



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
Julio@escil.co.il	olegg@escil.co.il	gilad@escil.co.il

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,

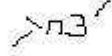
אקולוג הנדסה בע"מ

מירי למפרט



מנהלת אגף מדעי האדמה והסביבה

יצחק שטרמר



מהנדס סביבה

נועם פוניה



מהנדס סביבה

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	2.1
3	הרכב הזיהום	2.1.1
5	ריכוז הזיהום	2.1.2
5	מרקם הקרקע	2.1.3
5	טמפרטורה	2.1.4
6	ריכוז חמצן	2.1.5
6	pH	2.1.6
7	זמינות חומרי הזנה (נוטריאנטים)	2.1.7
7	תכולת רטיבות בקרקע	2.1.8
7	תוספות לקרקע	2.1.9
8	אוכלוסיה מיקרוביאלית	2.1.10
9	טיפול קדם	2.1.11
10	ניטור ובקרה	2.2
11	שיקולים סביבתיים	2.3
13	יתרונות וחסרונות טיפול ביולוגי	2.4
13	שיטות טיפול ביולוגי Ex-Situ	2.5
13	Land-Farming (מוכר גם כ-Composting , Windrows)	2.5.1
14	Bio-piles	2.5.2
16	שיטות טיפול ביולוגי In-Situ	2.6
16	Bio-Venting	2.6.1
19	דוגמאות טיפול ביולוגי In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI	2.7
21	דוגמאות לטיפול ביולוגי Ex-Situ\On-Site מתוך מסמכי ה-RIF	2.8

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

51.....	תיאור הטכנולוגיה	3.4.1
53.....	דוגמאות למתקנים מתוך מסמכי ה-RFI	3.4.2
53.....	שריפה (Incineration)	3.5
53.....	תיאור הטכנולוגיה	3.5.1
55.....	דוגמאות למתקני טיפול Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI	3.5.2
56.....	שיקולים סביבתיים	3.6
	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.....	טבלת סיכום טכנולוגיות טיפול תרמי	3.7
64.....	מקרי בוחן בעולם (International Case Studies)	3.8
68.....	4 שטיפת קרקע	4
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	תיאור כללי של הטכנולוגיה	5.1
91	התאמת הטכנולוגיה לקבוצות המזהמים	5.2
97	פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת	5.3
101.....	טיפול מיצוב מיצוק מחוץ לאתר (Ex-Situ).....	5.4
101	תיאור כללי של התהליך	5.4.1
102	יתרונות וחסרונות של טיפול Ex-Situ	5.4.2
103	פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת.....	5.4.3
103	שיקולים סביבתיים.....	5.4.4
103	שיקולים סטטוטוריים.....	5.4.5
103	שיקולים פיננסיים ומחירים לטיפול	5.4.6
106	דוגמאות למתקני טיפול Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI	5.4.7
109	מקרי בוחן בעולם (International Case Studies).....	5.4.8
112.....	טיפול מיצוב מיצוק במקום : In-Situ	5.5
112	תיאור כללי של התהליך	5.5.1
113	יתרונות וחסרונות של הטיפול בתוך האתר	5.5.2
114	פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת.....	5.5.3
115	שיקולים סביבתיים.....	5.5.4
116	שיקולים סטטוטוריים.....	5.5.5
116	שיקולים פיננסיים ומחירים לטיפול	5.5.6
117	דוגמאות למתקני טיפול In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI.....	5.5.7
119	טבלת סיכום טכנולוגיות ייצוב מיצוק	5.5.8
121	מקרי מבחן בישראל (Local Case Studies)	5.5.9
123	מקרי מבחן בעולם (International Case Studies).....	5.5.10

6 סיכום 125

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

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 בטכנולוגיית 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 כמזוהמים סביבתיים.
96	טבלה 27 : התאמה בין פסולות שונות לשיטות ייצובמיצוק.
96	טבלה 28 : התאמה בין פסולות שונות לריאגנטים המשמשים בטכנולוגיית ייצובמיצוק.
97	טבלה 29 : אפקטיביות ייצובמיצוק בטיפול בסוגי מזוהמים שונים.
100	טבלה 30 : ערכי סף של חוזק, מוליכות הידראולית ומתכות כבדות.
100	טבלה 31 : השפעת פרמטרים שונים על יעילות תהליך ייצובמיצוק.
104	טבלה 32 : השוואת שיטות ייצובמיצוק 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 ייצובמיצוק מהעולם.
115	טבלה 37 : שיקולים נוספים בתהליך ייצובמיצוק In-situ.
117	טבלה 38 : דוגמאות טיפול ייצוב מיצוק In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI.
119	טבלה 39 : סיכום טכנולוגיות ייצובמיצוק.
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.
---	---

4.....	איור 2 : מידת הזמינות של שמנים ודלקים שונים לפירוק ביולוגי
8.....	איור 3 : ערבוב סדימנט מזוהם מנחל הקישון עם גזם כחומר נפחי באמצעות כלי צמ"ה וכלים חקלאיים
12.....	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
14.....	איור 6 : תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Land-Farming
15.....	איור 7 : תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Bio-Piles
16.....	איור 8 : תרשים סכמתי מערכת אוורור מאולץ ומבנה ערימה בשיטת Bio-Piles
18.....	איור 9 : תרשים סכמתי של אתר טיפול בשיטת Bio-Venting
18.....	איור 10 : פרמיאביליות הקרקע לאוויר בקרקעות שונות
20.....	איור 11 : מתקן Bio-Venting של חברת HPC
20.....	איור 12 : מתקן Bio-Venting של חברת RGS90
23.....	איור 13 : ערימות טיפול Bio-Piles באתר טיפול של חברת RGS90
23.....	איור 14 : ערימות טיפול Windrows באתר טיפול של חברת Ludreco SA
24.....	איור 15 : ערימות טיפול Bio-Pile באתר טיפול של חברת HPC
32.....	איור 16 : תרשים סכמתי של שיטות חימום שונות של תא הטיפול ושל הקרקע
35.....	איור 17 : איור סכמתי של מתקן טיפול
40.....	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
41.....	איור 21 : מתקן TD מסוג TPS של חברת SRT
42.....	איור 22 : מתקן TD של חברת Ludreco SA
43.....	איור 23 : תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD בשיטת הולכת חשמלית
45.....	איור 24 : תרשים סכמתי של טיפול In-Situ TD באמצעות קיטור
47.....	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

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 ייצובמיצוק.
87	איור 39 : תרשים סכמתי של תהליך הטיפול ייצובמיצוק.
94	איור 40 : מזהמים שטופלו באמצעות ייצובמיצוק 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 ייצובמיצוק In-situ מתחת לכבל אופטי פעיל.
113	איור 46 : מבנה אופייני של קרקע מטופלת באמצעות ייצובמיצוק In-situ.
114	איור 47 : עומסים פנימיים וחיצוניים היכולים להשפיע על הפסולת המיוצבת.
116	איור 48 : עבודות שיקום בשטח מזוהם בקיימברג, ארה"ב.
118	איור 49 : חברת HPC שיקום קרקע בשיטת TMT15-Stabilization.
118	איור 50 : טיפול ייצובמיצוק 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. בiorמדאיציה 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 בiorמדאיציה 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 שמוזהם אורגני יוכל להתפרק ע"י מ"א בתהליך בiorמדאיציה 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 משמעות תפעוליות של הגורמים השונים:

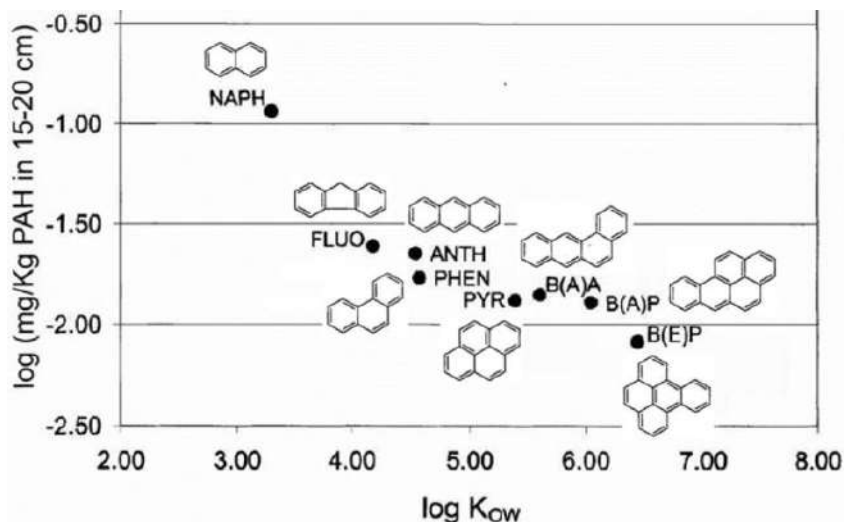
2.1.1 הרכב הזיהום

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
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="margin-right: 10px;">More degradable</div> <div style="margin-right: 10px;"> </div> <div style="margin-left: 10px;">Less degradable</div> </div>	n-butane, n-pentane, n-octane Nonane	<input type="radio"/> Gasoline <input type="radio"/> Diesel fuel
	Methyl butane, dimethylpentenes, methyloctanes	<input type="radio"/> Gasoline
	Benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes Propylbenzenes	<input type="radio"/> Gasoline <input type="radio"/> Diesel, kerosene
	Decanes Dodecanes Tridecanes Tetradecanes	<input type="radio"/> Diesel <input type="radio"/> Kerosene <input type="radio"/> Heating fuels <input type="radio"/> Lubricating oils
	Naphthalenes Fluoranthenes Pyrenes Acenaphthenes	<input type="radio"/> Diesel <input type="radio"/> Kerosene <input type="radio"/> Heating oil <input type="radio"/> Lubricating oils

איור 2: מידת הזמינות של שמנים ודלקים שונים לפירוק ביולוגי

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 מלחצים 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 חרסיתיות 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 חרסיתיות. זמינות המזהם לפעילות מיקרוביאלית נמוכה יותר בקרקעות חרסיתיות אשר נוטות לספוח מזהמים בצורה משמעותית בהשוואה לקרקעות חוליות. בנוסף, ישנו קושי להוסיף מים לקרקעות חרסיתיות יבשות מידי, בשל האטמות הקרקע והקושי בערבוב, ובמקרה של קרקעות חרסיתיות עם אחוזי רטיבות גבוהים מידי הניקוז והאיזוי 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 טמפרטורת הקרקע בסביבות ה-15 מ"צ ומטה, יש לצפות להמצאות בטווחי טמפרטורה בהם הפירוק אינו יעיל לאורך שבועות ארוכים.

ניטור הפער בין טמפרטורה הסביבה לטמפרטורת 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. טמפרטורת קרקע – ניטור טמפרטורת קרקע חשוב בכדי לבדוק את הפרש הטמפרטורה לבין הטמפרטורת הקרקע המטופלת. מדידת טמפרטורת הקרקע צריכה להתבצע בקרקע נקיה מזיהום, בעלת מאפיינים דומים לקרקע המטופלת מבחינת מרקם ואחוזי לחות, ובסמוך למדידת הטמפרטורת הקרקע 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 מזהמות 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 האוכלוסייה 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 האינדאליים 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 האינדאליים 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 חרסיתיות 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 הראשונית 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 חרסיתיות כך שיהיה מאוורר יותר, או על מנת לייבש 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 שישפיקו 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 ובטמפי קבועה. קיימות מספר רב של דרכים ושיטות אנליטיות לבדיקות 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 וישיג את ערכי היעד. כתלות בתכונות הקרקע ידרשו הטיפול הבאים:

- **ניפוי גס של פסולת בניין ואבנים\סלעים** – הניפוי נעשה בדרך כלל באמצעות כלי צמ"ה עבור פסולת בניין, או באמצעות נפות/טרומלים מכאניים בגדלים שונים.
- **הומוגניזציה** – על מנת להגיע למרקם אחיד ככל האפשר נעשה שימוש בציוד 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 חרסיתיות 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 חרסיתיות הנוטות ליצור גושי קרקע אשר הופכים לאנאירוביים. הערבוב נעשה באמצעות כלים חקלאיים, כלי צמ"ה, 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 חומציובסיסי.

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

אמצעי ניטור	מטרת הניטור	פרמטר
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.	ניטור תכונות המזהמים לפני תחילת הטיפול לצורך התאמת תנאי הטיפול, ובמהלכו על מנת לבקר את התהליך ולבצע מעקב אחר מנגנוני ההפחתה.	ריכוז והרכב המזהמים
בדיקות מעבדה גיאומכניות של דירוג קרקעות, בדיקות שדה אינדיקטיביות.	גורם תפעולי מרכזי המשפיע על יכולת לאוורר את הקרקע, על תכולת הרטיבות, על זמינות המזהמים לפירוק ועוד.	מרקם הקרקע
ניטור ערימות הטיפול בהשוואה לטמפי הרקע בקרקע נקיה ממזהמים ובעלת מאפיינים דומים.	מעקב אחר היקף הפעילות הביולוגית האירובית, שליטה בקצב היפוך ואוורור הקרקע.	טמפרטורה
נקודות שאיבת גזים במקומות מייצגים המחוברות למד חמצן.	בקרה על זמינות החמצן הדרוש לפעילות פירוק אירובית.	ריכוז חמצן
ניטור תדיר במיוחד במהלך הוספת תוספים.	בקרה על התנאים המאפשרים פעילות ביולוגית אופטימלית.	pH
בדיקות מעבדה מייצגות לאורך הטיפול, לפני ואחרי הטמעת תוספים בקרקע.	בקרה על המצאות וזמינות חומרי הזנה הדרושים לפעילות ביולוגית.	חומרי הזנה
בדיקות מעבדה מייצגות לאורך הטיפול.	שמירה על אחוזי רטיבות המתאימים לפעילות ביולוגית ולאספקת חמצן לתהליכים אירוביים.	תכולת רטיבות
בדיקות מעבדה מייצגות לאורך הטיפול.	קבלת מידע על המידה בה התנאים בקרקע מתאימים לפעילות ביולוגית	ספירת חיידקים
בדיקות מעבדה מייצגות לאורך הטיפול.	היקף פעילות הנשימה התאית של חיידקים בתנאים אירוביים לאפיון היקף הפעילות הביולוגית.	בדיקות נשימה

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 חרסיתיות.
- 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)

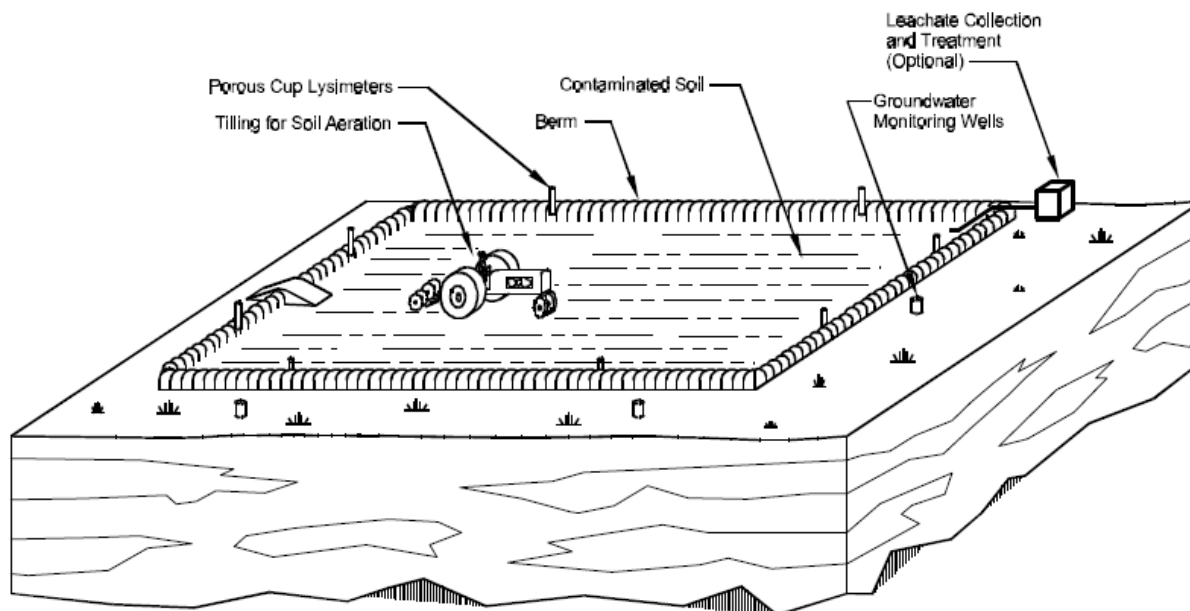
הטיפול כולל פיזור של הקרקע המזוהמת אשר נחפרה בשכבה דקה על פני האדמה, והאצת הפירוק הביולוגי האירובי ע"י אוורור, הוספת נוטריאנטים ושמירה על אחוזי לחות מתאימים. האוורור מתבצע באמצעות כלי תיחוח חקלאיים מכאניים, ועל כן גובה השכבה יכול להגיע עד לכ-60-40 ס"מ, כתלות בסוג המיכון המשמש ל"חרישת" הקרקע. אפשרות נוספת 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 הדחיסה של אוויר, טיפול בזיהום המכיל כמויות משמעותיות של נדיפים מצריך ניטור, איסוף וטיפול באוויר לפני שחרורו לסביבה.

