

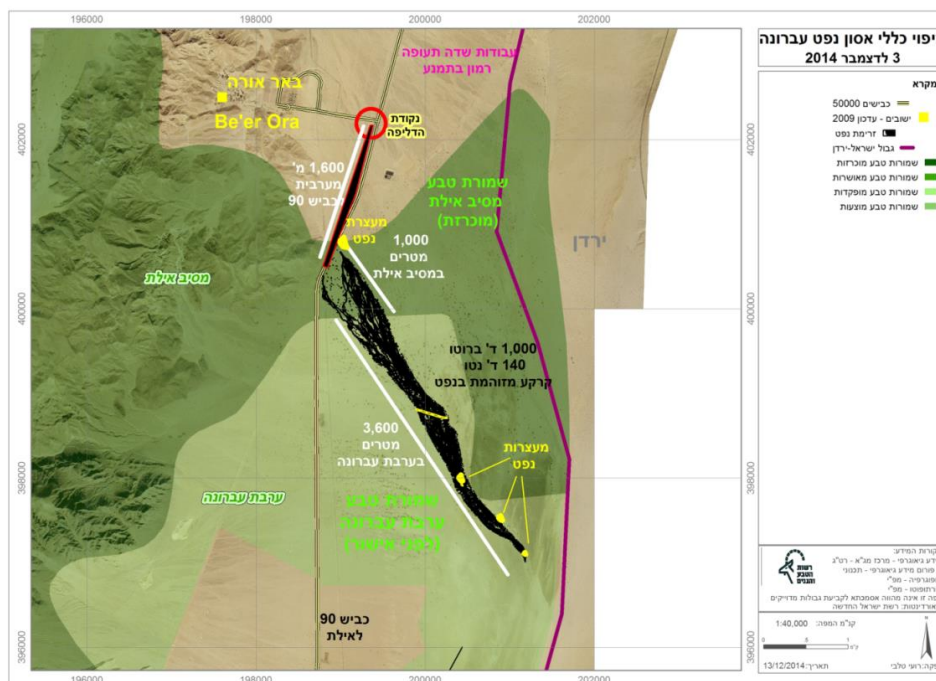
סיכום תהליך שיקום קרקע המזוהמת בנפט בעברונה

טל פולק, עודד סהר, גולן רידר, ערן היימס, אסף הברי, נעם לידר, יהושע שקדי, גלעד גבאי ואסף צוער

מבוא

ב-3 בדצמבר 2014 נבקע צינור נפט של חברת קצא"א בצמוד וממערב לכביש 90 בצומת באר אורה. הפריצה התרחשה במהלך עבודות העתקת קו הנפט במסגרת העבודות שנדרשו בשל שדה התעופה החדש בעברונה. למעלה מ-5,000 מ"ק נפט גולמי זרם במקביל לכביש דרומה לאורך 1,200 מ' מצדו המערבי, ושטף מזרחה אל תוך חורש השיטים בשולי מלחת עברונה תוך שעה מרגע הדליפה. מיד בתחילת הארוע החלו פעולות (חלקיות) למזעור נזקים כאשר הדאגה העיקרית בהתחלה הייתה למנוע הגעה של הזרימה לכיוון ירדן או מפרץ אילת.

איור 1: תיאור אזור פריצת וזרימת הנפט, והאזורים בהם נאצר הנפט.





הנפט זרם בנחל רחם לאורך כ-6 ק"מ והגיע כ-300 מ' מגבול ירדן. ציוד מכני הנדסי כבד הופעל ליצירת אתרים בהם נאצר נפט. היו ארבע אתרים בתוך השמורה שאגרו -2,500 2,100 אלפי מ"ק של נפט גולמי בתוך השמורה, ומתוארים בעיגולים צהובים באיור 1. האיור מציג גם את השטח בו זרם הנפט (בשחור). איור 2 מציג תצלום של אתר בו נאצר נפט. ברוב השטח הנפט התפזר לאורך הוואדי בערוצי זרימה קטנים. חדירת הנפט אל הקרקע החרסיתית ברוב השטח לא עלתה על 20 סנטימטר, ובאזורים בהם נאצר הנפט הוא חדר לעומק גדול יותר, אך כנראה לא יותר מ-50 ס"מ לעומק הקרקע.

