

**ECOLOG**

ENGINEERING LTD

**אקולוג**

הנדסה בע"מ

11/05/2017

PR16014

לכבוד:

|                                                          |                                                          |                                                          |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| חוליו סובוביץ                                            | אולג גרנד                                                | גלעד גולוב                                               |
| כימאי ראשי                                               | ראש מטה בטיחות, איכות ואקולוגיה                          | מנכ"ל                                                    |
| החברה לשירותי איכות הסביבה בע"מ                          | החברה לשירותי איכות הסביבה בע"מ                          | החברה לשירותי איכות הסביבה בע"מ                          |
| <a href="mailto:Julio@escil.co.il">Julio@escil.co.il</a> | <a href="mailto:olegg@escil.co.il">olegg@escil.co.il</a> | <a href="mailto:gilad@escil.co.il">gilad@escil.co.il</a> |

**הנדון:** סקר ספרות של שיטות טיפול ומתקני הטיפול הפוטנציאליים עבור כלל אתרים בהם יבצעו טיפול ושיקום קרקעות מזוהמות

שלום רב,

בהמשך לזכיית אקולוג הנדסה בע"מ (להלן: אקולוג) במכרז פומבי להכנת מפרטים טכניים וכלכליים ודוח חלופות טכנולוגיות במסגרת תכנית לטיפול ושיקום קרקע" (להלן: העבודה), מוגש בזאת חלק א' של העבודה - סקר ספרות של שיטות טיפול ומתקני הטיפול הפוטנציאליים עבור כלל אתרים בהם יבצעו טיפול ושיקום קרקעות מזוהמות.

אנו נשמח לעמוד לרשותכם בכל שאלה שתעלה.

בברכה,

**אקולוג הנדסה בע"מ**

מירי למפרט

מנהלת אגף מדעי האדמה והסביבה

יצחק שטרמר

מהנדס סביבה

נועם פוניה

מהנדס סביבה

ECOLOG ENGINEERING LTD

3 Pekris St., Edison Entrance, Tamar Park,  
Rehovot 76700203, ISRAEL

Tel: +972-8-9475222 | Fax: +972-8-9477008

[office@ecolog.co.il](mailto:office@ecolog.co.il)

אקולוג הנדסה בע"מ

פקריס 3, כניסת אדיסון, פארק תמר,

רחובות, 7670203

טל: 08-9475222 | פקס: 08-947708

# דו"ח חלופות טכנולוגיות במסגרת תכנית לטיפול ושיקום קרקע

11.05.2017

PR16014



הוכן עבור החברה לשירותי איכות  
הסביבה בע"מ

## תוכן העניינים

### 1 מבוא 1

### 2 טיפול ביולוגי 2

#### 2.1 תיאור כללי של הטכנולוגיה 2

2.1.1 הרכב הזיהום 3

2.1.2 ריכוז הזיהום 5

2.1.3 מרקם הקרקע 5

2.1.4 טמפרטורה 5

2.1.5 ריכוז חמצן 6

2.1.6 pH 6

2.1.7 זמינות חומרי הזנה (נוטריאנטים) 7

2.1.8 תכולת רטיבות בקרקע 7

2.1.9 תוספות לקרקע 7

2.1.10 אוכלוסיה מיקרוביאלית 8

2.1.11 טיפול קדם 9

#### 2.2 נייטור ובקרה 10

#### 2.3 שיקולים סביבתיים 11

#### 2.4 יתרונות וחסרונות טיפול ביולוגי 13

#### 2.5 שיטות טיפול ביולוגי Ex-Situ 13

2.5.1 Land-Farming (מוכר גם כ-Composting , Windrows) 13

2.5.2 Bio-piles 14

#### 2.6 שיטות טיפול ביולוגי In-Situ 16

2.6.1 Bio-Venting 16

#### 2.7 דוגמאות טיפול ביולוגי In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI 19

#### 2.8 דוגמאות לטיפול ביולוגי Ex-Situ\On-Site מתוך מסמכי ה-RIF 21

|          |                                                                    |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 25 ..... | טבלת סיכום טכנולוגיות טיפול ביולוגי                                | 2.9 |
| 28 ..... | 3 טיפול תרמי                                                       |     |
| 28 ..... | 3.1 טיפול תרמי בטכנולוגיית TD (Thermal Desorption)                 |     |
| 28 ..... | 3.1.1 תיאור הטכנולוגיה                                             |     |
| 28 ..... | 3.1.2 סוגי מזהמים מטופלים                                          |     |
| 31 ..... | 3.1.3 ניטור במהלך הטיפול                                           |     |
| 31 ..... | 3.1.4 יתרונות הטיפול בטכנולוגיית TD                                |     |
| 31 ..... | 3.1.5 חסרונות הטיפול בטכנולוגיית TD                                |     |
| 31 ..... | 3.2 טיפול בטכנולוגיית TD בצורת On-site \ Ex-Situ                   |     |
| 31 ..... | 3.2.1 תיאור הטכנולוגיה                                             |     |
| 32 ..... | 3.2.2 טיפול-קדם                                                    |     |
| 33 ..... | 3.2.3 שיטות הזנה                                                   |     |
| 34 ..... | 3.2.4 סוגי קרקעות לטיפול Ex-Situ                                   |     |
| 34 ..... | 3.2.5 תכנון ותפעול מתקן Ex-Situ – TD                               |     |
| 36 ..... | 3.2.6 יתרונות של טיפול Ex-Situ                                     |     |
| 36 ..... | 3.2.7 חסרונות של טיפול Ex-Situ                                     |     |
| 37 ..... | 3.2.8 דוגמאות למתקני טיפול Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI                |     |
| 43 ..... | 3.3 טיפול בטכנולוגיית TD בצורת In-Situ                             |     |
| 43 ..... | 3.3.1 חימום באמצעות הולכה חשמלית ERH (Electric resistance heating) |     |
| 44 ..... | 3.3.2 חימום באמצעות קיטור SEE (Steam enhanced extraction)          |     |
| 45 ..... | 3.3.3 חימום באמצעות הולכה TCH (Thermal conductive heating)         |     |
| 48 ..... | 3.3.4 חימום באמצעות גלי רדיו RFH (Radio-frequency heating)         |     |
| 48 ..... | 3.3.5 טיפול בטכנולוגיית ויטריפיקציה ISV (In-Situ Vitrification)    |     |
| 49 ..... | 3.3.6 ניטור תת פני הקרקע במהלך טיפול In-Situ                       |     |
| 51 ..... | 3.4 פירוליזה (Pyrolysis)                                           |     |

|    |                                                     |            |
|----|-----------------------------------------------------|------------|
| 51 | תיאור הטכנולוגיה                                    | 3.4.1      |
| 53 | דוגמאות למתקנים מתוך מסמכי ה-RFI                    | 3.4.2      |
| 53 | <b>שריפה (Incineration)</b>                         | <b>3.5</b> |
| 53 | תיאור הטכנולוגיה                                    | 3.5.1      |
| 55 | דוגמאות למתקני טיפול Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI       | 3.5.2      |
| 56 | <b>שיקולים סביבתיים</b>                             | <b>3.6</b> |
|    | טיפול בפליטות 56                                    | 3.6.1      |
| 57 | שינוע הקרקעות בטיפול Ex-Situ                        | 3.6.2      |
| 57 | אחסון הקרקעות בטיפול Ex-Situ                        | 3.6.3      |
| 58 | טיפול במזהמים אשר לא הושבו                          | 3.6.4      |
| 59 | רעש                                                 | 3.6.5      |
| 61 | שיקולים סטטוטוריים-סביבתיים                         | 3.6.6      |
| 61 | שיקולים אקולוגיים בטיפול In-Situ                    | 3.6.7      |
| 62 | <b>טבלת סיכום טכנולוגיות טיפול תרמי</b>             | <b>3.7</b> |
| 64 | <b>מקרי בוחן בעולם (International Case Studies)</b> | <b>3.8</b> |
| 68 | <b>4 שטיפת קרקע</b>                                 | <b>4</b>   |
| 68 | תיאור הטכנולוגיה                                    | 4.1        |
| 69 | סוגי מזהמים                                         | 4.2        |
| 70 | סוגי קרקע                                           | 4.3        |
| 71 | שלבי הטיפול                                         | 4.4        |
| 73 | תכנון תהליך הטיפול ובדיקת עמידה ביעדי הטיפול        | 4.5        |
| 75 | סוגי מתקנים                                         | 4.6        |
| 75 | עלויות                                              | 4.7        |
| 76 | שיקולים סביבתיים                                    | 4.8        |
| 77 | יתרונות וחסרונות                                    | 4.9        |
| 78 | דוגמאות למתקני שטיפת קרקע מתוך מסמכי ה-RFI          | 4.10       |

|     |                                                           |      |
|-----|-----------------------------------------------------------|------|
| 84  | טבלת סיכום טכנולוגית שטיפת קרקע.....                      | 4.11 |
| 86  | 5 טיפול ייצוב מיצוק .....                                 |      |
| 86  | 5.1 תיאור כללי של הטכנולוגיה .....                        |      |
| 91  | 5.2 התאמת הטכנולוגיה לקבוצות המזהמים .....                |      |
| 97  | 5.3 פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת .....                  |      |
| 101 | 5.4 טיפול מייצוב מיצוק מחוץ לאתר (Ex-Situ) .....          |      |
| 101 | 5.4.1 תיאור כללי של התהליך .....                          |      |
| 102 | 5.4.2 יתרונות וחסרונות של טיפול Ex-Situ .....             |      |
| 103 | 5.4.3 פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת .....                |      |
| 103 | 5.4.4 שיקולים סביבתיים .....                              |      |
| 103 | 5.4.5 שיקולים סטטוטוריים .....                            |      |
| 103 | 5.4.6 שיקולים פיננסיים ומחירים לטיפול .....               |      |
| 106 | 5.4.7 דוגמאות למתקני טיפול Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI ..... |      |
| 109 | 5.4.8 מקרי בוחן בעולם (International Case Studies) .....  |      |
| 112 | 5.5 טיפול מייצוב מיצוק במקום: In-Situ .....               |      |
| 112 | 5.5.1 תיאור כללי של התהליך .....                          |      |
| 113 | 5.5.2 יתרונות וחסרונות של הטיפול בתוך האתר .....          |      |
| 114 | 5.5.3 פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת .....                |      |
| 115 | 5.5.4 שיקולים סביבתיים .....                              |      |
| 116 | 5.5.5 שיקולים סטטוטוריים .....                            |      |
| 116 | 5.5.6 שיקולים פיננסיים ומחירים לטיפול .....               |      |
| 117 | 5.5.7 דוגמאות למתקני טיפול In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI ..... |      |
| 119 | 5.5.8 טבלת סיכום טכנולוגיות ייצוב מיצוק .....             |      |
| 121 | 5.5.9 מקרי מבחן בישראל (Local Case Studies) .....         |      |
| 123 | 5.5.10 מקרי מבחן בעולם (International Case Studies) ..... |      |

## 6 סיכום 125

|          |                     |   |
|----------|---------------------|---|
| 133..... | 7 ביבליוגרפיה       | 7 |
| 133..... | 7.1 כלל הטכנולוגיות |   |
| 134..... | 7.2 טיפול ביולוגי   |   |
| 134..... | 7.3 טיפול תרמי      |   |
| 134..... | 7.4 שטיפת קרקע      |   |
| 135..... | 7.5 ייצוב מיצוק     |   |

## רשימת טבלאות

|         |                                                                                                     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10..... | טבלה 1 : פרמטרים מרכזיים לניטור במהלך הבקרה על תהליך טיפול ביולוגי                                  |
| 19..... | טבלה 2 : דוגמאות טיפול ביולוגי In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI                                             |
| 21..... | טבלה 3 : דוגמאות טיפול ביולוגי Ex-Situ\On-Site מתוך מסמכי ה-RFI                                     |
| 25..... | טבלה 4 : סיכום טכנולוגיות טיפול ביולוגי                                                             |
| 30..... | טבלה 5 : טמפי' נידוף של מזהמים עיקריים                                                              |
| 30..... | טבלה 6 : יעילות טיפול תרמי עבור מזהמים ממשפחות שונות                                                |
| 33..... | טבלה 7 : עלויות אופייניות לטיפול בטכנולוגיית TD כתלות בשיטת הזנת הקרקע (רציפה\מנתית)                |
| 35..... | טבלה 8 : הערכת עלויות לטיפול בקרקעות מזהמות לפי סוג מתקן וכמות הקרקע בה יש לטפל                     |
| 36..... | טבלה 9 : הערכת עלויות לטיפול בטכנולוגיית Ex-Situ TD                                                 |
| 37..... | טבלה 10 : דוגמאות טיפול תרמי Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI                                               |
| 54..... | טבלה 11 : הערכת עלויות לטיפול בטכנולוגיות שריפה                                                     |
| 56..... | טבלה 12 : תכונות הקרקע והמזהמים הנדרשות לקליטה לטיפול במפעל נשר                                     |
| 57..... | טבלה 13 : סוגי המזהמים הנפלטים במהלך טיפול תרמי                                                     |
| 60..... | טבלה 14 : מידת הרעש המופקת מחלקים ופעילויות שונות של מתקן שריפה ומתקני טיפול בתוצרי טיפול תרמי      |
| 62..... | טבלה 15 : סיכום טכנולוגיות טיפול תרמי                                                               |
| 64..... | טבלה 16 : מקרי בוחן לטיפול תרמי מהעולם                                                              |
| 71..... | טבלה 17 : ריכוזי מזהמים המותרים לקליטה במתקני שטיפת קרקע בהולנד                                     |
| 74..... | טבלה 18 : בדיקות המעבדה השונות אשר יש לבצע על מנת לאפיין תהליך טיפול בשטיפת קרקע                    |
|         | טבלה 19 : כמות אנליזות ותת דגימות מוצעת לדיגום מרוכב של קרקעות בנפחים שונים לפני ואחרי טיפול (תכנית |



|     |                                                                                           |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 75  | דיגום בפרויקטים של חברת Ludreco, מתוך מסמכי ה-RFI.                                        |
| 77  | טבלה 20 : מידת הרעש המקסימלית המופקת מחלקי מחלקים שונים של מתקני שטיפת קרקע.              |
| 78  | טבלה 21 : דוגמאות לטכנולוגיות שטיפת קרקע מתוך מסמכי ה-RFI.                                |
| 84  | טבלה 22 : סיכום טכנולוגיות שטיפת קרקע.                                                    |
| 90  | טבלה 23 : טכנולוגיות שיקום אתרים מזוהמים בארה"ב בין השנים 2005-2011.                      |
| 91  | טבלה 24 : מידע כימי על כל סוגי המתכות, מידע על הרמות הולנטיות שלהם והתנאים בהם הן מגיבות. |
| 93  | טבלה 25 : הכימיה היציבה של היונים.                                                        |
| 93  | טבלה 26 : חומרי הנפץ הנפוצים ביותר כמזהמים סביבתיים.                                      |
| 96  | טבלה 27 : התאמה בין פסולות שונות לשיטות ייצוב/מיצוק.                                      |
| 96  | טבלה 28 : התאמה בין פסולות שונות לריאגנטים המשמשים בטכנולוגיית ייצוב/מיצוק.               |
| 97  | טבלה 29 : אפקטיביות ייצוב/מיצוק בטיפול בסוגי מזהמים שונים.                                |
| 100 | טבלה 30 : ערכי סף של חוזק, מוליכות הידראולית ומתכות כבדות.                                |
| 100 | טבלה 31 : השפעת פרמטרים שונים על יעילות תהליך ייצוב/מיצוק.                                |
| 104 | טבלה 32 : השוואת שיטות ייצוב/מיצוק שונות.                                                 |
| 104 | טבלה 33 : עלויות של אתרים בגדלים שונים.                                                   |
| 105 | טבלה 34 : עלויות של אתרים בגדלים שונים.                                                   |
| 106 | טבלה 35 : דוגמאות טיפול ייצוב מיצוק Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI.                             |
| 109 | טבלה 36 : מקרי בוחן לטיפול ייצוב/מיצוק מהעולם.                                            |
| 115 | טבלה 37 : שיקולים נוספים בתהליך ייצוב/מיצוק In-situ.                                      |
| 117 | טבלה 38 : דוגמאות טיפול ייצוב מיצוק In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI.                             |
| 119 | טבלה 39 : סיכום טכנולוגיות ייצוב/מיצוק.                                                   |
| 121 | טבלה 40 : מקרי בוחן לטיפול תרמי מישראל.                                                   |
| 123 | טבלה 41 : מקרי בוחן לטיפול תרמי מהעולם.                                                   |
| 125 | טבלה 42 : טבלת סיכום טכנולוגיות טיפול בקרקעות מזוהמות.                                    |

## רשימת איורים

|   |                                                                 |
|---|-----------------------------------------------------------------|
| 4 | איור 1 : מידת ההידרופוביות ( $K_{ow}$ ) של מולקולות PAH השונות. |
|---|-----------------------------------------------------------------|



- איור 2 : מידת הזמינות של שמנים ודלקים שונים לפירוק ביולוגי ..... 4
- איור 3 : ערבוב סדימנט מזוהם מנחל הקישון עם גזם כחומר נפחי באמצעות כלי צמ"ח וכלים חקלאיים ..... 8
- איור 4 : הקמת משטחי טיפול ביולוגי על גבי יריעות HDPE אטומות בפרויקט שיקום קרקעית נחל הקישון ..... 12
- איור 5 : מערכות ניקוז על גבי יריעות HDPE (בהקמה) שהותקנו בפרויקט שיקום קרקעית נחל הקישון ..... 12
- איור 6 : תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Land-Farming ..... 14
- איור 7 : תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Bio-Piles ..... 15
- איור 8 : תרשים סכמתי מערכת אוורור מאולץ ומבנה ערימה בשיטת Bio-Piles ..... 16
- איור 9 : תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Bio-Venting ..... 18
- איור 10 : פרמיאביליות הקרקע לאוויר בקרקעות שונות ..... 18
- איור 11 : מתקן Bio-Venting של חברת HPC ..... 20
- איור 12 : מתקן Bio-Venting של חברת RGS90 ..... 20
- איור 13 : ערימות טיפול Bio-Piles באתר טיפול של חברת RGS90 ..... 23
- איור 14 : ערימות טיפול Windrows באתר טיפול של חברת Ludreco SA ..... 23
- איור 15 : ערימות טיפול Bio-Pile באתר טיפול של חברת HPC ..... 24
- איור 16 : תרשים סכמתי של שיטות חימום שונות של תא הטיפול ושל הקרקע ..... 32
- איור 17 : איור סכמתי של מתקן טיפול ..... 35
- איור 18 : מתקן TD נייד בחימום עקיף של חברת Dekonta ..... 40
- איור 19 : מתקן TD בחימום ישיר של חברת Astec ..... 40
- איור 20 : מתקן TD של חברת HPC ..... 40
- איור 21 : מתקן TD מסוג TPS של חברת SRT ..... 41
- איור 22 : מתקן TD של חברת Ludreco SA ..... 42
- איור 23 : תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD בשיטת הולכת חשמלית ..... 43
- איור 24 : תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD באמצעות קיטור ..... 45
- איור 25 : תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD באמצעות הולכה ..... 47
- איור 26 : תרשים סכמתי של מיקום הקידוחים השונים בטיפול In-Situ TD באמצעות הולכה ..... 47

|     |                                                                                  |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------|
| 49  | איור 27 : תרשים סכמתי של טיפול In-Situ באמצעות ויטריפיקציה.                      |
| 51  | איור 28 : מבנה של באר ניטור מאפשרת דיגום של מים בצורה בטיחותית וללא איבוד VOC.   |
| 52  | איור 29 : תרשים סכמתי של תהליך פירוליזה.                                         |
| 55  | איור 30 : הכבשן המסתובב של ייצור הקלינקר במפעל נשר.                              |
| 59  | איור 31 : תרשים סכמתי של מערכות לטיפול במזהמים בזרם הגז.                         |
| 69  | איור 32 : סוגי קשרים בין מזהמים לחלקיקי הקרקע.                                   |
| 73  | איור 33 : תרשים סכמתי של תהליך הטיפול בשטיפת קרקע.                               |
| 80  | איור 34 : רכיבים שונים של מתקן שטיפת הקרקע של חברת DEKONTA.                      |
| 81  | איור 35 : מתקן שטיפת הקרקע של חברת Sol Environment.                              |
| 82  | איור 36 : רכיבים שונים של מתקן שטיפת הקרקע של חברת Ludreco SA.                   |
| 83  | איור 37 : מתקן שטיפת הקרקע של חברת Boskalis.                                     |
| 87  | איור 38 : דוגמאות עבור פסולת גולמית ופסולת לאחר טיפול בתהליך ייצוב/מיצוק.        |
| 87  | איור 39 : תרשים סכמתי של תהליך הטיפול ייצוב/מיצוק.                               |
| 94  | איור 40 : מזהמים שטופלו באמצעות ייצוב/מיצוק באתרים בארה"ב.                       |
| 99  | איור 41 : הגדרת ערכי סף לתוצרים.                                                 |
| 108 | איור 42 : חברת Sectar SA.                                                        |
| 108 | איור 43 : חברת Ludreco SA.                                                       |
| 112 | איור 44 : תרשים סכמתי של האזור המטופל, לפני ואחרי שיקום In-situ.                 |
| 112 | איור 45 : פעולות הערוב בשיקום ייצוב/מיצוק In-situ מתחת לכבל אופטי פעיל.          |
| 113 | איור 46 : מבנה אופייני של קרקע מטופלת באמצעות ייצוב/מיצוק In-situ.               |
| 114 | איור 47 : עומסים פנימיים וחיצוניים היכולים להשפיע על הפסולת המיוצבת.             |
| 116 | איור 48 : עבודות שיקום בשטח מזוהם בקיימברידג', ארה"ב.                            |
| 118 | איור 49 : חברת HPC שיקום קרקע בשיטת TMT15-Stabilization.                         |
| 118 | איור 50 : טיפול ייצוב/מיצוק In-Situ חברת Ludreco SA.                             |
| 122 | איור 51 : תהליך טיפול In-situ שבוצע בבריכת ב"ש 2 בשטח חברה לשירותי איכות הסביבה. |

## 1 מבוא

במסגרת היערכות החברה לשירותי איכות הסביבה (להלן: החברה) לשמש כ"זרוע ביצוע" של המדינה לעניין שיקום קרקעות שפוננו או שיפוננו על ידי צה"ל וקרקעות שהוחזקו ו/או מוחזקים על ידי התעשייה הצבאית לישראל בע"מ (רשימת האתרים מפורטת בהמשך), נדרשת הכנתו של דו"ח ניתוח חלופות טכנולוגיות לעניין שיטות הטיפול הקיימות בהם ניתן לעשות שימוש לצורך פרויקט שיקום קרקעות.

סקר הספרות כוללת את שיטות טיפול ומתקני הטיפול הפוטנציאליים עבור כלל המתחמים וכלל החומרים המזהמים המצויים בהם. במסגרת עבודה זו, בוצע סקר ספרות עבור ארבע טכנולוגיות מרכזיות לשיקום קרקעות: טיפול ביולוגי, טיפול תרמי, ייצוב/מיצוק ושטיפת קרקע.

## 2 טיפול ביולוגי

### 2.1 תיאור כללי של הטכנולוגיה

קרקעות מכילות באופן טבעי מיקרואורגניזמים המסוגלים לפרק מזהמים אורגניים – בעיקר בקטריות, פטריות. ביורמדיאציה הוא התהליך בו מזהמים אורגניים מפורקים ע"י מיקרואורגניזמים (מ"א) בתהליכים מטאבוליים, תחת תנאים טבעיים או מבוקרים לתוצרים בלתי מזיקים, או מזיקים פחות, מהמזהם המקורי. מגוון המ"א כולל גם בקטריות אירוביות אובליגטוריות וגם בקטריות הפועלות בסביבות אנאירוביות (כגון קרקעות רוויות). תהליכי ביורמדיאציה יכולים להתבצע על קרקע שנחפרה באתר ייעודי רחוק ממקום הזיהום (Ex-Situ), באתר הזיהום עצמו (On-Site) או באתר המזוהם ללא הפרה משמעותית של מבנה הקרקע (In-Situ). בניגוד לתהליכי טיפול אחרים אשר מטרתם היא העברת המזהמים מהקרקע אל מדיה ופאזה אחרות להמשך טיפול, בטיפול ביולוגי היתרון המשמעותי הוא פירוק בפועל של הזיהום.

חיידקים הם האוכלוסיה המיקרוביאלית הגדולה והפעילה ביותר בקרקעות. עבור פעילות חיידקים לפירוק מזהמים אורגניים דרושים מקור פחמן (לרוב, הזיהום האורגני עצמו), מקבל אלקטרונים סופי (עבור חיידקים ארוביים חמצן, ועבור חיידקים אנאירוביים תרכובות אחרות כגון ניטראט וסולפאט) ונוטריאנטים.

ישנם מספר סוגים עיקריים של תהליכים ביולוגיים אפשריים:

פירוק אירובי – התהליך המטאבולי הנפוץ ביותר, והקל ביותר ליישום, המתאים לטווח רחב של מזהמי שמנים ודלקים ומזהמים אורגניים נוספים, כגון חומרי נפץ. פירוק אירובי הוא היעיל ביותר מבחינה אנרגטית ועל כן רוב השיטות לטיפול בזיהומים אורגניים בשיטה ביולוגית מיועדות לעודד את התהליך האירובי באמצעות יצירת התנאים המתאימים עבורו. קצב הטיפול בתהליך אירובי הוא מהיר יחסית לתהליכים אחרים.

פירוק אנאירובי – פעילות מטאבולית בתנאי חוסר חמצן, בהם תרכובות אחרות משמשות כמקבל אלקטרונים סופי. טיפול ביולוגי בקרקעות באמצעות תהליכים אנאירוביים פחות נפוץ, והוא משמש למשל כאחד מהשלבים בפירוק מזהמים אורגניים מוכלרים קשי פירוק, ובתהליכי חיזור של סולפאט וניטראט.

קו-מטבוליזם – ישנם תהליכים ביולוגיים בהם זני חיידקים מסוימים מבצעים פירוק של מזהם שלא על מנת לקבל ממנו אנרגיה או פחמן, אלא כתהליך נלווה לפעילות המטאבולית שלהם. תהליכים אלו מורכבים לתפעול ופחות נפוצים.

על מנת שמזהם אורגני יוכל להתפרק ע"י מ"א בתהליך ביורמדיאציה חייבים להתקיים שלושה תנאים:

- המזהם חייב להימצא בפאזה מומסת על מנת להיות זמין לפעילות המטאבולית של המ"א. מזהם אשר נוטה להיות מומס בתמיסת הקרקע הוא מזהם בעל זמינות ביולוגית גבוהה לפירוק, ואילו מזהם אשר נוטה להיות ספוח לקרקע אינו יכול להתפרק בצורה יעילה באמצעות מטבוליזם של מ"א כתוצאה מזמינות ביולוגית נמוכה. היספחות לקרקע של מזהמים עשויה לעכב את פירוקו, ואף

להגביל את זמינותו בצורה מוחלטת כתוצאה מהתיישנות (Aging) של קשר הספיחה ההופכת אותו לחזק ועמיד יותר.

- הקרקע חייבת להכיל אוכלוסייה משמעותית ופעילה של חיידקים אשר מסוגלים לנצל את המזהם לצרכים המטאבוליים שלהם.
- התנאים בקרקע צריכים להיות כאלו אשר תומכים בפעילות ביולוגית משמעותית – חמצן (בפירוק אירובי), לחות, טמפ', pH, נוטריאנטים זמינים וכד'.

כל גורם אשר ישפיע על היתכנותם ועל איכותם של אחד משלושת התנאים האלו ישפיע על יעילות הפירוק הביולוגי הכוללת. גורמים אלו יכולים להיות קשורים במאפייני הזיהום עצמו, במאפייני הסביבה הביוטית והא-ביוטית של הקרקע ובמאפייני טכנולוגיית הטיפול עצמה. לכן, במהלך בחירת שיטת הטיפול יש לתת דגש לצורה בה הטכנולוגיה וצורת יישומה נותנות מענה לשיפור גורמים אלו, ולתנאים הסביבתיים בהם היא תפעל.

להלן הגורמים מרכזיים אשר משפיעים על היכולת לבצע טיפול ביולוגי יעיל ועל משמעותיות תפעוליות של הגורמים השונים :

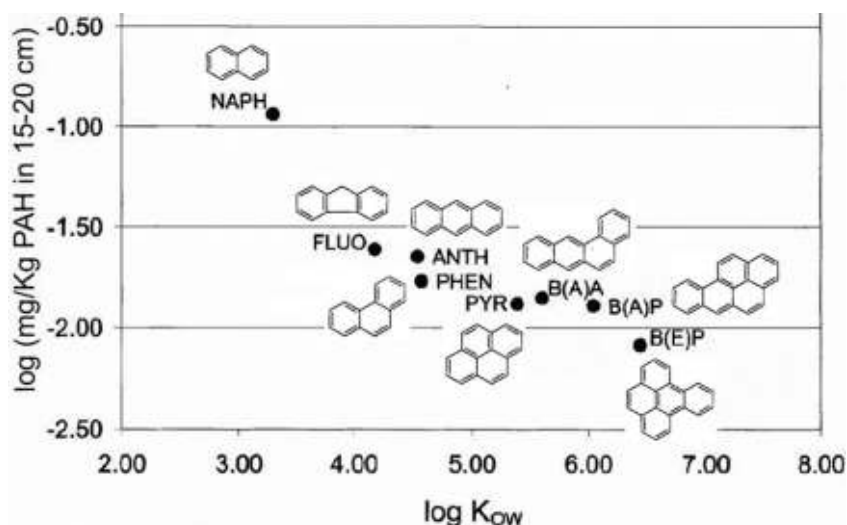
### 2.1.1 הרכב הזיהום

העמידות של מולקולות מזהמים אורגניים בפני פירוק ביולוגי עולה בצורה לוגריתמית עם העלייה במשקל המולקולרי שלהן (מספר הפחמנים), עם העלייה בכמות ההסתעפויות (מולקולה לינארית לעומת מולקולה גלובולרית), עם העלייה בכמות הטבעות (מולקולה אליפטית לעומת מולקולה ארומטית) ועם העלייה במספר ההתמרות של הלוגנים על גבי המולקולה. דוגמאות לכך ניתן לראות באיור 1. העלייה בעמידות לפירוק הביולוגי נובע גם מירידה במסיסות, וגם מהקושי של האנזימים המופרשים ע"י החיידקים לגשת מבחינה מרחבית אל מולקולות גדולות, מסועפות ובעלות כמות גדולה של קשרים כפולים. פחמימנים כבדים יותר פחות זמינים לפעילות ביולוגית ולכן מתפרקים בזמנים ארוכים יותר. איור 2 מסכם את סוגי השמנים והדלקים השונים ואת מידת הזמינות שלהם לפירוק ביולוגי מהיר.

במהלך שלבי התכנון של טיפול ביולוגי ישנה חשיבות גדולה לאפיון כימי של המזהמים לפי תכונותיהם, על מנת לאמוד את הזמינות של המזהמים לפירוק ביולוגי ועל מנת לאפשר לגזור זמני טיפול משוערים. הפילוג של המזהמים האורגניים לפרקציות לפי סוג ומשקל מולקולרי חשוב גם לקביעת פרמטרים תפעוליים שונים. ריכוזים משמעותיים של מזהמים נדיפים אשר עלולים להתנדף אל האוויר בכמויות משמעותיות במהלך אזור הקרקע יצריכו מערכות לאיסוף וטיפול בגזים לאורך שלבי הטיפול.

גם לאורך הטיפול הביולוגי ישנה חשיבות לאפיון זה, על מנת לעקוב אחרי השתנות תכונות המזהם. עם התקדמות הטיפול מולקולות גדולות מתפרקות למולקולות קטנות יותר, ומעקב אחר הפרקציות השונות מאפשר גם לעקוב אחר המנגנונים של הפחתת הזיהום ולהבחין בין מנגנון של פירוק ביולוגי לבין מנגנון של נידוף פרקציות קלות. ככל שהפחמימנים קצרים יותר הנידוף הופך למנגנון הרחקה משמעותי יותר, בעיקר במהלך טיפול Ex-Situ אינטנסיבי.

חשוב לבצע אנליזות מעבדה אשר נותנות מידע לגבי פילוג הזיהום לפי משקל מולקולרי, ופילוג לפי תרכובות אליפטיות/ארומטיות במיוחד בשלבים הראשונים של הטיפול, או בשלבי פיילוט, ובתדירות משתנה לאורך הפרויקט בהתאם להטרוגניות של הקרקע.



**איור 1:** גרף המתאר את מידת ההידרופוביות ( $K_{ow}$ ) של מולקולות PAH השונות כתלות בכמות הטבעות הארומטיות במולקולה ובצפיפותן. ניתן לראות עליה בהידרופוביות (ועל כן - ירידה במסיסות) ככל שמולקולת ה-PAH מכילה טבעות רבות וצפופות יותר.

| Biodegradability | Example Constituents                                         | Products In Which Constituent Is Typically Found                                                                                                |
|------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| More degradable  | n-butane, n-pentane,<br>n-octane<br>Nonane                   | <input type="radio"/> Gasoline<br><input type="radio"/> Diesel fuel                                                                             |
|                  | Methyl butane,<br>dimethylpentenes,<br>methyloctanes         | <input type="radio"/> Gasoline                                                                                                                  |
|                  | Benzene, toluene,<br>ethylbenzene, xylenes<br>Propylbenzenes | <input type="radio"/> Gasoline<br><input type="radio"/> Diesel, kerosene                                                                        |
|                  | Decanes<br>Dodecanes<br>Tridecanes<br>Tetradecanes           | <input type="radio"/> Diesel<br><input type="radio"/> Kerosene<br><input type="radio"/> Heating fuels<br><input type="radio"/> Lubricating oils |
| Less degradable  | Naphthalenes<br>Fluoranthenes<br>Pyrenes<br>Acenaphthenes    | <input type="radio"/> Diesel<br><input type="radio"/> Kerosene<br><input type="radio"/> Heating oil<br><input type="radio"/> Lubricating oils   |

**איור 2:** מידת הזמינות של שמנים ודלקים שונים לפירוק ביולוגי

אקולוג הנדסה בע"מ

### 2.1.2 ריכוז הזיהום

יעילות הטיפול פוחתת עם הגעה לריכוזים נמוכים מאוד של מזהמים עד לנקודה בה הזיהום כבר לא יכול לשמש מקור אנרגיה ופחמן מספק לאוכלוסיה מיקרוביאלית פעילה וגדולה, וקצב הפירוק יורד משמעותית או נעצר לגמרי. לרוב, אחוזי ההפחתה של זיהום אורגני בקרקע בטיפול ביולוגי עומד על 90-95%, והגעה לאחוזי הפחתה גבוהים יותר ידרשו זמן טיפול ארוך מאוד. גם עבור ריכוזים גבוהים מידי של מזהמים קצב הפירוק הוא נמוך, כאשר המזהמים הופכים להיות טוקסיים עבור החיידקים, או נמצאים בפאזה חופשית אשר מגבילה את הזמינות שלהם לתהליך ביולוגי. גם ריכוזים משמעותיים של מתכות עלולים להוות מעכב לפעילות הביולוגית. עיכוב בקצב הפעילות הביולוגית מתחיל כבר בריכוזים של כ-10,000 מ"ג/ק"ג TPH אך השיטה נחשבת ליעילה גם בריכוזים של כ-50,000 מ"ג/ק"ג TPH. השפעות מעכבות של מתכות מתחילות כבר בריכוזים של מעל 2,500 מ"ג/ק"ג.

בקרקות בהן קיים ריכוז מלחים מומסים גבוה במיוחד בתמיסת הקרקע (לאו דווקא מזהמים סביבתיים עם ערך סף מוגדר), עלול להיווצר עיכוב בפעילות הביולוגית כתוצאה מלחים אוסמוטיים גבוהים הפוגעים במיקרו-אורגניזמים. ישנם זני חיידקים המבצעים פירוק ביולוגי של מזהמים גם במים מליחים בריכוזים של 2.5%-3.5%, ובריכוזים גבוהים מכך יש לבצע בדיקות התכנות לטיפול ביולוגי באמצעות ניסוי מעבדתי או חצי חרושתי.

### 2.1.3 מרקם הקרקע

אפיון המרקם של הקרקע המזוהמת נחוץ על מנת לתכנן את הטיפול מכיוון שהוא הגורם המרכזי בתפעול פרמטרים רבים. מרקם הקרקע משפיע על תכולת הרטיבות, על הפרמיאביליות של אוויר ושל מים, על ריכוזי החמצן, על המשקל הסגולי ועוד. קרקעות חרסיות קשות יותר לאוורור בגלל פרמיאביליות נמוכה ובגלל הנטייה ליצור גושי קרקע גם בתכולת רטיבות נמוכה. כתוצאה מכך גם קשה יותר לפזר תוספים בצורה הומוגנית בקרקעות חרסיות. זמינות המזהם לפעילות מיקרוביאלית נמוכה יותר בקרקעות חרסיות אשר נוטות לספוח מזהמים בצורה משמעותית בהשוואה לקרקעות חוליות. בנוסף, ישנו קושי להוסיף מים לקרקעות חרסיות יבשות מידי, בשל האטמות הקרקע והקושי בערבוב, ובמקרה של קרקעות חרסיות עם אחוזי רטיבות גבוהים מידי הניקוז והאידיוי הטבעי הוא איטי מאוד. מרקם הקרקע מגדיר גם את סוג וכמות חומרי הנפח (כמוגדר בסעיף 2.1.9) שיש להוסיף על מנת לשפר את התכונות המועילות לפעילות ביולוגית. בגמר הטיפול הביולוגי מרקם הקרקע אינו משתנה, פרט לשבירת אגריגטים כתוצאה מערבוב מכאני ופרט לחומרים הנפחיים אשר הוטמעו בה.

### 2.1.4 טמפרטורה

קצב המטבוליזם הביולוגי של חיידקים מושפע מאוד מהטמפר' בה הם נמצאים. פירוק של מזהמים ביולוגיים באמצעות מ"א יכול להתבצע בטווח רחב מאוד של טמפר' - מחקרים הראו פעילות פירוק ביולוגי קרוב ל-0 מעלות צלזיוס, והאנזימים של פטריות מסוימות פועלים ביעילות גבוהה דווקא גם בטמפר' של כ-50 מעלות צלזיוס ואף מעל ל-75 מעלות צלזיוס. פעילות מקסימלית של חיידקים תרמופיליים המפרקים פחמימנים מתרחשת בכ-35-45 מ"צ. פעילות פירוק אירובית הינה פעילות אקסותרמית הפולטת חום, ובשיטות טיפול



הכוללות ערימות קרקע בעלות שטח פנים קטן יחסית, החום מצטבר בקרקע ומעלה את הטמפרטורה שלה, דבר המביא להגברת קצב הפירוק הביולוגי. פעילות אוכלוסיית המ"א בקרקע בשיטות הטיפול השונות מושפעת מאוד מטמפרטורה הסביבה. בעונות השנה הקרות כאשר טמפרטורה הקרקע בסביבות ה-15 מ"צ ומטה, יש לצפות להמצאות בטווחי טמפרטורה בהם הפירוק אינו יעיל לאורך שבועות ארוכים.

ניטור הפער בין טמפרטורה הסביבה לטמפרטורה הקרקע בה מתקיים הטיפול הביולוגי הוא אמצעי למעקב אחר היקף הפעילות הביולוגית. פעולות של ערבוב קרקע הנמצאת בטיפול ביולוגי וחשיפתה לאוויר מהסביבה מורידות את הטמפרטורה שלה כתוצאה מפליטת חום החוצה, ויש לוודא שהדבר נעשה בתדירויות הנדרשות וטמפרטורה עבודה אופטימליות נשמרות לאורך כמה שיותר זמן ממשך הטיפול. טמפרטורה קרקע – ניטור טמפרטורה קרקע חשוב בכדי לבדוק את הפרש הטמפרטורה בינה לבין הטמפרטורה הקרקע המטופלת. מדידת טמפרטורה קרקע צריכה להתבצע בקרקע נקיה מזיהום, בעלת מאפיינים דומים לקרקע המטופלת מבחינת מרקם ואחוזי לחות, ובסמוך למדידת הטמפרטורה בקרקע המטופלת.

#### 2.1.5 ריכוז חמצן

התהליך היעיל ביותר של פירוק פחמימנים בפעילות ביולוגית הוא פירוק אירובי. פירוק אנאירובי קיים, אך הוא יעיל פחות מבחינת אנרגטית ועל כן אוכלוסיית החיידקים המבצעת אותו לרוב זניחה בקרקעות מזוהמות אשר נמצאות בתאים מאווררים. תנאים אנאירוביים נוצרים בקרקעות כאשר זיהום אורגני מתפרק בתהליכים אירוביים וקצב צריכת החמצן גבוה מקצב האוורור וההעשרה בחמצן חדש. על כן, טכנולוגיית הטיפול נדרשת לדאוג להכנסת כמות מספקת של חמצן אל הקרקע על מנת לאפשר פעילות אירובית יעילה. ישנם גורמים אשר מקשים על יצירת תנאים אירוביים, כמו למשל אזורים בעלי ריכוז מזהמים גבוה במיוחד אשר צריכת החמצן בו היא גבוהה, קרקעות רוויות במים אשר לא משאירים מקום לפאזה גזית בחללים שבין חלקיקי הקרקע וקרקעות חרסיות אשר יוצרות גושי קרקע אטומים אשר אינם מתאווררים בצורה יעילה מספיק. ניטור ריכוז החמצן בקרקעות מטופלות יכול להתבצע ע"י התקנת נקודות שאיבת גזים במקומות מייצגים המחוברות למד חמצן.

#### 2.1.6 pH

בתהליכי טיפול ביולוגי יש לשמור על pH של 6-8 על מנת לספק תנאים אופטימליים לפעילות האנזימטית של המ"א מפרקי הפחמימנים. פעילות האנזימים עלולה להשתבש בערכי pH קיצוניים אשר ישנו את מצב היינון של הקבוצות הפונקציונליות שלהם. לעיתים קרובות קרקעות המזוהמות בדלקים ממקור תעשייתי מכילות גם זיהום תעשייתי של חומצות, בסיסים, תשטיפים של פסולת בניין או מזהמים אחרים אשר יוצרים תנאי pH אשר מעכבים את הפעילות הביולוגית. קרקעות ובוצות חומציות או בסיסיות מידי יצטרכו לעבור טיפול קדם של ייצוב pH לפני הטיפול הביולוגי, וגם במהלך הטיפול הביולוגי יש להמשיך ולנטר את רמת החומציות, במיוחד עם נעשה שימוש נרחב בתוספים ובחומרים נפחיים. ישנם מחקרים המראים על פעילות מיקרוביאלית גם בתנאים אלו של קרקעות בסיסיות או חומציות אך היא מוגבלת מאוד.

### 2.1.7 זמינות חומרי הזנה (נוטריאנטים)

מעבר לצורך בפחמן, אשר מסופק ע"י המזהם האורגני עצמו, דרושים נוטריאנטים נוספים לבניית תאים עבור המ"א, בעיקר חנקן וזרחן. יתכן שהקרקע מכילה כבר את הכמות הדרושה של הנוטריאנטים, אבל כתלות במקור הקרקע ובאופי הזיהום, יהיה צורך בתוספים לאורך זמן הטיפול. גם אם יש כמות נוטריאנטים מספיקה בקרקע, שמירה על יחסים מומלצים של נוטריאנטים מאפשר זמינות גבוהה של נוטריאנטים לתהליך גדילת האוכלוסיה המיקרוביאלית בקרקע ועל כן מאיץ את פעילות הפירוק. יחסי C:N:P תאורטיים מחושבים על בסיס מבנה של הביומסה של אוכלוסיית המ"א הפעילה. כתלות בסוג הפעילות הביולוגית בקרקע היחסים האידיאליים של C:N:P הם בטווח של 100:1:0.5 – 100:10:1. במקרים מסוימים שמירה על יחסים שונים בין הנוטריאנטים יכולים לסייע בעידוד סוג מ"א מסוימים על פני אחרים. ריכוזים גבוהים מידי של נוטריאנטים עלולים לגרום להיווצרות תרכובות טוקסיות ולעכב את הפעילות הביולוגית. שימוש בתוספי קרקע המכילים נוטריאנטים בצורה המאפשרת שחרור איטי שלהם אל הקרקע יעזרו לשמור על רמות נוטריאנטים רצויות לאורך זמן. הוספת נוטריאנטים לקרקע יכולה גם לשנות את ה-pH בקרקע ויש לנטר פרמטר זה במקביל להוספתם.

### 2.1.8 תכולת רטיבות בקרקע

מיקרואורגניזמים וכל התהליכים המטאבוליים שלהם מתקיימים בסביבה לחה, ועל כן יש לשמור על אחוזי רטיבות מתאימים לאורך הטיפול. עם זאת, אחוזי רטיבות גבוהים מקטינים את נפח החללים הפנוי בקרקע היכול להכיל אוויר והופכים את הקרקע לאנאירובית. אחוזי הרטיבות האידיאליים משתנים בין קרקע לקרקע ולפי אופי תהליך הטיפול, אך תכולת הרטיבות האידיאלית לפעילות ביולוגית בקרקע נחשבת בטווח של 40%-85% מתכולת המים בקרקע במצב של קיבול שדה. לאורך הטיפול תכולת הרטיבות יכולה לרדת כחלק מתהליך אידוי מוגבר כתוצאה מאוורור הקרקע ועליית הטמפר' כחלק מהתהליך הביולוגי האקסותרמי. הוספת מים לקרקע צריכה להתבצע בצורה מבוקרת, כך שהמים יחדרו את כל חלקי הקרקע. במקרה של קרקעות חרסיות ישנה האטמות בזמן הוספת מים ויש צורך בערבוב מבוקר על מנת להחדיר את המים לקרקע מצד אחד ולמנוע היווצרות גושים מצד שני. בעונות גשומות יש צורך בכיסוי הערימות על מנת למנוע מצב של קרקע רוויה במים ללא חמצן. תכנון הטיפול הביולוגי צריך לקחת בחשבון ניקוז, איסוף וטיפול בתשטיפים מהקרקעות העלולים להכיל מזהמים מומסים. תשטיפים מקרקעות עם עודף מים יכולים לשמש בסחרור להרטבה מחדש של קרקעות יבשות.

### 2.1.9 תוספות לקרקע

גם בטיפול Ex-Situ וגם בטיפול In-Situ ניתן להוסיף לקרקע תוספים במטרה לשפר את תכונותיה הפיסיות והכימיות, לשנות את תכונות המזהמים או את תכונות האוכלוסייה המיקרוביאלית. הרכב התוספים והכמות נקבעים לרוב בשלבים הראשוניים של בחינת ההיתכנות לטיפול או בשלבי פיילוט שונים, ונבדקים באופן רציף לאורך הטיפול, בתדירות התלויה בהטרוגניות הקרקע ובהצלחת הטיפול. ניתן לבצע את ערבוב הקרקע עם התוספים השונים באמצעים שונים. בטיפול Ex-Situ הטמעת תוספים בערימות הטיפול קלה יחסית באמצעות מתקני גריסה וערבוב המכילים תאים להזנת קרקע וסוגי תוספים שונים. יש להתאים את מבנה התאים,

מערכות השקילה, והמסועים למרקם הקרקע ולמרקם התוספים. שימוש בכלי צמ"ה או בכלים חקלאיים מאפשר תפעול פשוט וזמין ללא הקמת מתקנים, אך לרוב יהיה קשה להשיג ערבוב יעיל והגעה להומוגניות [איור 3]. In-Situ הכנסת תוספים אפשרית באמצעות בארות הזרקה לקרקע, אך תהליך זה מורכב יותר בשל מגבלות פרמיאביליות הקרקע, הטרוגניות הקרקע, או בשל הצורך להגיע לשכבות קרקע עמוקות.

- **חומרים נפחיים** – על מנת לשפר את המרקם של קרקעות חרסיות כך שיהיה מאוורר יותר, או על מנת ליישב ולהקנות יציבות לקרקעות ובוצות עם אחוזי רטיבות גבוהים, ניתן לערבב עם הקרקע המטופלת עם חומרים נפחיים (Bulking materials). חומר נפחי יכול להיות גזם קצוץ, שבבי עץ, חצץ, חול, וכדומה. ישנם חומרים נפחיים שיכולים לתרום לקרקע גם נוטריאנטים – פסולת עופות, קומפוסט פטריות ועוד.
- **חומרים פעילי שטח** – להגדלת הזמינות הביולוגית של המזהמים הספוחים בנישות הידרופוביות.
- **ביו-אוגמנטציה** – רוב תהליכי הטיפול הביולוגיים עושים שימוש באוכלוסיה המיקרוביאלית הקיימת בקרקע, ומספקים לה את התנאים האופטימליים על מנת שתוכל לגדול ולפרק מזהמים בקצב גבוה. במקרים מסוימים האוכלוסיה המיקרוביאלית הטבעית אינה מספיקה בכדי לעמוד ביעדי הטיפול הנדרשים - מבחינת כמות החיידקים או התאמת סוג החיידקים לסוג הזיהום. במקרים אלו ניתן להשתמש בתוספים של תרביות חיידקים מרוכזות. ייתכן שיספיקו מספר "זריעות" חיידקים בתחילת תהליך הטיפול ולאחר מכן האוכלוסייה תקלט ותחזיק מעמד לאורך כל הטיפול, אך במידה והתנאים הפיזיים והכימיים בקרקע בעייתיים, ידרשו מחזורי זריעה לאורך כל משך הטיפול. שימוש בתוספים אלו מחייב בדיקות מיקרוביאליות תדירות על מנת לוודא את מידת הקליטה של החיידקים ואת מידת פעילות הביולוגית על מנת לתזמן זריעות נוספות במידת הצורך.



