופית, ובחודשי אפריל עד ספטמבר פורח בקצהו בתפרחת כמעין סוכך עם פרחים רבים. צמחים אלו הם דו-מיניים, אך גם מתרבים על ידי שלוחות. הצמח מוגדר כנדיד בארץ עקב פגיעה בבתי הגידול הטבעיים שלו (פינברון-דותן ודנין, 1998).



תמונה 2: גומא פרקים (*Cyperus articulatus L.*) – צמח האגן הירוק שנמצא היעיל ביותר בהרחקת ביספנול-A במערכת הידרופונית בעבודה הנוכחית.

Picture 2: *Cyperus articulatus L.* – a wetland plant that demonstrated the most effective removal abilities of bisphenol-A in the experimental hydroponic system.

הטיפול במט"ש כולל מספר שלבים: טיפול קדם, טיפול ראשוני, טיפול שניוני וחיתוי או החדרה דרך שכבות חול למי תהום (SAT) (Arye, Dror, & Berkowitz, 2011).

במקרים מסוימים, מי קולחין עוברים טיפול שלישוני. בטיפול זה מסלקים ממים מטופלים מיקרו-מזהמים ושאריות של חומרים כימיים. הניקוי מתבצע על ידי מיקרואורגניזמים וצמחים בבריכות המיועדות לכך.

בהוד השרון הוקם אגן ירוק מלאכותי, אשר מוזן על ידי קולחים שניוניים ממט"ש כפר סבא וממט"ש הוד השרון, והמים המטופלים מוזרמים לאפיק הירקון. כחלק מהטיפול הביולוגי של המים באגן הירוק נעשה שימוש בצמחים הגדלים על מצע חצץ (תמונה 1).

האגן הירוק בהוד השרון נבנה כדי לטפל בשאריות מקרו-מזהמים (חומר אורגני, חנקנים וזרחנים) ובמיקרו-מזהמים, כמו תרכובות פרמה, הורמונים ומזהמי תעשייה.

אגן ירוק הוא נישא אקולוגית המאופיינת בשטח אדמה רווי במים באופן קבוע או עונתי, דבר המעניק לו מאפיינים ייחודיים מבתי גידול יבשים. השטח יכול להיות רווי במים מתוקים, מלוחים או מליחים. אחד המאפיינים הבולטים של אגן ירוק הוא הצמחייה הייחודית שלו, אשר יכולה לגדול בקרקע רוויה במים, כלומר בתנאים של מחסור בחמצן מומס (תנאים אנאירוביים). צמחיית האגנים הירוקים מורכבת מסוגים שונים של צמחים אשר גדלים בתוך המים או ליד מקור המים. צמחים באגן הירוק ניזונים ממיקרו וממקרו אלמנטים, אשר נכנסים לאגן על ידי המים שבשפכים. צמחים קולטים ומפרקים מזהמים שונים המופיעים במים על ידי השורשים וחידקי סביבת השורש (Keddy, 2010).

בריוספרה ישנו שיתוף פעולה בין החידקים לצמח כאשר סביבה זו עשירה בחומרים שעוזרים לשגשוג החידקים (Helal & Sauerbeck, 1989).

מחקרים שונים מציגים את עושר החידקים בריוספרה באגנים ירוקים, חידקים אלו משחקים תפקיד ראשי בהרחקת מזהמים מהמים. מיקרואורגניזמים משגשגים בריוספרה כיוון שהיא סביבה עשירה בחומרים המופרשים על ידי הצמח (Stottmeister, Wiebner, Kusch et al., 2003).

סביבה עשירה בחידקים סביב שורשי הצמח מושכת מיקרואורגניזמים אחרים, כגון: פרוטוזואות ונמטודות אשר ניזונים מהם, דבר היוצר מעגל של מזון. כמו כן, שטח הפנים של שורשי הצמח רחב יותר מחצץ, דבר המוביל למספר חידקים גבוה יותר ליחידת שטח (Williams, Mitsch, & Gosselink, 2007).