איור 2: צילום של אחד האזורים בהם נאצר נפט בתוך השמורה.



הפעולות בימים הראשונים התמקדו בשאיבת הנפט הגולמי מאתרי אצירת הנפט אל מחוץ לשמורה, וכן פונתה קרקע הספוגה בנפט רב מאתרים אלה. החומרים פונו לאתר איסוף אשפה נמרה, הנמצא במרחק קצר מהיישוב באר אורה.

החלטת ממשק נוספת שהתקבלה היא לסלק מהשטח את פירות עצי השיטה הטבולים בנפט, משום שאנחנו חוששים שכאשר הנפט יתאדה מהם והריח יפוג, יהיו בעלי חיים שיזונו מהם. פעולה זו תבצע ידנית ובזהירות, סביב לעצי שיטה באזור המזוהם.

לאור ממצאים המעידים לפגיעה בנביטה של שיטים בקרקע המזוהמת בנפט, הוחלט על ביצוע טיפול ביולוגי-כימי להורדת כמות מרכיבי הנפט מהקרקע. לצורך כך פרסמו קצא"א

ורט"ג קול קורא לחברות להציע שיטות טיפול להסרת הנפט מהקרקע באתרו וללא הסרת קרקע.

החברות שנגשו ועמדו בתנאי המכרז הקימו מערך ניסוי בחלקה שנבחרה במעלה הנחל בשמורת עברונה, בחלקה הצפון מערבי של השמורה. בחלקת ניסוי שנבחרה עומק הזיהום בחלקה זו היה רדוד (0.05-0.15 מ') יחסית לממוצע שנדגם על ידי קצא"א בשאר השמורה 0.3-0.4 מ'. כל חלקת ניסוי הייתה בגודל של 10 מ"ר. החברות החלו את הניסוי בתאריך 15/3/2015. החלקות נדגמו שלוש פעמים במהלך הניסוי (בהתחלה, אמצע ודיגום סופי) על ידי חברה LDD. באנליזת המעבדה נבדקו מדדים של TPH (כלל הפחמנים – C8-C35) והפרקציות שלו - GRO (C6-C10), DRO (C10-C25) ו-ORO (C25-C35).

טבלה 1 – תוצאות פילוט שיקום על ידי חמש חברות מתמודדות מתוך הדוח של המשרד להגנת הסביבה בעריכת איתי הרלינג (2015) – נספח 1

חברה א	חברה ב	חברה ג	חברה ד	חברה ה	עיקר השיטה
קילטור, הרטבה והחדרת בקטריות בצירוף חומרי Bioenhancement שעוזרים לפעולת הבקטריות	תכשיר לשיקום ביולוגי המבוסס על שילוב של אינזימים וחידקים המפרקים את הנפט לתוצרים ידידותיים לסביבה.	OSEI - Oil Spill Eater II חומר על בסיס אינזימתי ללא חיידקים אך מאיץ את פעילות החיידקים המקומיים	שימוש בפירורי גומי מצמיגים ממוחזרים הסופחים אליהם את הנפט. הפירורים מפוזרים על הקרקע ללא צורך בהשקיה	תמיסה החומר מוחדרת לקרקע ומפרקת את מולקולות הפחמימניים ויוצרת מטריצה סיליקטית.	עיקר השיטה
ק	לא	חלקי	כ	כ	קלטור
ק (2.67)	ק (6)	ק (5)	לא	כ (3.4)	הרטבה (ליטר/מ"ר)
26.7	32	69.8	86.9	6.37	אחוז ירידה TPH בפני השטח
96.5	?	97.8	74.3	48.7	אחוז ירידה TPH בעומק 0.2 מ
42	?	89.3	44.5	-3.2	אחוז ירידה TPH בעומק 0.3 מ

פיילוט הדונם

לאור ממצאי ניסוי חמשת החברות שהתבצע על פני שטח קטן (נספח 1). יצא מכרז לבחירת חברה שתבצע טיפול ניסיוני על שטח של דונם אליו הורשו לגשת רק 4 חברות. טיפול ניסיוני זה על שטח גדול יותר כונה "פיילוט הדונם". המכרז היה דו שלבי, כלומר החברה שתזכה במכרז ותעמוד בתנאי הפיילוט, תוכל לבצע את הטיפול בכלל השמורה. הקריטריונים לבחירה היו: מחיר, התחייבות לפירוק כמות מסויימת של נפט, השפעות על השמורה כגון:



השפעת החומרים המוספים לסביבה, ימי עבודה בשטח, כלי רכב בשטח, כמות מים, צנרת, התרשמות כללית. חברת ליקוויד גז נבחרה בשל ההצלחה בניסוי הקודם וההתחייבות שלהם למינימום פגיעה בשמורה.

