



מדריך שימושי אפר פחם בסלילת כבישים

יוני 2003

הוכן עבור מנהלת אפר הפחם על ידי:

יונה - ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ

רח' שמשון 37, חיפה 34678

פקס: 04-8340459

טל.: 04-8246959

email: yona@yonaltd.com

website: www.yonaltd.com



מדריך שימושי אפר פחם בסלילת כבישים

תוכן עניינים

1	אפר פחם בסלילת כבישים בארץ – רקע כללי	1
2	מטרת פרק הסלילה	1
3	אפר פחם בכבישים ובתשתיות	2
3.1	ייצור אפר פחם	2
3.2	אספקת אפר פחם לסלילה	2
4	שימושים עיקריים של אפר פחם בסלילת כבישים	3
5	תכונות אפר פחם	4
5.1	כללי	4
5.2	תכונות כימיות	4
5.3	תכונות פיסיקליות	5
5.3.1	דירוג	5
5.3.2	משקל סגולי	5
5.4	תכונות הנדסיות	6
5.4.1	גבולות סומך	6
5.4.2	יחסי צפיפות-רטיבות	6
5.4.3	חוזק לגזירה	7
5.4.4	דחיסות וקונסולידציה	7
5.4.5	חדירות ומוליכות הידראולית	7
5.4.6	מנת תיסבולת קליפורניה - מת"ק	8
6	ייצוב וטיוב קרקעות חרסיתיות עם אפר פחם מרחף	8
6.1	כללי	8
6.2	אפר פחם לטיוב/ייצוב קרקע	8
6.3	מכניזם הטיוב/ייצוב של חרסיתות עם אפר פחם מרחף	8
6.4	תכונות הנדסיות של חרסית מיוצבת באפר פחם מרחף	9
6.4.1	כללי	9
6.4.2	פלסטיות	9
6.4.3	מנת תיסבולת קליפורניה – מת"ק	10
6.4.4	שיעור ולחץ תפיחה	12
7	סוגיות ביצוע של סלילה עם אפר פחם	13
7.1	כללי	13
7.2	ביצוע של סוללות עם אפר פחם מרחף או תחתי	13
7.2.1	מפרטים ונוהלים בשימוש בארץ	13
7.2.2	הובלת ואחסון ביניים של אפר פחם מרחף ותחתי	13
7.2.3	פיזור אפר פחם	13
7.2.4	הידוק שכבות אפר הפחם	14
7.2.5	חתך טיפוסי של סוללות אפר פחם	14
7.2.6	בקרת איכות של סוללות אפר פחם	15



7.3 ביצוע של עבודות ייצוב/טיוב חרסית עם אפר פחם מרחף 15.....

7.3.1 מפרטים ונוהלים בשימוש בארץ 15.....

7.3.2 אפר פחם מרחף לייצוב/טיוב חרסית 15.....

7.3.3 ציוד לייצוב חרסית עם אפר פחם מרחף 16.....

7.3.4 בקרת איכות של עבודות ייצוב/טיוב חרסית עם אפר פחם מרחף 16.....

7.4 איכות הסביבה בהקשר לסלילה עם אפר פחם 16.....

רשימת מראי מקום 17.....

1. אפר פחם בסלילת כבישים בארץ – רקע כללי

בשנת 1994 יזמה חברת כביש חוצה ישראל בע"מ, בשיתוף עם מנהלת אפר הפחם, עריכת חקירה רב-שלבית לבחינת פוטנציאל השימוש של אפר פחם בסלילת כבישים. חקירה זאת כוונה לשלושה היבטים עיקריים: א) סקר ספרות מקיף ללימוד יישומי הסלילה השונים בעולם, ב) סקר תכונות הנדסיות של אפר פחם כולל בדיקות מעבדה של אפר פחם מקומי, ו-ג) בחינת הכדאיות הכלכלית של היישומים השונים בתנאי הארץ. חקירה זאת סוכמה בשלושה דו"חות המסומנים 1 עד 3 ברשימת מראי המקום של פרק זה.