לצורך המחקר נבחרו שני צמחים, הנפוצים באופן טבעי בסביבת נחל הירקון ושנשתלו באגן הירוק הוד השרון.

1. גומא הפרקים – *Cyperus articulatus L.*

גומא הפרקים (תמונה 2) הוא עשב רב-שנתי ממשפחת הגמאים כאשר בניגוד לרוב בני משפחתו אינו מכיל עלים

בידוד חיידקים

כדי לבדוד חיידקי ריזוספרה של שורשי גומא הפרקים נלקח 1 גרם שורשים והוכנס לתוך מבחנה המכילה 100 מ"ל דטרגנט 0.5% TWEEN. התרחיף המתקבל נמהל ונזרע על גבי מצע גידול LB בשיטת זריעות בידוד. המושבות שהתקבלו נשלחו לזיהוי למעבדות HY-LAB.

גידול חיידקים

חיידקים גודלו על גבי קרקע מזון LB בריכוזים שונים של מזינים, בטמפרטורה של 28 מעלות צלזיוס בטלטול איטי.

שיטות האנליזה

זיהוי ריכוז ביספנול-A בדגימות נעשה על ידי כרומטוגרפיה נוזלית (HPLC), עם קולונה RP 18, ומריץ אצטוניטריל ומים ביחס 50/50, ובקצב הזרימה של 1 מ"ל לדקה. אורך גל הפליטה היה 305 nm.

ממצאי המחקר

המחקר בוצע במערכת מודל הידרופונית בפקולטה לחקלאות.

התחלנו במחקר במקביל באגן הירוק בהוד השרון ובחממה בפקולטה לחקלאות. ניסויים בוצעו בחממה, בפקולטה לחקלאות, במערכת הידרופונית של 10 ליטר, המכילים חצץ וצמחים, בדומה למערכת טיפול במים באגן הירוק בהוד השרון. השורשים של הצמחים נטבלו בתמיסת המזהם BPA, וקביעת ריכוזו בתמיסה נעשתה בעזרת HPLC. תמיסות מטופלות הראו ירידה בריכוז מזהם מ-100 חל"ב ל-7 חל"ב, ומ-100 חל"ב ל-63 חל"ב תוך שלושה ימים, בטיפול על ידי גומא הפרקים וסמר חד בהתאמה, כמתואר באיור 1. בחזרות על הניסויים אלו הצמחים גומא הפרקים וסמר חד נמצאו מתאימים להרחקה מהירה של BPA. הממצאים הראו שגומא הפרקים הוא הצמח היעיל ביותר להרחקת BPA במערכת הידרופונית שנבחנה במעבדה.

במקביל נבדק פירוק BPA בחצץ בלבד מהאגן הירוק כדי לבחון פעילות חיידקים. במערכות הללו נבדקה הרחקת BPA מתמיסות בריכוזים 50, 100, 200 חל"ב עד 95% מהמזהם הורחק בתנאים הללו.

נבחנה השפעת אור וחושך על הרחקת BPA מתמיסה בריכוז מזהם 200 חל"ב בגומא פרקים וסמר חד. הניסוי בוצע במערכת הידרופונית. טיפול חושך בוצע על ידי כיסוי הצמחים בניילון שחור. בניסויים אלה לא נצפה הבדל בקצב הרחקת ביספנול-A בין תנאי חושך ואור, בגומא הפרקים ובסמר חד כל החומר נעלם לאחר שלושה ימים.

באופן דומה נבחנו השפעת גודל הצמח, וריכוז המזהם ההתחלתי בתמיסה המטופלת. התוצאות שקיבלנו מראות שככל שהצמח גדול יותר כך הוא מרחיק את ה-BPA בצורה



תמונה 3: סמר חד (*Juncus acutus*), צמח הגדל באגן הירוק בהוד השרון, שיכולתו להרחקת ביספנול-A ממים מזוהמים נבדקה במחקר זה.