פיילוט הדונם (נספח 2) הצליח להוריד את ריכוז הנפט החציוני בפני השטח (TPH) ביותר מ 70%. לאור הצלחה זו הוחלט לצאת לעבודת שיקום מלאה באותה מתכונת כפי שהיה בפיילוט הדונם.

מטרת מסמך זה היא להציג את תהליך שיקום הקרקע משרידי הנפט ותוצאות תהליך זה.

שיטות

לב התהליך הפיסקלי-ביולוגי שמיושם הוא פירוק באמצעות החיידקים של שרשראות פחמן ארוכות וכבדות שנוצרו מהזיהום ומקבלות את השם הכללי TPH, לכדי שרשראות פחמן קצרות וקלות יותר שחלקן יכולות עם הזמן להתנדף (להתפרק). מדובר בתהליך המשלב חומרים שתפקידם לגרום לקרקע שזוהמה בשמורה להפוך לחדירה יותר למים, חומרי תמיכה בחיידקים ולבסוף החיידקים עצמם אשר מפרקים את הנפט. החדרת החומרים והשקייה עצמה נעשית באותה מערכת השקייה שנפרסת בשמורה ובכך הגופים מיעלים את התהליך תוך חסכון במשאבים וצמצום "טביעת הרגל" בשטח של אמצעי היישום. תהליך החדרת החומרים הוא מידי ולוקח שעות בודדות לכל דונם בשטח השמורה. יתר הזמן משמש להזרמת מים שנחוצים לחיידקים כדי לחיות ולשגשג. בזמן זה, החיידקים "מכרסמים" את הזיהום ובכך מקטינים את כמות הנפט בקרקע. על מנת לבחון את הצלחת הטיפול נדגמו 250 נקודות דיגום שפוזרו אקראית בשטח המטופל. בכל נקודה נדגמו שני עומקים: Shallow (0-10 מ"מ) ו- Deep (20-40 מ"מ). כל חמש נקודות דיגום אוחדו לדגימה מורכבת (אחת לכל עומק) לסך הכל של 50 דגימות מורכבות שנשלחו לבדיקת מעבדה במכון הנפט בעבור כל עומק קרקע. בשני מועדי דיגום: t_0 – לפני תחילת הטיפול ו- t_1 – בסיום הטיפול. נקודות הדיגום נבחרו בצורה אקראית על שכבת ממש של זרימת הנפט בתוכנת Arc GIS (לפירוט על שיטת הדיגום ראה נספח 3). יש לציין שחברת ליקוויד גז דגמה תוך כדי התהליך באופן עצמאי. תוצאות דיגום זה לא מוצגות.

על מנת לבחון עד כמה נקודות הדיגום אכן דגמו אזורים חשודים ועד כמה עבודות השיקום (מתזים) אכן נפרשו באזור שזוהם בנפט. מופו כל נקודות הדיגום והמתזים. בחינה מרחבית של אתרי הדיגום ביחס למיפוי זרימת הנפט מראה שכל נקודות הדיגום והמתזים היו באזור בהם זרם נפט בארוע 2014. בתאריך 13/3/2020 היה ארוע שטפוני חלש שגרם לפגיעה חלקית בתהליך הטיפול. מניתוח מרחבי של האזורים שנפגעו ולא הוחזרו לתפקוד שיקומי נראה שהפגיעה זניחה עבור התוצאה כאשר רוב אתרי הדיגום מרוחקים מאזור זה.