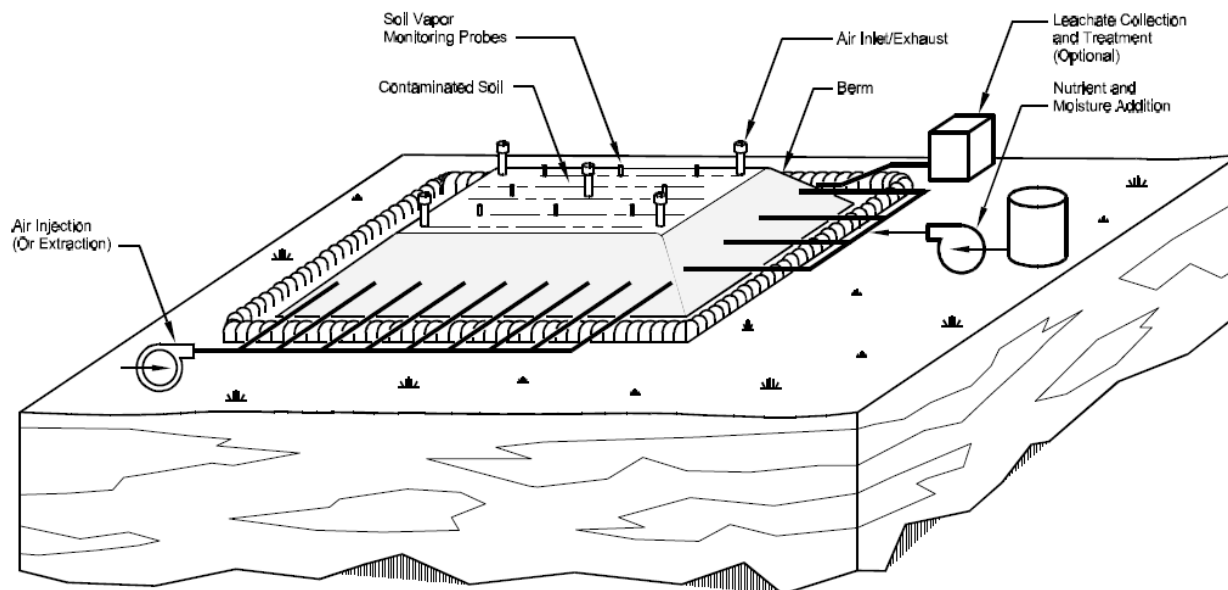
תכנון ותפעול טיפול בשיטת Bio-piles רגיש מאוד לקרקעות חרסיתיות עם אחוזי רטיבות גבוהים, בשל בעיות בפרמיאביליות ויכולת של החרסית להחזיק מים. בשל כך, במקרים רבים יש צורך להשתמש בכמויות משמעותיות של חומר נפחי.

יתרונות השיטה :

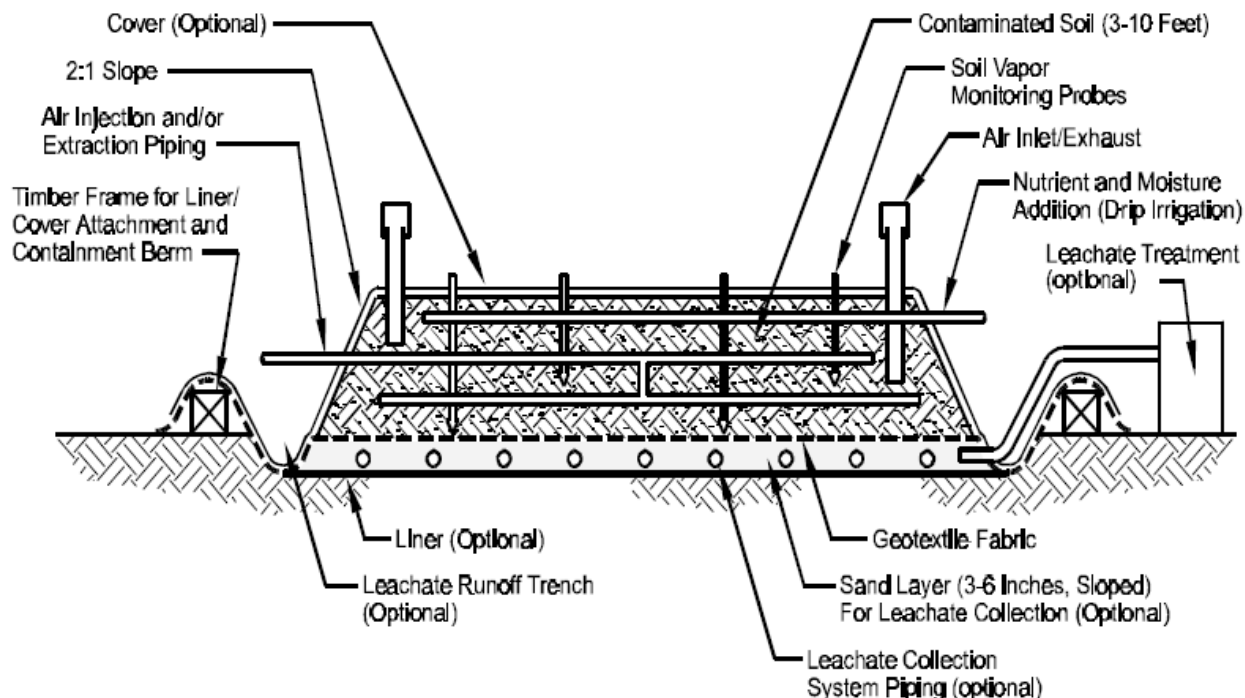
- תכנון ויישום פשוטים.
- זמני טיפול קצרים יחסית.
- אפקטיבי עבור זיהומים בעלי משקל מולקולרי גבוה הדורשים זמני טיפול ארוכים.
- דורש פחות שטח מ-Farm-Land.
- כיסוי ואיסוף גזים מתבצע בצורה נוחה יותר מאשר ב-farm-Land אשר דורש היפוך הקרקע.

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 חרסיתיות 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.

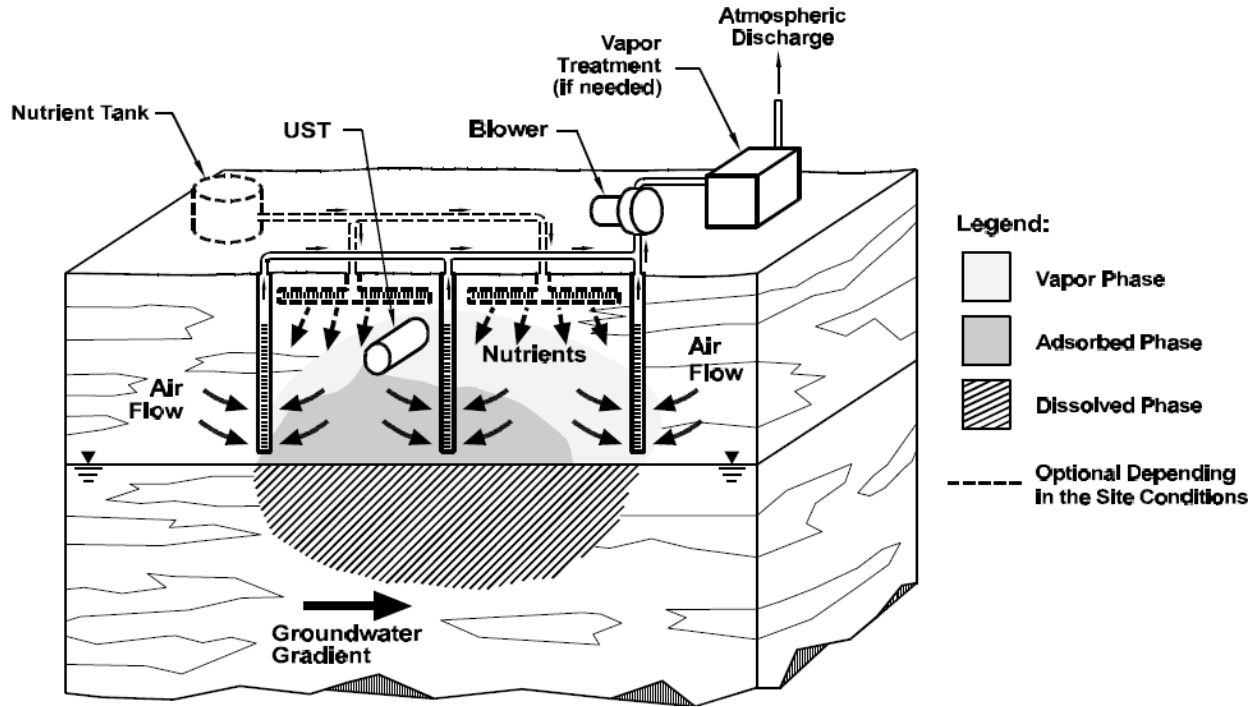
בדומה לטיפול פיזיקלי בשיטת (SVE) (Soil vapor extraction), חלק מהטיפול מתבצע ע"י שאיבת הפרקציות הנדיפות של הזיהום, אך ע"י שימוש בספיקות אוויר נמוכות יותר וע"י שימוש בתוספים לעידוד הפעילות הביולוגית, Bio-Venting מעודד את מנגנון הטיפול של הפירוק הביולוגי. שימוש בטכנולוגיות Bio-Venting עבור זיהומי דלק בתחום 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, טמפי 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 :

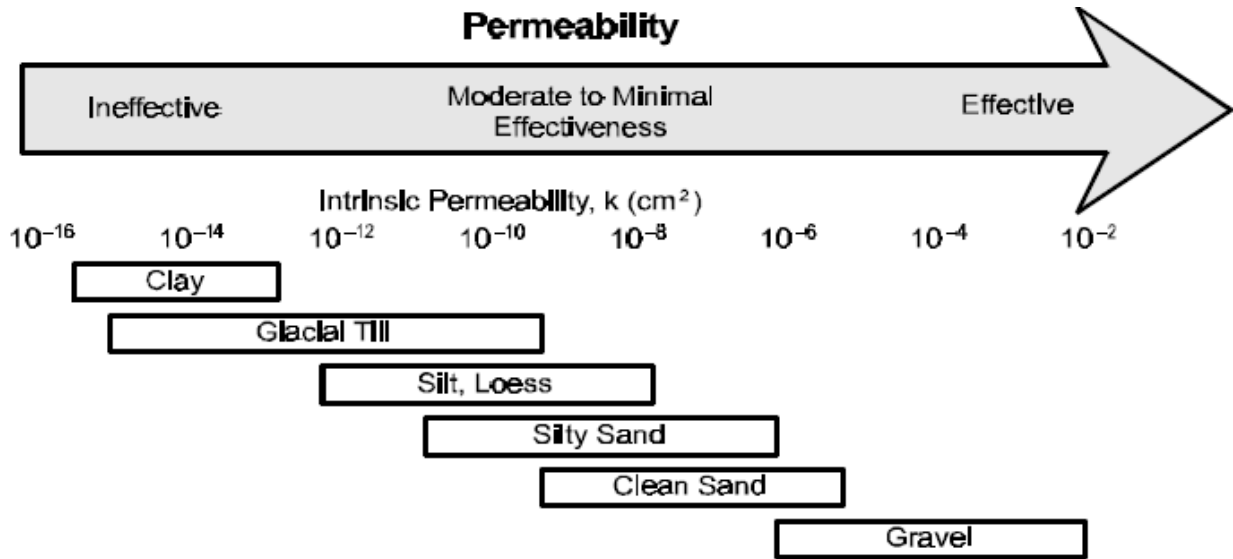
- פשטות התקנה
- אין הפרה של הקרקע
- השיטה מאפשרת הגעה לאזורים בלתי נגישים לעבודות חפירה
- חיסכון כלכלי בהימנעות מחפירה הקרקע, שינוע לטיפול ושינוע לפתרון קצה

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
- הטמפי של תת הקרקע היא לרוב נמוכה משמעותית מטמפי 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

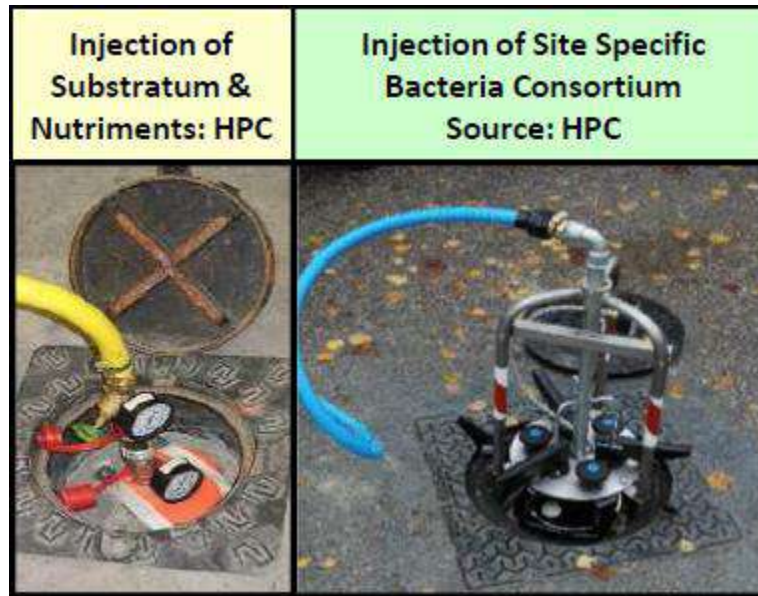
2.7 דוגמאות טיפול ביולוגי In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

