



# היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם

**- יסודות קורט -**

**סקירת מחקרים ועבודות  
בהיגוי צוות מקצועי – מדעי (מזהמים)<sup>1</sup>  
מנהלת אפר הפחם**

**אוקטובר 2016**

**הוכן בסיוע  
פרופ' אורי מינגלגרין**

<sup>1</sup> חברים בצוות לדורותיו ושותפים בדיוניו: פרופ' יורם אבנימלך, דר' מנחם בן-חור, אולגה ברלין, דר' ישעיהו בראור, יועץ דויטש, אינג' דוד ויינברג, דר' נדיה טויטש, פרופ' חיים כהן, פרופ' אורי מינגלגרין, דר' אריאל מצגר, דר' ויקטור מרקו, אילן נסים, דר' יעקב נתן ז"ל, דר' אילן צדיקוב, דר' פיליפ קלסון, פרופ' רמי קרן ז"ל, פרופ' ישראלה רבינא, גיא רשף.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
 היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

**תוכן עניינים**

עמ'

1	<i>הקדמה</i>
	<i>אפיון החומר והערכה סביבתית</i>
2	❖ יסודות קורט בתשטיפים מאפר בליזימטרים – פרופ' ישראלה רבינא, טל גולדרט
3	❖ בדיקת תשטיפים בשיטות מיצוי תקניות – פרופ' חיים כהן, דר' הנרי פונר
3	❖ אפיון כימי ומינרלוגי בסוללות בתחנת הכח אורות רבין – יועץ דויטש
3	❖ השפעה על זיהום קרקע ומקורות מים – דר' מני בן חור, דר' רמי קרן, גיא רשף
4	❖ התנהגות כרום – Dr. Hans van der Sloot
5	❖ אומדן שחרור סלניום, ונדיום ובורון בקרקע – פרופ' רמי קרן, סיגל צעידו-נתיב
6	❖ שחרור אוקסי-אניונים בסביבה מימית בסיסית – פרופ' רמי קרן, לודמילה צחנסקי
7	❖ אפיון כימי-סביבתי שוטף לאפר הישראלי
7	❖ מודל לחיזוי יסודות קורט באפר פחם – Dr. Ruud Meij
8	❖ אפיון מקורות שונים בשיטת Dr. Hans van der Sloot – prEN 14429, יועץ דויטש
8	❖ אפיון מקורות שונים בשיטת prEN 14997 – דר' נדיה טויטש, אולגה ברלין
8	❖ הערכת שחרור מזהמים באמצעות מודל – Dr. Hans van der Sloot
9	❖ הערכה סביבתית של השימושים באמצעות מערכת LEAF – דר' נדיה טויטש, Prof. David Kosson
	<i>תשתיות</i>
11	❖ מעקב אחר שינויים כימיים ומינרלוגיים בסוללת אפר פחם בג'יסר-א-זרקא וההשפעה על הסביבה – יועץ דויטש, דר' מני בן-חור, פרופ' רמי קרן, דר' אריאל מצגר
14	❖ חידור מים בסוללת אפר מרחף ברבדים – פרופ' רמי קרן
15	❖ פוטנציאל הסיכון מיישום אפר תחתית בתשתיות – דר' יעקב נתן, יועץ דויטש
	<i>חקלאות</i>
16	❖ מזהמים בגידולים חקלאיים על מצע אפר תחתית (אפ"ת) – פרופ' יונה חן
16	❖ מזהמים בחלב פרות על מצע אפ"ת – פרופ' רמי קרן
16	❖ מזהמים בפרות ותרגולות על מצע אפ"ת – דר' ישראל ברוקנטל
17	❖ תשטיפי מזהמים מרפד אפ"ת לפרות – פרופ' רמי קרן
17	❖ כושר ספיחה של רפד אפ"ת לפרש עופות – דר' דן בכרך
	<i>בטון</i>
18	❖ בחינת פוטנציאל שחרור מתכות מתערובות צמנטיות המכילות אפר מרחף- בחנ"מ



סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם

וגראוט – דר' נדיה טויטש, אולגה ברלין

מזהמים אורגניים

- 19 ❖ דיאוקסינים ופוראנים באפר מרחף ותחתית – Dr. Ruud Meij
- 19 ❖ דיאוקסינים בחלב פרות על רפת אפי"ת – דר' גיל כץ



**סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

**הקדמה**

אפר פחם הוא השארית הנותרת, רובה ככולה מינרלית, לאחר שריפת פחם. כמו כל תוצר של שריפת חמר צמחי, גם אפר הפחם מכיל מגוון יסודות, לרבות ריכוזים נמוכים של יסודות קורט המוגדרים כרעילים כגון מתכות כבדות וכן יסודות רדיואקטיביים (שיידונו בנפרד). יישומי אפר פחם בתשתיות ובחקלאות מלווים בחשש של זיהום הקרקע ומקורות מים כתוצאה משחרור מזהמים מן האפר, שטיפתם והתפשטותם בסביבה וחדירתם לגידולים חקלאיים ולמי תהום. פוטנציאל הפגיעה בסביבה בשל שימוש מושכל באפר נמוך והוא תלוי בעיקר בקצב השטיפה הנקבע על ידי יחס הנוזל למוצק לאורך הזמן ובתכונות הפיסיקליות והכימיות של האפר ושל הקרקע. מבין התכונות הפיסיקליות הרלוונטיות של המדיום המוצק יש לציין את התפלגות גודל הגרגר לפיו נקבעת הנקבוביות (אחוז החללים בחומר בהם נוזלים וגזים יכולים לשהות ולנוע והתפלגות גודל הנקבובים), ואת החדירות לתוך גוש החמר המוצק, המבטאים את רמת הזמינות של המוצק (למשל האפר) למעבר מים. גודל הגרגר קובע גם את שטח הפנים הזמין למגע עם המים ולכן את מידת השחרור (והספיחה) של מרכיבי האפר המסיסים. פוטנציאל הזיהום תלוי גם במקדם הדיפוזיה של כל מזהם מסיס וזמינות המזהמים המצויים באפר לשטיפה נקבעת בין השאר על ידי תהליכי נידוף ועיבוי מחדש של המזהם הפוטנציאלי על פני האפר בתהליך השריפה בכבשני תחנת הכח. ככל שהחומר נדיף יותר הוא מתעבה מאוחר יותר על פני חלקיקי האפר ולכן הוא זמין יותר לשטיפה במגע האפר עם מים. יסודות המצויים בצורונים נדיפים פחות נשארים כלואים בעומק החלקיקים האמורפיים בעלי המבנה הזכוכיתי של האפר ואינם זמינים לשטיפה. גורם חשוב בקביעת מידת הזמינות של מרכיבי האפר השונים הוא ה-pH המשפיע על יחסי הגומלין בין האפר לתשטוף ועל תהליכים בתשטוף עצמו הקובעים במידה רבה את התפלגות המזהמים בין הפאזות המוצקה והנוזלית ובפרט את מעבר היסודות מהאפר לתמיסה.

שחרור מרכיבי האפר לסביבה מושפע מהאופי הפוצולני שלו שכן ראקציות פוצולניות גורמות לציפוף מבנה האפר ולמעשה אוטמות אותו למעבר מים דרכו. גם אם משתחררת כמות מסוימת של יסוד מן האפר, אין פירוש הדבר שרובה או כולה תגיע למי התהום, משום שבדרכו לשם עובר היסוד על צורוניו השונים דרך תווך הקרקע ותת הקרקע ושם הוא עשוי להיספח למרכיבי הפאזה המוצקה או לשקוע.

את פוטנציאל הזיהום של סוג אפר נתון ניתן להעריך ע"י מיצוי המזהמים מתוכו בשיטת מיצוי שאומצה בדירקטיבה האירופית ומבוצעת משנת 2007 ע"י המכון הגיאולוגי מטעם מנהלת אפר הפחם. בשיטה זו שסימנה EN 12457/2, האפר המרחף מטולטל במיכל סגור עם מים מזוקקים ללא וויסות ה-pH ביחס מוצק: נוזל של 1 ל-10 למשך 24 שעות. בנוסף



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

מבוצעות בדיקות מיצוי בשיטת ה-TCLP שאומצה ע"י ה-EPA האמריקאי להערכת הסיכון של שחרור מזהמים מפסולות תעשייתיות חומציות, והמקובלת עדיין בארץ למיצוי אפר בהתאם [להחלטת הוועדה המקצועית-מדעית משנת 1997](#). שיטת ה-TCLP אומצה משום פשטות ביצועה ומשום שקיימת רשימת ערכים מרביים לריכוזי יסודות שחריגה מהם מגדירה חומר כמסוכן. בזמנו לא הייתה קיימת רשימה שכזאת בדירקטיבה האירופית. בעקבות תהליך בחינה ומחקר ממושך שנערך בארץ, המליצה הוועדה להעדיף את שיטת המיצוי האירופאית משום שהיא מחקה באופן טוב יותר את המציאות הסביבתית מאשר שיטת ה-TCLP בה המיצוי נעשה ב-pH קבוע ונמוך (4.9), בעוד שבמציאות ערכי ה-pH תלויים במשתנים הסביבתיים.

לצורך הערכת סיכונים הנובעים מיישומי האפר נעשה גם שימוש במודלים סטטיסטיים המבוססים על נתונים שנאספו במשך שנים, בעזרתם ניתן להעריך את מידת שחרור מזהמים מהאפר לאורך זמן ואת רמת הסיכון לסביבה ובפרט למי התהום. המודלים הללו מתחשבים במאפייני האפר (המשפיעים מצדם על מידת המסיסות והתנועה של המזהמים), באופן יישום האפר בשטח, במידת חשיפתו לסביבה ובתנאי הסביבה והקרקע המשפיעים על תנועת המזהמים המתמצים מן האפר.