נתוני הדיגום (נספח 4) נותחו על ידי שימוש בתוכנת R גרסה 4.0.3. נערכה השוואה בין מועד הדיגום הראשון (t_0) למועד הדיגום האחרון (t_1) כאשר התוצאה הקובעת היתה אחוז הירידה החציוני של ריכוז הנפט (TPH) בקרקע. בנוסף נבדק השינוי ביחס של שרשראות הפחמן הבינוניות לשרשראות הפחמן הארוכות - $\frac{DRO}{ORO}$, עליה ביחס זה מתארת את הפירוק של השרשרות הארוכות והבעייתיות יותר. ניתוח הנתונים נעשה על כל התוצאות ביחד ועל שני העומקים השונים רדוד (Shallow) ועמוק (Deep) בנפרד. כיוון שהתפלגות התוצאות איננה עומדת בהנחות של מבחן פרמטרי, בוצע מבחן א-פרמטרי Wilcoxon rank sum test שבוחן את השונות בין תוצאות הדיגום לפני ואחרי הטיפול הביולוגי. בחינת השינוי נעשה על הממוצע החציוני של התוצאות.

תוצאות

במבט כללי על הנתונים נראה שישנה שונות גדולה בריכוז הנפט בין דגימות וישנה נקודת קיצון אחת משמעותית מזמן t0 (איור 3) בשכבת הקרקע הרדודה. כיוון שניתוח הנתונים בחן את הערך החציוני, נקודת הקיצון לא השפיעה על התוצאות בצורה משמעותית, אבל כן יצרה הטיה של הצירים בגרפים השונים. על כן, נקודת הקיצון נכנסה לנתונים המוצגים באיור 3 בלבד ולא נכללה בשאר האיורים. כאשר בוחנים את התפלגות ריכוזי הנפט (איור 4) ניתן לראות הסטה של ההתפלגות שמאלה (ירידה בריכוזים) מלפני ואחרי הטיפול הביולוגי. אך גם כאן מדובר בירידה קטנה יותר מזו שנצפתה בפילוט הדונם (נספח 2).

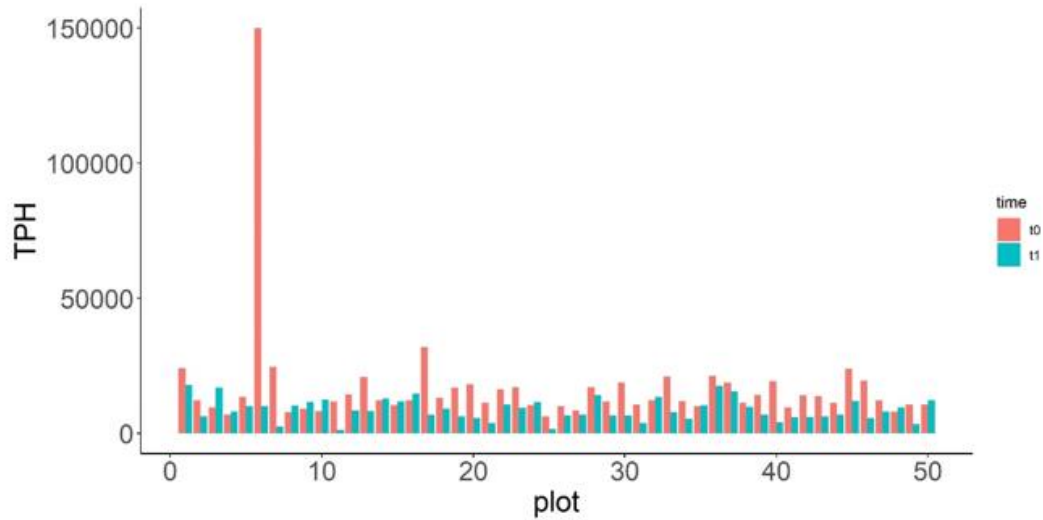
מהתוצאות ניתן לראות באופן ברור שתהליך השיקום הוריד בפחות מחצי את כמות הנפט הממוצעת בקרקע. בשכבה העליונה של הקרקע ריכוז הנפט ירד בכ 30% ואילו בעומק הקרקע ירד ריכוז הנפט ביותר מ 60% אך תוצאה זאת אינה מובהקת סטטיסטית (טבלה 2, איור 5). תוצאות אלו נמוכות משמעותית מתוצאות פילוט הדונם שם הייתה ירידה של מעל 95% בכלל דגימות הקרקע משני העומקים ומעל ל 70% בשכבת הקרקע הרדודה, בשכבת הקרקע העמוקה לא היתה מגמת שינוי מובהקת (נספח 2).