Picture 3: *Juncus acutus* – a wetland plant which was tested in our study for its removal ability of bisphenol-A from contaminated water.

2. סמר חד – *Juncus acutus*

סמר חד (תמונה 3) הוא עשב רב-שנתי ממשפחת הסמריים, בעל גבעול חסר עלים וראשו דוקרני. גדל בצברים עגולים וצפופים בקוטר של עד מטר, ולגובה של עד מטר וחצי. בעל תפוצה ים-תיכונית ומערב אירנו-טורני, נפוץ בחלקים שונים של הארץ מביצות ועד ערבות הירדן ומואב. פורח בין אפריל לספטמבר (פינברון-דותן ודנין, 1998).

מטרת המחקר

מטרת המחקר הייתה לבחון מה היא תרומתם של צמחי אגן ירוק, גומא הפרקים וסמר חד וחיידקי סביבת השורש בפירוק BPA; לאפיין ולכמת את יכולת ההרחקה של BPA על ידי הצמחים גומא הפרקים וסמר חד; להבין מהי התרומה של חיידקי סביבת שורשי הצמחים; לבחון שימוש בצמחים בתנאי שטח באגנים ירוקים, הן כטיפול שלישוני, כנעשה בהוד השרון וכמודל שניוני, בגופי מים נוספים שיתגלו כמכילי BPA מפעילות בתעשייה.

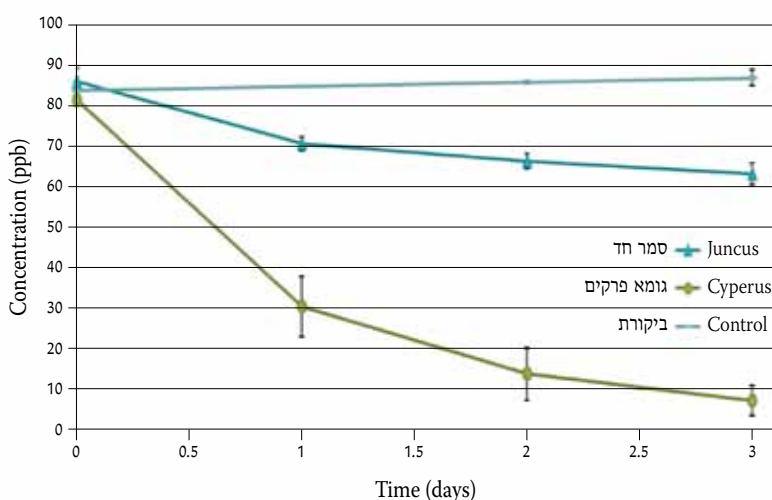
שיטות וחומרים

גידול צמחים

הצמחים גודלו בחממה בפקולטה לחקלאות.

הכנת תמיסות

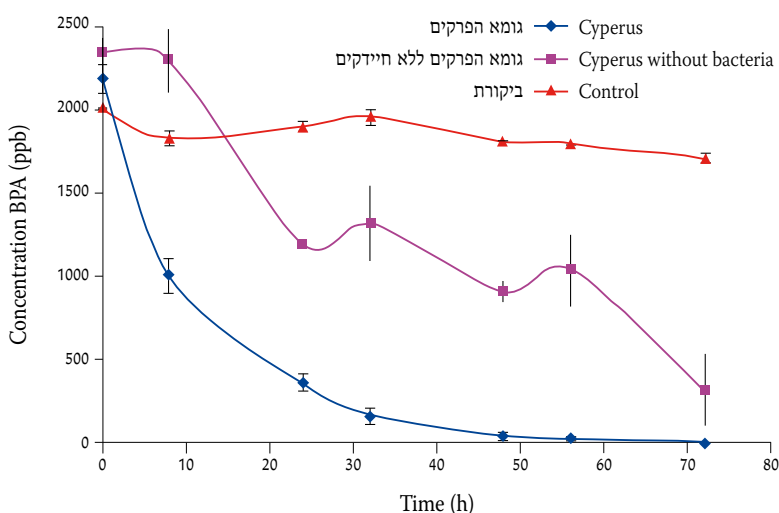
תמיסות מודל הוכנו על בסיס מים מזוקקים, וביספנול-A מסחרי (SIGMA).