**אפיון החומר והערכה סביבתית**

**בהנחיית הוועדה המקצועית-מדעית של המנהלת משנת 1997, בוצעה עבודת מחקר נרחבת לאפיון האפר הישראלי ולבדיקת פוטנציאל שחרור המזהמים ממנו, ונבחנה התאמת שיטות מיצוי שונות לצורך בדיקה זו.** נבדקו דוגמאות מייצגות של אפר מרחף שמקורו מפחם שיובא מדרום אפריקה וקולומביה וששיקפו בזמנו למעלה מ-80 אחוז מסל מקורות האפר. העבודה בוצעה במקביל על ידי ארבעה קבוצת חוקרים מכמה מוסדות מחקר בארץ בליווי Dr. Hans van der Sloot ממכון המחקר ECN בהולנד:

- [פרופ' ישראלה רבינא וטל גולדרט, הפקולטה להנדסה חקלאית בטכניון, 1996](#) – נבדקה מסיסות ושחרור מזהמים מעמודת חומר בליזימטרים שכללה שכבת חול ים שטוף, מעליה שכבת האפר שכוסתה בחול. הליזימטרים (ביחסי כמויות של 400 ק"ג אפר וטון חול) נחשפו לגשמי חורף ומי השקייה בקיץ (בסה"כ עברו במערכת כ-800 ליטר מים). בכל המקרים נמצאה שטיפה מוגברת של יסודות עיקריים (נתרן, סידן, מגנזיום ואשלגן), כנראה בגלל שטיפה לא מספקת של החול. ריכוזי מרבית יסודות הקורט בתשטיפ היו נמוכים מסף הגילוי ( $<0.1$  מ"ג/ליטר), וריכוזי היסודות שכן היו בני מדידה (בורון, בריום, ונדיום, כרום מוליבדן וכספית) נעו רובם סביב עשיריות מ"ג/ליטר ומיעוטם נע בין 1-6



סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016

**היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

מ"ג/ליטר בלבד. עם זאת, בשל הפסקת העבודה בתום שנה אחת לא הגיע תהליך השטיפה לדרגת יציבות המאפשרת לאמוד בבירור את פוטנציאל השטיפה.

• **פרופ' חיים כהן, דר' הנרי פונר, אתל דורפמן, שלומית שפס, המחלקה לכימיה באוני' בן גוריון בנגב והמכון הגיאולוגי, 1996** – הוכן מערך אנליטי לבדיקת תשטיפי אפר בשיטות מיצוי תקניות: מיצוי בטלטול (batch)-TCLP של ה-EPA האמריקאי ו-CEN/TC292 של האיחוד האירופי או שטיפה דרך עמודה- NVN2508 הנהוגה בהולנד. השיטות נבחנו ברמות שונות של הפרמטרים - יחס מוצק לנוזל, טמפרטורה, משך מיצוי וחומציות התשטיפי. נבחנו הערכים התקניים של הפרמטרים וערכים שאמורים היו להתאים את שיטות המיצוי לתנאי הסביבה בישראל. אף שהבדיקות נעשו במקביל בשתי מעבדות נפרדות (אוני' בן גוריון והמכון הגיאולוגי), התקבלה התאמה טובה בין תוצאות שתי המעבדות. התוצאות הראו שאין כמעט השפעה של ערך ה-pH של התשטיפי על מידת מיצוי היסודות בתחום התגובה שנבדק: pH 10.5 – 12.7 בשיטה האירופאית ו-pH 4.5 – 5.5 בזו האמריקאית. בדומה, לא נמצא השפעה של הטמפי' ומשך המיצוי בתחום הנמדד על הכמות שמוצתה. לעומת זאת, נמצאה השפעה ניכרת של יחס המוצק לנוזל על מידת המיצוי. בסיכום, הומלץ להעדיף את השיטה האירופאית על האמריקאית מאחר והאחרונה מותאמת לבחינת תשטיפי פסולת בסביבה חומצית שאינה שכיחה בישראל. אף על פי כן, **השיטה האמריקאית היא זו שאומצה לבסוף לבדיקות אפר מהסביבה שהיא כללה רשימת ערכי סף למזהמים, רשימה שלא הייתה קיימת באותו זמן עבור השיטה האירופאית.**

• **יועץ דויטש, המכון הגיאולוגי, 1996** – נבדק השינוי המינרלוגי עם הזמן באפר בסוללות תחנת הכח בחדרה, תוך התחשבות בעובדה שההרכב המקורי של האפר בסוללות אינו ידוע כמו גם כמויות המים שעברו דרכו ושקיים זיהום סביבתי שאינו קשור לאפר. בשתי הסוללות- הצפונית הוותיקה שגילה מעל ל-10 שנים והדרומית הצעירה בת השנתיים, נמצאו בשכבה העליונה של הסוללה רמות נמוכות של חלק גדול מהיסודות שנבדקו בעוד שבשכבות התחתונות של הסוללה נמצאו רמות גבוהות, אולם לא נמצאה מגמת עליה הדרגתית של יסודות אלה בשכבות הביניים שבין העליונות לתחתונות. החל מעומק 4 עד 6 מטר הריכוזים אכן עלו עד אשר התייצבו. התופעה בלטה לגבי ארסן, כרום, מנגן, עופרת וסלניום. תלות דומה בעומק נצפתה בפרופיל ה-pH. לכאורה, העובדה שפרופיל הריכוזים היה דומה, איכותית וכמותית, בשתי הסוללות, יכולה להצביע על תהליך שטיפה של היסודות מהשכבות העליונות לתחתונות. מאידך גיסא ייתכן שהשינוי החד בריכוזים בין השכבות נובע מהנחת סוגי אפר שונים בשכבות הסוללה השונות.

• **פרופ' רמי קרו, דר' מני בן-חור וגיא רשף, המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה במרכז וולקני, 1998** - נבחנה רמת היסודות הניתנים למיצוי כתלות ב-pH מהאפר ומתערובת האפר עם קרקע. הקרקע יכולה להשפיע על תנאי הסביבה כגון ה-pH, החוזק היוני



סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016

**היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

וריקוזי היסודות בסביבת האפר ובכך לשנות את מידת השחרור או הקיבוע של יסודות שמקורם באפר. בוצעו ניסויי שטיפה במעבדה דרך ארבע עמודות שהכילו אפר, קרקע, תערובת קרקע-אפר הומוגנית ועמודה שהכילה אריזה משוכבת של שכבות אפר וקרקע. יסודות הקורט חולקו לשתי קבוצות עיקריות על פי התנהגותם בתערובות אפר/קרקע: (1) יסודות כגון Li ו-Mo שמידת מיצויים מהאפר גבוהה ושריכוזם בתשטיף התערובת היה נמוך מאשר סכום ריכוזם בתשטיפי האפר והקרקע לבדם; (2) יסודות בעלי רמת מיצוי בינונית מהאפר כגון Se, V, B ו-Cr (המופיעים כאוקסיאניונים) ושריכוזם בתשטיף התערובת היה גבוה מאשר סכום ריכוזם בתשטיפי האפר והקרקע לבדם, בעיקר כתוצאה מהמסה מוגברת שלהם מהאפר עקב ה-pH הנמוך בתשטיף התערובת (> 8) יחסית לתשטיף האפר בלבד בגלל נוכחות הקרקע שהקנתה לתערובת כושר בופר חזק. עם זאת, בהמשך השטיפה חלה הידלדלות של המינרלים המכילים יסודות אלו באפר וכתוצאה מכך חלה פחיתה בכמות יסודות אלו שמוצתה. ריקוזי היסודות הללו בתשטיף העמודה המשוכבת היה נמוך מאשר סכום ריכוזם בתשטיפי עמודות האפר או הקרקע לבדם, בעיקר עקב ספיחה בקרקע של היסודות שמוצו מהאפר. על סמך הממצאים הללו ניתן להסיק שמתרחש שחרור לא מבוטל של אניונים ואוקסיאניונים מהאפר, המוגבר עבור חלק מהיסודות בתערובת עם קרקע, שהבולטים שבהם הם בורון, כרום וסלן, היסודות הבעייתיים ביותר מבחינת פוטנציאל זיהום הסביבה כתוצאה מיישום אפר.

לבקשת המנהלת בוצעה **הערכת התנהגות כרום** (כרום הוא יסוד חיוני והוא רעיל רק ברמות גבוהות דיין ובפרט כשהוא במצב חימצון +6) באפר מרחף ישראלי על ידי Dr. Hans van der Sloot ממכון המחקר ECN בהולנד ופורסם דו"ח סיכום להערכה זו ב-2001. לצורך ההערכה בוצעו בדיקות אפיון לדגימות אפר מרחף טרי, ואפרים שעברו "הזדקנות" – מסוללת כביש הגישה לישוב גייסר-א-זרקא (יפורט בהמשך המסמך), ומסוללה בתחנת הכח בחדרה. האפיון כלל בדיקות השטיפה בשיטת CEN/TC 292 (pH dependence test) והתוצאות הוזנו למודל הערכת סיכונים המאפשר להעריך את צפי שחרור המזהמים מהחומר בהינתן תרחישים שונים לאורך זמן. נמצא שכמות הכרום שמוצתה מן האפר שעבר הזדקנות מסוללות בתחנת הכח ובכביש הינה בסדר גודל (פי 10 – 20) נמוכה יותר מאשר מהאפר הטרי, ממכס' 20 מ"ג/ק"ג  $Cr^{6+}$  (המסיס מאד) בתשטיף האפר הטרי המהווה כ-10% מתכולת הכרום באפר המרחף, לפחות מ-1 מ"ג/ק"ג כרומאט ( $CrO_4^{2-}$ , כלומר  $Cr^{6+}$ ) בתשטיף האפר מהסוללות המהווה פחות מ-0.5% מכלל הכרום באפר המרחף. בנוסף, גם ה-pH היה נמוך יותר באפר מהסוללות לעומת האפר הטרי (9.24 ו-8.38 לעומת ~12, בהתאמה). כתוצאה מערך ה-pH הנמוך יותר במיצוי האפרים מהסוללות, הירידה המשמעותית במיצוי הכרום מאפרים אלו בהשוואה למיצוי הכרום מהאפר הטרי הייתה בניגוד למצופה. ההסבר לכך הוא כנראה אפיניות גדולה יותר של תחמוצות ברזל המצויות באפר ל- $Cr^{3+}$  מאשר ל- $Cr^{6+}$ . לפיכך, הירידה בריכוז הכרום בר המיצוי מאפר מרחף שעבר "הזדקנות" יכולה



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

לנבוע מחיזור הכרומאט מ- $Cr^{6+}$  ל- $Cr^{3+}$ . אחוז ה- $Cr^{6+}$  מכלל הכרום באותן דגימות אפר נבדק ב-2002 ע"י Dr. Frank E. Huggins מאוניברסיטת קנטקי, ארה"ב, בשיטת ספקטרוסקופיית X-ray absorption fine structure (XAFS), ונמצא שהוא נע בין 6 ל-14% מכלל הכרום, כמות הנחשבת יחסית נמוכה.

