

# יום עיון בנושא דליפת הנפט בשמורת הטבע עברונה

## הצגת פרויקטי מחקר-גמר של סטודנטים לתואר ראשון בטכניון

### חוברת תקצירים

יום ג' 17.05.16

מכון למחקר המים ע"ש גרנד, בטכניון



## דליפת הנפט בשמורת הטבע עברונה

### הצגת פרויקטי מחקר-גמר של סטודנטים לתואר ראשון בטכניון

יום ג' ה-17.05.16, מכון למחקר המים ע"ש גרנד, בטכניון

אורי שביט וסימה ירון

הכשל בקו צינור אילת אשקלון (קצא"א) שהתרחש בסוף 2014 גרם לזרימה של כמויות עצומות של נפט לאורך ערוצי הפזרות של נחל רחם בין כביש 90 ומלחת עברונה. הנפט שזרם בערוצים הלחל בחלקו לתוך הקרקע וגרם לשינויים בתכונות הקרקע אשר הפכו אותה להידרופובית באופן קיצוני. החשש מפגיעה בצומח, בבעלי החיים ובמערכת האקולוגית של שמורת עברונה מחייב את הרשויות לקבל החלטות בנושא שיטת הטיפול המיטבית ומידת ההתערבות הדרושה.

מתוך מודעות סביבתית עמוקה החליטו חברי מעל"ה (מהנדסי העתיד למען הסביבה), ארגון התנדבותי של סטודנטים לתואר ראשון בטכניון, להתארגן יחד במטרה לפעול לשם הצלת השמורה. הסטודנטים פעלו במסגרת קורס פרויקט מחקר-גמר ועסקו במהלך השנה האחרונה באיסוף מידע ונתונים, בניתוח פסיקלי, כימי וביולוגי של מצב הקרקעות בשמורה ובפוטנציאל הטיפול בשיטות ביולוגיות. במסגרת יום העיון בנושא "דליפת הנפט בשמורת הטבע עברונה" אשר מתקיים במכון למחקר המים ע"ש גרנד, בטכניון, 17.05.16, יוצגו תוצאות של שמונה פרויקטי מחקר-גמר שבוצעו על ידי 12 סטודנטים לתואר ראשון בטכניון מהמסלול להנדסת סביבה בפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית, מהפקולטה להנדסת ביוטכנולוגיה ומזון ומהפקולטה להנדסה כימית, כולם חברים במעל"ה.

הפרויקט הראשון שיוצג במסגרת יום העיון עוסק בניתוח תצלומי אוויר לפני ואחרי ארוע הזיהום בעזרת אלגוריתמים לעיבוד תמונה במטרה למפות את עוצמת הזיהום בכלים של מערכות מידע גיאוגרפיים (GIS). ארבעה פרויקטים מבוססים על השוואה של דגימות קרקע שנאספו במרכז השמורה מערוץ מזוהם ומערוץ בלתי מזוהם. הדגימות, חלקן מופרות וחלקן בלתי מופרות, נלקחו משכבות בעומקים שונים בהתאם למידת הזיהום ומרקם הקרקע. הדיגומים שימשו את הסטודנטים והסטודנטיות לאפיון הקרקעות על ידי מדידות של עקומי תאחיזה וכימות כוחות התאחיזה של מים בקרקע, מדידות של מקדמי מוליכות הידרולית ברוויה, בדיקה של מרקם הקרקעות, בחינה של השפעת הזיהום על השינוי בזווית המגע ומידת ההידרופוביות, ניסויים של קצבי התאדות, בדיקה של פרופיל הרטיבות, מליחות וטמפרטורה, בידוד ואפיון של חיידקים מפרקי נפט, בחינה של טכנולוגיות למדידה של שינויים במידת הזיהום ופיתוח של שיטה המבוססת על הערכת מידת הזיהום על פי זווית המגע. פרויקט נוסף עסק בפיתוח מודל חד ממדי שהתבסס על הנתונים שנאספו במטרה לחשב בתלות בזמן את השפעת הזיהום על זרימת מים, תנועת דשנים וקצב הטיפול במרכיבי הזיהום לאורך חתך אנכי בקרקע. ולבסוף, בשני פרויקטים הנדסיים פיתחו הסטודנטים מודל נגר עילי והסעת מזהמים במקרה של אירוע שיטפוני ותכנון של מערכת השקיה ודישון הדרושה לתהליך הטיפול הביולוגי.

במהלך עבודות המחקר והלימוד האינטנסיביים הצליחו הסטודנטים לאפיין תהליכים חשובים שהתרחשו בשמורה, לזהות תופעות שמאפיינות את הקרקע המזוהמת ולתאר אותן מספרית. למרות זאת, חשוב לנו לציין שמדובר בתוצאות ראשוניות שהתקבלו מעבודות מחקר של סטודנטים לתואר ראשון, ואין לראות בעבודות אלה מענה לצורך במחקר מקיף הדרוש לשם קבלת החלטות אופרטיביות.