טבלה 2 – תוצאות הדיגום של הטיפול הביולוגי והירידה (באחוזים) בערכים החציונים של מרכיבי הנפט השונים: TPH – כלל הפחמנים (C8-C35); DRO – שרשראות פחמן בינוניות (C10-C25); ORO – שרשראות פחמן ארוכות (C25-C35); DRO/ORO – היחס בין השרשראות הבינוניות לארוכות.

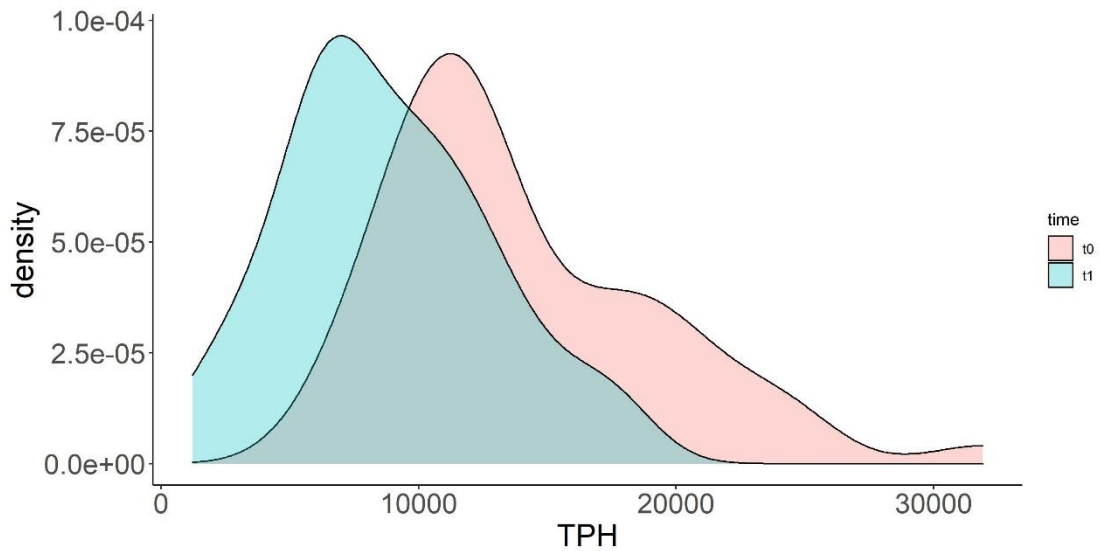
דיגום	עומק דיגום	DRO/ORO	DRO (מ"ג/קג)	ORO (מ"ג/קג)	TPH (מ"ג/קג)
T0	רדוד	1.550	7564.5	4849.5	12169.0
	עמוק	1.555	565	261.5	866.5
	כלל הדגימות	1.550	4105.0	3074	7419.0
T1	רדוד	1.455	4902.5	3425.5	8165.5
	עמוק	1.115	115	189.0	326.0
	כלל הדגימות	1.400	2426.5	1607	3978.5
אחוז הירידה	רדוד	6.1%**	35.2%**	29.4%*	32.9%**
	עמוק	28.3%*	79.6%	27.7%	62.4%
	כלל הדגימות	9.7%**	40.9%*	47.7%*	46.4%**