ב-2005 סוכם **מחקר של פרופ' רמי קרן וסיגל צעידי-נתיב בנושא פיתוח שיטה לאומדן שחרור סלניום, ונדיום ובורון מאפר מרחף המוצנע בקרקע**. יסודות אלו מתמצים בכמות גבוהה יחסית מהאפר (>10%) כאשר בורון הוא הזמין ביותר, ומידת שחרורם מהאפר לקרקע תלויה במידת השפעתם של מרכיבי הקרקע השונים (חרסית, חומר אורגני, גיר ותחמוצות Fe ו-Al) על pH המערכת ובשיעור ספיחת היסודות על מרכיבים אלו. כדי לבחון השפעת מרכיבי קרקע שונים על שחרור היסודות לקרקע, בוצעו ניסויי שטיפה בתערובות אפר עם כל מרכיב קרקע (שהופרד מקרקע ורטיסול ומקרקע חמרה), בתנאי סביבה קבועים (pH=7.5 האופייני לקרקע, ופאזה מימית הנמצאת בשיווי משקל עם הלחץ החלקי של  $CO_2$  באטמוספירה, מאחר וריכוז ה- $CO_2$  בתמיסה קובע את רמת ה-pH מה שמשפיע על מידת התמוססות היסודות ועל מידת השקיעה המשנית של חלקם). מרכיבי הקרקע עורבבו עם תרחיף המכיל 3.5 גרם אפר ו-35 מ"ל מים מזוקקים ביחסים משקליים של 1/1, 1/2 ו-1/4 מרכיב קרקע לאפר (3.5, 7 ו-14 גרם קרקע, בהתאמה), והמיצוי נמדד לאחר טלטול למשך 3 ימים. כמויות היסודות שנספחו למרכיבי הקרקע לאחר שחרורם מהאפר התקבלו מתוך חישובים.

נמצא שכמות **הסלניום** שנספחה למקטע החרסית שהופרדה מקרקע חמרה (ללא תחמוצות מתכת וחומר אורגני) הייתה נמוכה רק במעט מזו שנספחה על החרסית בנוכחות סילט וחול לאחר הרחקת התחמוצות. מכאן שספיחת היסוד למקטעי החול והסילט שבקרקע הייתה זניחה. כן נמצא שמשכיכת (אפיניות) תחמוצות ה-Fe ו-Al לסלניום הייתה גדולה יותר מזו של החרסית. למרות זאת, השפעת התחמוצות על ספיחת היסוד בקרקע הייתה זניחה מפני שתכולתן בקרקע נמוכה בהרבה מזו של מינרלי החרסית. ממצאים דומים התקבלו עבור **ונדיום** – כמות גדולה יותר של היסוד נספחה בקרקע חמרה על כל מרכיביה מזו שנספחה על מרכיב החרסית בלבד, בין היתר בשל אפיניות גדולה יותר של תחמוצות המתכת ליסוד זה ב-pH=7.5. אולם שוב, השפעת התחמוצות הייתה קטנה מזו של מקטע החרסית בשל תכולתן הנמוכה יחסית בקרקע בהשוואה לתכולת החרסית. נוכחות מרכיבי הסילט והחול בוורטיסול גרמה לפחיתה בספיחת היסוד על מקטע החרסית אולם השפעת מיקטעים אלו הייתה זניחה. מכאן שרוב אתרי ספיחת הונדיום בקרקע נמצאים על מקטע החרסית. לגבי **בורון** – כמות היסוד שמוצתה מהאפר היוותה ~85% מכלל הבורון בר המיצוי באפר, כלומר, רוב הבורון השתחרר לתמיסה בתנאים שנבחנו. נוכחות תחמוצות הברזל הקטינה את כמות היסוד שנספחה לקרקע. בסיכום, הממצאים הראו שמקטע החרסית הוא הרכיב העיקרי המספח יסודות אלו בקרקעות שנבחנו. מכאן שעל בסיס תכולת





סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016

**היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

החרסית וכמות האפר המרחף בקרקע נתונה ניתן להעריך את כמות היסודות סלניום וונדיום שייספחו בקרקע זו. לגבי בורון – מידעת מקדמי הספיחה של בורון למרכיבי הקרקע, תוך לקיחה בחשבון של תכולת כל מרכיבי הקרקע, כמות הבורון המרבית הניתנת למיצוי מהאפר שהוסף לקרקע ותכולת הרטיבות בקרקע, ניתן להעריך עפ"י נוסחה שפיתח רמי קרן את כמות הבורון שתיספח בקרקע נתונה בשכבה שלה הוסף האפר.

ב- 2008 סוכם **מחקר מעבדתי של פרופ' רמי קרן ולודמילה צחנסקי** מהמכון למדעי הקרקע, המים והסביבה במרכז וולקני, לבחינת קצב שחרור אוקסיאניונים מאפר מרחף (בורון, כרום, מוליבדנום וונדיום) לפאזה מימית השוטפת אותו, כתלות בזמן חשיפת האפר לאטמוספירה לפני שטיפתו ולהבנת הגורמים המשפיעים על קצב זה. לצורך כך בוצע מיצוי לאפר מרחף שהוסף טרי לעמודות ואוחסן בשני מצבים שונים: 1) איחסון במיכל אטום למגע עם האטמוספירה; 2) איחסון במיכל פתוח לסביבה בטמפ' החדר ( $25 \pm 5^\circ\text{C}$ ) למשך שלבי "הזדקנות" שונים: 0, 3, 6 ו-12 חודשים, תוך שמירה על תכולת רטיבות קבועה ברמת "קיבול שדה". האפר עורבב עם חול קוורץ ונארז בעמודות באורכים של 10, 20 ו-30 ס"מ לקבלת צפיפות מדומה אחידה של 1.64 גר"סמ"ק, והעמודה נשטפה בנפחי מים שונים. **תוצאות ומסקנות: 1.** בעוד שריכוז האוקסיאניונים שהתקבל בכל נפח תשטיף נתון עלה עם אורך העמודה, לאורך העמודה לא הייתה השפעה על ריכוז הבורון הממוצע בתשטיף לכל נפח נקבובים (Pore volume). לעובדה זו יש חשיבות גדולה בהערכת ריכוז יסודות אלה בתשטיף העובר דרך אפר מרחף בערימה (למשל במטמנה). ניתן לפיכך להעריך את ריכוזם במי הנקז בתחתית הערימה אם ידועה הצפיפות המדומה של שכבת האפר (בהנחה שהיא אחידה בכל נפח הערימה) וערכי ה-pH. **2.** האפר המרחף עובר תהליכים מינרלוגיים כשהוא בא במגע עם מים המכילים  $\text{CO}_2$  מומס. תהליכים אלה גורמים לפחיתה במוליכות ההידראולית של אפר הפחם עד להיאטמות מוחלטת. מכאן, התוצאות שהתקבלו בניסוי הן בחזקת "worst case" וסביר יותר להניח שמי גשם היורדים על סוללת אפר לא יעברו דרכה עד אל מתחת לסוללה. **3.** ריכוזי היסודות בתשטיפים של דוגמאות האפר שעברו "הזדקנות" היו גבוהים בהשוואה לריכוזים שבתשטיף של האפר הטרי וריכוזים אלו גדלו עם העלייה במשך זמן ה"הזדקנות". הסיבה לכך היא הירידה ההדרגתית ב-pH המערכת כתוצאה מתגובת האפר עם  $\text{CO}_2$ .

פחיתה בריכוזי היסודות בתשטיף חלה עם עלייה ב-pH (בתחום 10 – 13), למעט מוליבדנום שמסיסותו לא הייתה תלויה ב-pH. ל-pH הייתה השפעה רבה יותר על הכמות המתמצית כשנפח התשטיף הכולל היה מספר נפחי נקבובים בודדים בלבד. מכאן שמניעת תהליך "ההזדקנות" (העדר מגע עם האטמוספירה- שמירה על pH מעל 10) יכולה למזער את הסיכון בשחרור היסודות לתשטיף ובפרט במעבר מספר קטן של נפחי נקבובים בערימת האפר.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

**אפיון כימי-סביבתי שוטף לאפר הישראלי נערך במספר מסגרות:**

**חברת החשמל-** בתהליך בחירת מקורות הפחם לוקחת חברת החשמל בחשבון את ההשלכות הסביבתיות בשימושי אפר ומשתמשת ככל הניתן בפחמים אשר תשטיף האפר המתקבל מהם עומד בערכי היסודות שנקבעו בקריטריון "אפר בר שימוש". השיטה התקפה כיום לבקרת ריכוזי היסודות בקריטריון היא שיטת ה- [TCLP](#) ובה משתמשת חברת החשמל למיצוי האפר.

**מנהלת אפר הפחם-** מבצעת באופן שגרתי במכון הגיאולוגי (ע"י יועץ דויטש עד 2011, דר' נדיה סויטש ואולגה ברלין לאחר מכן) בדיקות לקביעת ריכוזי יסודות קורט בתשטיפי אפר מרחף ממקורות הפחם העיקריים בשיטות ה- [TCLP](#) וה- [EN 12457/2](#) (בדיקת התאמה-compliance test) והריכוזים הנמדדים מושווים לערכי הסף [בקריטריון "אפר בר שימוש"](#) וב**דירקטיבה האירופית** (Landfill Directive) לפסולת לא מסוכנת, בהתאמה. במקביל נבדקת תכולת יסודות הקורט (במכון הגיאולוגי) והרדיונוקלידים  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ו-  $^{40}\text{K}$  (ע"י זוהר יונגרייס וגוסטבו חקין, ממ"ג-שורק) באפר פחם לאחר שריפת הפחם במעבדה ובאפר המרחף הטרי הנדגם בתחנת הכח. כמו כן נבדקים רדיונוקלידים באפר תחתית, הן לצורך אפיון שוטף של האפר והן לצורך בניית מאגר נתונים שייטכן ויאפשר בעתיד לקשור בין תכולת היסודות בפחם לתכולתן באפר ובתשטיף ללא צורך בבדיקה שגרית של האפר.