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 $1\$ = 3.8\text{€}$, $1\text{€} = 4\text{₪}$. 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*
Dekonta	Bio-Venting אירובי	טווח זיהום נמוך	1-3 שנים (6 חודשים פיילוט)	לא צפויות פליטות לאוויר. מערכות איסוף וטיפול בתשטיפים.	50 טון	עלות טיפול: 38 ₪ - 114 ₪ לטון
HPC [איור 11]	Bio-Venting אירובי	עד 5,000 מ"ג/ק"ג	500-50,000 טון לשנה (2-6 חודשים פיילוט)	איסוף וטיפול בגז ובתשטיפים, תאי טיפול מותקנים על משטחים אטומים.		עלות טיפול: 20 ₪ - 280 ₪ לטון
RGS90 [איור 12]	Bio-Venting אירובי					40 ₪ - 60 ₪ לטון
RGS90 [איור 12]	Bio-Venting אנ-אירובי	זיהום גבוה מאוד של מזהמים מוכלרים				
Sol Environment	Bio-Venting אירובי	עד 10,000 מ"ג/ק"ג				עלות טיפול: 152 ₪ - 2280 ₪ לטון (228 ₪ - 3,420 ₪ 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 $1\$ = 3.8\text{€}$, $1\text{€} = 4\text{₪}$. 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 3: דוגמאות לטיפול ביולוגי Ex-Situ\On-Site מתוך מסמכי ה-RIF

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

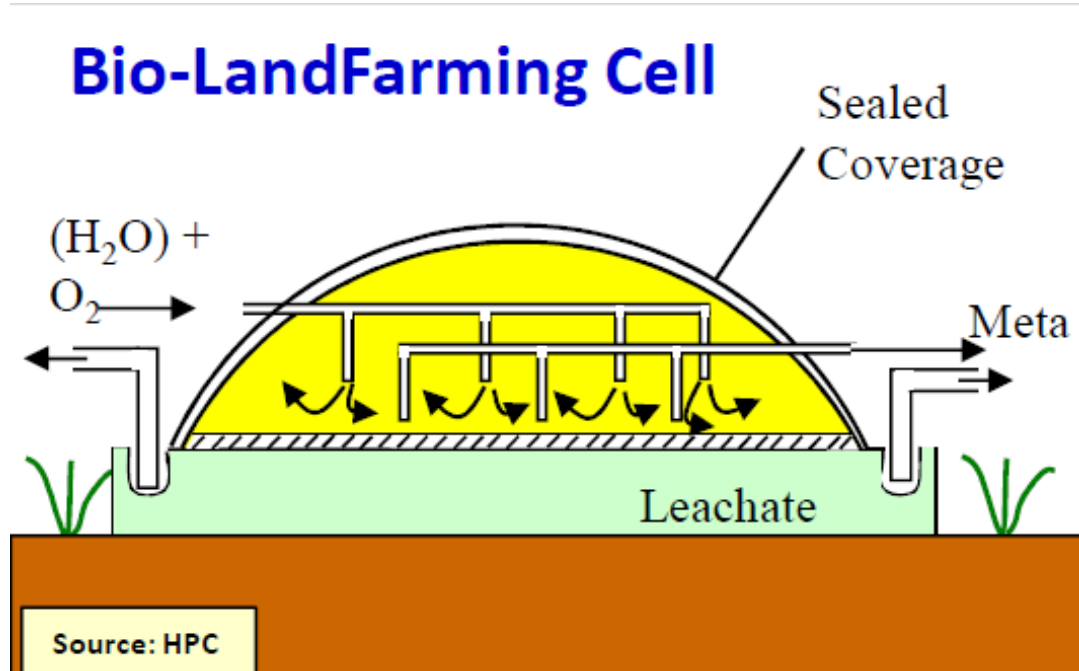
עלות טיפול: 120 ₪ - 380 ₪ ל טון			החומר פעיל השטח פריק ביולוגית ומאושר לשימוש ע"י ה-EPA	54,000 טון לשנה (1920 טון ליום). 6-10 חודשים להתחלת הטיפול		Landfarming עם תוסף פעיל שטח	ID Enterprises
עלות טיפול: 76 ₪ - 228 ₪ ל טון			איסוף וטיפול בגזים ובתשטיפים	4-9 חודשים לערימת טיפול (3-6 חודשים פיילוט)	נמוך-בינוני	Bio-Piles עם ביואוגמנטציה	Dekonta
עלות כלי צמ"ח: 2 מליון ₪. עלות טיפול: 60 ₪ - 120 ₪ ל טון כולל שינוע ליעד סופי	0.5 מ"ר ל טון	1,000 טון	כיסוי ערימות במידת הנדרש	היפוך קרקע בקצב של 100 טון בשעה. זמן טיפול של מספר שבועות/חודשים	רלוונטי עד 500 מ"ג/ק"ג של VOC ועד לשרשראות של 35 פחמנים	Windrows עם אפשרות לביואוגמנטציה	Ludreco SA [איור 14]
עלות טיפול: 8 ₪ - 200 ₪ ל טון		50 טון		500-100,000 טון בשנה (2-6 חודשים פיילוט)	עד 5,000 מ"ג/ק"ג	Bio-pile	HPC [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
בקרעות עם אחוזים גבוהים של חרסית יש להשתמש בחומרים ניפחיים על מנת ליצור מרקם מאוורר יותר.	●	חרסית וטין	
	●	הטרוגני	

הערות	סיווג	קריטריונים	
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 המזרחמים והנוטריאנטים לתהליך הביולוגי.	●	רטיבות הקרקע	
	●	רדוד (פחות מ-5 מ')	עומק אפקטיבי לטיפול (In-Situ)
	●	בינוי (5 עד 15 מ')	
	●	עמוק (יותר מ-15 מ')	
ניפוי גס של פסולת ואבנים, הומוגניזציה, ייבוש, ערבוב עם חומר נפחי, וויסות pH.		טיפול קדם בטיפול Ex-Situ (בהתאם למאפייני הקרקע והזיהום)	
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.	●	קצב טיפול	
90%-95%. מעבר לכך זמני הטיפול עלולים להיות ארוכים	●	הרחקת מזהמים	
מרקם הקרקע אינו משתנה, פרט לערבוב עם תוספים	●	מרקם הקרקע לאחר טיפול	
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.	○	שטח (בטיפול Ex-Situ)	תשתיות נדרשות ליישום הטכנולוגיה
תהליך אשר אינו דורש כמות אנרגיה גבוהה. במקרה של אזור מואץ ב-Bio-piles או בטיפול In-Situ משאבות האוויר יהיו הצרכן המרכזי.	●	אנרגיה	
כמות קטנה של מים להרטבה של קרקעות יבשות.	●	מים	
נידוף אינו המנגנון העיקרי של הטיפול הביולוגי, אך בטיפול בקרקעות המכילות ריכוזים משמעותיים של VOC, או בטכנולוגיה הכוללת אזור מואץ, יש צורך באיסוף, ניטור ובטיפול בגזים הנפלטם.	●	פליטות לאוויר	השפעה על הסביבה
מיעוט תשטיפים, בהם ניתן לעשות שימוש חוזר להרטבה או להפנות לטיפול.	●	מים ותשטיפים	
עלות כלי צמ"ה לטיפול Ex-Situ – כ-4 מליון ₪.		עלות מתקן	עלויות

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

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

3.1.2 סוגי מזהמים מטופלים

חומרים שונים מתנדפים בטמפ' שונות, בהתאם לנקודת הרתיחה שלהם, התלויה במשקל המולקולרי ובתכונות הכימיות של החומר. תכנון הטיפול והתאמתו לטיפול בזיהום מסוים מתחשב בהרכב הזיהום, טמפ' 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 שטמפי ההתנדפות שלו היא מתחת לכ-930 מעלות.

טמפי הנידוף עבור SVOC (PAH, PCB ועוד) הינה כ-325 מ"צ, ועבור VOC נדרשת טמפי של כ-100 מ"צ בלבד. ניתן לטפל ב-SVOC בטמפי הנמוכות מטמפי 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 הטמפי 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 טמפי הנידוף של מזהמים עיקריים (טמפי 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
Organic				
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
Inorganic				
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
Reactive				
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):

- טמפי' הטיפול – הטמפי' 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
- טמפי' אמצעי הטיפול במזהמים הגזיים לפני שחרורם
- טמפי' וספיקה של מי תהליך
- טמפי' יציאה של הקרקע, גזים ונוזלים מתא הטיפול
- טמפי' 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 בטמפי' 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.

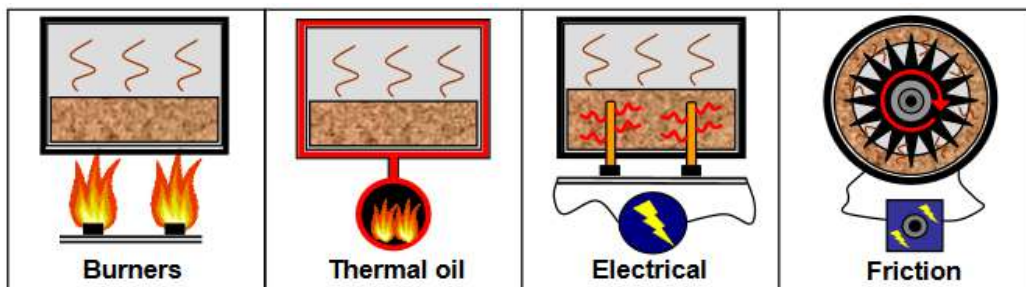
3.2 טיפול בטכנולוגיית TD בצורת Ex-Situ \ On-site**3.2.1 תיאור הטכנולוגיה**

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 ובצידוד 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 בציוד. 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 (טמפ' 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.

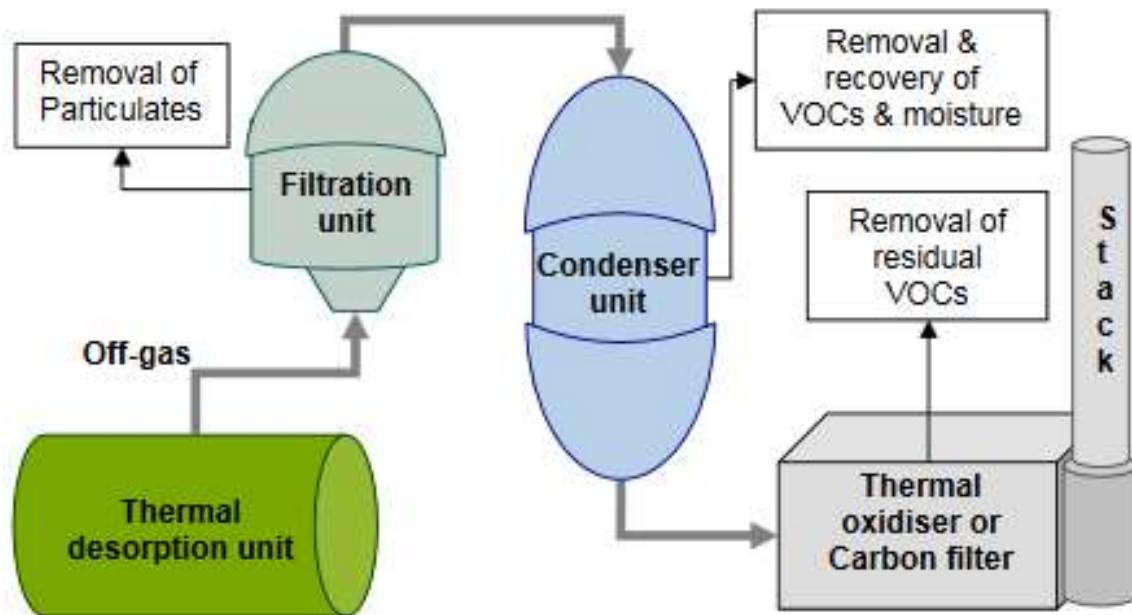
לאחר הטיפול, מרקם הקרקע עשוי להשתנות בעקבות החשיפה לחום הגורמת לייבוש קיצוני ולהתפוררות אגריגטים ברמת הגרגר. בטכנולוגיות TD הפועלות בטמפ' נמוכה יחסית, השינוי יהיה זניח, אך עם העליה בטמפ' בעבודה, ובמיוחד במעבר לשיטות טיפול של פירוליזה (ראה סעיף 3.4) או שריפה (ראה סעיף 3.5) תתקבל השחמה של הקרקע והפרקציה 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 טמפ', קצב הזנת הקרקע, קצב הסעת הגזים, ועוד).
- טיפול מנתי צריך להתבצע בתא אטום על מנת למזער פליטת גזים לסביבה, מזער 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 למזער כניסת אוויר ע"י מערכות וויסות אוויר (damper).
- חימום הקרקע מתבצע בקצב הדרגתי ובשלב. קצב חימום איטי מונע מצבים לא רצויים של התלקחות ושינויים כימיים של המזהמים. בשלב הראשון נעשה חימום לטמפ' נמוכה (90-100 מעלות) בה המים מתאדים, ורק לאחר מכן נעשית עליה לטמפ' 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 למוזהמים, דרך יחידות הטיפול במוזהמים בזרם הגז הנפלט (טיפול בחלקיקים, עיבוי מוזהמים מהפאזה הגזית, ושריפה/פירוק של שאריות המוזהמים) ועד לשחרור זרם הגז המטופל לאוויר דרך ארובה.



איור 17: איור סכמתי של מתקן טיפול

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

Size of Waste Site (tons)	Application	Petroleum-Contaminated Soil Cost (\$/ton) ^(b)	Hazardous Waste (Superfund) Cost (\$/ton) ^(b)
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

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

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*
Dekonta [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 בצידוד לטיפול באוויר). שינוע מתקן לישראל: 192,000 ₪. התקנה: 140,000 ₪ - 220,000 ₪. טיפול: 320 ₪ - 480 ₪ לטון
Astec [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		

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

<p>עלות כל מודול : 3.8-5.7 מיליון ₪ טיפול : 760 ₪ 1140- ₪ לטון</p>		<p>עבור מודול בודד : -33,600 89,600 טון לשנה (12-32 טון ליום) עבור קרקע עם זיהום של עד 15% משקלי</p>				<p>חימום הקרקע מתבצע ע"י אינפרא- אדום</p>	<p>טכנולוגיית MCS – תא טיפול אטום לאוויר המכיל מגשים של קרקע</p>	<p>מנתית</p>	<p>ניתן לניוד על גבי משאיות</p>	<p>Thermo dyne</p>
<p>עלות המתקן – כ-24 מיליון ₪. עלות טיפול – 240 ₪ - 480 ₪ לטון</p>	<p>מים : 5-10 מ"ק/שעה חשמל : -825 1015kW שמן גזגז טבעי : 1800l\h \ 1800Nm³\h שטח : 4 דונם למתקן התרמי, 3 דונם לקדם טיפול, 2 דונם לאחסון תוצרים</p>	<p>42,000-84,000 טון לשנה (30-15 טון לשעה). זמן שהייה של הקרקע בטיפול – כ-12 דקות. כמות קרקע תפעולים של 2,500-3,000 טון.</p>	<p>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'.</p>	<p>עד 30% חרסית (63) מיקרון ועד 5% חומר אורגני. יעילות מקסימלית ב-15%, ועד 25% מקסימלי</p>	<p>ממוצע 20,000 מ"ג/ק"ג</p>	<p>חימום בגז לטמפי של 350-550 מ"צ.</p>	<p>תוף מסתובב</p>	<p>מתקן נייח</p>	<p>Ludreco SA [איור 22]</p>	