**איור 3:** ערבוב סדימנט מזוהם מנחל הקישון עם גזם כחומר נפחי באמצעות כלי צמ"ה וכלים חקלאיים.

## 2.1.10 אוכלוסיה מיקרוביאלית

יש מספר דרכים על מנת להעריך את כמות ואת אופי הפעילות של האוכלוסיה המיקרוביאלית בקרקע:

- ספירת חיידקים - קרקעות טבעיות מכילות בדרך כלל  $10^4$ - $10^7$  CFU לגר', ותוצאות של פחות מ- $10^3$  מעידות על ריכוזים טוקסיים של זיהום אורגני או זיהום במתכות או מעכבים אחרים בקרקע. ספירת

חיידקים כללית יכולה לתת מידע על המידה בה התנאים בקרקע מתאימים לפעילות ביולוגית, אך לאו דווקא על כמות החיידקים המסוגלים לבצע פירוק ביולוגי של מזהמים אורגניים בפועל. ספירת חיידקים הטרו-טרופים תשמש לאפיון כמות החיידקים אשר עושים שימוש במקור פחמן חיצוני, ורלוונטים לפירוק ביולוגי של מזהמים אורגניים. ביצוע ספירת חיידקים ספציפית לזנים מסוימים של חיידקים הידועים כיעילים בפירוק מזהמים כאלו או אחרים יכולה להוות אינדיקציה ספציפית להתכנות ולקצב הפירוק הצפוי, ושימושית במקרים בהם דרושה בדיקת התכנות או מעקב אחר סבבים של זריעת זני חיידקים.

- בדיקות נשימה – בדיקות נשימה מודדות את היקף פעילות הנשימה של חיידקים בתנאים אירוביים. הבדיקה מתבצעת במעבדה ומודדת את כמות החמצן או את כמות הפחמן הדו חמצני הנפלט בזמן הדגרה של כמות קרקע מסוימת לאורך זמן מוגדר ובטמפרטורה קבועה. קיימות מספר רב של דרכים ושיטות אנליטיות לבדיקת נשימה חיידקית בקרקע, אך יש לבחור בשיטה המאפשרת תנאים דומים ככל הניתן לתנאי השטח של הטיפול הביולוגי (ולא, למשל, בדיקה בתרחיף קרקע או בתוספת נוטריאנטים). מכיוון שהיקף הפעילות הביולוגי תלוי גם באופי האוכלוסייה המיקרוביאלית וגם בכמות וזמינות המזהם לפירוק, הבדיקה נותנת אינדיקציה טובה למגמות של הפירוק הביולוגי בפועל לאורך שלבי הטיפול השונים.

#### 2.1.11 טיפול קדם

בטיפול ביולוגי Ex-Situ, ניתן לבצע טיפול קדם שונים על מנת לתת לקרקע אשר נחפרה את התכונות האופטימליות לתהליך הביולוגי, כך שיהיה יעיל, מהיר ושיג את ערכי היעד. כתלות בתכונות הקרקע ידרשו הטיפול הבאים:

- **ניפוי גס של פסולת בניין ואבנים\סלעים** – הניפוי נעשה בדרך כלל באמצעות כלי צמ"ח עבור פסולת בניין, או באמצעות נפות/טרומלים מכאניים בגדלים שונים.
- **הומוגניזציה** – על מנת להגיע למרקם אחיד ככל האפשר נעשה שימוש בצידוד ריסוק לריסוק גושי קרקע, וערבוב באמצעות כלים חקלאיים.
- **ייבוש** – לפני הטיפול בבוצות או בקרקעות עם אחוזי רטיבות גבוהים, נעשה ייבוש באמצעות סחיטה בטכנולוגיות Filter-Press, Belt-Press, צנטריפוגה וכד', או באמצעות ערבוב עם חומר נפחי יבש ועוד. שימוש במתקני סחיטה מתאים יותר לבוצות או לקרקעות מעל למצב רוויה (Slurry), בעוד שערבוב עם חומר נפחי מתאים יותר לקרקעות חרסיות אשר דורשות הפחתה באחוז הלחות.
- **ערבוב עם חומר נפחי** – ערבוב עם גזם קצוץ, שבבי עץ, חצץ, חול, וכדומה, לקבלת מרקם מאוורר. מרקם מאוורר נדרש על מנת לתמוך בפעילות ביולוגית אירובית גם בקרקעות חרסיות הנוטות ליצור גושי קרקע אשר הופכים לאנאירוביים. הערבוב נעשה באמצעות כלים חקלאיים, כלי צמ"ח, או במתקני ערבוב ייעודיים. טיפול זה משמעותי מאוד בעיקר כאשר נעשה שימוש באוורור מאולץ בערימות טיפול סטטיות.

- **וויסות pH** – הוספת חומרים מווסתי חומציות לתהליך הערבוב בהתאם לצורך בתיקון pH לרמות ניטרליות בבוצות תעשייתיות או בקרקעות עם זיהום תעשייתי חומצילבסיסי.

## 2.2 ניטור ובקרה

**בטבלה 1** ניתן לראות סיכום של הפרמטרים המרכזיים אותם יש לנטר במהלך טיפול ביולוגי בקרקעות מזוהמות, על מנת לבצע בקרה על היקף הפעילות הביולוגית, על התנאים בקרקע אשר עלולים להגביל את פירוק המזהמים ועל קצב ואופי ההפחתה בריכוזם.

**טבלה 1:** פרמטרים מרכזיים לניטור במהלך הבקרה על תהליך טיפול ביולוגי

| פרמטר                      | מטרת הניטור                                                                                                                  | אמצעי ניטור                                                                                                                                                                                                  |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ריכוז והרכב המזהמים</b> | ניטור תכונות המזהמים לפני תחילת הטיפול לצורך התאמת תנאי הטיפול, ובמהלכו על מנת לבקר את התהליך ולבצע מעקב אחר מגננוני ההפחתה. | בדיקות מעבדה המתבססות על דיגום מייצג של התהליך לפני הטיפול, במהלך הטיפול ולאחר סיומו. עבור מזהמי דלקים ושמנים – שימוש בשיטת TPH-CWG עם חלוקה לפרקציות לפי מספר פחמנים ולפי חלוקה לחומרים אליפטיים וארומטיים. |
| <b>מרקם הקרקע</b>          | גורם תפעולי מרכזי המשפיע על יכולת לאוורר את הקרקע, על תכולת הרטיבות, על זמינות המזהמים לפירוק ועוד.                          | בדיקות מעבדה גיאומכניות של דירוג קרקעות, בדיקות שדה אינדיקטיביות.                                                                                                                                            |
| <b>טמפרטורה</b>            | מעקב אחר היקף הפעילות הביולוגית האירובית, שליטה בקצב היפוך ואוורור הקרקע.                                                    | ניטור ערימות הטיפול בהשוואה לטמפי' הרקע בקרקע נקיה ממזהמים ובעלת מאפיינים דומים.                                                                                                                             |
| <b>ריכוז חמצן</b>          | בקרה על זמינות החמצן הדרוש לפעילות פירוק אירובית.                                                                            | נקודות שאיבת גזים במקומות מייצגים המחוברות למד חמצן.                                                                                                                                                         |
| <b>pH</b>                  | בקרה על התנאים המאפשרים פעילות ביולוגית אופטימלית.                                                                           | ניטור תדיר במיוחד במהלך הוספת תוספים.                                                                                                                                                                        |
| <b>חומרי הזנה</b>          | בקרה על המצאות וזמינות חומרי הזנה הדרושים לפעילות ביולוגית.                                                                  | בדיקות מעבדה מייצגות לאורך הטיפול, לפני ואחרי הטמעת תוספים בקרקע.                                                                                                                                            |
| <b>תכולת רטיבות</b>        | שמירה על אחוזי רטיבות המתאימים לפעילות ביולוגית ולאספקת חמצן לתהליכים אירוביים.                                              | בדיקות מעבדה מייצגות לאורך הטיפול.                                                                                                                                                                           |
| <b>ספירת חיידקים</b>       | קבלת מידע על המידה בה התנאים בקרקע מתאימים לפעילות ביולוגית                                                                  | בדיקות מעבדה מייצגות לאורך הטיפול.                                                                                                                                                                           |
| <b>בדיקות נשימה</b>        | היקף פעילות הנשימה התאית של חיידקים בתנאים אירוביים לאפיון היקף הפעילות הביולוגית.                                           | בדיקות מעבדה מייצגות לאורך הטיפול.                                                                                                                                                                           |

## 2.3 שיקולים סביבתיים

- במהלך טיפול אינטנסיבי בזיהום מדלקים, הכולל אוורור בדרכים שונות, הפרקציות הקלות הנדיפות (VOCs) צפויות להתנדף בקצב מואץ, לפני שהן יתפרקו בתהליך הביולוגי. בהתאם לסוג הטיפול ולאופי המזהם, יש לבדוק את ריכוז המזהמים הנדיפים בקרקע, ולדאוג לאיסוף, טיפול וניטור לפני שחרורם לסביבה, ע"פ התקנים לאיכות אוויר הנדרשים. הטיפול יכול להתבצע ע"י כיסוי ערימות טיפול, שימוש במערכות שאיבה לגזים, והעברת המזהמים הנדיפים למערכת טיפול בגזים (מצע ביולוגי, פחם פעיל, טיפול תרמי וכד').
- בטיפול Ex-Situ, בזמן חורף, או במקרה של קרקעות רוויות, יש צורך לקיים את כל תהליך הטיפול על גבי משטחים מבודדים ואטומים [איור 4], עם מערכות לניקוז וטיפול בתשטיפים. באיור 5 ניתן לראות מערכות ניקוז על גבי יריעות HDPE שהותקנו בפרויקט שיקום קרקעית נחל הקישון.
- ערימות קרקע מטופלת החשופות לרוחות עלולות לייצר זיהום חלקיקי. בימים עם רוחות משמעותיות יש לוודא שהערימות מכוסות, או נמצאות בתכולת רטיבות כזו אשר מקטינה משמעותית את המפגע הפוטנציאלי.
- פירוק מזהמים ביולוגי יכול להגיע לתוצרים הסופיים הרצויים - פחמן דו-חמצני ומים, אך כאשר התהליך אינו מתקיים בצורה מלאה ויעילה נוצרים תוצרי ביניים אשר עלולים להיות רעילים יותר מתרכובות המקור שלהם. בדיקות של ריכוזי תוצרי פירוק אלו לאורך הטיפול חשובות על מנת לזהות הצטברות שלהם בקרקע.
- פעילות פירוק אירובית יכולה לשנות את צורה האניונית של מתכות. כאשר יש זיהום אורגני מעורב עם זיהום מתכות משמעותי יש לקחת בחשבון את המצב הסופי של המתכות בקרקע מבחינת זמינותה לסביבה.
- כאשר נעשה שימוש בתוספים כלשהם בקרקע – חומר נפחי, חומרים פעילי שטח, חומרים לייצוב pH, תוספי נוטריאנטים, וכד' – יש לוודא שהחומרים אינם מהווים זיהום בעצמם, פריקים ביולוגית או חסרי השפעה מזיקה לסביבה, ואינם מגבילים שימוש חוזר או מיחזור של הקרקע לפתרונות הקצה השונים.
- יש לוודא שהשימוש בחומר נפחי נעשה בכמויות קטנות ככל הניתן, רק עד להגעה למרקם הקרקע הרצוי, ולא יותר מכך. שימוש עודף בחומר נפחי יוצר מיהול של הקרקע ומתקבל הפחתה בריכוז המזהמים שלא כתוצאה מפירוקם, והם ממשיכים להוות מפגע סביבתי בנפח קרקע גדול יותר.
- בטיפול ביולוגי Ex-Situ, בהובלת הפסולת מחוץ לאתר, לעיתים דרך שטחים ציבוריים ו/או בכבישים ראשיים, עלולה לגרום למטרדים סביבתיים רבים הכוללים רעש, אבק, ריחות, שפיכה בלתי מכוונת של הפסולת ממשאיות, עומסי תנועה ועוד. בנוסף, ישנם סיכונים פוטנציאליים נוספים העלולים להיגרם בעת הובלת חומרים מסוכנים.
- בעת תכנון שימוש בקרקע מטופלת באתר מסוים יש לקחת בחשבון את שיקולים הבאים: שימוש חוזר באתר, פיתוח מחודש של האתר לשימוש הקהילה, שימושי קרקע עתידיים באתר, שיתוף הקהילה במידע אמיתי, מדויק, ובפורמט פשוט והכנת תכנית מגירה למקרי חירום.





**איור 4:** הקמת משטחי טיפול ביולוגי על גבי יריעות HDPE אטומות בפרויקט שיקום קרקעית נחל הקישון



**איור 5:** מערכות ניקוז על גבי יריעות HDPE (בהקמה) שהותקנו בפרויקט שיקום קרקעית נחל הקישון

## 2.4 יתרונות וחסרונות טיפול ביולוגי

יתרונות :

- טיפול ביולוגי מפרק את המזהמים לתוצרים בלתי מזיקים, בניגוד לתהליכים אחרים אשר רק מעבירים את הזיהום מהקרקע למדיות ופאזות אחרות.
- לא נדרשת השקעה ראשונה להקמת מתקנים מורכבים, אלא נעשה שימוש בכלים זמינים ובמתקנים קטנים פשוטים.
- תפעול הטיפול הוא פשוט יחסית ואינו דורש כמות גדולה של כוח אדם מקצועי.
- נעשה שימוש בתהליכים טבעיים אשר אינם דורשים השקעה גדולה של אנרגיה, פרט לאוורור.

חסרונות :

- בטיפול Ex-Situ נדרש שטח יחסית גדול לפריסת ערימות הטיפול.
- טיפול In-Situ מוגבל בטיפול בקרקעות חרסיות.
- התהליך איטי יותר מטיפולים אחרים, ועלול להתקל בהאטה עונתית של קצב פירוק המזהמים.
- אינו מטפל במתכות.

## 2.5 שיטות טיפול ביולוגי Ex-Situ

### 2.5.1 Land-Farming (מוכר גם כ-Composting, Windrows)

הטיפול כולל פיזור של הקרקע המזוהמת אשר נחפרה בשכבה דקה על פני האדמה, והאצת הפירוק הביולוגי האירובי ע"י אוורור, הוספת נוטריאנטים ושמירה על אחוזי לחות מתאימים. האוורור מתבצע באמצעות כלי תיחוח חקלאיים מכאניים, ועל כן גובה השכבה יכול להגיע עד לכ-40-60 ס"מ, כתלות בסוג המיכון המשמש ל"חרישת" הקרקע. אפשרות נוספת היא בניית ערימות קרקע נמוכות אשר מאווררות ע"י היפוך באמצעות כלים חקלאיים, ואז רוחב הערימה מוגבל לעד כ-2.5 מ' [איור 6]. במידה והזיהום בקרקע אינו עמוק יותר מכ-1 מ', ניתן להשתמש בשיטת ה-Land Farming גם ללא חפירת הקרקע, כלומר הפעלת טיפול In-Situ.

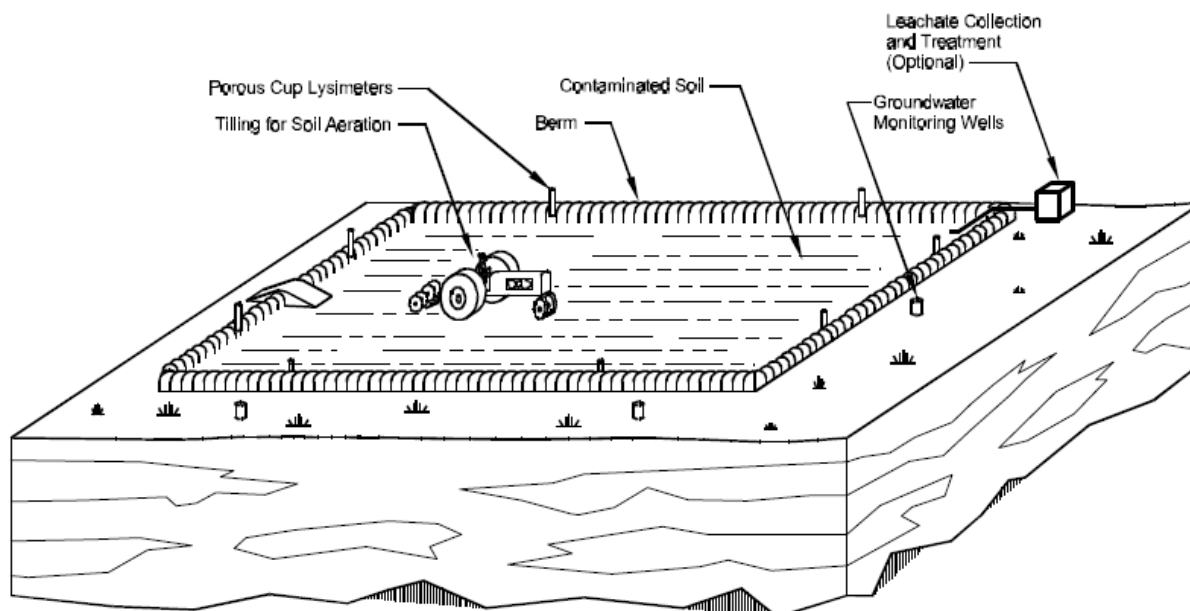
יתרונות השיטה :

- תכנון פשוט
- זמן טיפול קצר יחסית

חסרונות השיטה :

- נידוף מוגבר של VOC
- ייצור מוגבר של אבק
- דורש שטח גדול





איור 6: תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Land-Farming

## 2.5.2 Bio-piles

הטיפול כולל עירום מובנה של הקרקע ועידוד הפירוק האירובי באמצעות אוורור והטמעת תוספים. בשונה משיטת ה-Land-farming בה הקרקע מטופלת בשכבות או בערימות נמוכות של עשרות סנטימטרים בודדים ומאווררת ע"י ערבול והיפוך מכאני, בשיטת Bio-Piles נבנות ערימות גדולות הרבה יותר (גובה של 1-3 מ', עם שיפועים מתונים), ואספקת החמצן לתהליך הביולוגי מתבצעת באמצעות אוורור מאולץ דרך צנרת ייעודית בתוך הערימה. הצנרת המחורצת נפרסת בתוך הערימה והאווריר נכנס כתוצאה מיניקת אוויר או כתוצאה מדחיסת אוויר דרכה. [איור 7, איור 8].

היתרון הבולט בטיפול בערימות Bio-Piles הוא האפשרות לשליטה טובה יותר על הפרמטרים התפעוליים ועל תכונות הקרקע. הערימות הגדולות יחסית הן בעלות שטח פנים קטן ביחס לערימות השטוחות של שיטת ה-land-farming ועל כן מושפעות פחות מתנאי אקלים חיצוניים. החום הנפלט בתהליך הביולוגי מצטבר בצורה אפקטיבית יותר, לא מתפזר באירועי ההיפוך, אלא רק באמצעות האוורור המאולץ. הספיקה של האוויר נתונה לשליטה מלאה בהתאם לצורך, וניתן אף לחמם את האוויר הנכנס לערימות כאשר מדובר בדחיסת אוויר. בנוסף, השליטה על תכולת הרטיבות גבוהה יותר כאשר שטח הפנים של הערימה קטן והיא לא מעורבת בצורה אינטנסיבית. בשל הפעלת מערכת היניקה/דחיסה של אוויר, טיפול בזיהום המכיל כמויות משמעותיות של נדיפים מצריך ניטור, איסוף וטיפול באוויר לפני שחרורו לסביבה.

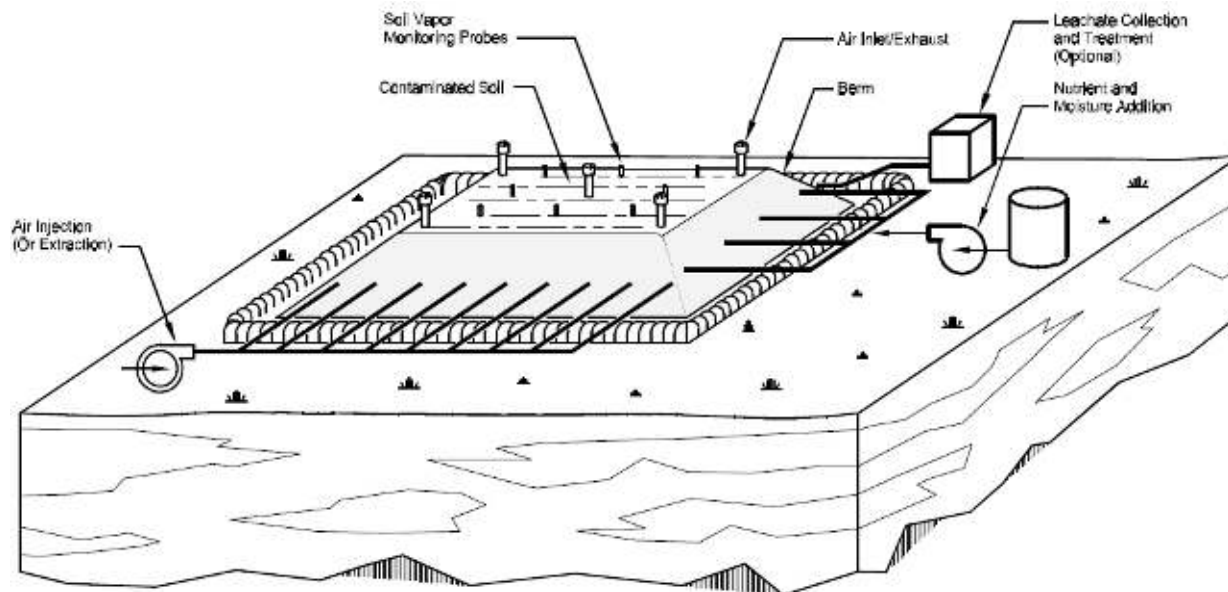
תכנון ותפעול טיפול בשיטת Bio-piles רגיש מאוד לקרקעות חרסיות עם אחוזי רטיבות גבוהים, בשל בעיות בפרמיאביליות ויכולת של החרסית להחזיק מים. בשל כך, במקרים רבים יש צורך להשתמש בכמויות משמעותיות של חומר נפחי.

## יתרונות השיטה :

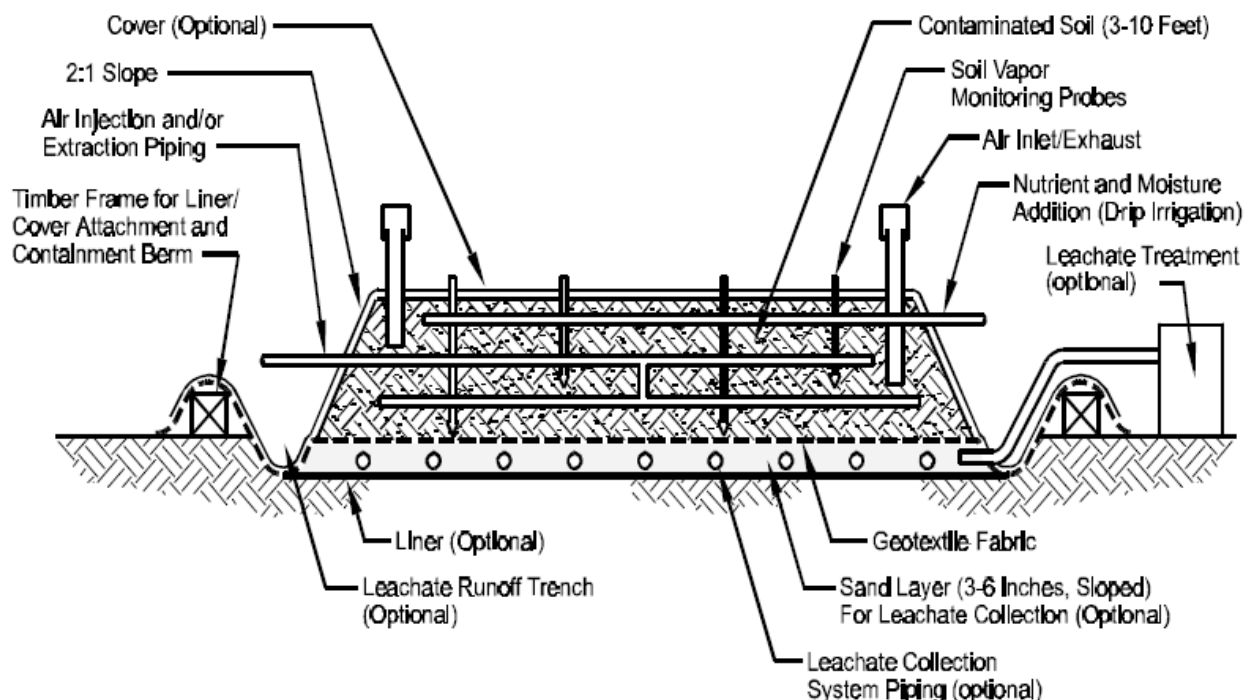
- תכנון ויישום פשוטים.
- זמני טיפול קצרים יחסית.
- אפקטיבי עבור זיהומים בעלי משקל מולקולרי גבוה הדורשים זמני טיפול ארוכים.
- דורש פחות שטח מ-Farm-Land.
- כיסוי ואיסוף גזים מתבצע בצורה נוחה יותר מאשר ב-farm-Land אשר דורש היפוך הקרקע.

## חסרונות השיטה :

- נידוף מוגבר של גזים הדורשים איסוף וטיפול
- לא ניתן לטפל בקרקעות בעלות פרמיאביליות נמוכה לגזים.



**איור 7:** תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Bio-Piles



**איור 8:** תרשים סכמתי מערכת אוורור מאולץ ומבנה ערימה בשיטת Bio-Piles

## 2.6 שיטות טיפול ביולוגי In-Situ

### 2.6.1 Bio-Venting

השיטה עושה שימוש באוכלוסיה המיקרוביאלית בקרקע הלא מופרת, ומספקת לה חמצן ע"י שאיבה/דחיסה של אוויר אטמוספרי, ובמידת הצורך גם באמצעות הזרקת תוספים נדרשים [איור 9]. סוג הקרקע המטופלת חייב להיות כזה אשר יאפשר זרימת אוויר מספקת על מנת לתמוך בפעילות הביולוגית בתת הקרקע. לקרקעות חרסיות יש פרמיאביליות נמוכה ולקרקעות חוליות פרמיאביליות גבוהה. הפרמיאביליות יכולה להקבע בדיוק ע"י אנליזה מעבדתית על מדגם קרקע בלתי מופר, או ע"י הערכה בהתאם לסוג הקרקע המזוהה בלוג קידוח. פרמיאביליות נמוכה מ- $10^{-10}$  סמ"ר נחשבת כלא מאפשרת אספקת אוויר הדרושה לפעילות ביולוגית [איור 10]. בנוסף, יש לבצע בדיקות מקיפות של שכבות הקרקע השונות לכל עומק הטיפול, על מנת לזהות הטרוגניות אשר עלולה לגרום לזרימת אוויר מוגברת באזורים מסוימים על חשבון זרימת אוויר לאזורים אחרים. הצבת בארות השאיבה/דחיסה בסמוך למיקום בו זרימת האוויר צפויה להיות בעייתית יכולה לפצות על כך וליצור אספקת אוויר הומוגנית לכל האזור המטופל. הטיפול ב-Bio-Venting רלוונטי לאזורים בהם פני מי התהום נמצאים לפחות כ-3 מ' מפני הקרקע. באזורים בהם מי התהום גבוהים יותר יש לבצע השפלת מי תהום, או התקנה זהירה של מערכות יניקת האוויר בצורה אופקית.

על מנת לבצע טיפול בתנאים אנאירוביים באמצעות Bio-Venting, המערכת פועלת באותה צורה בדיוק, רק במקום אוויר מוזרים לקרקע גזים אינרטים (למשל חנקן) וריכוז נמוך של מקבלי אלקטרונים סופיים, אשר

יוצרים סביבה מתאימה לתהליכים אנאירוביים. לאחר הפעלת של טיפול אנאירובי, עלולים להצטבר תוצרי פירוק אשר יטופלו בהמשך בצורה מיטבית ע"י החלפת הגזים בחזרה לאוויר ויצירת תנאים אירוביים.

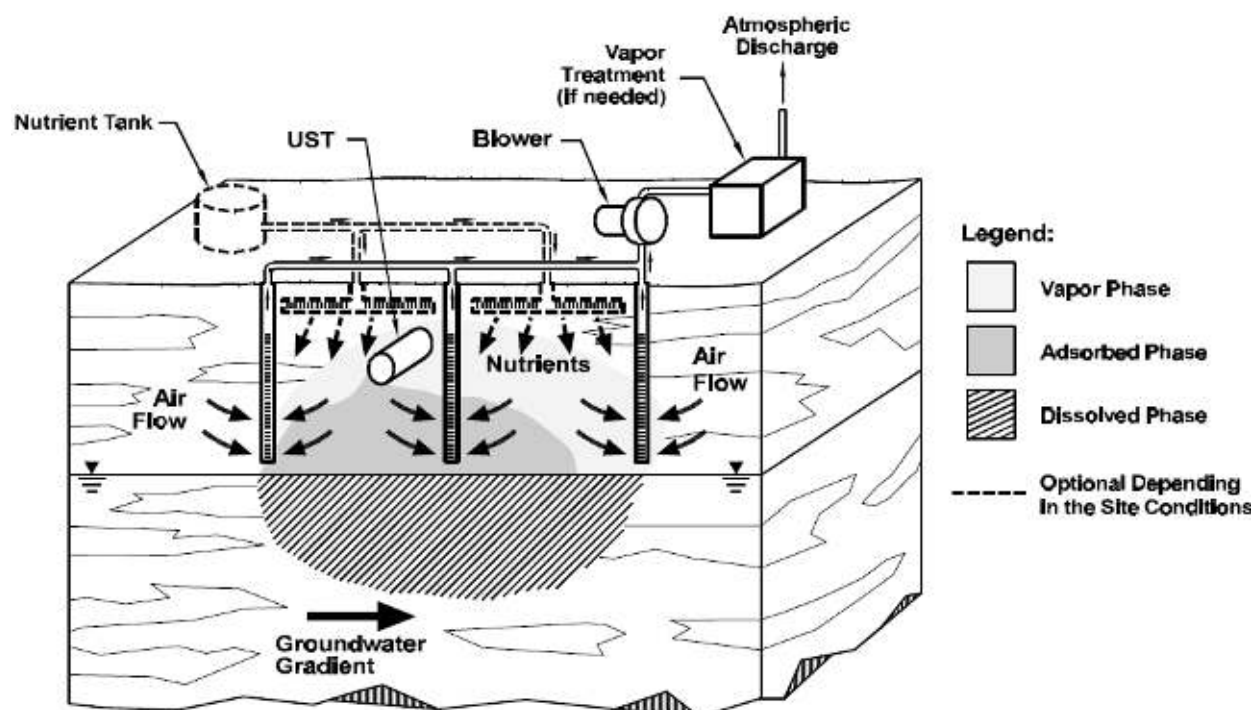
בדומה לטיפול פיזיקלי בשיטת SVE (Soil vapor extraction), חלק מהטיפול מתבצע ע"י שאיבת הפרקציות הנדיפות של הזיהום, אך ע"י שימוש בספיקות אוויר נמוכות יותר וע"י שימוש בתוספים לעידוד הפעילות הביולוגית, Bio-Venting מעודד את מנגנון הטיפול של הפירוק הביולוגי. שימוש בטכנולוגיות Bio-Venting עבור זיהומי דלק בתחום הבינוני-כבד יהיה עם כמות מועטה בלבד של שאיבת מזהמים נדיפים. עבור מזהמים בעלי תכונות נדיפות גבוהות (לחץ אדים גבוה מ-0.5 מ"מ כספית, טמפ' רתיחה של מתחת ל-250 מ"צ, קבוע הנרי של מעל 100 אטמ') מנגנון ההרחקה של נידוף יהיה משמעותי יותר במהלך טיפול Bio-Venting ויידרש טיפול בגזים הנשאבים לפני פליטה לאוויר.

יתרונות השיטה :

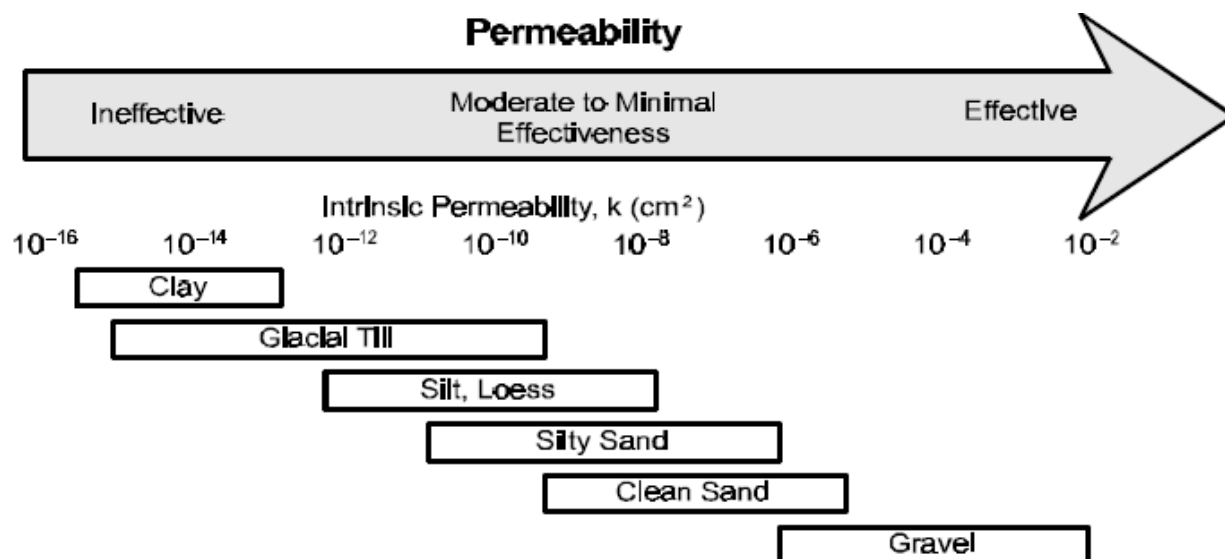
- פשטות התקנה
- אין הפרה של הקרקע
- השיטה מאפשרת הגעה לאזורים בלתי נגישים לעבודות חפירה
- חיסכון כלכלי בהימנעות מחפירה הקרקע, שינוע לטיפול ושינוע לפתרון קצה

חסרונות השיטה :

- לא מתאים לקרקעות חרסיתיות עם פרמיאביליות נמוכה או קרקעות הטרוגניות
- קושי בהגעה לערכי סף נמוכים במיוחד
- החדרה של כימיקלים לקרקע יכולה להיות בעייתית מבחינת רגולציה והשפעות ארוכות טווח של שינוי תכונות הקרקע והכנסת זנים זרים של חיידקים
- הטמפ' של תת הקרקע היא לרוב נמוכה משמעותית מטמפ' הסביבה
- קשה לשלוט על תכונות הפיזיות והכימיות של הקרקע המטופלת
- זמן טיפול ארוך יותר מטיפול Ex-Situ.



איור 9: תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Bio-Venting



איור 10: פרמיאביליות הקרקע לאוויר בקרקעות שונות

## 2.7 דוגמאות טיפול ביולוגי In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

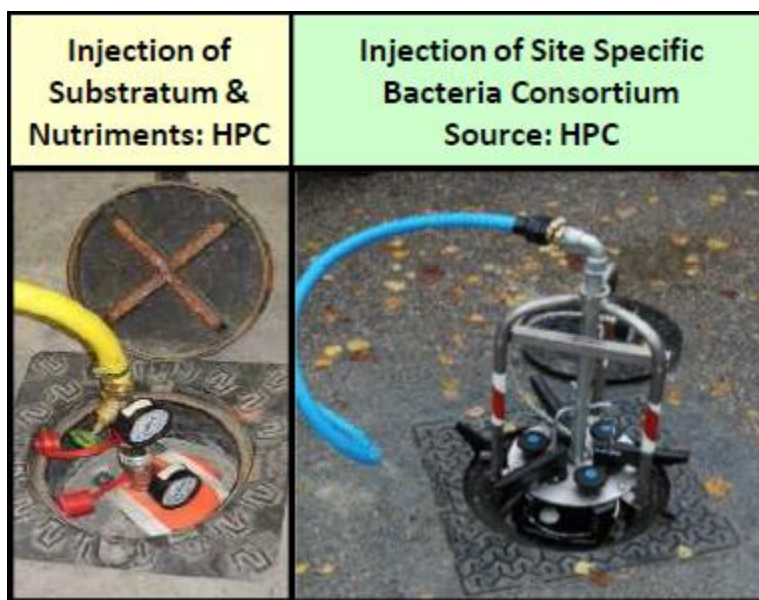
בטבלה 2 ניתן לראות דוגמאות לטכנולוגיות טיפול ביולוגי In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI אשר הוגשו לחברה לשירותי איכות סביבה.

\*לצורך הצגת ערכים אחידים בטבלה: העלויות מוצגות בשקלים ע"פ השערים  $1\$ = 3.8\text{ ש"ח}$ ,  $1\text{€} = 4\text{ ש"ח}$ . תפוקות מוצגות בטונות ע"פ 1 מ"ק קרקע = 1.5 טון. מס' שעות עבודה בשנה = 2,800 (10 שעות עבודה ביום, 280 ימי עבודה בשנה)

### טבלה 2: דוגמאות טיפול ביולוגי In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

| חברה                       | שיטת טיפול               | טווח ריכוז מזהמים                       | קצב טיפול*                                       | סביבה                                                                 | כמות מינימלית לטיפול | עלות*                                                                |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Dekonta</b>             | Bio-Venting<br>אירובי    | טווח זיהום נמוך                         | 1-3 שנים<br>(6 חודשים<br>פיילוט)                 | לא צפויות פליטות לאוויר.<br>מערכות איסוף וטיפול בתשטיפים.             | 50 טון               | עלות טיפול: 38 ש"ח -<br>114 ש"ח לטון                                 |
| <b>HPC</b><br>[איור 11]    | Bio-Venting<br>אירובי    | עד 5,000 מ"ג/ק"ג                        | 500-50,000 טון<br>לשנה<br>(2-6 חודשים<br>פיילוט) | איסוף וטיפול בגז ובתשטיפים,<br>תאי טיפול מותקנים על משטחים<br>אטומים. |                      | עלות טיפול: 20 ש"ח -<br>280 ש"ח לטון                                 |
| <b>RGS90</b><br>[איור 12]  | Bio-Venting<br>אירובי    |                                         |                                                  |                                                                       |                      | 40 ש"ח - 60 ש"ח לטון                                                 |
| <b>RGS90</b><br>[איור 12]  | Bio-Venting<br>אנ-אירובי | זיהום גבוה מאוד<br>של מזהמים<br>מוכלרים |                                                  |                                                                       |                      |                                                                      |
| <b>Sol<br/>Environment</b> | Bio-Venting<br>אירובי    | עד 10,000 מ"ג/ק"ג                       |                                                  |                                                                       |                      | עלות טיפול: 152 ש"ח -<br>2280 ש"ח לטון (228<br>ש"ח - 3,420 ש"ח למ"ק) |





איור 11 : מתקן Bio-Venting של חברת HPC



איור 12 : מתקן Bio-Venting של חברת RGS90



## 2.8 דוגמאות לטיפול ביולוגי Ex-Situ\On-Site מתוך מסמכי ה-RIF

בטבלה 3 ניתן לראות דוגמאות לטכנולוגיות טיפול ביולוגי In-Situ מתוך מסמכי ה-RIF אשר הוגשו לחברה לשירותי איכות סביבה.

\*לצורך הצגת ערכים אחידים בטבלה: העלויות מוצגות בשקלים ע"פ השערים  $1\$ = 3.8\text{ ש"ח}$ ,  $1\text{€} = 4\text{ ש"ח}$ . תפוקות מוצקות בטונות ע"פ 1 מ"ק קרקע = 1.5 טון. מס' שעות עבודה בשנה = 2,800 (10 שעות עבודה ביום, 280 ימי עבודה בשנה)

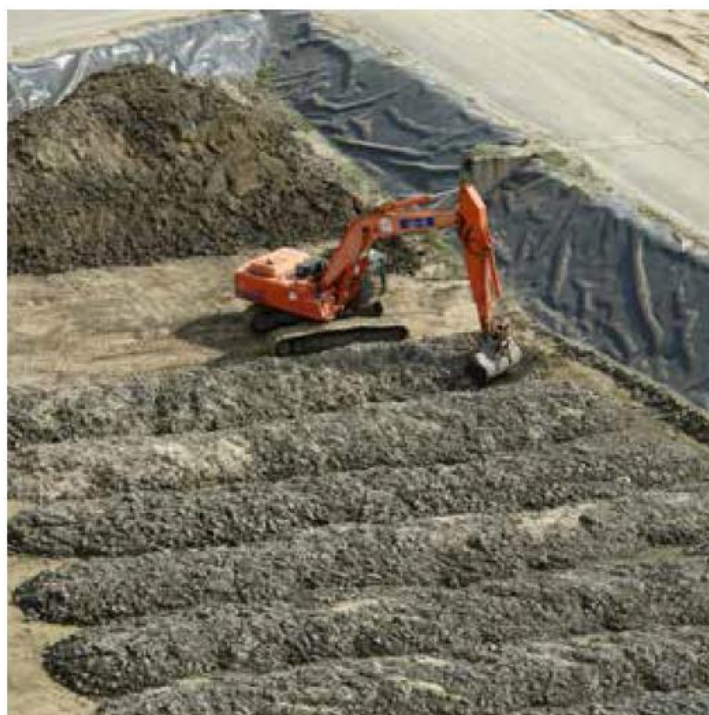
### טבלה 3: דוגמאות לטיפול ביולוגי Ex-Situ\On-Site מתוך מסמכי ה-RIF

| חברה                      | שיטת טיפול | טווח ריכוז מזהמים | קצב טיפול                  | סביבה | כמות מינימלית לטיפול | תשתיות                                             | עלות*                                                                |
|---------------------------|------------|-------------------|----------------------------|-------|----------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>RGS90</b><br>[איור 13] | Bio-Piles  |                   | 4-6 חודשים<br>לערימה גדולה |       |                      | חשמל, שטח<br>טיפול אטום,<br>0.5-1 מ"ר<br>לטון קרקע | עלות טיפול:<br>60 ש"ח - 120 ש"ח<br>לטון                              |
| <b>Sol Environment</b>    | Bio-Piles  | עד 10,000 מ"ג/ק"ג |                            |       |                      |                                                    | עלות טיפול:<br>330 ש"ח - 659 ש"ח<br>לטון (494 ש"ח - 988 ש"ח<br>למ"ק) |

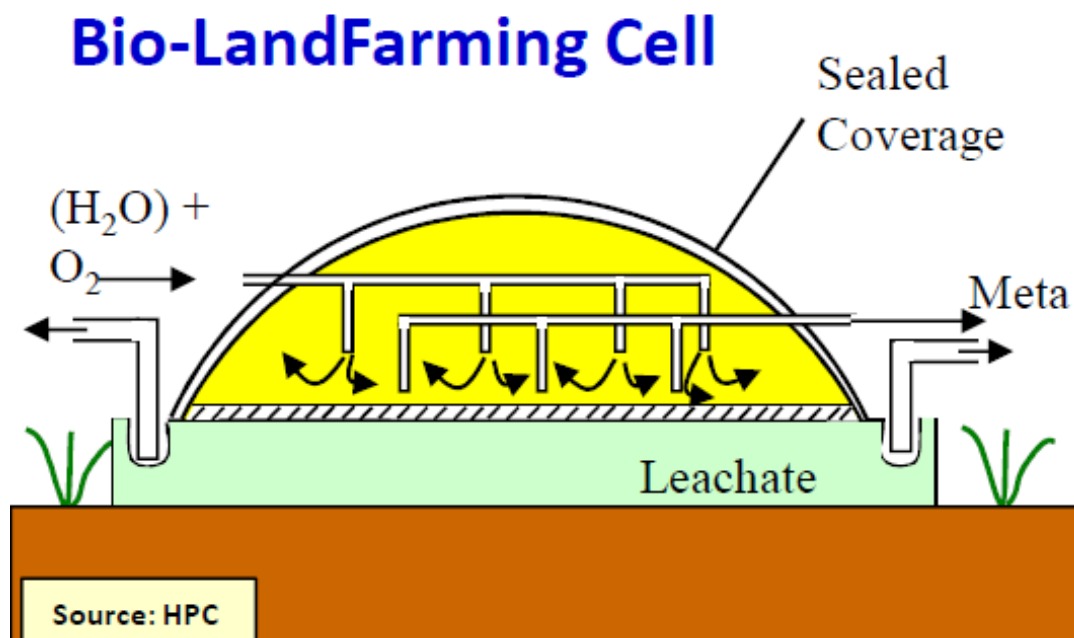
|                                                                                                    |             |           |                                                                |                                                                             |                                                                 |                                        |                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|
| עלות טיפול :<br>120 ₪ - 380 ₪<br>לטר                                                               |             |           | החומר פעיל השטח<br>פריק ביולוגית<br>ומאושר לשימוש ע"י<br>ה-EPA | 54,000 טון<br>לשנה (1920 טון<br>ליום). 6-10<br>חודשים<br>להתחלת<br>הטיפול   |                                                                 | Landfarming<br>עם תוסף פעיל<br>שטח     | <b>ID Enterprises</b>          |
| עלות טיפול :<br>76 ₪ - 228 ₪<br>לטר                                                                |             |           | איסוף וטיפול בגזים<br>ובתשטיפים                                | 4-9 חודשים<br>לערימת טיפול<br>(3-6 חודשים<br>פיילוט)                        | נמוך-בינוני                                                     | Bio-Piles עם<br>ביואוגמנטציה           | <b>Dekonta</b>                 |
| עלות כלי<br>צמ"ח : 2<br>מליון ₪.<br>עלות טיפול :<br>60 ₪ - 120 ₪<br>לטר כולל<br>שינוע ליעד<br>סופי | 0.5 מ"ר לטר | 1,000 טון | כיסוי ערימות במידת<br>הנדרש                                    | היפוך קרקע<br>בקצב של 100<br>טר בשעה. זמן<br>טיפול של מספר<br>שבועות/חודשים | רלוונטי עד 500<br>מ"ג/ק"ג של VOC<br>ועד לשרשראות של 35<br>פחמים | Windrows עם<br>אפשרות<br>לביואוגמנטציה | <b>Ludreco SA</b><br>[איור 14] |
| עלות טיפול :<br>8 ₪ - 200 ₪<br>לטר                                                                 |             | 50 טון    |                                                                | 500-100,000<br>טר בשנה (2-6<br>חודשים פיילוט)                               | עד 5,000 מ"ג/ק"ג                                                | Bio-pile                               | <b>HPC</b><br>[איור 15]        |



**איור 13:** ערימות טיפול Bio-Piles באתר טיפול של חברת RGS90



**איור 14:** ערימות טיפול Windrows באתר טיפול של חברת Ludreco SA



איור 15: ערימות טיפול Bio-Pile באתר טיפול של חברת HPC

## 2.9 טבלת סיכום טכנולוגיות טיפול ביולוגי

טבלה 4 מבוססת על הסקירה המדעית-הנדסית שנעשתה, ועל מידע אשר סופק ע"י חברות המפעילות טכנולוגיות טיפול ביולוגי כפי שמופיע במסמכי ה-RFI אשר נשלחו אל החברה לשירותי איכות סביבה.