לצורך הערכת ריכוזי יסודות קורט החזויים בתשטיף האפר הסתייעה המנהלת במודל [KTM](#) – [Kema Trace Model](#) של מכון המחקר KEMA, הולנד, המהווה מרכז התמחות בהיבטים הסביבתיים והבריאותיים של החשיפה לאפר פחם הן במהלך הייצור והן במהלך השימוש בו. המודל מתבסס על ניתוח סטטיסטי של מאגר נתונים גדול (שהצטבר בתקופה של מעל ל- 25 שנה) של פחם ואפר שמקורו בתחנות הכח בהולנד המשתמשות בסל מקורות פחם הדומה לזה הישראלי ובטכנולוגיית שריפה דומה. כרקע לדיון בסדנת היבטים סביבתיים בשימושי אפר שקיימה המנהלת ב- 2009 הורצו [נתוני פחם ישראלי במודל והממצאים הוצגו בסדנה ע"י Dr. Ruud Meij](#) [מ-KEMA](#). נבדק פחם ממקור דרום אפריקאי, קולומביאני ואינדונזי, המקורות העיקריים דאז, ועל סמך נתונים אלו חושבו ריכוזי יסודות קורט בתשטיפי אפר פחם מרחף ותחתית (לפי שיטת השטיפה Column test, יחס נוזל למוצק 10 ל- 1), והושוו כנגד הערכים המרביים המותרים בהולנד לאפליקציה מבודדת ולא מבודדת מהסביבה. החריגה הגדולה ביותר נמצאה למוליבדן, סלן וכרום, ממצאים החוזרים על עצמם כמעט מדי שנה (בעיקר ביחס לסלן) בבדיקות מיצוי שמבצעת המנהלת לאפר מרחף ישראלי. בצורה זו המודל מספק אינדיקציה למידת הסיכון לסביבה מאפר מסוים, בהתבסס על בדיקת הפחם בלבד.

כאמור, הקריטריון האירופי לפסולת לא מסוכנת מוגדר לריכוזי יסודות קורט בתשטיף לאחר מיצוי במים לפי שיטת [EN 12457/2](#) כאשר רמת החומציות (pH) אינה קבועה אלא נקבעת על ידי



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

האפר בלבד ונעה עבור אפרים ישראלים בין 10-12 בסוף המיצוי. לעומת זאת, ביישומים שונים ייתכנו רמות חומציות מחוץ לתחום זה שלהם חשוף האפר והנקבעות על ידי מרכיבים אחרים של המערכת הנתונה. מכיוון שכאמור, שחרור היסודות מן האפר תלוי ב- pH, יש לאפיין את מידת שטיפת היסודות ברמות pH שונות וביחסי מוצק: נוזל שונים, על מנת לבחון את התאמת האפר לניצול בתנאים סביבתיים נתונים. לצורך כך בוצע אפיון (Characterization test) **לאפר מרחף ממקורות הפחם העיקריים המיובאים לישראל, בשיטת prEN 14429 : Characterization of waste – Leaching behaviour test – Influence of pH on leaching with initial acid/base addition**, בטווח ה- pH שבין 3 – 12. בדיקות ראשוניות נערכו באפר ממקורות אחדים במכון הגיאולוגי ב- 2008 (אפר פחם דרא"פ מתחנת הכח אורות רבין ואפר פחם קולומביאני מתחנת הכח רוטנברג) – 2009 (אפר פחם אינדונזי מתחנת הכח רוטנברג) ע"י יועץ דויטש ובמקביל ע"י [Dr. Hans van der Sloot](#) ממכון המחקר ההולנדי ECN ששימש כבקרה מקצועית. הבדיקות ההשוואתיות בין שני המכונים בוצעו לאפר מדרא"פ וקולומביה. הן כללו מיצוי במים מזוקקים של האפרים ביחס נוזל/מוצק של 10 ל- 1 ליטר/ק"ג, בתנאי טלטול למשך 48 שעות; ה- pH הסופי לאחר הטלטול הושג על ידי הוספת חומצה (HNO<sub>3</sub>) או בסיס (NaOH). ריכוזי 20 יסודות הקורט שנבדקו בשני המכונים נמצאו דומים, ואשררו את תקפות שיטת העבודה שנקטה במכון הגיאולוגי.

**השלב הבא של אפיון מקורות האפר העיקריים בוצע ע"י דר' נדיה טויטש ואולגה ברלין לפי שיטת [prEN 14997 : Influence of pH on waste leaching with continuous control](#).** בעוד שבשיטה הקודמת דרגת ה- pH הרצויה התקבלה ע"י הוספה ידנית של חומצה או בסיס ובצורה זו רמת ה- pH לא נשמרה קבועה לכל אורך תקופת המיצוי (48 שעות) ואף השתנתה בשיעור ניכר עד לכ- 4 יחידות, בשיטה הנוכחית בוצע המיצוי ב- pH שבין 4 – 14 שנשמר באמצעות הוספת חומצה/בסיס ע"י מכשיר pH-stat. המטרה הייתה לבנות עקומת אפיון עבור כל מקור אפר ליסודות המשתחררים לתמיסה כתלות ב- pH, כאשר הריכוז שיתקבל בשיטת ההתאמה EN 12457/2 לכל יסוד באותו אפר ייבחן ביחס לריכוז שהתקבל ב- pH הבדיקה (pH טבעי המתקבל בתום המיצוי ומושפע רק מהאפר, היות והמיצוי מבוצע במים מזוקקים). כך ניתן יהיה להעריך מממצאי שיטת ההתאמה EN 12457/2 את מידת שחרור היסוד הצפויה בערך ה- pH בסביבת החשיפה (היישום) ולהשוות את ערך ה- pH שיחושב בסביבת היישום לערך התקן הנדרש בקריטריון "אפר בר שימוש ייעודי". מטרת עבודה זו הייתה לאפשר את הערכת מידת הסיכון לסביבה הגלום באפר המיושם בסביבות שונות, מאחר וכל סביבה מאופיינת בתנאי חשיפה שונים (pH, יחס מוצק לנוזל) המשפיעים על מיצוי המזהמים מן האפר.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

לצורך הערכת סיכוני שחרור מזהמים ביישומי אפר בסלילה ותשתיות, בוצעה בהזמנת המנהלת הרצת נתוני אפר ישראלי במודל בשם LeachXS-Orchestra שפותח ב- ECN ע"י קבוצת חוקרים בראשות Dr. Hans van der Sloot, בהתבסס על מספר רב ביותר של פסולות שונות, לרבות אפר פחם. המטרה הייתה להעריך כמותית שחרור מצטבר לאורך שנים (100) של יסודות קורט בהתחשב באופי החומר ובתנאי הסביבה להם הוא נחשף, ועל יסוד הממצאים לבצע הערכה של התנהגות צפויה של האפר במודל המדמה סוללה, ולאשש בדיעבד את הטענה המבוססת על מחקרי המנהלת שביישום אפר מרחף מעובד (מורטב ומהודק) בסוללת כביש, בכפוף לדרישות מפרט סלילה, האפר הופך אינרטי לסביבה עקב היאטמותו למעבר מים בתהליך מהיר למדי. למודל הוזנו נתוני אפיון לאפר מרחף (מתחנות הכח אורות רבין ורוטנברג) ומאפייני היישום: סוללת אפר בגובה 10 מטר וצפיפות 1.6 גר/סמ"ק על קרקע חולית בעומק 1 או 2 מטר מתחת הסוללה, עומק מי תהום 1.5 או 10 מטר מתחת הסוללה וחלחול משקעים דרך הסוללה בכמות של 20 מ"מ לשנה. התנהגות היסודות השונים באפר אופיינה כתלות ב- pH (בתחום 2 – 13) לפי שיטת האפיון CEN/TS 14429 וביחס נוזל/מוצק בין 0.2~ ל- 10 לפי שיטת הבדיקה בעמודות CEN/TS 14405 וכנגד ממצאי אפרים אחרים מתחנות כח דומות לאלה בישראל ואפרים מסוללות קיימות (באורות רבין ובגייסר-א-זרקא). נמצאה התאמה טובה בין ריכוזי היסודות המדודים בתשטיף שהתקבל בשיטת CEN/TS 14429 לבין הריכוזים החזויים במודל, והתאמה פחות טובה בהשוואה עם הריכוזים שהתקבלו בשיטת CEN/TS 14405. הממצאים שדווחו התמקדו בהתנהגות כרום בסוללת כביש. התאמה טובה נמצאה בין ריכוז כרום שנמדד בתשטיף האפר מהסוללה באורות רבין לבין הריכוז שהתקבל במודל בתנאי pH+pe של 12.5 (בתוך הטווח שנבדק במודל בין הערך 17 שמשמעו חשיפה מלאה לאוויר והערך 11 שמשמעו תנאים מחוזרים מתונים). התוצאות הצביעו על אפשרות הפיכת  $Cr^{6+}$  ל-  $Cr^{3+}$  גם בתנאים מחוזרים מתונים המתקיימים בסוללה וכתוצאה מכך ירידה במסיסות היסוד, שכן מסיסות  $Cr^{3+}$  נמוכה יותר מזו של  $Cr^{6+}$ . הממצאים מציגים את המודל ככלי יעיל לחיזוי שחרור מגוון יסודות בתנאים שונים (כגון בהתרחש תהליכי קרבונציה או חימצון או נוכחות חומר אורגני).

**LEAF**

ההיבטים הסביבתיים של שימושי אפר פחם בישראל נבחנים כיום במסגרת הפרויקט [הערכה סביבתית לאפיון תשטיפי אפר מרחף בשימושי השונים ע"י מערכת ה- LEAF](#) (Leaching ) (Environmental Assessment Framework), במטרה לבחון את אפשרות אימוצה בעתיד ככלי עזר לקבלת החלטות על היתר לשימוש נתון באפר ועל תנאי ההיתר. מדובר בפרוטוקול המיועד להערכת השפעות סביבתיות של תשטיפים ממגוון רחב של חומרים כתוצאה מחשיפתם לסביבה. מערכת ה- LEAF כוללת ארבע שיטות מיצוי עדכניות שאומצו על ידי ה- USEPA והמבוססות על שיטות המיצוי שאומצו על ידי האיחוד האירופאי. שיטות מיצוי אלו אמורות לשקף בקירוב טוב



סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016

**היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

את ההתנהגות הצפויה של תשטיפי החומרים עם חשיפתם לתנאי סביבה שונים. המערכת פותחה בשיתוף פעולה של קבוצות מחקר בהנהגת Prof. David Kosson מאוניברסיטת Vanderbilt, טנסי, ארה"ב, ו- Dr. Hans van der Sloot ממכון המחקר ECN, הולנד, במעורבות ותמיכה של ה- USEPA.