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

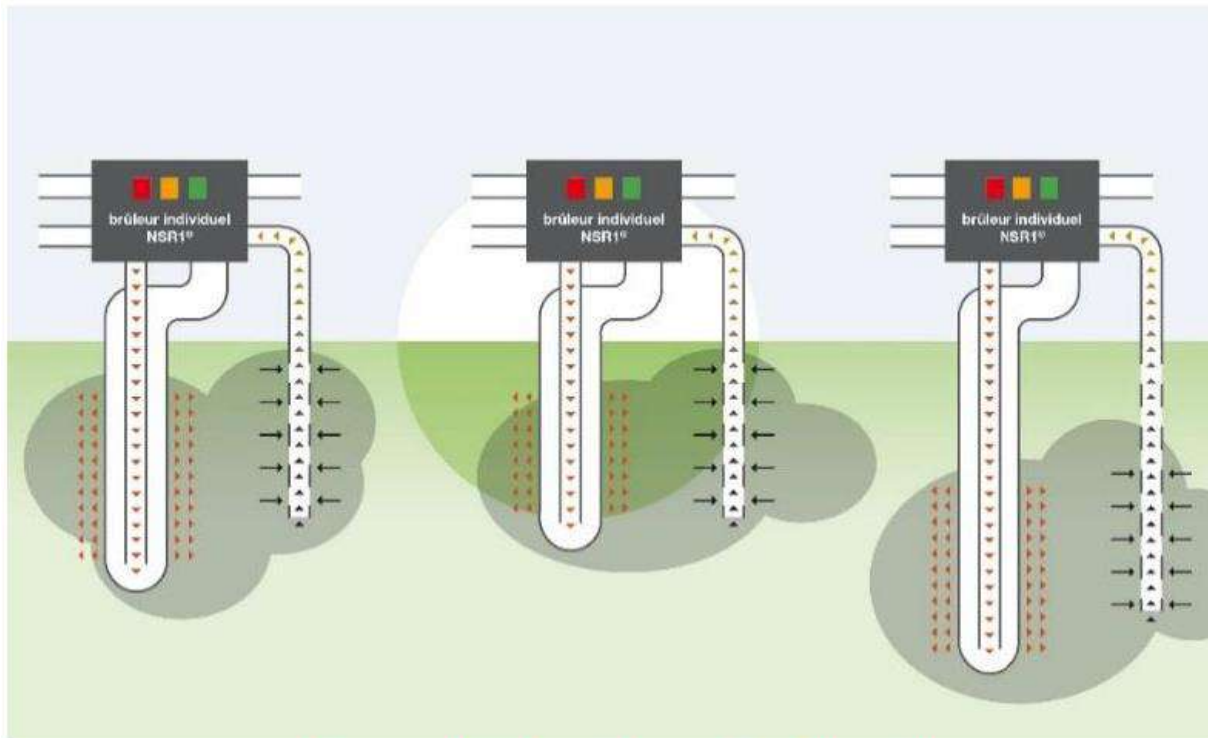
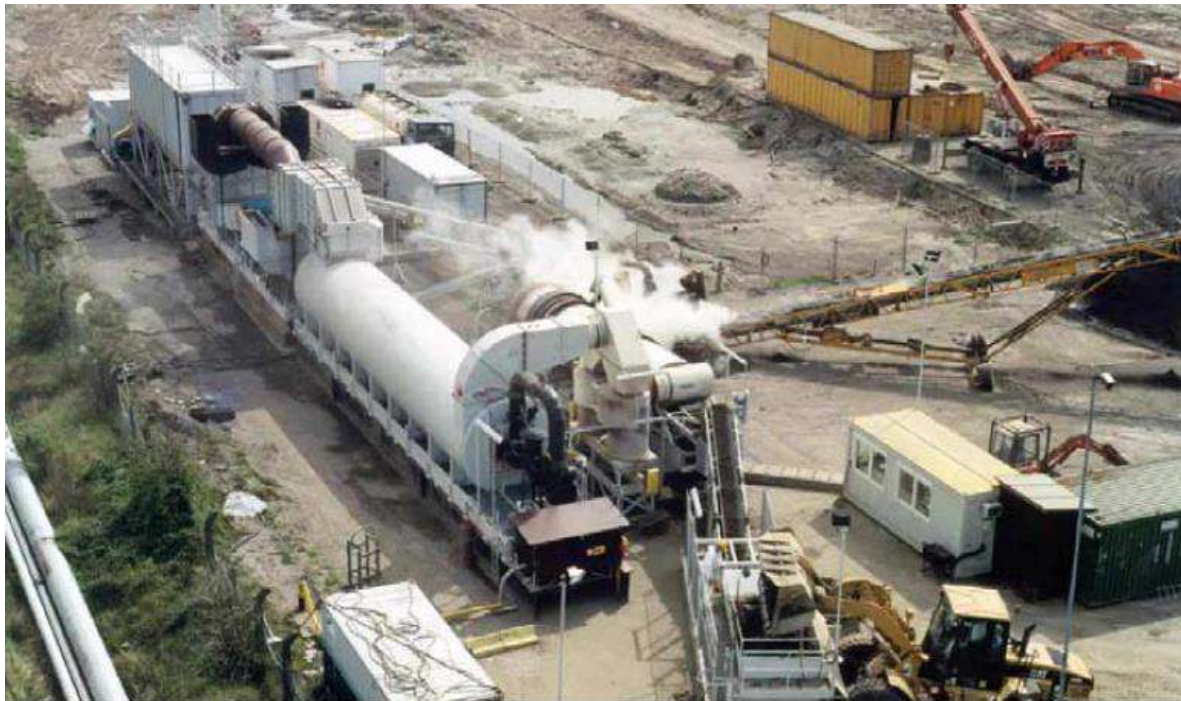


Figure : Heating elements in the soil



איור 21 : מתקן TD מסוג TPS של חברת SRT

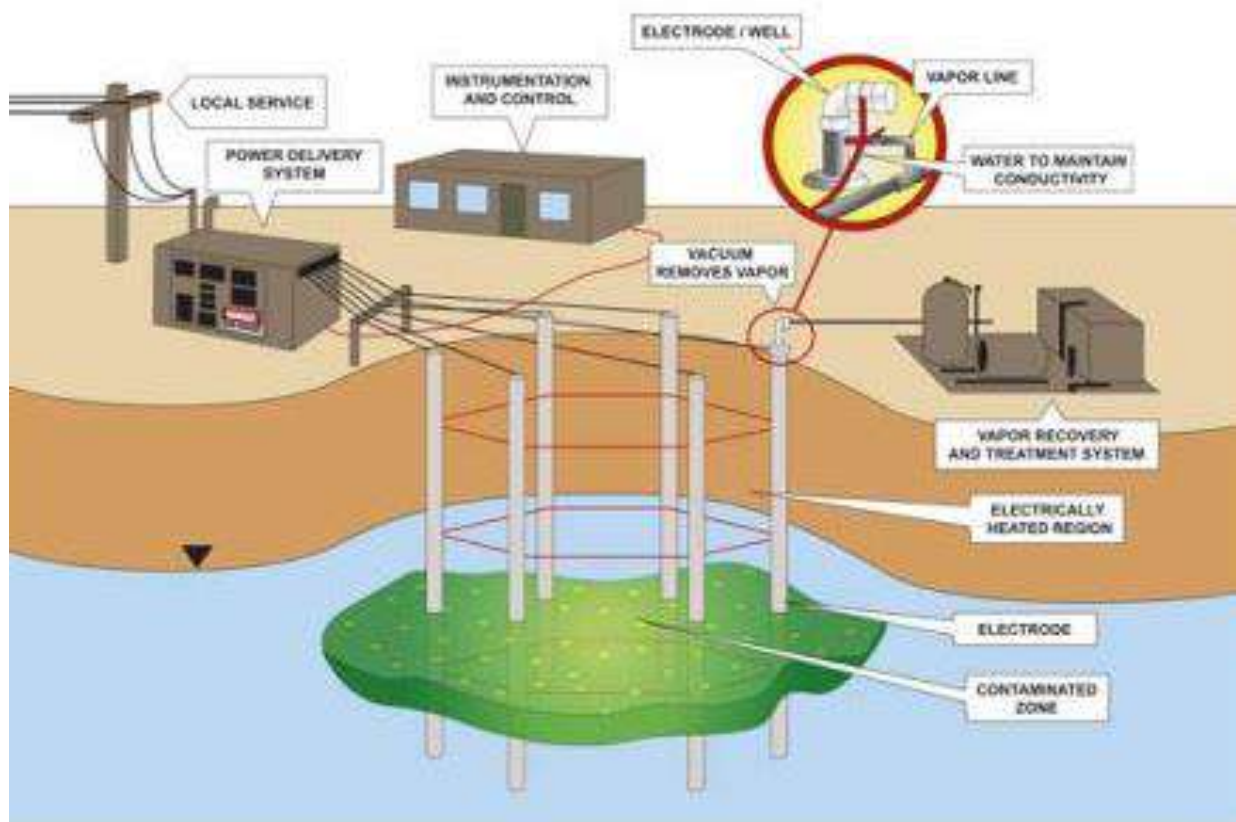


איור 22 : מתקן TD של חברת Ludreco SA

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 הנפלטים 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 לטמפי' 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

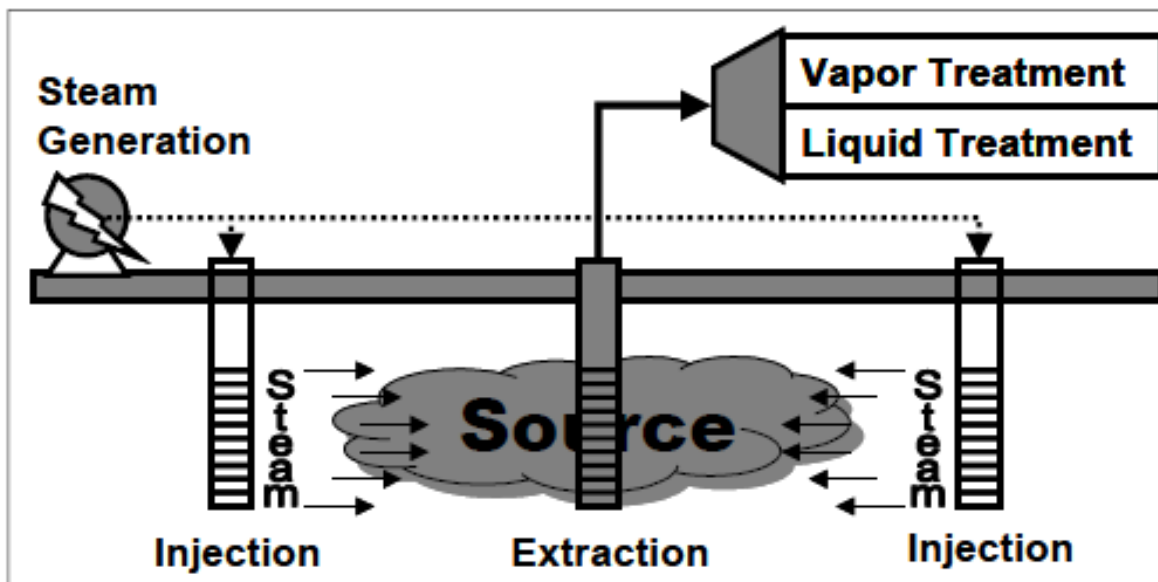
- פרמיאביליות של הקרקע – הפרמיאביליות של הקרקע צריכה להיות גבוהה מספיק בכדי לאפשר ספיקת קיטור משמעותית אל הקרקע על מנת לחמם את כל האתר המיועד לטיפול. הזרקה בקצבים גבוהים יותר יכולה להתקיים ע"י הגדלת הלחץ, אך יתכון ששיטת פעולה זו לא תהיה כלכלית.
- הומוגניות הקרקע – בקרקע הטרוגנית הקיטור יזרום דרך נתיבים 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 החדרה 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 החדרה, 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 קידוח 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.

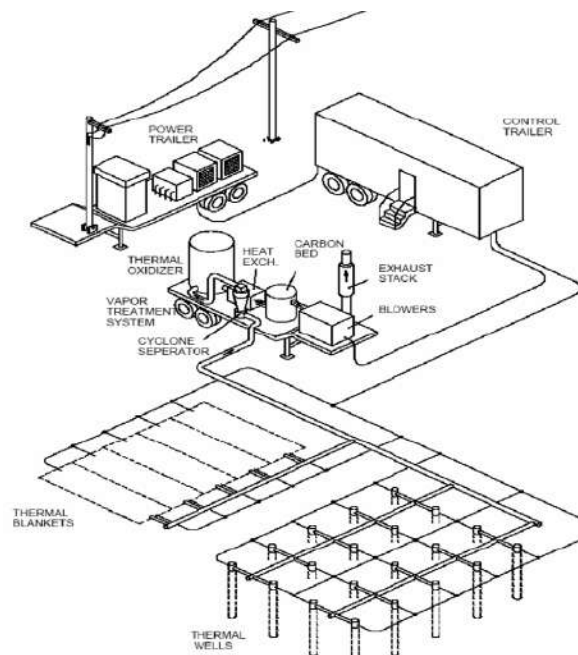
- **סוג הקרקע:** חימום בהולכה עובד בצורה הטובה ביותר בקרקעות עם אחוזי רטיבות נמוכים, אך נעשה בו שימוש גם בקרקעות עם אחוזי רטיבות גבוהים שהן בעייתיות מבחינת פרמיאביליות. בקרקע עם רטיבות גבוהה ופרמיאביליות גבוהה יכול להיווצר למצב בו מים זורמים לאזורים "יבשים" בהם המים כבר התאדו – מצב אשר ימנע הגעה לטמפ' 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.

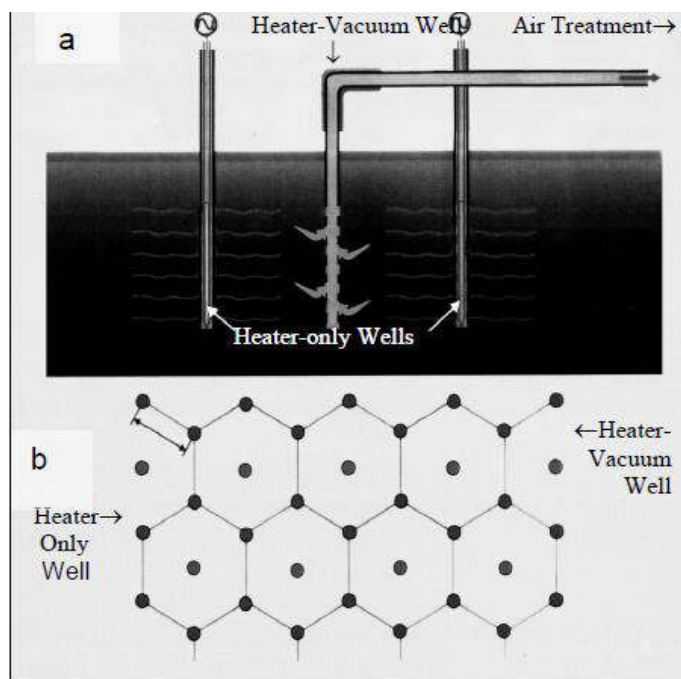


Figure 2-15. Schematic of Typical ISTD Well Field.
 (a) Cross-section showing one heater-vacuum well and two heater-only wells within a larger pattern.
 (b) Plan view showing thermal well field layout. Heater-vacuum wells are located in the center of each hexagon, and well spacing typically ranges from 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 בתוך זמן קצר יותר, אך עומק החדירה שלהם נמוך יותר.