יישום ראשון בארץ של אפר פחם בסלילה נעשה בחודשים 12/1997 ו-1/1/1998 ע"י מע"צ בכביש הגישה לג'סר-אל-זרקא, בו הוכנסו קרוב ל-30,000 טון של אפר פחם מרחף ותחתי כחומר מילוי [4]. מאז, גופים נוספים השתמשו בלמעלה מ-700,000 טון של אפר פחם מרחף ותחתי כחומר מילוי "נטו" בסוללות כבישים, כאשר בין הפרויקטים הבולטים ניתן למנות את מחלף גנות, כביש 57, כביש 55, וצומת יד מרדכי ע"י מע"צ, ומחלף ניצני עוז ליד טול כרם ע"י חברת דרך ארץ-CJV. רוב הפרויקטים הללו מסוכמים ומתועדים בדו"חות ביצוע ובקרת איכות [5, 6]

בנוסף לשימוש המוצלח של אפר פחם כחומר מילוי "נטו" בסוללות, נעשה ניסיון שטח ע"י מע"צ של ייצוב שתית חרסיתית עם אפר פחם מרחף בקטע באורך של כ-300 מ' בכביש 55 "עוקף הוד השרון" בקיץ 1999 [7]. החרסית המקומית יוצבה באמצעות מתחחת עם 30% אפר פחם ממקור דרום אפריקאי שהכיל כ-10% תחמוצות של קלציום ומגנזיום (סיד). הניסוי נועד לבדוק את הירידה בפלסטיות, השיפור בעבדות, והגידול בחוזק של החרסית המיוצבת כתוצאה מהריאקציות בין החרסית וה-"סיד" שנתרם ע"י אפר הפחם המרחף. לאור המגמות החיוביות שנתקבלו בניסוי הנ"ל, הביעו גופים נוספים עניין להעמיק את הבחינה של יישום זה. חברת דרך ארץ יזמה וממנה חקירה מעבדתית ענפה של ייצוב חרסית עם אפר פחם מרחף [8], וחברת כביש חוצה ישראל בחנה לאחרונה את הרחבתו של יישום זה "לטיוב" עודפי חפירה של חרסית "שמנה" באמצעות אפר פחם מרחף והכשרתה כחומר מילוי לא תופח בסוללות כביש חוצה ישראל – כביש מס' 6.

יישומים נוספים של אפר פחם בסלילה נבחנים ברמות שונות ע"י גופים שונים בארץ. הפוטנציאל הטמון באפר פחם כחומר לסלילת כבישים, הן מההיבט ההנדסי והן מההיבט הכלכלי, יוצר עניין רב העולה בקנה אחד עם המגמות המתפתחות זה זמן רב בעולם הרחב של ניצול מרבי ומחזור של "פסולת" תעשייתית.