טבלה 4: סיכום טכנולוגיות טיפול ביולוגי

● - יעילות/מתאים/לא מהווה גורם מגביל ● - יעילות בינונית / התאמה בינונית / גורם מגביל

○ - יעילות נמוכה / התאמה נמוכה / גורם מגביל מאוד

| הערות                                                                                                                                                     | סיווג | קריטריונים        |                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------|-----------------------|
| לרוב שיטות הטיפול הביולוגי אין צורך בשינוע ציוד ייחודי, וזמן ההתארגנות הוא של מספר בודד של חודשים, בעיקר להכשרת השטח.                                     | ●     | זמינות            | ישימות הטכנולוגיות    |
| בארץ קיים ניסיון משמעותי עם שיטות טיפול ביולוגי In-Situ ו-Ex-Situ                                                                                         | ●     | נסיון בישראל      |                       |
| פירוק של מזהמים אורגניים שיעיל עד ריכוזים של כ-50,000 מ"ג/ק"ג. יעילות הפירוק יורדת עבור מזהמים עם הלוגנים, ועבור מזהמים אורגניים בעלי משקל מולקולרי גבוה. | ●     | דלקים             | התאמת לקבוצות המזהמים |
|                                                                                                                                                           | ○     | VOC (הלוגנים)     |                       |
|                                                                                                                                                           | ●     | VOC (לא הלוגנים)  |                       |
|                                                                                                                                                           | ○     | SVOC (הלוגנים)    |                       |
|                                                                                                                                                           | ●     | SVOC (לא הלוגנים) |                       |
| טיפול ביולוגי אינו מפרק מתכות וחומרים אנאורגניים                                                                                                          | ○     | מתכות             |                       |
|                                                                                                                                                           | ○     | חומרים אנאורגניים |                       |
| טיפול ביולוגי מתאים לריכוזים נמוכים-בינוניים של חומרי נפץ. זמני הטיפול ארוכים יותר ויתכן תידרש זריעה של חיידקים ספציפיים לתהליך.                          | ○     | חומר נפץ          |                       |
|                                                                                                                                                           | ●     | חול               | התאמה לתכונות הקרקע   |
| בקרקות עם אחוזים גבוהים של חרסית יש להשתמש בחומרים ניפחיים על מנת ליצור מרקם מאוורר יותר.                                                                 | ●     | חרסית וטין        |                       |
|                                                                                                                                                           | ●     | הטרוגני           |                       |

| קריטריונים                                                                   | סיווג     | הערות                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| רטיבות הקרקע                                                                 | ●         | יש לשמור על אחוזי רטיבות של 40%-85% מקיבול השדה של הקרקע. מעל לאחוזים אלו ישנה בעיה באספקת חמצן לתהליכים אירוביים ומתחת לאחוזים אלו יש בעיית זמינות המזהמים והנוטריאנטים לתהליך הביולוגי. |
| עומק אפקטיבי לטיפול (In-Situ)                                                | ●         | רדוד (פחות מ-5 מ')                                                                                                                                                                        |
|                                                                              | ●         | בינוי (5 עד 15 מ')                                                                                                                                                                        |
|                                                                              | ●         | עמוק (יותר מ-15 מ')                                                                                                                                                                       |
| טיפול קדם בטיפול Ex-Situ (בהתאם למאפייני הקרקע והזיהום)                      |           |                                                                                                                                                                                           |
| ניפוי גס של פסולת ואבנים, הומוגניזציה, ייבוש, ערבוב עם חומר נפחי, וויסות pH. |           |                                                                                                                                                                                           |
| קצב טיפול                                                                    | ●         | עבור טיפול Ex-Situ – מספר שבועות-חודשים כתלות בסוג הקרקע ובריכוז הזיהום. ראה טבלה 3 להשוואה.<br>עבור טיפול In-Situ – חודשים-שני כתלות בסוג הקרקע ובריכוז הזיהום. ראה טבלה 2 להשוואה.      |
| הרחקת מזהמים                                                                 | ●         | 90%-95%. מעבר לכך זמני הטיפול עלולים להיות ארוכים                                                                                                                                         |
| מרקם הקרקע לאחר טיפול                                                        | ●         | מרקם הקרקע אינו משתנה, פרט לערבוב עם תוספים                                                                                                                                               |
| תשתיות נדרשות ליישום הטכנולוגיה                                              | ○         | הטיפול יכול להתבצע במקביל על כמות בלתי מוגבלת של קרקע, אך השטח הוא הגורם המגביל. עבור טיפול Ex-Situ - 0.5-1 מ"ר לטון.                                                                     |
|                                                                              | ●         | תהליך אשר אינו דורש כמות אנרגיה גבוהה. במקרה של אוורור מאולץ ב-Bio-piles או בטיפול In-Situ משאבות האוויר יהיו הצרכן המרכזי.                                                               |
|                                                                              | ●         | כמות קטנה של מים להרטבה של קרקעות יבשות.                                                                                                                                                  |
| השפעה על הסביבה                                                              | ●         | נידוף אינו המנגנון העיקרי של הטיפול הביולוגי, אך בטיפול בקרקעות המכילות ריכוזים משמעותיים של VOC, או בטכנולוגיה הכוללת אוורור מאולץ, יש צורך באיסוף, ניטור ובטיפול בגזים הנפלטים.         |
|                                                                              | ●         | מיעוט תשטיפים, בהם ניתן לעשות שימוש חוזר להרטבה או להפנות לטיפול.                                                                                                                         |
| עלויות                                                                       | עלות מתקן | עלות כלי צמ"ה לטיפול Ex-Situ – כ-4 מליון ₪.                                                                                                                                               |

| הערות                                                                                             | סיווג | קריטריונים                                                                                                                   |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 60 שנה - 380 שנה לטון כתלות בסוג הקרקע, צורת הטיפול וריכוז הזיהום.<br>ראה טבלה 2 וטבלה 3 להשוואה. |       | עלות טיפול                                                                                                                   |  |
| ביוסווייל: 160 שנה - 300 שנה לטון                                                                 |       | עלות טיפול<br>במתקנים קיימים<br>בארץ (הפירוט לצורך<br>השוואה וייחוס בלבד<br>ואינו מתייחס לשאר<br>הפרמטרים<br>התפעוליים לעיל) |  |



### 3 טיפול תרמי

#### 3.1 טיפול תרמי בטכנולוגיית TD (Thermal Desorption)

##### 3.1.1 תיאור הטכנולוגיה

טיפול בטכנולוגיית TD היא טכנולוגיית טיפול המיועדת לסלק זיהומים מקרקעות באמצעות נידופם ע"י חום, ללא התלקחות של המדיה או של המזהם. חימום הקרקע באמצעים שונים מביא את המזהמים אל מעבר לנקודת הנידוף שלהם וכך נוצרת ההפרדה. המזהמים אשר התנדפו נשאבים ומועברים אל יחידות טיפול משניות האחראיות על הגעה לאיכות פליטה רצויה לאוויר, ע"פ התקנות הרלוונטיות.

מזהמים נוטים להיספח בצורה שונה לסוגי קרקעות שונים. קרקע חולית אינה סופחת מזהמים בצורה משמעותית, על כן נידופם של המזהמים יהיה קל יותר מאשר מקרקעות חרסיתיות או מקרקעות בעלות אחוז גבוה של חומר אורגני, המסוגלות לספוח כמויות גדולות של מזהמים. בנוסף, הקרקעות החרסיתיות דקות הגרגר בעלות גודל חללים (פורות) קטן יותר מאשר בקרקעות חוליות, ומבנה זה יוצר אפקט יניקה המקטין את יכולת המזהם להתנדף. טיפול תרמי מתאים לקרקעות, בוצות, סדימנט וחומר סחוט (cake), אך אינו מתאים לטיפול בזיהום בפאזה נוזלית או בחומרים בעלי אחוז רטיבות גבוה במיוחד, בשל קיבול החום הגבוה של המים. לטיפול תרמי שני סוגים עיקריים:

- טיפול תרמי בטמפר' נמוכה (LTDD – Low Temperature thermal desorption) – חימום הקרקעות לטמפר' של 90-320 מעלות צלזיוס, על מנת להרחיק VOC, SVOC ודלקים. בטמפר' אלו תכונות הקרקע נשמרות, והיא יכולה לחזור ולשמש לצרכים שונים אשר דורשים פעילות ביולוגית בקרקע ומבנה קרקע טבעי. בטווח זה של טמפר', זמן השהייה של הקרקע בתא הטיפול הוא בדרך כלל כ-20-10 דקות, כתלות במאפייני הקרקע והזיהום.
- טיפול תרמי בטמפר' גבוהה (HTDD – High temperature thermal desorption) – חימום הקרקעות לטמפר' של 320-960 מעלות צלזיוס. טיפול בטמפר' גבוהה בדר"כ משולב בטיפול ע"י שריפה וואו טיפול בשיטת ייצוב/מיצוק. מיועד לפרקציות כבדות של SVOC, PAH, PCB, מתכות נדיפות וחומרי הדברה. טיפול בטמפר' גבוהות יכול לשנות את תכונות הקרקע ולהגביל את השימוש העתידי בהן. בטווח זה של טמפר' זמן השהייה של הקרקע בתא הטיפול הוא כ-20-45 דקות, כתלות במאפייני הקרקע והזיהום.

##### 3.1.2 סוגי מזהמים מטופלים

חומרים שונים מתנדפים בטמפר' שונות, בהתאם לנקודת הרתיחה שלהם, התלויה במשקל המולקולרי ובתכונות הכימיות של החומר. תכנון הטיפול והתאמתו לטיפול בזיהום מסוים מתחשב בהרכב הזיהום, טמפר' העבודה, ומשך זמן החימום. טיפול תרמי אשר יתבצע על מזהמים אשר אינם מתאימים לכך עלול לגרום לאי עמידה ביעדי הטיפול ואף לשבש בצורה חמורה את פעילות תא החימום ואת מערכת הטיפול בגזים.

טכנולוגיות TD יעילות ביותר לטיפול בקרקעות מזוהמות בדלקים (PAH, VOC, VOC, GRO, DRO), כספית, ממסים מוכלרים, חומרי הדברה מוכלרים, פורנים ו-PCB's, ובכלליות עבור כל מזהם שטמפ' ההתנדפות שלו היא מתחת לכ-930 מעלות.

טמפ' הנידוף עבור SVOC (PAH, PCB ועוד) הינה כ-325 מ"צ, ועבור VOC נדרשת טמפ' של כ-100 מ"צ בלבד. ניתן לטפל ב-SVOC בטמפ' הנמוכות מטמפ' הנידוף הסטנדרטיות בזמני טיפול ארוכים ובסביבה חמה הגורמים לעליה בלחץ האדים האפקטיבי של החומר.

במידה והמזהמים הינם אורגניים מוכלרים, יש לדאוג שצנרת מתקני הטיפול תהנה עמידות בתנאים קורוסיביים.

טיפול תרמי אינו מיועד לטיפול במזהמים אי-אורגניים, כגון מתכות, אך יוצאות מן הכלל הן הכספית והעופרת, המתנדפות בטווח הטמפ' של טיפול תרמי. עם זאת, יש לקחת בחשבון טיפול ספציפי לגז הנפלט לאוויר על מנת לוודא שהמתכות מורחקות בטרם הפליטה. טיפול תרמי אינו מתאים עבור מזהמים אשר עלולים להתפרק, להגיב או לפלוט חומרים מסוכנים כתוצאה מחימום, כדוגמת אסבסט, מחמצנים, חומרי נפץ וכד'.

כתלות בתכונות הקרקע והמזהמים, ובזמן הטיפול, ניתן להשיג יעילות הרחקה של מעל ל-99% ולעמוד בערכי סף מחמירים בסדר גודל של 0.01 מ"ג/ק"ג.

בטבלה 5 ניתן לראות את טמפ' הנידוף של מזהמים עיקריים (טמפ' אלו הן עבור תנאים סטנדרטיים, ומושפעות משלל מאפייני הקרקע וסביבת הטיפול), ובטבלה 6 ניתן לראות טבלה המפרטת היעילות הצפויה של טיפול תרמי עבור קבוצות שונות של מזהמים בסוגי מדיות שונות:

## טבלה 5: טמפי' נידוף של מזהמים עיקריים

| HAP                     |         |
|-------------------------|---------|
| Naphtalene              | 218 °C  |
| Acenaphtylene           | 280 °C  |
| Acenaphtalene           | 279 °C  |
| Fluorene                | 295 °C  |
| Phenantrene             | 340 °C  |
| Antracene               | 342 °C  |
| Fluoranthene            | 375 °C  |
| Pyrene                  | 393 °C  |
| Benzo(a)Fluranthene     | 482 °C  |
| Chryseen                | 488 °C  |
| Benzo(b)Fluoranthene    | 480 °C  |
| Benzo(k)Fluoranthene    | 480 °C  |
| Benzo(a)pyrene          | 371 °C  |
| Benzo(ghi) perylene     | 550 °C  |
| Indeno(1,2,3-c,d)pyrene | 530 °C  |
| Hydrocarbures           |         |
| Essence                 | 221 °C  |
| Diesel                  | 343 °C  |
| Fioul lourd             | 443 °C  |
| Autres                  |         |
| PCB                     | <350 °C |
| Phenols                 | 310 °C  |
| TNT                     | 300 °C  |
| Cyanide                 | 430 °C  |
| Mercure                 | 320 °C  |
| Sulphure                | 414 °C  |
| Solvants chlorés        | 60 °C   |

## טבלה 6: יעילות טיפול תרמי עבור מזהמים ממשפחות שונות

| Contaminant Groups |                                  | Effectiveness |        |           |              |
|--------------------|----------------------------------|---------------|--------|-----------|--------------|
|                    |                                  | Soil          | Sludge | Sediments | Filter Cakes |
| <b>Organic</b>     | Halogenated volatiles            | 1             | 2      | 2         | 1            |
|                    | Halogenated semivolatiles        | 1             | 2      | 2         | 1            |
|                    | Nonhalogenated volatiles         | 1             | 2      | 2         | 1            |
|                    | Nonhalogenated semivolatiles     | 1             | 2      | 2         | 1            |
|                    | Polychlorinated biphenyls (PCBs) | 1             | 2      | 2         | 2            |
|                    | Pesticides                       | 1             | 2      | 2         | 2            |
|                    | Dioxins/furans                   | 1             | 2      | 2         | 2            |
|                    | Organic cyanides                 | 2             | 2      | 2         | 2            |
|                    | Organic corrosives               | 3             | 3      | 3         | 3            |
| <b>Inorganic</b>   | Volatile metals                  | 1             | 2      | 2         | 2            |
|                    | Nonvolatile metals               | 3             | 3      | 3         | 3            |
|                    | Asbestos                         | 3             | 3      | 3         | 3            |
|                    | Radioactive materials            | 3             | 3      | 3         | 3            |
|                    | Inorganic corrosives             | 3             | 3      | 3         | 3            |
|                    | Inorganic cyanides               | 3             | 3      | 3         | 3            |
| <b>Reactive</b>    | Oxidizers                        | 3             | 3      | 3         | 3            |
|                    | Reducers                         | 3             | 3      | 3         | 3            |

Key: 1 – Demonstrated Effectiveness: Successful treatability at some scale completed.

2 – Potential Effectiveness: Expert opinion that the technology will work.

3 – No Expected Effectiveness: Expert opinion that the technology will not work.

Source: U.S. EPA, 1991, EPA/540/2-91/008.

**3.1.3 ניטור במהלך הטיפול**

פרמטרים לניטור במהלך מחזורי הטיפול התרמי (תא הטיפול ומתקני הטיפול בגז) :

- טמפ' הטיפול – הטמפ' של אמצעי החימום, של הקרקע ושל הגז היוצא ממנה
- ניטור תא הטיפול – לחץ, אחוז חמצן, LEL
- זמן שהיה בתא הטיפול
- מהירות סיבוב התוף (תא הטיפול)
- ספיקת הגז המוליך
- טמפ' אמצעי הטיפול במזהמים הגזיים לפני שחרורם
- טמפ' וספיקה של מי תהליך
- טמפ' יציאה של הקרקע, גזים ונוזלים מתא הטיפול
- טמפ' ו-pH של מתקן סקראבר
- בקרת טעינה ופריקה של הקרקע

**3.1.4 יתרונות הטיפול בטכנולוגיית TD**

- עלויות נמוכות בהשוואה לטיפול בשריפה
- התאמה לטווח רחב יחסית של מזהמים
- ניסיון מוכח עם יישום נרחב ברחבי העולם

**3.1.5 חסרונות הטיפול בטכנולוגיית TD**

- חוסר התאמה לטיפול במתכות כבדות. המתכות נשארות בקרקע ועלולות ליצור תוצרי לווי במהלך הטיפול בטמפ' גבוהות.
- המזהמים אינם מתפרקים, אלא מופרדים מהקרקע ויש למצוא פתרונות קצה של הרחקה, ספיחה או שריפה.
- תהליך התכנון והערכת העלויות רגישים מאוד למרקם הקרקע ולהומוגניות שלה.
- בקרקעות בעלות אחוזי רטיבות משמעותיים נדרש טיפול קדם של ייבוש/סחיטה.

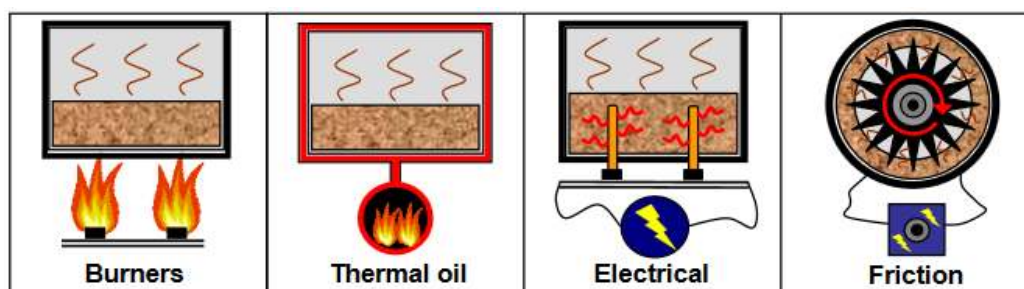
**3.2 טיפול בטכנולוגיית TD בצורת Ex-Situ \ On-site****3.2.1 תיאור הטכנולוגיה**

הטיפול בטכנולוגיית TD (Thermal Desorption) יכול להתבצע על קרקע שנחפרה ושונעה אל מתקן טיפול קבוע הממוקם מחוץ לאתר (טיפול Ex-Situ), או אל מתקן טיפול זמני הממוקם באתר העבודות עצמו (On-Site). הקרקע מוזנת בצורה רציפה או מנתית אל המתקן והתהליך כולו מתרחש בתאים חימום יעודיים.

ישנן מספר שיטות לחימום הקרקע [איור 16]:

- חימום של תא הטיפול
  - מבערים הפועלים על גז או דלקים נוזליים המחממים את תא הטיפול.
  - חימום שמן סינתטי אשר מוזרם בצינורות מסביב או בתוך תא הטיפול ומחמם את הקרקע בתוכו
  - חימום הקרקע בתא הטיפול ע"י גופי חימום חשמליים
  - חימום ע"י גלי מיקרו
- חימום ישיר של הקרקע
  - חימום ע"י חיכוך המיוצר באמצעות פטישים המסתובבים בתא הטיפול
  - חימום ע"י קיטור או אוויר חם המוזרמים ישירות אל תוך הקרקע

סוגי תאי הטיפול הנפוצים הם תוף מסתובב אופקי (Rotary Drum) מחומם, אשר מסתובב בשיפוע והקרקע בו מתחממת בצורה עקיפה, תאי חימום מנתיים (תנורים), או בורג חלול אשר מסיע את הקרקע המטופלת ומחומם מבפנים באמצעות שמן או קיטור.



**איור 16:** תרשים סכמתי של שיטות חימום שונות של תא הטיפול ושל הקרקע

### 3.2.2 טיפול-קדם

על פי תכונות הקרקע, ועל מנת לייעל את תהליך הטיפול מבחינת אחוזי ההרחקה של המזהמים ומבחינת השקעה אנרגטית, ייתכן שידרשו טיפולי קדם מסוגים שונים לפני התחלת הטיפול התרמי עצמו. הטיפול נעשה יעיל יותר ככל שהקרקע היא בעלת תכונות פיזיות וכימיות הומוגניות ומתאימות יותר לתהליך הטיפול.

- **הומוגניזציה** - על מנת להגיע למרקם קרקע הומוגני נעשה שימוש בנפות להרחקת אבנים ובציוד ריסוק לריסוק גושי קרקע. מרקם קרקע הומוגני משפר את מעבר החום ומונע סתימות במערך המסועים.
- **ייבוש** - על מנת להגדיל את יעילות החימום ולמנוע סתימות כתוצאה מהצטברות חומר במערכת, יש להוריד את רמת הרטיבות בקרקע. ייבוש הקרקע מתבצע באמצעות ייבוש ע"י אוויר, סחיטה באמצעות טכנולוגיות פילטר-פרס, צנטריפוגה וכד', ערבוב עם חומר נפחי יבש ועוד.

- **התאמת הסביבה הכימית של הטיפול** – ערבוב הקרקע המיועדת לטיפול עם תוספים כימיים מאפשר קבלת סביבה כימית המתאימה בצורה טובה יותר לטיפול יעיל ללא תקלות או פגיעה בצידוד. לדוגמה, על מנת למנוע קורוזיה של המתקן, ניתן לבצע ערבוב של הקרקע עם סיד או חומרים אלקליניים אחרים ותהליך של חימום מקדים, זאת על מנת להגיע ל-pH ניטרלי. גם זיהומים בסיסיים יתר על המידה דורשים טיפול קדם.

לאחר טיפול הקדם יש לבצע בקרה והערכה מחודשת של תכונות הקרקע (pH, רטיבות וכד') ושל אופי הטיפול (טמפר' יעד, משך וכד'). כל תהליכי טיפול הקדם צריכים להתבצע במתקן ייעודי ועם טיפול מלא בפליטות לאוויר של מזהמים וחלקיקים וטיפול בתשטיפים.

### 3.2.3 שיטות הזנה

**הזנה מנתית** – הזנה של קרקע אל תוך תא טיפול, תוך שליטה מלאה על זמן הטיפול עד להגעה ליעד – צורת תפעול המאפשרת גמישות הפעלה בהתאם לתכונות הקרקע וריכוז המזהמים בכל מנה. תא הטיפול הוא אטום וניתן להשתמש במערכות וואקום בכדי למנוע לחלוטין כניסת אוויר מבחוץ המפחיתה את יעילות הטיפול, ומעלה את כמות הגז שיש לטפל בו בסוף התהליך. תא טיפול מנתי יכול להיות סטטי או עם ערבול פנימי אשר מגדיל את היעילות האנרגטית של הטיפול כתוצאה מהגדלת הומוגניות הקרקע, הגדלת החשיפה שלה לחום ואת פיזורו השווה. ערבול פנימי יכול להיות באמצעות כפות פנימיות, באמצעות תוף טיפול מסתובב.

**הזנה רציפה** – מערכות הכוללות בדר"כ תוף מסתובב בהטיה (מערכת עם ערבול), או מסוע (מערכת סטטית) אשר עובר דרך אזורי הטיפול. הזנה רציפה הינה יעילה כאשר מדובר בכמויות קרקע גדולות. ניתן לשנות את זמן השהייה תוך הפעלת מערכת הזנה רציפה. הזנה רציפה מתאימה לשיטת חימום באמצעות להבה ישירה, בגלל האפשרות להזרים אוויר למערכת.

טבלה 7 מציגה השוואת עלויות בין שיטות טיפול מנתיות ורציפות בסוגי מתקנים שונים. העלויות בטבלה מתייחסות לעלויות הטיפול עצמו בלבד המהוות רק כשליש מהעלות הכוללת של שיקום אתר, ללא עלויות נלוות של חפירה, שינוע, תכנון ושיקום האתר :

**טבלה 7:** עלויות אופייניות לטיפול בטכנולוגיית TD כתלות בשיטת הזנת הקרקע (רציפה/מנתית) (NFESC, 1998a)

| Continuous Thermal Desorption Technologies  |                     | Batch Thermal Desorption Technologies |                       |
|---------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Small to Medium Direct-Contact Rotary Dryer | \$40-\$200 per ton  | Heated Oven                           | \$120-\$250 per ton   |
| Large Direct-Contact Rotary Dryer           | \$35-\$100 per ton  | HAVE System                           | \$48-\$51 per ton     |
| Indirect-Contact Rotary Dryer               | \$80-\$150 per ton  | Thermal Blanket Thermal Well          | roughly \$100 per ton |
| Indirect-Contact Rotary Screw               | \$100-\$150 per ton |                                       |                       |
| Base-Catalyzed Decomposition Process (BCDP) | \$322 per ton       |                                       |                       |

### 3.2.4 סוגי קרקעות לטיפול Ex-Situ

לתכונות הפיסיות של קרקע השפעה משמעותית על בחירת הטכנולוגיה לטיפול ועל היעילות בה היא תתבצע. קרקעות עם אחוזים גבוהים של חומר עדין חרסיתי וסילטי (חלקיקים הקטנים מ-75 מיקרון) נוטות ליצור גושים גדולים (עם קוטר של מעל לכ-5 ס"מ) של קרקע אשר עלולים לא להתחמם באופן אחיד וליצור אזורים בהם הטיפול אינו מגיע ליעדים שנקבעו. בנוסף, גושי קרקע נוטים להצטבר ולגדול עד כדי גרימת סתימות ותקלות מכאניות במתקן. הדבר נכון גם לקרקעות עם אחוז גבוה של חומר הומי. קרקעות אלו עלולות לגרום להיווצרות כמות גבוהה מידי של חלקיקים בזרם הגז המטופל וכתוצאה מכך להעמיס יתר על המידה על מערכות הפרדת החלקיקים. יש לבדוק את מרקם הקרקע ואת מידת הפלסטיות שלה לפני בחירת חלופת הטיפול על מנת לאמוד את הפוטנציאל שלה ליצור גושים במהלך ההסעה והערבוב של הטיפול.

פרמטר משמעותי נוסף הוא אחוז הרטיבות של הקרקע. בקרקעות עם אחוז רטיבות גבוה יעילות החימום תהיה פחותה בשל קיבול החום הגבוה של המים. בנוסף, המים הנכנסים למערך הטיפול יוצרים כמות גדולה של קיטור המעמיס על מערכת הפינוי והטיפול בגזים.

לאחר הטיפול, מרקם הקרקע עשוי להשתנות בעקבות החשיפה לחום הגורמת לייבוש קיצוני ולהתפוררות אגריגטים ברמת הגרגר. בטכנולוגיות TD הפועלות בטמפר' נמוכה יחסית, השינוי יהיה זניח, אך עם העליה בטמפר' בעבודה, ובמיוחד במעבר לשיטות טיפול של פירוליזה (ראה סעיף 3.4) או שריפה (ראה סעיף 3.5) תתקבל השחמה של הקרקע והפרקציה דקת הגרגר צפויה לגדול.

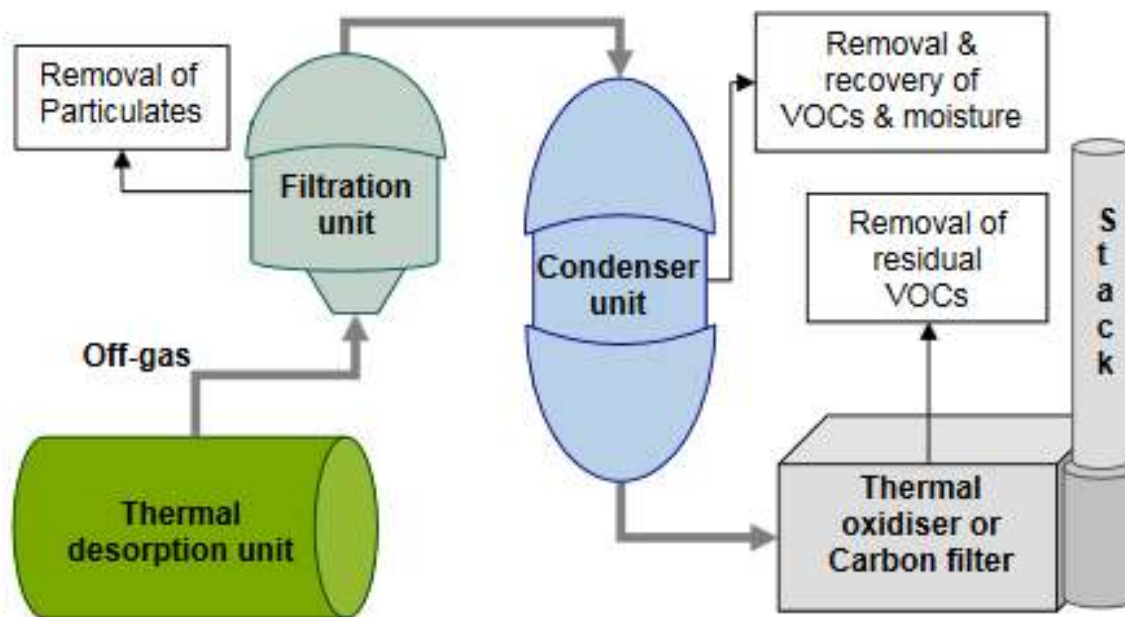
### 3.2.5 תכנון ותפעול מתקן Ex-Situ – TD

- תכנון מתקן הטיפול מבוצע בהתאם לקרקע ולמזהמים שבה, ואם ישנו צורך בטיפול במגוון קרקעות וזיהומים המתקן צריך להיות גמיש מספיק מבחינה תפעולית (טווח טמפר', קצב הזנת הקרקע, קצב הסעת הגזים, ועוד).
- טיפול מנתי צריך להתבצע בתא אטום על מנת למזער פליטת גזים לסביבה, מזעור כניסת אוויר מבחוץ ושמירה על אחוזי חמצן נמוכים על מנת למנוע התלקחות גזים. מערכות טיפול עם הזנה רציפה אינן אטומות כמו תאי טיפול מנתי, ויש לדאוג למזעור כניסת אוויר ע"י מערכות וויסות אוויר (damper).
- חימום הקרקע מתבצע בקצב הדרגתי ובשלבים. קצב חימום איטי מונע מצבים לא רצויים של התלקחות ושינויים כימיים של המזהמים. בשלב הראשון נעשה חימום לטמפר' נמוכה (90-100 מעלות) בה המים מתאדים, ורק לאחר מכן נעשית עליה לטמפר' גבוהות יותר המנדפות את המזהמים.
- ערבוב הקרקע במהלך החימום מבטיח פיזור חום אחיד ומסייע בנידוף המזהמים. הערבוב מסייע גם ביצירת מרקם הומוגני לקרקע ובמניעת שיכוב והיווצרות גושים לאורך הטיפול (מצב העלול להתרחש בעיקר בתאי טיפול בהם זמן השהייה ארוך). ערבוב אגרסיבי מידי עלול להרחיף חלקיקי קרקע עדינים אשר ישאבו עם זרם הגז לטיפול.
- הערכת העלויות עבור מתקנים לטיפול בטכנולוגית TD משתנה בהתאם לכמויות בהן יש לטפל, כשהעלות עבור טון קרקע מטופלת יורד ככל שכמויות הקרקע לטיפול בפרויקט הן גדולות יותר. טבלה 8 מסכמת הערכת עלויות עבור מתקנים ניידים, ועבור מתקן קבוע.



- החימום והקירור של תהליכי ההפעלה והעצירה של מתקני טיפול תרמי Ex-Situ יכולים לארוך שעות ארוכות ואף יום עבודה מלא. תהליכים אלו, אם מתרחשים בתדירויות תכופות מידי, עלולים להגדיל את הסיכון לתקלות מכאניות במתקן. לפיכך, יש יתרון להפעלה רציפה של 24 שעות ביממה, עם עצירות לצרכים תפעוליים וצרכי תחזוקה שוטפת בלבד.

בתיאור סכמתי של מתקן טיפול תרמי בטכנולוגיית Ex-Situ TD [איור 17] ניתן לראות את השלבים העיקריים בתהליך – החל מהיחידה התרמית בה מתקיימת ההפרדה בין הקרקע למזהמים, דרך יחידות הטיפול במזהמים בזרם הגז הנפלט (טיפול בחלקיקים, עיבוי מזהמים מהפאזה הגזית, ושריפה/פירוק של שאריות המזהמים) ועד לשחרור זרם הגז המטופל לאוויר דרך ארובה.



**איור 17:** איור סכמתי של מתקן טיפול

**טבלה 8:** הערכת עלויות לטיפול בקרקעות מזהמות לפי סוג מתקן וכמות הקרקע בה יש לטפל.

| Size of Waste Site (tons) | Application          | Petroleum-Contaminated Soil Cost (\$/ton) <sup>(b)</sup> | Hazardous Waste (Superfund) Cost (\$/ton) <sup>(b)</sup> |
|---------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1,000                     | Mobile/transportable | \$90-130                                                 | \$300-600                                                |
| 10,000                    | Mobile/transportable | \$40-70                                                  | \$200-300                                                |
| 100,000                   | Mobile/transportable | \$35-50                                                  | \$150-200                                                |
| N/A                       | Fixed base           | \$35-75                                                  | not available                                            |

**3.2.6 יתרונות של טיפול Ex-Situ**

- זמני טיפול קצרים יותר.
- רמת ודאות גבוהה של תוצאות הטיפול ואיכות החומר המטופל.
- אפשרות לבצע טיפול קדם לקבלת הומוגניות של החומר המטופל.
- מאפשר טיפול בטמפי' נמוכות יחסית ועל כן אינו משנה את תכונות הקרקע, ומאפשר שימוש חוזר במגוון דרכים.

**3.2.7 חסרונות של טיפול Ex-Situ**

- עלויות גבוהות של שינוע הקרקע למתקן טיפול שאינו On-Site.
- עלויות של טיפול קדם.
- מציאת פתרון קצה לשימוש בקרקע.

בשל עלויות גבוהות של עבודות החפירה, יש יתרון כלכלי לחפירה ולטיפול Ex-Situ באתרים עם נפח גדול לטיפול [טבלה 9].

**טבלה 9:** הערכת עלויות לטיפול בטכנולוגיות Ex-Situ TD

| <b>SOIL TECHNOLOGY:</b>                   |                   | <b>Thermal Desorption</b> |                   |                   |                   |
|-------------------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>RACER PARAMETERS</b>                   | <b>Scenario A</b> |                           | <b>Scenario B</b> | <b>Scenario C</b> | <b>Scenario D</b> |
|                                           | <b>Small Site</b> |                           | <b>Large Site</b> |                   |                   |
|                                           | <b>Easy</b>       | <b>Difficult</b>          | <b>Easy</b>       | <b>Difficult</b>  |                   |
| <b>Remedial Action:</b>                   |                   |                           |                   |                   |                   |
| <b>Media/Waste Type</b>                   | Soil              | Soil                      | Soil              | Soil              |                   |
| <b>Contaminant</b>                        | VOCs/fuels        | SVOCs                     | VOCs/fuels        | SVOCs             |                   |
| <b>Approach</b>                           | Ex Situ           | Ex Situ                   | Ex Situ           | Ex Situ           |                   |
| <b>System Definition:</b>                 |                   |                           |                   |                   |                   |
| <b>Volume of Bulk Waste (Tons)</b>        | 10,000            | 10,000                    | 300,000           | 300,000           |                   |
| <b>System Type</b>                        | VOCs/fuels        | SVOCs                     | VOCs/fuels        | SVOCs             |                   |
| <b>Safety Level</b>                       | D                 | D                         | D                 | D                 |                   |
|                                           |                   |                           |                   |                   |                   |
| <b>Additional Costs:</b>                  |                   |                           |                   |                   |                   |
| <b>Remedial Design</b>                    | \$26,568          | \$73,800                  | \$335,792         | \$730,623         |                   |
|                                           |                   |                           |                   |                   |                   |
| <b>Thermal Desorption Marked-up Costs</b> | \$590,402         | \$1,845,009               | \$9,594,049       | \$24,354,104      |                   |
|                                           |                   |                           |                   |                   |                   |
| <b>TOTAL MARKED-UP COSTS</b>              | \$616,970         | \$1,918,809               | \$9,929,841       | \$25,084,727      |                   |
|                                           |                   |                           |                   |                   |                   |
| <b>COST PER CUBIC FOOT</b>                | <b>\$2</b>        | <b>\$7</b>                | <b>\$1</b>        | <b>\$3</b>        |                   |
| <b>COST PER CUBIC METER</b>               | <b>\$81</b>       | <b>\$252</b>              | <b>\$44</b>       | <b>\$110</b>      |                   |
| <b>COST PER CUBIC YARD</b>                | <b>\$75</b>       | <b>\$232</b>              | <b>\$40</b>       | <b>\$101</b>      |                   |

## 3.2.8 דוגמאות למתקני טיפול Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

בטבלה 10 ניתן לראות דוגמאות לטכנולוגיות טיפול תרמי Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI אשר הוגשו לחברה לשירותי איכות סביבה.

\*לצורך הצגת ערכים אחידים בטבלה: העלויות מוצגות בשקלים ע"פ השערים  $1\$ = 3.8\text{€}$ ,  $1\text{€} = 4\text{₪}$ . תפוקות מוצקות בטונות ע"פ 1 מ"ק קרקע = 1.5 טון. מס' שעות עבודה בשנה = 2,800 (10 שעות עבודה ביום, 280 ימי עבודה בשנה).

## טבלה 10: דוגמאות טיפול תרמי Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

| חברה                        | ניידות                   | הזנה  | תא טיפול                 | חימום                          | טווח ריכוז מזהמים    | מאפייני קרקע                                                                             | סביבה                                                                                           | קצב טיפול*                                                       | תשתיות                                                                                              | עלות*                                                                                                                                                |
|-----------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Dekonta</b><br>[איור 18] | ניתן לניוד על גבי משאיות | רציפה | תוף מסתובב עם דופן כפולה | מבערי שמן לטמפ' של 200-450 מ"צ | 3,000-30,000 מ"ג/ק"ג | מרקם: עד 60% משקלי של מתחת ל=63 מיקרון ועד 40% משקלי של מתחת ל=10 מיקרון. רטיבות: עד 20% | טיפול בגזים: עיבוי. לפי דרישה – חמצון קטליטי, חמצון תרמי, סקראבר. עבודה בתת לחץ בערימות האחסון. | 5,600 טון לשנה (2 טון לשעה) עבור קרקע עם זיהום של עד 30% משקלי   | חשמל: 120kW. מים: 5 מ"ק/שעה. שטח למתן טיפול: 1.5 דונם + שטח אחסון 50 מ"ר. שטח תפעולי כולל: 2-5 דונם | מתקן: 152,000 ₪ - 192,000 ₪ לחודש (כתלות בציוד לטיפול באוויר). שינוע מתקן לישראל: 192,000 ₪. התקנה: 140,000 ₪ - 220,000 ₪. טיפול: 320 ₪ - 480 ₪ לטון |
| <b>Astec</b><br>[איור 19]   | ניתן לניוד על גבי משאיות | רציפה | תוף מסתובב (8")          | טמפ' מרבית של 550 מ"צ          |                      |                                                                                          |                                                                                                 | 112,000 טון לשנה (40 טון לשעה) עבור קרקע עם זיהום של עד 5% משקלי |                                                                                                     |                                                                                                                                                      |

| HPC<br>[איור 20] | מתקן<br>נייח. 3-6<br>חודשי<br>הקמה.                                          | רציפה                                                                               | תוף<br>מסתובב                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                              |  |  | 5,000-100,000<br>טון לשנה עבור<br>קרקע עם זיהום<br>של עד 20%<br>משקלי.                                  |  | עלות טיפול: 160<br>₪ - 480 ₪ לטון |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------|
| SRT<br>[איור 21] | מודולים<br>ניידים<br>ומאפשרת<br>גמישות<br>מבחינת<br>כמות<br>הקרקע<br>המטופלת | הטיפול<br>בקרקע<br>חפורה<br>Ex-Situ<br>מתבצע<br>בערימו<br>ת של כ-<br>1,500<br>טונות | טכנולוגיית<br>TPS -<br>חימום<br>הקרקע<br>מתבצע ע"י<br>הולכה,<br>באמצעות<br>יחידות של<br>צינורות<br>מתכת.<br>שאיבת<br>הגזים<br>להשבה<br>וטיפול<br>מתבצעת<br>ע"י צינורות<br>מחוררים. | צינורות<br>המתכת<br>מחוממים<br>באמצעות<br>גז ומגיעים<br>לטמפ' של<br>600-900<br>מ"צ<br>מעלות,<br>בכדי<br>להגיע<br>לטמפ'<br>טיפול<br>בקרקע של<br>90-250<br>מ"צ |  |  | דרושות 3 יחידות<br>(2 פועלות ו-1<br>גיבוי) בכדי לטפל<br>בכ-1,500 טון,<br>בזמן טיפול של<br>כארבע שבועות. |  | טיפול: 225 ₪ -<br>550 ₪ לטון      |

|                                |                          |       |                                                           |                                   |                      |                                                                                     |                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                       |                                                                                                                                                          |                                                              |
|--------------------------------|--------------------------|-------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Thermo dyne</b>             | ניתן לניוד על גבי משאיות | מנתית | טכנולוגיית MCS – תא טיפול אטום לאוויר המכיל מגשים של קרקע | חימום הקרקע מתבצע ע"י אינפרא-אדום |                      |                                                                                     |                                                                                                                                                                                           | עבור מודול בודד : 33,600-89,600 טון לשנה (12-32 טון ליום) עבור קרקע עם זיהום של עד 15% משקלי                          |                                                                                                                                                          | עלות כל מודול : 3.8-5.7 מיליון ₪. טיפול : 760 ₪ 1140- ₪ לטון |
| <b>Ludreco SA</b><br>[איור 22] | מתקן ניח                 |       | תוף מסתובב                                                | חימום בגז לטמפ' של 350-550 מ"צ.   | ממוצע 20,000 מ"ג/ק"ג | עד 30% חרסית (63) מיקרון ועד 5% חומר אורגני. יעילות מקסימלית ב-15%, ועד 25% מקסימלי | אוויר : כיסוי ערימות, שאיבת אוויר משלבי הטיפול השונים, ציקלונים, חמצון תרמי (850-1,200 מ"צ), בתי שקים וסקראברים רטובים רעש : 110 דציבל ב-5 מ'. עם מגן רעש ניתן להגיע ל-54 דציבל ב-200 מ'. | 42,000-84,000 טון לשנה (15-30 טון לשעה). זמן שהייה של הקרקע בטיפול – כ-12 דקות. כמות קרקע תפעולים של 2,500-3,000 טון. | מים : 5-10 מ"ק/שעה חשמל : 825-1015kW שמן גז/גז טבעי : 1800l/h \ 1800Nm <sup>3</sup> /h שטח : 4 דונם למתקן התרמי, 3 דונם לקדם טיפול, 2 דונם לאחסון תוצרים | עלות המתקן – כ-24 מיליון ₪. עלות טיפול – 240 ₪ -480 ₪ לטון   |





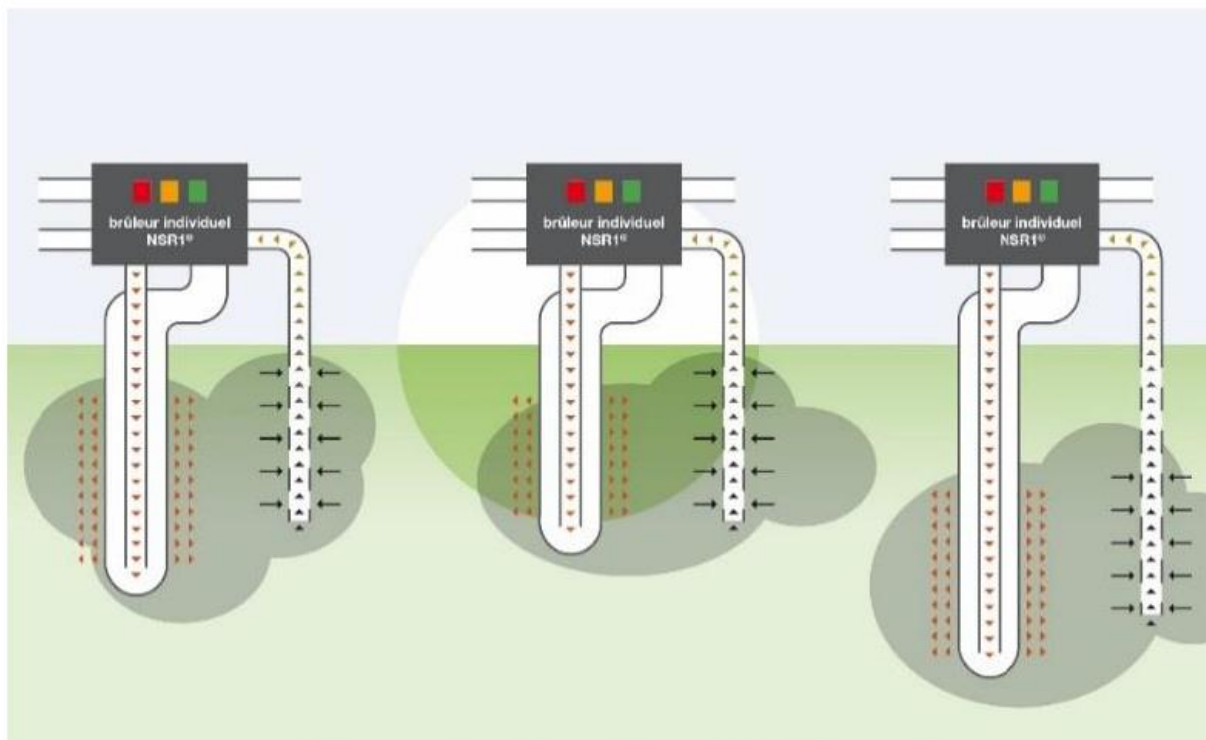
איור 18: מתקן TD נייד בחימום עקיף של חברת Dekonta



איור 19: מתקן TD בחימום ישיר של חברת Astec



איור 20: מתקן TD של חברת HPC

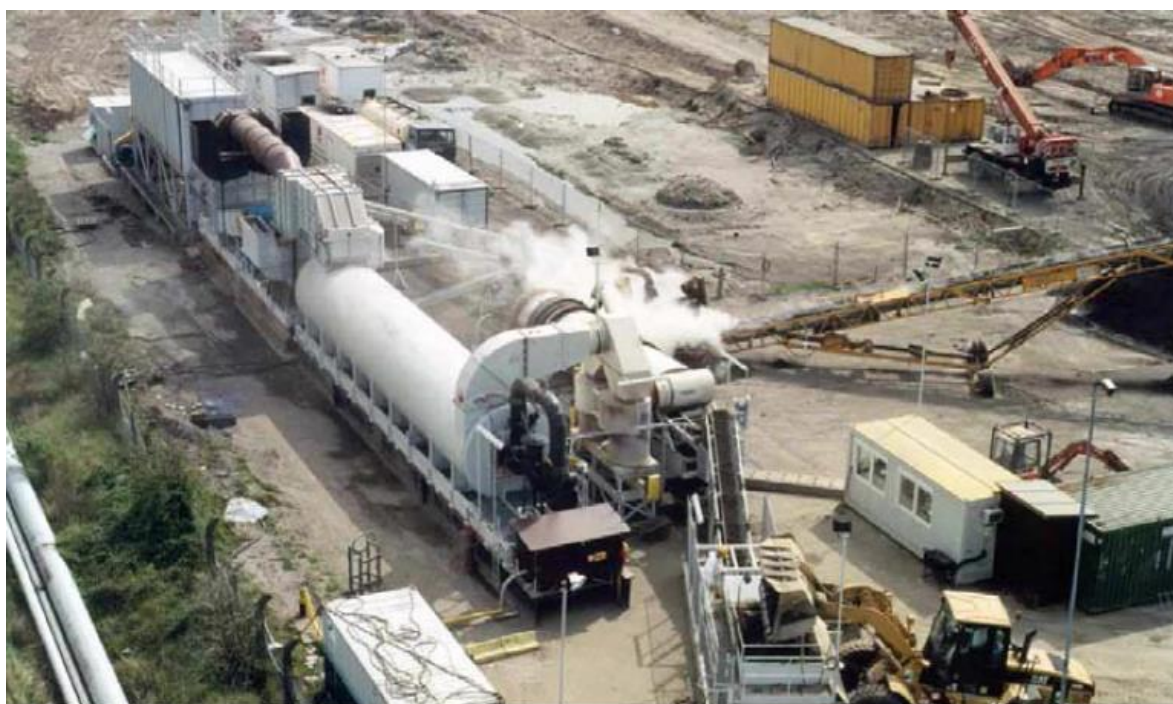


*Figure : Heating elements in the soil*



איור 21 : מתקן TD מסוג TPS של חברת SRT



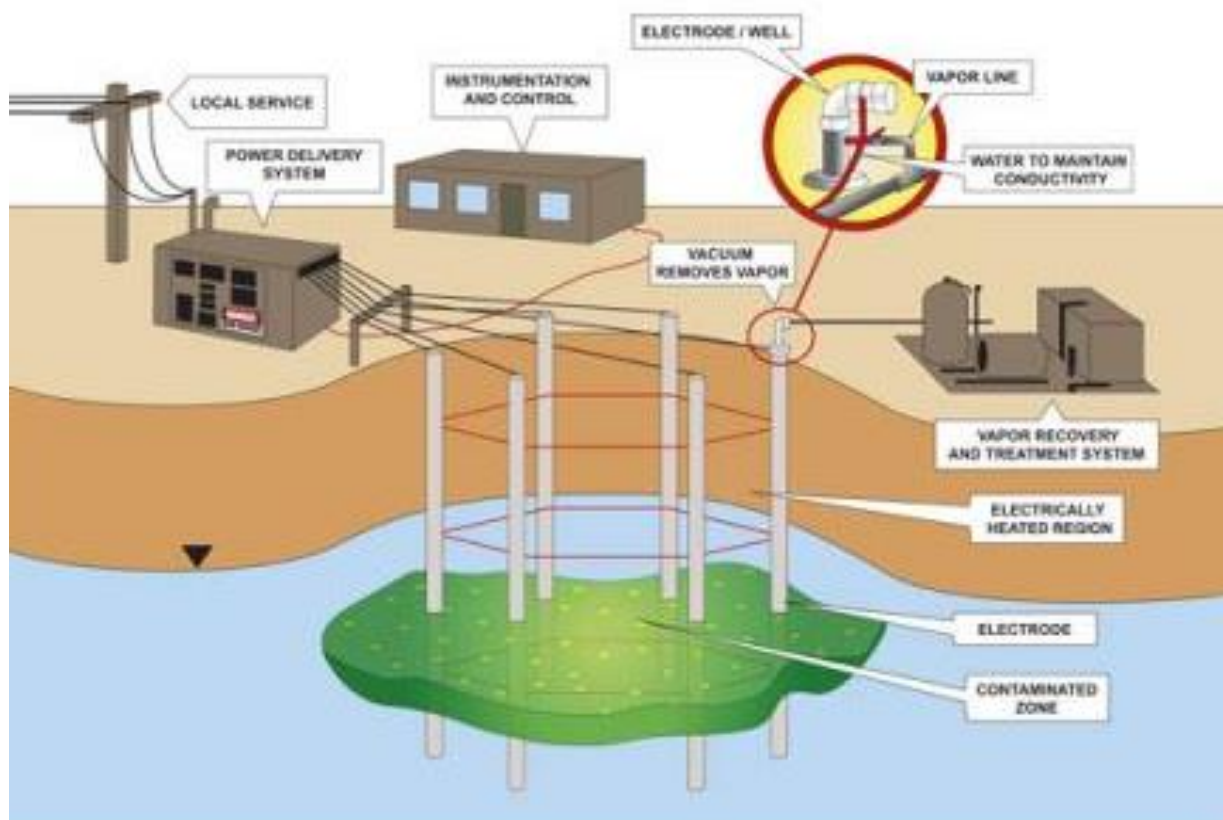


איור 22 : מתקן TD של חברת Ludreco SA

### 3.3 טיפול בטכנולוגיית TD בצורת In-Situ

#### 3.3.1 חימום באמצעות הולכה חשמלית ERH (Electric resistance heating)

בשיטה זו לטיפול תרמי In-Situ TD מועבר זרם חשמלי דרך הקרקע. הלחות בקרקע משמשת כמוליך וההתנגדות של הקרקע עצמה מייצרת חום. הטיפול הנפוץ עושה שימוש בזרם חשמל תלת-פאזי ומערך אלקטרודות משולש לטיפול בקנה מידה מלא של אזורים נרחבים. קיימת שיטה העושה שימוש בזרם חשמל בעל שש פאזות, ומערך אלקטרודות משושה, אך שיטה זו בעייתית מבחינת פיזור החום ועלולה לייצר נקודות קרות/חמות באזור הטיפול. האלקטרודות מותקנות באמצעות קידוחים ישרים או מאונכים, מסוגלות להעביר זרם חשמלי בעומקים שונים ואף לשמש כצנרת לשאיבת הגזים הנפלטות מהקרקע. האלקטרודות יכולות להיות מותקנות בכל עומק בהתאם לצורך לעבוד באזור בלתי-רווי או רווי. אם העבודה היא באזור הבלתי-רווי, יש להוסיף מים לאזור בהן מותקנות האלקטרודות על מנת לשמור על מעבר השטף החשמלי המופק מהן. המרחק בין האלקטרודות הוא בד"כ 4-8 מ'. במהלך התכנון יש לקחת בחשבון התפשטות של זרמים "טועים". איור 23 מציג תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD באמצעות הולכת חשמלית.