תהליך אימוץ מערכת ה- LEAF בישראל כולל 4 שלבים כלהלן:

1. הטמעת נוהל LEAF ושיטות הבדיקה הכלולים בו במערך הבדיקות השגרתיות לאפר - דר' נדיה טויטש ואולגה ברלין מהמכון הגיאולוגי.
2. הגדרת המגבלות הסביבתיות לשימוש באפר בבטון ובמוצרים צמנטיים (בחנ"מ, גראוט) לתשתיות- דר' נדיה טויטש ופרופ' קוסטה קובלר מהטכניון.
3. בחינה סביבתית של יישום אפר מרחף (כתוסף לקרקע ולבוצת שפכים) בחקלאות- דר' פנחס פיין ודר' אבנר זילבר ממרכז וולקני.
4. פיתוח מסגרת מובנית לשימוש במערכת ה- LEAF לקבלת החלטות בנושאים סביבתיים הנוגעות ליישומי אפר בתנאים הייחודיים לישראל (כגון גיאולוגיה, הידרולוגיה, אקלים, סוגי אפר, קרקעות וגידולים).

עד עתה ההתמקדות היא בשתי תתי משימות במסגרת השלב הראשון דלעיל:

1. לימוד ארבע שיטות המיצוי שהן:
  - **pH dependance – 1313**: בדיקת ריכוזי היסודות בתשטיפי המתקבל במגע בין הנוזל (מים מזוקקים) למוצק (L/S=1 מ"ל/גרם-יבש) בתנאי pH שונים (pH סופי) למשך פרקי זמן של 24, 48 או 72 שעות, לפי גודל החלקיקים (85% מהם קטן מ- 0.3, 2 ו- 5 מ"מ, בהתאמה). שיטה זו שונה משיטת האפיון prEN 14997 בה ה- pH נשמר למשך 48 שעות בעזרת מכשיר pH-stat,
  - **Percolation Column – 1314**: בדיקה בעמודות לקבלת תשטיפי (מצטבר, סיכום של 9 תשטיפים המתקבלים במיצוי ביחסים שונים של L/S) העובר דרך המדיום הנבחן בזרימה כלפי מעלה, ביחס L/S=10/1 מ"ל/גרם-יבש מצטבר,
  - **Mass transfer rates – 1315**: בדיקת תשטיפי (מצטבר, סיכום של 9 תשטיפים המתקבלים במיצוי למשך פרקי זמן שונים הנעים משעתיים ועד 63 יום) ממונולית או חומר גרנולרי מהודק החשוף להמסה בשטח הפנים העליון בלבד, ביחס נוזל לשטח פנים של  $9 \pm 1$  מ"ל/סמ"ר,
  - **Batch L/S – 1316**: בדיקה ביחסי נוזל: מוצק שונים שבין 0.5-10 מ"ל/גרם-יבש (5 שלבי מיצוי; כל שלב ביחס L/S נתון) למשך פרקי זמן של 24, 48 או 72 שעות, לפי לגודל החלקיקים (85% מהם קטן מ- 0.3, 2 ו- 5 מ"מ, בהתאמה).



**סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

2. הזנה לבסיס נתונים בשם LeachXS שעליו מבוסס נוהל ה- LEAF של נתוני בדיקות אפיון תשטיפי האפר המרחף שהתקבלו עד כה במכון הגיאולוגי לפי שיטת prEN 14997 ושל הנתונים שיתקבלו בעתיד בבדיקות לפי השיטות הני"ל, המוגדרות בתהליך ה- LEAF.

**תשתיות**

**סוללת ג'יסר-א-זרקא**

ב- 1997 נעשה לראשונה שימוש בארץ באפר פחם למילוי מבני שיושם בסוללת כביש. המיקום היה בכביש הגישה לשוב ג'יסר-א-זרקא והסוללה הייתה מורכבת מאפר פחם מרחף ותחתית (14 אלף טון מכל סוג) שפוזר והודק במצב מורטב עד לכיסויו בשכבת קרקע חיפוי מעל. הקמת הסוללה הותנתה ע"י המשרד לאיכות הסביבה (הגנת הסביבה בהווה) בביצוע מעקב רב שנתי אחר התנהגות האפר המרחף בסוללת הכביש והשפעתו האפשרית על הסביבה ואיכות מי התהום לאורך זמן. **המעקב בוצע ע"י קבוצת מחקר מהמכון למדעי קרקע, מים וסביבה במרכז וולקני בראשות דר' מני בן-חור**. ב- 1998 הוקמו חלקת ניטור שהכילה מיכלים לאיסוף מי נקז מן הסוללה הבנויה מאפר וחלקת ביקורת על אדמת כורכר. הניטור כלל בדיקות מזהמים במי הנקז ובמי התהום באזור הסוללה, כדי להעריך סיכוני דליפת מזהמים מן האפר לסביבה.

**ניטור מי תהום** – בוצעה אנליזה כימית של מי תהום שנדגמו בין יוני 1998 לדצמבר 2000 בקידוח סמוך לסוללת האפר ובקידוח ביקורת שנמצא במעלה גרדיאנט מי התהום ביחס לסוללה. דיגומים בוצעו אחת לשלושה חודשים אחרי עונת הגשמים בכל שנת ניטור. ריכוזי יסודות הקורט במי התהום משני הקידוחים שנמדדו היו נמוכים מאד, אופייניים למי תהום לא מזהמים ועמדו בתקן מי השתייה. כלומר, לא אובחנה השפעה של האפר על איכות מי התהום. ממצא זה נותר בעינו לאורך הבדיקות שבוצעו עד ל- 2004 ע"י המכון הגיאולוגי.

**ניטור תשטיפים מן הסוללה** – הניטור בוצע לאחר עונת הגשמים 1998/1999 ו- 2000/1999 וכלל דיגום תשטיפים משלושה עומקים בחתך סוללת האפר המרחף: מעל שכבת החיפוי, בפן הביניים (interface) בין שכבת החיפוי ושכבת האפר, ומתחת לשכבת האפר בעומק 1 מטר. במקביל בוצע ניטור בחלקת הביקורת שכלל דיגום מעל שכבת החיפוי ומתחת לשכבת המילוי המסורתית (נטול האפר). **בחנית יכולת חידור האפר למים** – נבדקה ע"י פרופ' רמי קרן ודר' מני בן-חור מהמכון למדעי קרקע, מים וסביבה ודר' אריאל מצגר מחברת החשמל. בדיקות החידור למים בוצעו במרחק 1.5, 2.5 ו- 4.5 מטר מן הכביש בחתך הסוללה לכל גובהה. נצפו הפרשים ניכרים בערכי החידור בין ראש הסוללה לרגליה- בעוד שבתחתית הסוללה (מרחק 4.5 מטר) החידור היה גבוה (55 ו- 20 מ"מ לשעה בתחילת החידור ולאחר שעתיים), בשיא הסוללה סמוך לכביש (מרחק 1.5 מטר) נאטם האפר לחלוטין, כנראה כתוצאה מהידוק תקני של האפר בסמוך לכביש ולקוי במורדות הסוללה. האפר נאטם כתוצאה מציפופו לאחר הידוק וכתוצאה משקיעת גיר בתהליך





**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

קרבונציה של הסיד החופשי באפר בנוכחות CO<sub>2</sub> ומי גשמים. בשתי העונות לא התקבל נקז מתחת לשכבת האפר אלא רק מפן הביניים, עקב היאטמותו למעבר מים. בעונה השנייה לא התקבל נגר גם משכבת הכורכר, כנראה עקב הידוק הן של האפר והן של הכורכר שהקטין את המוליכות ההידראולית של שכבות אלה. הנגר הרב יותר שהתקבל בחלקת האפר בשתי העונות לעומת הביקורת נבע כנראה מהמוליכות ההידראולית הנמוכה יחסית של האפר. **מבחינת ההרכב הכימי** – לרוב, ריכוזי היסודות במי הנקז מפן הביניים (Zn, Ni, B, Cr, Cu, Fe, Sr, Li, V, Mo, Ba, Mn) היו גבוהים מריכוזיהם בנגר העילי, כנראה כתוצאה מהמסה/שחרור של יסודות אלו מהאפר בזמן הזרימה האופקית של הנגר על גבי שכבת האפר בפן הביניים ועליה נימית של היסודות מהאפר כלפי מעלה עם התייבשות הקרקע, אך הם היו עדיין נמוכים. כדי לבדוק את ההשערה שהריכוזים יורדים עם הזמן לרמות זניחות, הוחלט לבקשת המשרד להגנת הסביבה לחדש את המעקב בחלקות הניטור (האפר והביקורת, פירוט בהמשך המסמך). ריכוזים של יסודות אחדים בתשטיף הנקז מהכורכר (Zn, B, Li, Sr) היו גבוהים מריכוזיהם בנגר הכורכר והנקז בפן הביניים בין האפר-קרקע. זאת כנראה עקב היות הכורכר מקור ליסודות אלו. לעומת זאת, ריכוזי יסודות אחרים (Ni, Cu, V) היו נמוכים יותר בנקז הכורכר מאשר בנגר הכורכר, כתוצאה משקיעה/ספיחה של יסודות אלו עם מעבר התמיסה משכבת הקרקע דרך הכורכר. **הסיכון לסביבה** – לאור הממצא שתשטיפי הנגר בחלקת הניטור נאספו מפני שכבת האפר אך לא מתחתיה, הוחלט להפסיק את הניטור לאחר שתי עונות גשמים משנמצא כי מים אינם חודרים דרך שכבת האפר. כלומר, גוף האפר נאטם עם הזמן ולא איפשר מעבר מים דרכו ולכן גם נמנעה המסת מזהמים ושטיפתם למי תהום. לגבי התשטיפים שכן התקבלו בעומקים השונים- כולם עמדו בתקן מי שתייה.

בעקבות החלטת הצוות המקצועי-מדעי (מזהמים) להפסיק את הפעלת חלקות הניטור, הנחה המשרד לאיכות הסביבה את המנהלת לערוך מעקב רב שנתי של שינויים מינרלוגיים וכימיים באפר המרחף בסוללה. עבודת המעקב הוטלה על קבוצת המחקר של המכון הגיאולוגי בראשות יועץ דויטש ובהנחיית דר' יעקב נתן, כהמשך למחקר שביצעה בשנת 1996 בסוללת האפר בתחנת הכח בחדרה. המחקר כלל **מעקב תלת שלבי (ב- 2000, 2005 ו- 2007) אחר פרופיל שינויים כימיים ומינרלוגיים שהתרחשו באפר המרחף** לעומק הסוללה עד בסיסה, היות ונדידה אנכית של מזהמים בריכוזים משמעותיים כלפי עומק הסוללה מהווה אינדיקטור לזיהום אפשרי בעוד שיציבות כימית ומינרלוגית מקטינה את הסבירות לזיהום אפשרי.