## תודות

**אוניברסיטת בן גוריון:**  
פרופ' יונתן לרון

**התחנה לחקר הסחף:**  
ד"ר רועי אגוזי

**רשות הטבע והגנים:**  
ד"ר יהושע שקדי, מדען ראשי

רועי טלבי, אקולוג  
השמורה לשעבר  
ראובן הפנר, פקח ערבה  
דרומית  
אבי אוזן

**משרד להגנת הסביבה:**  
עפרי חזיז

**מלח הארץ:**  
דוביק טל, מנכ"ל החברה

**חברת אקולוג:**  
יונתן נאור

**רשות ניקוז ונחלים ערבה:**  
בועז רונן

**קצא"א:**  
בועז הראל

Technische Universität  
Braunschweig,  
Germany:  
Dr. Sascha Iden  
Dr. Katinka Koll  
Birgit Walter

קרן קובלר  
שלמה (מומי) אמרג'י  
עידן כהן  
אריק וינשטוק  
אסעד (אסי) חלבי  
רונית פארן  
מריה בס  
מירון צולמן

**מעל"ה**  
אוריאל קלר  
נר מרום  
אורי הלברשטדט

**מרכז קיימות - טכניון:**  
טל גולדרט

**מכון הבין-אוניברסיטאי  
לחקר הים באילת:**  
רועי הולצמן

**מרכז המדע ים המלח  
והערבה:**  
ד"ר אילן סתוי  
ד"ר אלי גרונר  
ניצן שגב  
יובל לוריג

**אוניברסיטת תל-אביב:**  
פרופ' אליאורה רון

**האוניברסיטה העברית:**  
ד"ר דרור הבלנה

**המכון הגיאולוגי:**  
ד"ר רביד רוזנצווייג

**הנהלת הטכניון:**

פרופ' משה סידי, משנה  
בכיר לנשיא הטכניון

פרופ' יובל שהם, דיקן  
הפקולטה להנדסת  
ביוטכנולוגיה ומזון

פרופ' עודד רבינוביץ, דיקן  
הפקולטה להנדסה  
אזרחית וסביבתית

פרופ' פר אולף גוטמן,  
ראש היחידה להנדסת  
סביבה, מים וחקלאות

פרופ' אורי להב, ראש מכון  
המים

**הנחיה ותמיכה מדעית:**

פרופ' אבי שביב  
פרופ' מקסים שושני  
פרופ' אבי אוסטפלד

ארז צמחוני  
פרופ' קרלוס דוזורץ  
פרופ' יצחק שמולביץ  
פרופ' אבי מרמור  
צחי גרטלר

**תמיכה ארגונית וטכנית:**

ד"ר תמי מילגרום מסטר  
דינה שחר  
שרה סבח  
מלכה כוכבא  
כפיר נרקיס  
רן נהיר  
שי אשר  
נטלי וינרוט  
מרדכי עמיר  
גלעוז קנטי

## תכנית יום העיון

### דליפת הנפט בשמורת הטבע עברונה

### הצגת פרויקטי מחקר-גמר של סטודנטים לתואר ראשון בטכניון

יום ג' 17.05.16, מכון למחקר המים ע"ש גרנד, בטכניון

זמן	נושא	שם	עמוד
15:30-16:00	התכנסות + הצגת פוסטרים		
16:00-16:15	ברכות ודברי פתיחה	פרופ' משה סידי – משנה בכיר לנשיא, טכניון ד"ר יהושע שקדי – מדען ראשי, רשות הטבע והגנים	
16:15-16:30	הצגת הפרויקט	אוריאל קלר, מנהל מעל"ה במהלך הפרויקט פרופ' אורי שביט - פקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית	
16:30-16:45	ניתוח ואפיון זיהום הנפט בשמורת עברונה בקורלציה לגוון צבעו בחישה מרחוק	עיסם שפרן בהנחיית פרופ' מקסים שושני	8
16:45-17:00	איפיון כימיקלי ופיזיקלי של קרקעות שמורת עברונה	קרן טוניס ומיכל קיסרא בהנחיית פרופ' אבי שביט ופרופ' אורי שביט	9
17:00-17:15	בידוד ואפיון של חיידקים מפרקי נפט ומעקב אחר הפירוק בתנאים שונים	צפורה צופיוף ויערה כלב בהנחיית פרופ' סימה ירון	10
17:15-17:30	מודל נגר עילי והסעת מזהמים	גלעד יוגב בהנחיית פרופ' אבי אוסטפלד	11
17:30-18:00	הצגת פוסטרים + הפסקת קפה		
18:00-18:15	איפיון קצב התאדות מים מקרקע מזהמת בנפט בשמורת עברונה	מיה איל ואנג'ל זוסמן בהנחיית פרופ' אורי שביט ופרופ' אבי שביט	12
18:15-18:30	מודל חד ממדי לתיאור זרימת המים, תנועת המומסים ותכולת הרכיב המזוהם בתת קרקע	שגב דגן בהנחיית פרופ' אורי שביט	13
18:30-18:45	שיטות למעקב אחר פירוק מיקרוביאלי של הנפט בקרקע מזהמת	עומר לוי ויעל זבולונב בהנחיית פרופ' סימה ירון	14
18:45-19:00	תכנון מערכת השקיה ודישון או: איך מאכילים את החיידקים בשמורת עברונה?	שי ערב לוי בהנחיית מר ארז צמחוני	15
19:00-20:30	הצגת פוסטרים + ארוחת ערב		