* p<0.05, ** p<0.01

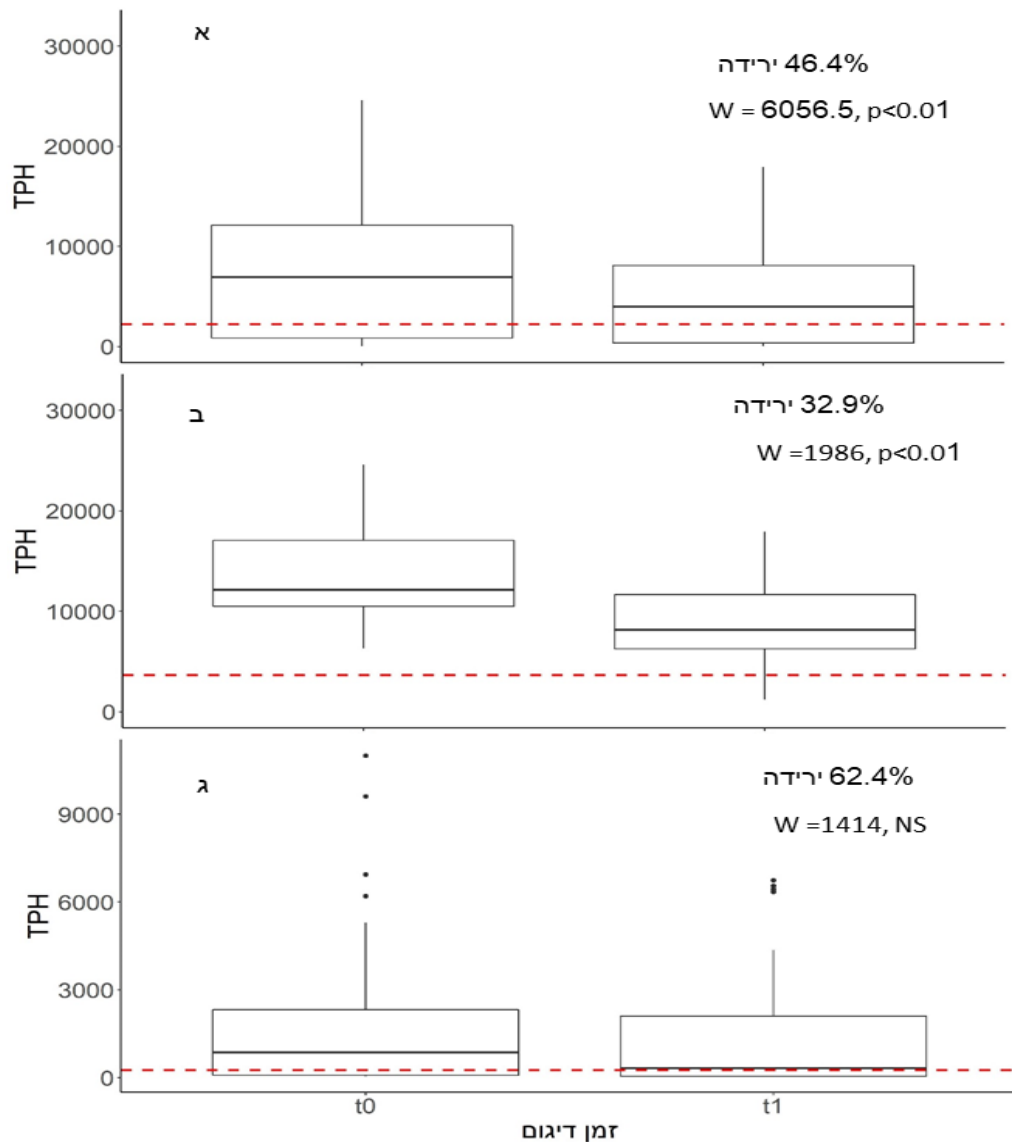
איור 3 – ריכוז כלל הפחממנים (TPH) פר דגימה מורכבת בשכבת הקרקע הרדודה לפני (t0) ואחרי הטיפול הביולוגי (t1)



איור 4 - התפלגות ריכוז כלל הפחממנים (TPH) בשכבת הקרקע הרדודה לפני (t0) ואחרי הטיפול הביולוגי (t1)