איור 23 : תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD בשיטת הולכת חשמלית

### 3.3.2 חימום באמצעות קיטור SEE (Steam enhanced extraction)

בשיטה זו לטיפול תרמי In-Situ TD מוזרק קיטור אל בארות החדרה, והמזהמים אשר התנדפו נשאבים מבארות השבה. בשלב הראשוני הקיטור מחמם את הקרקע, מתעבה והופך למים המתפשטים בקרקע תוך כדי דחיקת גזים ומים. בשלב השני הקרקע מגיעה לטמפר' הקיטור, במקביל להזרקת קיטור נוסף, וכך נוצרת חזית קיטור אשר הולכת ומתפשטת ודוחפת את המים החמים באמצעות הלחץ שנוצר. חזית המים החמים מסייעת בהסעה של NAPL ע"י הקטנת הויסקוזיות של המזהם, וחזית הקיטור מנדפת מזהמים אשר נשארים ספוחים לקרקע. מזהמים אלו עלולים להתעבות בתוך הקרקע טרם שאיבתם החוצה, וליצור חזית של מזהמים בפאזה נוזלית העלולה לחלחל מטה בקרקע. לפיכך, תכנון הטיפול צריך להתחשב באיסוף יעיל של פאזה המזהמים. הסרת המזהמים נעשית בהתאם לנדיפות שלהם – עבור VOC המנגנון העיקרי הוא נידוף, ועבור SVOC המנגנון העיקרי הוא הסעה כ-NAPL. בארות ההשבה שואבות נוזלים וגזים, ומעבירים אותם למתקן טיפול על פני הקרקע. איור 24 מציג תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD באמצעות קיטור.

התאמה של טיפול TD באמצעות קיטור In-Situ לאתר מסוים תלויה במספר גורמים:

#### • סוג הקרקע

- פרמיאביליות של הקרקע – הפרמיאביליות של הקרקע צריכה להיות גבוהה מספיק בכדי לאפשר ספיקת קיטור משמעותית אל הקרקע על מנת לחמם את כל האתר המיועד לטיפול. הזרקה בקצבים גבוהים יותר יכולה להתקיים ע"י הגדלת הלחץ, אך יתכון ששיטת פעולה זו לא תהיה כלכלית.
- הומוגניות הקרקע – בקרקע הטרוגנית הקיטור יזרום דרך נתיבים מועדפים ולא יחדור אל שכבות עם פרמיאביליות נמוכה. במקרים כאלו החדרת הקיטור צריכה להיות משני צידי האזור הבעייתי, כאשר עוביו אינו יותר מכ-3 מטרים. עובי קטן של שכבה עם פרמיאביליות נמוכה יכול לאפשר גם חימום בהולכה, כתוצאה מאיבודי חום גבוהים יותר בשכבות קרקע צמודות בעלות מוליכות גבוהה (כתוצאה מחללים גדולים יותר).

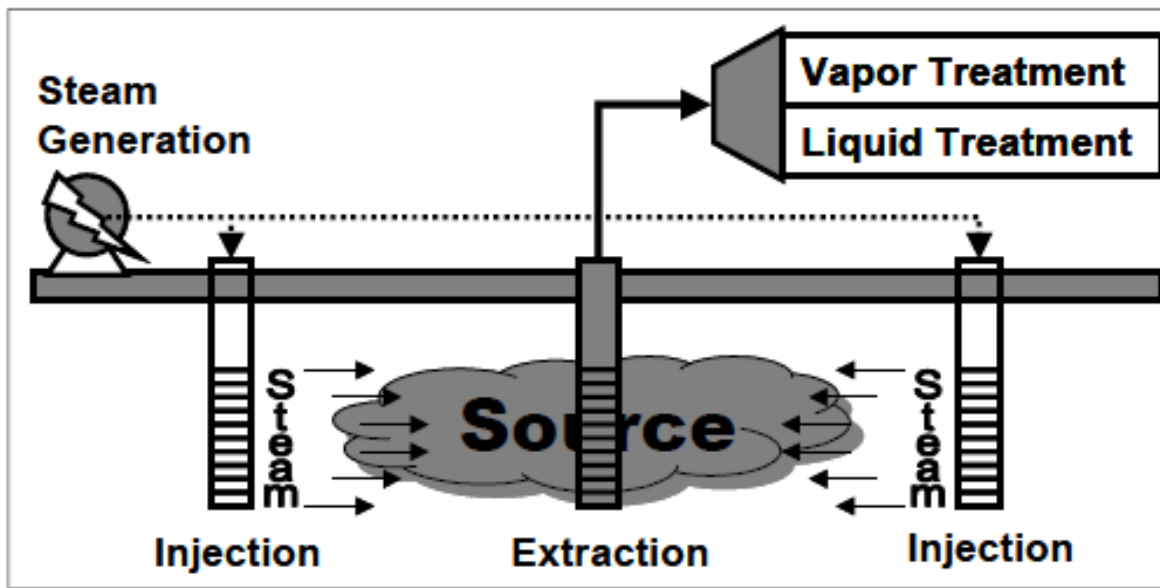
#### • עומק הזיהום

- בכדי להימנע מיצירת לחץ קיטור גבוה מידי אשר יפרוץ את פני הקרקע, ישנה הגבלה כללית של 1.6 PSI לכל מטר עומק. מסיבה זו ישנו קושי לטפל באמצעות קיטור באזורים רדודים, ויתכן שיידרש כיסוי הקרקע במשטח בלתי חדיר לגזים.

#### • מיקום הקידוחים

- הדרך האפקטיבית למקם את קידוחי ההחדרה וההשבה היא להקיף את האזור המזוהם ב-4-6 קידוחי החדרה ולמקם באר השבה במרכזו. במידה ומדובר באזור נרחב - יש לחזור על תבנית זו. המרחק המקובל בין קידוחי החדרה הוא 1.5-18 מ'.
- התקדמות חזית הקיטור תלויה באיזון בין קצב החדרת הקיטור לבין קצב קליטת החום ע"י הקרקע. עם ההתרחקות מקידוח ההחדרה, בנקודה בה הקצבים שווים, חזית הקיטור תפסיק להתקדם, ומיקום קידוח ההשבה צריך להיות לפני נקודה זו.





**איור 24:** תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD באמצעות קיטור

### 3.3.3 חימום באמצעות הולכה TCH (Thermal conductive heating)

בשיטת זו לטיפול In-Situ TD נעשה שימוש במערך קידוחי חימום והשבה אנכיים. כאשר השכבה המזוהמת קרובה לפני הקרקע (עד כ-40 ס"מ) ניתן לעשות שימוש במערך גופי חימום על פני הקרקע. הטיפול במזהמים נעשה במספר מנגנונים: נידוף, זיקוק ע"י קיטור, הרתחה, חמצון ופירוליזה.

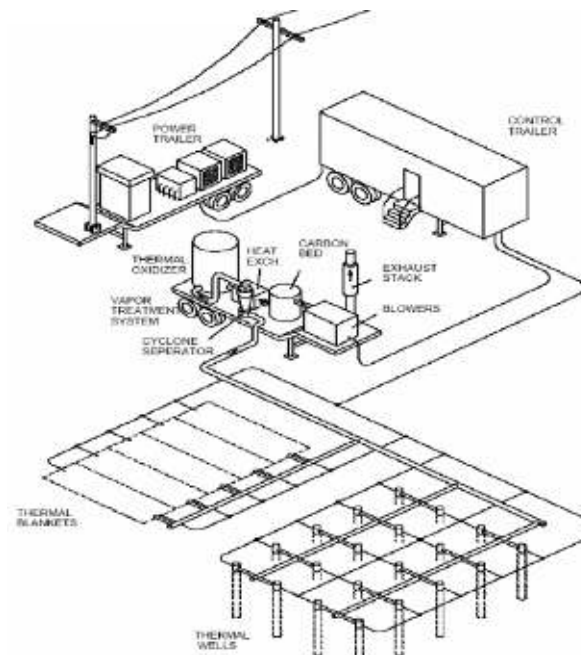
קידוחי החימום מורכבים מצינורות מתכת עם קצה אטום שלתוכם מוכנס גוף חימום חשמלי, הפועל בטמפ' של בין 540 ל-815 מ"צ. פיזור החום הוא אחיד יחסית בכל סוגי הקרקעות השונים. הטמפ' המירבית בצמוד לגופי החימום היא כ-590 מ"צ, והטמפ' הנמוכה ביותר תהיה בין הקידוחים.

קידוחי ההשבה מורכבים באותה צורה כמו קידוחי החימום, אך נמצאים בתוך באר אליה ניתן לחבר משאבת וואקום. הגזים הנשאבים עוברים דרך קרקע בטמפ' גבוה ועל כן יתכן שחלק מהמזהמים יעברו פירוק חלקי לפי שיגיעו לפני הקרקע. איור 25 ואיור 26 מציגים תרשימים סכמתיים של טיפול In-Situ TD באמצעות הולכה.

- **סוג הקרקע:** חימום בהולכה עובד בצורה הטובה ביותר בקרקעות עם אחוזי רטיבות נמוכים, אך נעשה בו שימוש גם בקרקעות עם אחוזי רטיבות גבוהים שהן בעייתיות מבחינת פרמיאביליות. בקרקע עם רטיבות גבוהה ופרמיאביליות גבוהה יכול להיווצר למצב בו מים זורמים לאזורים "יבשים" בהם המים כבר התאדו – מצב אשר ימנע הגעה לטמפ' הנדרשת. במצב כזה נדרש שימוש במערכות לייבוש קרקע רוויה, או שילוב של חימום באמצעות קיטור.

**מיקום הקידוחים:**

- המרחק בין הקידוחים נקבע בעיקר ע"פ הטמפי' המינימלית הדרושה על מנת להגיע לנידוף המזהמים, ותלויה בסוג המזהם, עומק הזיהום ורטיבות הקרקע.
  - הדרך האפקטיבית למקם את קידוחי ההחדרה וההשבה היא להקיף את האזור המזהם ב-6 קידוחי חימום במבנה משושה ולמקם באר השבה במרכזו. אם מדובר באזור נרחב - יש לחזור על תבנית זו. עבור SVOC מדובר במרחקים של 1.5-2.3 מ', ועבור VOC מדובר במרחקים של 3.5-6 מ'.
  - הקידוחים יכולים להתבצע באמצעות דחיקה ישירה.
  - **צריכת אנרגיה:** שיטת טיפול זו דורשת אנרגיה רבה, ולעיתים הטיפול נעשה בהפסקות יומיות בהתאם למגבלות על צריכת חשמל (מגבלות הספקה או מגבלות עלות).
- יתרונות הטיפול באמצעות הולכה:
- השיטה כמעט ולא רגישה לסוג הקרקע מכיוון שטווח ערכי הולכת החום בקרקעות שונות הוא קטן יחסית.
  - השיטה מתאימה לטיפול במגוון רחב של אזורי טיפול מבחינת גודל השטח, הטרוגניות הקרקע, עומקה, המצאות פסולת בקרקע, וכד'.
  - **חסרונות הטיפול באמצעות הולכה:**
    - בעומקים רדודים נדרש כיסוי של שטח הטיפול על מנת למזער איבודי חום
    - הליתולוגיה של הקרקע, או המצאות פסולת בניין בקרקע, יכולה להשפיע על היכולת לקדוח לעומקים הנדרשים.
    - אזורים עם פרמיאביליות גבוהה בעייתיים מבחינת איבודי חום ומבחינת חדירת מים לאחר החימום (מוליכות הידראולית מקסימלית לאזורים רוויים –  $10^{-3}$  ס"מ/שניה)



**איור 25:** תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD באמצעות הולכה.

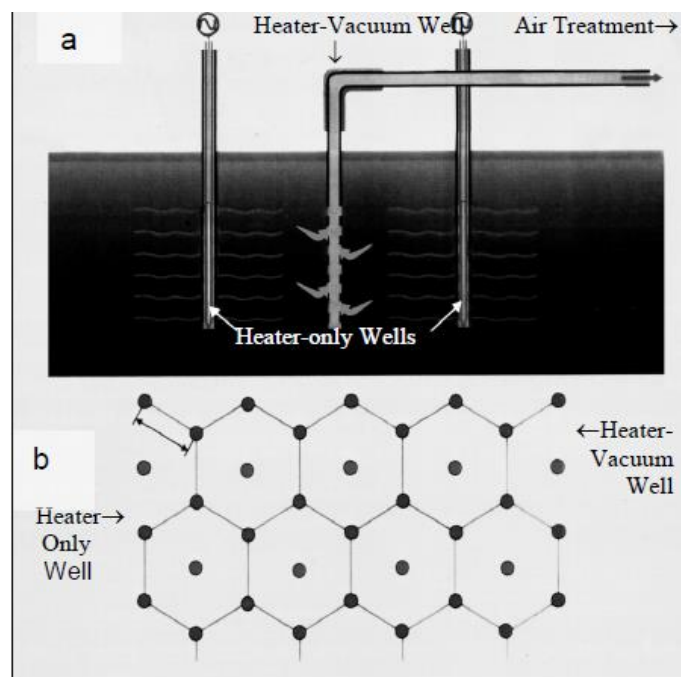


Figure 2-15. Schematic of Typical ISTD Well Field.  
 (a) Cross-section showing one heater-vacuum well and two heater-only wells within a larger pattern.  
 (b) Plan view showing thermal well field layout. Heater-vacuum wells are located in the center of each hexagon, and well spacing typically ranges from 6 to 15 feet.

**איור 26:** תרשים סכמתי של מיקום הקידוחים השונים בטיפול In-Situ TD באמצעות הולכה.



### 3.3.4 חימום באמצעות גלי רדיו (RFH (Radio-frequency heating

בשיטה זו לטיפול In-Situ TD נעשה שימוש בתדרים גבוהים של שדה מגנטי חילופי. התהליך מתבסס על המצאות חומרים דיאלקטריים עם פיזור מטענים לא מאוזן, אשר רוטטים כתוצאה מהשדות החשמליים המתחלפים וכך מייצרים חום. השיטה עושה שימוש בתדרים המאושרים לשימוש תעשייתי. שימוש בתדרים גבוהים יותר מייצר חום גבוה יותר בתווך זמן קצר יותר, אך עומק החדירה שלהם נמוך יותר.

מערך הטיפול מורכב ממקור חשמל תלת-פאזי, מקור רדיו עם אוסילטור המייצר מקור זרם נמוך בתדירות הרצויה, מספר מגברים המחוברים בטור, מגבר סופי שמשחרר את הזרם בצורה הרצויה, אלקטרודות או אנטנות, מערך ניטור, כיסוי מתכתי מגן על פני האתר ומערכת איסוף וטיפול בגזים.

מערכת האלקטרודות מוחדרות ע"י קדיחה או דחיקה ישירה לעומק הטיפול הרצוי ויכולות לשמש גם כבארות השבה. בארות השבה יכולים גם לשמש כבורות בולעים לשדות המגנטיים ובכך לתחום את אזור הטיפול.

### 3.3.5 טיפול בטכנולוגיית ויטריפיקציה (ISV (In-Situ Vitrification

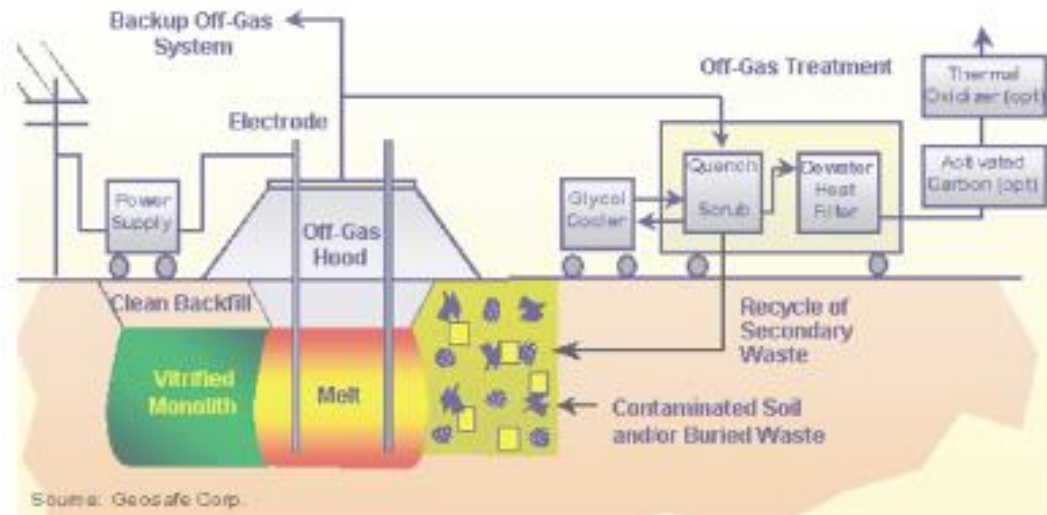
בשיטת טיפול In-Situ זו נעשה שימוש באלקטרודות (בטכנולוגיות הישנות יותר) או בפלסמה (בטכנולוגיות החדשות יותר) על מנת להמיס את הקרקע וליצור זכוכית וקריסטלים מיוצבים. זו אינה טכנולוגיית TD אך היא מובאת כאן בשל היותה טכנולוגיית טיפול In-Situ אשר יכולה לשמש כטכנולוגיה משלימה לטיפול TD In-Situ אחרים. איור 27 מציג תרשים סכמתי של טיפול In-Situ באמצעות ויטריפיקציה.

- **שימוש באלקטרודות:** אלקטרודה ראשונית (לרוב עשויה מגרפית) מוחדרת לקרקע ומחממת אותה מפני הקרקע כלפי מטה לטמפר' של 1,400 – 2,000 מעלות. עומק הטיפול בשיטה זו הוא כ-6 מטרים עבור התקנה אחת.

- **תכונות הקרקע:**

- יעילות הטיפול תלויה בהמצאות 1.4-15 אחוזים של תחמוצות מתכת אלקליות בחומר המטופל, על מנת לשמור על איזון בין מוליכות חשמלית וטמפר' התכה. יותר מידי מתכות אלקליות מעלות את המוליכות של הקרקע ומונעות היווצרות חום מספקת.
- אם תכולת הסיליקה בקרקע גבוהה מספיק, הקרקע תהפוך לזכוכית, תוך כדי נידוף או פירוליזה של מזהמים אורגניים. לאחר התקררות הקרקע, רוב המזהמים יהיו כלואים במנוולית הזכוכית.

- **טיפול בגזים:** המערכת צריכה לכלול כיסוי של שטח הטיפול לקליטת גזים. לפני הטיפול במזהמים שבגזים הנפלטים יש לקרר אותם.



**איור 27:** תרשים סכמתי של טיפול In-Situ באמצעות ויטריפיקציה.

### 3.3.6 ניטור תת פני הקרקע במהלך טיפול In-Situ

ניטור תת פני הקרקע לאורך הטיפול הכרחי בכדי לווסת את האנרגיה המוכנסת לאזור הטיפול, מדידת אפקטיביות הטיפול מבחינת הגעה לטמפ' היעד ואחוזי הרחקה של מזהמים. הנתונים הנאספים מנותחים על בסיס יומי על מנת לקבוע את אופן הפעלת הטיפול. היקף ותדירות הניטור תלוי בהיקף הטיפול, ביעדים, בהטרוגניות של האזור המטופל, ובהגבלות הכלכליות. עלות מערך הניטור (מכשור, דיגוס, מעבדות אנליטיות, ניתוח הנתונים ועוד) מהוות אחוז משמעותי מעלות הטיפול הכוללת.

הניטור יכול להתקבל ממכשור המותקן בתוך הבארות עצמן או בקידוחים יעודיים על פי הצורך. המכשור צריך להיות עמיד בטמפ' ובלחצים גבוהים ועמיד בפני קורוזיביות.

- **לחץ:** מידע על לחצים בתת הקרקע נועד למנוע דליפות אל מחוץ לאזור המטופל, ופריצות לפני הקרקע ומאפשר לקבוע את האפקטיביות של מחזורי החדרת הקיטור או החימום. בנוסף, מידע על לחצים ממספר נקודות מאפשר לקבוע את משטר הזרימה של מים וגזים בקרקע. ניטור עליה בלחץ מאפשר לקבל אינדיקציה על התנדפות של מזהמים.
- **ספיקת נוזלים:** מד ספיקה של נוזלים בקרקע משמש בטיפולים תרמיים על מנת לפקח על מאזן האנרגיה בקרקע ולעקוב אחר ההשבה של מזהמים מבארות ההשבה. על מנת לבצע מאזני מסה על מזהמים, יש לדגום באופן מייצג את הנוזלים הנשאבים מהבארות על מנת לתרגם את הנפחים המדווחים למסה של מזהם.
- **טמפרטורה:** הטמפ' היא הפרמטר המשמעותי ביותר בטיפול תרמי, ועל כן הניטור צריך להיות ברזולוציה גבוהה. הניטור מספק מידע על פיזור החום והאפקטיביות של החדרת האנרגיה לקרקע, זיהוי אזורים אשר הגיעו לטמפ' היעד, אזורים בהם מתקיים הרס של המזהמים ע"י החימום, אזורים בהם קיימים מים (אזורים מתחת לטמפ' הרתיחה), ביצוע חישובים עקיפים ללחץ הקיטור הרטוב,

השוואה של המודלים משלב התכנון לביצוע בפועל, ועוד. ניטור טמפ' במהלך הטיפול מתבצע בעומקים שונים (במרווחים של 1-2 מ' לכל עומק האזור המטופל), בקידוחי החימום (טמפ' מקסימלית) או בבורות ייעודיים בין הקידוחים (טמפ' מינימלית) כמדד להגעה לטמפ' יעד לנידוף מזהמים. ניטור בקצות אזור הטיפול מאפשר לוודא הגעה לטמפ' היעד בכל אזור הטיפול. ניטור באזורים הטרוגניים משמש לבקרה על יעילות הטיפול ופיזור אפקטיבי של החום.

- **טומוגרפיה (ERT – Electrical Resistance Tomography):** שיטת ניטור גיאופיזית אשר מעבירה זרם חשמלי דרך הקרקע ליצירת מפת דו או תלת מימדית של התנגדויות החומר בתת הקרקע. העברת הזרם מתבצעת דרך מספר מוקדים, ע"י פריסת רשת של אלקטרודות או ע"י מעבר על האזור המיועד לטיפול עם מכשור נייד. ניתוח המידע המתקבל מהניטור הוא מורכב, מכיוון שההולכה החשמלית של החומר בתת הקרקע תלוי בטמפ' הקרקעות, בטמפ' המים, סוג המינרל ממנו מורכבת הקרקע, אחוז הרטיבות, מליחות, המצאות פאזות מזהמים לא מסיסות (NAPL), המצאות גזים ועוד. לפיכך, יש חשיבות בביצוע ניטור טומוגרפי לא רק במהלך הטיפול, אלא גם לפני תחילת הטיפול, בכדי לקבל תמונת רקע מהימנה. על מנת לשפר את הדיוק של הניטור הטומוגרפי ניתן לכייל אותו בהתאם למידע על הפרמטרים לעיל אשר נאספו מדיגום נקודתי.
- **כימיה:** אנליזות כימיות למים וגזים המושבים, ושל מים וגזים הנדגמים ממקומות שונים באזור הטיפול, על מנת לנטר את התקדמות הטיפול ואת האפקטיביות שלו. הניטור יאפיין את מזהמי המטרה, ותוצרי פירוק שלהם, את תנאי הסביבה (pH, מליחות, חמצן מומס, פד"ח, עכירות וכד') ואינדיקטורים נוספים להתקדמות הטיפול (TOC למשל). הניטור יכול להתבצע ע"י קיטים בשטח, או ע"י מעבדה מוסמכת. בפרויקטים גדולים ישנה עדיפות למעבדה בשטח הפרויקט בכדי ליצור זמינות מירבית ואמינות של האנליזות ללא צורך בשינוע והמתנה הפוגמים באמינות. תדירות דיגום המזהמים יכולה לנוע בין 3 ימים לשבועיים, תלוי בקצב הטיפול. יש לתת את הדעת על נקודות דיגום נכונות וטיפול נכון בדגימה על מנת להמנע מאיבוד חומרים נדיפים. דיגום ידני וקריאת נתונים מקידוחים בזמן טיפול יכול לחשוף את הדוגם להתפרצות של גזים ומים בטמפ' גבוהות ומסוכנות. באיור 28 ניתן לראות דוגמה למבנה של באר ניטור מאפשרת דיגום של מים בצורה בטיחותית וללא איבוד VOC.
- **דיגום גזים:** בזמן דיגום גזים לתוך קניסטר, חלק מהמהזמים יתעבו, ולכן יש צורך לבצע אנליזות גם לפרקציה הגזית וגם לפרקציה הנוזלית של הדגימה, ולהשתמש בהנחות על קבועי ש"מ בכדי לחשב את ריכוז המזהמים בגזים אשר נדגמו במקור. בנוסף, יש לקחת בחשבון שמזהמים מסויימים יתעבו בקרבת באר הדיגום עצמה, ועל כן הריכוזים אשר ידגמו יהיו גבול תחתון בלבד לריכוז של המזהמים המוסעים בפועל.
- **ניטור רציף:** בהתאם למגבלות התקציב ורגישות התפעול, יתבצע שימוש בניטור פרמטרים רציף בנקודות מפתח של הפרויקט - נקודות אינדיקטיביות או נקודות הדורשות תפעול רגיש יותר.

- **ניטור לחות:** ניטור לחות משמעותי בטיפולים אשר מתבצעים בקרקעות רוויות. עבודה בקרקע עם לחות מינימלית חוסכת אנרגיה רבה. מדידת הלחות באמצעות בקרים רציפים אשר מוחדרים לקרקע צריכה להתבצע הרחק ממקורות ההחדרה וההשבה אשר עלולים להפריע לקריאות.

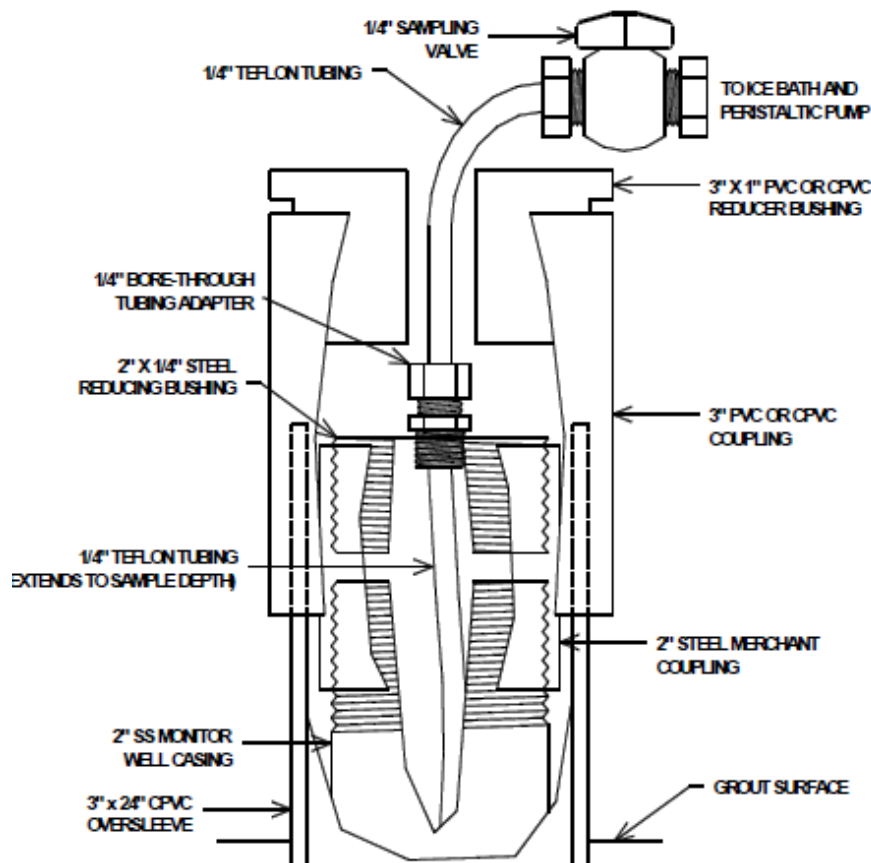


Figure 8-1. Modified Monitoring Well.

**איור 28 :** מבנה של באר ניטור מאפשרת דיגום של מים בצורה בטיחותית וללא איבוד VOC

### 3.4 פירוליזה (Pyrolysis)

#### 3.4.1 תיאור הטכנולוגיה

פירוליזה היא שיטה של טיפול תרמי, שבשונה מטיפול TD נועדה לפירוק כימי של מזהמים לתוצרים גזיים בסביבה עניה בחמצן. חימום הקרקע מתבצע בצורה דומה לתהליכי טיפול תרמי אחרים, אך החוסר הסטוכיומטרי בחמצן והטמפי' הגבוהה יחסית מונעים את תהליך החמצון של המזהמים האורגניים, כך שתוצרי הפירוליזה הם גזים דליקים (פחמן חד חמצני, מימן, מתאן והידרוקרבונים נוספים). הפירוליזה מתרחשת בתנאי לחץ ובטמפי' של 430 עד 1150 מ"צ. בדומה למערכות טיפול תרמי אחרות, יעילות הטיפול היא מעל 99%.

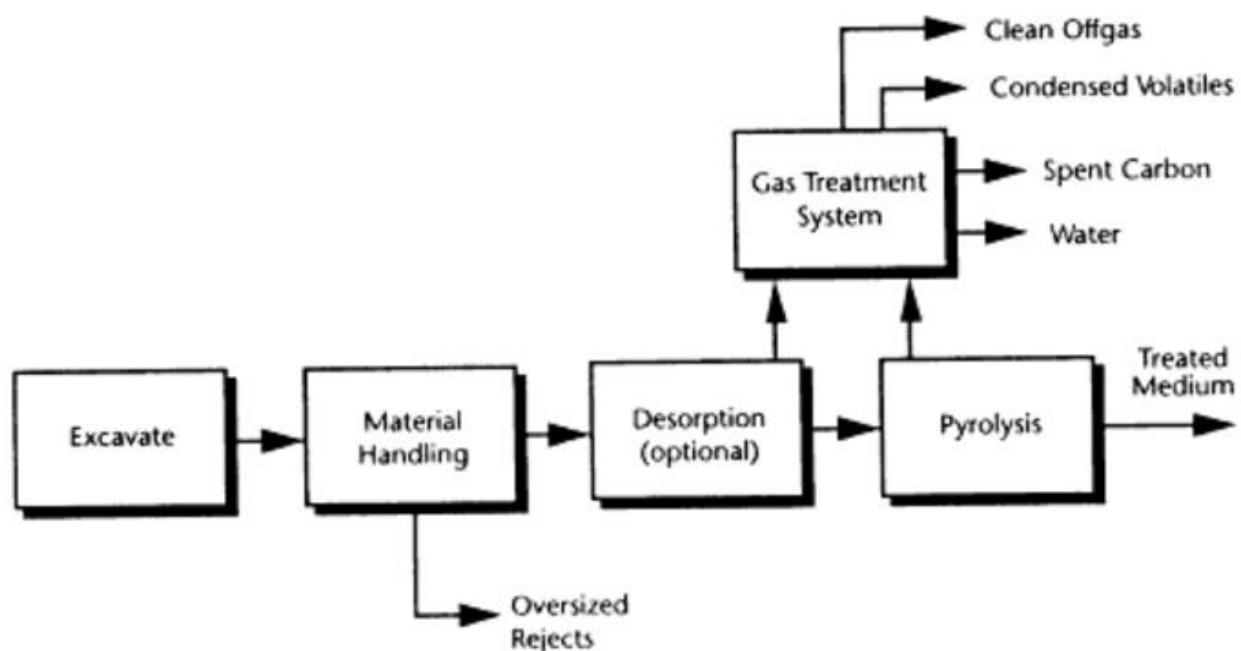
תוצרי הלוואי של תהליך זה הם מעט נוזלים ושאריות מוצקות (Coke) המכילות פחמן מקובע ואפר. את תוצרי הלוואי המוצקים יש לדגום למזהמים על מנת לבדוק האם ניתן לערבבם בחזרה אל הקרקע המטופלת או שנדרש טיפול משלים (למשל ייצוב/מיצוק) במידה וקיים זיהום במתכות או במזהמים אנאורגניים אחרים. הטיפול בגזים כולל שריפת הגזים בתהליך שריפה משני, וואו עיבוי חלקי. הטיפול בחלקיקים כולל הרחיקה באמצעות בתי שקים או סקראברים רטובים.

באיור 29 ניתן לראות תרשים סכמתי של תהליך טיפול בפירוליזה, אשר בדומה לטיפול תרמי בשיטת TD כולל סינון פסולת ואבנים כטיפול קדם וטיפול בחלקיקים ובגזים הנפלטים לאחר הטיפול התרמי. השוני המהותי הוא תא הטיפול אשר פועל בטמפ' גבוהה יותר המביאה לפירוק המזהמים בסביבה עניה בחמצן.

מתקני הטיפול דומים מאוד למתקנים של שריפה (Incineration) אך פועלים בטמפ' נמוכות יותר ושמירה על סביבה עניה בחמצן. הקרקע המטופלת צריכה להיות מיובשת לחלוטין ( $<1\%$  רטיבות) בכדי לשמור על תהליך יעיל. תהליך הפירוליזה עלול ליצור חומצות הידרוהלדיות וסולפידיות קורוסיביות כאשר הקרקע מזוהמת בהלוגנים ובתרכובות גופרית. כמו כן ריכוזים גבוהים של ארסן וואו כספית עלולים לפגוע ביעילות התהליך.

כאשר הקרקע מכילה מזהמים נדיפים אחד המנגנונים של הרחקת המזהמים יהיה גם נידוף בדומה ל-TD, ניתן להשתמש במתקני TD כשלב מקדים לטיפול פירוליזה.

עלויות הטיפול הן כ-300\$ לטון קרקע מזוהמת.



איור 29: תרשים סכמתי של תהליך פירוליזה

### 3.4.2 דוגמאות למתקנים מתוך מסמכי ה-RFI

#### מתקן פירוליזה של חברת HPC

- הפירוליזה מתבצעת בתוף מסתובב בטמפ' של 200-300 מעלות.
- המתקן מיועד לטפל בריכוז מזהמים בקרקע של עד 200 גר'ק"ג, בקצב של 5,000-100,000 טון לשנה.
- הקמת המתקן אורכת כ-4 עד 6 חודשים. המתקן אינו נייד.
- עלות טיפול (ללא עלות הקמת המתקן) – 50-350 יורו לטון קרקע.

### 3.5 שריפה (Incineration)

#### 3.5.1 תיאור הטכנולוגיה

טיפול בטכנולוגיות שריפה מתבצע בצורה של חימום הקרקע בטמפ' גבוהות בסביבה עשירה בחמצן על מנת לנדף ולשרוף שריפה מלאה עד כמה שניתן של מזהמים אורגניים ומזהמים אורגניים מוכלרים בפסולות מסוכנות, חומרי נפץ, PCB ודיאוקסינים. על מנת להשיג שריפה יעילה, טווח הטמפ' הוא גבוה יחסית לטיפול TD או לפירוליזה: 870-1,200 מ"צ. אוויר מוזרם אל תא הטיפול בריכוזים גבוהים על מנת ליעל את תהליך השריפה, ונעשה שימוש בתוספת דלקים אל תא הטיפול על מנת לשמור על בערה מספקת. טיפול נוסף נדרש בגזים ובשיירים המוצקים של תוצרי השריפה. השימוש במשרפות, במיוחד במתקני משרפה קבועים מחוץ לאתר, הוא נפוץ מאוד במאות אתרים של טיפול בקרקעות בארה"ב. בדומה למערכות טיפול תרמי אחרות, עיילות הטיפול היא מעל 99%.

הפעלת מתקני משרפות נתון לרגולציה מחמירה בנושאי איכות האוויר הנפלט, אחסון וטיפול בפסולות ותוצרי לוואי מהתהליך, רעש ועוד. הטיפול בתוצרי השריפה בזרם הגז לפני הפליטה לאוויר מתבצע ע"י מערכות של בתי שקים, ציקלונים, סקרברים וכד' להרחקת חלקיקים וניטרול מזהמים כגון NOx ו-Sox. שריפה אינה מטפלת בזיהום במתכות, ואפר תחתון עשיר במתכות מצטבר במתקן הטיפול ודורש טיפול מייצב. מתכות אשר מתנדפות בטמפרטורות גבוהות דורשות מערכות טיפול לגזים לפני שחרורם לסביבה. בנוסף, המתכות עלולות להגיב עם מזהמים נוספים (בעיקר כלור וגופרית) בטמפ' גבוהות וליצור תוצרי ביניים נדיפים ורעילים. טיפול בתוצרי ביניים אלו יכול להתבצע ע"י תגובת שיכוך (quench) קאוסטית.

קרקעות בעלות ריכוזי נתרן ואשלגן גבוהים עלולות ליצור אפר בעל טמפ' התכה נמוכה אשר יוצר עם הזמן שכבה של חומר דביק אשר יכול לסתום את המתקן.

- **כבשן מסתובב (Rotary Kiln) -** כבשן בצורת צילינדר מסתובב, המותקן בהטיה, ובתוכו מבער אשר פועל בטמפ' של עד 980 מ"צ.
- **מצע מורחף (Circulating Bed Combustor) -** הקרקע מורחפת במתקן באמצעות לחץ אוויר ומסוחררת באמצעות ציקלון, ליצירת סביבת שריפה יעילה, הומוגנית וטורבולנטית. מתקן CBC פועל בטווח טמפ' נמוך יחסית של עד 870 מ"צ.



טבלה 11 מסכמת הערכת עלויות לטיפול בטכנולוגיות שריפה.

טבלה 11: הערכת עלויות לטיפול בטכנולוגיות שריפה

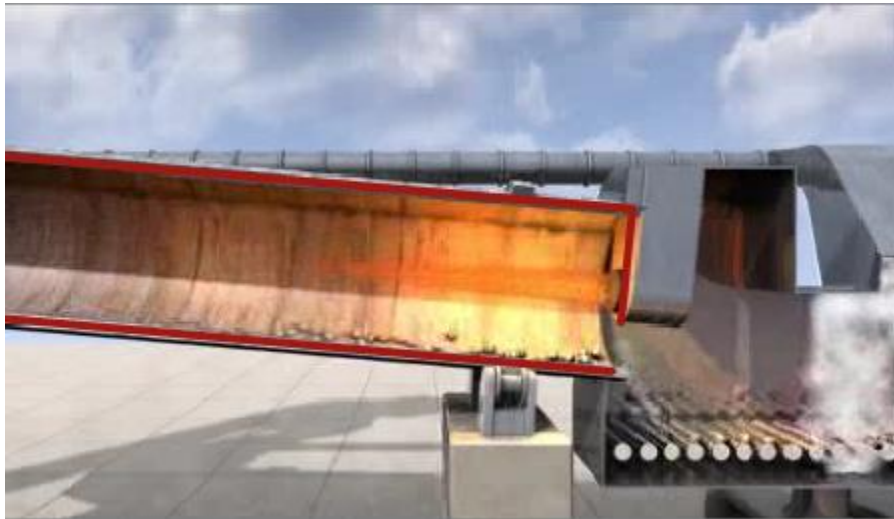
| SOIL TECHNOLOGY: Incineration       |              |              |              |               |
|-------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| RACER PARAMETERS                    | Scenario A   | Scenario B   | Scenario C   | Scenario D    |
|                                     | Small Site   |              | Large Site   |               |
| Remedial Action:                    | Easy         | Difficult    | Easy         | Difficult     |
| Media/Waste Type                    | Soil         | Sediment     | Soil         | Sediment      |
| Contaminant                         | SVOC         | SVOC         | SVOC         | SVOC          |
| Approach                            | Ex Situ      | Ex Situ      | Ex Situ      | Ex Situ       |
| System Definition:                  |              |              |              |               |
| Type of Waste                       | Soil         | Sediment     | Soil         | Sediment      |
| Total Volume of Waste (CY)          | 15,000       | 15,000       | 100,000      | 100,000       |
| Size Reduction Materials Processing | No           | Yes          | No           | Yes           |
| Safety Level                        | D            | D            | D            | D             |
| Waste:                              |              |              |              |               |
| Moisture Content (%)                | 20           | 55           | 20           | 55            |
| Ash Content (%)                     | 78           | 40           | 78           | 40            |
| Bulk Density (Lbs/CY)               | 2430         | 2430         | 2430         | 2430          |
| Mobilization Distance (Mi)          | 50           | 50           | 50           | 50            |
| O&M:                                |              |              |              |               |
| Years of O&M                        | N/A          | N/A          | N/A          | N/A           |
| Additional Costs:                   |              |              |              |               |
| O&M                                 | \$0          | \$0          | \$0          | \$0           |
| Remedial Design (3%)                | \$347,647    | \$511,396    | \$2,024,029  | \$3,096,904   |
| Incineration Marked-Up Costs        | \$11,588,242 | \$17,046,523 | \$67,467,651 | \$103,230,123 |
| TOTAL MARKED-UP COSTS               | \$11,935,889 | \$17,557,919 | \$69,491,680 | \$106,327,027 |
| COST PER CUBIC FOOT                 | \$30         | \$44         | \$26         | \$40          |
| COST PER CUBIC METER                | \$1,047      | \$1,540      | \$914        | \$1,399       |
| COST PER CUBIC YARD                 | \$796        | \$1,171      | \$695        | \$1,063       |

### 3.5.2 דוגמאות למתקני טיפול Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

#### מתקן שריפה להכנת קלינקר של מפעלי נשר

- המתקן ממוקם ברמלה וקולט קרקעות פסולות וקרקעות מזוהמות לשריפה, כתוספים לתהליך ייצור הקלינקר. הקרקעות עוברות טיפול קדם של גריסה והפרדה מפסולות מוצקות.
- השריפה מתבצעת בכבשן מסתובב המחומם באמצעות מבער הפועל על פחם טחון, גז ופטרוליום קוק (תוצר לווי של תהליכי זיקוק נפט) ומגיע ל-1,870 מ"צ. טמפ' היעד של חומרי הגלם הנשרפים היא 1,480 מ"צ. איור סכמתי של הכבשן באיור 30.
- קצב הקליטה עבור קרקעות תלוי בסיליקה מודול (SIM) ובאחוז הכלור: עבור  $SIM < 3.3\%$  יכולות הקליטה הן כ-1,000 טון ליום עם כלור מתחת ל-0.2% וכ-300 טון ליום עבור כלור מתחת ל-0.6%. עבור  $3.3\% < SIM < 5\%$  יכולות הקליטה הן כ-100 טון ליום. עבור קרקעות חוליות יכולות הקליטה הן כ-200 טון ליום. טבלה 12 מסכמת את תכונות הקרקע והמזהמים הנדרשות.

קליטת פסולות וקרקעות מזוהמות מתבצעת תחת אישור רוחבי של המשרד להגנ"ס, בהתאם לתכונות כימיות ופיסיקליות של הקרקע ושל המזהמים, אשר מבטיחות צמצום פליטות לסביבה והתאמה לתהליך במפעל.



איור 30: הכבשן המסתובב של ייצור הקלינקר במפעל נשר.

**טבלה 12:** תכונות הקרקע והמזהמים הנדרשות לקליטה לטיפול במפעל נשר

| רטיבות | TOC | Clay minerals*1 | Cl  | SO <sub>3</sub> | Hg     | Cd+Tl | Metals *2 |
|--------|-----|-----------------|-----|-----------------|--------|-------|-----------|
| %      | %   | %               | %   | %               | ppm    | ppm   | ppm       |
| <25    | <3  | >50             | 0.6 | <0.5            | <0.155 | <20   | <3000     |

\*1 = % $[\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3]$  •

\*2 = ppm $[\text{Sb} + \text{As} + \text{Pb} + \text{Cr} + \text{Co} + \text{Cu} + \text{Mn} + \text{Ni} + \text{V}]$  •

### מתקן שריפה של חברת HPC

- השריפה מתבצעת בכבשן מסתובב בטמפ' גבוהות של 870-1,200 מ"צ.
- דלקים מוזרמים למערכת על מנת לשמור על בערה קבועה בטמפ' הרצויה.
- המתקן מיועד לטפל בריכוז מזהמים בקרקע של עד 200 גר"ק"ג, בקצב של 5,000-100,000 טון לשנה.
- הקמת המתקן אורכת כ-4 עד 6 חודשים. המתקן אינו נייד.
- עלות טיפול (ללא עלות הקמת המתקן) – 50-350 יורו לטון קרקע מזהמת.

### 3.6 שיקולים סביבתיים

#### 3.6.1 טיפול בפליטות

טיפול תרמי דורש טיפול בפרקציות של המזהמים אשר לא הושבו מהגזים אשר התאדו מהקרקע, לפני שהן נפלטות לאוויר. ישנם שני מוקדי פליטות עיקריים – הגזים הנפלטים מתא הטיפול, והגזים הנפלטים ממערכת אספקת החום. המזהמים הצפויים להיפלט ממערכת החימום הם  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , ו- $\text{CO}_2$ . המזהמים הצפויים להיפלט מתא הטיפול הם בעיקר VOCs וחומר חלקיקי, אך גם שאריות של מתכות (על גבי החלקיקים או בפאזה גזית), PCBs, דיאוקסינים ופורנים (כתלות בטמפ' הטיפול). טבלה 13 מסכמת את סוגי המזהמים הנפלטים במהלך הטיפול התרמי.

**טבלה 13:** סוגי המזהמים הנפלטים במהלך טיפול תרמי.

| Air pollutants                                                     | Potential sources                                                                               | Emission controls options                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Combustion gases (e.g. NO <sub>x</sub> , CO, SO <sub>2</sub> )     | Heating system exhaust (e.g. boilers, burners etc)                                              | Design of plant (e.g. low-NO <sub>x</sub> burners)<br>Choice of fuel (e.g. electricity or natural gas)<br>System efficiency<br>Combustion control<br>Selective catalytic/non-catalytic reduction |
| Acid gases (e.g. H <sub>2</sub> S)                                 | Treatment of wastes containing sulphur                                                          | Neutralisation – e.g. using wet or dry scrubber                                                                                                                                                  |
| VOC's & odour (e.g. mercaptans and other organo-sulphur compounds) | Volatile contaminants desorbed from waste material into off-gas                                 | Condensers<br>Thermal oxidisers/afterburners<br>Catalytic oxidisers<br>Combustion in boiler or engine<br>Carbon adsorption                                                                       |
| Particulates                                                       | Carried over into off-gas by air extraction system (e.g. ID fan)<br><br>Boiler plant combustion | Cyclones<br>Scrubbers<br>Fabric filters/bag-filters<br>HEPA filters<br>Choice of fuel (e.g. electricity or natural gas)                                                                          |
| Metals (low volatility)                                            | Carried over into off-gas with particulates                                                     | Carbon adsorption<br>Particulate abatement – see above                                                                                                                                           |
| Dioxins & furans<br>PCBs                                           | Treatment of chlorinated wastes leading to formation in off-gas                                 | Waste acceptance analysis<br>Particulate abatement<br>Carbon adsorption<br>Operating temperatures                                                                                                |
| Volatilised metals (e.g. mercury)                                  | Volatile contaminants desorbed from waste material into off-gas                                 | Waste acceptance analysis<br>Carbon adsorption]<br>Operating temperatures                                                                                                                        |

### 3.6.2 שינוע הקרקעות בטיפול Ex-Situ

הובלת הקרקע מחוץ לאתר, לעיתים דרך שטחים ציבוריים ו/או בכבישים ראשיים, עלולה לגרום למטרדים סביבתיים רבים הכוללים רעש, אבק, ריחות, שפיכה בלתי מכוונת של הפסולת ממשאיות, עומסי תנועה ועוד. בנוסף, ישנם סיכונים פוטנציאליים נוספים העלולים להיגרם בעת הובלת חומרים מסוכנים.

### 3.6.3 אחסון הקרקעות בטיפול Ex-Situ

אחסון הקרקע המזוהמת, הקרקע בזמן טיפול קדם והקרקע לאחר הטיפול, יהיה על אזור אטום ובצורה שתאפשר איסוף תשטיפים. ייתכן ויידרש טיפול בתשטיפים, בהתאם לאיכותם. תשטיפים הנאספים מהקרקעות או מתהליך הטיפול, צריכים להיות מאוחסנים בצורה נאותה, המתחשבת בתכונות הכימיות שלהם, עם מערכות טיפול למניעת פליטות לאוויר. יש להתחשב בתכונות הפיזיות-כימיות של הקרקעות בשלבים השונים ולהתאים את אזורי האחסון כך שלא יפגע האיטום.

הקרקע עצמה תהיה מכוסה למניעת נגר עילי ופליטות חומרים נדיפים וחלקיקים לסביבה. יש להתחשב בהצטברות גזים נדיפים דליקים - האחסון יהיה מאוורר, ובמידת הצורך עם טיפול באוויר הנפלט. יש לבצע כיסוי והרטבה מבוקרת של קרקע אשר יכולה ליצור מפגע חלקיקים ואבק.

במידת האפשר יש להפריד בין קרקע המזוהמת בחומרים אורגניים לבין קרקע המזוהמת בחומר אי-אורגניים, ובין קרקע אחרי טפול לבין קרקע לפני טיפול החורגת מערכי הסף אשר הוגדרו. מיהול קרקעות מזוהמות בקרקעות נקיות אינו מקובל. במידה ונדרש ערבוב של הקרקע לצורך טיפול-קדם או הכנסת תוספים לצורך הטיפול, יש לנהל רישום ומעקב אחר הכמויות בכדי לוודא שלא נעשה מיהול לצורך שינוי הגדרות הקרקע המזוהמת, ובכדי שתכונות הקרקע לא ישתנו לרעה מבחינה כלשהי שעלולה לפגוע במהלך הטיפול.

לאחר סיום הטיפול, הקרקע צריכה להתקרר לפני שמשנעים אותה ממקום למקום, בכדי לצמצם את פליטת החלקיקים, גזים וריחות. השינוע יכול להתבצע במערכות סגורות המתחשבות בפליטות אלו.