איור 1: הרחקת BPA על ידי צמחי האגן הירוק: גומא הפרקים (*Cyperus atriculatus* L.) וסמר חד (*Juncus acutus*) במערכת הידרופונית ניסיונית, ממי מודל המכילים ריכוז מזהם התחלתי של 100 חל"ב.

Figure 1: BPA uptake by wetland plants – *Cyperus articulatus* and *Juncus acutus* in an experimental hydroponic system, with water at an initial bisphenol-A concentration of 100 ppb.

כמו כן, תוצאות המחקר הראו, שחיידקי ריזוספרה של גומא הפרקים משפיעים על פירוק והרחקת BPA. בנוכחות חיידקים של גומא הפרקים המזהם הורחק תוך 48 שעות לעומת גומא הפרקים ללא חיידקים, שהרחיק מזהם עד 300 חל"ב לאחר 72 שעות במערכת הידרופונית, כאשר הריכוז ההתחלתי היה 2,500 חל"ב (איור 2). חיידקי ריזוספרה של שורשי גומא הפרקים עוכבו בעזרת האנטיביוטיקה אוגמנטין.



איור 2: הרחקת BPA על ידי גומא הפרקים (*Cyperus atriculatus* L.) עם ובלי נוכחות חיידקי שורשי הגומא, ממים המכילים ריכוז מזהם התחלתי של 2000 חל"ב.

Figure 2: BPA removal by the wetland plant *Cyperus articulatus* with and without associated bacteria from *Cyperus* roots, from water at an initial bisphenol-A concentration of 2000 ppb.

מהירה יותר, וככל שריכוז המזהם עולה, כך קצב ההיעלמות של ה-BPA בתמיסה עולה.

נערכו ניסויים לקביעת תוצרי פירוק של BPA בתהליך הרחקה על ידי הצמח גומא הפרקים, בריכוז המזהם 5, 10, 50 חל"ב. בנוסף לספיחה פסיבית של BPA מתרחשים תהליכי הידרולציה וחמצון של BPA על ידי אנזימים של הצמח.

נמצאו כמה תוצרי פירוק של BPA, כאשר העיקרי ביניהם הוא 3-OH-BPA. שאר תוצרי הפירוק של ה-BPA התקבלו בריכוזים נמוכים, בהשוואה לריכוז 3-OH-BPA, ולכן ניתן להסיק, כי או שהזיקה שלהם לתגובה נמוכה יותר מתוצר הפירוק העיקרי, או שהם לא יציבים ומתפרקים למולקולות קטנות יותר בזמן קצר, וקשה לעקוב אחריהם תוך כדי תהליך ההרחקה. בהמשך הוקמה מערכת הידרופונית בהיקף PILOT במיכלים בנפח של 20 ליטר, כמתואר בתמונה 4.