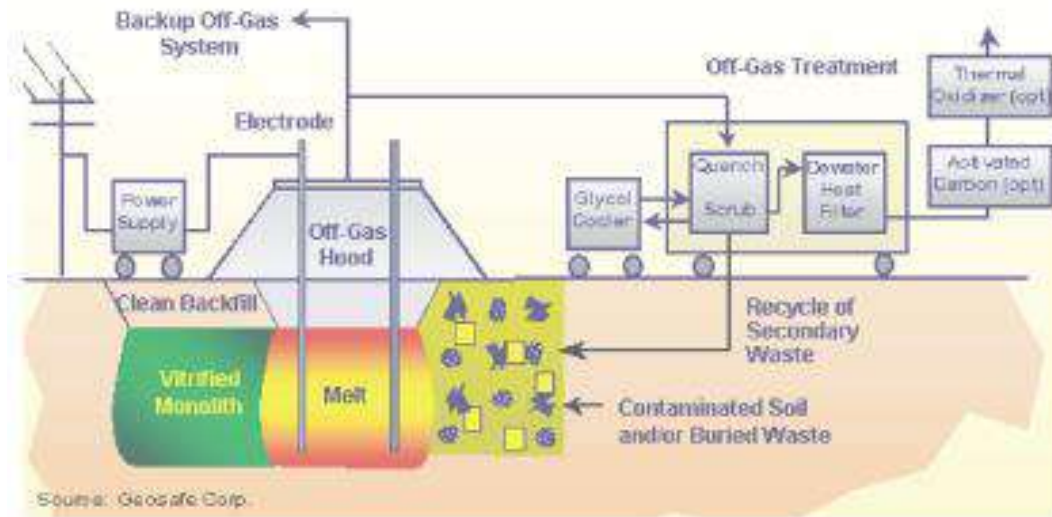
מערך הטיפול מורכב ממקור חשמל תלת-פאזי, מקור רדיו עם אוסילטור המייצר מקור זרם נמוך בתדירות הרצויה, מספר מגברים המחוברים בטור, מגבר סופי שמשחרר את הזרם בצורה הרצויה, אלקטרודות או אנטנות, מערך ניטור, כיסוי מתכתי מגן על פני האתר ומערכת איסוף וטיפול בגזים.

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 לטמפי 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 וטמפי 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 במונוליט הזכוכיתי.
- **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, דיגום, 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 מיסוגזים 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 הרווי,

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.

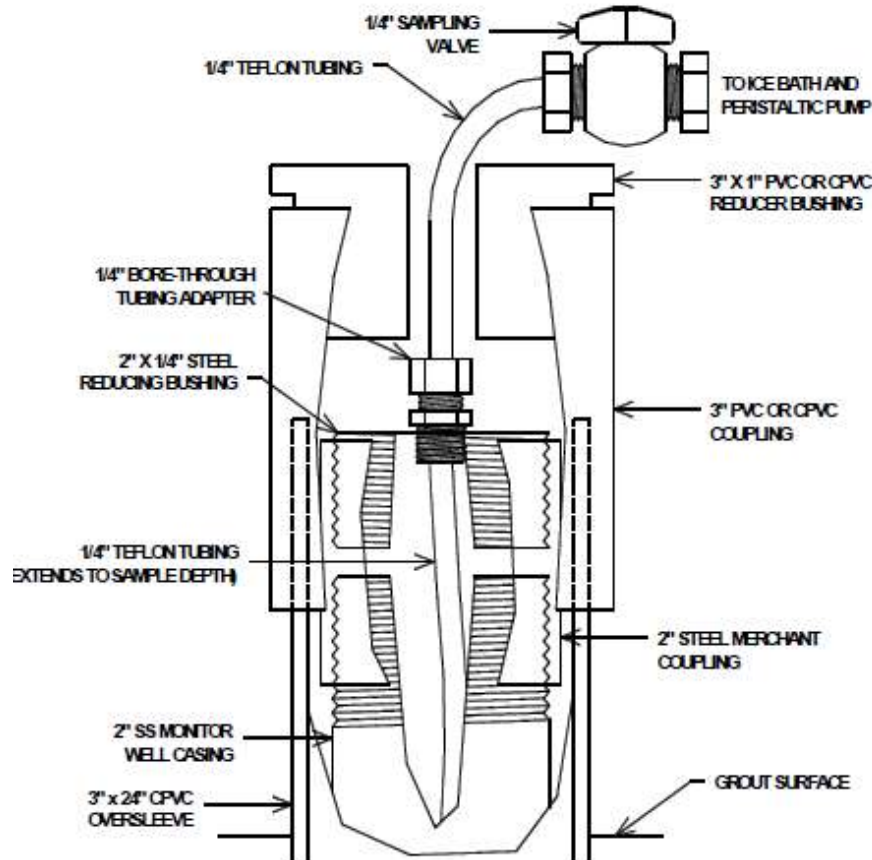


Figure 8-1. Modified Monitoring Well.

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%.

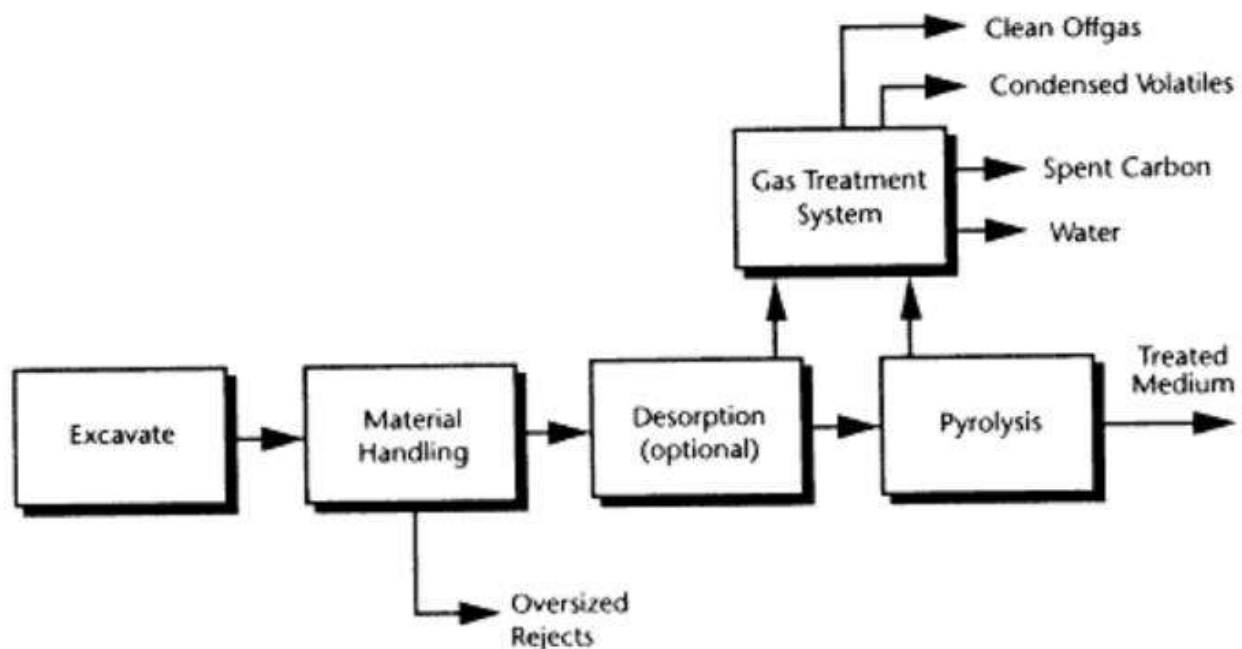
תוצרי הלוואי של תהליך זה הם מעט נוזלים ושאריות מוצקות (Coke) המכילות פחמן מקובע ואפר. את תוצרי הלוואי המוצקים יש לדגום למזהמים על מנת לבדוק האם ניתן לערבבם בחזרה אל הקרקע המטופלת או שנדרש טיפול משלים (למשל ייצוב/מיצוק) במידה וקיים זיהום במתכות או במזהמים אנאורגניים אחרים. הטיפול בגזים כולל שריפת הגזים 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 בטמפי' גבוהה יותר המביאה לפירוק המזהמים בסביבה עניה בחמצן.

מתקני הטיפול דומים מאוד למתקנים של שריפה (Incineration) אך פועלים בטמפי' 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 הידרוהלידיות וסולפידיות קורוסיביות כאשר הקרקע מזהמת 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 מזהמת.



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 בטמפי 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 בטמפי 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 הטמפי 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, עילות 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) בטמפי 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 טמפי 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 בטמפי 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 טמפי נמוך יחסית של עד 870 מ"צ.

טבלה 11 מסכמת הערכת עלויות לטיפול בטכנולוגיות שריפה.

טבלה 11: הערכת עלויות לטיפול בטכנולוגיות שריפה

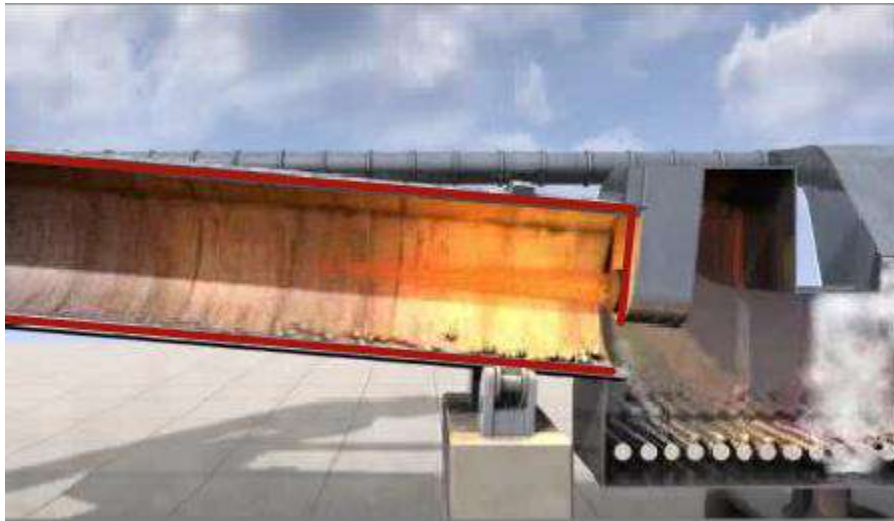
SOIL TECHNOLOGY: Incineration				
RACER PARAMETERS	Scenario A	Scenario B	Scenario C	Scenario D
	Small Site		Large Site	
Remedial Action:	Easy	Difficult	Easy	Difficult
Media/Waste Type	Soil	Sediment	Soil	Sediment
Contaminant	SVOC	SVOC	SVOC	SVOC
Approach	Ex Situ	Ex Situ	Ex Situ	Ex Situ
System Definition:				
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 ₃	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 בטמפי' גבוהות של 870-1,200 מ"צ.
- דלקים מוזרמים למערכת על מנת לשמור על בערה קבועה בטמפי' 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 תרמיים דורשים 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 SO₂, NO_x, CO, ו-CO₂. 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 בטמפי' 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 _x , CO, SO ₂)	Heating system exhaust (e.g. boilers, burners etc)	Design of plant (e.g. low-NO _x burners) Choice of fuel (e.g. electricity or natural gas) System efficiency Combustion control Selective catalytic/non-catalytic reduction
Acid gases (e.g. H ₂ 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 Thermal oxidisers/afterburners Catalytic oxidisers Combustion in boiler or engine Carbon adsorption
Particulates	Carried over into off-gas by air extraction system (e.g. ID fan) Boiler plant combustion	Cyclones Scrubbers Fabric filters/bag-filters HEPA filters Choice of fuel (e.g. electricity or natural gas)
Metals (low volatility)	Carried over into off-gas with particulates	Carbon adsorption Particulate abatement – see above
Dioxins & furans PCBs	Treatment of chlorinated wastes leading to formation in off-gas	Waste acceptance analysis Particulate abatement Carbon adsorption Operating temperatures
Volatilised metals (e.g. mercury)	Volatile contaminants desorbed from waste material into off-gas	Waste acceptance analysis Carbon adsorption] 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.

הקרקה 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 טפול 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 מזהמים 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.

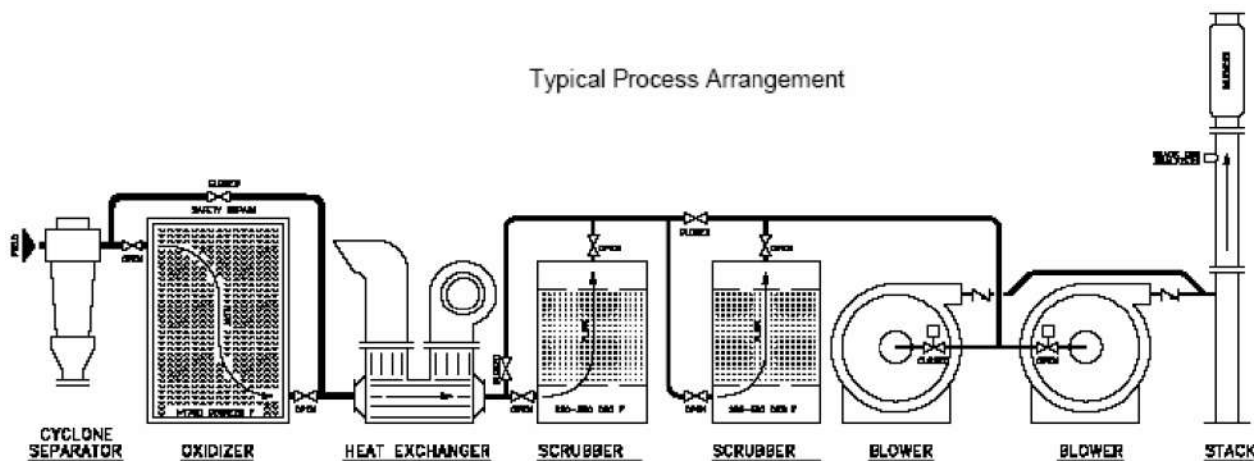
• נדיפים

- הניטור צריך לכלול אנליזות עבור כל טווח המזהמים בכדי לאפיין את כל טווח התפעול של הטיפול מבחינת טמפר' וסוגי פסולות.
- תהליכי הטיפול במזהמים השאריתיים 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 NO_x (שליטה בטמפ', שימוש בקטליזטורים).
 - התקנת מערכות לשליטה בבעירה ותחזוקה שותפת של המתקנים.
- פליטות למים
 - הזרמים המזוהמים כוללים זרמים של מזוהמים מושבים, מי תהליך, מי נגר עילי של האתר, תשטיפים מערימות הקרקע המזוהמות, וכד'
 - ככל הניתן יש לעשות שימוש חוזר בזרמי מים מזוהמים, 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 במזוהמים, פילטרים וקטליזטורים.
 - אפשרויות לשימוש חוזר ומחזור של זרמי פסולת צריכות להיות חלק מתכנון המתקן



איור 31 : תרשים סכמתי של מערכות לטיפול במזוהמים 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/ main emitters	Reduction measures	Noise level 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: - ESP - Scrubbing - Suction draught - Chimney - 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 82 - 85 82 - 84 84 - 85 89 - 95
Disposal of residues - Bottom ash discharge - Loading - Transportation from the plant - Total waste management residues	Enclosure, loading in the bunker	71 - 72 73 - 78 (day) 92 - 96 (day) 92 - 96 (day) 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
Total level L_{WA} of the plant Day Night		105 - 110 93 - 99
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 האוכלוסייה 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 המיידני 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 ללא מהווה גורם מגביל ● - יעילות בינונית \ התאמה בינונית \ גורם מגביל