2. מטרת מדריך הסלילה

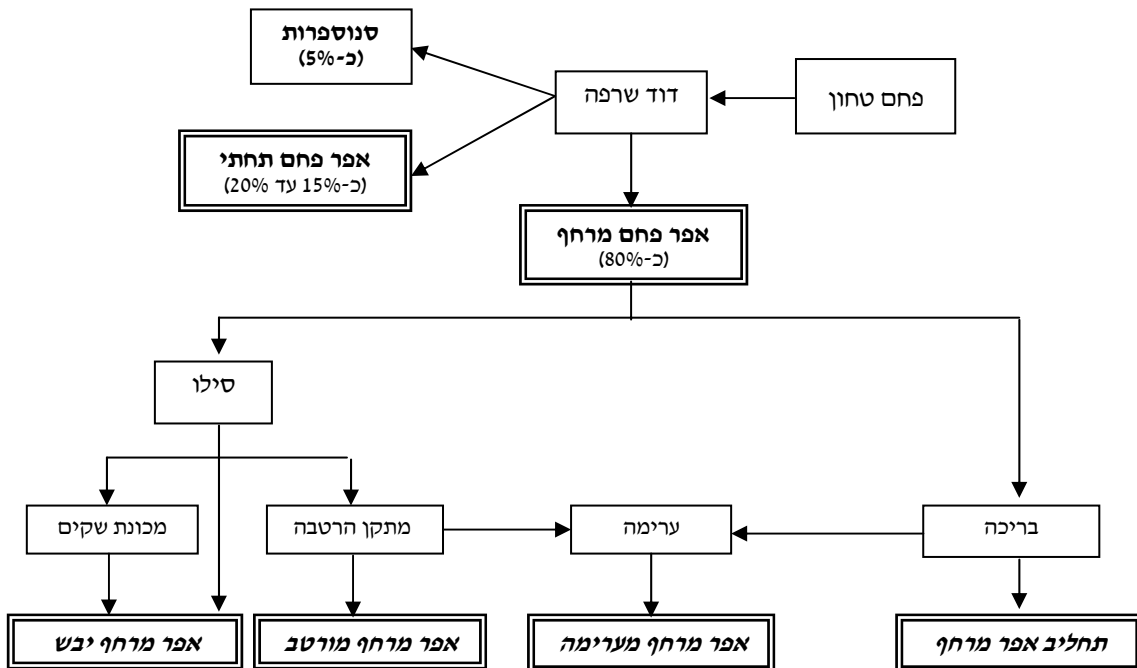
מדריך זה נועד לסייע למוסדות, יזמים ומהנדסים ללא ניסיון או עם ניסיון מועט בשימוש של אפר פחם בסלילת כבישים במתן מידע הנדסי ראשוני לגבי סוגי אפר הפחם והיישומים האפשריים. לאור הניסיון שנצבר כבר בארץ, מדגיש מדריך זה תכונות הנדסיות של סוגי אפר פחם מקומיים, ומתאר מאפייני ביצוע ובקרת איכות של פרויקטים שבוצעו בארץ.

3. אפר פחם בכבישים ובתשתיות

3.1. ייצור אפר פחם

תרשים מס' 1 מתאר באופן סכמתי את תהליך הייצור של אפר פחם בתחנת כוח. בתהליך השריפה של פחם טחון נוצרים שני סוגי אפר פחם עיקריים:

- **אפר פחם תחתי (Bottom Ash):** המהווה כ- 15% עד 20% מכלל האפר המופק ומצטבר בתחתית התנור. גודלו המרבי של הגרגר הוא כ- 10 מ"מ ואפשר להגדירו כחול גס בצבע אפור, ו- אפר.
- **אפר פחם מרחף (Fly Ash):** המהווה כ- 80% מכלל האפר. הוא עובר הרחפה, יוצא עם גזי השריפה, ונאסף על ידי מפרידים אלקטרוסטטיים. גודלו המרבי מגיע ל- 100 מיקרון, אך מרבית החלקיקים הם בגודל של מספר מיקרונים בודדים. האפר המרחף דומה לאבקה או קמח בצבע אפור.



תרשים מס' 1: סכימת ייצור אפר פחם בתחנת כוח

3.2. אספקת אפר פחם לסלילה

אפר פחם מרחף מסופק בשתי צורות עיקריות:

- **מורטב או Conditioned:** זהו אפר פחם "טרי" שעובר מהסילו דרך מתקן הרטבה ישירות למשאיות הובלה. אפר פחם זה שומר על מרבית תכונותיו הכימיות, ונתון זה יכול להיות חשוב בהתאם ליישום המיועד של אפר הפחם המרחף. בדרך כלל נהוג להרטיב את אפר הפחם לתכולת רטיבות של כ- 20%.