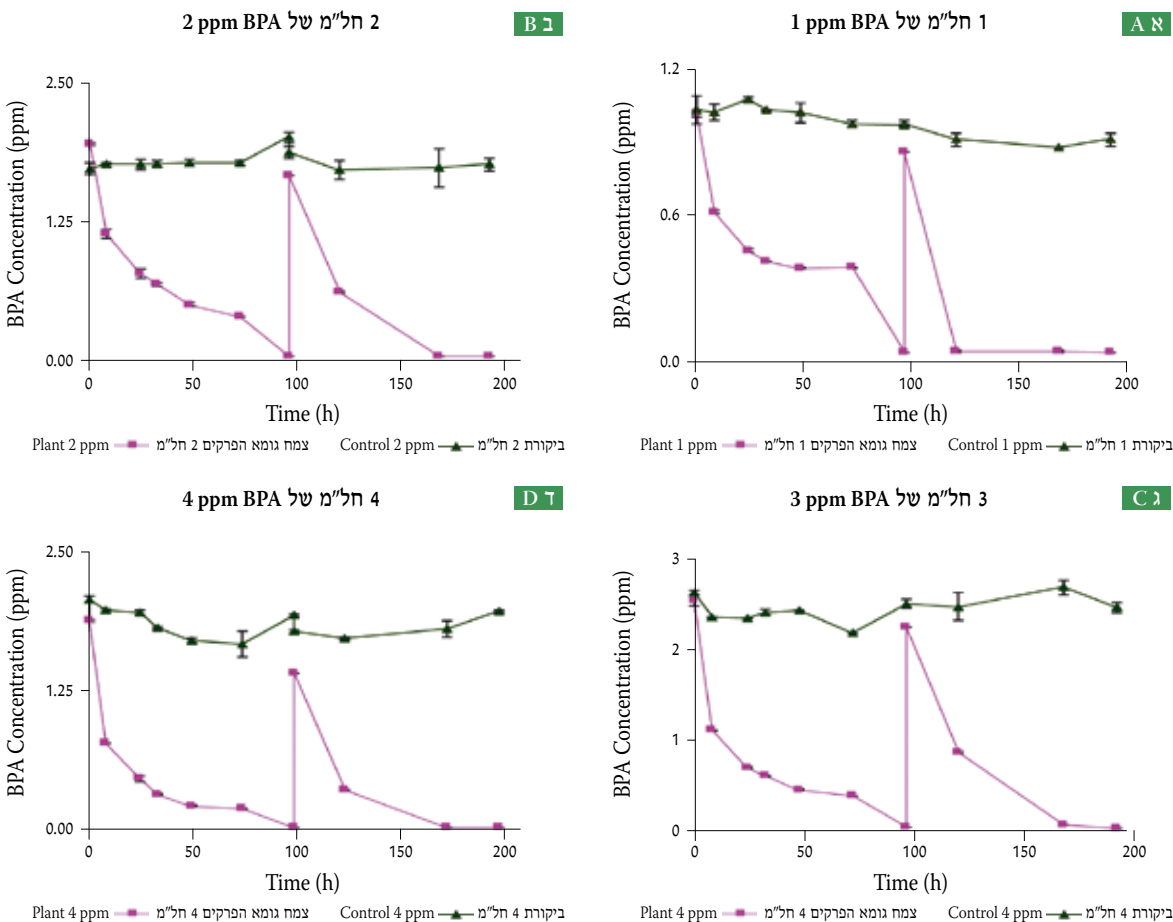
תמונה 4: מערכת הידרופונית, עם מכילים בנפח 20 ליטר, המדמה את האגן הירוק בהוד השרון, ישראל. בתמונה מוצגת המערכת שבה צמחי גומא הפרקים (*Cyperus atriculatus* L.) פעילים בהרחקת BPA מתמיסות מימיות ומזהם.

Picture 4: The hydroponic system, with a 20 liter capacity, which simulates the Hod HaSharon Wetland, Israel, used in our research. The wetland plant – *Cyperus articulatus* removes BPA from polluted water.

בניסויים שנערכו נבחנו ההשפעות של תנאי חושך, חיידקי ריזוספרה, והשפעת ריכוז המזהם בתמיסה על הרחקת BPA על ידי גומא הפרקים.

כמו בניסויים בהיקף קטן ראינו שאין הבדל משמעותי בין תנאי אור וחושך בכושר ההרחקה של BPA בריכוז של 1 חל"ב, אבל נצפה הבדל בהרחקה כאשר העלינו את ריכוז המזהם ל-2 חל"ב. כך צמח בתנאי אור הרחיק מזהם תוך 32 שעות, לעומת 72 שעות בתנאי חושך.