# תקצירים

## ניתוח ואפיון זיהום הנפט בשמורת עברונה בקורלציה לגוון צבעו בחישה מרחוק

עיטם שפרן

בהנחיית פרופ' מקסים שושני ופרופ' אורי שביט

מגוון הצומח, נוכחות אוכלוסיית הצבאים ובעלי חיים אחרים ואופייה הייחודי של שמורת עברונה מחייבים זהירות והתערבות מינימלית במסגרת המאמצים לטיפול בנזקים שגרם הנפט ולשיקום אפשרי של השמורה בעקבות אירוע הדליפה שהתרחש בדצמבר 2014. תצורות הקרקע השונות והמערכות האקולוגיות הרבות שמאפיינות את השמורה הופכות את תהליך קבלת ההחלטות והבחירה של שיטת הטיפול למורכבים. אירוע הזיהום עצמו יצר מרקם מורכב של "ערוצי פזרות" לאורך נתיב ארוך ומפותל. נתיבים מזוהמים ברוחב ועומק משתנים, נקודות פיצול ואיחוד של ערוצים מזוהמים, הפסקות בזיהום ואזורי איגום רחבים הפכו את האתגר למסובך במיוחד. למרות שבמסגרת הפעילות המחקרית של קבוצת הסטודנטים בטכניון ובמסגרת הפעילות של גופים אחרים וקבוצות מחקר אחרות נדגמו קרקעות במספר גדול של נקודות בשמורה, לא ניתן עדיין לבנות מאגר נתונים מספק שמייצג את המגוון הגדול של התנאים בהם יש לטפל בשמורה. ההטרונגניות הזו הביאה אותנו לנסות ולאפיין את התנאים שנוצרו בשיטות של חישה מרחוק.

טכנולוגיות חישה מרחוק ואלגוריתמים שפותחו לשם סיווג של פני השטח על פי גוון צבע הפכו כלי מקובל למטרות מיפוי ומדידה של אזורים מוכי אסון והערכה של היקף וגודל הפגיעה בהם. במחקר הנוכחי נבחנה אפשרות השימוש בטכנולוגיות חישה מרחוק וסיווג פני שטח על פי גוון צבע על מנת לאפיין את רמות הזיהום השונות ופיזורם המרחבי בשמורת עברונה. המחקר מבוסס על תצלומי אוויר של השמורה שצולמו לפני ואחרי אירוע הדליפה, ניתוח השינוי שנמדד בעזרת הצילומים על ידי תוכנות מערכות מידע גאוגרפית (Arc View ו-Erdas imagine), חפירה בעשרות אתרים לשם מדידת עומק הזיהום, איסוף של דוגמאות קרקע ואנליזת מעבדה של חלק מהדוגמאות. מאמץ מיוחד הושקע בהבאת הצילומים שנאספו לפני האירוע ואחריו למישור משותף ובר השוואה כולל התאמה של גוון הרקע והתאמה של הרזולוציות השונות של התצלומים. המידע שנאסף שימש את המחקר לשם סווג של ערוצי הנפט על פי השינוי בגוון והתאמה של קבוצות הסיווג למאפייני הזיהום.

תוצאות הדיגום, הניסויים והאנליזה שמשו את המחקר לאיתור קשרים פונקציונליים בין השינוי בגוון הצבע של תצלומי האוויר ובין עומק הזיהום ואחוז הפחמימנים בקרקע. הבדיקה העלתה שקיים קשר פונקציונלי מובהק בין השינוי בגוון ועומק הזיהום. ההתאמה שנמצאה עם כמות הפחמימנים אינה מספקת ונובעת, כנראה, מחוסר התאמתה של שיטת המדידה לתנאים בשמורה וממספר לא מספק של בדיקות.

המחקר מצביע על כך ששימוש בטכנולוגיות חישה מרחוק מתאים לאפיון השטח המזוהם ויהווה בהמשך כלי שימושי בתהליך בחירת הטיפול האופטימלי באזורים המזוהמים בשמורה. בעקבות תוצאות המחקר של עומר לוי ויעל זבולנוב מוצע להשתמש בשיטה המבוססת על זווית מגע ולחזור על הבחינה והפיתוח של הקשר הפונקציונלי בין השינוי בגוון של תצלומי האוויר ומידת הזיהום ברחבי השמורה.



## איפיון כימיקלי ופיזיקלי של קרקעות שמורת עברונה

קרן טוניס ומיכל קיסרא

בהנחיית פרופ' אבי שביב ופרופ' אורי שביט

שמורת עברונה אשר נמצאת בערבה זוהמה במיליוני ליטרים של נפט במהלך אירוע דליפה מצינור הובלה של חברת קצא"א. עבודה זו הינה חלק מפרוייקט קבוצתי שבוצע ע"י סטודנטים לתואר ראשון במסלול להנדסת סביבה בטכניון, במטרה ללמוד על השפעות אירוע הזיהום ודרכי התמודדות עם הנזקים שהותיר אחריו.

בעבודה הניסויית שמוצגת להלן נעשה ניסיון למדוד ולחשב פרמטרים שונים כדי לאפיין את הקרקע בשמורה לפני ואחרי הזיהום. אפיון כמותי זה יאפשר לנו ללמוד על השפעות הזיהום, להוות בסיס למידול תהליכים שונים בשמורה ולשמש כבסיס לבחינה של דרכי טיפול.

נקודה מזוהמת אחת נבחרה במרכז השמורה ונדגמה במרכז ערוץ זרימה של הנפט. קרקעות מעומקים שונים נלקחו והשוו לקרקעות מנקודה קרובה אשר זרם הנפט לא הגיע אליה. נערכו מספר בדיקות על מנת לאפיין את הקרקע בהיבטים פיזיקליים וכימיקלים: ראשית נמדדו מרקם הקרקע, צבעה, pH, מוליכות חשמלית ואחוז הזיהום בקרקע. בהמשך נערכו ניסויים במטרה לבנות את עקומי התאחיזה עבור השכבות השונות, למדוד את מקדם המוליכות ברוויה ואת זווית המגע בין מים לקרקעות. בנוסף נערך ניסוי אינקובציה על מנת להעריך את הפעילות המיקרוביאלית בשכבות השונות.