• **מערימה:** אפר פחם מרחף שלא נאסף ישירות מהסילו נערם בערימות בחצר תחנת הכוח. גם אפר פחם תחתי נערם בדרך כלל בערימות נפרדות. מטבע הדברים, ערימות וותיקות שנערמים בהם סוגי אפר פחם ממקורות שונים הן יותר הטרוגניות בתכונותיהן הפיסיקליות והכימיות. בתנאים מסוימים, אפשר לתאם מראש עם תחנת הכוח על עירום נפרד של סוג אפר פחם זה או אחר בתלות ביישום המתוכנן. גם אפר הפחם בערימות מוחזק רטוב כל הזמן למניעת התעופפותו ברוח.

חברת החשמל בארץ מייצרת אפר פחם מרחף ותחתי בתחנות הכוח "אורות רבין" בחדרה ו-"רוטנברג" באשקלון. בארץ לא נהוג לאחסן אפר פחם מרחף בבריכות או לשווק אותו במצב יבש בשקים. אי לכך, אספקת אפר הפחם לסלילה יכולה להיות מערימות בתחנת הכוח, לגבי שני סוגי אפר הפחם, או במצב מורטב ישירות מהסילו לגבי אפר פחם מרחף.

4. שימושים עיקריים של אפר פחם בסלילת כבישים

השימושים העיקריים של אפר פחם בסלילת כבישים הם רבים ומגוונים, כאשר הבולטים הם:

(א) תערובות אספלט:

- אפר פחם מרחף כמלאן או אפר פחם תחתי כמחליף פרקציה חולית בתערובות אספלט.
- יישומים אלה צורכים כמויות קטנות יחסית של אפר פחם.
- מאחר ואין בעיות בארץ עם המלאנים המינרלים המצויים, נראה שהאופציה של אפר פחם כמלאן לא מעשית לעת עתה.
- נעשו מספר בדיקות בארץ לבחינת שיפור ההתנגדות להחלקה של בטון אספלט עם מרכיב חולי של אפר פחם תחתי. בדיקות אלה טרם סוכמו באופן סופי.

(ב) ייצוב תשתית עם אפר פחם וסיד:

- יצירת תשתית מיוצבת עם אגרגטים "גבוליים" נחותים באמצעות אפר פחם וסיד בתכולה טיפוסית של 5% סיד ו-15% אפר פחם מרחף.
- יישום נפוץ במדינות מרכז-מערב ארה"ב.
- הבחינה הכלכלית בתנאי הארץ מראה שיישום זה לא תחרותי בגלל מחירו הגבוה של הסיד.

(ג) אפר פחם כחומר מילוי "נטו":

- אפר פחם מרחף ותחתי כחומר מילוי בסוללת הכביש.
- יישום פופולרי וכדאי מבחינה כלכלית בתלות במרחקי ההובלה.
- ניסיון הולך וגדל בארץ עם יישום זה משלהי 1997 ולמעלה מ-1,000,000 טון בפרויקטים שונים.

(ד) ייצוב/טיוב חרסית "שמנה" עם אפר פחם מרחף:

- ייצוב/טיוב חרסית עם 20% עד 40% אפר פחם מרחף עתיר תחמוצות של קלציום ומגנזיום ("סיד") להורדת הפלסטיות, שיפור העבידות, והגדלת החוזק של החרסית.



- מתאים לשיפור השתית החרסיתית המקומית או להכשרת חרסית "פסולה" כחומר מילוי משופר לא פלסטי.
- מחייב שימוש במתחחות מודרניות ומיומנות שטרם פותחו בארץ.
- יכול להניב מדדי עלות/תועלת אטרקטיביים לפרויקט בקנה מידה מתאים.
- ניסוי שטח בקנה מידה קטן שנעשה ע"י מע"צ ב-1999 הראה תוצאות מבטיחות.

5. תכונות אפר פחם

5.1. כללי

התכונות הכימיות והפיסיקליות של אפר הפחם תלויות בגורמים רבים כגון מקור הפחם, דרגת הכנת הפחם, ניקיונו ודקות טחינתו, תכנון, סוג והפעלה של דודי הבעירה, איסוף, שינוע ושיטות אחסנה. בגלל כל אלה, אפר הפחם מפגין דרגת הטרוגניות גבוהה בתכונותיו לאורך הזמן. על מנת להתמודד עם הטרוגניות זאת, יש להגדיר פרמטרים שמתארים את ההתנהגותו של אפר הפחם כך שניתן להעריך ולנתח את התאמתו של אפר הפחם ליישום ההנדסי המתוכנן.