**שלב א' של המחקר** החל בשנת 2000 (לאחר שלוש עונות גשמים מאז הסלילה) ובמסגרתו בוצעו שני קידוחים להוצאת חומר המילוי מן הסוללה: מתחת לכביש הגישה ליישוב (להלן סוללת גשר), ודרומה יותר בשכבת אפר ששימש כחומר מילוי לבסיס הכביש (להלן סוללת כביש). תכולת המים באפר מסוללת הגשר הייתה גבוהה וקבועה, כ- 25% לעומת 10% בבסיס הסוללה; בסוללת הכביש תכולת המים ירדה בהדרגה מ- 25% בגג האפר לכ- 10% בבסיסו ופחות מזה בסלע בבסיס הסוללה. בבדיקה מינרלוגית נמצאה פאזה חדשה שלא הייתה קיימת באפר המקורי- המינרל



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

Stilpnomelane. ריכוזי היסודות המזהמים שנמדדו באפר לא השתנו עם העומק בסוללת הגשר, להוציא Sb ו-Se שהיו נמוכים יותר במרכז הסוללה; בסוללת הכביש ריכוזי חלק מהיסודות נותרו קבועים עם העומק, בעוד שריכוזי ה-As, B, Cu, Sb ו-V ירדו עם העומק והריכוז של Cr, Ba ו-Sr עלה עם עומק הסוללה. אולם, בנייתו הנתונים הללו יש לזכור שהאפר שנעשה בו שימוש בבניית הסוללה לא היה הומוגני, כפי שיפורט בממצאי שלב ב'.

**שלב ב' של המחקר** החל ב-2003 בוצעו שני קידוחים נוספים בסמוך לקידוחים שבוצעו בשלב א', ונבדק ההרכב המינרלוגי והכימי בחומר המוצק ובתשטיף (בשיטת TCLP), רק באפר מסוללת הגשר). על מנת לקבוע נדידה של יסודות באפר הסוללות יש לדעת את ההרכב הכימי הראשוני בכל עומק בזמן הקמת הסוללות. אולם מאחר ומידע זה חסר, בוצעה השוואה עם ההרכב הכימי של מדגם לא מייצג של האפר ששימש לבניית הסוללות ונשמר במעבדה, ועם אנליזות עבר שבוצעו במכון הגיאולוגי לאפר ישראלי. התוצאות מראות שלא חל כמעט שינוי בהרכב הכימי של האפר בהשוואה לשלב א', אולם בעומק האמצע של סוללת הכביש נמצא ריכוז נמוך של המינרל מוליט הייחודי לאפר ותכולת מים נמוכה יותר (10 – 15 אחוז לערך), לעומת תכולה קבועה פחות או יותר של 20 – 30 אחוז בסוללת הגשר), יחסית לדגימות מעומק נמוך וגבוה יותר. ככל הנראה, ממצאים אלו הם תוצאה מכך שמילוי האפר בסוללה זו לא היה הומוגני והכיל חומר מקומי מהסביבה, לעומת סוללת הגשר שהייתה בנויה בעיקר מאפר מרחף. גם בשלב זה נמצאה הפאזה המינרלית החדשה Stilpnomelane, שריכוזה היה גבוה יותר בסוללת הגשר והיה גבוה יותר בשתי הסוללות מהריכוז שנמדד בשלב א'. בבדיקות המיצוי שנערכו לחומר שנלקח מעומק 80 ו-140 – 150 ס"מ בסוללת הגשר לא נצפו שינויים משמעותיים בהרכב הכימי של תמיסת מיצוי האפר, למעט Mn ו-V ובמידה פחותה גם Mo ו-Zn, שריכוזם בתשטיף עלה ביחס לריכוזם בשלב א', זאת למרות שריכוזם בסוללות לא השתנה מאז, כלומר מסיסותם גדלה עם הזמן.

**שלב ג' של המחקר** החל בשנת 2006 בוצעו שני קידוחים בסמוך למקום הקידוחים שבוצעו בשלבים הקודמים. יש לציין כי הקידוח בסוללת הגשר היה בעייתי משום שהמקדח נתקל בשכבת אפר קשה ובלתי חדירה שגרמה לשבירת ציוד הקידוח, אך לבסוף הניסיון צלח באמצעות מקדח "חילוון". כאמור, הריכוזים ההתחלתיים של היסודות לא נבדקו בזמן הקמת הסוללה, ובנוסף, האפר שהושם בסוללה לא היה הומוגני בהרכבו, ולכן לצורך השוואת התוצאות עם הרכב האפר ההתחלתי הוערך הרכב זה באופן תיאורטי. גם בשלב זה של הניטור נצפתה התנהגות בי-מודלית של תכולת המים בסוללת הכביש לעומת ריכוז מים קבוע פחות או יותר בסוללת הגשר, ככל הנראה בשל אי אחידות החומר בסוללת הכביש. מבחינת ההרכב הכימי – כל היסודות שנבדקו בשתי הסוללות הראו ריכוזים דומים לאלו ההתחלתיים, מה שהביא למסקנה שלא התרחשה נדידה אנכית עם הזמן של יסודות בתוך הסוללות. לעתים נצפתה התנהגות בי-מודלית (שני שיאי ריכוז), כמו למשל ב-Se ו-Sb בסוללת הגשר, אולם מאחר ומדובר בריכוזים נמוכים, ניתן לייחס





**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

זאת לאי הומוגניות האפר, לשגיאה אנליטית ולשוני בין הריכוז האמיתי בזמן הקמת הסוללה לריכוז התיאורטי המחושב. פרופיל היסוד Mn הצביע על האפשרות שהוא נודד לעומק, שם ריכוזו היה הגדול ביותר. אולם, הסיבה לכך הייתה כנראה ריכוזו הגבוה בחומר המקורי באתר. בדיקות היסודות בתשטיף TCLP הראו שרוב היסודות היו קשי מיצוי, להוציא Se, Mo ו-B, כאשר זה האחרון היה המסיס ביותר (שיעור מיצוי ~80%) והוא לפיכך אמנם בעל פוטנציאל זיהום גבוה יחסית, אך עם זאת, כפי שצוין מקודם, לא נמצאה עדות לנדידה אנכית של יסודות בתוך הסוללה. המינרל Stilpnomelane אובחן גם בשלב זה, ומאחר והוא נעדר באפר ובסביבה ניתן להסיק שהוא נוצר בתוך הסוללה. ריכוזו היה גבוה יותר בסוללת הגשר מאשר בסוללת הכביש, גדל במעבר משלב א' ל-ב', אך קטן או נשאר ללא שינוי בשלב ג'. לא הוצע הסבר לתופעה זו.

**המסקנות העיקריות מהמחקרים שנסקרו הן שלא חלו שינויים מהותיים באפר בגרעין הסוללה ולא חל מעבר מזהמים מהאפר לקרקע הסביבה.** תופעות אלו מוסברות בהיאטמות פני שכבת האפר כתוצאה מציפוף שמקורו בהידוק השכבה בהתאם להנחיות ההנדסיות לסלילה, עקב שקיעה בחללים הבין גרגריים של גיר שנוצר בתהליך קרבונציה של הסיד החופשי באפר שהגיב עם מי גשמים ו- $CO_2$  מהאטמוספירה, ועקב ריאקציות פוצולניות שעבר האפר. כלומר, **בתנאי סלילה (הרטבה והידוק מבוקרים) אין שטיפה של מזהמים מן האפר בסוללה.**

בחורף 2007/8 שוקמו החלקות בסוללה לשם **ניטור נוסף** של כמויות נגר, סחף ואיכות הנגר מהסוללה, עשר שנים מאז הקמתה. השיקום והניטור בוצעו ע"י דר' מני בן חור, חיים טנאו ולאחייב לייב מהמכון למדעי קרקע, מים וסביבה. הניטור בוצע לאחר 3 סופות גשם. מחלקת הביקורת נדגמו רק מי הנגר העילי וסחף הקרקע ומחלקת האפר נדגמו גם מי הנקז מפן הביניים (בין כיסוי הקרקע לשכבת האפר מתחת). ריכוזי מרבית יסודות הקורט שהתקבלו במי הנקז והנגר משתי החלקות נמצאו מתחת לסף הגילוי של המכשיר, למעט B, Ba, V ו-Mn. יש לציין כי מי הנקז מפן הביניים נאספו בסופה הראשונה בלבד. בשל העובדה שריכוז הבורון בפן הביניים בחלקת האפר היה גבוה מהריכוז בנגר העילי הן בחלקת האפר והן הביקורת, הוחלט לבדוק את ריכוז הבורון בתשטיף קרקע הכיסוי בשתי החלקות, ונמצא כי ריכוז הבורון בתשטיף הקרקע המכסה את האפר גבוה יותר. לבירור מקור הבורון בוצע ניטור נוסף מלא בחורף 2008/9, במסגרתו נבדק גם ריכוז הבורון בתשטיף קרקע הכיסוי שנדגמה משני עומקים בשתי החלקות, בשלוש נקודות דיגום: מעלה, מרכז ומורד החלקה. הבדיקות הראו שריכוז הבורון בקרקע הכיסוי בחלקת האפר גבוה יותר מאשר בחלקת הביקורת וכי הריכוז בשכבה התחתונה של הקרקע בחלקת האפר גבוה יותר מאשר בשכבה העליונה בשלוש נקודות הדיגום. בדו"ח הסיכום מ-2009 לממצאי הניטור בשני החורפים נכתב שעליית ריכוז הבורון בקרקע מעל שכבת האפר יכולה הייתה להיגרם כתוצאה מעליה נימית של היסוד משכבת האפר לקרקע במהלך התייבשות הקרקע, ערבוב הקרקע עם האפר ע"י פעילות ביולוגית (למשל שורשי צמחים), וריקבון צמחים בקרקע ששורשיהם הגיעו לשכבת האפר וקלטו ממנה את הבורון.