○ - יעילות נמוכה \ התאמה נמוכה \ גורם מגביל מאוד

הערות	סיווג	קריטריונים	
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. פרט למפעל לשריפה בנשר, אין בארץ נסיון משמעותי עם מתקנים מסוג זה.	●	זמינות	ישימות הטכנולוגיות
	○	נסיון בישראל	
יעיל מרבית בריכוזים של עד כ-30,000 מ"ג/ק"ג	●	דלקים	התאמת לקבוצות המזהמים
	●	VOC (הלוגנים)	
	●	VOC (ללא הלוגנים)	
	●	SVOC (הלוגנים)	
	●	SVOC (לא הלוגנים)	
יעיל בטיפול בכספית ועופרת בלבד אשר להן טמפ' נידוף נמוכה יחסית.	○	מתכות	
	○	חומרים אנאורגניים	
	○	חומר נפץ	
היעילות האנרגטית גדלה ככל שאחוז החול גבוה יותר	●	חול	התאמה לתכונות הקרקע
ההשקעה באנרגיה ובעיות תפעוליות עולים עם עליה באחוז החרסית והטין. מתאים לקרקעות עם עד 30%-40% חרסית.	○	חרסית וטין	
בטיפול Ex-Situ נדרש טיפול קדם להומוגניזציה. בטיפול In-Situ קרקע הטרונגנית מקשה על תכנון טיפול יעיל.	●	הטרונגני	
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.	●	רטיבות הקרקע	

הערות	סיווג	קריטריונים	
בחימום באמצעות קיטור יש לוודא שאין פריצה של פני הקרקע.	●	רדוד (פחות מ-5 מ')	עומק אפקטיבי לטיפול (In-Situ)
	●	בינוי (5 עד 15 מ')	
	●	עמוק (יותר מ-15)	
ניפוי גס של פסולת ואבנים, הומוגניזציה, ייבוש, התאמת הסביבה הכימית לטיפול תרמי.		טיפול קדם בטיפול Ex-Situ (בהתאם למאפייני הקרקע והזיהום)	
עבור טיפול Ex-Situ - טיפול מהיר. 5,000-150,000 טון לשנה, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 10 להשוואה.	●	קצב טיפול	
מעל ל-99%, עמידה בערכי סף מחמירים	●	הרחקת מזהמים	
ללא שינוי ניכר ב-TD בטמפי' נמוכות, אך עם העלייה בטמפי' ומעבר לשיטות פירוליזה ושריפה יש השחמה של הקרקע וקבלת גודל גרגר דק יותר.	○	מרקם הקרקע לאחר טיפול	
5-10 דונם	●	שטח (בטיפול Ex-Situ)	תשתיות נדרשות ליישום הטכנולוגיה
תהליך עתיר אנרגיה. חיבור למקור אנרגיה לחימום (חשמל, גז טבעי, דלקים שונים)	○	אנרגיה	
חיבור מים במידה ויש צורך בסקראברים רטובים	●	מים	
כל המזהמים עוברים לפאזה גאזית ונדרש טיפול בכמויות גדולות של גזים המכילים מזהמים וחלקיקים.	○	פליטות לאוויר	השפעה על הסביבה
מיעוט תשטיפים, רק במידה ומתקיים טיפול בגזים עם סקראבר רטוב, ומערימות הקרקע לפני טיפול.	●	מים ותשטיפים	
עבור מתקן Ex-Situ - ראה טבלה 10 להשוואה.		עלות מתקן	עלויות
160 טון - 550 טון, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 10 להשוואה.		עלות טיפול	
ביוסויל: 160 טון - 300 טון		עלות טיפול במתקנים קיימים בארץ (הפירוט לצורך השוואה וייחוס בלבד ואינו מתייחס לשאר הפרמטרים התפעוליים לעיל)	

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

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

Project Name	Location	Parties Involved (Contractors, Consultants, Regulators etc...)	Years Performed	Primary Contaminants	Type of Soil/Waste	Treatment Description	Operating 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) Cis-1,2DCE (39 mg/kg) 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 (Contractors, Consultants, Regulators etc...)	Years Performed	Primary Contaminants	Type of Soil/Waste	Treatment Description	Operating Capacity	Treatment Costs
Former Wood Treatment Area AOC-2	Alhambra, Ca	California Department of Toxic Substances Control	2002-2003	PAH,PCPs, Dioxins, Furans, Petroleum Hydrocarbons	Contaminated 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 ³ . 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 ³

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 (On-Site\Ex-Situ):

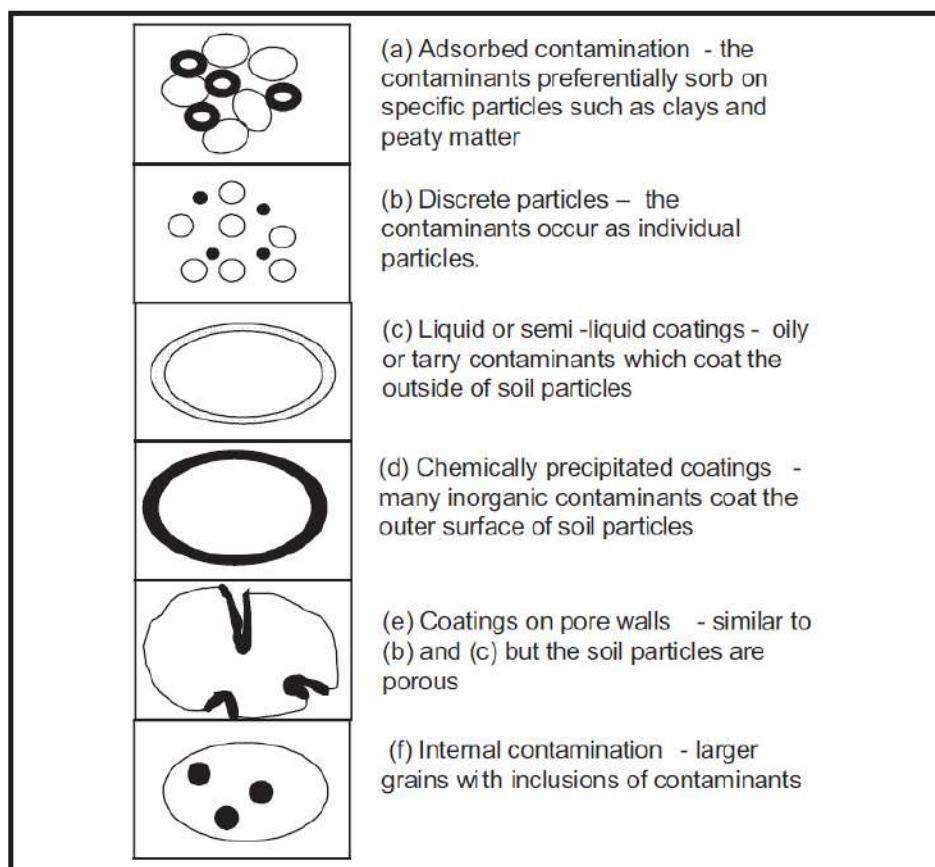
- מנגנון פיסיקלי: המנגנון הפיסיקלי הוא המנגנון הנפוץ והיעיל ביותר במתקני שטיפת קרקע. מזהמים אורגניים ואנאורגניים רבים נוטים להיספח אל הפרקציות הדקות של הקרקע (חרסית, סילט), בעוד הפרקציות החוליות אינן מזדהמות. ע"י הפרדה בין הפרקציות החרסיתיות והחוליות של הקרקע המזוהמת, מתבצעת הפרדה של המזהמים מכלל הקרקע 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, VOC, PAH, PCB, 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 מזהמות 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 מזהמות 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-74-63 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 מזהמות 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'

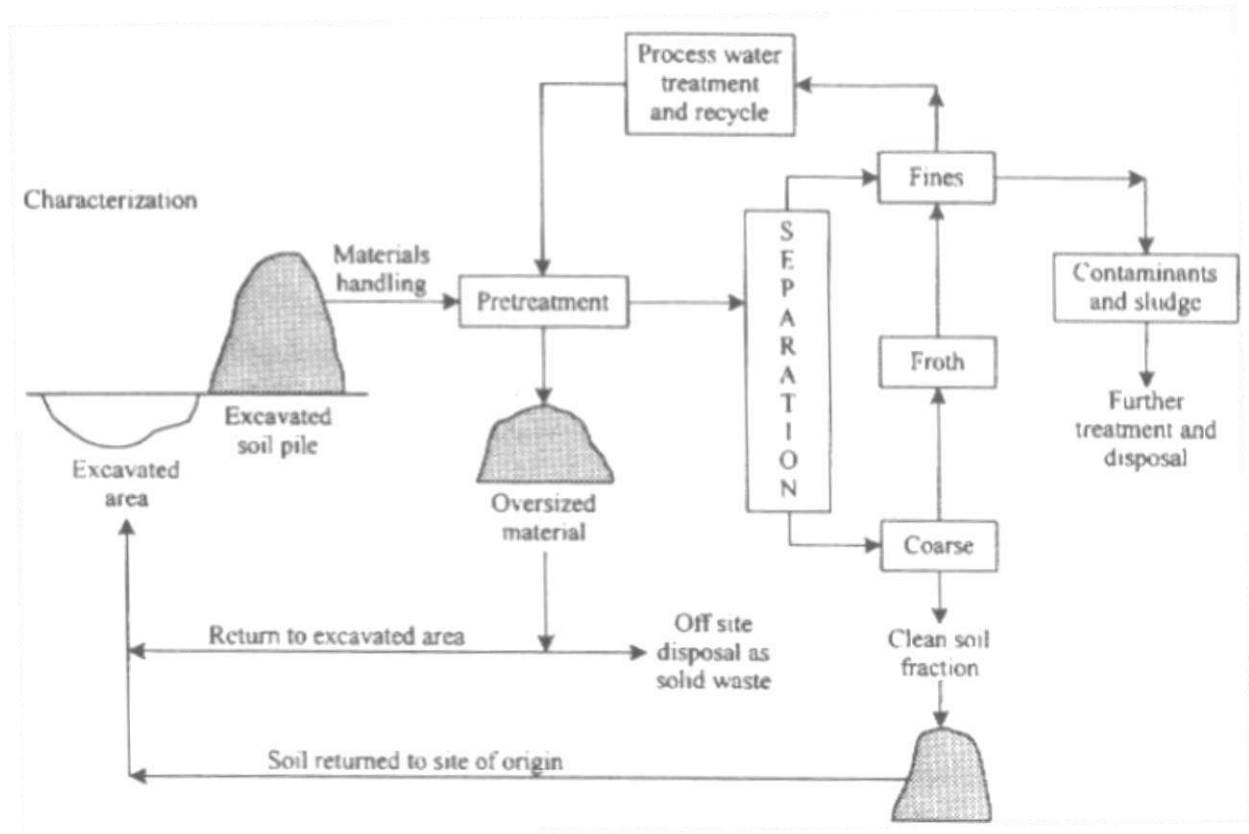
4.4 שלבי הטיפול

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. 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 מכאנית שונות (Belt press, Filter Press, צנטרפוגות 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 המשיך 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 תבצע 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 לאפיון 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 (חוליוחרסית) 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 מזהמם 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 מזוהמות 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 ונבנים תוך מספר מועט של שבועות. ישנם עלויות משמעותיות של שינוע והקמת המתקן, אך כאשר מדובר בכמויות גדולות של קרקע מזוהמת 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 מזוהמת משונעת למתקן קבוע מאתרים מזוהמים בסביבתו. מתקנים אלו נמצאים בקרבה גדולה יותר אל האתרים המזוהמים 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 המזוהמת 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 המזוהמות צריכים להיות מכוסים ביריעות או במשטחי אספלט/בטון על מנת למנועי 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 מזוהמות 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 המזוהמות 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 המזוהמת של הקרקע ובנפח המים אשר שימש לשטיפה.
- לא אפקטיבי לקרקעות המכילות מעל ל-50% 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

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

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

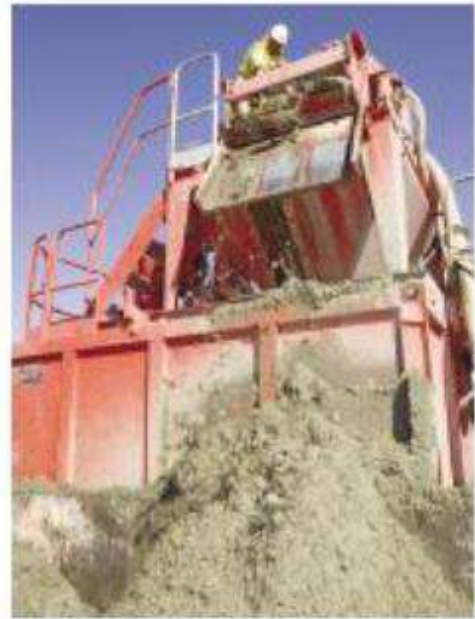
The plant can be mobilized as a load consisting of 7 containers. Main parts of the plant are shown on the following picture (1 - soil hopper with weigh belt feeder, 2 rotary scrubber with a trommel screen, 3 - spiral classifier, 4 - containerized filter press).



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

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

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

5 טיפול ייצוב מיצוק

5.1 תיאור כללי של הטכנולוגיה

ייצוב ומיצוק של קרקע מזוהמת הם תהליכים בהם המזהמים הופכים למקובעים אל הקרקע ע"י ראקציה עם תוספים. תהליכים אלו אינם מפרקים או מרחיקים זיהום מהקרקע, אלא מצמצמים את המובילות 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 slag²).

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 עביר 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 מעורבבים בשל

¹ פוזולאן (Pozzolan) הינו סוג של טיח

² סיגים כתוצאה מייצוג 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 והמוזהם
- 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 הגרנים, 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 טמפי' 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 מזוהמים 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 14th edition)

Technology	Total (FY 2005-08)	Percent Source Treatment Decision Documents (FY 2005-08)	Total (FY 2009-11)	Percent Source Treatment Decision Documents (FY 2009-11)
In Situ Treatment	72	48%	59	50%
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%
Ex Situ Treatment	98	65%	80	67%
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

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

מתכת	קבוצה	מצבים וולנטיים	מצב וולנטי מועדף	תרכובות עם מסיסות נמוכה	תנאים להוצרות תרכובות	רעילות
כרום (Cr)	IVB	+2, +3, +6	+3, +6	קרבוט, הידרוקסיד, פוספט, תרכובות גופרית	במצב וולנטי +6 מופיע כאניון (CrO_4^{2-} או $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ויוצר תרכובת לא מסיסה עם בריום ועופרת.	Cr^{+3} רעיל, Cr^{+6} רעיל מאוד וקרצינוגני.
עופרת (Pb)	IVA	+2		קרבוט, כרומט, הליד, פוספט, גופרית, תרכובות גופרית		
כספית (Hg)	IB	+2, +1, 0		הליד, הידרוקסיד, פוספט וסולפידים		
ניקל (Ni)	VIII	+1, 0, -1, +3, +2, +4	+2	קרבוט, הידרוקסיד, פוספט, תרכובות גופרית		
סלניום (Se)	VIB	+4, 0, -2, +6		סלנידים, אוקסידים, סולפידים		
כסף (Ag)	IB	+1		הליד, הידרוקסיד, תרכובות גופרית		
תליום (Tl)	II	+3, +1	+1	הלידים (פרט ל-F), הידרוקסיד, סולפיד		
אבץ (Zn)	IB	+2		קרבוט, הידרוקסיד, פוספט, סולפיד		