5.2. תכונות כימיות

אפר הפחם המרחף הינו השארית הבלתי נשרפת של הפחם, ובשל כך היא מורכבת מחלקיקי קרקע או סלע שנסחפו לתוך החומר האורגני (הפחם) ומהווה חלק אינטגרלי ממנו. החלק הארי של אפר הפחם המרחף הינו זכוכיתי. מרכיבי הזכוכית הם סיליקה ואלומינה בתכולה של עד 80% מכלל האפר.

בפחם הנשרף בישראל יש בין 10 ל-15% אפר. טבלה מס' 1 מציגה את רכב מינרלוגי טיפוסי של סוגי אפר פחם הנוצרים בארץ בהתאם למקורות השונים של הפחם. הפחם הדרום אפריקאי מהווה בשנים האחרונות יותר מ-50% מהפחם הנצרך בארץ ליצירת חשמל. יש לקחת בחשבון שמקורות הפחם והתכונות הכימיות של המקורות השונים יכולים להשתנות מעת לעת.

כל סוגי אפר הפחם מכילים כמות מסוימת של פחם בלתי שרוף. כמות זאת נמדדת במעבדה בעזרת בדיקת "אובדן בהצתה" (Loss on Ignition - LOI). כמות גדולה מדי של פחם לא שרוף עלולה להפריע בחלק מיישומי האפר המרחף לסלילת כבישים, במיוחד לאלה המערבים ייצוב בצמנט, בסיד, או באפר פחם עצמו, בהם מתרחשת ריאקציה כימית.

תקן של ה-ASTM¹ מגדיר שני סוגים של אפר פחם מרחף על בסיס הרכבם הכימי: א) סוג "C" הנוצר משריפת פחם תת-ביטומני, דל בגופרית, המכיל למעלה מ-25% תחמוצות של קלציום ומגנזיום, ו-ב) סוג

¹ ASTM C618, "Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete".



"F" הנוצר משריפת פחם ביטומני המכיל עד כ-10% תחמוצות של קלציום ומגנזיום. לשם השוואה, צמנט פורטלנד מכיל למעלה מ-65% תחמוצות של קלציום ומגנזיום. בארץ נשרפים מקורות פחם המניבים אפר פחם מסוג F בלבד.

טבלה מס' 1: הרכב מינרלוגי טיפוסי של אפר פחם מרחף בארץ בהתאם למקורות הפחם

מרכיב	הרכב ב- % לפי מקור הפחם			
	קולומביה	ארה"ב	אוסטרליה	דרום אפריקה
SiO ₂	60-62	48-52	50-67	38-44
Al ₂ O ₃	19-20	24-27	21-31	32-36
Fe ₂ O ₃	8-9	12-16	5-7	4.5-5.5
CaO	2.5-3.5	2-3	0.6-1.9	10-13.8
MgO	1.5-2	0.5-1.5	<1	1.8-2.5
Na ₂ O	<1	<1	<1	<1
K ₂ O	1.5-2	1.5-2	0.3-1.1	<1
SO ₃	20-30	1-2	0.3-1	2-4
TiO ₂	1	1.6	1.1-1.5	1.5

מקור: מנהלת אפר הפחם

5.3. תכונות פיסיקליות

5.3.1. דירוג

אפר פחם מרחף מורכב ברובו מחלקיקים בתחום בין 200 ל-2 מיקרון. אפר פחם תחתי, לעומת זאת, מתאים בדירוגו לחול בינוני עד גס. טבלה מס' 2 מציגה תחומי דירוג של סוגי אפר פחם שנבדקו בארץ בשנים האחרונות.