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

**רבדים**

ממצאי הניטור בסוללת גייסר-א-זרקא הובילו למסקנה שהאפר בסוללה נאטם עם הזמן למעבר מים, אולם מאחר ותהליכי היאטמות האפר הינם תלויי זמן וטרם מוצו במלואם במועד הניטור שבוצע כעבור שתי עונות גשם מאז הסלילה, הוחלט לבצע בדיקות נוספות של חדירות אפר למים כדי לבסס את הממצאים הקודמים ולהעריך את מהירות תהליכי ההיאטמות, כדי שניתן יהיה להסתמך עליהם בקביעת תנאים סביבתיים סבירים יותר לשימוש באפר לסלילה מאלה שנקבעו בהנחה מחמירה של המסה מרבית של המזהמים באפר בסוללה, שטיפתם המלאה לסביבה והגעתם למי תהום. לצורך כך בוצע ע"י פרופ' רמי קרן [מעקב אחר השינויים עם הזמן ביכולת חידור למים של שכבת אפר מרחף ששימשה כתשתית בקטע 19 של כביש 6 סמוך לרבדים](#). המעקב כלל תצפיות בקיץ 2005 עם השלמת הסלילה, בקיץ 2006 כאשר האפר היה מחופה בקרקע בעובי 1.5 מטר, ובקיץ 2007 (מאחר והונח שתהליך ההיאטמות לא הסתיים לאחר שנה). לשם בדיקת החידור הוסרה תחילה מעל שכבת האפר שכבה של חמרה חולית בעובי 45 ס"מ ושכבת חרסית בעובי 60 ס"מ שנמצאה מעליה. הבדיקה בוצעה בלחץ הידרוסטטי קבוע. התוצאות שהתקבלו העידו על מגמה של ירידה בחידור עם הזמן: מ- 21.6 מ"מ/שעה ב- 2005, ל- 11.8 מ"מ/שעה ב- 2006 ועד ל- 7 מ"מ/שעה ב- 2007. לאור מגמה זו הוחלט לחזור על התצפית במרווח שנתיים, בקיץ 2009. נטיעת עצי זית בנקודת המדידה הקודמת אילצה לנדוד למיקום המרוחק כ- 30 מטר דרומית למיקום בשנת 2007. הערך שנמדד בנקודה היה 12.5 מ"מ/שעה, גבוה מזה שנמדד ב- 2007. הסיבה לכך היא כנראה כיסוי של שכבת קרקע עבה יותר בנקודה זו (חול בעובי מטר וחרסית בעובי 70 ס"מ), שיחד עם מיעוט המשקעים באזור ונוכחות צמחיה צורכת מים, הביאו למיזעור כמות המים שהגיעה לשכבת האפר וכתוצאה מכך האטו את תהליכי הקרבונציה והריאקציות הפוצולניות הגורמים להיאטמות האפר. עם זאת, חשוב לציין שבעת חשיפת שכבת האפר כף הטרקטור לא הצליחה לחדור מבעד לשכבה – עדות לדרגת קושי גבוהה באפר שהושגה לאחר 4 שנות "הזדקנות".

**פוטנציאל הסיכון מיישום אפר תחתית בתשתיות**

המחקרים עד כה התמקדו בעיקר בהערכת הסיכון הסביבתי כתוצאה משימוש באפר מרחף בתשתיות, מאחר שהוכח כי פוטנציאל שחרור יסודות באפר תחתית (אפ"ת) לסביבה הינו זניח, בעקבות [ממצאי עבודת דר' יעקב נתן ויועץ דויטש מהמכון הגיאולוגי שסוכמו ב- 2004 בנושא פוטנציאל הזיהום בשימושים השונים של אפר מסוג זה](#). כדי להעריך פוטנציאל זה נמדדו ריכוזי יסודות קורט בתשטיף דוגמאות אפ"ת שהתקבל בשיטת המיצוי EN 12457/2 (שטיפה במים מזוקקים ביחס מוצק לנוזל של 1 ל- 10), ונמצא כי הם עומדים בהגדרת הדירקטיבה האירופית לפסולת אינרטיית ואף נמוכים מהערכים המותרים לתקן הישראלי למי שתייה. ממצאים אלו נתמכים גם בממצאי [ניטור מי תהום](#) שבוצע ע"י המכון הגיאולוגי, של בארות מי שתייה באתר קיבוץ זיקים דרומית לאשקלון שנדרש בעקבות הקמת שכונת מגורים בקיבוץ על גבי תשתית



סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016

**היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

אפ"ת. עד כה, לאחר כ- 12 שנות ניטור (בין השנים 2002-2013), לא חל שינוי משמעותי בריכוזי יסודות הקורט שנמדדו באתר לאורך השנים. מגבלה שאכן קיימת לשימוש באפ"ת בתשתיות נוגעת לאזורים בהם ריכוז הבורון במי התהום נמצא בתחום 0.3-0.5 מ"ג/ק"ג, למעט שימוש בכמויות מצטברות של עד 5000 טון ברדיוס 5 ק"מ מאתר היישום במהלך 5 שנים. מגבלת הזמן מבוססת על התרחשות תגובות כימיות הגורמות עם הזמן להפסקת תהליכי שחרור היסודות מהאפ"ת וכן לשטיפת המקטע הזמין ביותר של בורון ממנו

**חקלאות**

במסגרת קידום השימוש במקטעי גודל שונים של אפ"ת כמצע לגידול צמחים וכרפד לבעלי חיים, התנתה רשות המזון ממשד הבריאות את האישור לשימוש זה באפר בבחינת **ההיבט הבריאותי של השימוש** – דהיינו קביעת תכולת מזהמים ורדיונוקלידים (יפורטו בהמשך) בחלקים הנאכלים של הגידולים או בעלי החיים הבאים במגע עם האפר (פירות, ירקות ותבלינים; פרות חלב ובשר ותרנגולות פטם) לצורך בדיקת עמידתם בריכוזים המותרים בתקנים.

**בדיקות ריכוזי מזהמים בגידולים חקלאיים בוצעו בין 1998 – 2006 בגידולים חקלאיים ע"י פרופ' יונה חן, צילה אביעד ואורי מגדל מהפקולטה לחקלאות, מזון ואיכות הסביבה, האוניברסיטה העברית.** נבדקו עגבניות (רגילות וצ'רי), פלפל, עירית, מלפפון, תות שדה, חסה, בזיל, מנגו וכרוב סיני שגודלו על מצע גידול המורכב מאפר תחתית ממזון וקומפוסט ביחסים נפחיים של 60 – 70 אחוז אפר ושל 30 – 40 אחוז קומפוסט, בהשוואה לגידולים שגודלו על מצע המורכב ממוץ וקומפוסט (המצע המקובל בשימוש) באותם יחסי נפח. הריכוזים שנמדדו בכל הבדיקות בצמחים שגדלו על מצע האפר היו דומים או נמוכים מאלו שנמדדו בצמחים שגדלו במצע טוץ, ונמוכים באופן ניכר מהסף המותר. לפיכך נקבע כי ניתן להשתמש ללא חשש באפ"ת כמצע לגידול צמחי מאכל והומלץ על השימוש בו לכל גידולי המזון החד-שנתיים בנוסף לגידולים לא אכילים כגון פרחים.

**ממצאי בדיקת איכות חלב של פרות שרבעו על מצע אפר ומצע רגיל העשוי קש, סוכמו בשנת 2000 ע"י פרופ' רמי קרן, פרופ' אורי מינגלגרין, דר' פנחס פיין ודר' ישראל ברוקנטל ממרכז וולקני.** לא נמצאה השפעה של האפר על ריכוז היסודות שנבדקו בחלב (Cd, Ni, Cr, Mo, Zn, B) ו-<sup>137</sup>Cs. (V)

**בדיקת מתכות כבדות (קדמיום, ארסן, עופרת וכספית) בפרות (רקמות וחלב) ותרנגולות פטם שרבעו על רפד אפ"ת לעומת רפד רגיל כביקורת, בוצעו ע"י דר' ישראל ברוקנטל מהמכון למדעי בעלי חיים, מרכז וולקני, וסוכמו בדו"ח מ- 2005.** בבדיקות הרקמות בפרות נבחרו 8 פרות ששהו על רפד האפר למשך שנה לפחות (5 פרות) ושנתיים לפחות (3 פרות), וכן 2 פרות ביקורת ששהו על



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

רפד קש. דגימות חלב נלקחו מ- 10 פרות ששהו על רפד האפר לפחות שנה אחת ו- 7 פרות ביקורת. כל ריכוזי המתכות שנבדקו ובכל הפרות, הן ברקמות (כבד וכליות) והן בחלב, היו נמוכים מהערכים המותרים (0.5, 0.5, 0.5 ו- 0.2 מ"ג/ק"ג ברקמות בע"ח, 0.005, 0.005, 0.02 ו- 0.01 מ"ג/ק"ג בחלב, עבור As, Cd, Pb ו-Hg, בהתאמה) וחלקם אף מתחת לגבול המדידה, למעט חריגה חסרת משמעות של ריכוז קדמיום בדגימה אחת של כליה מפרה ששהתה על רפד האפר (0.56 מ"ג/ק"ג) וריכוז עופרת בדגימת חלב אחת של פרה ששהתה על רפד האפר (0.022 מ"ג/ק"ג). להוציא חריגות אלו, ריכוזי המתכות הכבדות ברקמות ובחלב היו דומים בין הפרות שנחשפו לאפר לפרות הביקורת. בבדיקות הרקמות בפטמים (כבד, כליות ושריר) נערכו שתי תצפיות כאשר בכל תצפית היו שתי קבוצות פטמים ששהו על הרפד (אפר ושבבי עץ כביקורת) למשך 40 יום (תקופת הגידול), כל קבוצה כללה 5 פטמים. ריכוזי המתכות גם בתצפיות הללו היו בכל המקרים מתחת למותר. כמו כן, לא הייתה כל תרומה של רפד מסוים (אפר או ביקורת) להגדלת הריכוזים בדגימות – לעתים הריכוזים היו גבוהים יותר בפטמים ששהו על רפד האפר (עם הבדל המרבי של 111 מ"ג/ק"ג עופרת בכליה של דגימת פטם מרפד האפר לעומת הביקורת) ולעתים ההיפך (הבדל מרבי של 79 מ"ג/ק"ג קדמיום בכבד של דגימת פטם מרפד הביקורת לעומת האפר).