תרכובות אורגניות אחרות

אניונים אשר מטופלים לרוב בתהליכי ייצוב/מיצוק: פלואוריד (F^-) ציאניד (CN^-) ניטראט (NO_3^-), פוספאט (PO_4^{3-}) וסולפיד (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
פלאוריד (F ⁻)	מיוצב בקלות בצורתו כקלציום פלוריד CaF ₂
ציאניד (CN ⁻)	ציאנידים מסיסים כולל ניקל ציאניד (C ₂ N ₂ Ni) או קדמיום ציאניד (Cd(CN) ₂). יוצר תרכובת לא מסיסה עם ברזל ([Fe(CN) ₆] ⁴⁻).
ניטראט (NO ₃ ⁻)	כל תרכובות הניטראט הינן מסיסות, על כן טיפול ייצובמיצוק בד"כ אינו יעיל
פוספאט (PO ₄ ⁻³)	פוספטים מסיסים יוצרים עם קטיונים רבים תרכובות לא מסיסות, כולל קלציום, ברזל ועופרת
סולפיד (S ⁻²)	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, 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine Trinitrotoluene cyclotrimethylene-trinitramine	Royal Demolition Explosive (RDX)
אוקטוגן cyclotetramethylene-tetranitramine	High Melting eXplosive (HMX)
	2,4,6-trinitrotoluene (TNT)
2,4-dinitrotoluene	2,4-DNT (DNT) ³
2,6-dinitrotoluene	2,6-DNT (DNT) ³
Hexahidro-1-nitroso-3,5-dinitro-1,3,5-triazine	MXN ⁴
Hexahidro-1,3-dinitroso-5-nitro-1,3,5-triazine	DNX ⁴
Hexahidro-1,3,5-trinitroso-1,3,5-triazine	TNX ⁴
-	1,3,5-trinitrobenzene (TNB) ⁵
Guncotton, Cellulose nitrate	Nitrocellulose

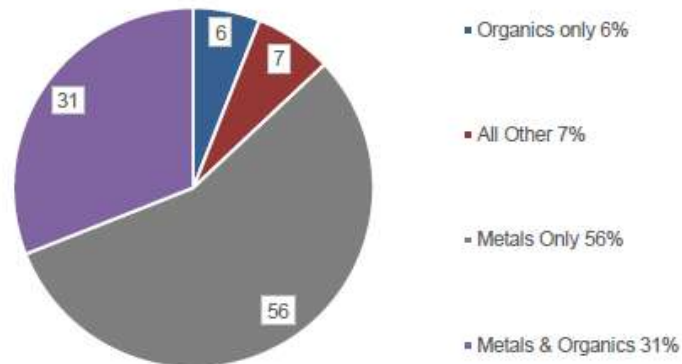
³ תוצר פירוק של TNT בתנאים אירוביים

⁴ תוצר פירוק של RDX בתנאים אירוביים

⁵ 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 ייצובמיצוק 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 ייצובמיצוק באתרים בארה"ב. כפי שניתן לראות, ב-56% מהאתרים נמצא זיהום במתכות בלבד. ב-31% זיהום במתכות וחומרים אורגניים יחד.



איור 40: מזהמים שטופלו באמצעות ייצובמיצוק באתרים בארה"ב (מקור: Bates and Hills, 2015)

יתרונות הטיפול בטכנולוגיית ייצובמיצוק:

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

חסרונות הטיפול בטכנולוגיית ייצובמיצוק:

- ה-pH הסופי של התערובת הוא בסיסי מאוד (12.5) אינו אופטימלי לשיקוע מתכות (כ-10).
- מזהמים 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/מיצוק 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/מיצוק 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/מיצוק 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/מיצוק בפולימר :

- מתאים לשימוש מול מגוון מזהמים, ובעיקר מתכות רעילות ותרכובות אורגניות
- מתאים לשימוש בפסולות נוזליות
- בהשוואה לייצוב/מיצוק 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/מיצוק 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
	Organophillic Clay	Phenolic waste, organics	Adsorption
	Attapulgate Clay	Acids Waste, Metals	Adsorption
	Lime	Inorganics, Metals	Binding

טבלה 29: אפקטיביות ייצובמיצוק בטיפול בסוגי מזהמים שונים (מקור: USEPA, 2009)

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

■ = Demonstrated Effectiveness

▲ = No Expected Effectiveness

● = Potential Effectiveness

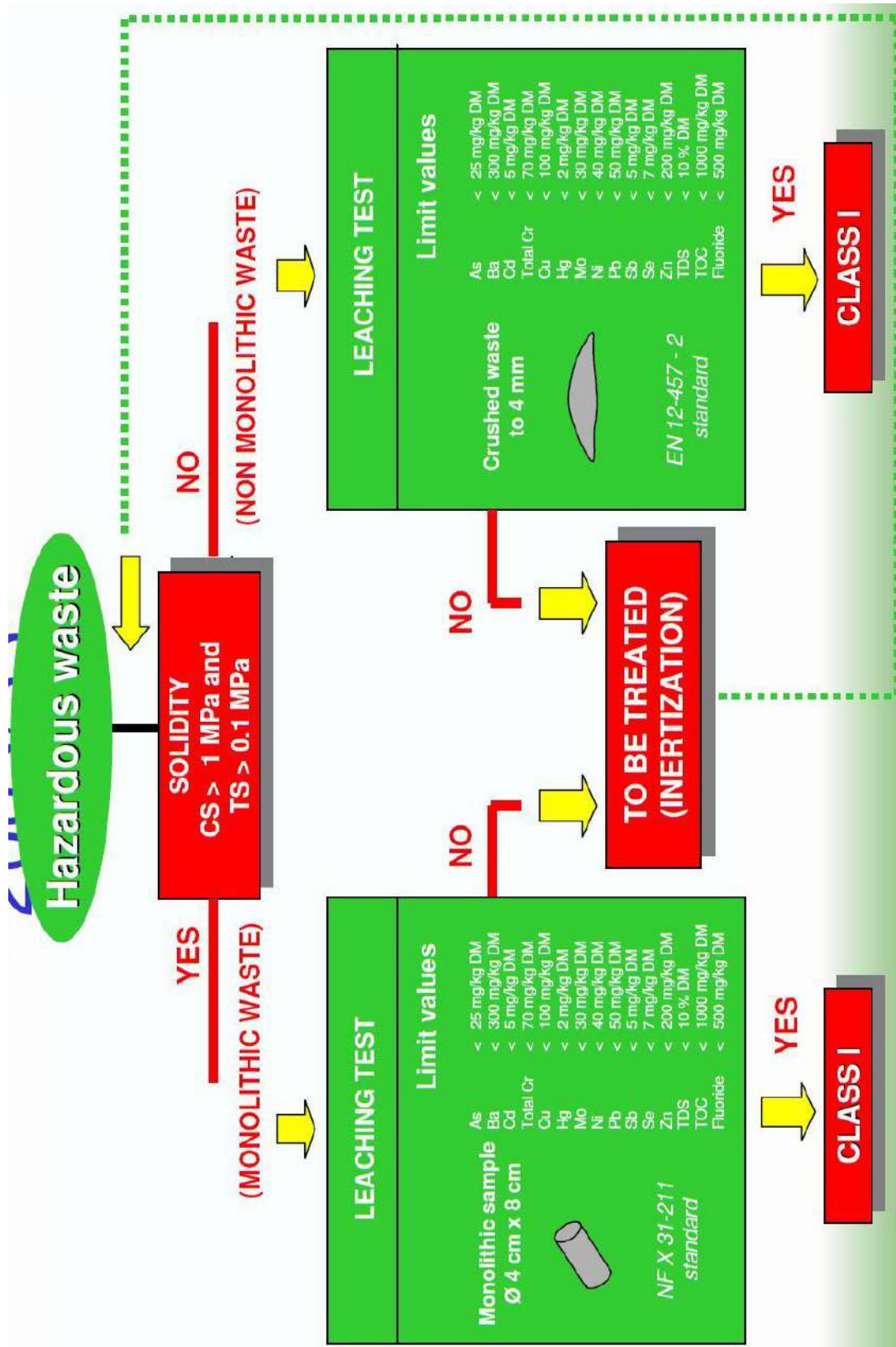
5.3 פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת

פרמטרים, מבחנים וקריטריונים שונים משמשים לתכנון תהליך ייצובמיצוק. 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).

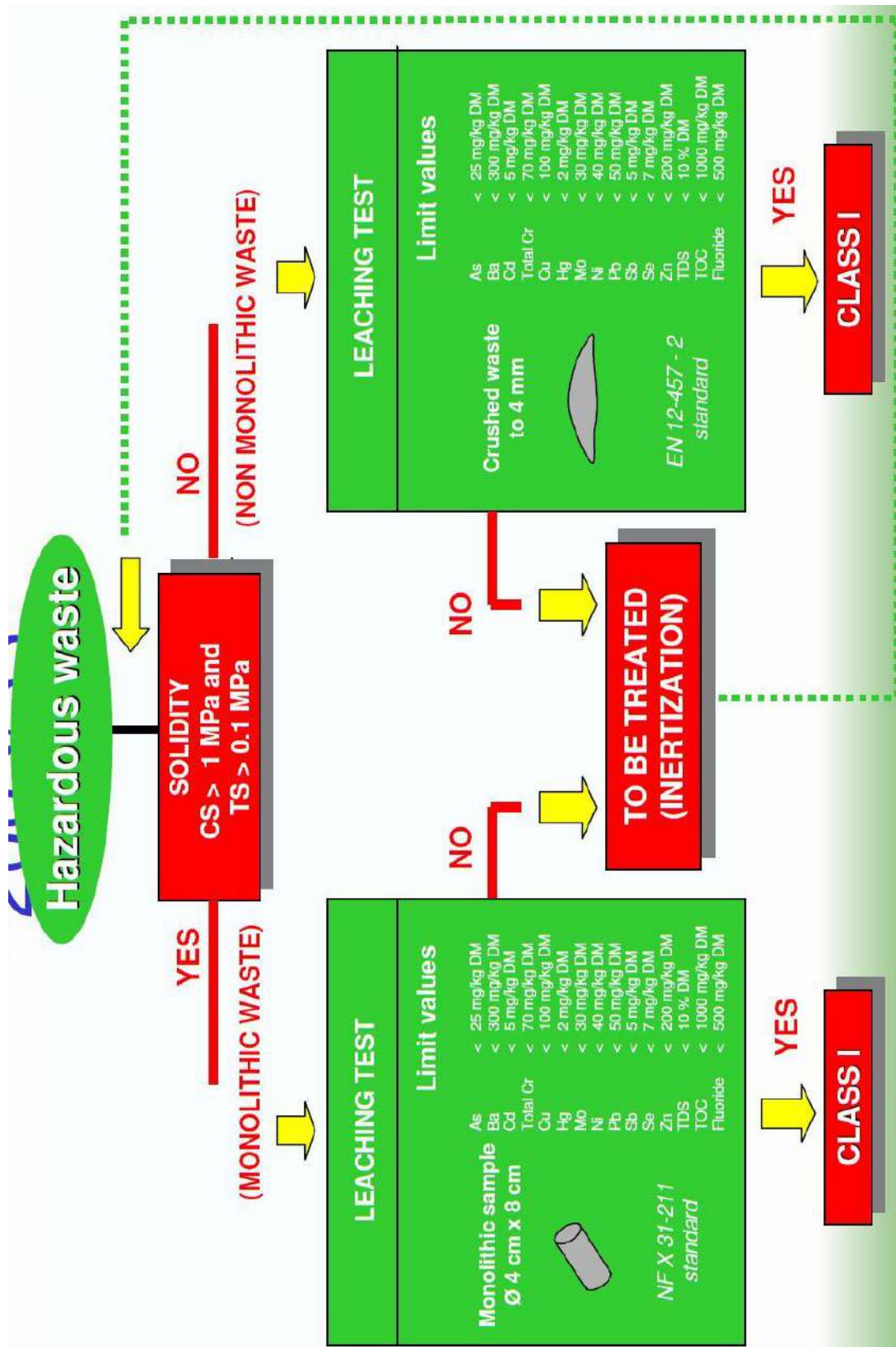
פרמטרים

פרמטרים לאפיון פסולת מיוצבת:

- חוזק – מייצג את יכולת החומר לעמוד בלחץ פיסי המופעל עליו ללא עיוות או כשל. פרמטר נפוץ עבור תוצרי ייצובמיצוק הוא הפעלת לחץ (Unconfined compressive strength, UCS).
- מוליכות הידראולית – פרמטר המתייחס לתנועת מים דרך תווך נקבובי. הפרמטר המשמעותי בייצובמיצוק הוא המוליכות ההידראולית היחסית בין הפסולת המזוהמת ($K_{s/s}$) לקרקע בסביבתה (K_{soil}). כאשר $K_{s/s}$ 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 ייצובמיצוק 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-Tabbsaa (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., 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 Cr(III)→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.
	Biological activity	Acids produced by biological activity can alter pore chemistry and locally degrade minerals.
Physical factors	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"> • חוזק/התנגדות לחדירה • מוליכות הידראולית • Leachability • עמידות 	<ul style="list-style-type: none"> • הרכב צמנט או תוספים אחרים • גידול הנפח • צפיפות הצובר ואחוז הלחות • אחידות • ריכוז המזהמים

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 פינוי 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 פינוי בשכבה בעובי 2-24 אינצ' ומכוסה לאחר מכן בשכבה של ריאגנטים. שתי השכבות מעורבות 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 הציוד: עלות יומית כוללת עבור ציוד המשמש לטיפול Ex-situ נמוכה בהשוואה לציוד בשיטת ה-In-situ. עלות המערבל כ-1000\$/יום, ציוד שינוע כ-1000\$/יום, סילו לאחסון ריאגנטים כ-500\$/יום. עלות טיפול למנת פסולת אחת, כולל עלויות כל הציוד, 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 (וציוד 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, ציוד, 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 (9%)	20.50 (63%)	20.50 (53%)	20.50 (42%)	20.50 (49%)
Labor and per diem (\$)	51.07 (23%)	1.36 (4%)	3.83 (10%)	6.93 (14%)	6.35 (15%)
Equipment rental (\$)	37.14 (17%)	1.38 (4%)	3.93 (10%)	7.54 (16%)	4.07 (10%)
Used drums at \$11/drum (\$)	48.18 (21%)	-	-	-	-
Mobilization-demobilization	15.68 (7%)	1.58 (5%)	1.43 (4%)	2.26 (5%)	1.20 (3%)
Cost of treatment process	172.57	24.83	29.69	37.23	32.11
Profit and overhead (30%)	51.72 (23%)	7.45 (23%)	8.91 (23%)	11.17 (23%)	9.63 (23%)
Total cost/ton (\$)	224.29	32.28	38.60	48.40	41.75

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 ³	\$6	\$7	\$4	\$5
Cost per m ³	\$216	\$248	\$124	\$190
Cost per yd ³	\$165	\$189	\$94	\$144

Reproduced from: 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	\$190	
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 $1\$=3.8\text{€}$, $1\text{€}=4\text{₪}$. 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 35: דוגמאות טיפול ייצוב מיצוק Ex-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

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

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



איור 42 : חברת Sectar SA



איור 43 : חברת Ludreco SA

5.4.8 מקרי בוחן בעולם (International Case Studies)