במהלך הניסויים ניתן היה להבחין ברמת הידרופוביות גבוהה בקרקעות המזוהמות, ובעיקר בשתי השכבות העליונות בהן התקבלו זוויות מגע גדולות מ-90° שגרמו לקשיים בביצוע חלק מהבדיקות. השכבה העמוקה ביותר, אשר בתחילת הניסויים ניתן היה לסווגה כשכבה שאליה לא חדר הזיהום, הראתה גם היא תוצאות הרומזות על נוכחות מידה מסוימת של זיהום, ומעידות על כך שגם זיהום קל עלול להוביל לשינוי בתכונות הקרקע ולדחיית מים.

בקרקעות המזוהמות נראתה פעילות מיקרוביאלית שונה לעומת זו שבקרקעות הייחוס, וניתן להסיק שקיימת בקרקע אוכלוסיית מיקרואורגניזמים מפרקי נפט באופן טבעי, דבר אשר מהווה בסיס להתכנות פתרון מיקרוביאלית בשמורה ללא הפרה של המערכת הטבעית.

קיימים אתגרים בנוגע לטיפול בקרקע המזוהמת ויישום הפתרון אשר עולים מעבודה זו: קושי בהרטבת הקרקעות, צורך במדידת הזיהום וכימותו בשיטות חלופיות, צורך בדיגום מרחבי רחב יותר של השמורה וכן הוספת בדיקות על דגימות לא מופרות של הקרקע.

## בידוד ואפיון חיידקים מפרקי תרכובות נפט מקרקעות עברונה

צפורה צופיוף ויערה כלב

בהנחיית פרופ' סימה ירון

בלילה שבין 3 ו-4 בדצמבר 2014, כ-5 מיליון ליטרים של נפט גולמי דלפו מצינור נפט בדרום הנגב וזיהמו את הקרקע בשמורת עברונה וסביבתה. כדי לצמצם את ממדי הנזק, הועלתה האפשרות להסתייע בחיידקים שיפרקו את התרכובות המזהמות. מאז שנות ה-40 ידוע כי חיידקים יכולים לפרק תרכובות פחמימניות לתרכובות בלתי מזיקות, תוך ניצול של הפוטנציאל המטבולי שטמון בהן. הוכח כי שימוש בחיידקים לצורך פירוק נפט בים וביבשה הוא יעיל כלכלית וידידותי לסביבה בהשוואה לטכניקות אחרות. מחקר זה התבסס על ההיפותזה שקיימים בקרקעות בעברונה חיידקים שמסוגלים לפרק נפט, ושניתן להסתייע בהם כדי לפרק את הזיהום, במקום להוסיף לקרקע חיידקים מסחריים. מטרת המחקר הינה לאפיין את אוכלוסיית החיידקים שנמצאים בקרקעות המזוהמות של שמורת עברונה ולבודד מתוכן חיידקים בעלי פוטנציאל לפירוק נפט. בנוסף נרצה לאפיין את התנאים הדרושים לחיידקים אלו כדי לפרק את הנפט.

בחלק הראשון של המחקר זיהינו חיידקים שמסוגלים לגדול על קרקעות מזוהמות בנפט, הן על ידי זיהוי גנטי של כלל המיקרופלורה בקרקע והן בשיטות מיקרוביאליות בתהליכי העשרה. דני"א חיידקי הופק מקרקעות נקיות ומזוהמות ורוצף בטכנולוגית ריצוף בתפוקה גבוהה של כלל מקטעי הרני"א הריבוזומלי. אנליזה של התוצאות הראתה שינויים באוכלוסיות החיידקים כתלות ברמות הזיהום. למרות ששכיחותם של רוב הזנים ירדה בקרקעות המזוהמות, נמצאו מספר זנים ששרדו בקרקע מזוהמת, וחלקם אף עברו העשרה טבעית. בנוסף, דגימות מקרקעות בעלות דרגות שונות של זיהום הודגרו במצע מלחים נוזלי (מצע דיוויס), על מנת לאפשר העשרה של חיידקים שיצליחו לגדול ללא מקור פחמן חיצוני, כלומר ינצלו את הנפט כמקור פחמן ואנרגיה עיקרי. במהלך ההדגרה עקבנו אחר השינוי במספר החיידקים לאורך זמן. מעקום הגידול של החיידקים ניתן לראות כי אכן ההעשרה של החיידקים מהקרקע בוצעה בהצלחה, וכי כמות החיידקים שהועשרו גדלה עם העלייה ברמת הזיהום.

בחלק השני של המחקר נבחרו מתוך החיידקים שגדלו בנוכחות הנפט מספר מושבות שונות לצורך זיהוי ואפיון. הגן המקודד ל-16S rRNA מן החיידקים שנבחרו עבר הגברה ב-PCR, הופק, ורוצף. אנליזה ביואינפורמטית הראתה כי מרבית החיידקים שהתקבלו היו מסוג *Bacillus*. תוצאה זו נתמכת בספרות שכן ידוע על זני *Bacillus* שמסוגלים לפרק נפט. מתוך החיידקים שבודדו, נבחרו שני זנים לצורך אפיון. חיידקים אלו הוספו לדגימות קרקע במצע דיוויס והודגרו ב-37°C. בנוסף, חיידקים אלו הוספו גם לדגימות קרקע מעוקרות בתוספת מצע דיוויס והודגרו ב-25°C וב-37°C. מעקב אחר הגידול של החיידקים בקרקעות הלא מעוקרות ובקרקעות המעוקרות בשתי טמפרטורות ההדגרה הראה כי לאחר יום כבר לא ניתן להבדיל בין קרקעות שהוספו להן חיידקים לבין קרקעות ללא התוספת.