**ההיבט הסביבתי של השימוש באפ"ת כרפד לבעלי חיים נבחן בעבודה לעיל של רמי קרן וקבוצתו משנת 2000, בעבודת פרופ' רמי קרן ולודמילה צחנסקי משנת 2004, ובניסוי שבוצע ע"י דר' דן בכרך, דר' ישראל יוסלביץ' ויצחק מלכא משירות ההדרכה והמקצוע, לבחינת כושר הספיחה של האפר לפרש עופות, שסוכם ב- 2008.**

**בעבודה משנת 2000** נבדקו ריכוזי יסודות בתשטיפים מתערובות שונות של אפ"ת, גיר, זבל פרות וקומפוסט. ריכוזי כל היסודות (למעט בורון שריכוזו בהפרשות הפרה גבוה), בתשטיפים עם החומר האורגני (רפד אפר עם זבל חצרות או קומפוסט), היו נמוכים באופן משמעותי מהריכוזים המרביים המותרים בקולחים להשקיה מעל אקוויפר החוף. **בעבודה משנת 2004** נבדקו ריכוזי מזהמים בתשטיפים שהתקבלו מהרווייה במים מזוקקים של עמודות שמולאו ברפד אפר או רפד נסורת עץ כביקורת ושהכילו זבל עופות, לאחר 40 ימי גידול אפרוחים בכל רפד. התוצאות – ריכוזי קדמיום ומוליבדן שנמדדו בתשטיפי שני הרפדים היו מתחת לסף הגילוי של המכשיר; ריכוזי אבץ ומנגן היו נמוכים יותר בתשטיפי מרפד האפר. בחינת ריכוז הבורון בתשטיפי כנגד נפח המים שעברו דרך הרפד מראה שהבורון התמוסס מרפד האפר באופן מתון יותר מזה שנמצא ברפד הביקורת, עד נפח תשטיפ של 500 מ"ל, וריכוזו בתשטיפי מנקודת נפח זו והלאה (מעבר 1000 מ"ל ויותר של מים מזוקקים דרך הרפד) היה נמוך יותר מהערך שנמצא בתשטיפי מרפד הביקורת והיה קטן מ- 0.5 ו- 1 מ"ג/ליטר, בהתאמה. בסיכום העבודה צוין שמידת זיהום הסביבה של רפד האפר עם הלשלת הייתה נמוכה משל רפד הביקורת עם הלשלת. **בעבודה משנת 2008** אפר התחתית נבחן כחומר המקטין את זיהום הסביבה במסגרת ניסוי שבוצע ע"י דר' דן בכרך, דר' ישראל יוסלביץ' ויצחק מלכא משירות ההדרכה והמקצוע, לבחינת כושר הספיחה של האפר לפרש עופות מלולי



סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016

**היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

מטילות המכיל מזהמים (כגון ניטרט) העלולים לחלחל לעומק פרופיל הקרקע. בניסוי נדגמה לשלשת עופות ללא טיפול (ביקורת) ולשלשת שהצטברה על גבי שכבת אפר בעובי 2 ס"מ, אחת לשבועיים ואחת לחודש, במשך 130 יום. איכות השלשת נמדדה עפ"י אחוז הרטיבות וריכוזי המזהמים כלוריד, זרחן וניטראט בביקורת ובטיפול עם האפר (לאחר הומוגניזציה של האפר והשלשת). מתוצאות הניסוי שסוכם ב- 2008 נראה שהאפר הפחית באופן ניכר את אחוז הרטיבות בשלשת ואת כמות המזהמים בה, למעט הניטראט שכמותו הייתה דומה בכל הטיפולים. בסיכום הניסוי הוחלט להמשיך לעקוב אחר השפעת האפר בהוספתו בתדירויות משתנות.

**בטון**

שימוש אפשרי נוסף של אפר מרחף בתשתיות הוא כמלאן פוצולני המוסף לתערובות צמנטיות בשם בחנ"מ (בטון בעל חוזק נמוך מבוקר; CLSM – Control Low Strength Material) וגראוט (Grout) המיושמות בתת הקרקע לצורך חיזוק וייצוב התשתית באמצעות מילוי חללים וסדקים במסלע. ביישומים אלו התערובות עשויות לבוא במגע עם מי נגר או מי תהום. לפיכך, הוחלט לבצע בדיקות של שטיפת המזהמים כתוצאה מהוספת אפר מרחף לתערובת אלו. בכדי להעריך את הסיכון המרבי לסביבה הוחלט להשתמש באפר מרחף ממקור קולוביאני הן בשל הריכוזים הגבוהים יחסית בתשטיף והן בשל האקטיביות פוצולנית הנמוכה. הבדיקות וממצאי שתי העבודות סוכמו ע"י דר' נדיה טויטש ואולגה ברלין מן המכון הגיאולוגי בדו"חות מ- 2013 ו- 2015, ומתייחסות ליישום בחנ"מ וגראוט, בהתאמה.

בדיקות המעבדה כללו מיצוי מקוביות שהוכנו מתערובות שהכילו אפר וכן תערובת בקרה ללא אפר, לאחר שאלה עברו אשפחה בתנאים מבוקרים (80% לחות ב-  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ) ובפרקי זמן שונים (7, 28 ו- 90 יום) בכדי לבחון השפעת "הזדקנות" התערובות (שקיעת קלציום קרבונט בתהליך קרבונציה) על שחרור היסודות. הליך המיצוי בוצע לפי השיטה האירופאית EA NEN 7375:2004 (tank test) שנועדה למיצוי פסולות המתנהגות כמונוליט כדוגמת פסולת בטון או התערובות הצמנטיות לעיל. בהתאם לפרוטוקול השיטה, הושמה כל קוביה בתוך מיכל המכיל מים מזוקקים ונמדד שחרור היסודות בשמונה מועדים מ- 6 שעות ועד 64 יום, ובתום כל שלב מיצוי הוחלפו המים לצורך בדיקה. הריכוזים המצטברים של היסודות בתשטיפים מכל שלבי המיצוי נורמלו לשטח הפנים של הקוביה ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ) והשווה לקריטריון ההולנדי לחומרי בנייה. על אף ההעשרה הברורה של יסודות קורט בתשטיפי התערובות עם האפר לעומת תערובות ללא אפר, הריכוזים המצטברים בתשטיפים של מרבית היסודות, הן מתערובות הבחנ"מ והן מהגראוט, היו נמוכים מהקריטריון ההולנדי, חלקם אף מתחת לסף המדידה. סלן הוא היסוד היחיד שחרג מהקריטריון: פי 1.1 ו- 1.8 מהקריטריון באשפחה למשך 28 יום, פי 1.8 ו- 3 מהקריטריון באשפחה למשך 90 יום, בתשטיף הגראוט והבחנ"מ, בהתאמה (ריכוזי סלן בתשטיפי הגראוט והבחנ"מ שעברו אשפחה



**סקירת מחקרים ועבודות  
 אוקטובר 2016  
היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

למשך 7 יום לא חרגו מהקריטריון). אולם חשוב לציין שיייתכן שקריטריון זה אינו אופטימלי עבור התנאים בישראל משום שתנאי יישום התערובות הצמנטיות הינם תלויי מקום (למשל אקלים, סוג קרקע וכו'). אך בהיעדר כל קריטריון אחר זה הקריטריון היחיד הניתן להשוואה. מכאן שממצאי שתי העבודות מצביעים על כך שאין חשש ממשי לשחרור מזהמים מהאפר המרחף לסביבה כאשר הוא מוסף לתערובות צמנטיות.

**מזהמים אורגניים**

מזהמים אורגניים יציבים (POP- Persistent Organic Pollutants) הם שם כולל לתרכובות רעילות ויציבות כגון דיאוקסינים, פוראנים ופחמימנים ארומטיים פוליציקליים ( PAH- Polycyclic Aromatic Hydrocarbons). מבין הדיאוקסינים, 17 ידועים כרעילים ביותר. החשש מנוכחות חומרים אלה באפר הפחם נובע מאופן היווצרותם – בשריפה לא מושלמת של חומרים אורגניים מוצקים, בהם פחם, המשחררת תרכובות פחמימניות היכולות להגיב עם כלור, ברום או פלואור ליצירת דיאוקסין. לאחר היווצרותם, הדיאוקסינים נעים יחד עם גזי הפליטה ועלולים להיספח לפני השטח של חלקיקי האפר המרחף. עם זאת, בטכנולוגיה הנהוגה בתחנות הכח הפחמיות המודרניות והכוללת טחינת הפחם לחלקיקים דקים מאוד, משך שהייה קצר של החלקיקים בכבשן ויחס דלק/אוויר אופטימלי, מובטחת שריפה כמעט מושלמת המונעת היווצרות מזהמים אלה והצטברותם באפר בריכוזים מסוכנים.

לבקשת המשרד להגנת הסביבה **בוצעו בשנת 2006 בדיקות לנוכחות דיאוקסינים ופוראנים באפר מרחף ותחתית ממקורות הפחם העיקריים המיובאים לישראל** שבוצעו על ידי Dr. Ruud Meij ממכון המחקר KEMA במעבדת TAUW, הולנד. הריכוזים שנמדדו נמצאו נמוכים מאוד ונעו בין 0 – 0.78 פיקוגרם (1/10<sup>12</sup> גרם) I-TEQ לגרם (I-TEQ הוא המדד המקובל לרעילות הדיאוקסינים והפוראנים שפותח ע"י ה-EPA), והתחום העליון של הערכים (השווה לסכום הריכוזים ברי המדידה וערכי הסף עבור התרכובות שאינן ברות מדידה) נע בין 0.42 < ל- 1.11 < פיקוגרם I-TEQ לגרם. ערכים אלו נמוכים מערך הסף המומלץ ע"י ארגון הבריאות העולמי לצריכה היומית הנסבלת (Tolerance Daily Intake- TDI) של 1 – 4 פיקוגרם I-TEQ לכל ק"ג ממשקל הגוף ליום. הריכוזים של 16 תרכובות ה-PAH המצוינות ברשימת ה-EPA, נמצאו נמוכים ונעו בין 0.02 – 1 מ"ג/ק"ג, מתחת לתקן ההולנדי לתרכובות PAH בחומרי בנייה (אחד משימושי האפר בהולנד) שנקבע בתחום שבין 5 – 50 מ"ג/ק"ג ולתקן הישראלי של 40 מ"ג/ק"ג בקרקע חקלאית. לסיכום, ריכוזי המזהמים האורגניים באפר הישראלי נמצאו נמוכים מאוד, ובחלקם אף מתחת לסף רגישות מכשיר המדידה.



סקירת מחקרים ועבודות  
אוקטובר 2016

**היבטים סביבתיים, בריאותיים וגיהותיים של שימושי אפר פחם**

לבקשת שירות המזון הארצי בוצעו בדיקות דיאוקסינים בחלב פרות שרbcו על רפד המכיל אפר תחתית בהשוואה לחלב פרות שרbcו על מצע רגיל. כן נבדק מזון הפרות ומצע האפר. הדוגמאות נמסרו לדר' גיל כץ מחברת KTE, ונשלחו לבדיקה במעבדת ALS, צ'כיה. בדו"ח סיכום הממצאים מ-2013 נמצא שכל הערכים שנמדדו בחלב פרות שרbcו על רפד משני הסוגים היו נמוכים מהמותר עפ"י התקן המחמיר האירופי, ומתוך השוואה של רכוזי הדיאוקסינים השונים בחלב הוסק בדו"ח כי מקור המזהמים בחלב הוא מן המזון שסופק לפרות ולא מן האפר.