יש לשטוף ולנקות את מתקני הטיפול בין אצוות של קרקעות המכילות מזהמים שונים.

#### 3.6.4 טיפול במזהמים אשר לא הושבו

יש לאפיין את הפליטות מחלקי המתקן השונים באמצעות דיגום ואנליזות על מנת לכמת את סוג וכמות המזהמים הנפלטים. כתלות בכמות המזהמים אשר לא הושבו מזרם הגז, יהיה צורך בטיפול (השמדה או הרחקה) במזהמים לפני שחרורם לאוויר. מערכת טיפול זו צריכה להיות מנוטרת עבור כל הפרמטרים הרלוונטיים. באיור 31 ניתן לראות תרשים סכמתי של מערכות לטיפול במזהמים בזרם הגז.

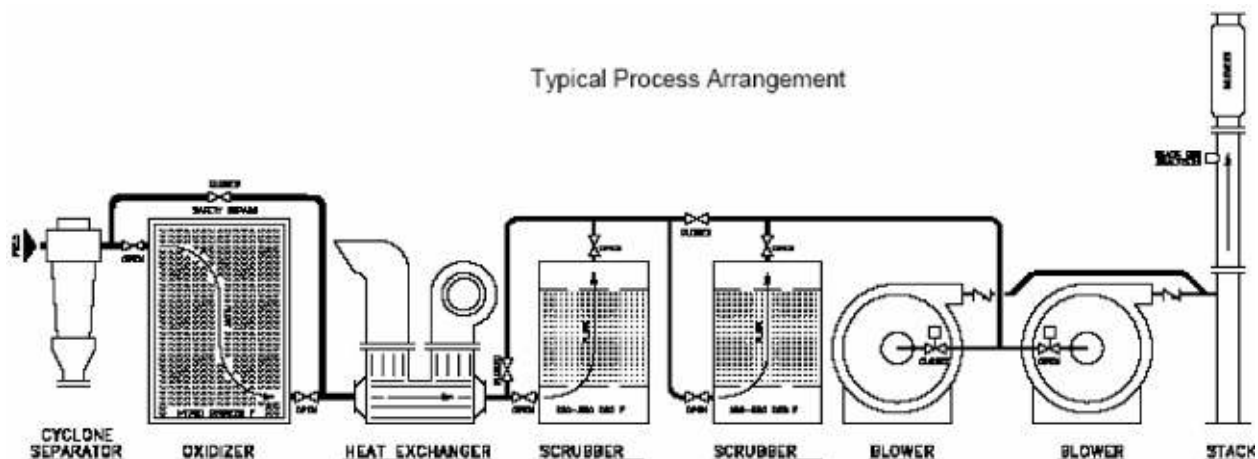
#### • נדיפים

- הניטור צריך לכלול אנליזות עבור כל טווח המזהמים בכדי לאפיין את כל טווח התפעול של הטיפול מבחינת טמפר' וסוגי פסולות.
- תהליכי הטיפול במזהמים השאריים צריכים להיות מנוטרים גם הם, ובתקשורת תפעולית עם שלבי הטיפול הקודמים.

#### • חלקיקים

- הלחץ בתא הטיפול וספיקת הגזים אל מחוץ לתא הטיפול משפיעים על כמות החלקיקים אשר תשאב אל מחוץ לתא. איזון נחוץ של הפרמטרים התפעוליים יאפשר טיפול במזהמים הספוחים לקרקע תוך כדי הקטנה של החלקיקים הנשאבים החוצה.
- בתי שקים לחלקיקים עם קוטר קטן (עד כ-10 מיקרון), ציקלונים לחלקיקים עם קוטר גדול יותר (עד כ-15 מיקרון), טיפול בגזים עם מזהמים אורגניים - שריפה באמצעות מבערים או ספיחה על מסנן פחמן פעיל ולטיפול גזים עם תחמוצות - סקראבר רטוב סקראבר ונטורי.
- כאשר יש שימוש בסקראברים רטובים לטיפול בחלקיקים, יש להתחשב בדרכי הטיפול בתשטיפים שהם ייצרו.
- חלקיקים נוצרים גם בשריפת הדלקים לחימום תא הטיפול, ושימוש בגז טבעי יכול להקטין את כמות החלקיקים הנפלטים.

- גזי בעירה
  - עדיפה בחירה בדלקים בעלי אחוז נמוך של גופרית, ותהליכי בערה של אשר יפחיתו פליטות  $\text{NO}_x$  (שליטה בטמפ', שימוש בקטליזטורים).
  - התקנת מערכות לשליטה בבעירה ותחזוקה שותפת של המתקנים.
- פליטות למים
  - הזרמים המזהמים כוללים זרמים של מזהמים מושבים, מי תהליך, מי נגר עילי של האתר, תשטיפים מערימות הקרקע המזהמות, וכד'
  - ככל הניתן יש לעשות שימוש חוזר בזרמי מים מזהמים, בתהליך הטיפול עצמו או בתהליכים תומכים במתקן.
  - ניתן לבצע תהליכי השבה לזרם אורגני נוזלי (תהליכי השבה לשמנים ולממסים).
- פסולת אחרת
  - פסולת גדולה הנמצאת בתוך הקרקע (אבנים וסלעים, פסולת בניין, פסולת עירונית ועוד), פחם פעיל רווי במזהמים, פילטרים וקטליזטורים.
  - אפשרויות לשימוש חוזר ומחזור של זרמי פסולת צריכות להיות חלק מתכנון המתקן



**איור 31:** תרשים סכמתי של מערכות לטיפול במזהמים בזרם הגז

### 3.6.5 רעש

בטבלה 14 ניתן לראות את מידת הרעש המופקת מחלקים ופעילויות שונות של מתקן שריפה ומתקני טיפול בתוצרי טיפול תרמי



**טבלה 14:** מידת הרעש המופקת מחלקים ופעילויות שונות של מתקן שריפה ומתקני טיפול בתוצרי טיפול תרמי

| Area relevant to noise/<br>main emitters                                                                                            | Reduction measures                                                                                                                                             | Noise level<br>$L_{WA}$ in dB(A)                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Delivery of waste i.e. noise from lorries etc.                                                                                      | Tipping hall closed to all sides                                                                                                                               | 104 - 109                                                                     |
| Shredding                                                                                                                           | Scissors in tipping hall                                                                                                                                       | 95 - 99                                                                       |
| Waste bunker                                                                                                                        | Noise insulation of the building with gas concrete, gates with tight design                                                                                    | 79 - 81                                                                       |
| Boiler building                                                                                                                     | Enclosure with multi-shell construction or gas concrete, ventilation channels with connecting link silencers, tight gates                                      | 78 - 91                                                                       |
| Machine building                                                                                                                    | Use of low-noise valves, noise-insulated tubes, noise insulation of the building as described above                                                            | 82 - 85                                                                       |
| Flue-gas cleaning:<br>- ESP<br>- Scrubbing<br>- Suction draught<br>- Chimney<br>- Total flue-gas cleaning system                    | Noise insulation, enclosure of the facility e.g. with sheets with trapezoidal corrugations, use of blimps for the suction draught and silencer for the chimney | 82 - 85<br>82 - 85<br>82 - 84<br>84 - 85<br>89 - 95                           |
| Disposal of residues<br>- Bottom ash discharge<br>- Loading<br>- Transportation from the plant<br>- Total waste management residues | Enclosure, loading in the bunker                                                                                                                               | 71 - 72<br>73 - 78 (day)<br>92 - 96 (day)<br>92 - 96 (day)<br>71 - 72 (night) |
| Air cooler                                                                                                                          | Silencers on the suction and pressure sides (see also BREF on cooling systems for further information)                                                         | 90 - 97                                                                       |
| Energy transformation facility                                                                                                      | Low-noise design, within specially constructed noise proofed building                                                                                          | 71 - 80                                                                       |
| <b>Total level <math>L_{WA}</math> of the plant</b><br><b>Day</b><br><b>Night</b>                                                   |                                                                                                                                                                | <b>105 - 110</b><br><b>93 - 99</b>                                            |
| Note: Day/night indicates that the operation is usually carried out during the day or night.                                        |                                                                                                                                                                |                                                                               |

### 3.6.6 שיקולים סטטוטוריים-סביבתיים

בעת תכנון שימוש בקרקע מטופלת באתר מסוים יש לקחת בחשבון את שיקולים הבאים: שימוש חוזר באתר, פיתוח מחודש של האתר לשימוש הקהילה, שימושי קרקע עתידיים באתר, שיתוף הקהילה במידע אמיתי, מדויק, ובפורמט פשוט והכנת תכנית מגירה למקרי חירום.

### 3.6.7 שיקולים אקולוגיים בטיפול In-Situ

- **השפעה אקולוגית:** השפעות החימום על הקרקע עלולות לפגוע בבע"ח ובמיקרו-אורגניזמים בקרקע ובאזור הטיפול
- **השפעות מיקרוביולוגיות:** חימום הקרקע יגרום לאוכלוסייה המיקרוביאלית לנטות לכיוון מיקרואורגניזמים מזופיליים ותרמופילים. שיטות טיפול המייבשות את הקרקע יגרמו לירידה חדה בגודל האוכלוסיה באופן כללי, ובסמוך לקידוחי החימום יתכן סטריליזציה מלאה של הקרקע.
- **השפעות על בע"ח:** בע"ח רב-תאיים כמו תולעים וחרקים ימותו או יברחו מהאזור המטופל. בע"ח המתגוררים במחילות בקרקע יברחו מאזור הטיפול המיידי בגלל החום ומסביבתו הרחבה יותר בשל הרעש ועבודות התשתית הנלוות. בע"ח אשר ניזונים מבע"ח קטנים אלו יסבלו ממחסור במזון. באזורים מסוימים, במיוחד בחורפים קרים, נצפתה תופעה של בע"ח אשר נמשכו לשולי אזור הטיפול דווקא בגלל החום היחסי. נדרש סקר אקולוגי וביולוגי לאזור הטיפול על מנת לאמוד את מידת ההשפעה של חימום הקרקע על מארג המזון ועל אוכלוסיות בע"ח מקומיות, במיוחד אם מדובר באזור גידול ייחודי, במינים אנדמיים או בבע"ח בסכנת הכחדה.

טבלת סיכום טכנולוגיות טיפול תרמי

טבלה 15 מבוססת על הסקירה המדעית-הנדסית שנעשתה, ועל מידע אשר סופק ע"י חברות המפעילות טכנולוגיות טיפול תרמי כפי שמופיע במסמכי ה-RFI אשר נשלחו אל החברה לשירותי איכות סביבה.

טבלה 15 : סיכום טכנולוגיות טיפול תרמי

● - יעילות/מתאים/לא מהווה גורם מגביל ● - יעילות בינונית \ התאמה בינונית \ גורם מגביל

○ - יעילות נמוכה \ התאמה נמוכה \ גורם מגביל מאוד

| קריטריונים            | סיווג             | הערות                                                                                                                                                              |
|-----------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ישימות הטכנולוגיות    | זמינות            | רוב מתקני הטיפול בטכנולוגיית TD יכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן של עד מספר חודשים בודד. מתקן לשריפה בנשר זמין ופועל תחת אישור רוחבי של המשרד להגנ"ס.             |
|                       | נסיון בישראל      | פרט למפעל לשריפה בנשר, אין בארץ נסיון משמעותי עם מתקנים מסוג זה.                                                                                                   |
| התאמת לקבוצות המזהמים | דלקים             | יעיל מרבית בריכוזים של עד כ-30,000 מ"ג/ק"ג                                                                                                                         |
|                       | VOC (הלוגנים)     |                                                                                                                                                                    |
|                       | VOC (ללא הלוגנים) |                                                                                                                                                                    |
|                       | SVOC (הלוגנים)    |                                                                                                                                                                    |
|                       | SVOC (לא הלוגנים) |                                                                                                                                                                    |
|                       | מתכות             | יעיל בטיפול בכספית ועופרת בלבד אשר להן טמפ' נידוף נמוכה יחסית.                                                                                                     |
|                       | חומרים אנאורגניים |                                                                                                                                                                    |
| התאמה לתכונות הקרקע   | חומר נפץ          |                                                                                                                                                                    |
|                       | חול               | היעילות האנרגטית גדלה ככל שאחוז החול גבוה יותר                                                                                                                     |
|                       | חרסית וטין        | ההשקעה באנרגיה ובעיות תפעוליות עולים עם עליה באחוז החרסית והטין. מתאים לקרקעות עם עד 30%-40% חרסית.                                                                |
|                       | הטרונגי           | בטיפול Ex-Situ נדרש טיפול קדם להומוגניזציה. בטיפול In-Situ קרקע הטרונגית מקשה על תכנון טיפול יעיל.                                                                 |
|                       | רטיבות הקרקע      | ההשקעה באנרגיה עולה עם העלייה ברטיבות. רטיבות מקסימלית של עד כ-25%. באחוזים גבוהים יותר ב-Ex-Situ יש צורך בתהליכי סחיטה וייבוש, וב-In-Situ יש צורך בהשפלת מי תהום. |

| קריטריונים                                              | סיווג                                                                                                      | הערות                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| עומק אפקטיבי                                            | ●                                                                                                          | בחומס באמצעות קיטור יש לוודא שאין פריצה של פני הקרקע.                                                                       |
| לטיפול In-)                                             | ●                                                                                                          |                                                                                                                             |
| (Situ)                                                  | ●                                                                                                          |                                                                                                                             |
| טיפול קדם בטיפול Ex-Situ (בהתאם למאפייני הקרקע והזיהום) |                                                                                                            |                                                                                                                             |
| קצב טיפול                                               | ●                                                                                                          | עבור טיפול Ex-Situ - טיפול מהיר. 5,000-150,000 טון לשנה, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 10 להשוואה.   |
| הרחקת מזהמים                                            | ●                                                                                                          | מעל ל-99%, עמידה בערכי סף מחמירים                                                                                           |
| מרקם הקרקע לאחר טיפול                                   | ○                                                                                                          | ללא שינוי ניכר ב-TD בטמפ' נמוכות, אך עם העלייה בטמפ' ומעבר לשיטות פירולזה ושריפה יש השחמה של הקרקע וקבלת גודל גרגר דק יותר. |
| תשתיות נדרשות ליישום הטכנולוגיה                         | ●                                                                                                          | 5-10 דונם                                                                                                                   |
|                                                         | ○                                                                                                          | תהליך עתיר אנרגיה. חיבור למקור אנרגיה לחימום (חשמל, גז טבעי, דלקים שונים)                                                   |
|                                                         | ●                                                                                                          | חיבור מים במידה ויש צורך בסקראברים רטובים                                                                                   |
| השפעה על הסביבה                                         | ○                                                                                                          | כל המזהמים עוברים לפאזה גאזית ונדרש טיפול בכמויות גדולות של גזים המכילים מזהמים וחלקיקים.                                   |
|                                                         | ●                                                                                                          | מיעוט תשטיפים, רק במידה ומתקיים טיפול בגזים עם סקראבר רטוב, ומערימות הקרקע לפני טיפול.                                      |
| עלויות                                                  | עלות מתקן                                                                                                  | עבור מתקן Ex-Situ - ראה טבלה 10 להשוואה.                                                                                    |
|                                                         | עלות טיפול                                                                                                 | 160 ש"ח - 550 ש"ח, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 10 להשוואה.                                         |
|                                                         | עלות טיפול במתקנים קיימים בארץ (הפירוט לצורך השוואה וייחוס בלבד ואינו מתייחס לשאר הפרמטרים התפעוליים לעיל) | ביוסויל: 160 ש"ח - 300 ש"ח לטון                                                                                             |

### 3.7 מקרי בוחן בעולם (International Case Studies)

בטבלה 16 ניתן לראות מספר מקרי בוחן לטיפול תרמי מהעולם

**טבלה 16:** מקרי בוחן לטיפול תרמי מהעולם

| Project Name                     | Location                        | Parties Involved<br>(Contractors,<br>Consultants,<br>Regulators etc...) | Years<br>Performed                                  | Primary<br>Contaminants                                                                       | Type of<br>Soil/Waste                                                            | Treatment Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Operating<br>Capacity                      | Treatment Costs                            |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Sungai Bera<br>Remediation       | Negara<br>Brunei<br>Darussalam  | Envirosoil                                                              | 1999-2002                                           | Aliphatic<br>hydrocarbons,<br>PAH, asphaltenes,<br>waxes, resins. Up<br>to 150,000 ppm<br>TPH | Oilfield<br>wastes from<br>oil<br>exploration<br>and<br>production<br>activities | Materials were treated on site in an<br>Astec Indirect Thermal Recovery<br>system where solids were thermally<br>treated in an indirect rotary kiln.<br>Contaminants were thermally<br>desorbed in the kiln, then recovered<br>in the system's scrubbers and<br>condenser. A scrubber water<br>treatment plant continually<br>separated the recovery<br>hydrocarbons. Which was sent<br>back to the oilfield distillation<br>column for re-use. | 12 ton per<br>hour, 240<br>ton per<br>day. | Treatment:<br>4,000,000 USD                |
| Central<br>Treatment<br>Facility | Vineland,<br>New Jersey,<br>USA | Mid Atlantic<br>Recycling<br>Technologies Inc                           | Start: 1997<br>Facility is<br>still in<br>operation | Coal tar<br>contaminated<br>soils, up to 30,000<br>ppm TPH                                    | Soil                                                                             | Permanent treatment facility was<br>permitted and constructed. The<br>thermal process equipment consists<br>of an Astec 8' direct fired thermal<br>treatment plant, truck scales, two<br>large soil processing buildings and<br>assicated conveying systems.                                                                                                                                                                                    | 45 ton per<br>hour, 900<br>ton per<br>day  | Facility<br>construction:<br>3,200,000 USD |

| Project Name                                             | Location                       | Parties Involved<br>(Contractors,<br>Consultants,<br>Regulators etc...)    | Years<br>Performed | Primary<br>Contaminants                                                                     | Type of<br>Soil/Waste                                                             | Treatment Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Operating<br>Capacity                     | Treatment Costs                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coleman-<br>Evans Wood<br>Preserving site<br>Remediation | Whitehouse,<br>Florida,<br>USA | Weston Solutions inc                                                       | 2002-2004          | Pentachlorophenol<br>(up to 25,000 ppb)<br>and dioxin/furan<br>compounds (up to<br>5.5 ppb) | Soils<br>contaminated<br>from wood<br>preservative<br>manufacturing<br>activities | Materials were treated on site in an<br>Astec Indirect Thermal Recovery<br>System where solids are thermally<br>treated in an indirect rotary kiln.<br>Contaminants were thermally<br>desorbed in the kiln, then<br>controlled by the system's<br>scrubbers and condenser.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 18 ton per<br>hour, 360<br>ton per<br>day | Facility<br>construction:<br>3,500,00 USD,<br>Processing:<br>25,000,000 USD<br>(220,000 ton)                                                        |
| Former Shell<br>Bulk Storage<br>Terminal                 | Eugene,<br>OR, USA             | Hart Crowser, Inc.<br><br>Oregon Department<br>of Environmental<br>Quality | 1997-1998          | Benzene, GRO,<br>DRO                                                                        | Contaminated<br>Soil and<br>Groundwater                                           | The site was a 0.4-hectare site in a<br>light commercial area of Eugene,<br>OR. The remediation approach<br>included the installation of 277<br>heater-vacuum wells and 484<br>heater –ponly wells to treat<br>approximately 11,430m <sup>3</sup> of<br>contaminated soil. The thermal<br>wells were spaced on 2.13 m<br>centers and installed to a depth of<br>3.05-3.66 m.<br>Thermal treatment lasted 120 days<br>from the time construction was<br>finalized. The thermal well system<br>achieved an average in-situ<br>temperature of 282°C. An<br>estimated 200,000 lbs of<br>hydrocarbons were removed and<br>treated. |                                           | The total turnkey<br>cost for design,<br>permitting,<br>operation,<br>demobilization and<br>reporting was<br>\$2,971,000 or<br>260\$/m <sup>3</sup> |



| Project Name                                | Location          | Parties Involved<br>(Contractors,<br>Consultants,<br>Regulators etc...) | Years<br>Performed | Primary<br>Contaminants                                      | Type of<br>Soil/Waste             | Treatment Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Operating<br>Capacity | Treatment Costs |
|---------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Chlorinated Solvent Manufacturing Facility. | Portland, IN, USA | H.J., Vineger. G.L. Stegemeir et.al.                                    | 1997 (6 months)    | PCE (3,500 mg/kg)<br>Cis-1,2DCE (39 mg/kg)<br>TCE (79 mg/kg) | Contaminated Soil and Groundwater | <p>Remediation Objectives: PCE-8 mg/kg, TCE-25mg/kg, cis-1,2 DCE 0.8 mg/kg</p> <p>The remediation approach included 145 heater vacume wells that extended up to 5.8 m in to the subsurface. Secondary and tertiary treatment was accomplished using a flameless thermal oxidizer and carbon bed (both located in an adjacent trailer). The remediation goals were achieved. The southern part of the site achieved an operational temperature of 260°C while the northern part of the site only achieved 100°C (due to an influx of water).</p> |                       | Not Available   |

| Project Name                           | Location        | Parties Involved<br>(Contractors,<br>Consultants,<br>Regulators etc...) | Years<br>Performed | Primary<br>Contaminants                                    | Type of<br>Soil/Waste | Treatment Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Operating<br>Capacity | Treatment Costs                                                                                                          |
|----------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Former Wood<br>Treatment<br>Area AOC-2 | Alhambra,<br>Ca | California<br>Department of Toxic<br>Substances Control                 | 2002-2003          | PAH,PCPs,<br>Dioxins, Furans,<br>Petroleum<br>Hydrocarbons | Contaminated<br>Soil  | The former wood treatment area (AOC-2) occupied a 0.81 –hectare portion of the Southern California Edison Facility. The total treatment volume of 11,500 m <sup>3</sup> . The treatment area includes a variety of buried service features including treatment tanks, structural remains from the facility and various buried utilities. The remediation approach included an edge-centered hexagonal pattern with 2.16 m well spacing (780 wells total), a minimum target temp. of 325°C maintained for 3 days. The off-gas treatment consisted of a thermal oxidizer, heat exchange, and GAC. |                       | Total cost for the design, permitting, operation, demobilization, and reporting was \$5,343,500 or 480 \$/m <sup>3</sup> |

## 4 שטיפת קרקע

### 4.1 תיאור הטכנולוגיה

שטיפת קרקע היא תהליך טיפול בקרקע שמטרתו העיקרית היא צמצום נפח הקרקע המזוהם הנדרש בטיפול, ע"י הפרדה בין הפרקציות המזוהמות של הקרקע לאלו הנקיות. חלק משמעותי מעלות פרויקט שיקום קרקעות מזוהמות אשר מתבצע Ex-Situ הוא עלויות השינוע של נפחי הקרקע אשר נחפרו אל מתקני הטיפול. באמצעות הפחתת נפח הקרקע הדרוש שינוע למתקן טיפול, והיכולת לעשות שימוש חוזר בפרקציות הנקיות של הקרקע המתקבלות, ניתן להפחית בצורה משמעותית את העלות הכוללת של השיקום.

קיימים שני מנגנונים אפשריים לתהליך הטיפול במתקן שטיפת קרקע Ex-Situ\On-Site:

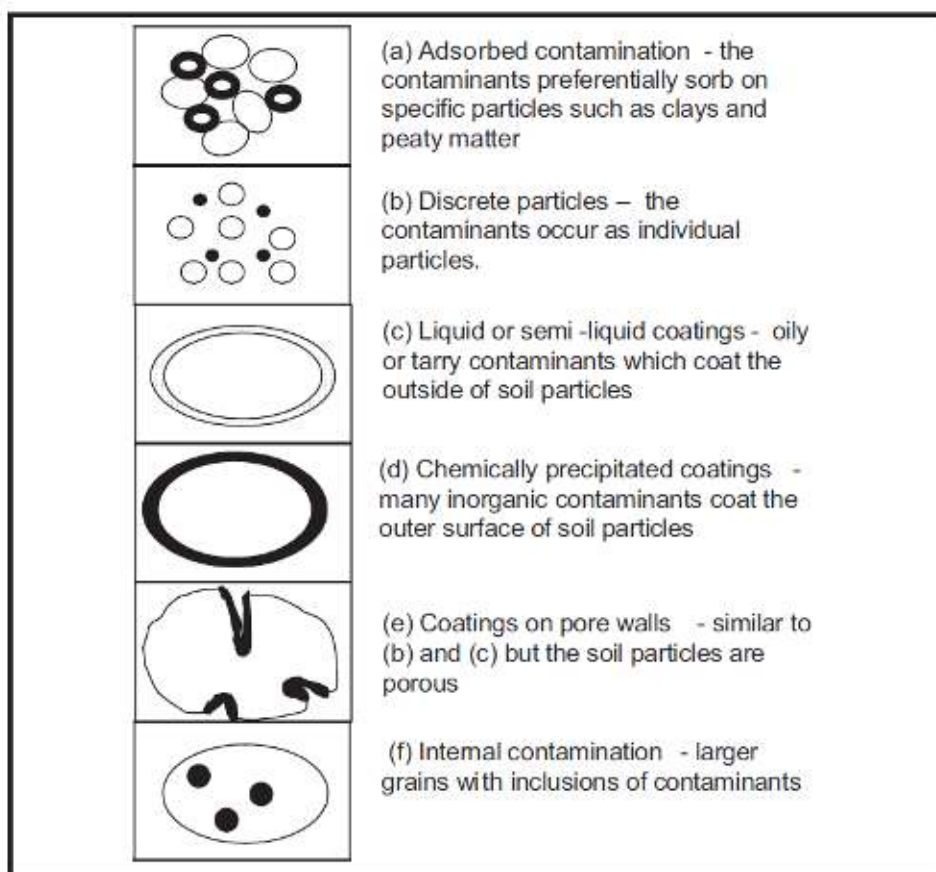
- מנגנון פיסיקלי: המנגנון הפיסיקלי הוא המנגנון הנפוץ והיעיל ביותר במתקני שטיפת קרקע. מזהמים אורגניים ואנאורגניים רבים נוטים להיספח אל הפרקציות הדקות של הקרקע (חרסית, סילט), בעוד הפרקציות החוליות אינן מזדהמות. ע"י הפרדה בין הפרקציות החרסיתיות והחוליות של הקרקע המזוהמת, מתבצעת הפרדה של המזהמים מכלל הקרקע המזוהמת אל נפח קרקע שאריתי קטן משמעותית אשר עובר לתהליכי טיפול ומחזור או מסולק להטמנה. ההפרדה הינה הפרדה פיזיקלית בבסיסה, המתבצעת באמצעות מים המסוחררים במערכת הטיפול. ההפרדה מתבססת על הבדלים הפיזיקליים והכימיים בין חלקיקי הקרקע – גודל גרגר, מהירות שיקוע, משקל סגולי, מטענים על פני שטח הגרגר ובמקרים מסוימים אף תכונות מגנטיות. ההפרדה מתבצעת באמצעות טכנולוגיות המשמשות לרוב בתעשיית המכרות להפרדת מינרלים ומחצבים. בסוף התהליך מתקבלת פרקציה חולית העומדת בתנאי הסף לשימוש חוזר, ופרקציה מזוהמת של דקים אשר נסחטת ממי התהליך אשר שימוש להפרדה ומועברת להמשך טיפול או להטמנה.
- מנגנון כימי: מנגנון נוסף הוא הסרת המזהמים הספוחים מהקרקע אל הפאזה המימית ע"י שטיפתה בתמיסות המכילות תוספים כגון חומצות, בסיסים, חומרי פעילי שטח (חפ"ש), ממסים וכלאנטים. בדרך זו ניתן להתמודד עם מזהמים אשר נספחים בצורה משמעותית גם אל הפרקציות החוליות ומונעים הגעה אל ערכי יעד אשר יאפשרו שימוש חוזר בקרקע. בנוסף, ניתן להקטין את ריכוז המזהמים אשר נשארים ספוחים לפרקציות הדקות של הקרקע, או להסירם לחלוטין. מי השטיפה אשר קלטו את המזהמים, כפאזה מומסת או כפאזה חופשית, מועברים להמשך טיפול במטרה לעביר את המזהמים אלו אל נפח קטן של מדיה מוצקה העוברת להטמנה או לטיפול קצה אחר (לרוב מדובר תהליכי ספיחה ושיקוע כימי). המנגנון הכימי נפוץ פחות בהשוואה למנגנון הפיזיקלי, בעיקר בשל העלויות הגבוהות של התוספים ובשל הצורך בהמשך טיפול בזיהום בפאזה המומסת ובפאזה החופשית.

בסיום הטיפול הפרקציה החולית הנקייה של הקרקע יכולה להיות מוחזרת לאתר ממנו נחפרה או לעבור מחזור לשימוש אחר, בהתאם לעמידה בערכי יעד אשר הוגדרו. הפרקציה המזוהמת המכילה חרסית, סילט וחומר אורגני, יכולה לעבור להטמנה או להמשך טיפול בטכנולוגיות טיפול משלימות נוספות.

#### 4.2 סוגי מזהמים

מכיוון שהנטייה של מזהמים להיספח לפרקציות הדקות של הקרקע היא רחבה מאוד, שטיפת קרקע מתאימה לטיפול במגוון רחב של מזהמים אורגניים, אנאורגניים וחומרי הדברה - דלקים, PCB, PAH, VOC, SVOC ומתכות.

ישנן מספר דרכים בהן מזהמים נקשרים אל חלקיקי הקרקע, אשר משפיעות במידה רבה על סוג שטיפת הקרקע הנדרש על מנת להפריד בניהם. באיור 32 ניתן לראות את סוגי הקשרים השונים: עבור מזהמים אשר ספוחים לחלקיקי הקרקע הדקים (לחרסיות או לחומר האורגני) או נמצאים כחלקיקים נפרדים בקרקע (איור 32 - a, b) הטיפול הוא בעיקרו הפרדה פיזיקלית. לעומת זאת, עבור קרקעות עם מזהמים אשר מצפים את כלל החלקיקים כפאזה שומנים או משקעים אנאורגניים (איור 32 - c, d) יתכן ויידרש טיפול שטיפה כימי על מנת לקבל פרקציה חולית אשר תעמוד בערכי היעד לשימוש חוזר. קרקעות בהן מזהמים אשר מצפים חלקיקים פורוזיביים או נמצאים כחלקיקים בתוך אגרגט (איור 32 - e, f) יש להעביר את הקרקע שלב של גריסה מכאנית במהלך הטיפול על מנת לחשוף את המזהמים לתהליכים הפיזיקליים ואו הכימיים.



איור 32 : סוגי קשרים בין מזהמים לחלקיקי הקרקע

הימצאותם של מספר סוגי מזהמים בעלי תכונות ספיחה ומסיסות שונות (למשל המצאות מתכות ו-PAH) תחייב תנאי תפעול גמישים של תהליך השטיפה, מבחינת זמני שהייה, הפרדת פרקציות מדויקת יותר או שימוש בתוספים. במתקנים קבועים אשר קולטים קרקעות מזוהמות ממספר מקורות, ניתן לבצע ערבוב של קרקעות בצורה מושכלת על מנת לקבל קרקעות עם ריכוזי מזהמים הומוגניים יותר ונוחים יותר לטיפול מבחינה תכנון ותפעול המתקן.

המצאות מזהמים הידרופוביים מאוד, אשר נספחים בצורה משמעותית גם אל הפרקציה החולית של הקרקע המטופלת, יקשו על ההפרדה ויחייב שימוש בחומרים אשר יפרקו את הקשרים בין המזהם לחלקיקי הקרקע ויעבירו אותו אל הפאזה המומסת. בהתאם לסוג המזהם יותאם סוג התוסף אשר ישלים את תהליך ההפרדה הפיזיקלי בהפרדה כימית: חומצות, בסיסים, חומרי פעילי שטח (חפ"ש), ממסים וכלאנטים. שימוש בתוספים מעלה את נפח המים בו נעשה שימוש במהלך הטיפול ודורש שלבי טיפול נוספים אשר נועדו להפריד את התוספים מהמים על מנת לסחרר אותם במערכת (עלות התוספים היא משמעותית) או להרחיק אותם לפני הזרמת מי התהליך לסביבה או למט"ש. בטבלה 17 ניתן לראות את ריכוזי המזהמים המותרים לקליטה במתקני שטיפת קרקע בהולנד, שם תהליך זה מבוצע כבר שנים רבות ובהיקפים גדולים. ערכים אלו רלוונטים עבור קרקעות מזוהמות המכילות עד 50% דקים (<63 מיקרון), ובהנחה של הרחקה של 90-99% עבור מתכות, ושימוש חוזר בקרקע לאזורי תעשייה.

### 4.3 סוגי קרקע

שטיפת קרקע באמצעים פיזיקליים מתאימה לטיפול בקרקעות חוליות, עם מקסימום 30-50% דקים (קטנים מ-63 מיקרון). טיפול בקרקעות עם אחוזים גבוהים יותר של חרסית יהיה פחות כלכלי. שטיפת קרקע באמצעים כימיים יכולה להתמודד עם אחוזי חרסית גבוהים יותר מכך, אבל עדיין יש להתמודד עם בעיות תפעוליות של הזנת החומר החרסיתי אשר נוטה להצטבר בגושים, ועם הצורך בשיקוע ובסחיטת המים הפרקציה הדקה. אחוז רטיבות גבוה של הקרקע הנכנסת לטיפול ואשר מכילה אחוזים גבוהים של חרסית, יכול לגרום לסתימה ובעיות מכאניות של מערכת ההזנה.

כמו כן, חומר הומי הוא בעל יכולת קשירה טובה של מזהמים, ועל כן אחוז גבוה של חומר הומי בקרקע יקשה על ההפרדה.

במתקנים קבועים אשר קולטים קרקעות מזוהמות ממספר מקורות, ניתן לבצע ערבוב של קרקעות בצורה מושכלת על מנת לקבל קרקעות עם אחוזי חרסית הומוגניים יותר על מנת לפשט את תפעול המתקן.

קרקעות הנשלחות לטיפול מכילות הרבה פעמים אבנים, שורשים, פסולת בניין או פסולת עירונית. בטיפול On-Site ישנה אפשרות להחזיר לאתר חומרים טבעיים אשר לגביהם אין חשש להמצאות זיהום. פסולת בניין ופסולת עירונית ישלחו למתקני קצה מתאימים.

**טבלה 17:** ריכוזי מזהמים המותרים לקליטה במתקני שטיפת קרקע בהולנד

| Soil chemical parameters (in mg per kg dry solid material): |                                                          |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Parameter                                                   | Value                                                    |
| TPH                                                         | <C14: 7.500; C14-C27: 3.000; C27-C40: 1.000              |
| Sum PAH                                                     | 800                                                      |
| BTEX                                                        | 1.000                                                    |
| Sum PCBs                                                    | 8                                                        |
| Other organic parameters                                    | 10 to 90 times the maximal Dutch soil quality 'Industry' |
| CN (free)                                                   | 250                                                      |
| Barium                                                      | 9.200                                                    |
| Cadmium                                                     | 40                                                       |
| Chromium                                                    | 5.400                                                    |
| Cobalt                                                      | 1.900                                                    |
| Copper                                                      | 1.700                                                    |
| Mercury                                                     | 10                                                       |
| Lead                                                        | 5.400                                                    |
| Molybdenum                                                  | 1.000                                                    |
| Nickel                                                      | 600                                                      |
| Tin                                                         | 9.000                                                    |
| Zinc                                                        | 5.900                                                    |
| Asbestos                                                    | 10.000                                                   |
| Fluoride                                                    | Depending on soil end use                                |
| Bromide                                                     | Depending on soil end use                                |
| Chloride                                                    | Depending on soil end use                                |
| Sulphate                                                    | Depending on soil end use                                |
| Other inorganic parameters                                  | 10 to 90 times the maximal Dutch soil quality 'Industry' |

#### 4.4 שלבי הטיפול

בהתאם לסוג ותכונות הקרקע, והתאם לאופי הזיהום, נדרשים שלבים שונים של טיפול לאורך תהליך שטיפת הקרקע. באיור 33 ניתן לראות תרשים סכמתי של תהליך הטיפול. השלבים העיקריים הם:

- **טיפול קדם:** הפרדה ראשונית של פסולת גסה (פסולת בניין, פסולת עירונית), אבנים קטנות, שורשים וכד'. ההפרדה נעשית באמצעות מסננת גסה על פתחי ההזנה של המתקן, נפות רוטטות או נפת תוף מסתובב עבור סינון עדין יותר של מילימטרים בודדים. במידה ויש צורך בשבירת אגריגטים או בגריסה, הקרקע תעבור שלב של מתזי מים, מערבלים ובמידת הצורך מיכון ייעודי לגריסה

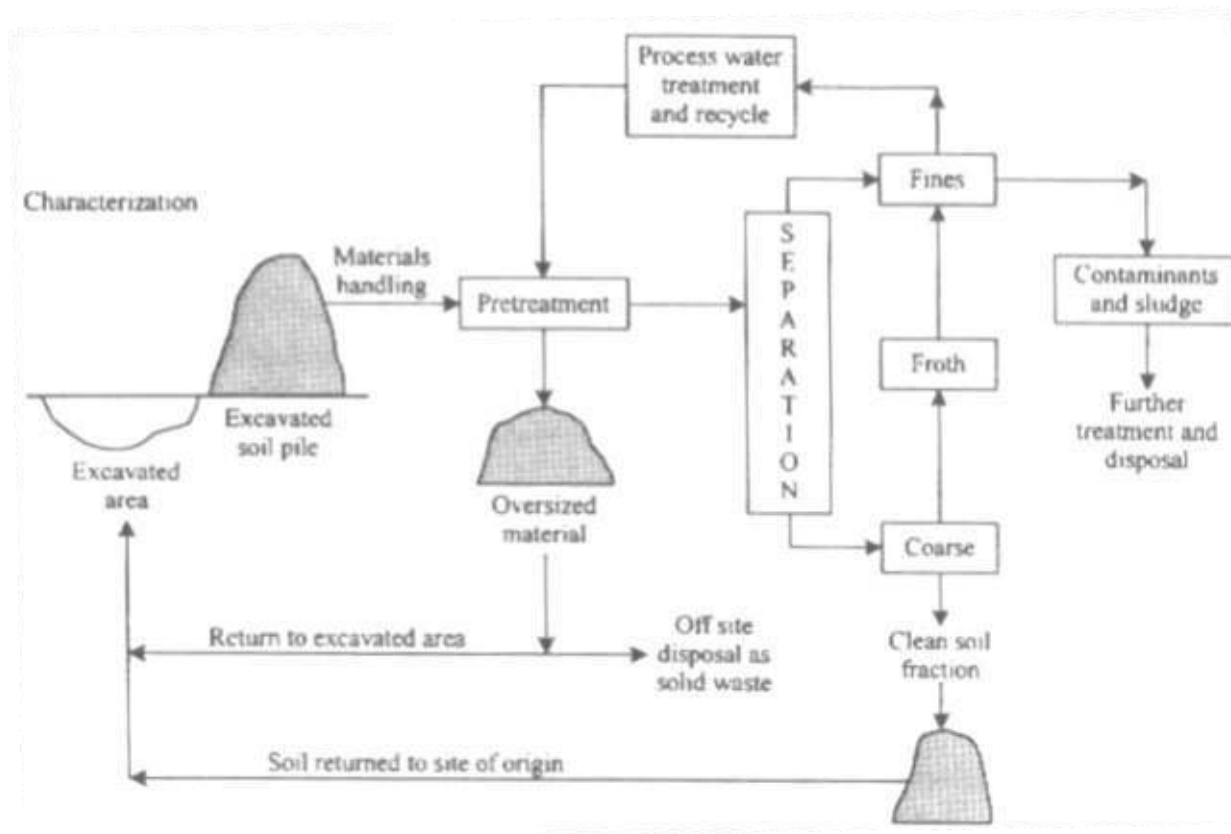


אינטנסיבית. בשלב זה כבר ניתן להוסיף תוספים כימיים להעברת חלק מהזיהום לפאזה מומסת. במידה והפרקציה הגסה או הקרקע בכללותה מכוסה בחרסיות מזוהמות, ניתן לבצע שטיפה באמצעות מתזי מים עם ערבול אגרסיבי לניקוי הפסולת, ולשלוח אותה לאחר מכן לאתר הטמנה/מחזור, או להחזירה לאתר החפירה המקורי. מי השטיפה והחרסיות אשר נוקו מהפסולת, נאספים ומוזרמים להמשך הפרדה.

- **הפרדת פרקציה חולית:** הפרדה מכאנית בסביבה רטובה בין הפרקציה העדינה של הקרקע (חרסית, סילט וחומר אורגני) לבין הפרקציה החולית מופרדת באמצעות שימוש במערך של אמצעי הפרדה בסביבה רטובה המתבססים על גודל גרגר והבדלים במהירות שיקוע סגולית, כגון הידרו-ציקלונים ומתקני זרימה נגדית (counter-current washing). החול המתקבל בקצה מתקני הפרדה אלה עובר לניקוז המים (למשל על ידי נפה רוטטת).

- **הפרדת פרקציה דקה:** לאחר הפרדת החול, הפרקציה החרסיתית נשארת במצב Slurry עם מי התהליך, ועוברת בדרך כלל תהליך הפרדה באמצעות שיקוע, ותהליך ניקוז וסחיטת המים (Dewatering). על מנת להאיץ את תהליך השיקוע נעשה שימוש בפלוקולנטים. יתכנו שיטות הפרדה אחרות כגון DAF. סחיטת המים נעשית בשיטות מכאניות שונות (Belt press, Filter Press, צנטריפוגות וכד'). מתקני הפרדה עם מספר שלבים יהיו מסוגלים להפריד את הקרקע לפרקציות שונות של דקים – חרסיות, סילט וחומר אורגני, וכך לאפשר קבלת פרקציות נוספות עם ריכוזי מזוהמים נמוכים יחסית, אשר אפשר יהיה לייעד לשימוש חוזר או לטיפול המשך שונים.

- **טיפול במים ובתשטיפים:** במהלך הטיפול, המים משמשים בתהליכי ההפרדה השונים - פירוק אגריגטים, הרחפה של חלקיקים במתקני ההפרדה הפיזיקליים וכתמיסה עם תוספים בתהליכי ההפרדה הכימיים. בשל מעבר מזהמים לפאזה מומסת ופאזה חופשית, יש צורך לטפל במי השטיפה על מנת להרחיק מזהמים לפני שחרורם למחזור טיפול נוסף. הטיפול מתבצע בשלב הראשון להרחקת חומר חלקיקי מרחף באמצעות מסננים שונים, ולאחר מכן הפרדת המזהמים באמצעות מפרידי שמנים, מחליפי קטיונים, שיקוע כימי, חמצון כימי, טיפול ממברנלי, ספיחה על פחם פעיל ועוד. תשטיפים משלבים שונים של אחסון או טיפול בקרקעות המזוהמות מועברים גם הם למערכות טיפול אלו.



**איור 33:** תרשים סכמתי של תהליך הטיפול בשטיפת קרקע

#### 4.5 תכנון תהליך הטיפול ובדיקת עמידה ביעדי הטיפול

על מנת לצמצם את הסיכון לכישלון של הטיפול ואי-עמידה בערכי היעד, יש לבצע שלבי פיילוט עבור מדגם מייצג של הקרקע המיועדת לטיפול. בשלב הראשון תתבצע בדיקה מעבדה על קילוגרמים בודדים של הקרקע, ולאחר מכן בשלב הפיילוט על מספר טונות של קרקע במתקן שטיפה קטן או בשטיפה מנתית. טבלה 18 מתארת את בדיקות המעבדה השונות אשר יש לבצע על מנת לאפיין פרמטרים שונים של הקרקע ואת התאמתה לטיפול. כל האנליזות של מרקם ותכונות הקרקע מתבצעות בשיטות סטנדרטיות במעבדות מוסמכות לאפיין גיאוטכני של קרקעות לצרכי עבודות אזרחיות. המטרה של הבדיקות המעבדתיות והפיילוט בקנה מידה גדול יותר היא לבדוק האם ניתן לקבל הפרדה של פרקציה נקיה, והאם היא משמעותית מספיק בכדי להצדיק את הטיפול מבחינה כלכלית.

**טבלה 18:** בדיקות המעבדה השונות אשר יש לבצע על מנת לאפיין תהליך טיפול בשטיפת קרקע

| Property                    | Laboratory Test                                              |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Grain size                  | Wet sieving through a number of screens.                     |
| Settling velocity           | Hydrocycloning or cyclosizing with laboratory units.         |
| Specific gravity            | Float and sink tests using liquids of different densities.   |
| Surface chemical properties | Laboratory froth flotation tests.                            |
| Magnetic properties         | Laboratory magnetic separation at different field strengths. |

במהלך הטיפול יבצעו אנליזות מעבדה לאורך השלבים השונים :

**דיגום כניסה:** מטרת הדיגום של קרקע לפני טיפול היא על מנת לוודא את ההיתכנות של הטיפול בה. הדיגום יתבצע בכל פעם שמתקבלת קרקע בעלת מאפיינים שונים, או אשר נחפרה מאזורים שונים, אך גם מעת לעת בזמן קבלת קרקע מאותו מקור בכדי לוודא את הומוגניות החומר הנקלט. המפתח לכך הוא אפיון היחס בין פרקציות הקרקע השונות (חול/חרסית) לריכוזי המזהמים בהם יש לטפל. לשם כך יש לבדוק את ריכוז המזהמים בקרקע המזוהמת בכללותה, לבצע הפרדה של הפרקציות, ואז לבדוק את ריכוזי המזהמים בכל פרקציה בנפרד. הפאזה בה נמצא המזהם בכל פרקציה (חופשי, חלקיקי, ספוח, מומס וכד') משמעותית גם היא.

**דיגום יציאה:** נדרש דיגום מוודא בחומר מטופל עבור כל מזהם בו התהליך אמור לטפל. בנוסף, יש לדגום את נוכחות התוספים אשר הוכנסו אל התהליך (או את השפעתם על הקרקע, למשל pH במידה ונעשה שימוש בחומצות או בסיסים), במידה והם מהווים זיהום לבני אדם או לסביבה בפני עצמם.

תדירות הדיגום בכניסה/יציאה תהיה גבוהה יותר ככל שהקרקע תהיה הטרוגנית יותר, ונמוכה יותר בקרקעות הומוגניות מבחינת ריכוז מזהמים, מרקם, רטיבות וכד'. כמו כן, קרקעות עם אחוזים גבוהים של חרסית יש לדגום בצורה תדירה יותר, לעומת קרקעות המכילות בעיקר פרקציות חוליות.

בשלבים הראשוניים של הטיפול (שלבי הפיילוט השונים, והרצות ראשוניות) תדירות הדיגום תהיה גבוהה יותר בהשוואה לתפעול הרציף והשגרתי, בהנחה שהקרקע המוזנת הינה הומוגנית לכל אורך הטיפול.

בטבלה 19 ניתן לראות דוגמא לתדירות דגימות מוצעת מתוך מסמכי ה-RFI, עבור מספר האנליזות שיש לבצע עבור נפחים שונים של קרקע, ומספר תת הדגימות אשר ישמשו לדגימה המרוכבת.

**טבלה 19:** כמות אנליזות ותת דגימות מוצעת לדיגום מרוכב של קרקעות בנפחים שונים לפני ואחרי טיפול (תכנית דיגום בפרויקטים של חברת Ludreco, מתוך מסמכי ה-RFI).

| Quantities (Q)           | Number of sub-samples | Number of analysed samples |
|--------------------------|-----------------------|----------------------------|
| $0 < Q < 60$             | 5                     | 1                          |
| $60 \leq Q < 150$        | 10                    | 1                          |
| $150 \leq Q < 400$       | 20                    | 1                          |
| $400 \leq Q < 1.000$     | 25                    | 1                          |
| $1.000 \leq Q < 2.000$   | 25                    | 2                          |
| $2.000 \leq Q < 5.000$   | 25                    | 3                          |
| $5.000 \leq Q < 15.000$  | 25                    | 5                          |
| $15.000 \leq Q < 30.000$ | 25                    | 10                         |
| $30.000 \leq Q < 60.000$ | 25                    | 15                         |

**מאזני מסה:** מאזני מסה של מזהמים ושל תוספים בפרקציות השונות של הקרקעות, ובתמיסת השטיפה לפני ואחרי הטיפול מספקים מידע חשוב על איכות ואופי התהליך. בנוסף, מאזני מסה נועדו לבצע בקרה על כך שלא נעשה ערבוב בין אצוות קרקע מזהמות לבין אצוות קרקע מטופלות. עם זאת, מכיוון שקרקעות המטופלות בשטיפת קרקע מופרדות למספר פרקציות ע"פ גודל גרגר, ולכל פרקציה כזו צפויים להיות ריכוזי מזהמים שונים בצורה משמעותית, ביצוע מאזני מסה אמינים ומייצגים דורשים משאבים רבים בדיגום, באנליזות ובניטור של פרמטרים תפעוליים רבים כגון ספיקת נוזלים וספיקת מוצקים לאורך התהליך.

#### 4.6 סוגי מתקנים

**מתקנים ניידים On-Site:** מתקנים ניידים וחצי-ניידים המובלים באמצעות מספר קטן של משאיות ובנים תוך מספר מועט של שבועות. ישנם עלויות משמעותיות של שינוע והקמת המתקן, אך כאשר מדובר בכמויות גדולות של קרקע מזהמת אשר ניתן להקטין את הכמות הסופית אשר תצטרך להיות משונעת אל מחוץ האתר להמשך טיפול - ישנה כדאיות כלכלית לטיפול שטיפת הקרקע.

**מתקנים מרכזיים קבועים Ex-Situ:** קרקע מזהמת משונעת למתקן קבוע מאתרים מזהמים בסביבתו. מתקנים אלו נמצאים בקרבה גדולה יותר אל האתרים המזהמים מאשר אתרי טיפול אחרים, ועל כן ניתן להקטין עלויות שינוע לטיפול הקצה ע"י שינוע אל מתקני שטיפת הקרקע ולצמצם את כמות הקרקע הדורשת טיפול המשך.