בטבלה 36 ניתן לראות מספר מקרי בוחן לטיפול ייצובמיצוק מהעולם

טבלה 36: מקרי בוחן לטיפול ייצובמיצוק מהעולם

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

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

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

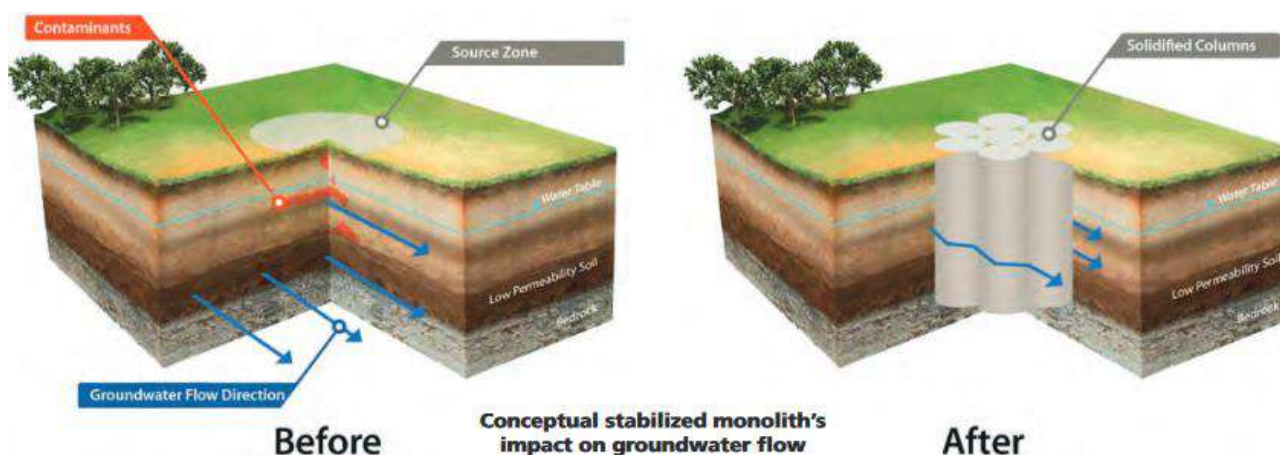
5.5 טיפול מיצוב מיצוק במקום: In-Situ

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:

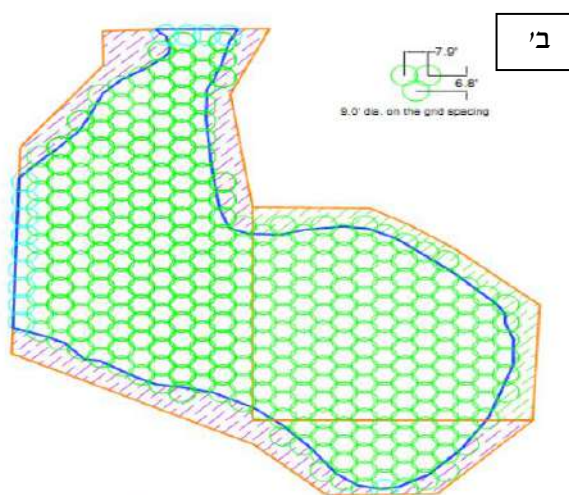
- ביצוע הדיגום באתר השיקום
- אנליזה מקדימה
- מבחני פיילוט (במידת הצורך)
- פעולות שיקום באתר כוללות: (1) הוספת ריאגנטים לתוך הפסולת, (2) עירבוב באמצעות Auger לתחילת תהליך הייצוב, (3) ריאקציה במשך 24-48 שעות ו-(4) איסוף הגזים הרעילים הנוצרים במהלך הריאקציה וטיפול בהם.



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 ייצובמיצוק 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 מחדש
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 יהוו סיכון בלתי קביל עבור רצפטורים קרובים.

5.5.3 פרמטרים אופייניים לקרקע מטופלת

בתהליכי ייצובמיצוק 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.

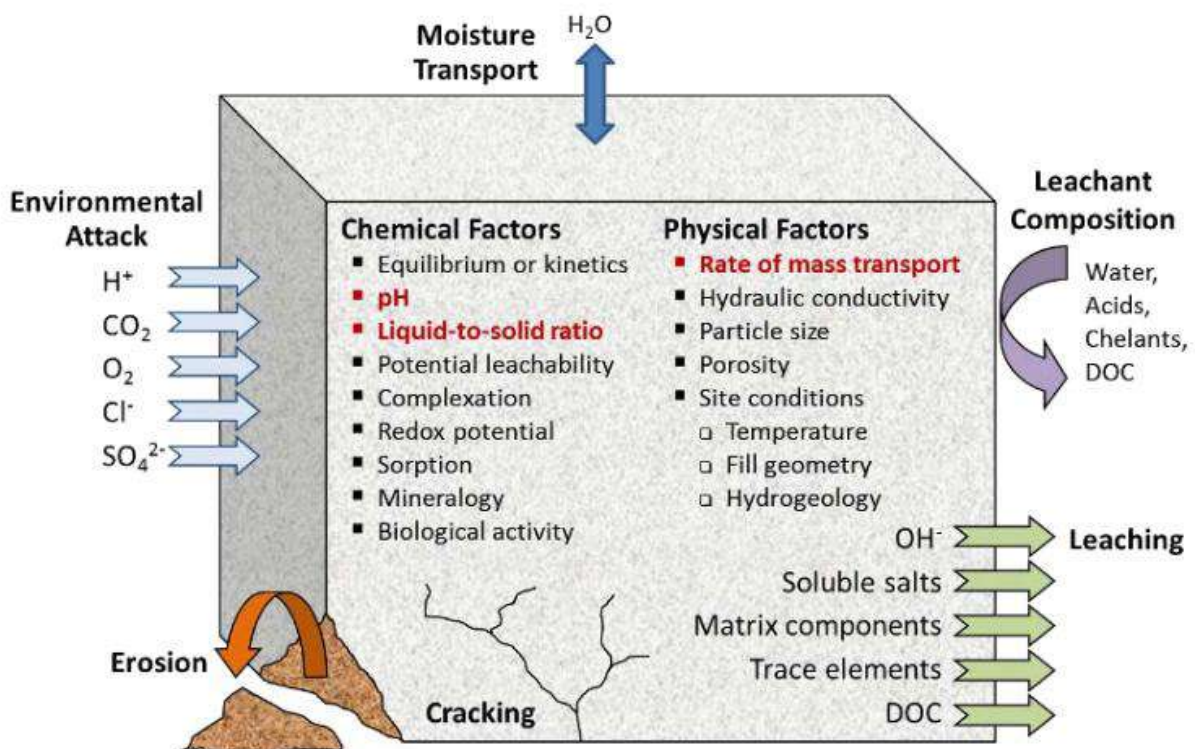


Figure 3-1. Internal and external stresses influencing the performance of S/S-treated materials. Source: Modified from Garrabrants and Kosson 2005.

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"> Proposed future land use Local zoning/land use ordinance/regulations Long-term stewardship Community impacts/concerns (environmental justice, health risks, economic development) 	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"> Site and surrounding land use Institutional controls Ecological status Proximity to sensitive receptors (sensitive populations, water bodies, endangered species) Local groundwater use 	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

באיור 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 (ב') לאחר השיקום (מקור: Cambridge, Ma, USA : (2006)

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 $1\$ = 3.8\text{€}$, $1\text{€} = 4\text{€}$. 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 38: דוגמאות לטיפול ייצוב מיצוק In-Situ מתוך מסמכי ה-RFI

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



איור 49: חברת HPC שיקום קרקע בשיטת TMT15-Stabilization



איור 50: טיפול ייצובמיצוק 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/מאזן לא מהווה גורם מגביל ● - יעילות בינונית \ התאמה בינונית \ גורם מגביל

○ - יעילות נמוכה \ התאמה נמוכה \ גורם מגביל מאוד

הערות	סיווג	קריטריונים	
טכנולוגיות ייצוב מיצוק עושות שימוש בכלים הנדסיים ובמתקני ערבול זמינים יחסית ויכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן קצר.	●	זמינות	ישימות הטכנולוגיות
מתקן טיפול קבוע של החברה לשירותי איכות סביבה נאות חובב (ניסיון גם בטיפול בזיהום דלקים ושמינים גבוה)	○	נסיון בישראל	
היעילות יורדת עם העלייה בריכוז של מזהמים שומניים	○	דלקים	התאמת לקבוצות המזהמים
	○	VOC (הלוגנים)	
	○	VOC (לא הלוגנים)	
	○	SVOC (הלוגנים)	
	○	SVOC (לא הלוגנים)	
	●	מתכות	
	●	חומרים אנאורגניים	
	●	חומר נפץ	
	●	חול	התאמה לתכונות הקרקע
אחוזים גבוהים של חרסית עלולים להגביל את יעילות הערבוב	○	חרסית וטין	
	●	הטרוגני	
רטיבות גבוהה בעייתית מבחינת שינוע	○	רטיבות הקרקע	עומק אפקטיבי לטיפול (In-Situ)
	●	רדוד (פחות מ-5 מ')	
	○	בינוני (5 עד 15 מ')	
	○	עמוק (יותר מ-15)	
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.	●	קצב טיפול	
לא רלוונטי. המזהמים אינם מורחקים		הרחקת מזהמים	
תכונות הקרקע משתנות בצורה דרמטית ולא מתאימות לשימוש	○	מרקם קרקע לאחר טיפול	
	●	שטח (בטיפול Ex-Situ)	תשתיות

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 ₪ טון, 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 (קבלנים, יועצים, רגולטורים וכו')	שנות ביצוע	מזהמים עיקריים	סוג הקרקע/פסולת	ריאגנטים	עלויות השיקום
טיפול ראשוני בבריכות חומציות ב"ח 1/3	מגרש 181 לשעבר בחברה לשירותי איכות הסביבה	תכנון וביצוע: החברה לשירותי איכות הסביבה פיקוח: אקולוג הנדסה, משרד להגנת הסביבה	2011-2014	VOCs (אצטון, דיכלורומטן), בנזן, חומצות, מתכות כבדות	שפכים אורגניים ובוצות חומציות	אפר פמ"א	
פיילוט טיפולי בבריכות אנאורגני ב"ש 2	מגרש 181 לשעבר בחברה לשירותי איכות הסביבה	תכנון וביצוע: החברה לשירותי איכות הסביבה פיקוח: אקולוג הנדסה, משרד להגנת הסביבה	2011	סידן, מלחים, מתכות כבדות, BTEX	בוצות וקרקע מזהמת	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 th Street Landfill Superfund Site	West Memphis, AR, USA	USEPA	1998 - 2000	PAHs, PCBs, BTEX, Pesticides, and Metals	Oil Sludge, Acidic waste	- Soil 64.5 % - AG limestone 16.1 % - Portland cement 12.9 % - Fly ash 6.5 %	- UCS > 50 psi (0.3 MPa) - Hydraulic conductivity less 1×10^{-6} centimeters per second (cm/s) - Leaching of lead < 15 micrograms per liter ($\mu\text{g/L}$) as determined by SPLP	~ 106 \$/cu yd (138 \$/m ³)
In-Situ S/S Remediation of the Former Kendall Square	Cambridge, Ma, USA	Remediation Design: The RETC Group, Concord Ma. Contractor:	2006	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), Volatile	Coal Tar Impacted Soils. To a depth of 6 m.	- 7% Cement by Weight - 5% Water by Weight - <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 Plan (MGP)		Geo-Con Incorporated		Organic Compounds (VOCs)			<ul style="list-style-type: none"> - 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 m³). - Nuisance gasses generated during treatment were collected and treated to prevent atmospheric release. 	

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.

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

טבלה 42: טבלת סיכום טכנולוגיות טיפול בקרקעות מזהמות

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

ייצוב/מיצוק		שטיפת קרקע		טיפול תרמי		טיפול ביולוגי		קריטריונים	
הערות	סיווג	הערות	סיווג	הערות	סיווג	הערות	סיווג		
טכנולוגיות ייצוב מיצוק עושות שימוש בכלים הנדסיים ובמתקני ערבול זמינים יחסית ויכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן קצר.	●	רוב מתקני הטיפול בטכנולוגיית שטיפת קרקע יכולים להיות מוקמים בארץ בפרק זמן של עד מספר בודד של שבועות.	●	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.	●	לרוב שיטות הטיפול הביולוגי אין צורך בשינוע ציוד ייחודי, וזמן ההתארגנות הוא של מספר בודד של חודשים, בעיקר להכשרת השטח.	●	זמינות	ישימות הטכנולוגיות
מתקן טיפול קבוע של החברה לשירותי איכות סביבה נאות חובב (ניסיון גם בטיפול בזיהום דלקים ושמנים גבוה)	●	אין בארץ ניסיון עם מתקנים מסוג זה.	○	קיים ניסיון במתקן לשריפה בנשר ובמתקן לשריפה של חברת אקוסול בנאות חובב.	●	בארץ קיים ניסיון משמעותי עם שיטות טיפול ביולוגי In-Situ ו-Ex-Situ	●	ניסיון בישראל	
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.	● ● ● ● ●	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)	● ● ● ● ●	יעיל מרבית בריכוזים של עד 30,000 מ"ג/ק"ג	● ● ● ● ●	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 VOC (הלוגנים) VOC (לא הלוגנים) SVOC (הלוגנים) SVOC (לא הלוגנים)	התאמת לקבוצות המזהמים

ייצוב/מיצוק		שטיפת קרקע		טיפול תרמי		טיפול ביולוגי		קריטריונים	
הערות	סיווג	הערות	סיווג	הערות	סיווג	הערות	סיווג		
	●		●	יעיל בטיפול בכספית ועופרת בלבד אשר להן טמפ' נידוף נמוכה יחסית.	○	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	
	●	היעילות בהפרדת הפרקציה החרסיתית המזוהמת עולה עם העלייה באחוז החול.	●	היעילות האנרגטית גדלה ככל שאחוז החול גבוה יותר	●		●	חול	התאמה לתכונות הקרקע
אחוזים גבוהים של חרסית עלולים להגביל את יעילות הערבוב	●	יעילות התהליך יורדת עם העליה בריכוז החרסית. מתאים לקרקעות עם עד 30%-40% חרסית.	○	ההשקעה באנרגיה ובעיות תפעוליות עולים עם עליה באחוז החרסית והטין. מתאים לקרקעות עם עד 30%-40% חרסית.	○	בקרקות עם אחוזים גבוהים של חרסית יש להשתמש בחומרים ניפחיים על מנת ליצור מרקם מאורר יותר.	●	חרסית וטין	

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

ייצוב/מיצוק		שטיפת קרקע		טיפול תרמי		טיפול ביולוגי		קריטריונים
הערות	סיווג	הערות	סיווג	הערות	סיווג	הערות	סיווג	
ניפוי גס של פסולת ואבנים, התאמת הסביבה הכימית לריאקציות ייצוב/מיצוק, הקטנת נפח, הומוגניזציה.		ניפוי גס של פסולת ואבנים, גריסת אגרגטים.		ניפוי גס של פסולת ואבנים, הומוגניזציה, ייבוש, התאמת הסביבה הכימית לטיפול תרמי.		ניפוי גס של פסולת ואבנים, הומוגניזציה, ייבוש, ערבוב עם חומר נפחי, וויסות pH.		טיפול קדם בטיפול Ex-Situ (בהתאם למאפייני הקרקע והזיהום)
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.	●	טיפול מהיר. עד כ-400,000 טון לשנה, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 20 להשוואה.	●	עבור טיפול Ex-Situ - מהיר. 5,000-150,000 טון לשנה, כתלות בגודל המתקן, סוג הקרקע וריכוז הזיהום. ראה טבלה 10 להשוואה.	●	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.	●	קצב טיפול
לא רלוונטי. המזהמים אינם מורחקים		כ-70%-99% עבור מזהמים אורגניים ומתכות. ראה טבלה 20 להשוואה ופירוט	●	מעל ל-99%, עמידה בערכי סף מחמירים	●	90%-95%. מעבר לכך זמני הטיפול עלולים להיות ארוכים	●	הרחקת מזהמים

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

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

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

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 14th Edition*, November 2013

United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Clue-In" Website, (<https://clue-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 (CI: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=>

Inertec, *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.