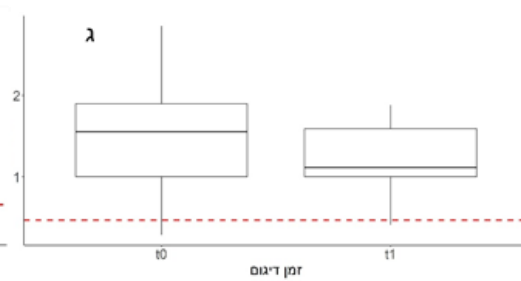
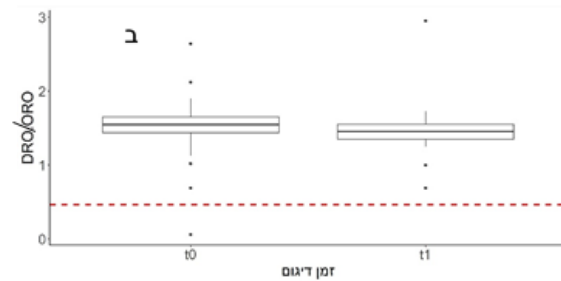
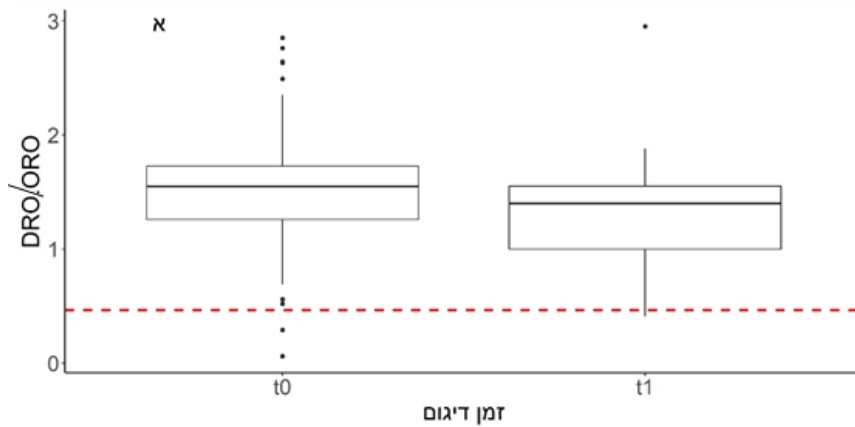
איור 5 – השינוי החציוני בריכוז כלל הפחמנים (TPH) לפני (t0) ואחרי הטיפול הביולוגי (t1). בכלל הקרקע (א), בפני השטח (ב), ובעומק הקרקע (ג). הקו האדום מסמן את ריכוז ה TPH המייצג את ירידה של 70%.



גם ביחס בין השרשראות הבינוניות לקצרות (DRO/ORO) התקבלה תוצאה שונה מזאת שהתקבלה בפיילוט של הדונם. בפיילוט היחס בין השרשראות גדל אחרי הטיפול, כלומר היה ריכוז גדול יותר של שרשראות בינוניות DRO ביחס לריכוז השרשראות הארוכות ביחס למה שהיה קודם (נספח 2). תוצאה שמצביעה על פירוק יעיל יותר של השרשראות הארוכות לשרשראות בינוניות. כמו כן נצפתה ירידה כללית גדולה יותר בכל אחד מהמדדים בנפרד. בתוצאות שהתקבלו לאחר השיקום הכולל לא רק שלא נראתה עליה ביחס בין זמן t0 לזמן t1

אלא אפילו נצפתה ירידה קטנה בפני השטח ובכלל הקרקע, בעומק היתה ירידה גדולה אפילו יותר אך היא לא היתה מובהקת (טבלה 2, איור 6).

איור 6 – השינוי החציוני בממד $\frac{DRO}{ORO}$: היחס בין השרשראות הבינוניות (DRO) לשרשראות הארוכות (ORO), לפני (t0) ואחרי הטיפול הביולוגי (t1). בכלל הקרקע (א), בפני השטח (ב), ובעומק הקרקע (ג). הקו האדום מסמן את ריכוז ה TPH המייצג את ירידה של 70%



הטיפול הביולוגי בכלל שטח שמורת עברונה הצליח להוריד את ריכוז הנפט בפחות מחמישים אחוז, יעד נמוך מזה שנקבע והתקבל בפילוט הדונם. גם היחס DRO/ORO לא הראה ירידה בריכוז הנפט (היחס אמור לגדול בין שתי נקודות הזמן ובכך להצביע על פירוק יעיל יותר של השרשראות הארוכות – ORO). תוצאות אלו מעידות גם על המורכבות של ביצוע טיפול שכזה בשטח הטרוגני, עם שונות גבוהה של ריכוזי הנפט בקרקע, בתנאים סביבתיים שאינם אופטימליים הכוללים שטפונות ונזקים מבעלי חיים. למרות הנאמר, הטיפול בשטח בוצע בצורה טובה בתנאים שהיו ידועים מראש. על כן, הציפיה בעקבות הפילוט היתה להצלחה גדולה יותר בהורדת ריכוז הנפט בקרקע. ככל הנראה שברמה של כלל השטח הטיפול עצמו לא היה מספק על מנת לנקות את מרבית הנפט מהקרקע, ולכך יש השלכות על כל רמות הטרופיות של המגוון הביולוגי בשמורה.