ניתן לסכם כי קיימים חיידקים מפרקי תרכובות פחמימניות בקרקעות שמורת עברונה, וכי אלו עברו העשרה טבעית בשטח. מרבית החיידקים שהצלחנו לזהות הם מסוג בצילוס. כמו כן, הראינו כי הוספת חיידקים חיצוניים איננה מועילה משמעותית, גם אם חיידקים אלו בודדו מאותן קרקעות. מחקר המשך נחוץ על מנת להעריך את קצב הפירוק הביולוגי ואת יעילותו.

## מודל נגר עילי והסעת מזהמים – שמורת עברונה

גלעד יוגב

בהנחיית פרופ' אבי אוסטפלד ופרופ' אורי שביט

עבודה זו עוסקת בנגר עילי בשמורת עברונה, בבדיקה של השפעת הנפט על זרימת מים במקרה של ארוע שטפון, בחישוב פשטי ההצפה של הערוצים בשמורה בספיקות תכן בהסתברויות שונות, בפיתוח מודל תמידי ולא-תמידי של זרימת הנגר העילי ובהערכה של פוטנציאל הסעת המזהמים בערוצי השמורה.

הנתונים שנאספו לצורך בניית מודל הנגר הוטמעו באמצעות תוכנת ArcMap והם כוללים מפות, נתוני טופוגרפיה, שיפועים, גבהים, וחתכים של ערוצים. מערך ערוצי הפזרות, הכולל אלפי ערוצי זרימה, צומצם למערך של 25 ערוצים באמצעות עיבוד שכבת ה-DEM ב-ArcMap. הערוצים בשמורה סווגו לשלוש קטגוריות על פי גודל השטח אותו הם מנקזים. עשרים וחמישה הערוצים בעלי השטח המנוקז הגדול ביותר הם אלו שהוכנסו למודל. בנוסף, נאספו נתוני קלט של ספיקות תכן שהתקבלו מנתוני רשות המים לאגן הניקוז נחל רחם ומהתאמה להידרוגרמת ספיקה של אירוע שטפוני שאירע בנחל יעלון הממוקם בערבה הדרומית.

פיתוח וחישוב המודלים לזרימה תמידית ולא-תמידית בוצעו באמצעות תוכנת HEC-RAS והפלט של הרצת המודלים שכלל עומקי זרימה, מהירויות ומאמצי גזירה, הוחזר לסביבת ArcMap להמשך ניתוח הנתונים והסקת מסקנות.

מעיבוד של הרצות המודל ומניתוח הנתונים עולה ששטפונות בהסתברות 1% ו-2% גורמים לפשטי ההצפה לכסות את כל מערך ערוצי הפזרות אך לא מעבר לכך. תוצאה זו התקבלה מפתרון המודל לזרימה תמידית ומהמודל לזרימה לא-תמידית. נמצא בשני המקרים שפשט ההצפה גדול במיוחד באזור המליחה שבקצה הדרום מזרחי של השמורה.

לשם חישוב תהליך ההרחפה סיפק המודל הערכה למאמצי הגזירה שמתפתחים על הקרקעית תוך שימוש בדיאגרמת שילדס להסעת חלקיקים. נמצא שמאמצי הגזירה המקסימליים שמתקבלים במודל התמידי הם  $\tau_0 = 10 Pa$  ואילו במודל הלא-תמידי  $\tau_0 \approx 6000 Pa$ . ההבדל הגדול נובע ממספר ערוצי הזרימה שהוגדרו במודל הלא תמידי (מספר הערוצים צומצם ל-5 לעומת 25 במודל התמידי, במטרה לפשט את החישובים), מה שגרם להגדלת הספיקות הזורמות בכל ערוץ ולהגדלת מאמצי הגזירה.

על אף ההבדל שהתקבל מההרצה של שני המודלים, מאמצי הגזירה בכל אחד מהם גדולים מספיק בכדי לגרום להסעה של חלקיקי חרסית וסילט (קוטר גרגר 2 ו-20 מיקרון בהתאמה) ואף הרחפה של חלקיקי חול עדין (קוטר גרגר 50 מיקרון). ממצא זה מביא לכך שישנה סבירות גבוהה שבאירועים שטפוניים דומים תתרחש הרחפה של שרשראות פחממניות של נפט שנספח לחרסיות ולחלקיקי הסילט. בהתחשב בפשט ההצפה הגדול בדרום השמורה ותרומתם של נחלים אחרים שלא הוכנסו למודל (למשל, נחל ניצוף), ישנה סבירות להרחפה והסעה של חלקיקי נפט ספוחים עם מי השטפונות וזרימה שלהם לכיוון נחל הערבה ואף מפרץ אילת.