#### 4.7 עלויות

החיסכון הכלכלי עבור פרויקט שיקום העושה שימוש בטכנולוגיית שטיפת קרקע מתבטא בעיקר בחיסכון עלויות השינוע של הקרקע אשר מתקבלת כנקייה לאחר השטיפה. לרוב יש צורך לקבל לפחות 70-80% (משקלי) של קרקע נקייה מתוך סך הקרקע המזהמת שנחפרה על מנת להצדיק את השימוש בטכנולוגיה זו,

אך במקרים בהם עלויות השינוע או עלויות הטיפול הם גבוהים, גם 50% (משקלי) של קרקע נקיה לאחר טיפול יהיה כדאי מבחינת עלות-תועלת.

הפקטור המשפיע ביותר על עלות הטיפול הוא אחוז החרסית. פקטורים משפיעים נוספים הם אחוז החומר האורגני וקיבולת הקטיונים החליפיים בקרקע, המשפיעים על המידה בה הקרקע סופחת אליה מזהמים. השימוש בתוספים למי השטיפה מגדילים את עלות הטיפול פי 2-4, בשל עלות התוספים עצמם ובשל הצורך לטפל במים בתהליכים נוספים.

#### 4.8 שיקולים סביבתיים

- **אחסון הקרקעות:** משטחי האחסון של הקרקעות המזהמות צריכים להיות מכוסים ביריעות או במשטחי אספלט/בטון על מנת למנוע חלחול תשטיפים מזהמים לקרקע. קרקעות המכילות מזהמים אשר אין חשש שידלפו בצורה משמעותית ניתן לאחסן על הקרקע ללא יריעות איטום ולבצע דיגום מוודא לאחר גמר הטיפול. איזור הטיפול ככלל, וערימות הטיפול בפרט, צריכים להיות מכוסים, או תחת מבנה מקורה או להיערך לטיפול בתשטיפים אשר יוצרו ויאגרו בשטח האחסון. יש ליצור הפרדות פיזיות ברורות בין הערימות השונות על מנת למנוע ערבוב וזיהום צולב בין ערימות מזהמות במזהמים שונים ובין ערימות לפני ואחרי טיפול.
- **פליטת מזהמים לאוויר:** הקרקעות צריכות להיות מכוסות או מורטבות באופן תדיר על מנת למנוע מפגעי אבק. בקרקעות עם ריכוז גבוה של מזהמים נדיפים יש לנטר מזהמים אלו ולדאוג לטיפול בפליטות של גזים משלבים שונים של התהליך. לרוב, המתקנים של שטיפת קרקע אינם נדרשים להיתרי פליטות לאוויר, אך אם מתבצע בהם טיפול בריכוזים משמעותיים של מזהמים נדיפים יש לבצע ניטור אוויר בחלקי הטיפול השונים.
- **הזרמת שפכים ותשטיפים:** למרות שיש סחרור פנימי של המים בתהליך השטיפה, המתקן ככלל הוא צרכן מים, מכיוון שהקרקע יוצאת מהטיפול עם אחוזי לחות גבוהים יותר מאשר בכניסה. בטיפול המתבסס בעיקרון על מנגנון פיזיקלי, כמות המזהמים המועברת לפאזה המומסת היא נמוכה. מי הפיצוי המוכנסים למערכת מדללים את ריכוז המזהמים, ועל כן עלויות הטיפול הן נמוכות. בטיפול שטיפה במנגנון כימי יש צורך לטפל בנפחים משמעותיים של מים להסרת מזהמים ותוספים, ועל כן עלויות הטיפול יקרות משמעותית. הזרמה של מי תהליך, תשטיפים, מי נגר מגשמים נעשית לאחר הרחקה/השבה/טיפול במזהמים ובתוספים ככל האפשר, ובהתאם לרגולציה על הזרמה לסביבה או למט"ש. בהתאם לקרבה של המתקן לאקוויפר, למידת הרגישות ההידרולוגית שלו ולסוג התוספים בהם נעשה שימוש, יש להכין תכנית למניעת דליפות מים אל הקרקע כתוצאה מתפעול שוטף של המתקן או כתוצאה מפריצה של המיכלים. תכנית זו כוללת לרוב הקמת המתקן על משטח מוגבה, עם מערכת לאיסוף דליפות בחזרה לסחרור בתהליך או למערכת טיפול לפני שחרורם לסביבה או למט"ש. עלויות מערכות אלו הן לרוב נמוכות בהשוואה לעלות ההקמה והטיפול הכוללים.
- **פתרונות קצה לפרקציות השונות:** על מנת להחזיר את הפרקציות הנקיות של הקרקעות לסביבה, ובהתאם לשימוש העתידי באזור, יש לבצע ייצוב של ה-pH במידה ונעשה שימוש בחומצות או

בסיסים. בנוסף, יש לשקול השבת נוטריאנטים לקרקעות אשר נשטפו. את הפרקציות המזהמות יש להעביר לפתרונות קצה מתאימים.

- **רעש:** בטבלה 20 ניתן לראות את מידת הרעש המקסימלית המופקת מחלקים שונים של מתקני שטיפת קרקע (מתוך מסמכי ה-RFI)
- בעת תכנון שימוש בקרקע מטופלת באתר מסוים יש לקחת בחשבון את שיקולים הבאים: שימוש חוזר באתר, פיתוח מחודש של האתר לשימוש הקהילה, שימושי קרקע עתידיים באתר, שיתוף הקהילה במידע אמיתי, מדויק, ובפורמט פשוט והכנת תכנית מגירה למקרי חירום.

**טבלה 20:** מידת הרעש המקסימלית המופקת מחלקי מחלקים שונים של מתקני שטיפת קרקע

| Source                               | Sound level ( $L_{pa}$ ) in dB(A) (average) |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| Gravel washer                        | 83.7                                        |
| Hydro cyclone and current classifier | 79.6                                        |
| Pre-screening , loading              | 79.7                                        |
| Wet screen                           | 84.2                                        |
| Slurry pump                          | 76.1                                        |
| Filter Chamber Press                 | 76.0                                        |
| Sludge treatment                     | 83.8                                        |

#### 4.9 יתרונות וחסרונות

**יתרונות השימוש בטכנולוגיית שטיפת קרקע:**

- הטכנולוגיה יעילה עבור טיפול בזיהומים אורגניים ואנאורגניים.
- השבה ומחזור קרקעות חוליות בצורה מיידית ובעלויות נמוכות.
- חיסכון כלכלי משמעותי בקרקעות עם אחוז חרסיות נמוך.
- תהליך רטוב - מיעוט בפליטות מזהמים לאוויר.

#### **חסרונות:**

- נדרש טיפול בפרקציה החרסיתית המזהמת של הקרקע ובנפח המים אשר שימש לשטיפה.
- לא אפקטיבי לקרקעות המכילות מעל ל-50-30% חרסית
- השיטה רגישה להמצאות ריכוזים גבוהים של חומצות הומיות, תערובות מורכבות של מזהמים וריכוזי מזהמים גבוהים במיוחד.



#### 4.10 דוגמאות למתקני שטיפת קרקע מתוך מסמכי ה-RFI

בטבלה 21 ניתן לראות דוגמאות לטכנולוגיות שטיפת קרקע מתוך מסמכי ה-RFI אשר הוגשו לחברה לשירותי איכות סביבה.

\*לצורך הצגת ערכים אחידים בטבלה: העלויות מוצגות בשקלים ע"פ השערים  $1\$ = 3.8\text{ ש"ח}$ ,  $1\text{€} = 4\text{ ש"ח}$ . תפוקות מוצקות בטונות ע"פ 1 מ"ק קרקע = 1.5 טון. מס' שעות עבודה בשנה = 2,800 (10 שעות עבודה ביום, 280 ימי עבודה בשנה).

#### טבלה 21: דוגמאות לטכנולוגיות שטיפת קרקע מתוך מסמכי ה-RFI

| חברה                        | ניידות         | שלבי טיפול                                                                                                                            | כמות מינימלית לטיפול | קצב טיפול*                             | טווח ריכוז מזהמים | מאפייני הקרקע    | תשתיות                                      | הרחקת מזהמים  | סביבה | פיילוט                                             | עלות*                         |
|-----------------------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------------|---------------|-------|----------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Dekonta</b><br>[איור 34] | נייד, 7 מכולות | תהליך פיזיקלי<br>גס: תוף מסתובב וטרומל.<br>חול: מפריד ספירלי,<br>הידרוציקלון.<br>דקים: תא שיקוע.<br>סחיטה: צנטריפוגה,<br>Filter Press |                      | 56,000 טון לשנה (20 טון\שעה)           |                   |                  |                                             |               |       | ציוד נייד לביצוע פיילוט של עד 100 ק"ג. 1-3 חודשים. | טיפול: 38 ש"ח - 228 ש"ח לטון  |
| <b>HPC</b>                  | נייד           | תהליך פיסיקלי<br>גס: ריסוק חלקיקים גדולים מ-100 מ"מ<br>חול, דקים: יחידות ערבוב ושטיפה מסתובבות                                        | 500 טון              | 1,400-140,000 טון לשנה (5-500 טון\יום) | עד 50,000 מ"ג\ק"ג | עד 15%-30% חרסית | משטח בטון, דרכים, חיבור מים, חיבור חשמל\דלק | עד 20 מ"ג\ק"ג |       | 2-6 חודשים לביצוע פיילוט והרצה                     | טיפול: 200 ש"ח - 360 ש"ח לטון |

|                                                                                                                  |  |                                                                               |                                                                                                        |                                                                                                                           |                                                                                                        |                                                                                            |                                                                           |                                                 |                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                    |                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <p>טיפול :<br/>150 ש"ח<br/>507 -<br/>ש"ח לטון<br/>(226 ש"ח<br/>760 -<br/>ש"ח<br/>למ"ק)</p>                       |  |                                                                               | <p>VOC :<br/>90-99%<br/>SVOC:<br/>40-90%<br/>באמצעות<br/>חפ"ש</p>                                      |                                                                                                                           |                                                                                                        | <p>עד<br/>25,000<br/>מ"ג/ק"ג<br/>ניתן<br/>לטפל<br/>למצב של<br/>לא<br/>פרקציה<br/>מזהמת</p> | <p>140,000<br/>טון<br/>לשנה<br/>(עד 50<br/>טון/שעה<br/>)</p>              |                                                 | <p>תהליך פיסיקלי וכימי<br/>גס : נפות וטרומל.<br/>תוספים : ערבול אגרסיבי<br/>עם אפשרות להוספת<br/>באפר, וחפ"ש.<br/>חול : הידרוציקלונים.<br/>דקים : Counter Stream.<br/>טיפול במים : מודולים של<br/>Pump&amp;Treat של<br/>החברה.</p> | <p>נייד</p>                                                        | <p><b>Sol<br/>Environment</b><br/>[איור 35]</p> |
| <p>מתקן :<br/>16<br/>מיליון<br/>ש"ח.<br/>טיפול :<br/>120 ש"ח<br/>240 -<br/>ש"ח<br/>לטון,<br/>כולל<br/>הטמנה.</p> |  | <p>טיפול<br/>ב-100<br/>ליטר<br/>לטון<br/>קרקע.<br/>רעש :<br/>75-80<br/>dB</p> | <p>80%-<br/>90%<br/>עבור<br/>PAH,<br/>שמנים<br/>ומתכות<br/>כבדות.<br/>65-75%<br/>עבור<br/>ציאנידים</p> | <p>חשמל או<br/>גנרטור עם<br/>מיכל 6<br/>מ"ק.<br/>ספיקת<br/>מים<br/>מירבית<br/>של 10<br/>מק"ש,<br/>משרדים,<br/>מקלחות.</p> | <p>עד 40%<br/>חרסית.<br/>קצב<br/>טיפול<br/>מירבי :<br/>15%<br/>דקים,<br/>35% חול,<br/>50%<br/>חצץ.</p> |                                                                                            | <p>70,000-<br/>280,000<br/>טון<br/>לשנה<br/>(25-100<br/>טון/שעה<br/>)</p> | <p>3600-<br/>7200 טון<br/>(6 ימי<br/>עבודה)</p> | <p>גס : נפות ומסוע מגנטי (עד<br/>50 מ"מ). שטיפה ע"י<br/>Counter Stream<br/>חול : הידרוציקלון.<br/>דקים : Upstream<br/>Classification.<br/>סחיטה : Filter Press.<br/>טיפול במים : סינון חול,<br/>פחם פעיל.</p>                      | <p>נייד : 10<br/>מכולות.<br/>כשבועיים<br/>להפעלה</p>               | <p><b>Ludreco SA</b><br/>[איור 36]</p>          |
| <p>טיפול :<br/>180 ש"ח<br/>250 -<br/>ש"ח לטון</p>                                                                |  | <p>טיפול<br/>ב-50<br/>ליטר<br/>לטון<br/>קרקע</p>                              | <p>70%-<br/>99%</p>                                                                                    | <p>כ-20 דונם<br/>כולל שטחי<br/>אחסון<br/>לקרקעות,<br/>שטח<br/>אספלט<br/>אטום<br/>למים,<br/>חשמל או<br/>גנרטור</p>         | <p>עד 40%<br/>חרסית.<br/>יעילות<br/>מקסימלית<br/>15%-<br/>20%<br/>חרסית.</p>                           |                                                                                            | <p>28,000-<br/>280,000<br/>טון<br/>לשנה<br/>(10-100<br/>טון/שעה<br/>)</p> | <p>50,000<br/>טון</p>                           | <p>גס : נפות רוטטות או תוף<br/>מסתובב (3-4 מ"מ).<br/>חול : הידרוציקלונים וזרם<br/>נגדי (40-60 מיקרון).<br/>דקים : תא שיקוע + Belt<br/>Filter.</p>                                                                                  | <p>נייד : 25-<br/>30<br/>מכולות.<br/>כ-6<br/>שבועות<br/>להפעלה</p> | <p><b>Boskalis</b><br/>[איור 37]</p>            |

The plant can be mobilized as a load consisting of 7 containers. Main parts of the plant are shown on the following picture (1 - soil hopper with weigh belt feeder, 2 rotary scrubber with a trommel screen, 3 - spiral classifier, 4 - containerized filter press).



**איור 34 :** רכיבים שונים של מתקן שטיפת הקרקע של חברת DEKONTA



*Sand washing unit*



*Extraction of the recoverable fraction*

**איור 35 :** מתקן שטיפת הקרקע של חברת Sol Environment





Figure 3 Input Feeding Hooper

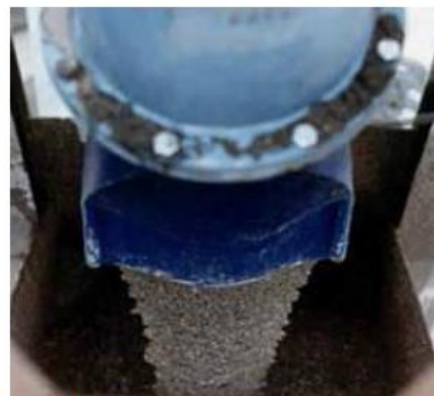


Figure 4 Hydro Cyclone



Figure 5 Current classifier



Figure 6 Vibrating dewatering screen



Figure 7 Filter chamber press



Figure 8 Gravel washer

איור 36: רכיבים שונים של מתקן שטיפת הקרקע של חברת Ludreco SA



איור 37 : מתקן שטיפת הקרקע של חברת Boskalis

## 4.11 טבלת סיכום טכנולוגית שטיפת קרקע

טבלה 22 מבוססת על הסקירה המדעית-הנדסית שנעשתה, ועל מידע אשר סופק ע"י חברות המפעילות טכנולוגיות שטיפת קרקע כפי שמופיע במסמכי ה-RFI אשר נשלחו אל החברה לשירותי איכות סביבה.

טבלה 22: סיכום טכנולוגיות שטיפת קרקע

● - יעילות/מאמץ/לא מהווה גורם מגביל ● - יעילות בינונית \ התאמה בינונית \ גורם מגביל

○ - יעילות נמוכה \ התאמה נמוכה \ גורם מגביל מאוד

| קריטריונים                                              | סיווג                | הערות                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ישימות הטכנולוגיות                                      | זמינות               | רוב מתקני הטיפול בטכנולוגיית שטיפת קרקע יכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן של עד מספר בודד של שבועות.                                  |
|                                                         | ניסיון בישראל        | אין בארץ ניסיון עם מתקנים מסוג זה.                                                                                                    |
| התאמת לקבוצות המזהמים                                   | דלקים                | בקרקות חוליות יעילות בריכוזים בינוניים עד גבוהים של זיהומים המשלבים זיהום אורגני (עד כ-50,000 מ"ג/ק"ג) ואנאורגני (עד כ-5,000 מ"ג/ק"ג) |
|                                                         | VOC (הלוגנים)        |                                                                                                                                       |
|                                                         | VOC (ללא הלוגנים)    |                                                                                                                                       |
|                                                         | SVOC (הלוגנים)       |                                                                                                                                       |
|                                                         | SVOC (לא הלוגנים)    |                                                                                                                                       |
|                                                         | מתכות                |                                                                                                                                       |
|                                                         | חומרים אנאורגניים    |                                                                                                                                       |
|                                                         | חומר נפץ             |                                                                                                                                       |
| התאמה לתכונות הקרקע                                     | חול                  | היעילות בהפרדת הפרקציה החרסיתית המזהמת עולה עם העלייה באחוז החול.                                                                     |
|                                                         | חרסית וטין           | יעילות התהליך יורדת עם העליה בריכוז החרסית. מתאים לקרקעות עם עד 30%-40% חרסית.                                                        |
|                                                         | הטרונגי              | נדרש טיפול קדם להומוגניזציה.                                                                                                          |
|                                                         | רטיבות הקרקע         | תהליך רטוב, אין צורך בייבוש הקרקע לפני הטיפול.                                                                                        |
| טיפול קדם בטיפול Ex-Situ (בהתאם למאפייני הקרקע והזיהום) |                      | ניפוי גס של פסולת ואבנים, גריסת אגרגטים.                                                                                              |
| קצב טיפול                                               |                      | טיפול מהיר. עד כ-400,000 טון לשנה, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 21 להשוואה.                                   |
| הרחקת מזהמים                                            |                      | כ-70%-99% עבור מזהמים אורגניים ומתכות. ראה טבלה 20 להשוואה ופירוט                                                                     |
| מרקם הקרקע לאחר טיפול                                   |                      | מתקבלות בנפרד פרקציה חולית ופרקציות חרסיתיות                                                                                          |
| תשתיות נדרשות ליישום הטכנולוגיה                         | שטח (בטיפול Ex-Situ) | כ-20 דונם כולל שטחי אחסון לקרקעות                                                                                                     |
|                                                         | אנרגיה               | צריכת אנרגיה משמעותית למתקני ההפרדה. חיבור לחשמל או גנרטור.                                                                           |
|                                                         | מים                  | המים מסוחררים בתהליך. נדרש חיבור מים של עד 5-10 מ"ק"ש.                                                                                |



| קריטריונים      |               | סיווג                                                                                   | הערות                                                                                                                       |
|-----------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| השפעה על הסביבה | פליטות לאוויר | ●                                                                                       | התהליך הוא רטוב, ללא פליטות משמעותיות לאוויר.                                                                               |
|                 | מים ותשטיפים  | ○                                                                                       | טיפול בכמות מים גדולה יחסית בסינון חול, פחם פעיל, ועוד. הטיפול מורכב ויקר יותר במידה ונעשה שימוש בתוספים לתהליך הפרדה כימי. |
| עלויות          | עלות מתקן     | כ-16 מליון ש"ח, כתלות בגודל המתקן                                                       |                                                                                                                             |
|                 | עלות טיפול    | 120 ש"ח - 360 ש"ח טון, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 21 להשוואה. |                                                                                                                             |

## 5 טיפול ייצוב מיצוק

### 5.1 תיאור כללי של הטכנולוגיה

ייצוב ומיצוק של קרקע מזהמת הם תהליכים בהם המזהמים הופכים למקובעים אל הקרקע ע"י ראקציה עם תוספים. תהליכים אלו אינם מפרקים או מרחיקים זיהום מהקרקע, אלא מצמצמים את המוביליות של המזהמים בקרקע ומחוצה לה, ונועדו להשיג מספר מטרות הבאות:

- שיפור התכונות הפיזיקליות של הקרקע
- הקטנת שטח הפנים האפקטיבי של הקרקע דרכו מזהמים עלולים לנדוד לסביבה
- הקטנת רמת המסיסות של המזהמים בקרקע
- יצירת מעטפת מסביב למזהמים (קפסולציה)

ישנם שלושה סוגים של תהליכי ייצוב/מיצוק:

- ייצוב/מיצוק בפאזה נוזלית
- ייצוב/מיצוק בעזרת פולימרים
- ייצוב/מיצוק ע"י ויטריפיקציה בטמפ' גבוהה

החומרים בהם נעשה שימוש בתהליכי ייצוב/מיצוק מתחלקים למייצבים ראשיים, אשר גורמים לבדם לייצוב משמעותי (צמנט-פורטלנד ו-Lime הם הנפוצים ביותר. נעשה שימוש גם בחרסיות בנטונייט טבעיות, חרסיות אורגנופיליות, ביטומן, silica fume, cement kiln dust, ובמוצרי מדף כמו Geodur, EnviroOceM ועוד), ומייצבים משניים אשר משפרים את איכות הייצוב כאשר הם מגיבים עם המייצבים הראשיים בנוכחות מים (Pozzolanic materials כגון fly-ash ו-Ground-Granulated blast-furnace slag<sup>2</sup>).

קיבוע של מזהמים אנ-אורגניים דורש גם תהליך של ייצוב וגם תהליך של מיצוק, ולעומת זאת קיבוע של מזהמים אורגניים הוא בעיקרו תהליך מיצוק מאחר שקשה יותר ליצור ייצוב כימי של מזהמים אורגניים.

מנגנונים של ייצוב כימי של חומרים אנ-אורגניים: שיקוע מומסים ע"י שינוי pH, שיקוע מומסים ע"י תהליכי חמצון-חיזור, שינוי פוטנציאל ספיחה, הטמעה ברכיבים הגבישיים של צמנט באמצעות הידרציה.

מנגנונים של ייצוב כימי של חומרים אורגניים: תהליכים מבוססי צמנט בטמפ' סביבה – הידרוליזה, חמצון, חיזור, יצירת מלחים אורגניים. המצאות חומצות הומיות בקרקע מעקבת תהליכים של הרטבת צמנט ועל תכונותיו בסוף התהליך.

פורטלנד-צמנט: צמנט עובר בטון לבניה, המתאים לתהליכי ייצוב ומיצוק של מגוון רחב של מזהמים. השימוש בצמנט זה לתהליכי ייצוב/מיצוק הוא הרחב ביותר בעולם. השימוש בצמנט מאפשר קשירת מים חופשיים, הקטנת פרמיאביליות של הקרקע/פסולת המטופלת, קפסולציה של מזהמים, קיבוע כימי של מזהמים ע"י הקטנת המסיסות שלהם, הקטנת רעילות של חומרים המגיבים עם הצמנט. לרוב, תערובות של פורטלנד-צמנט לתהליכי ייצוב/מיצוק כוללות תוספים, כגון אפר מרחף, ליצירת תגובה פוזולנית. סיג (slag) ו-CKD מעורבים בשל

<sup>1</sup> פוזולאן (Pozzolan) הינו סוג של טיח

<sup>2</sup> סיגים כתוצאה מייצוב ברזל בכבשן/התכת מתכות

תכונותיהם הצמנטיות על מנת לחסוך בצמנט. סיד ו-LKD מעורבבים על מנת לתקן pH ועל מנת לייבש את התערובת כתוצאה מהחום הנפלט מתגובתם לתהליך ההידרציה. ערבוב עם אבן משמש לתיקון pH וכתוספת חומר נפחי. באיור 38 מוצגות מספר דוגמאות עבור פסולת גולמית ופסולת לאחר טיפול בתהליך ייצוב/מיצוק.



**איור 38:** דוגמאות עבור פסולת גולמית ופסולת לאחר טיפול בתהליך ייצוב/מיצוק (מקור: Intertec, N.D.).

תכנון תהליך הטיפול בייצוב/מיצוק יתבסס על פרמטרים הבאים:

- אפיון כימי ופיסיקלי של החומר המזוהם והמזהם
- אפיון התהליך (in-situ, in plant, in-drum ועוד) ומגבלותיו (מודל הערבוב, תובלה ואחסון הפסולת)
- הגדרת יעדי טיפול עבור התוצר הסופי (יעדים שונים אם מדובר בהטמנה או בהפיכת הקרקע ללא מסוכנת)
- שיקולים רגולטוריים
- שיקולים כלכליים

באיור 39 מוצג תרשים סכמתי של התהליכים המרכזיים בטיפול ייצוב/מיצוק - הזנת הקרקע, ביחד עם מים ועם הראגנטים הדרושים, אל מתקן ערבוב, והסעת החומר המטופל אל אזור אחסון ואגירה לפני העברתו להטמנה.



**איור 39:** תרשים סכמתי של תהליך הטיפול ייצוב/מיצוק (מקור: מסמכי RFI של חברת Dekonta).

**טיפול בנוזלים חופשיים** – ייצוב מיצוק משמש להתמודדות עם מים חופשיים בפסולות מזוהמות בטרם יהיה ניתן להטמין אותן בהתאם לתקנים. התקן הישראלי לבדיקה שהמים החופשיים בפסולת אינם ספוגים אלא כלואים, הוא הפעלת לחץ (Unconfined compressive strength) – UCS של 1 מגה-פסקל. שימוש בצמנט הוא הנפוץ ביותר למיצוק הפסולת וכליאת המים החופשיים, כחלק מתהליך ההידרציה של הצמנט.

**טיפול במזהמים אנ-אורגניים** – חומרים אנ-אורגניים רבים, בדומה למתכות, הם קשיי פירוק. ייצוב מיצוק משמש להתמודדות עם חומרים אנ-אורגניים (בעיקר מתכות) בפסולות אשר אינן מתאימות להטמנה מכיוון שאינן עומדות בתקנים לפוטנציאל לתשטיפים של מזהמים. לאחר הטיפול והקטנת הפוטנציאל להוצרות תשטיפים מהפסולת, היא לא תחשב יותר פסולת מסוכנת. הערבוב עם הצמנט יוצר הידרוקסידים, קרבונאטים וסיליקטים לא מסיסים, קושר את המתכות למבנה המינרלי, משנה את הערכיות של חלק מהמתכות ומוריד את רעילותן ומהווה מעטפת פיזית מסיבית למתכות.

**טיפול במזהמים אורגניים** – מזהמים אורגניים (בעיקר דלקים ושמיים) בריכוזים גבוהים עלולים לעטוף את חלקיקי הצמנט, להפריע לתהליך ההידרציה שלו ולהפוך את התהליך ללא יעיל ולא אפקטיבי. יש לתכנן היטב ובאופן פרטני תהליכי ייצוב מיצוק של מזהמים אורגניים, בהתאם לאופיים. בנוסף, התגובות האקסו-תרמיות של תהליך ההידרציה עלולות לגרום לנידוף של VOCs ואף SVOCs, ויש להתייחס לאיסוף וטיפול בגזים הנפלטים במהלך עבודות הערבוב וייצוב הצמנט. עם זאת, תהליכי ייצוב מיצוק הוכחו כיעילים בטיפול במזהמים אורגניים הלוגניים, חצי-נדיפים ולא נדיפים, PAHs, PCBs, חומרי הדברה, ציאנידים אורגניים, וחומרים קורסיביים אורגניים. קשה להבחין בין התהליכים השונים של קיבוע החומרים האורגניים בתהליך הייצוב מיצוק, אך הוא לרוב אינו כולל היווצרות של מלחים אורגניים. קיבוע ע"י ספיחה נגרם ככל הנראה כתוצאה משינוי במבנה המרחבי של התרכובות האורגניות ו/או היווצרות תוצרי פירוק אשר חשופים יותר לספיחה ולקפסולציה. תהליך הייצוב מיצוק מתרחש בסביבה בסיסית מאוד, ולפיכך וייתכנו שינויים קצרי וארוכי טווח בהרכב הכימי של החומר האורגני בתוצר הסופי.

התהליכים הנפוצים של תגובות חומרים אורגניים בתהליך הייצוב מיצוק:

- הידרוליזה – תגובה של חומר עם מים, החלפת קבוצה הידרוכסילית בקבוצה פונקציונלית. יונים של נחושת וסידן הם זרזים של תגובות הידרוליזה של תרכובות אורגניות מסוימות. גם חומרים הספוחים לחרסיות או לפחם פעיל נמצאים בעדיפות לתגובות הידרוליזה. תרכובות אורגניות העמידות בפני הידרוליזה: חלק מהאסטרס, רוב האמידים, כל הניטרילים, חלק מהקרבמטים, וכל האלקיל-הלידים. תרכובות אורגניות אשר פחות עמידות להידרוליזה: אלקיל ובנזיל הלידים, פולי-מתאנים, אפוקסידים מותמרים, חומצות אסתר אליפטיות, אצטמידים מוכלרים וחלק מהחומצות הפוספוריות.
- חמצון – תרכובות ארומטיות רבות עוברות חמצון ע"י רדיקלים חופשיים (בנזן, בנזידין, אתיל בנזן, נפטלן, פנול). ארומטיים מוכלרים ותרכובות פולי-ארומטיות אינן מתחמצנות בדר"כ. קרקעות רוויות מים יהיו חשופות פחות לתהליכי חמצון כתוצאה מתהליך הייצוב מיצוק מאשר קרקעות בעלות אחוזי רוויה חלקיים. יש לקחת בחשבון שתוצרי חמצון של תרכובות מסוימות עלולות להיות רעילות יותר מאשר התרכובות המקוריות.
- חיזור – תהליכי חיזור יכולים להתרחש בקרקעות חרסיות בהן החרסית משמשת כמחזרת. חיזור של תרכובות אורגניות בפסולת נלמד מעט ולכן תהליך זה אינו ברור לחלוטין.

- יצירת תרכובות – יצירת תרכובות של חומרים אורגניים עם מתכות או קטיונים יכולה להיות דרך להורדה משמעותית של מסיסות המזהמים. כך חומצות אורגניות הופכות למקובעות בסביבה העשירה בסידן של תהליכי הייצוב/מיצוק.

- ייצוב פיסי (ספיחה) – מטרת החומרים הסופחים היא להקטין את כמות המים החופשיים בפסולת/בוצות המיועדות לטיפול, ובכך לשפר את יכולת השינוע של הפסולות וכן הקטנת מסיסות המזהמים ודליפתם מתוך הפסולות. חומרים אורגניים רבים יכולים להיספח בצורה טובה בתהליכי ייצוב מבוססי צמנט המשלבים תוספי פחם פעיל, בנטוניט, סודיום-סיליקאט בלתי רווי, גבס, Celite, חרסיות, מיקה וזאוליטים. עפר מרחף וסיליקטים מסיסים פחות אפקטיביים במובן זה. חומרים נדיפים ומסיסים מאוד אינם מגיבים טוב לתהליכי הייצוב, בעוד שחומרים עם מסיסות נמוכה נספחים בצורה טובה. הגדרה של אופי וכמות החומר בו יש להשתמש תלויה בכמות המים החופשיים, סוג המזהם, ויכולות הייצוב של החומר, ומושגת ע"י ניסויים בקנה מידה חצי-חרושת.

**שיקולים גיאוטכניים** – חקירת קרקע נדרשת על מנת לאפיין את אופי הקרקע ואת השינויים המרחביים בתכונותיה בכל האזור המזוהם, לפני תחילת הטיפול, על מנת לאפשר לטיפול להתבצע בצורה רציפה ויעילה. ישנן מספר רב של שיטות והגדרות לאפיון הקרקע, לכן יש חשיבות גדולה לתיאום ואחידות בין כל הגורמים המעורבים בפרויקט. אפיון הקרקע כולל פילוג גודל הגרגרים, צבע, אחוז חומר אורגני ותכונות פיזיקליות שונות. קרקעות המכילות כמויות משמעותיות של בולדרים או פסולת בניין לא מתאימות לערבוב מכאני עם חומרי ייצוב/מיצוק, ואפשר לבחון לגביהן שיטות ערבוב in-situ, או שיטות טיפול אחרות לחלוטין.

**טיפול באמצעות זיגוג (ויטריפיקציה)** – תהליך הטיפול כולל שימוש במקור חום (זרם חשמלי או תנור המוזן בדלקים) לקבלת טמפ' גבוהות מאוד ( $1,600^{\circ}\text{C} - 2,000^{\circ}\text{C}$ ). התהליך נועד לקבע מזהמים אנ-אורגניים ולפרק מזהמים אורגניים באמצעות פירוליזה. המזהמים האנ-אורגניים מקובעים אל המטריצות של הזכוכית והגבישים הנוצרים מההתכה של הקרקע. תוצרי הפירוליזה והשריפה הגזיים נקלטים ומטופלים באמצעות מערכות לטיפול בגזים, לפני פליטתם אל הסביבה. העלויות הגבוהות בתהליך עתיר-אנרגיה זה, ביחד עם עלויות השינוע של הקרקעות למתקן הטיפול, הופכות את שיטת הזיגוג להיות בלתי-מועדפת מבחינה כלכלית.

תהליכי ייצוב/מיצוק יכולים להתבצע Ex-Situ באמצעות חפירת הקרקע לצורך הטיפול, או In-Situ ע"י הזרקת תוספים אל הקרקע ללא הפרתה. ייצוב/מיצוק הינה אחת השיטות המועדפת על ידי ה-EPA לשיקום אתרים מזהמים בארה"ב בין השנים 2005 – 2011 [טבלה 23] – שימוש בטכנולוגיות ייצוב מיצוק נעשה בכ-20% מתוך 131 אתרים ששוקמו בשנים אלה בטכנולוגיות In-Situ, ובכ-25% מתוך 178 אתרים ששוקמו בשנים אלה בטכנולוגיות Ex-Situ.

**טבלה 23:** טכנולוגיות שיקום אתרים מזהמים בארה"ב בין השנים 2005-2011 (מקור: Superfund Remedy Report 14<sup>th</sup> edition)

| Technology                     | Total<br>(FY 2005-08) | Percent Source Treatment<br>Decision Documents<br>(FY 2005-08) | Total<br>(FY 2009-11) | Percent Source Treatment<br>Decision Documents<br>(FY 2009-11) |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>In Situ Treatment</b>       | <b>72</b>             | <b>48%</b>                                                     | <b>59</b>             | <b>50%</b>                                                     |
| Soil Vapor Extraction          | 32                    | 21%                                                            | 25                    | 21%                                                            |
| Chemical Treatment             | 11                    | 7%                                                             | 17                    | 14%                                                            |
| Solidification/Stabilization   | 14                    | 9%                                                             | 11                    | 9%                                                             |
| Thermal Treatment              | 14                    | 9%                                                             | 7                     | 6%                                                             |
| Bioremediation                 | 10                    | 7%                                                             | 4                     | 3%                                                             |
| Multi-Phase Extraction         | 6                     | 4%                                                             | 3                     | 3%                                                             |
| Constructed Treatment Wetland  | 0                     | 0%                                                             | 2                     | 2%                                                             |
| Subaqueous Reactive Cap        | 0                     | 0%                                                             | 2                     | 2%                                                             |
| Flushing                       | 2                     | 1%                                                             | 1                     | 1%                                                             |
| Fracturing                     | 1                     | 1%                                                             | 1                     | 1%                                                             |
| Phytoremediation               | 2                     | 1%                                                             | 0                     | 0%                                                             |
| <b>Ex Situ Treatment</b>       | <b>98</b>             | <b>65%</b>                                                     | <b>80</b>             | <b>67%</b>                                                     |
| Physical Separation            | 31                    | 21%                                                            | 33                    | 28%                                                            |
| Solidification/Stabilization   | 29                    | 19%                                                            | 15                    | 13%                                                            |
| Pump and Treat                 | 18                    | 12%                                                            | 13                    | 11%                                                            |
| Unspecified Off-site Treatment | 11                    | 7%                                                             | 11                    | 9%                                                             |
| Recycling                      | 15                    | 10%                                                            | 10                    | 8%                                                             |
| Unspecified On-site Treatment  | 2                     | 1%                                                             | 6                     | 5%                                                             |
| Phytoremediation               | 0                     | 0%                                                             | 5                     | 4%                                                             |
| Chemical Treatment             | 5                     | 3%                                                             | 4                     | 3%                                                             |
| Bioremediation                 | 4                     | 3%                                                             | 3                     | 3%                                                             |
| NAPL Recovery                  | 1                     | 1%                                                             | 1                     | 1%                                                             |
| Thermal Desorption             | 1                     | 1%                                                             | 1                     | 1%                                                             |
| Unspecified Thermal Treatment  | 1                     | 1%                                                             | 1                     | 1%                                                             |
| Other Ex Situ Technologies     | 13                    | 9%                                                             | 0                     | 0%                                                             |



## 5.2 התאמת הטכנולוגיה לקבוצות המזהמים

תהליכי ייצוב/מיצוק מתאימים עבור קרקעות המזהמות במתכות, תרכובות אנאורגניות, SVOCs וחומרים רדיואקטיביים. חומרים נדיפים אינם מתאימים לתהליכי ייצוב מכיוון שהם נוטים להתנדף בזמן עבודות הערבוב האינטנסיביות.

### מתכות

רוב המתכות ניתן לייצב באמצעות ייצוב/מיצוק. עם זאת ישנן מספר מתכות המהוות מזהמים סביבתיים עיקריים. בטבלה 24 סיכום מידע כימי על כל סוגי המתכות המזהמות, מידע על הרמות הולנטיות שלהם והתנאים בהם הן מגיבות.

**טבלה 24:** מידע כימי על כל סוגי המתכות, מידע על הרמות הולנטיות שלהם והתנאים בהם הן מגיבות

| מתכת         | קבוצה | מצבים וולנטיים | מצב וולנטי מועדף | תרכובות עם מסיסות נמוכה                               | תנאים להוצאות תרכובות                                                                                                                       | רעילות |
|--------------|-------|----------------|------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| אנטימון (Sb) | V     | +3, +5, -3     |                  | אוקסידים וסולפידים                                    | כימיה קטיונית לאחר חיזור למצב התלת-וולנטי                                                                                                   |        |
| ארסן (As)    | V     | +3, +5, -3     |                  | אוקסידים וסולפידים                                    | המצב הוולנטי משתנה בצורה קלה. הכימיה מורכבת (אניונית וקטיונית) ויש לשנות את פוטנציאל החמצון-חיזור על מנת לקבל מצב וולנטי מסוים              |        |
| בריליום (Be) | II    | +2             |                  | הידרוקסיד                                             | ערכי pH קרובים לנורמליים. בריליום הידרוקסיד מתאפיין באמפוטרייות, יוצר אניון ברילאט $(\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_4^{2-})$ בתמיסה אלקלינית |        |
| קדמיום (Cd)  | II B  | +2             |                  | קרבוט, הידרוקסיד ופוספט                               |                                                                                                                                             |        |
| קובלט (Co)   | VIII  | +3, +2         |                  | פוספט, סולפיד, תרכובות arsenosulfer                   |                                                                                                                                             |        |
| נחושת (Cu)   | II B  | +2             |                  | קרבוט, הידרוקסיד, פוספט, גופרית, תרכובות arsenosulfer |                                                                                                                                             |        |

| מתכת        | קבוצה | מצבים וולנטיים        | מצב וולנטי מועדף | תרכובות עם מסיסות נמוכה                          | תנאים להוצרות תרכובות                                                                                                      | רעילות                                                         |
|-------------|-------|-----------------------|------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| כרום (Cr)   | VB    | +2, +3, +6            | +3, +6           | קרבוט, הידרוקסיד, פוספט, תרכובות גופרית          | במצב וולנטי +6 מופיע כאניון ( $\text{CrO}_4^{2-}$ או $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) ויוצר תרכובת לא מסיסה עם בריום ועופרת. | $\text{Cr}^{+3}$ רעיל, $\text{Cr}^{+6}$ רעיל מאוד וקראצינוגני. |
| עופרת (Pb)  | IVA   | +2                    |                  | קרבוט, כרומט, הלד, פוספט, גופרית, תרכובות גופרית |                                                                                                                            |                                                                |
| כספית (Hg)  | IB    | +2, +1, 0             |                  | הלד, הידרוקסיד, פוספט וסולפידים                  |                                                                                                                            |                                                                |
| ניקל (Ni)   | VIII  | +1, 0, -1, +3, +2, +4 | +2               | קרבוט, הידרוקסיד, פוספט, תרכובות גופרית          |                                                                                                                            |                                                                |
| סלניום (Se) | VB    | +4, 0, -2, +6         |                  | סלנידים, אוקסידים, סולפידים                      |                                                                                                                            |                                                                |
| כסף (Ag)    | IB    | +1                    |                  | הלד, הידרוקסיד, תרכובות גופרית                   |                                                                                                                            |                                                                |
| תליום (Tl)  | II    | +3, +1                | +1               | הלדים (פרט ל-F), הידרוקסיד, סולפיד               |                                                                                                                            |                                                                |
| אבץ (Zn)    | IB    | +2                    |                  | קרבוט, הידרוקסיד, פוספט, סולפיד                  |                                                                                                                            |                                                                |

#### תרכובות אורגניות אחרות

אניונים אשר מטופלים לרוב בתהליכי ייצוב/מיצוק: פלואוריד ( $\text{F}^-$ ) ציאניד ( $\text{CN}^-$ ) ניטראט ( $\text{NO}_3^-$ ), פוספאט ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) וסולפיד ( $\text{S}^{2-}$ ). כלוריד יכול להיות מטופל בתהליכי ייצוב צמנטיים, אך כל כמות אשר תחרוג מיכולות הייצוב של הצמנט תעבור התמוססות ודיפוזיה מהירים במגע עם מים. בטבלה 25 סיכום על הכימיה היציבה של היונים.

## טבלה 25: הכימיה היציבה של היונים

| אניון                                   | אופן ייצוב                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| פלואוריד (F <sup>-</sup> )              | מיוצב בקלות בצורתו כקלציום פלוריד CaF <sub>2</sub>                                                                                                                                 |
| ציאניד (CN <sup>-</sup> )               | ציאנידים מסיסים כולל ניקל ציאניד (C <sub>2</sub> N <sub>2</sub> Ni) או קדמיום ציאניד (Cd(CN) <sub>2</sub> ). יוצר תרכובת לא מסיסה עם ברזל ([Fe(CN) <sub>6</sub> ] <sup>4-</sup> ). |
| ניטראט (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )  | כל תרכובות הניטראט הינן מסיסות, על כן טיפול ייצובמיצוק בד"כ אינו יעיל                                                                                                              |
| פוספאט (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) | פוספטים מסיסים יוצרים עם קטיונים רבים תרכובות לא מסיסות, כולל קלציום, ברזל ועופרת                                                                                                  |
| סולפיד (S <sup>2-</sup> )               | סולפידים מסיסים יוצרים עם קטיונים מתכתיים תרכובות לא מסיסות. תכונה זו הופכת סולפיד לריאגנט בתהליכי ייצובמיצוק בטיפול במתכות ובעיקר בכרום שש ערכי                                   |

## חומרי נפץ

חומרי נפץ הם חומרים שעוברים שינוי כימי מהיר, תוך ייצור גז, כאשר הם עוברים חימום או זעזוע מבני (אשד, 2005). חומרי הנפץ הנפוצים ביותר כמזהמים סביבתיים מופיעים בטבלה 26:

## טבלה 26: חומרי הנפץ הנפוצים ביותר כמזהמים סביבתיים

| שמות נוספים                                                                                          | חומר נפץ                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| ציקלוניט, הקסוגן,<br>1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine<br>Trinitrotoluene cyclotrimethylene-trinitramine | Royal Demolition Explosive (RDX)         |
| אוקטוגן<br>cyclotetramethylene-tetranitramine                                                        | High Melting eXplosive (HMX)             |
|                                                                                                      | 2,4,6-trinitrotoluene (TNT)              |
| 2,4-dinitrotoluene                                                                                   | 2,4-DNT (DNT) <sup>3</sup>               |
| 2,6-dinitrotoluene                                                                                   | 2,6-DNT (DNT) <sup>3</sup>               |
| Hexahidro-1-nitroso-3,5-dinitro-1,3,5-triazine                                                       | MXN <sup>4</sup>                         |
| Hexahidro-1,3-dinitroso-5-nitro-1,3,5-triazine                                                       | DNX <sup>4</sup>                         |
| Hexahidro-1,3,5-trinitroso-1,3,5-triazine                                                            | TNX <sup>4</sup>                         |
| -                                                                                                    | 1,3,5-trinitrobenzene (TNB) <sup>5</sup> |
| Guncotton, Cellulose nitrate                                                                         | Nitrocellulose                           |

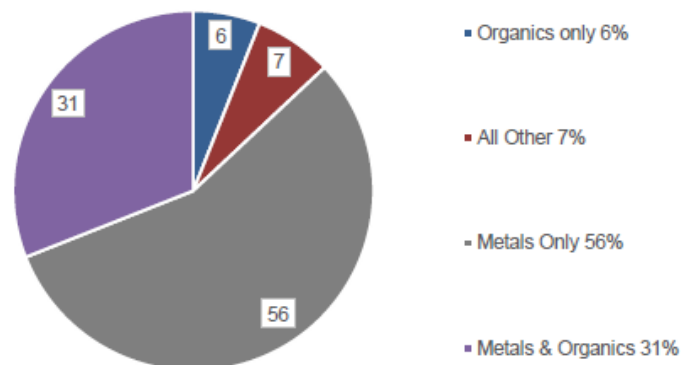
<sup>3</sup> תוצר פירוק של TNT בתנאים אירוביים

<sup>4</sup> תוצר פירוק של RDX בתנאים אירוביים

<sup>5</sup> תוצר פירוק פוטוליטי, נמצא לעיתים קרובות במי התהום

לרוב חומרי הנפץ מסיסות נמוכה יחסית במים ולכן גם בריכוזים נמוכים הם נוטים להצטבר בקרקע כחלקיקים נפרדים. בהתאם, אופן הפיזור שלהם בתת הקרקע מאוד הטרוגני. מאחר וניידותם נמוכה יחסית, תהליך ייצוב\מיצוק נחשב כלא יעיל בטיפול בקרקעות מזוהמות בחומרי נפץ.

קרקעות מזוהמות, מאופיינות במרבית המקרים במזהמים אורגניים ואנ-אורגניים יחד. חומרים אורגניים בתוך הקרקע עלולים לעכב הידרציה של הצמנט ובכך השפעתם שלילית על מטריצת הצמנט. באיור 40 מוצג אופי הזיהומים אשר טופלו באמצעות ייצוב\מיצוק באתרים בארה"ב. כפי שניתן לראות, ב-56% מהאתרים נמצא זיהום במתכות בלבד. ב-31% זיהום במתכות וחומרים אורגניים יחד.



**איור 40:** מזוהמים שטופלו באמצעות ייצוב\מיצוק באתרים בארה"ב (מקור: Bates and Hills, 2015)

#### יתרונות הטיפול בטכנולוגיית ייצוב\מיצוק:

- עלות זולה של חומרים
- מגוון רחב של חומרים (הכי נפוץ – צמנט פורטלנד)

#### חסרונות הטיפול בטכנולוגיית ייצוב\מיצוק:

- ה-pH הסופי של התערובת הוא בסיסי מאוד (12.5) אינו אופטימלי לשיקוע מתכות (כ-10).
- מזוהמים שונים (בעיקר שומניים) מפריעים לתהליך ההידרציה של הצמנט
- צמנט אינו יכול להשפיע על רמת החמצון של מתכות

ניתן להתגבר על חסרונות אלו באמצעות שימוש בתוספים לצמנט, כגון pozzolan, blast furnace slag, ואפר מרחף, אשר משפרים את יעילות התהליך ומקטינים את עלויות הטיפול.

**טיפול קדם**

קיימים מספר טיפולי קדם בכדי להפוך את תהליך הייצוב למיצוק לאפקטיבי יותר :

- ניטרול חומרים אשר עלולים להפריע לראגנטים של תהליך המיצוק, כמו חומצות או מחמצנים
  - הקטנת הנפח הכולל של החומר אותו יש לייצב ע"י שיקוע, סחיטה (הרחקת מים)
  - קשירה כימית לפאזה מוצקה של חלק מהמזהמים, לפני תחילת תהליך המיצוק, בכדי להרחיק אותם מהתמיסה
  - הומוגניזציה של החומר המיועד למיצוק בכדי להימנע מתכונות שונות של החומר לאורך הטיפול
- טיפול הקדם משמש להפיכת הפסולת לאינרטי או לפחות מסיסה, משפר את יעילות תהליך הייצוב למיצוק ומקטין את עלויות הטיפול. קדם טיפול מתבצע בתהליכי :

- ניטרול
- חמצון-חיזור
- סתירה והרחקה כימית של חומרים אשר עלולים להגיב בצורה לא רצויה (Chemical Scavenging)
- נידוף חומרים נדיפים
- ייבוש (הפרדה להרחקת מים)

**ייצוב למיצוק באמצעות פולימר**

יצירת מיקרו־מאקרו אנקפסולציה של המזהם באמצעות פולימרים. מתבצע בטמפרטורה נמוכה יחסית כאשר הפסולת בסביבת פולימר נוזלי. יכולה להתבצע In-Situ או Ex-Situ. ישנם פולימרים תרמופלסטיים (נמסים בחימום ומתקשים בטמפ' סביבה) ו-Thermosetting אשר דורשים ראגנטים נוספים על מנת להפוך לפולימרים ולהתקשות בצורה בלתי הפיכה. עבור חלקיקים מזהמים קטנים (מתחת ל-60 מ"מ) המפוזרים באופן הומוגני במטריצת הפולימר, התהליך נקרא מיקרו-אנקפסולציה. עבור חלקיקי מזהמים גדולים (מעל 60 מ"מ) כאשר הפולימר ממוקם סביבם, התהליך נקרא מאקרו-אנקפסולציה. מאקרו-אנקפסולציה נחשבת כטכנולוגיה המוכחת הטובה ביותר (BDAT – Best Demonstrated available technology) ע"י ה-EPA.