עבודות מחקר פרטניות על נביטה בשיטים שבוצעו בבנק הגנים הישראלי (נספח 6) הראו שהנביטה של עצי השיטה נפגעת גם בריכוזי נפט מאוד נמוכים. נמצא כי הנפט בנוכחות הגולמית אינו מאפשר נביטה של שיטה ומיני צומח אחר ואלו שכן נובטים אינם שורדים לאורך זמן. בנוסף, נמצא עיכוב פיסיולוגי בנבט המתפתח והוא בעל פחות עלים אמיתיים וקצר יותר משמעותית. תוצאות דומות נמצאו בבדיקה על קרקעות שזוהמו לפני יותר מ-40 שנה באירוע דליפה דומה בשמורה (Golan et al., 2016). גם ברמות זיהום נפט פחותות של 70 ו-30% עדיין ניכרה ההשפעה השלילית של הנפט הן על הנביטה והן על התפתחות צמחי השיטה (Tran et al., 2018). רק בריכוזי נפט של 5-10%, חזרו רמות הנביטה והצימוח התקינות (נספח 6).

בחירת הטיפולים שנערכו בשמורה על נביטה והתפתחות הצומח הראו כי בשיטה, מין מפתח במערכת המדברים של שמורת עברונה הטיפול המשולב של קילטור יחד עם פעילות החברה המסחרית, אפשרו יחסית נביטה והתפתחות נאותים (נספח 6). גם ניסוי דומה שנערך על ידי רט"ג הראה שיפור בנביטה של זרעי שיטה בקרקעות שעברו את קילטור וטיפול ביולוגי.

בנוסף, המחקר בחן את השפעת הרכיב הרעיל בנפט על נביטה והתפתחות הנבט תוך הסרת המחסום הפיסיקלי בקליטת המים במערכת זו (הרכיב ההידרופובי). נמצא כי הרכיב הרעיל בנפט אינו מעכב נביטת זרעים בכל המודלים שנבדקו אולם חשיפה של הנבטים הגדלים לרכיב הרעילי לא אפשרו התפתחות נאותה של השורש המרכזי (נספח 6). מתוצאות בנק הגנים ישנה סבירות שהטיפול הביולוגי יסייע בנביטת עצי שיטה אך היא איננה גבוהה וכל עוד הרכיב הטוקסי באדמה קיים הנבטים שכן יצליחו לנבטות לא יתפתחו בצורה תקינה לכדי עצים.

חמש שנים לאחר פריצת הנפט נעשה הצעד הראשון המשמעותי לשיקום השמורה – ניקוי ביולוגי של הנפט בקרקע. השיקום הביולוגי בעברונה הוא צעד חשוב לשיקום השמורה אך



הוא איננו הצעד היחיד ולצערינו גם לא שלם. למרות הציפיות הגדולות בעקבות פילוט הדונם. השיקום הכולל היה משמעותית פחות יעיל מהפילוט עצמו והמשמעות היא שעדיין נשאר לא מעט נפט בשמורה והשלכותיו על המערכת האקולוגית חמורות.

ספרות

Golan, S., Faraj, T., Rahamim, E., Zemach, H., Lifshitz, D., Singer, A., Bar, D., Carmeli, D., Steinberger, Y., Sherman, C., Gati, E.M., 2016. The effect of petroleum hydrocarbons on seed germination, development and survival of wild and cultivated plants in extreme desert soil. *International Journal of Agriculture and Environmental Research*, 1743e1767.

Tran, T.H., Gati, E.M., Eshel, A. and Winters, G., 2018. Germination, physiological and biochemical responses of acacia seedlings (*Acacia raddiana* and *Acacia tortilis*) to petroleum contaminated soils. *Environmental pollution*, 234, pp.642-655.