טבלה מס' 2: תחומי דירוג טיפוסיים של אפר פחם מרחף ותחתי בארץ

נפה מס'	% עובר אפר פחם מרחף	% עובר אפר פחם תחתי
#4	100	75-100
#40	90-100	30-65
#200	90-100	10-30

5.3.2. משקל סגולי

המשקל הסגולי של אפר פחם נע בין 1.9 ל-2.5. הסנוספרות החלולות, המופיעות באפר פחם מרחף באחוזים קטנים מ-5%, הן בעלות משקל סגולי מתחת ל-1.

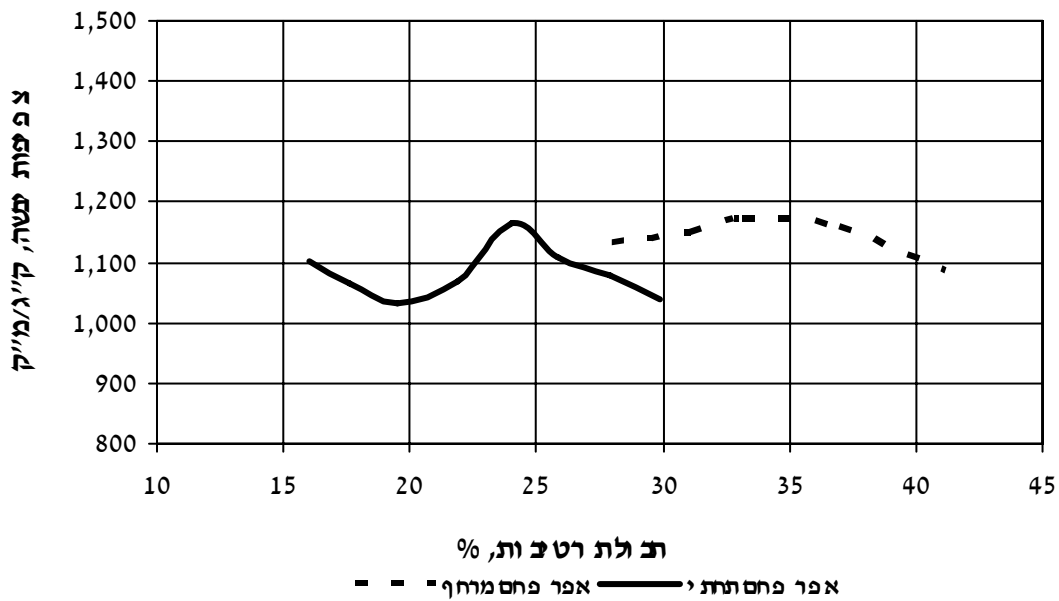
5.4. תכונות הנדסיות

5.4.1. גבולות סומך

רוב סוגי אפר הפחם המרחף מכילים כמויות גדולות של חלקיקים קטנים מ-2 מיקרון, המתאים לגודל "חרסית". על אף זאת, בגלל יכולת החלפת קטיונים נמוכה, רוב סוגי האפר אינם מתנהגים כחרסית והם "לא פלסטיים". בדיקת גבולות וקביעת אינדקס פלסטיות אינן רלבנטיות, ואין צורך לבצען עבור רוב סוגי אפר הפחם המרחף והתחתי.

5.4.2. יחסי צפיפות-רטיבות

תרשים מס' 2 מראה עקומות צפיפות-רטיבות מעבדתיות טיפוסיות של אפר פחם מרחף ותחתי באנרגיית מודיפייד פרוקטור.



תרשים מס' 2: יחסי צפיפות-רטיבות טיפוסיים

מתוך התרשים ומתוך נתונים רבים שנאספו ממדגמי אפר פחם מרחף ותחתי בארץ אפשר לציין את הנקודות הבאות:

(א) הצפיפות היבשה המכסימלית באנרגיית מודיפייד פרוקטור עבור שני סוגי אפר הפחם נעה בדרך כלל בין 1,000 ל-1,400 ק"ג/מ"ק. באפר פחם תחתי, הצפיפות היבשה יכולה להגיע לערכים של 1,500 ק"ג/מ"ק ואף יותר.