ריכוז המזהם בתמיסה מגביר את קצב ההרחקה גם בהיקף גדול יותר, כלומר ככל שריכוזו גבוה יותר כך קצב היעלמות המזהם מהיר יותר.



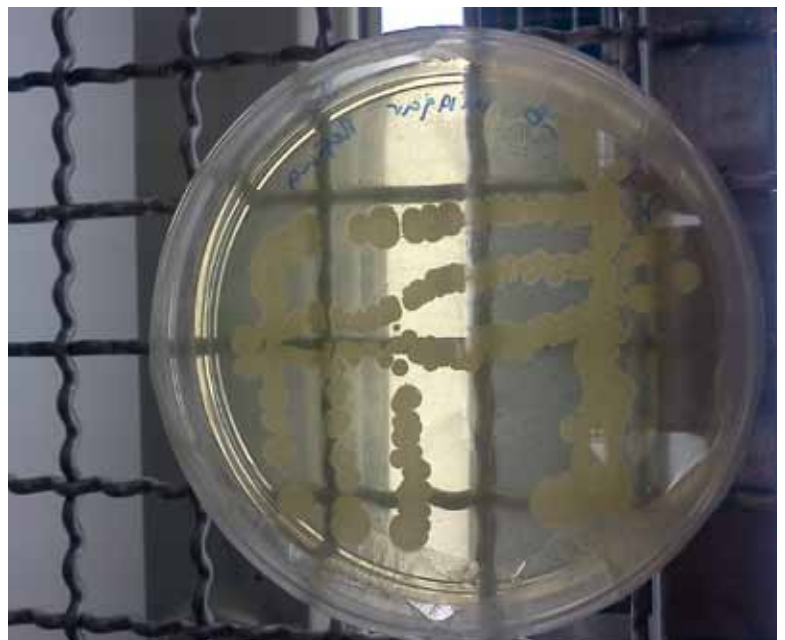
איור 3: הרחקת BPA על ידי גומא הפרקים *Cyperus atriculatus* (L.) עם ובלי נוכחות חיידקי שורשי הגומא, ממים המכילים ריכוז מזהם התחלתי של 2000 חל"ב.

Figure 3: Removing BPA by the wetland plant *Cyperus atriculatus* from a water solution with an initial pollutant concentration of 1, 2, 3 and 4 ppm (a, b, c and d, respectively) using an experimental hydroponic system, that simulated a continuous process with a second addition of bisphenol-A. The second dose of BPA was added after 96 hours (marked with an arrow).

במחקר גם נבחן כושר ההרחקה של BPA על ידי צמח גומא הפרקים עם ובלי עלווה, שנעשה בתמיסות בריכוז המזהם 1,2,3,4 חל"מ. התוצאות הראו, כי אין הבדל ב-BPA בריכוזי תמיסות 1,2,3 חל"מ, ויש הבדל בריכוז הגבוה ביותר שנבדק - 4 חל"מ. העשרה בחיידקי ריזוספרה שיפרה את כושר ההרחקה של BPA ידי הצמח השלם מתמיסות בריכוזים 1,2,3,4 חל"מ. בנוסף לכך, כדי להבין האם מערכת הידרופונית יכולה לעבוד באופן רציף, נערך ניסוי שבו מוסיפים מנה שנייה של מזהם לאחר 96 שעות לתוך המערכת ובודקים איך הצמחים מתמודדים. התמיסות מטופלות הכילו ריכוז מזהם התחלתי 1,2,3,4 חל"מ. ראינו שהמערכת הרחיקה בצורה יעילה את המזהם, והגבירה את קצב הפירוק. לדוגמה, בריכוז של 1 חל"מ כל המזהם הורחק לאחר 96 שעות במנה ראשונה, ולאחר 24 שעות במנה השנייה. מכאן ניתן להסיק, שהצמח מתאים את עצמו לנוכחות המזהם בסביבה, ועשה אינדוקציה לשיפור תהליך אקטיבי של הרחקה או פירוק BPA (איור 3).