## אפיון קצב התאדות מים מקרקע מזוהמת בנפט בשמורת עברונה

אנג'ל סוזמן ומיה איל

בהנחיית פרופ' אורי שביט ופרופ' אבי שביב

השיטות הביולוגיות שנבחנו בפרויקט עברונה מחייבות שמירה על תכולת רטיבות מינימלית במטרה לאפשר פעילות של חיידקים מעכלי נפט. לשם כך הוצע לפתח מערכת השקיה ודישון בעזרת טפטוף טמון כמדוזון בעבודה של שי ערב לוי. אלא שהטמפרטורה הגבוהה והלחות היחסית הנמוכה בדרום הערבה גורמים לקצבי התאדות גבוהים שמקשים על שמירת תכולת הרטיבות הדרושה. מטרת המחקר של העבודה הנוכחית היא בחינת ההשפעה של אירוע הזיהום על אופי וקצב אידוי המים מקרקעות עברונה. קצבי ההתאדות נמדדו בתלות בטמפרטורה תוך השוואה בין ההתאדות מקרקעות מזוהמות והידרופוביות להתאדות מקרקעות שלא זוהמו.

ניסויי ההתאדות בוצעו במעבדה בטכניון. דוגמאות קרקע אשר הובאו משמורת עברונה נופו בנפה 2 מ"מ, הורטבו ונארזו במצב רווי לתוך עמודות שקופות בגובה של 75 ס"מ וקוטר 8 ס"מ. סדר שכבות הקרקע בעמודות דומה לסדר השכבות בשמורה עבור הקרקעות המזוהמות והבלתי מזוהמות להוציא שכבת הזיהום P2. העמודות הונחו על מאזניים שחוברו למערכות איסוף נתונים ונחשפו למנורות חימום ומאווררים. צינוריות שקופות אשר חוברו בתחתית כל אחת מהעמודות שמשו למעקב אחר המשטח הפריאטי בתוך העמודות. תנאי הניסוי כללו התאדות מקרקע נקייה ומקרקע מזוהמת בטמפרטורה של 60°C והתאדות של קרקע מזוהמת בטמפרטורה של 30°C. כל אחד מהתנאים נבדק בשלוש חזרות. בנוסף, נמדד קצב ההתאדות מעמודה מלאה במים ללא קרקע במטרה לעקוב אחר תנאי ההתאדות במעבדה. עם סיום הניסוי פורקו העמודות במטרה למדוד פרופילים אנכיים של טמפרטורה, מליחות ותכולת רטיבות.

תוצאות המעקב אחר מסת המים שעברה אידוי בתלות בזמן מצביעות על כך שניתן לתאר את תהליך ההתאדות מקרקעות עברונה בעזרת המודל הדו שלבי. המודל מתאר בצורה טובה את שני שלבי האידיוי בקרקעות הנקיות ובקרקעות המזוהמות. בשתייהן קצב האידיוי של השלב הראשון קבוע ומהיר וקיים מעבר חד בין סוף השלב הראשון ותחילת השלב השני שמאופיין בקצב התאדות איטי. בשעה שנפח המים שמתאדה בשלב השני עוקב במדויק אחר שורש הזמן בקרקעות הנקיות, התוצאה שהתקבלה עבור הקרקעות המזוהמות פחות ברורה, ולא ניתן לקבוע אם נפח ההתאדות משתנה לינארית או בתלות בשורש הזמן. נראה שבשלב הראשון קצב ההתאדות מהקרקע המזוהמת גדול במעט מזה של הקרקע הנקייה ואילו בשלב השני המגמה הפוכה.

מעקב אחר מפלס המים בצינוריות הראה שהתנאים בחלל המעבדה היו בקירוב קבועים ושקצב הירידה בקרקעות הנקיות דומה לזה שדווח במחקרים אחרים. לעומת זאת, מפלס המים בצינוריות שחוברו לקרקעות המזוהמות ירד כמצופה, אבל בהמשך עלה לפני שהמשיך שוב את מגמת הירידה. העלייה הבלתי צפויה של המפלסים מרמזת שלא מתקיים שיווי משקל פשוט ושמנגנוני הזרימה וההתאדות בקרקעות אלה מורכבים.

במידת פרופילי הטמפרטורה, המליחות ותכולת הרטיבות שבוצעו עם סיום הניסויים נמצא שהצטברות מלחים בפני הקרקע דומיננטית בקרקעות הנקיות וזניחה בקרקעות המזוהמות ושהשינוי בתכולת הרטיבות מתרחש בעומק דומה בכל הטיפולים.

עבודה זו עסקה באפיון התהליכים וכימות קצב ההתאדות של מים מקרקעות עברונה, תוך בחינת ההשפעה של ארוע הזיהום על תהליכים אלה.

## מודל חד-ממדי לתיאור זרימת המים, תנועת המומסים ותכולת הרכיב המזהם בתת הקרקע של שמורת עברונה

שגב דגן

בהנחיית פרופ' אורי שביט

המטרה של פיתוח מודל מתמטי לתיאור תופעות המעבר בשמורת עברונה היא לימוד ובחינה של המנגנונים העיקריים ששולטים בזרימת המים, בתנועת המומסים ובתהליך העיכול של זיהומי הנפט שבשמורה. המודל ישמש לתכנון וניתוח של מדידות מעבדה, הרחבה של תוצאות המעבדה לתנאים שלא נבחנו וללימוד התהליכים שמתרחשים בשטח השמורה, לבחינה של תרחישים ושיטות טיפול שונות ובחינת ההשפעה של הפרמטרים התכנוניים על יעילות הטיפול.