יתרונות ייצוב למיצוק בפולימר :

- מתאים לשימוש מול מגוון מזהמים, ובעיקר מתכות רעילות ותרכובות אורגניות
- מתאים לשימוש בפסולות נוזליות
- בהשוואה לייצוב למיצוק מבוסס צמנט, יש לחומר המיוצב תכונות תשטיפים ועמידות משופרים
- עלות נמוכה (\$1.88 עבור ק"ג של פוליאיתילן, בהשוואה ל-\$3 עבור ק"ג צמנט)
- מתאים לשימוש מול מגוון פסולות ובעיקר פסולות נוזליות, המתאפיינות במגוון תכונות ודרישות שיקום

חסרונות ייצוב למיצוק בפולימר :

- רגישות לקוטר החלקיקים. תהליך מיקרו-אנקפסולציה אופטימלי עבור חלקיקים שגודלם בין 50 מיקרון ל-3 מ"מ. מאקרו-אנקפסולציה עבור חלקיקים גדולים מ-60 מ"מ. עבור חלקיקים בגודל שונה מתווך זה מתאימות שיטות אחרות.

- נידוף. על מנת למנוע שחרור VOCs כדאי לבצע טיפול קדם בפסולות בהן 2% לחות ויותר

תכונות הפסולת הינן הפרמטר העיקרי בקביעת טכנולוגיית ייצוב/מיצוק. בטבלה 27 ובטבלה 28 מוצגת התאמה בין פסולות שונות לריאגנטים המשמשים בטכנולוגיית ייצוב/מיצוק. ניתן לראות כי טיפול המבוסס על צמנט יעיל מאוד בטיפול בפסולות אנ-אורגניות חומציות בגלל יכולת הצמנט לנטרל חומצות. אולם, אם נעשה שימוש במיקרו-אנקפסולציה תרמופלסטית לטיפול בפסולות אנ-אורגניות חומציות, יש צורך בניטרול הפסולת טרם הטיפול. ב

טבלה 29 בהמשך מוצגת אפקטיביות טכנולוגיית ייצוב/מיצוק בטיפול בסוגי מזהמים שונים.

**טבלה 27:** התאמה בין פסולות שונות לשיטות ייצוב/מיצוק

| Waste Component                               | Treatment Type                                                      |                                         |                                               |                                                     |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                                               | Cement-Based                                                        | Pozzolan-Based                          | Thermoplastic Microencapsulation              | Surface Encapsulation                               |
| ORGANICS                                      |                                                                     |                                         |                                               |                                                     |
| Organic solvents and oils                     | May impede setting, may escape as vapor                             | May impede setting, may escape as vapor | Organics may vaporize on heating              | Must first be absorbed on solid matrix              |
| Solid organics (e.g., plastics, resins, tars) | Good-often increases durability                                     | Good-often increases durability         | Possible use as binding agent in this system  | Compatible-many encapsulation materials are plastic |
| INORGANICS                                    |                                                                     |                                         |                                               |                                                     |
| Acid wastes                                   | Cement will neutralize acids                                        | Compatible, will neutralize acids       | Can be neutralized before incorporation       | Can be neutralized before incorporation             |
| Sulfates                                      | May retard setting and cause spalling unless special cement is used | Compatible                              | May dehydrate and rehydrate causing splitting | Compatible                                          |
| Halides                                       | Easily leached from cement, may retard setting                      | May retard set, most are easily leached | May dehydrate and rehydrate                   | Compatible                                          |
| Heavy metals                                  | Compatible                                                          | Compatible                              | Compatible                                    | Compatible                                          |
| Radioactive materials                         | Compatible                                                          | Compatible                              | Compatible                                    | Compatible                                          |

**טבלה 28:** התאמה בין פסולות שונות לריאגנטים המשמשים בטכנולוגיית ייצוב/מיצוק (ISS=In Situ Solidification/Stabilization) (מקור: Geo-Solutions, N.D.)

| Reagents   |                    |                                                                 |                    |
|------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------|
| ISS or IST | Reagent            | COCs Effectively Stabilized or Treated                          | Underlying Process |
| ISS        | Portland cement    | Numerous, MGP waste, gasoline and diesel range organics, metals | Binding            |
|            | Blast Furnace Slag | Numerous, MGP waste, gasoline and diesel range organics         | Binding            |
|            | Flyash             | Metals, organics and inorganics                                 | Binding            |
|            | Cement Kiln Dust   | Metals                                                          | Binding            |
|            | Activated Carbon   | Organics, Phenolic Waste                                        | Adsorption         |
|            | Bentonite Clay     | Organics                                                        | Adsorption         |
|            | Organophilic Clay  | Phenolic waste, organics                                        | Adsorption         |
|            | Attapulgate Clay   | Acids Waste, Metals                                             | Adsorption         |
|            | Lime               | Inorganics, Metals                                              | Binding            |



**טבלה 29:** אפקטיביות ייצוב/מיצוק בטיפול בסוגי מזהמים שונים (מקור: USEPA, 2009)

| Contaminant Group                               | Effectiveness |
|-------------------------------------------------|---------------|
| <b>Organic</b>                                  |               |
| Halogenated Volatiles                           | ▲             |
| Non-halogenated Volatiles                       | ▲             |
| Halogenated Semivolatiles                       | ■             |
| Non-halogenated Semivolatiles and Non-volatiles | ■             |
| Polychlorinated Biphenyls                       | ■             |
| Pesticides                                      | ■             |
| Dioxins/Furans                                  | ●             |
| <b>Inorganic</b>                                |               |
| Non-volatile Metals                             | ■             |
| Radioactive Materials                           | ■             |

■ = Demonstrated Effectiveness

▲ = No Expected Effectiveness

● = Potential Effectiveness

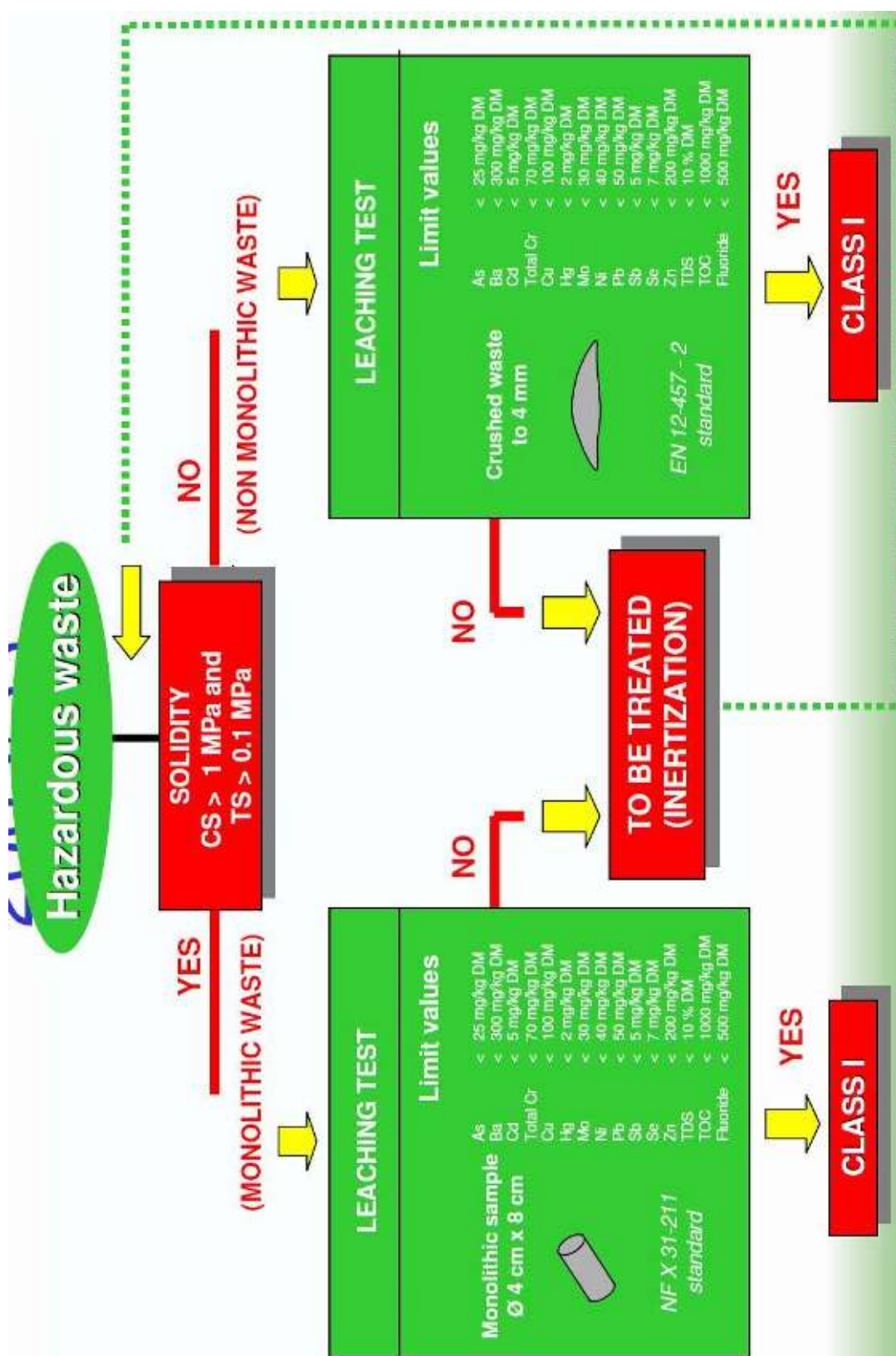
### 5.3 פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת

פרמטרים, מבחנים וקריטריונים שונים משמשים לתכנון תהליך ייצוב/מיצוק. הפרמטרים הם מאפייני החומרים המגדירים את יכולת התהליך לקבל את איכות התוצר הנדרשת (לדוגמא Leachability (תשטיפיות)). המבחנים משמשים להגדרת המאפיינים של החומרים (ISO-12457/2 משמש למדידת תשטיפיות). הקריטריונים הינם ערכי הפרמטרים המשמשים להשוואה האם הושגו היעדים בתהליך (לדוגמא ערכי סף לשיקום).

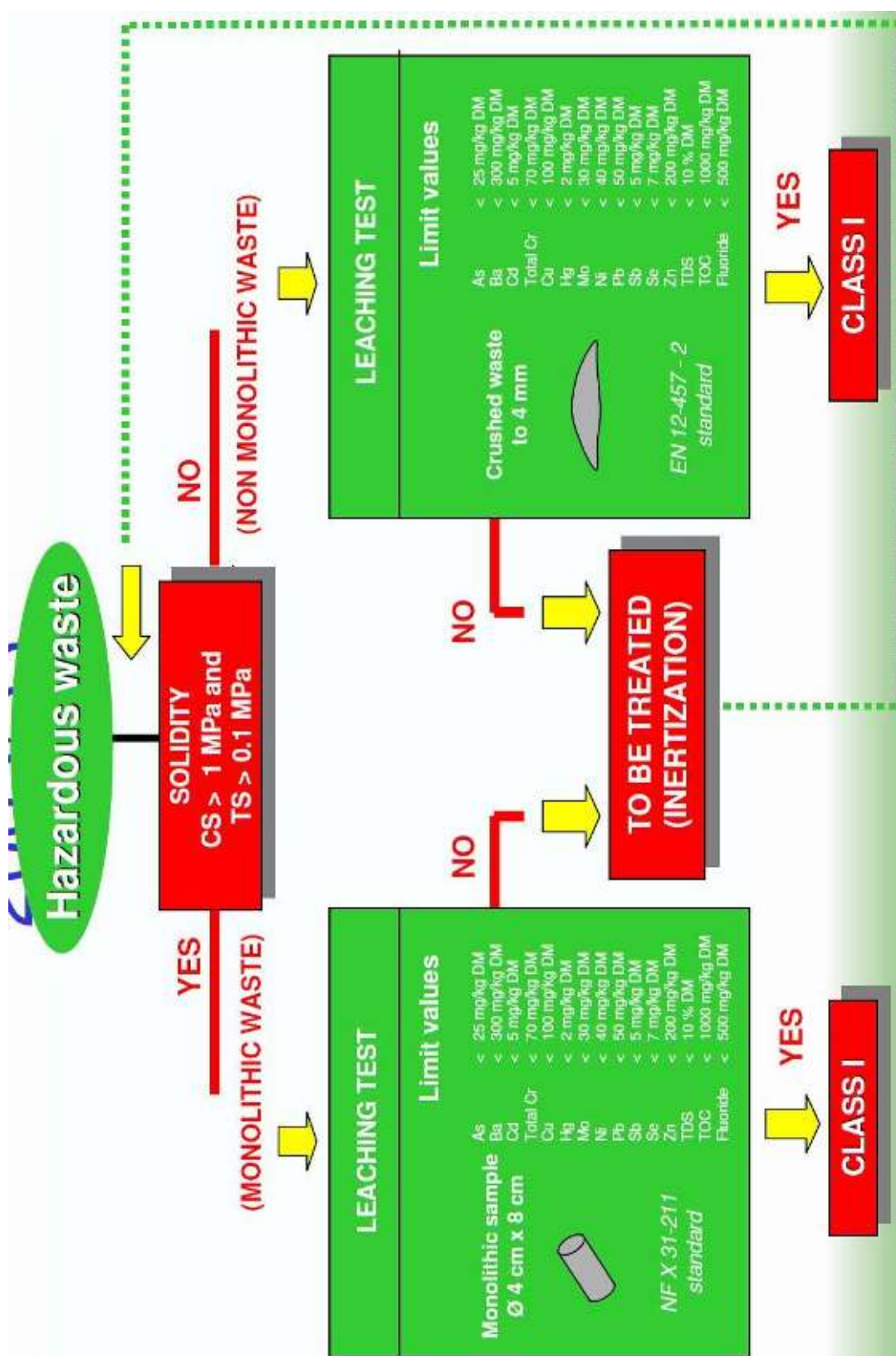
### פרמטרים

פרמטרים לאפיון פסולת מיוצבת:

- חוזק – מייצג את יכולת החומר לעמוד בלחץ פיסי המופעל עליו ללא עיוות או כשל. פרמטר נפוץ עבור תוצרי ייצוב/מיצוק הוא הפעלת לחץ (Unconfined compressive strength, UCS).
- מוליכות הידראולית – פרמטר המתייחס לתנועת מים דרך תווך נקבובי. הפרמטר המשמעותי בייצוב/מיצוק הוא המוליכות ההידראולית היחסית בין הפסולת המזוהמת ( $K_{sls}$ ) לקרקע בסביבתה ( $K_{soil}$ ). כאשר  $K_{sls}$  גבוה ביחס ל- $K_{soil}$ , הפסולת מכילה יותר מים.
- תשטיפיות – היכולת של הפסולת להרחיק מזהמים אל המים שזרמו דרכה. תשטיפיות מהווה פרמטר עיקרי במרבית תהליכי ייצוב/מיצוק וזאת כי מטרתו העיקרית של התהליך היא הקטנת המוביליות של המזהמים.



איור 41 ובטבלה 30 מוצגים מאפיינים להגדרת ערכי סף לתוצרים פי הדריקטיבה האירופאית.



איור 41: הגדרת ערכי סף לתוצרים (מקור: (French Interpretation of the EU Directive)



**טבלה 30:** ערכי סף של חוזק, מוליכות הידראולית ומתכות כבדות (מקור: Kogbara, 2013)

| Performance criteria                                                                                       | UCS  | Hydraulic conductivity | Cd     | Ni   | Zn  | Cu  | Pb  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------|--------|------|-----|-----|-----|
| Environment Canada WTC: Proposed UCS before immersion for controlled utilization (kPa)                     | 440  | NA                     | NA     | NA   | NA  | NA  | NA  |
| UK Environment Agency: 28-d UCS limit for disposal of S/S-treated wastes in landfills (kPa)                | 1000 | NA                     | NA     | NA   | NA  | NA  | NA  |
| UK and USEPA hydraulic conductivity limit for inground treatment and landfill disposal, respectively (m/s) | NA   | $<10^{-9}$             | NA     | NA   | NA  | NA  | NA  |
| Environment Canada WTC: Proposed permeability limit for landfill disposal scenarios (m/s)                  | NA   | $<10^{-8}$             | NA     | NA   | NA  | NA  | NA  |
| Environmental Quality Standard for inland surface waters (mg/L)                                            | NA   | NA                     | 0.0045 | 0.02 | NA  | NA  | 7.2 |
| Hazardous waste landfill WAC for granular leachability (mg/kg)                                             | NA   | NA                     | 5      | 40   | 200 | 100 | 50  |
| Stable nonreactive hazardous waste in nonhazardous landfill WAC (granular leaching) (mg/kg)                | NA   | NA                     | 1      | 10   | 50  | 50  | 10  |
| Inert waste landfill WAC for granular leaching (mg/kg)                                                     | NA   | NA                     | 0.04   | 0.4  | 4   | 2   | 0.5 |

Note: WTC, Wastewater Technology Centre; UCS, unconfined compressive strength; USEPA, United States Environmental Protection Agency; WAC, waste acceptance criteria. Adapted from Kogbara and Al-Tabbaa (2011).

בטבלה 31 מוצגת השפעתם של פרמטרים השונים על יעילות תהליך ייצוב/מיצוק.

**טבלה 31:** השפעת פרמטרים שונים על יעילות תהליך ייצוב/מיצוק (מקור: IRTC, 2011)

| Factor               |                             | Impact on performance                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Chemical factors     | Equilibrium vs. kinetics    | Equilibrium-controlled (e.g., steady-state) concentrations are generally higher than kinetic-controlled (e.g., time-based) concentrations such as some hydration and degradation reactions.                                                                                                 |
|                      | pH                          | Solubility of inorganic species and organic carbon can be a strong function of pH.                                                                                                                                                                                                          |
|                      | Liquid-to-solid ratio (L/S) | At low L/S, ionic strength increases, which can increase the solubility of some species.                                                                                                                                                                                                    |
|                      | Maximum leachability        | Fraction of total content that is leachable (i.e., availability) provides driving force for leaching.                                                                                                                                                                                       |
|                      | Complexation                | Some contaminants form soluble complexes (e.g., $\text{CdCl}_2$ , Pb-acetate, dissolved organic carbon [DOC]-PAHs), which increase aqueous concentrations and leaching rates.                                                                                                               |
|                      | Redox potential             | S/S mix designs may result in reducing conditions. Oxidation of reduced contaminant speciation, such as $\text{Cr(III)} \rightarrow \text{Cr(IV)}$ , can increase concentrations, toxicity, and leaching rates.                                                                             |
|                      | Sorption                    | Surface interactions with mineral phases (e.g., iron, aluminum, and manganese oxides; calcium silicates) can reduce porewater concentrations of some contaminants.                                                                                                                          |
| Physical factors     | Biological activity         | Acids produced by biological activity can alter pore chemistry and locally degrade minerals.                                                                                                                                                                                                |
|                      | Particle size               | Unit particle size dictates whether material is monolithic or granular. Mean particle size of contaminated material (e.g., finely grained or gravelly) may influence selection of reagents.                                                                                                 |
|                      | Hydraulic conductivity      | Water contact mode (e.g., flow through or flow around) is dictated by relative hydraulic conductivity of S/S material and surrounding soil.                                                                                                                                                 |
|                      | Pore structure              | Materials with large, connected pores generally have higher hydraulic conductivity, whereas lower hydraulic conductivity may be seen in materials with smaller or disconnected pores.                                                                                                       |
| Site conditions      | Groundwater flow rate       | Fast-moving groundwater limits contact time with the surface of S/S materials but may result in sufficient hydraulic head to force groundwater through the material pore structure.                                                                                                         |
|                      | Fill geometry               | Flux-based release of contaminants is proportional to the bulk surface area of the S/S fill.                                                                                                                                                                                                |
|                      | Temperature                 | Higher temperatures increase the rate of chemical reactions (e.g., mineral dissolution).                                                                                                                                                                                                    |
|                      | Hydrogeological conditions  | Determine water contact mode, liquid-to-solid ratios, infiltration rates, active surface area for leaching.                                                                                                                                                                                 |
| Moisture transport   |                             | Leaching from an S/S material is discontinued during drying; gas-phase reactions (e.g., oxidation, carbonation) require a pore vapor space for transport (i.e., partially dried material).                                                                                                  |
| Leachant composition |                             | Acids, chelants, and organic carbon may alter solubility of surface/near-surface minerals and contaminants.                                                                                                                                                                                 |
| Environmental attack |                             | Several species in the surrounding environment may accelerate leaching or degradation of the mineral structure through pH or redox changes and expansive precipitation reactions.                                                                                                           |
| Leaching             |                             | Release of mineral phases increases pore diameters and connectivity, potentially leading to increase in hydraulic conductivity and increased release rates.                                                                                                                                 |
| Cracking             |                             | All S/S materials have cracks on the micro and macro scales; formation of larger-aperture through-cracks may increase hydraulic conductivity but does not equate to catastrophic failure as complete through-cracks simply result in two monoliths of the same performance characteristics. |

בנוסף לפרמטרים שצוינו קודם, בפסולת מיוצבת יבדקו פרמטרים הבאים :

| פסולת מוקשה                                                                                                                                    | פסולת טרייה                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• חוזק/התנגדות לחדירה</li> <li>• מוליכות הידראולית</li> <li>• Leachability</li> <li>• עמידות</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• הרכב צמנט או תוספים אחרים</li> <li>• גידול הנפח</li> <li>• צפיפות הצובר ואחוז הלחות</li> <li>• אחידות</li> <li>• ריכוז המזהמים</li> </ul> |

## מבחנים

תדירות הדיגום של הפסולת הטרייה מוגדר על ידי המתכנן ו/או הרגולטור. אולם מומלץ לבצע דיגום בהתאם להנחיות כלליות הבאות :

- לפחות אחת ליום עבודה ואחת למשמרת (במקרה של מספר משמרות) ובכל פעם של שינוי אצווה או מפעיל
- כל 400-800 מ"ק חומר מטופל (ובהתבסס על גודל אתר שיקום, הטרוגניות של הפסולת, תוצאות דיגום קודמות. מידע זה ישמש למעקב אודות התקדמות הפרויקט)
- בכל פעם שהתכונות הפיסיקליות של החומר משתנות באופן משמעותי, כגון רמת זיהום גבוהה, רטיבות ועוד

ניתן לבחון כל אחד מהפרמטרים באמצעות מספר שיטות שונות, כאשר בכל אחת מהשיטות יתקבלו תוצאות שונות בצורה משמעותית. ניתן לבצע מבחנים של חוזק ומוליכות הידראולית בפסולת מיוצבת טריה והתוצאות שיתקבלו יהיו נכונות גם לטווח זמן ארוך. לעומת זאת, התשטיפיות משתנה לאורך חיי החומר ולכן מבחן לבדיקת פרמטר זה יבחר בהתאם לדרישות הספציפיות, כגון יעד פינני סופי של החומר.

### 5.4 טיפול מיצוב מיצוק מחוץ לאתר (Ex-Situ)

תהליכי ייצוב/מיצוק יכולים להתבצע בשתי שיטות עיקריות: מחוץ לאתר (Ex-Situ) או בתוך האתר (In-Situ). בסעיף זה מוצגת בפירוט שיטת הטיפול מחוץ לאתר (Ex-Situ).

#### 5.4.1 תיאור כללי של התהליך

ייצוב/מיצוק מחוץ לאתר (Ex-Situ) מתבצע באמצעות חפירת הקרקע/פסולת והעברתה לאתר חיצוני לצורך הטיפול. לאחר הטיפול מוחזרת הפסולת המיוצבת להטמנה באתר המקורי או מפונה לאתר חיצוני. בתהליך זה מתבצעת בקרה טובה על הריאגנטים, פעולות הערבוב ואיכות התוצר הסופי. תהליך זה מתאים לאתרים בהם הזיהום בעומק רדוד ואתרים בהם אין אפשרות למקם ציוד גדול. יישומים נוספים של ייצוב/מיצוק Ex-situ כוללים:

1. ערבוב במיכל (In-drum mixing): פסולות רעילות מוזנות לתוך מיכל הממוקם באתר עצמו. בשיטה זו המיכל משמש הן לערבוב הפסולת הרעילה והן לאחסונה לאחר הטיפול. במקרה זה נדרש נפח פנוי של 30%-50% מהמיכל והריאגנטים מוספים ישירות לתוכו.
2. שטח ערבוב (Area mixing): הפסולת מונחת על גבי משטח פינני בשכבה בעובי 2-24 אינצ' ומכוסה לאחר מכן בשכבה של ריאגנטים. שתי השכבות מעורבבות באמצעות כלי מכאני. התערובת מתייבשת באוויר ונדחסת

וניתן להוסיף שכבות נוספות של פסולת או ריאגנטים. השכבה האחרונה מכוסה באדמה לכיסוי סופי. ניתן לפנות את הפסולת ליעד פינוי אחר, אך פעולה זו משמעותה שטח מזוהם נוסף שדורש טיפול.

השיקולים בבחירת טיפול Ex-situ כוללים הכפלת נפח הפסולת במהלך התהליך, היווצרות מטרדי ריח, אבק וגזים אורגניים. תהליך הטיפול מורכב משלושה שלבים :

1. מחקר מעבדתי :
  - (1) איפיון/אנליזה של הפסולת,
  - (2) פיתוח נוסחה ספציפית לתהליך, הכולל בחירת ריאגנטים ותוספים מתאימים
2. בחינה והרצה :
  - (1) בחינת תהליך הטיפול בקנה מידה אמיתי,
  - (2) ביצוע מספר מבחנים עבור הפורמולה למציאת אופטימיזציה של התהליך,
3. תפעול :
  - (1) גיוס של ציוד הכרחי,
  - (2) תכנון הכולל תשתיות נדרשות, אתר טיפול, אתר יעודי לסילוק הפסולת המטופלת (כגון אתר הטמנה),
  - (3) הנעת התהליך, כולל חפירת הפסולת והובלתה לאתר הטיפול, עירבוב, איסוף גזים רעילים והטיפול בהם,
  - (4) בקרת איכות של התוצר.
4. פינוי סופי של התוצר.

#### 5.4.2 יתרונות וחסרונות של טיפול Ex-Situ

##### יתרונות של טיפול Ex-Situ

1. מתבצעת בחינה של תכונות הפסולת, כגון תכולת לחות, מרקם, רמת זיהום, דרגת אגרציה/אגלומרציה, כמות וסוג מזהמים, המאפשרת פיתוח תהליך יעיל וקבלת תוצר מבוקר. כאשר תכונות הפסולת שונות מקריטריוני התכנון, ניתן לשנות ולהתאים את תהליך הטיפול כך שמטרתו תשמר.
2. לטיפול בפסולת מזוהמת ניתן להשתמש הן בריאגנטים נוזליים והן במוצקים, בד"כ תוך כדי ביצוע פעולות הערבוב. בנוסף, במידת הצורך ניתן להוסיף מים, שהינו מרכיב חיוני לערבוב מושלם, על מנת לייעל את התהליך.
3. ניתן לדגום בקלות את הפסולת המטופלת במהלך התהליך על מנת לקבל הערכה מהירה של התוצר המתקבל. במידת הצורך, ניתן להחזיר את התוצר לתהליך על מנת לקבל איכות טובה יותר.
4. מתאים לקרקעות רדודות הממוקמות מעל מפלס מי התהום.

##### חסרונות של טיפול Ex-Situ

1. נדרש שטח גדול יותר לאגירת הפסולת (חומר גלם), ביצוע תהליך הייצוב/מיצוק והפסולת המטופלת (תוצר) טרם פינויה לצורך בדיקת איכותה. בתהליך זה הסדרים לוגיסטיים הכוללים תובלת הפסולת לאתר הטיפול ובהמשך ליעד פינוי סופי.
2. במקרה של קרקעות מזוהמות עמוקות (בעומק גדול מ-4.5 מ') ישנן דרישות תכנון רבות יותר. חפירה לעומקים אלה דורשת ביצוע תמיכה מתאימה.
3. חפירה מתחת למפלס מי התהום דורשת פעולות לניהול מי התהום.



**5.4.3 פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת**

תהליך טיפול זה מתאים לפסולות בעומק רדוד אשר לא מכילות אבנים וסלעים או הפרדת אבנים וסלעים מן הפסולת טרם הכנסתה למערבל. במידה וימצאו סלעים בתוך הפסולת הם עלולים לפגוע במערבל, הן בבוחש הנמצא במגע ישיר עם הפסולת והן בגלגלי השיניים והמנוע המניעים אותו. בהתאם לכך לנושא זה חשיבות רבה.

**5.4.4 שיקולים סביבתיים**

בסעיף זה מוצגים שיקולים סביבתיים שיש לקחת בחשבון בעת בחירת טיפול Ex-situ :

- הובלת הפסולת מחוץ לאתר, לעיתים דרך שטחים ציבוריים ו/או בכבישים ראשיים, עלולה לגרום למטרדים סביבתיים רבים הכוללים רעש, אבק, ריחות, שפיכה בלתי מכוונת של הפסולת ממשאיות, עומסי תנועה ועוד. בנוסף, ישנם סיכונים פוטנציאליים נוספים העלולים להיגרם בעת הובלת חומרים מסוכנים.
- מתקן הטיפול נמצא, בדרך כלל, מרוחק מרצפטורים רגישים על מנת לצמצם, ככל האפשר, את ההשפעה עליהם,
- התהליך מתבצע בסביבה מבוקרת

**5.4.5 שיקולים סטטוטוריים**

בעת בחירת טיפול Ex-situ יש לקחת בחשבון שיקולים סטטוטוריים הבאים :

- הפעלת מתקן ייצוב/מיצוק קיים/מתוכנן תתבצע עם קבלת כל ההיתרים ואישורים הנדרשים,
- להובלה ושינוע הפסולת לטיפול באתר חיצוני נדרש היתר להובלת חומ"ס. לטיפול בקרקע מעורבת (תערובת קרקע מסוכנת וקרקע לא מסוכנת) יש צורך להפרדה/הגדרה באתר השיקום.

**5.4.6 שיקולים פיננסיים ומחירים לטיפול**

עלויות ייצוב/מיצוק משתנות בהתאם לאתר וסוגי מזהמים. שיקולים כלכליים שיש לקחת בחשבון בעת בחירת טיפול Ex-situ כוללים :

- מרחק מאתר השיקום למתקן ייצוב/מיצוק : המרחק משפיע על עלויות ההובלה והשינוע. ככל שהמרחק יהיה גדול יותר, נדרש יותר דלק, כח אדם וכו' ובהתאם עלויות יהיו גבוהות יותר.
- עלות הצידוד : עלות יומית כוללת עבור צידוד המשמש לטיפול Ex-situ נמוכה בהשוואה לצידוד בשיטת ה-In-situ. עלות המערבל כ-1000\$/יום, צידוד שינוע כ-1000\$/יום, סילו לאחסון ריאגנטים כ-500\$/יום. עלות טיפול למנת פסולת אחת, כולל עלויות כל הצידוד, עומדת על כ-2000\$/יום.
- סוג הפסולת : (1) תכולת מים בתוך הפסולת מעלה את עלות התהליך, (2) ריכוז וסוג מזהמים מגדירים את הכמות הנדרשת של הריאגנטים.
- גודל אתר מזהם : ככל שהאתר גדול יותר, התהליך פשוט יותר והמחיר לטון נמוך יותר.
- עלויות כוח אדם : לתפעול מערכת Ex-situ, הכוללת הזנת המערכת, תפעול המערבל (וצידוד נוסף), אחסון הריאגנטים והובלתם ופינוי התוצר, נדרשים 3-4 עובדים.

ב

טבלה 32 מוצגת השוואת שיטות ייצוב/מיצוק שונות. ההשוואה כוללת ציון יעילות התהליך, משך הביצוע ועלויות לטון חומר מטופל תוך ציון עלויות הבאות : ריאגנטים, כוח אדם ליום, צידוד, תובלה, עלות התהליך ורווח.

**טבלה 32: השוואת שיטות ייצוב/מיצוק שונות**

| Parameter                      | In Drum        | In Situ        | Plant Mixing   |                | Area Mixing    |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                |                |                | Pumpable       | Unpumpable     |                |
| Metering and mixing efficiency | Good           | Fair           | Excellent      | Excellent      | Good           |
| Processing days required       | 374            | 4              | 10             | 14             | 10             |
| Cost/ton                       |                |                |                |                |                |
| Reagent (\$)                   | 20.50<br>(9%)  | 20.50<br>(63%) | 20.50<br>(53%) | 20.50<br>(42%) | 20.50<br>(49%) |
| Labor and per diem (\$)        | 51.07<br>(23%) | 1.36<br>(4%)   | 3.83<br>(10%)  | 6.93<br>(14%)  | 6.35<br>(15%)  |
| Equipment rental (\$)          | 37.14<br>(17%) | 1.38<br>(4%)   | 3.93<br>(10%)  | 7.54<br>(16%)  | 4.07<br>(10%)  |
| Used drums at \$11/drum (\$)   | 48.18<br>(21%) | -              | -              | -              | -              |
| Mobilization-demobilization    | 15.68<br>(7%)  | 1.58<br>(5%)   | 1.43<br>(4%)   | 2.26<br>(5%)   | 1.20<br>(3%)   |
| Cost of treatment process      | 172.57         | 24.83          | 29.69          | 37.23          | 32.11          |
| Profit and overhead (30%)      | 51.72<br>(23%) | 7.45<br>(23%)  | 8.91<br>(23%)  | 11.17<br>(23%) | 9.63<br>(23%)  |
| <b>Total cost/ton (\$)</b>     | <b>224.29</b>  | <b>32.28</b>   | <b>38.60</b>   | <b>48.40</b>   | <b>41.75</b>   |

Reproduced from: USEPA, 1986

בטבלה 33, ובטבלה 34 מוצגות עלויות של אתרים בגדלים שונים.

**טבלה 33: עלויות של אתרים בגדלים שונים**

| Racer parameters         | Small site |           | Large site |           |
|--------------------------|------------|-----------|------------|-----------|
|                          | Easy       | Difficult | Easy       | Difficult |
| Cost per ft <sup>3</sup> | \$6        | \$7       | \$4        | \$5       |
| Cost per m <sup>3</sup>  | \$216      | \$248     | \$124      | \$190     |
| Cost per yd <sup>3</sup> | \$165      | \$189     | \$94       | \$144     |

Reproduced from: [www.frtr.gov](http://www.frtr.gov)

טבלה 34: עלויות של אתרים בגדלים שונים

| SOIL TECHNOLOGY:                             |  | Solidification/Stabilization |                |             |                |
|----------------------------------------------|--|------------------------------|----------------|-------------|----------------|
| RACER PARAMETERS                             |  | Scenario A                   | Scenario B     | Scenario C  | Scenario D     |
|                                              |  | Small Site                   |                | Large Site  |                |
| Remedial Action:                             |  | Easy                         | Difficult      | Easy        | Difficult      |
| Media/Waste Type                             |  | Solid                        | Sludge         | Solid       | Sludge         |
| Contaminant                                  |  | Metals                       | Metals & SVOCs | Metals      | Metals & SVOCs |
| Approach                                     |  | Ex Situ                      | Ex Situ        | Ex Situ     | Ex Situ        |
| System Definition:                           |  |                              |                |             |                |
| Type of Waste                                |  | Solid                        | Sludge         | Solid       | Sludge         |
| Density of Waste (pcf)                       |  | 100                          | 80             | 100         | 80             |
| Quantity of Waste (CY)                       |  | 1,000                        | 1,000          | 50,000      | 50,000         |
| Process System (CY)                          |  | 2                            | 2              | 10          | 10             |
| Safety Level                                 |  | D                            | D              | D           | D              |
| Additives:                                   |  |                              |                |             |                |
| Initial Moisture Content (%)                 |  | 15                           | 60             | 15          | 60             |
| Minutes Per Batch (MIN)                      |  | 20                           | 20             | 20          | 20             |
| Waste Disposal Volume (CY)                   |  | 1,270                        | 1,337          | 63,487      | 66,855         |
| Chemical Additive Ratios:                    |  |                              |                |             |                |
| Cement : Waste                               |  | 0.15 : 1                     | 0.40 : 1       | 0.15 : 1    | 0.40 : 1       |
| Water : Cement                               |  | 0.40 : 1                     | N/A            | 0.40 : 1    | N/A            |
| Proprietary Chemicals : Waste                |  | 0.01 : 1                     | 0.01 : 1       | 0.01 : 1    | 0.01 : 1       |
| Fly Ash : Waste                              |  | 0.00 : 1                     | 0.00 : 1       | 0.00 : 1    | 0.00 : 1       |
| Cement Kiln Dust : Waste                     |  | 0.00 : 1                     | 0.00 : 1       | 0.00 : 1    | 0.00 : 1       |
| Hydrate Lime : Waste                         |  | 0.00 : 1                     | 0.00 : 1       | 0.00 : 1    | 0.00 : 1       |
| Bitumen : Waste                              |  | 0.00 : 1                     | 0.00 : 1       | 0.00 : 1    | 0.00 : 1       |
| Activated Carbon : Waste                     |  | 0.00 : 1                     | 0.00 : 1       | 0.00 : 1    | 0.00 : 1       |
| Solidification/Stabilization Marked-Up Costs |  | \$149,546                    | \$171,663      | \$4,280,064 | \$6,555,059    |
| Additional Costs:                            |  |                              |                |             |                |
| Remedial Design - Detailed On-Site           |  | \$16,450                     | \$18,883       | \$342,405   | \$458,854      |
| TOTAL MARKED-UP COST \$                      |  | \$165,996                    | \$190,546      | \$4,622,469 | \$7,013,913    |
| COST PER CUBIC FOOT                          |  | \$6                          | \$7            | \$4         | \$5            |
| COST PER CUBIC METER                         |  | \$216                        | \$248          | \$124       | \$150          |
| COST PER CUBIC YARD                          |  | \$165                        | \$189          | \$94        | \$144          |

#### 5.4.7 דוגמאות למתקני טיפול Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

בטבלה 35 ניתן לראות דוגמאות לטכנולוגיות טיפול ייצוב מיצוק Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI אשר הוגשו לחברה לשירותי איכות סביבה.

\*לצורך הצגת ערכים אחידים בטבלה: העלויות מוצגות בשקלים ע"פ השערים \$1=3.8₪, €1=4₪. תפוקות מוצקות בטונות ע"פ 1 מ"ק קרקע = 1.5 טון. מס' שעות עבודה בשנה = 2,800 (10 שעות עבודה ביום, 280 ימי עבודה בשנה).

#### טבלה 35: דוגמאות טיפול ייצוב מיצוק Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

| חברה | הזנה  | מזהמים                                                                | טווח ריכוז מזהמים                                         | קצב טיפול                         | כמות מינימלית | סביבה                                                  | משך הרצה               | מגבלות          | תשתיות נדרשות | עלות                           |
|------|-------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------|------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|
| HPC  | -     | TPH, PAH, chlorinated & brominated Organics, Pesticides, POP & PCDD/F | עד 200,000 מ"ג/ק"ג                                        | 500-100,000 טון לשנה              | 100 טון       |                                                        | מידית או 3-6 חודשים    | עודף מים בפסולת | -             | עלות טיפול: 20 ₪ - 240 ₪ לטון  |
|      | -     | מתכות כבדות                                                           | עד 50,000 מ"ג/ק"ג                                         | 500-50,000 טון לשנה               | 50 טון        |                                                        | 2-6 חודשים             | -               | -             | עלות טיפול: 8 ₪ - 200 ₪ לטון   |
|      | רציפה | אנ-אורגניים (בעיקר מתכות) ואורגניים (שמנים, חומרי הדברה ועוד)         | זיהום נמוך עד בינוני, במקרים מסוימים מתאים גם לזיהום גבוה | עד 140,000 טון לשנה (50 טון לשעה) | -             | אוויר: בד"כ אין פליטות. במידת הצורך תתבצע בקרת הפליטות | מתקן פיילוט כ-3 חודשים | -               | -             | עלות טיפול: 114 ₪ - 304 ₪ לטון |

| חברה                           | הזנה           | מזהמים                                                                                                                                       | טווח ריכוז מזהמים                                                 | קצב טיפול                                                                 | כמות מינימלית           | סביבה                                                                                             | משך הרצה     | מגבלות                                                             | תשתיות נדרשות                                      | עלות                                                     |
|--------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>Sectar SA</b><br>[איור 42]  | מנתי           | Heavy oily hydrocarbons<br>Heavy metals                                                                                                      | יעילות מרבית עבור 30,000-50,000 מ"ג/ק"ג. אפשרי עד 150,000 מ"ג/ק"ג | 56,000-112,000 טון לשנה (200-400 טון ליום), אפשרי גם עד 560,000 טון לשנה. | 500 טון                 | אוויר ורעש : מרחק הפרדה של כ-500 מ' לפחות מקולטנים רגישים                                         | כ-10 ימים    | שמיים מעל 5% TPH. תנאי מז"א : גשם, רוחות חזקות, שלג, טמפי קיצוניות | חשמל, מים, ביוב, מעבדה, שטחי אחסון, אטומים, משרדים | עלות טיפול : 106 - 152 ש"ח לטון                          |
| <b>CH2M</b>                    | מנתי, חצי-רציף | Oils/fuels, explosives, heavy metals, oxidizers, acids, bases, salts, volatile and semi-volatile organics, and chloro-organic solvent wastes | -                                                                 | עד 168,000 טון לשנה (600 טון ליום)                                        | 1,500 טון (1,000 מ"ק)   | אוויר : הרטבה של ערימות הקרקע למניעת אבק, וכיסוי באמצעות קצף למניעת ריח ונידוף מזהמים במידת הצורך | כ-2-3 שבועות | עודף משקעים                                                        | מים, חשמל, מדחסים                                  | עלות טיפול : 152 - 228 ש"ח לטון                          |
| <b>שיכון ובינוי</b>            | -              | רוב המזהמים כולל מתכות, חומצות ובסיסים                                                                                                       | -                                                                 | -                                                                         | -                       |                                                                                                   | -            | -                                                                  | כיסוי קרקע לא חדיר, חשמל                           | -                                                        |
| <b>Ludreco SA</b><br>[איור 43] | מנתי, רציף     | שמיים, דלקים, מתכות כבדות                                                                                                                    | -                                                                 | 500-3,200 מ"ק ליום                                                        | 75,000 טון (50,000 מ"ק) |                                                                                                   | 2-3 שבועות   | סלעים                                                              | -                                                  | עלות מתקן : 2 מליון ש"ח. עלות טיפול : 160 - 240 ש"ח לטון |



איור 42 : חברת Sector SA



איור 43 : חברת Ludreco SA



#### 5.4.8 מקרי בוחן בעולם (International Case Studies)

בטבלה 36 ניתן לראות מספר מקרי בוחן לטיפול ייצוב\מיצוק מהעולם

**טבלה 36:** מקרי בוחן לטיפול ייצוב\מיצוק מהעולם

| Project Name                          | Location           | Parties Involved<br>(Contractors,<br>Consultants, Regulators<br>etc...)                                    | Years<br>Performed       | Primary<br>Contaminants                      | Type of<br>Soil/Waste                                                               | Project Description                                                                                                              | Performance<br>Standards                                                                                                                                                                                                        | Treatment<br>Costs |
|---------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Villeparisis<br>Unit                  | France             | <b>Designer:</b><br><br><b>Operator:</b> France<br>Déchets                                                 |                          |                                              | Hazardous<br>Industrial<br>Waste,<br>Asbestos,<br>Sewage<br>Waste,<br>Polluted Soil | 200,000 tons of hazardous<br>waste/year<br><br>50,000 tons of contaminated<br>soil                                               | French Interpretation<br>of the EU Directive<br>for Leachate Criteria                                                                                                                                                           | N/A                |
| Soil<br>Stabilization<br>Olympic Park | London,<br>England | <b>Remediation<br/>Contractor:</b><br>HBR Remediation<br>Specialists<br><b>Managing Consultant:</b><br>CLM | April 2008<br>(25 Weeks) | Arsenic,<br>Mercury,<br>Selenium and<br>Lead |                                                                                     | In total some 30,000 tons<br>(500 tons/day) of<br>material was processed and<br>incorporated back into the<br>earthworks design. | All such QA/QC<br>procedures<br>were monitored by<br>the single process<br>operator, with treated<br>materials stockpiled<br>for independent<br>validation for<br>compliance to local<br>leachate and<br>geotechnical criteria. | £0.4M              |

| Project Name                                                         | Location                  | Parties Involved<br>(Contractors,<br>Consultants, Regulators<br>etc...)                  | Years<br>Performed | Primary<br>Contaminants                                                            | Type of<br>Soil/Waste | Project Description                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Performance<br>Standards                                                                                                                                                              | Treatment<br>Costs |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Schuylkill<br>Metals<br>Superfund Site,<br>Battery<br>Recycling Site | Plant,<br>City FL,<br>USA | <u>Remediation Contractor:</u><br><br><u>Managing Consultant:</u>                        | 1990-1998          | Heavy Metals                                                                       |                       | Ex-Situ Mixing<br>Proportions Included:<br>- Soil 88 %<br>- Cement 10 %<br>- Tri-Sodium Phosphate<br>(TSP) 2 %                                                                                                                                                                                                                                                                          | - UCS > 50 psi<br>- Hydraulic<br>conductivity <<br>1x10 <sup>-6</sup> cm/s<br>- Lead in TCLP<br>leachate < 5<br>milligrams per<br>liter (mg/L)<br>- Lead in SPLP<br>leachate < 1 mg/L |                    |
| Sunflower<br>Army<br>Ammunition<br>Depot SWMU<br>22                  | De Soto<br>KS.<br>USA     | <u>Remediation Contractor:</u><br>IT Corporation<br><br>Paul.Lear<br>plear@envirocon.com |                    | Explosives<br>(nitro-<br>glycerine and<br>nitrocellulose),<br>propellants,<br>lead | Contaminated<br>Soil  | The contaminated soil<br>(70,000 tons) was<br>treated with Portland<br>cement, producing a<br>treated material that did<br>not exhibit a hazardous<br>characteristic for<br>leachability (primarily<br>lead) or ignitability (due<br>to the presence of<br>explosives and<br>propellant).<br><br>The treated soil was<br>transported to a local<br>landfill or use as a daily<br>cover. | - TCLP lead < 5<br>mg/L,<br>- No reactivity                                                                                                                                           |                    |

| Project Name                    | Location                | Parties Involved<br>(Contractors,<br>Consultants, Regulators<br>etc...) | Years<br>Performed | Primary<br>Contaminants                                                                                                                                                                                                                       | Type of<br>Soil/Waste | Project Description                                                                                                                                                                                                                                    | Performance<br>Standards                      | Treatment<br>Costs |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------|
| Umatilla<br>Ammunition<br>Depot | Umatilla,<br>OR,<br>USA |                                                                         |                    | Heavy Metals<br>(antimony,<br>arsenic, barium,<br>beryllium,<br>cadmium,<br>chromium, lead,<br>cobalt, thallium,<br>copper, nickel,<br>silver, zinc) and<br>Explosives<br>(1,3,5- TNB,<br>2,4-DNT, RDX,<br>2,4,6-TNT,<br>HMX, and<br>Tetryl.) |                       | The contaminated soil<br>was removed and treated<br>onsite to reduce the<br>leachability of metals<br>and explosives. The<br>treated soil was placed<br>back and compacted in<br>the excavation area and<br>capped with a low<br>permeable clay cover. | Leachate Limits<br>defined for the<br>project |                    |

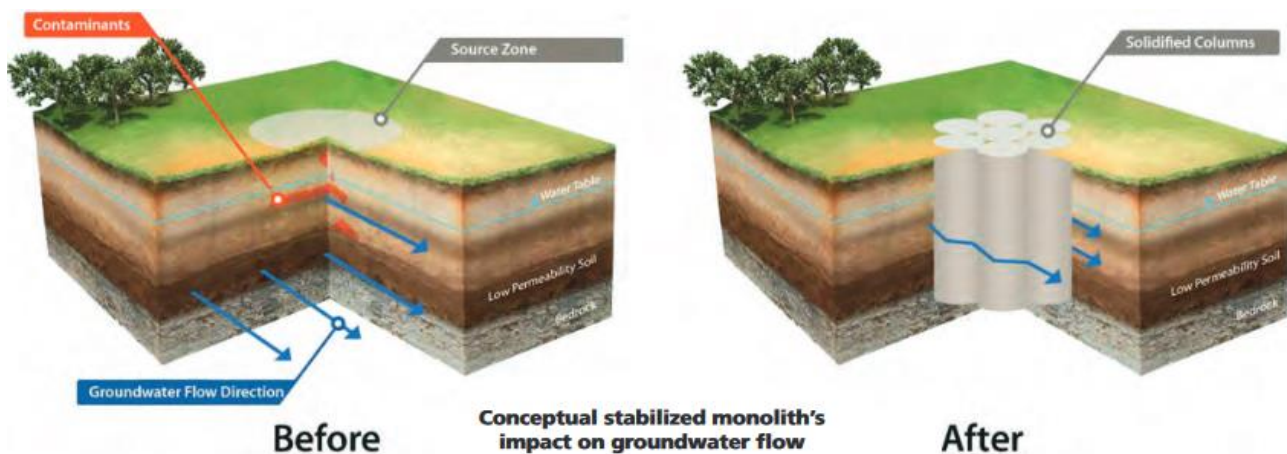
## 5.5 טיפול מיצוב מיצוק במקום: In-Situ

תהליכי ייצוב מיצוק יכולים להתבצע בשתי שיטות עיקריות: מחוץ לאתר (Ex-Situ) או בתוך האתר (In-Situ). בסעיף זה מוצגת בפירוט שיטת הטיפול בתוך האתר (In-Situ).