בחלק שני של המחקר החוקרים בודדו ובחנו חיידקי שורשי גומא הפרקים.

החיידקים בודדו משורש של גומא הפרקים, ונזרעו על גבי צלחות פטרי במעבדה. הצלחות נשלחו למעבדות חי לזיהוי. החיידק שזוהה הוא *Bacillus megaterium* (תמונה 5).

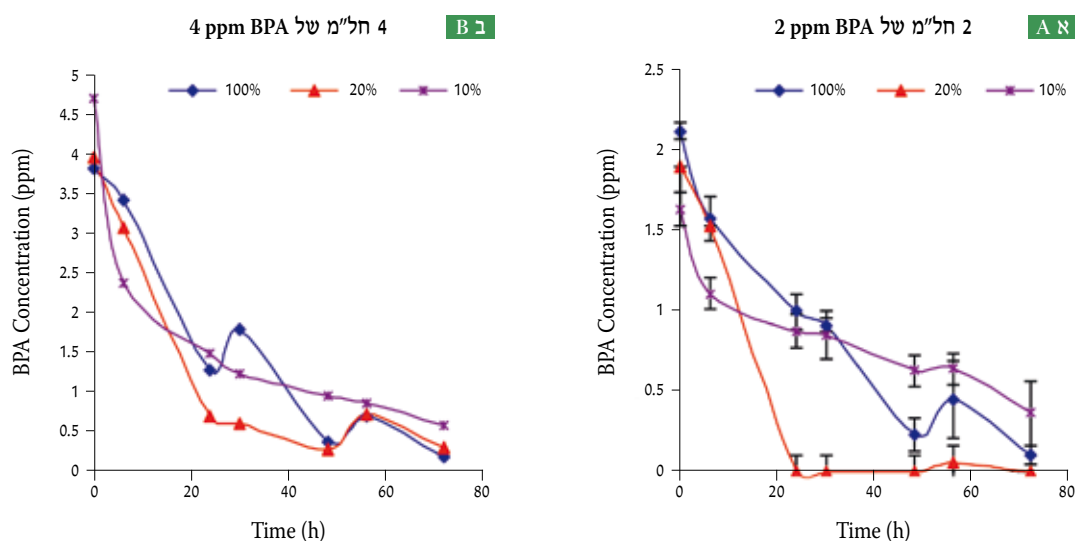


תמונה 5: *Bacillus megaterium* שזוהה ובודד מהשורשים של גומא הפרקים, המסייע בהרחקת ביספנול-A מתמיסות מימיות.

Picture 5: *Bacillus megaterium* the associated bacteria that was isolated from *Cyperus atriculatus* roots and identified by rRNA Gene PCR and sequencing. The bacteria are involved in the BPA removal process.

איור 4: הרחקת BPA על ידי חיידקים בשורשי גומא הפרקים *Bacillus megaterium* – מתמיסות בריכוז BPA התחלתי 2 (א) ו-4 (ב) חל"מ. החיידקים גדלו על קרקע מזון שהכילה 10%, 20%, 100% מכמות המזינים המקורית.

Figure 4: BPA removal by *Bacillus megaterium*, at initial contaminant concentrations of 2 ppm (a) and 4 ppm (b). Luria-Bertani growth medium that contains 10%, 20%, 100% nutrients from the original amount was used in the culture experiments.