המודל שפותח הוא חד-ממדי אנכי, תלוי זמן ומייצג חתך בקרקע המורכב משכוב דומה לזה שנמצא בשמורה. השינויים שהתרחשו בתכונות הקרקע (עקום התאחזיה ומשוואת מקדם המוליכות) בעקבות אירוע הזיהום מתוארים כאן על ידי המודל הקפילרי. לשם כך הנחנו שאירוע הזיהום לא שינה את התפלגות הגודל וסידור הנקבובים ושהשינוי היחיד שיש לקחת בחשבון הוא העלייה בזווית המגע.

עקום התאחזיה של הקרקעות הבלתי מזוהמות נמדד והותאם למודל ון-גנוחטן. היות ולא ניתן היה למדוד את עקום התאחזיה של הקרקעות המזוהמות (P1 ו-P2) הוחלט לתאר את העקום בעזרת התאמת המודל הקפילרי לזווית המגע של קרקעות אלה. על פי המודל קפילרי עלייה בזיהום אמורה לגרום לעליה בעומד המטריצי. בבדיקה שנעשתה על ידי קרן טוניס ומיכל קיסרא ועל ידי מעבדה בבראונשוויג, גרמניה, נמצא שעקום התאחזיה של קרקע P3 לא תאם את השינוי המצופה מהמודל הקפילרי. במידה ונמצא בעתיד שגם קרקעות P1 ו-P2 לא תואמות את המודל הקפילרי ושהשינוי הצפוי בזווית המגע לא מגדיל את העומד המטריצי, נאלץ להתאים את המודל מחדש.

משמעות נוספת של ההנחה שאירוע הזיהום לא שינה את התפלגות גודל הנקבובים היא שקיימות שתי פונקציות למקדם המוליכות ההידרולית, אחת עבור קרקעות שזווית המגע שלהן קטנה מ- $90^{\circ}$  ואחת שזווית המגע שלהן גדולה מ- $90^{\circ}$  (קרקעות הידרופוביות). הסיבה לכך היא שעל פי המודל הקפילרי סדר המילוי של הנקבובים בקרקעות הידרופוביות הפוך מזה של קרקעות נקיות. כאשר תכולת הרטיבות נמוכה הנקבובים הגדולים הם אלה שמתמלאים ראשונים בקרקעות הידרופוביות. תופעה זו יוצרת מצב מעניין שבו קשה להרטיב קרקעות הידרופוביות, אך ברגע שהעומד חיובי וגדול מ"ערך כניסת המים" קצב החדירה של מים לקרקע גדול יותר מזה שבקרקעות הנקיות.

פתרון נומרי של המודל התקבל בעזרת תוכנת Comsol. זרימת המים התקבלה מפתרון של משוואת ריצרדס תוך התעלמות מהאפשרות החשובה של זרימה בנתיבי זרימה מועדפים. במהלך יום העיון נציג פתרונות של הרטבה של קרקעות בזוויות מגע שונות.

תנועת הדשן מתוארת באמצעות משוואת הסעה-דיספרסיה תוך התחשבות בשטף ההסעה, שטף הדיספרסיה ואיבר בור המתאר ריאקציה מיקרוביאלית מסוג מונו. חישוב ריכוז הנפט בקרקע מתקבל מפתרון של משוואת מאזן מסה בהנחה שהגורם הישיר היחיד שמשפיע על המזהם הוא ריאקציה מיקרוביאלית מסדר מונו עבור הנוטריינטים ותלות מסדר ראשון בתכולת הרטיבות כך שעלייה בכמות המים גורמת לעלייה בקצב הריאקציה.

## בחינת שיטות למעקב אחר פירוק מיקרוביאלי של נפט בקרקע מזוהמת

יעל זבולונב ועומר לוי

בהנחיית פרופ' סימה ירון ופרופ' אורי שביט

בתהליך פירוק ביולוגי של נפט בקרקע מזוהמת, קצב הפירוק נקבע על ידי חיידקים מפרקי נפט. קצב זה הינו נתון יסודי וחשוב עבור מודל הטיפול בקרקעות עברונה ויש לעקוב אחריו בשיטות שונות. מציאת שיטות מעקב מתאימות הכרחית לצורך קביעת יעילות הפירוק בניסויים עתידיים שמטרתם לבחון מה הם התנאים האידיאליים הדרושים לשם טיפול ביולוגי בקרקע.

מטרת המחקר הינה איתור של שיטה נוחה ומהירה שתשמש למעקב אחר פירוק נפט, באופן ישיר ועקיף, דרך בחינה והתאמה של שיטות מוכרות ו/או פיתוח של שיטות חדשות. מעקב ישיר אחר פירוק הנפט מאפשר הערכה של כמות הנפט שפורקה ואילו מעקב עקיף מאפיין את פירוק הנפט באמצעות בדיקה של הפעילות המיקרוביאלית. על שיטות המעקב להיות מהירות, בעלות פרוטוקול מתאים לסביבה קרקעית, מדויקות ככל שניתן וזאת תוך שימוש במכשור קיים ובעלות נמוכה.

קרקעות השמורה ששימשו לבחינת השיטות השונות עברו ניפוי ידני גס וטולטלו ב- 37°C עם מים/תמיסת דשן ביחס משקלי זהה, כאשר מקור הפחמן היחיד הינו הנפט עצמו.