### 5.5.1 תיאור כללי של התהליך

ייצוב מיצוק בתוך האתר (In-Situ) מתבצע באמצעות הזרקת תוספים אל הקרקע ללא הפרתה ומנצל את המאגר הקיים לפעולות הערבוב. בסיום תהליך הטיפול החומר המטופל נשאר במקומו המקורי (איור 44, איור 45, איור 46). לטיפול In-Situ מתאימים פרויקטי שיקום בקנה מידה גדול. מנקודת מבט רגולטורית, בשיטה זו לא נדרשות עתודות קרקע. תהליך הטיפול מורכב משלבים הבאים:

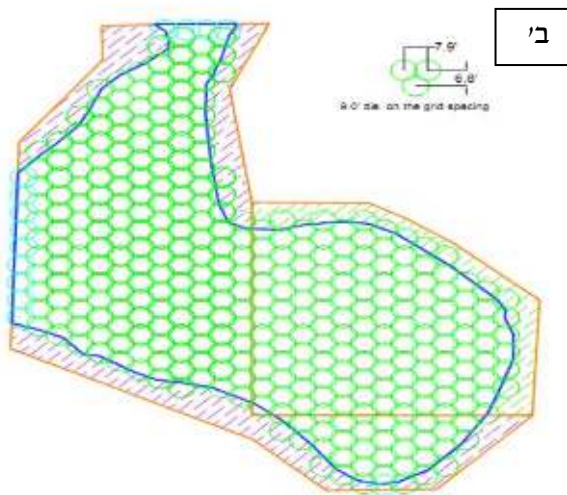
- ביצוע הדיגום באתר השיקום
- אנליזה מקדימה
- מבחני פיילוט (במידת הצורך)
- פעולות שיקום באתר כוללות: (1) הוספת ריאגנטים לתוך הפסולת, (2) עירבוב באמצעות Auger לתחילת תהליך הייצוב, (3) ריאקציה במשך 24-48 שעות ו-(4) איסוף הגזים הרעילים הנוצרים במהלך הריאקציה וטיפול בהם.



**איור 44:** תרשים סכמתי של האזור המטופל, לפני ואחרי שיקום In-situ (מקור: Geo-Solutions, N.A.)



**איור 45:** פעולות הערבוב בשיקום ייצוב מיצוק In-situ מתחת לכבל אופטי פעיל (מקור: Bates, 2015)



**איור 46:** מבנה אופייני של קרקע מטופלת באמצעות ייצוב/מיצוק In-situ : א'- מקטע, ב'- כיסוי מלא של השטח המזוהם (מקור : Bates, 2015)

## 5.5.2 יתרונות וחסרונות של הטיפול בתוך האתר

### יתרונות הטיפול בתוך האתר

1. עלויות שיקום נמוכות
2. מתאים לשימוש עבור מגוון רחב של מזהמים ולסוגי קרקעות שונות
3. ציוד פשוט וזמין
4. קצב תפוקה גבוה
5. תהליך הטיפול מתבצע במקום ללא צורך בחפירת ותובלת הפסולת (לוגיסטיקה) וללא צורך בשטח נוסף לתהליך הטיפול ולאחסון
6. תהליך הטיפול המתבצע מתחת לפני מי התהום אפשרי ללא צורך בשאיבת המים ופינויים מחוץ לאתר
7. לא נדרש טיפול קדם על מנת להכין את הפסולת לתהליך הטיפול

### חסרונות הטיפול בתוך אתר

1. המזהמים נותרים בתוך הקרקע, לא נהרסים או מפונים
2. נפח פסולת מטופלת גדל, בדרך כלל, באופן משמעותי
3. במהלך התהליך עלולים להיפלט VOC's וחומרים אחרים
4. תכונות הפסולת "מפוענחות" באמצעות התנהגות הכלים במהלך התהליך, לכן לעיתים קרובות נדרשים העובדים/המפעילים לעבוד ביעילות ובזהירות יתרה. בנוסף, במקרים רבים, נדרש לפתח חוזק לחיצה מספק של הפסולת המטופלת כך שתשמש כבסיס להנחת הכלים
5. יתכן קושי בקבלת תוצר באיכות נדרשת
6. החדרת ריאגנטים לעומק הפסולת וערבובן הינם פעולה לא פשוטה. ליתולוגיה צפופה המכילה אבנים וסלעים מעכבת ו/או מונעת את ההחדרה לעומק הנדרש

7. ישנה מגבלת שימוש בריאגנטים נוזליים או סלארי לצורך עבודה במערבל רוטרי ואוגר. הריאגנטים משמשים כנוזלי קדיחה ומקלים על תנועת הכלים והערבוב
8. צמיגות החומר המטופל מקשה, לעיתים קרובות, על ביצוע פעולות הדיגום ובקרת איכות על התהליך
9. אתר ששוקם בשיטת In-situ לא ניתן לפיתוח מחודש
10. יעילות שיטת In-situ לטווח ארוך אינה ידועה באופן וודאי עדיין

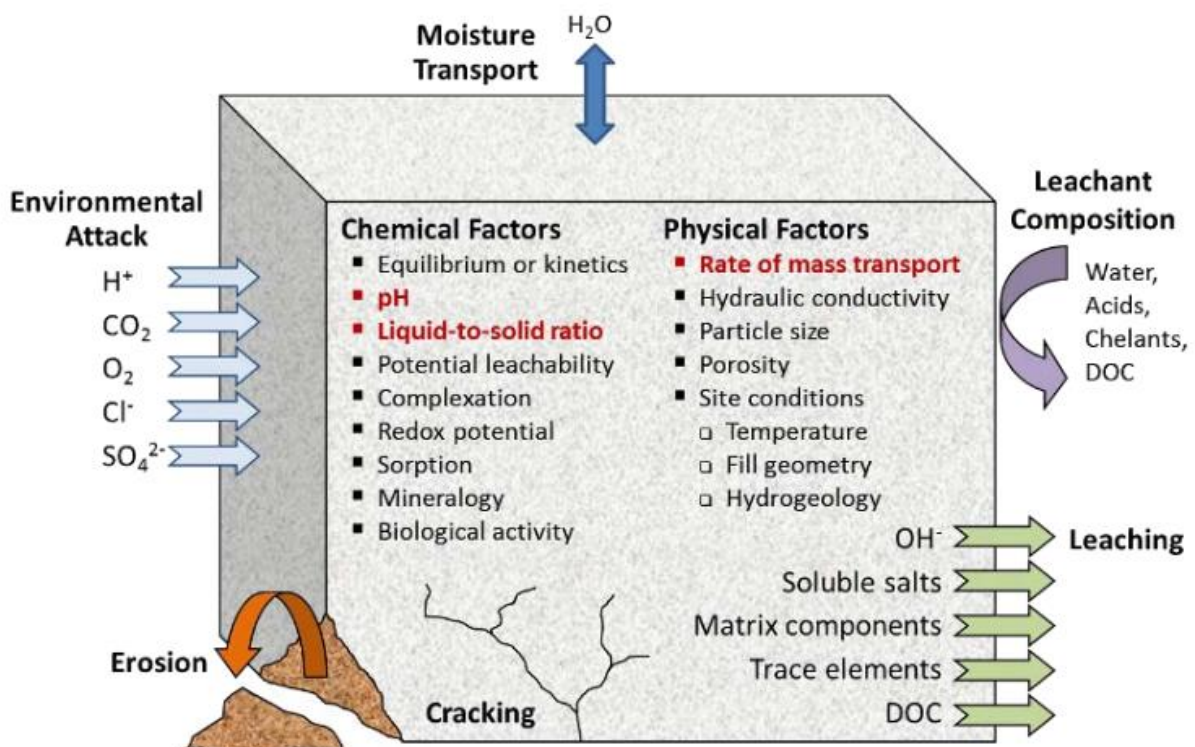
נציין כי גם לאחר סיום השיקום, מזהמים עלולים להיפלט מהפסולת המטופלת. בהתאם, המטרה בתכנון התהליך היא יצירת תוצר עמיד, כך שהפליטות לא יהיו סיכון בלתי קביל עבור רצפטורים קרובים.

### 5.5.3 פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת

בתהליכי ייצוב/מיצוק ישנם שני מרכיבים חשובים המהווים בסיס לתכנון תהליך יעיל:

- אפיון החומר ובמקרה זה מוליכות הידראולית של הפסולת, בהשוואה למוליכות הידראולית של הקרקע בסביבתה, מהווה אינדיקציה לתכולת המים בפסולת ויכולת ההתנקזות שלה,
- בקרת איכות של תהליך הטיפול נועד לוודא כי התוצר (החומר המטופל) עומד באיכות הנדרשת ומתנהג באופן שהוגדר במבחני המעבדה

באיור 47 מוצגים עומסים פנימיים וחיצוניים היכולים להשפיע על הפסולת המיוצבת.



**Figure 3-1. Internal and external stresses influencing the performance of S/S-treated materials.** Source: Modified from Garrabrants and Kosson 2005.

**איור 47:** עומסים פנימיים וחיצוניים היכולים להשפיע על הפסולת המיוצבת



#### 5.5.4 שיקולים סביבתיים

בסעיף זה מוצגים שיקולים סביבתיים שיש לקחת בחשבון בעת בחירת טיפול In-situ :

- במידה ואתר השיקום ממוקם בקרבת רצפטורים רגישים, תהליך הטיפול עלול לגרום להיווצרות מטרדים כגון מטרדי רעש וזיהום אוויר וריח. נדרש לבצע ניטור אקוסטי ואוויר. בהתאם ובמידת הצורך, יש לבצע מיגון אקוסטי מתאים ו/או איסוף וטיפול בגזים/אבק הנפלטים.
- העבודות יכולות לגרום לשינויי תנועה ועומסי תחבורה באזור העבודה.
- לא נדרשת הובלת פסולת למקום חיצוני דרך שטחים ציבוריים ו/או בכבישים ראשיים.
- לא נדרש שטח נוסף לתהליך הטיפול ולאחסון.
- הפסולת המטופלת נשארת באתר המקורי ולאורך זמן עלולים להיפלט מזהמים. נדרש לבצע ניטור, תוך ווידוא כי ריכוזם עומד בערכי הסף ואינם מהווים סיכון בלתי קביל לסביבה.

בטבלה 37 להלן מוצגים שיקולים נוספים בתהליך ייצוב/מיצוק In-situ.

**טבלה 37: שיקולים נוספים בתהליך ייצוב/מיצוק In-situ**

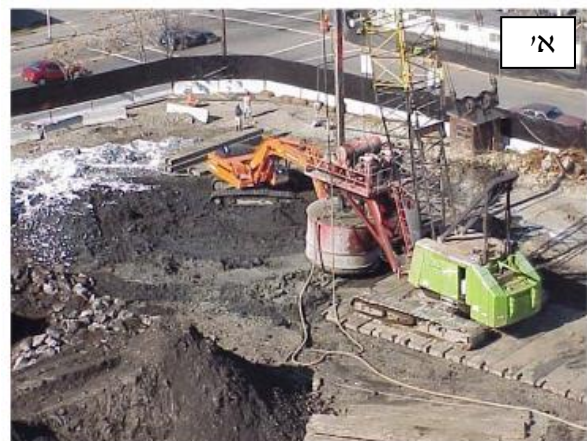
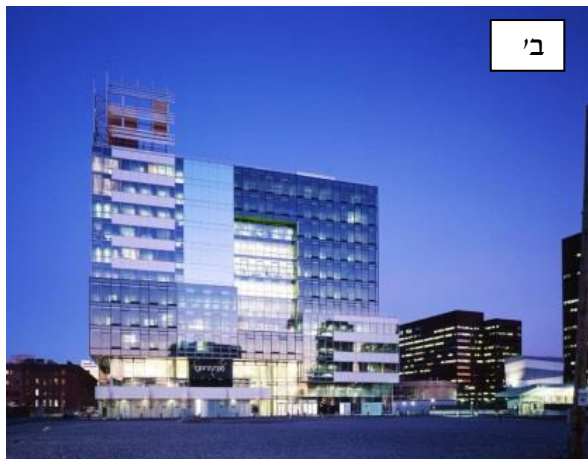
| Consideration                            | Relevance                                                                                                                                                                                                                                                                     | Significance to S/S technology performance and monitoring                                                                                                                                                                                           |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Acute health and safety                  | Implementation                                                                                                                                                                                                                                                                | Use of certain materials, especially hazardous, respirable, or toxic materials, may require special health and safety monitoring. Therefore, certain types of operations may be contraindicated due to health and safety considerations.            |
| Current and future land use              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Proposed future land use</li> <li>Local zoning/land use ordinance/regulations</li> <li>Long-term stewardship</li> <li>Community impacts/concerns (environmental justice, health risks, economic development)</li> </ul>                | Performance criteria may differ based on proposed future land use, affecting risk-based permissible leaching levels and remedy performance standards (e.g., compressive strength requirements should be consistent with future land use).           |
|                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Site and surrounding land use</li> <li>Institutional controls</li> <li>Ecological status</li> <li>Proximity to sensitive receptors (sensitive populations, water bodies, endangered species)</li> <li>Local groundwater use</li> </ul> | Performance criteria may differ based on land use (e.g., industrial park vs. greenway) and sensitive receptors, affecting risk-based permissible leaching levels and remedy performance standards.                                                  |
|                                          | Potential future intrusive work (e.g., construction, boring, etc.)                                                                                                                                                                                                            | May affect design strength criteria of S/S material and supplementary remediation steps (e.g., thickness of clean soil buffer, placement of geomembrane or a vapor intrusion barrier).                                                              |
|                                          | Institutional controls                                                                                                                                                                                                                                                        | May affect access for long-term performance monitoring.                                                                                                                                                                                             |
| Groundwater and surface water regulation | Regulatory classification of groundwater and surface waters                                                                                                                                                                                                                   | Affects remedial goals, cleanup criteria, and determination of practicability to achieve cleanup criteria (e.g., performance criteria could include reduced leachability and hydraulic conductivity to be protective of ground and surface waters). |

### 5.5.5 שיקולים סטטוטוריים

שימושי וייעודי קרקע הינו נושא חשוב במיוחד עבור שלטון מקומי, תושבים וארגונים שונים. שימושי קרקע עתידיים מושפעים שלילית מהימצאות קרקע מזהמת ומפעולות שיקום מתמשכות, ובמיוחד כשהזיהום קרוב לאזורי מגורים. טכנולוגיית ייצובמיצוק מתאימה למגוון שימושי קרקע אך אינה מתאימה לשימושי מגורים או שימושים רגישים, כגון מעונות יום, בתי ספר וכו'. בעת תכנון ייצובמיצוק באתר יש לקחת בחשבון שיקולים הבאים:

- שימוש חוזר באתר
- פיתוח מחודש של האתר לשימוש הקהילה
- שימושי קרקע עתידיים באתר
- שיתוף הקהילה במידע אמיתי, מדויק, ובפורמט פשוט
- הכנת תכנית מגירה למקרי חירום

באזור 48 להלן מוצג Kendall Square, קיימברידג', ארה"ב, במהלך עבודות השיקום בשטח מזהם כתוצאה מפעילות תחנת גז במקום ולאחר השיקום.



**איור 48:** קיימברידג', ארה"ב: (א') במהלך עבודות השיקום בשטח מזהם כתוצאה מפעילות תחנת גז במקום (2006), (ב') לאחר השיקום (מקור: Cambridge, Ma, USA)

### 5.5.6 שיקולים פיננסיים ומחירים לטיפול

עלויות ייצובמיצוק משתנות בהתאם לאתר, תכונות הקרקע/פסולת וסוגי המזהמים. בסעיף זה מוצגים שיקולים כלכליים שיש לקחת בחשבון בעת בחירת טיפול In-situ:

- עלויות יומיות של שימוש בכלים עבור ייצובמיצוק In-situ, דוגמת מערבול רכוב על מנוף, הינן גבוהות. לדוגמא, עלות ממוצעת עבור Auger, המשמש להחדרת ריאגנטים וערבוב תוך כדי קדיחה בתוך הקרקע, משתנה בין \$50-80 למ"ר בעומקים רדודים ועד ל-\$190-330 למ"ר בעומקים גדולים יותר
- עלויות של מרבית הריאגנטים והתוספים, הנמצאים בשימוש רחב בתעשייה, אינן גבוהות יחסית
- עלויות תובלה של ריאגנטים יכולות להיות משמעותיות במידה ולא נמצא מקור מקומי
- עלויות כוח אדם: לתפעול מערכת ערבוב In-situ עם אוגר, הכולל אחסון הריאגנטים והובלתם ותפעול המערבל, נדרשים שני עובדים. לתפעול מערכת עם מערבול רכוב על מנוף נדרשים 5-6 עובדים.

## 5.5.7 דוגמאות למתקני טיפול In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

בטבלה 38 ניתן לראות דוגמאות לטכנולוגיות טיפול ייצוב מיצוק In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI אשר הוגשו לחברה לשירותי איכות סביבה.

\*לצורך הצגת ערכים אחידים בטבלה: העלויות מוצגות בשקלים ע"פ השערים  $1\$ = 3.8\text{ ש"ח}$ ,  $1\text{€} = 4\text{ ש"ח}$ . תפוקות מוצקות בטונות ע"פ 1 מ"ק קרקע = 1.5 טון. מס' שעות עבודה בשנה = 2,800 (10 שעות עבודה ביום, 280 ימי עבודה בשנה).

## טבלה 38: דוגמאות טיפול ייצוב מיצוק In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

| חברה                    | הזנה       | מזהמים                                                                | טווח ריכוז מזהמים  | קצב טיפול            | כמות מינימלית | סביבה | משך הרצה            | מגבלות          | תשתיות נדרשות | עלות                                                          |
|-------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------|---------------|-------|---------------------|-----------------|---------------|---------------------------------------------------------------|
| HPC<br>[איור 49]        | -          | TPH, PAH, chlorinated & brominated Organics, Pesticides, POP & PCDD/F | עד 200,000 מ"ג/ק"ג | 500-100,000 טון לשנה | 100 טון       |       | מידית או 3-6 חודשים | עודף מים בפסולת | -             | עלות טיפול: 20 ש"ח - 240 ש"ח לטון                             |
|                         | -          | מתכות כבדות                                                           | עד 50,000 מ"ג/ק"ג  | 500-50,000 טון לשנה  | 50 טון        |       | 2-6 חודשים          | -               | -             | עלות טיפול: 8 ש"ח - 200 ש"ח לטון                              |
| Ludreco SA<br>[איור 50] | מנתי, רציף | שמנים, דלקים, מתכות כבדות                                             | -                  | 500-3,200 מ"ק ליום   | 50,000 מ"ק    |       | 1-2 ימים            | סלעים           | -             | עלות מתקן: 2 מליון ש"ח.<br>עלות טיפול: 160 ש"ח - 240 ש"ח לטון |





**איור 49:** חברת HPC שיקום קרקע בשיטת TMT15-Stabilization



**איור 50:** טיפול ייצוב\מיצוק In-Situ חברת Ludreco SA

## 5.5.8 טבלת סיכום טכנולוגיות ייצוב מיצוק

טבלה 39 מבוססת על הסקירה המדעית-הנדסית שנעשתה, ועל מידע אשר סופק ע"י חברות המפעילות טכנולוגיות טיפול ייצוב מיצוק כפי שמופיע במסמכי ה-RFI אשר נשלחו אל החברה לשירותי איכות סביבה.

טבלה 39: סיכום טכנולוגיות ייצוב מיצוק

● - יעילות/מאמץ/לא מהווה גורם מגביל ○ - יעילות בינונית \ התאמה בינונית \ גורם מגביל

○ - יעילות נמוכה \ התאמה נמוכה \ גורם מגביל מאוד

| קריטריונים                    | סיווג                | הערות                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ישימות הטכנולוגיות            | זמינות               | טכנולוגיות ייצוב מיצוק עושות שימוש בכלים הנדסיים ובמתקני ערבול זמינים יחסית ויכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן קצר.                                                                                       |
|                               | נסיון בישראל         | מתקן טיפול קבוע של החברה לשירותי איכות סביבה נאות חובב (ניסיון גם בטיפול בזיהום דלקים ושמינים גבוה)                                                                                                       |
| התאמת לקבוצות המזהמים         | דלקים                | היעילות יורדת עם העלייה בריכוז של מזהמים שומניים                                                                                                                                                          |
|                               | VOC (הלוגנים)        |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | VOC (ללא הלוגנים)    |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | SVOC (הלוגנים)       |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | SVOC (לא הלוגנים)    |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | מתכות                |                                                                                                                                                                                                           |
| התאמה לתכונות הקרקע           | חומרים אנאורגניים    |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | חומר נפץ             |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | חול                  |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | חרסית וטין           | אחוזים גבוהים של חרסית עלולים להגביל את יעילות הערבוב                                                                                                                                                     |
|                               | הטרוגני              |                                                                                                                                                                                                           |
| עומק אפקטיבי לטיפול (In-Situ) | רטיבות הקרקע         | רטיבות גבוהה בעייתית מבחינת שינוע                                                                                                                                                                         |
|                               | רדוד (פחות מ-5 מ')   |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | בינוי (5 עד 15 מ')   |                                                                                                                                                                                                           |
|                               | עמוק (יותר מ-15)     |                                                                                                                                                                                                           |
| קצב טיפול                     |                      | הטיפול הוא מהיר - 5,000-100,000 טון לשנה, כוללת בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 35 וטבלה 38 להשוואה. בחלק מהתהליכים דרוש זמן של מספר ימים עד מספר שבועות להתייצבות התהליך לאחר גמר הטיפול. |
| הרחקת מזהמים                  |                      | לא רלוונטי. המזהמים אינם מורחקים                                                                                                                                                                          |
| מרחק קרקע לאחר טיפול          |                      | תכונות הקרקע משתנות בצורה דרמטית ולא מתאימות לשימוש                                                                                                                                                       |
| תשתיות                        | שטח (בטיפול Ex-Situ) |                                                                                                                                                                                                           |

| הערות                                                                                                                             | סיווג | קריטריונים                                                                                                 |                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| צריכת אנרגיה משמעותית למתקני הערבול השונים. דרוש חיבור לחשמל או גנרטור.                                                           | ○     | אנרגיה                                                                                                     | נדרשות ליישום הטכנולוגיה |
| נדרשת הוספת מים לתהליך. ניתן להשתמש במים באיכות ירודה.                                                                            | ○     | מים                                                                                                        |                          |
| יש צורך באמצעים לטיפול בפליטות חלקיקים במהלך עבודות הערבוב. במידה ויש תהליכים הפולטים גזים יש צורך בטיפול ובניטור הפליטות מהמתקן. | ○     | פליטות לאוויר                                                                                              | השפעה על הסביבה          |
|                                                                                                                                   | ●     | מים ותשטיפים                                                                                               |                          |
| עבור מתקן Ex-Situ – כ-2 מליון ₪. ראה טבלה 35 להשוואה.                                                                             |       | עלות מתקן                                                                                                  | עלויות                   |
| 100 ₪ - 240 ₪ לטון, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 35 וטבלה 38 להשוואה.                                     |       | עלות טיפול                                                                                                 |                          |
| החברה לשירותי איכות סביבה : 523 ₪ לטון                                                                                            |       | עלות טיפול במתקנים קיימים בארץ (הפירוט לצורך השוואה וייחוס בלבד ואינו מתייחס לשאר הפרמטרים התפעוליים לעיל) |                          |



## 5.5.9 מקרי מבחן בישראל (Local Case Studies)

בטבלה 40 ניתן לראות מספר מקרי בוחן לטיפול תרמי מישראל

**טבלה 40: מקרי בוחן לטיפול תרמי מישראל**

| שם הפרויקט                              | מיקום                                           | צדדים מעורבים<br>(קבלנים, יועצים,<br>רגולטורים וכו')                                                         | שנות ביצוע | מזהמים עיקריים                                               | סוג הקרקע/פסולת                  | ריאגנטים | עלויות השיקום |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------|---------------|
| טיפול ראשוני בבריכות<br>חומציות ב"ח 1/3 | מגרש 181 לשעבר<br>בחברה לשירותי<br>איכות הסביבה | <u>תכנון וביצוע:</u><br>החברה לשירותי<br>איכות הסביבה<br><u>פיקוח:</u> אקולוג<br>הנדסה, משרד<br>להגנת הסביבה | 2011-2014  | VOCs (אצטון,<br>דיכלורומטן), בנזן,<br>חומצות, מתכות<br>כבדות | שפכים אורגניים<br>ובוצות חומציות | אפר פמ"א |               |
| פיילוט טיפולי בבריכות<br>אנאורגני ב"ש 2 | מגרש 181 לשעבר<br>בחברה לשירותי<br>איכות הסביבה | <u>תכנון וביצוע:</u><br>החברה לשירותי<br>איכות הסביבה<br><u>פיקוח:</u> אקולוג<br>הנדסה, משרד<br>להגנת הסביבה | 2011       | סידן, מלחים,<br>מתכות כבדות,<br>BTEX                         | בוצות וקרקע<br>מזוהמת            | אפר פמ"א |               |

במהלך השנים 2006-2016 בוצעו בשטח המפעל לטיפול בפסולת מסוכנת בנאות חובב (החברה לשירותי איכות הסביבה) עבודות טיפול במאגרים ישנים של פסולת מסוכנת. הטיפול בוצע בטכנולוגיית ייצוב/מיצוק Ex-situ. בשלב הראשון של התהליך הוכנס הריאגנט (אפר פמ"א) לתוך המאגר ובוצע ערבוב באמצעות כלים מכניים (In-situ) לניטרול ראשוני של הפסולת. בשלב הבא הועברה התערובת למתקן ייצוב/מיצוק (במקרים מסוימים בוצע ערבוב ביניים במאגר נוסף טרם העברת הפסולת למתקן ייצוב/מיצוק להמשך התהליך Ex-situ). בסיום התהליך, הפסולת המיוצבת הועברה להטמנה במטמנה הממוקמת בשטח המפעל. באיור 51 להלן פעולות חפירת פסולת בבריכת שיקוע ב"ש 2 (אקולוג, פברואר 2014).



**איור 51:** תהליך טיפול In-situ שבוצע בבריכת ב"ש 2 בשטח חברה לשירותי איכות הסביבה (אקולוג, פברואר 2014).

### 5.5.10 מקרי מבחן בעולם (International Case Studies)

בטבלה 41 ניתן לראות מספר מקרי בוחן לטיפול תרמי מהעולם

**טבלה 41:** מקרי בוחן לטיפול תרמי מהעולם

| Project Name                                                                      | Location              | Parties Involved (Contractors, Consultants, Regulators etc...)                  | Years Performed | Primary Contaminants                              | Type of Soil/Waste                          | Reagents (Formula)                                                                    | Performance Standards                                                                                                                                                                                                                                                                        | Treatment Costs                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| In-Situ S/S Treatment at the South 8 <sup>th</sup> Street Landfill Superfund Site | West Memphis, AR, USA | USEPA                                                                           | 1998 - 2000     | PAHs, PCBs, BTEX, Pesticides, and Metals          | Oil Sludge, Acidic waste                    | - Soil 64.5 %<br>- AG limestone 16.1 %<br>- Portland cement 12.9 %<br>- Fly ash 6.5 % | <ul style="list-style-type: none"> <li>– UCS &gt; 50 psi (0.3 MPa)</li> <li>– Hydraulic conductivity less <math>1 \times 10^{-6}</math> centimeters per second (cm/s)</li> <li>– Leaching of lead &lt; 15 micrograms per liter (<math>\mu\text{g/L}</math>) as determined by SPLP</li> </ul> | ~ 106 \$/cu yd (138 \$/m <sup>3</sup> ) |
| In-Situ S/S Remediation of the Former Kendall Square                              | Cambridge, Ma, USA    | <b>Remediation Design:</b><br>The RETC Group, Concord Ma.<br><b>Contractor:</b> | 2006            | Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), Volatile | Coal Tar Impacted Soils. To a depth of 6 m. | - 7% Cement by Weight<br>- 5% Water by Weight<br>- <1% Bentonite by Weight            | - The mixed soil columns were overlapped 35%, ensuring that all impacted soil was treated.                                                                                                                                                                                                   | \$25,000,000                            |

| Project Name                 | Location | Parties Involved (Contractors, Consultants, Regulators etc...) | Years Performed | Primary Contaminants     | Type of Soil/Waste | Reagents (Formula) | Performance Standards                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Treatment Costs |
|------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Manufactured Gas Plant (MGP) |          | Geo-Con Incorporated                                           |                 | Organic Compounds (VOCs) |                    |                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ISS treatment resulted in the immobilization of contaminants of concern within a 20-ft (6 m.) thick monolithic, solidified mass with a volume of more than 100,000 cubic yards (80,000 m<sup>3</sup>).</li> <li>- Nuisance gasses generated during treatment were collected and treated to prevent atmospheric release.</li> </ul> |                 |

## 6 סיכום

טבלה 42 מציגה סיכום של טכנולוגיות הטיפול בקרקעות. הטבלה מבוססת על הסקירה המדעית-הנדסית שנעשתה, ועל מידע אשר סופק ע"י חברות המפעילות טכנולוגיות טיפול כפי שמופיע במסמכי ה-RFI אשר נשלחו אל החברה לשירותי איכות סביבה.

● - יעילות/מתאים/לא מהווה גורם מגביל ○ - יעילות בינונית \ התאמה בינונית \ גורם מגביל ○ - יעילות נמוכה \ התאמה נמוכה \ גורם מגביל מאוד

טבלה 42: טבלת סיכום טכנולוגיות טיפול בקרקעות מזוהמות

| קריטריונים |       | טיפול ביולוגי |       | טיפול תרמי |       | שטיפת קרקע |       | ייצוב/מיצוק |       |
|------------|-------|---------------|-------|------------|-------|------------|-------|-------------|-------|
| סיווג      | הערות | סיווג         | הערות | סיווג      | הערות | סיווג      | הערות | סיווג       | הערות |

| קריטריונים            |                | טיפול ביולוגי |                                                                                                                                                           | טיפול תרמי |                                                                                                                                                         | שטיפת קרקע |                                                                                                                                       | ייצוב/מיצוק |                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------|----------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |                | סיווג         | הערות                                                                                                                                                     | סיווג      | הערות                                                                                                                                                   | סיווג      | הערות                                                                                                                                 | סיווג       | הערות                                                                                                                                                                            |
| ישימות הטכנולוגיות    | זמינות         | ●             | לרוב שיטות הטיפול הביולוגי אין צורך בשינוע ציוד ייחודי, וזמן ההתארגנות הוא של מספר בודד של חודשים, בעיקר להכשרת השטח.                                     | ●          | רוב מתקני הטיפול בטכנולוגיית TD יכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן של עד מספר חודשים בודד. מתקן לשריפה בנשר זמין ופועל תחת אישור רוחבי של המשרד להגני"ס. | ●          | רוב מתקני הטיפול בטכנולוגיית שטיפת קרקע יכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן של עד מספר בודד של שבועות.                                  | ●           | טכנולוגיות ייצוב מיצוק עושות שימוש בכלים הנדסיים ובמתקני ערבול זמינים יחסית ויכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן קצר.                                                              |
|                       | נסיון בישראל   | ●             | בארץ קיים ניסיון משמעותי עם שיטות טיפול ביולוגי In-Situ ו-Ex-Situ                                                                                         | ●          | קיים ניסיון במתקן לשריפה בנשר ובמתקן לשריפה של חברת אקוסול בנאות חובב.                                                                                  | ○          | אין בארץ ניסיון עם מתקנים מסוג זה.                                                                                                    | ●           | מתקן טיפול קבוע של החברה לשירותי איכות סביבה נאות חובב (ניסיון גם בטיפול בזיהום דלקים ושמנים גבוה)                                                                               |
| התאמת לקבוצות המזהמים | דלקים          | ●             | פירוק של מזהמים אורגניים שיעיל עד ריכוזים של כ-50,000 מ"ג/ק"ג. יעילות הפירוק יורדת עבור מזהמים עם הלוגנים, ועבור מזהמים אורגניים בעלי משקל מולקולרי גבוה. | ●          | יעיל מרבית בריכוזים של עד כ-30,000 מ"ג/ק"ג                                                                                                              | ●          | בקרקות חוליות יעילות בריכוזים בינוניים עד גבוהים של זיהומים המשלבים זיהום אורגני (עד כ-50,000 מ"ג/ק"ג) ואנאורגני (עד כ-5,000 מ"ג/ק"ג) | ●           | עם העלייה בריכוז של מזהמים שומניים תיתכן ירידה ביעילות הטיפול וידרשו פעולות ערבוב אינטנסיביות יותר ושימוש בראגנטים מתאימים אשר מסוגלים להתגבר על כיסוי חלקיקי הקרקע בחומר שומני. |
|                       | VOC (הלוגנים)  | ○             |                                                                                                                                                           | ●          |                                                                                                                                                         | ●          |                                                                                                                                       | ●           |                                                                                                                                                                                  |
|                       | VOC (לא)       | ●             |                                                                                                                                                           | ●          |                                                                                                                                                         | ●          |                                                                                                                                       | ●           |                                                                                                                                                                                  |
|                       | SVOC (הלוגנים) | ○             |                                                                                                                                                           | ●          |                                                                                                                                                         | ●          |                                                                                                                                       | ●           |                                                                                                                                                                                  |
|                       | SVOC (לא)      | ●             |                                                                                                                                                           | ●          |                                                                                                                                                         | ●          |                                                                                                                                       | ●           |                                                                                                                                                                                  |
|                       | הלוגנים        | ●             |                                                                                                                                                           | ●          |                                                                                                                                                         | ●          |                                                                                                                                       | ●           |                                                                                                                                                                                  |



| קריטריונים          |                   | טיפול ביולוגי                                                                                                                    |       | טיפול תרמי                                                                                          |       | שטיפת קרקע                                                                     |       | ייצוב/מיצוק                                           |       |
|---------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------|-------|
| הערות               | סיווג             | הערות                                                                                                                            | סיווג | הערות                                                                                               | סיווג | הערות                                                                          | סיווג | הערות                                                 | סיווג |
|                     | מתכות             | טיפול ביולוגי אינו מפרק מתכות וחומרים אנאורגניים                                                                                 | ○     | יעיל בטיפול בכספית ועופרת בלבד אשר להן טמפ' נידוף נמוכה יחסית.                                      | ○     |                                                                                |       |                                                       | ●     |
|                     | חומרים אנאורגניים |                                                                                                                                  | ○     |                                                                                                     | ○     |                                                                                |       |                                                       | ●     |
|                     | חומר נפץ          | טיפול ביולוגי מתאים לריכוזים נמוכים-בינוניים של חומרי נפץ. זמני הטיפול ארוכים יותר ויתכן תידרש זריעה של חיידקים ספציפיים לתהליך. | ●     |                                                                                                     | ○     |                                                                                |       |                                                       | ●     |
| התאמה לתכונות הקרקע | חול               |                                                                                                                                  | ●     | היעילות האנרגטית גדלה ככל שאחוז החול גבוה יותר                                                      | ●     | היעילות בהפרדת הפרקציה החרסיתית המזהמת עולה עם העלייה באחוז החול.              | ●     |                                                       | ●     |
|                     | חרסית וטין        | בקרקות עם אחוזים גבוהים של חרסית יש להשתמש בחומרים ניפחיים על מנת ליצור מרקם מאוורר יותר.                                        | ●     | ההשקעה באנרגיה ובעיות תפעוליות עולים עם עליה באחוז החרסית והטין. מתאים לקרקעות עם עד 30%-40% חרסית. | ○     | יעילות התהליך יורדת עם העליה בריכוז החרסית. מתאים לקרקעות עם עד 30%-40% חרסית. | ○     | אחוזים גבוהים של חרסית עלולים להגביל את יעילות הערבוב | ●     |

| קריטריונים                     |                      | טיפול ביולוגי |       | טיפול תרמי                                                                                                                                                    |       | שטיפת קרקע                                     |       | ייצוב/מיצוק                       |       |
|--------------------------------|----------------------|---------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| הערות                          | סיווג                | הערות         | סיווג | הערות                                                                                                                                                         | סיווג | הערות                                          | סיווג | הערות                             | סיווג |
|                                | הטרוגני              |               | ●     | בטיפול Ex-Situ נדרש טיפול קדם להומוגניזציה. In-Situ בטיפול קרקע הטרוגנית מקשה על תכנון טיפול יעיל.                                                            | ●     | נדרש טיפול קדם להומוגניזציה.                   | ●     |                                   |       |
|                                |                      | רטיבות הקרקע  | ●     | ההשקעה באנרגיה עולה עם העלייה ברטיבות. רטיבות מקסימלית של עד כ-25%. באחוזים גבוהים יותר ב- Ex-Situ יש צורך בתהליכי סחיטה In- וב- Situ יש צורך בהשפלת מי תהום. | ●     | תהליך רטוב, אין צורך בייבוש הקרקע לפני הטיפול. | ●     | רטיבות גבוהה בעייתית מבחינת שינוע | ●     |
| עומק אפקטיבי לטיפול In-) (Situ | רדוד (פחות מ- 5 מ')  | ●             |       | בחימום באמצעות קיטור יש לוודא שאין פריצה של פני הקרקע.                                                                                                        | ●     | טיפול Ex-Situ בלבד                             | ●     |                                   |       |
|                                | בינוי (5 עד 15 מ')   | ●             |       |                                                                                                                                                               | ●     |                                                | ○     |                                   |       |
|                                | עמוק (יותר מ- 15 מ') | ●             |       |                                                                                                                                                               | ●     |                                                | ○     |                                   |       |

| קריטריונים                                                     |       | טיפול ביולוגי                                                                                                                                                                     |       | טיפול תרמי                                                                                                           |       | שטיפת קרקע                                                                                          |       | ייצוב/מיצוק                                                                                                                                                                                               |       |
|----------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| סיווג                                                          | הערות | סיווג                                                                                                                                                                             | הערות | סיווג                                                                                                                | הערות | סיווג                                                                                               | הערות | סיווג                                                                                                                                                                                                     | הערות |
| <b>טיפול קדם בטיפול Ex-Situ (בהתאם למאפייני הקרקע והזיהום)</b> |       | ניפוי גס של פסולת ואבנים, הומוגניזציה, ייבוש, ערבוב עם חומר נפחי, וויסות pH.                                                                                                      |       | ניפוי גס של פסולת ואבנים, הומוגניזציה, ייבוש, התאמת הסביבה הכימית לטיפול תרמי.                                       |       | ניפוי גס של פסולת ואבנים, גריסת אגרגטים.                                                            |       | ניפוי גס של פסולת ואבנים, התאמת הסביבה הכימית לריאקציות ייצוב/מיצוק, הקטנת נפח, הומוגניזציה.                                                                                                              |       |
| <b>קצב טיפול</b>                                               |       | עבור טיפול Ex-Situ – מספר שבועות-חודשים כתלות בסוג הקרקע ובריכוז הזיהום. ראה טבלה 3 להשוואה. עבור טיפול In-Situ – חודשים-שני כתלות בסוג הקרקע ובריכוז הזיהום. ראה טבלה 2 להשוואה. |       | עבור טיפול Ex-Situ – טיפול מהיר. 5,000-150,000 טון לשנה, כתלות בסוג הקרקע המתקן, וריכוז הזיהום. ראה טבלה 10 להשוואה. |       | טיפול מהיר. עד כ-400,000 טון לשנה, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 20 להשוואה. |       | הטיפול הוא מהיר - 5,000-100,000 טון לשנה, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 34 וטבלה 37 להשוואה. בחלק מהתהליכים דרוש זמן של מספר ימים עד מספר שבועות להתייצבות התהליך לאחר גמר הטיפול. |       |
| <b>הרחקת מזהמים</b>                                            |       | 95%-90%. מעבר לכך זמני הטיפול עלולים להיות ארוכים                                                                                                                                 |       | מעל ל-99%, עמידה בערכי סף מחמירים                                                                                    |       | כ-70%-99% עבור מזהמים אורגניים ומתכות. ראה טבלה 20 להשוואה ופירוט                                   |       | לא רלוונטי. המזהמים אינם מורחקים                                                                                                                                                                          |       |

| קריטריונים                      |                      | טיפול ביולוגי |                                                                                                                             | טיפול תרמי |                                                                                                                                | שטיפת קרקע |                                                             | ייצוב/מיצוק |                                                                         |
|---------------------------------|----------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------|
|                                 |                      | סיווג         | הערות                                                                                                                       | סיווג      | הערות                                                                                                                          | סיווג      | הערות                                                       | סיווג       | הערות                                                                   |
| מרקם הקרקע לאחר טיפול           |                      | ●             | מרקם הקרקע אינו משתנה, פרט לערבוב עם תוספים                                                                                 | ●          | ללא שינוי ניכר ב-TD בטמפי' נמוכות, אך עם העלייה בטמפי' ומעבר לשיטות פירוליזה ושריפה יש השחמה של הקרקע וקבלת גודל גרגר דק יותר. | ○          | מתקבלות בנפרד פרקציה חולית ופרקציות חרסיות                  | ○           | תכונות הקרקע משתנות בצורה דרמטית ולא מתאימות לשימוש                     |
| תשתיות נדרשות ליישום הטכנולוגיה | שטח (בטיפול Ex-Situ) | ○             | הטיפול יכול להתבצע במקביל על כמות בלתי מוגבלת של קרקע, אך השטח הוא הגורם המגביל. עבור טיפול Ex-Situ - 0.5-1 מ"ר לטון.       | ●          | 5-10 דונם                                                                                                                      | ●          | כ-20 דונם כולל שטחי אחסון לקרקעות                           | ●           | -                                                                       |
|                                 | אנרגיה               | ●             | תהליך אשר אינו דורש כמות אנרגיה גבוהה. במקרה של אוורור מאולץ ב-Bio-piles או בטיפול In-Situ משאבות האוויר יהיו הצרכן המרכזי. | ○          | תהליך עתיר אנרגיה. חיבור למקור אנרגיה לחימום (חשמל, גז טבעי, דלקים שונים)                                                      | ●          | צריכת אנרגיה משמעותית למתקני ההפרדה. חיבור לחשמל או גנרטור. | ●           | צריכת אנרגיה משמעותית למתקני הערבול השונים. דרוש חיבור לחשמל או גנרטור. |
|                                 | מים                  | ●             | כמות קטנה של מים להרטבה של קרקעות יבשות.                                                                                    | ●          | חיבור מים במידה ויש צורך בסקראברים רטובים                                                                                      | ●          | המים מסוחררים בתהליך. נדרש חיבור מים של עד 5-10 מק"ש.       | ●           | נדרשת הוספת מים לתהליך. ניתן להשתמש במים באיכות ירודה.                  |

| קריטריונים      |               | טיפול ביולוגי                                                                              |                                                                                                                                                                                     | טיפול תרמי                                                                           |                                                                                           | שטיפת קרקע                                                                           |                                                                                                                             | ייצוב/מיצוק                                                                                   |                                                                                                                                   |
|-----------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |               | סיווג                                                                                      | הערות                                                                                                                                                                               | סיווג                                                                                | הערות                                                                                     | סיווג                                                                                | הערות                                                                                                                       | סיווג                                                                                         | הערות                                                                                                                             |
| השפעה על הסביבה | פליטות לאוויר | ●                                                                                          | נידוף אינו המנגנון העיקרי של הטיפול הביולוגי, אך בטיפולים בקרקעות המכילות ריכוזים משמעותיים של VOC, או בטכנולוגיה הכוללת אוורור מאולץ, יש צורך באיסוף, ניטור ובטיפול בגזים הנפלטים. | ○                                                                                    | כל המזהמים עוברים לפאזה גאזית ונדרש טיפול בכמויות גדולות של גזים המכילים מזהמים וחלקיקים. | ●                                                                                    | התהליך הוא רטוב, ללא פליטות משמעותיות לאוויר.                                                                               | ●                                                                                             | יש צורך באמצעים לטיפול בפליטות חלקיקים במהלך עבודות הערבוב. במידה ויש תהליכים הפולטים גזים יש צורך בטיפול ובניטור הפליטות מהמתקן. |
|                 | מים ותשטיפים  | ●                                                                                          | מיעוט תשטיפים, בהם ניתן לעשות שימוש חוזר להרטבה או להפנות לטיפול.                                                                                                                   | ●                                                                                    | מיעוט תשטיפים, רק במידה ומתקיים טיפול בגזים עם סקראבר רטוב, ומערימות הקרקע לפני טיפול.    | ○                                                                                    | טיפול בכמות מים גדולה יחסית בסינון חול, פחם פעיל, ועוד. הטיפול מורכב ויקר יותר במידה ונעשה שימוש בתוספים לתהליך הפרדה כימי. | ●                                                                                             |                                                                                                                                   |
| עלויות          | עלות מתקן     | עלות כלי צמ"ה לטיפול Ex-Situ – כ-4 מליון ₪.                                                |                                                                                                                                                                                     | עבור מתקן Ex-Situ - ראה טבלה 10 להשוואה.                                             |                                                                                           | כ-16 מליון ₪, כתלות בגודל המתקן                                                      |                                                                                                                             | עבור מתקן Ex-Situ – כ-2 מליון ₪. ראה טבלה 34 להשוואה.                                         |                                                                                                                                   |
|                 | עלות טיפול    | 60 ₪ - 380 ₪ לטון כתלות בסוג הקרקע, צורת הטיפול וריכוז הזיהום. ראה טבלה 2 וטבלה 3 להשוואה. |                                                                                                                                                                                     | 160 ₪ - 550 ₪ לטון, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 10 להשוואה. |                                                                                           | 120 ₪ - 360 ₪ לטון, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 20 להשוואה. |                                                                                                                             | 100 ₪ - 240 ₪ לטון, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 34 וטבלה 37 להשוואה. |                                                                                                                                   |

| קריטריונים                                                                                                 |                              | טיפול ביולוגי |       | טיפול תרמי |       | שטיפת קרקע      |       | ייצוב\מיצוק                           |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|-------|------------|-------|-----------------|-------|---------------------------------------|-------|
| סיווג                                                                                                      | הערות                        | סיווג         | הערות | סיווג      | הערות | סיווג           | הערות | סיווג                                 | הערות |
| עלות טיפול במתקנים קיימים בארץ (הפירוט לצורך השוואה וייחוס בלבד ואינו מתייחס לשאר הפרמטרים התפעוליים לעיל) | ביוסוייל: 160 ₪ - 300 ₪ לטון |               |       |            |       | לא מתבצע בישראל |       | החברה לשירותי איכות סביבה: 523 ₪ לטון |       |



## 7 ביבליוגרפיה

### 7.1 כלל הטכנולוגיות

Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA), *Review of Decision Support Tools for Contaminated Land Management, and their Use in Europe*, Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies (CLARINET), November 2002

Environmental Services Company (ESC), data collected from the Request for Information (RFI) Concerning Technologies/Facilities for Contaminated Soil Remediation No: 1/2016

Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*, Version 4.0, January 2002.

European Commission, *Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Treatments Industries*, August 2006

European Commission, *Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*, August 2006

The Association of German Engineers (VDI), *VDI 3898 - Plants for Dry-mechanical, Physio-chemical, Thermal and Biological Soil Treatment*, January 2013

United States Environmental Protection Agency (USEPA), *Best Management Practices (BMPs) for Soils Treatment Technologies*, Suggested operational Guidelines to Prevent Cross-Media Transfer of Contaminants During Cleanup Activities, 1997

United States Environmental Protection Agency (USEPA), *Superfund Remedy Report 14<sup>th</sup> Edition*, November 2013

United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Clue-In" Website, (<https://clu-in.org/remediation>)

**7.2 טיפול ביולוגי**

Naval Facilities Engineering Service Center (NFESC), *Biopile Design and Construction Manual*, Technical Memorandum, June 1996.

New South Wales Environmental Protection Agency (NSW-EPA), *Best Practice Note: Landfarming*, April 2014.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), *A to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites*, Action Plan Reviewers, May 2004.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), *In Situ and Ex Situ Biodegradation Technologies for Remediation of Contaminated Sites*, October 2006

United States Environmental Protection Agency (USEPA), *Guidelines for the Bioremediation of Oil-Contaminated Salt Marshes*, July 2004

**7.3 טיפול תרמי**

Contaminated Land: Applications in Real Environment (Cl:AIRE), *Remediation Trail Using Low Temperature Thermal Desorption to Treat Hydrocarbons Contaminated Soil*, March 2004

McCreery, I., Linden, L., A Review of Thermal Desorption Technology for Waste Soil Remediation, Geo-Engineer – The international Information Center for Geotechnical Engineering website, (<http://www.geoengineer.org>).

Naval Facilities Engineering Service Center (NFESC), *Overview of Thermal Desorption Technology*, Technical Memorandum, June 1996.

UK Environment Agency, Treating Waste by Thermal Desorption.

**7.4 שטיפת קרקע**

Contaminated Land: Applications in Real Environment (Cl:AIRE), *Understanding Soil Washing*, TB13, September 2007.

Contaminated Land: Applications in Real Environment (Cl:AIRE), *Soil Washing*, TrB1, November 2011.

The Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), *Fixed Facilities for Soil Washing, A Regulatory Analysis*, December 1997

The Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), *Technical and Regulatory Guidance for Soil Washing*, December 1997

United States Environmental Protection Agency (USEPA), *A Citizen's Guide to Soil Washing*, EPA 542-F-96-002, April 2006

## 7.5 ייצוב מיצוק

Bates, E., Hills, C., *Stabilization and Solidification of Contaminated Soil and Waste: A Manual of Practice* 2015

Channel, M., Wakeman J., et al, *Solidification/Stabilization of Metals and Explosives in Soils*, Joint Conference on the Environment, HSRC May, 1996

Contaminated Land: Applications in Real Environment (Cl:AIRE), *Stabilisation/solidification of the Treatment of Contaminated Soil*, GB 1, November 2005.

Grobbe, L., Zhijie, W. *A Review of Stabilization/Solidification (S/S) Technology for Waste Soil Remediation*, Geo Engineer Web Site, <http://www.geoengineer.org/education/web-based-class-projects/geoenvironmental-remediation-technologies/stabilization-solidification?showall=1&limitstart=>

Intertec, *Waste Stabilisation and Solidification* <http://www.inertec.fr>

Kogbara, R.B., *A Review of Mechanical and Leaching Performance of Stabilized/Solidified Contaminated Soils*, NRC Research Press, Rev. 22: 66-86, August, 2013

Sustainable Landfill Foundation., *Solidification/Stabilisation of Hazardous Waste – An initiative to Promote Sustainable Landfill Management in Europe*

The Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), *Technical/Regulatory Guidance, Development of Performance Specifications for Stabilization/Solidification*, July 2011

United States Environmental Protection Agency (USEPA) *Solidification/Stabilization Resource Guide*. Report EPA/542-B-99-002, April 1999

United States Environmental Protection Agency (USEPA) *Technology Performance Review: Selecting and Using Solidification/Stabilization Treatment for Site Remediation*, EPA/600/R-09/148, November 2009

United States Environmental Protection Agency (USEPA) *Transmittal of Average Cost of Investigation Derived from Fund-leading Superfund Costs, Interim Measures Cost Compendium, and Compendium of Related Guidance Documents*, November 2004

Wilk, C. *Applying Solidification/Stabilization for Sustainable Redevelopment of Contaminated Property*, Portland Cement Association N.D.