מקורות

- פינברון-דותן, נ. ודנין, א. (1998). המגדיר לצמחי-בר בארץ ישראל. מהדורה שנייה. ירושלים: כנה.
- Arye, G., Dror, I., & Berkowitz, B. (2011). Fate and transport of carbamazepine in soil aquifer treatment (SAT) infiltration basin soils. *Chemosphere*, 82: 244–252.
- Hass, U., Christiansen, S., Boberg, J., Rasmussen, M.G., Mandrup, K., & Axelstad, M. (2016). Low-dose effect of developmental bisphenol: An exposure on sperm count and behaviour in rats. *Andrology*, ISSN 2047-2919: 1–14.
- Helal, H.M. & Sauerbeck, D. (1989). Carbon turnover in the rhizosphere. *Z Pflanzenernähr Bodenk.* 152: 211–216.
- Keddy, P. A. (2010). *Wetland ecology: Principles and conservation* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press: p. 497.
- Oehlmann, J., Schulte-Oehlmann, U., Kloas, W., Jagnytsh, O., Lutz, I., Kusk, K. O., Wollenberger, L., Santos, E. M., Paull, G. C., Van Look, K. J., Tyler, C. R. (2009). A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society London. B, Biological Sciences* 364 (1526): 2047–2062.
- Stottmeister, U., Wiebner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R., & Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnol Adv.* 12: 93–117.
- Vandenberg, L.N., Hauser, R., Marcus, M., Olea, N., & Welshons, W.V. (2007). Human exposure to bisphenol A (BPA). *Reproductive toxicology*, 24(2): 77–139.
- William, J., Mitsch, J. G., & Gosselink (2007). *Wetlands*. (4th ed.). New Jersey: John Wiley and Sons.
- Yamamoto, T., Yashura, A., Shiraishi, H., & Nakasugi, O. (2001). Bisphenol A in hazardous waste landfill leachates. *Chemosphere*, 42: 415–418.

בדקנו האם החיידק יכול להרחיק את ה-BPA מריכוזים 2,4 חל"מ. ראינו שחיידק מרחיק מזהם בצורה יעילה ולאחר 8 שעות רוב כמות המזהם נעלמה בשני הריכוזים. בנוסף בחנו האם החיידק יכול להשתמש ב-BPA כמקור פחמן. לשם כך הוגבל ריכוז מצע גידול בריכוזי מזון של 20% ול-10% מהכמות הרגילה במצע LB. ניסויים אלה נעשו בתמיסות המכילות 4,2 חל"מ של BPA. ב-20% LB הורחק BPA בקצב המהיר ביותר לשני הריכוזים שנבדקו (איור 4).

דיון ומסקנות

בכל הנסקר בפרקי העבודה השונים נמצא, שלגומא הפרקים כושר הרחקה גבוה של BPA במערכת הידרופונית המוצבת בחממה של הפקולטה לחקלאות. תכונות אלה הופכות את גומא הפרקים לצמח יעיל לשימוש באגן הירוק בהוד השרון. רכיב נוסף המקנה יתרון לגומא הפרקים הוא חיידק ריזוספרה – *Bacillus megaterium*, שהראה את יעילותו בפירוק ובהרחקה של BPA. הדבר נובע מכך, שהצמח גומא הפרקים יחד עם החיידק יוצרים אסוציאציה מעולה להרחקת המיקרו מזהם וסילוקו ממים מזהמים מהר יותר לעומת הצמח סמר חד.

יש לציין, שנדרשת עבודת מחקר נוספת לשם השלמת המידע שהוצג בעבודה הנוכחית, בהיבטים של:

1. בדיקת ביצועים של גומא הפרקים בתנאים אמיתיים של מי קולחין המגיעים לאתר אגן הירוק בהוד השרון.
 2. הבנת הגורמים המשפיעים על הישרדותו של הצמח גומא הפרקים בסביבת האגן הירוק בהוד השרון.
- במבט לעתיד, נראה, שלצמח גומא הפרקים יש פוטנציאל יישומי בטכנולוגיה המשמשת לניקוי BPA באגן הירוק בהוד השרון.