בין השיטות העקיפות שעקבו אחר גידול החיידקים ופעילותם נכללו הערכת כמות ה-DNA והערכת פעילות אנזימטית ספציפית לפירוק נפט (של האנזימים Esterases ו-Dehydrogenases). שיטות אלו נמצאו לא מתאימות מסיבות שונות, ביניהן מגבלות שנובעות מהתכונות של הסביבה הקרקעית, משך הבדיקה הארוך וטווח שגיאות רחב. לעומתן, שיטת Bradford להערכת כמות חלבונים בדוגמא על ידי ריאגנט כרומוגני נמצאה מתאימה ביותר. השיטה מהירה ומאפשרת בדיקה של מספר דגימות במקביל. עם זאת, תוצאותיה מעידות על גידול מיקרוביאלי בלבד ולא על מדד ספציפי לפירוק של נפט. השיטה הישירה שנבחנה כללה מיצוי חומר אורגני מהקרקע בהקסאן והערכת השינוי בו לאורך זמן על ידי שקילה. פרוטוקול הבדיקה ארוך, אינו בטיחותי, וטווחי השגיאה שהתקבלו לא אפשרו מדידות בפרקי זמן קצרים.

לאור התוצאות שהתקבלו במחקרים אחרים שבוצעו במסגרת הפרויקט הוחלט לבחון שיטה לפיה כמות זיהום הנפט תאופיין באמצעות מדידה של זווית המגע שיוצרת טיפת מים על פני משטח של קרקע.

לצורך בניה של עקום כיוול נמדדו כמות הנפט וזווית המגע של תערובות שונות של קרקע נקייה וקרקע מזוהמת. כמות הנפט נמדדה בבדיקת TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) חיצונית וזווית המגע נמדדה על ידי מכשיר Drop Shape Analyzer. עקום הכיוול שהתקבל מצביע על עליה בזווית המגע עם עליה ברמת ה-TPH והתייצבות אסימפטוטית ברמות הזיהום הגבוהות (כשזווית המגע היתה גבוהה מ- 120°). תוצאות אלה מעידות על היתכנות השימוש בזווית המגע כשיטה אלטרנטיבית להערכת קצב פירוק הנפט בקרקעות עברונה.

מדידת זווית המגע של הקרקע אפשרית גם בתנאי שטח, ללא צורך בצידוד מורכב, להוציא מצלמה ומחשב נייד, ומספקת תוצאות בזמן קצר. באם תיושם השיטה ניתן יהיה להעריך את קצב פירוק הנפט באופן מהיר, זמין וזול. חשוב לציין עם זאת, כי יש לכייל את השיטה עבור סוגי קרקע שונים ומדידה באמצעותה יעילה עד לדרגת זיהום מסוימת, שמעבר לה זוית המגע אינה משתנה באופן משמעותי.

## תכנון מערכת השקיה ודישון או איך מאכילים את החיידקים בשמורת עברונה?

שי ערב לוי

בהנחיית אינג' ארז צמחוני

בעקבות דליפת 5,000 מ"ק נפט גולמי בשמורת עברונה נערך בטכניון מחקר להצעת פתרון לשיקום השמורה. עבודה זו הינה אחת מתוך 8 מחקרים שנערכו בנושא.

בשמורת עברונה קיימים בקרקע חיידקים המפרקים פחמימנים, כאשר קצב פירוק הפחמימנים תלוי בתכולת הרטיבות, זמינות הפחמימנים וריכוזי המינרלים בקרקע. עבודה זו נערכה על מנת להציע פתרון מעשי לזירוז פירוק הפחמימנים בקרקע ע"י חיידקים בעזרת מערכת השקיה ודישון.

העבודה מורכבת מתכנון הנדסי של מערכת השקיה, התאמת המערכת לתנאים ולצרכים של שמורת עברונה, ובחינה של אופן ההשקיה המיטבי. בנוסף, היות והשקיה של קרקע הידרופובית אשר זווית המגע שלה גדולה מ- $90^{\circ}$  מחייבת הפעלה של לחצים חיוביים, והיות וההרטה של קרקעות אלה מתרחשת על פי רוב לאורך נתיבים מועדפים, הוחלט לחפש אחר פתרונות לחידור המים בקרקע על ידי שימוש בחומרים פעילי שטח.

נמצא כי משטר ההשקיה המיטבי עבור פעילות רציפה של מערכת ההשקיה הינו השקיה בפולסים קצרים בספיקת אביזר של 1 ליטר/שעה ובמרחקי הצבה של 0.15 מ', תוך שימוש בטפטפות אל-נגר. ספיקת מערכת ההשקיה המתוכננת היא 1140 מטר קוב במשך מחזור שאורכו 4 ימים וגודל שטח מזוהם נטו של כ- 140 דונם. השמורה חולקה ל 8 חלקות השקיה שכוללות כל אחת 4 תת חלקות שיושקו לסירוגין באותה משמרת. מוצע להצניע את הצנרת ואת קוי הטפטוף בקרקע על מנת לצמצם את אידוי המים ונזק לצנרת כתוצאה מפעילות של בעלי חיים.

נמצא כי ניתן להשתמש בנקודת מים הקיימת בשטח בעזרת מיכל אגירה של 500 מ"ק שימוקם בראש השטח. כמו כן נמצא שיש להגביל את מינון הדשן בהתאם לערך מוליכות חשמלית מקסימלית של 4.5 dS/m על מנת שלא לפגוע בעצי השיטה.

לבסוף, מוצע להוסיף חומר פעיל שטח ממקור ביולוגי על מנת לאפשר חידור מים לקרקע, לייצר הרטה לטרלית ולהגדיל את הזמינות הביולוגית של הפחמימנים. מבין החומרים שנבחנו נמצאו שתי חלופות – Rhamnolipid ו-Surfactin.