(ב) הצפיפות המעבדתית של שני סוגי אפר הפחם לא ממש רגישה לתכולת הרטיבות והעקומות די "שטוחות". ההבדל בין הצפיפות המכסימלית למינימלית בתחום תכולת רטיבויות רחב לא עובר בדרך כלל ערך של 150 ק"ג/מ"ק, כאשר ערך של עד 100 ק"ג/מ"ק הוא די שכיח.

ג) באפר פחם תחתי במיוחד, לא תמיד קל להגדיר מכסימום ("שיא" בעקומת צפיפות-רטיבות) לצפיפות היבשה. לעיתים יכול להופיע יותר ממכסימום אחד בתחום תכולת הרטיבות הנבדק. התנהגות זאת דומה להתנהגות של חול דיונות. משמעות הדבר היא שדרישה מפרטית לאחוז צפיפות מסוים בשדה יכולה להתקיים בתחום רחב של תכולות רטיבות.

ד) תכולת הרטיבות האופטימלית יכולה לנוע בין 22% ל-35% במקרה של אפר פחם מרחף ובין 20% ל-30% במקרה של אפר פחם תחתי. תחומים אלה יכולים להשתנות בהתאם לתכונות הפיסיקליות והכימיות של אפר הפחם.

5.4.3. חוזק לגזירה

פרמטרי החוזק לגזירה של אפר פחם מרחף עם הזמן תלויים במידה רבה בקיום או אי קיום תהליך של צמנטציה עצמית בתלות בהרכבו הכימי של אפר הפחם. אפר פחם מסוג F, כמו זה שיש בארץ, לא עובר צמנטציה עם הזמן פרט לאפר פחם ממקור דרום אפריקאי שיכול להפגין רמות שונות של צמנטציה עצמית בגלל התכולות הבוהות יותר של תחמוצות קלציום ומגנזיום. אפר פחם זה יכול לפתח קוהזיה עם הזמן.

אפר פחם מרחף ותחתי רגיל מפגין מידה מסוימת של קוהזיה מדומה שנעלמת במצב יבש או ברוויה מלאה. החוזק לגזירה של סוגי אפר פחם אלה תלוי בעיקר בזווית החיכוך הפנימית.

מספר מצומצם של בדיקות גזירה מרחבית בלתי מנוקזת שבוצעו בארץ על מדגמי אפר פחם ממקור קולומביאני ודרום אפריקאי הראו תוצאות כדלקמן:

- קוהזיה, c, של 10 עד 20 קפ"ס.
- זווית חיכוך פנימית, ϕ של 30° .

בספרות יש דיווחים על זווית חיכוך פנימית של עד 40° , אך יש לזכור כי הערכים הללו מושפעים גם מדרגת הצפיפות של אפר הפחם, וכאמור, מהזמן.

5.4.4. דחיסות וקונסולידציה

הדפורמציה של מילוי מאפר פחם מתרחשת באופן מיידי עם הפעלת העומס ובמהלך הדחיסה הראשונה. משמעות הדבר היא כי מרבית הדפורמציה בסוללת אפר הפחם מתהווה במהלך הביצוע.

אפר פחם מרחף משמש כאופציית מילוי מועדפת בסוללות גישה לגשרים במספר מקומות בבריטניה ובארה"ב בגלל משקלו הנמוך ובגלל תכונות הדחיסות הטובות. מחקר שנערך בבריטניה ע"י ה-TRRL הסיק כי אפר פחם מרחף עדיף על חומרים גרנולריים קונבנציונליים כחומר מילוי מאחורי קירות תומכים ונציבים, בגלל הלחצים האקטיביים המופחתים.

5.4.5. חדירות ומוליכות הידראולית

בדיקות חדירות מעבדתיות באפר פחם מרחף תחת עומד מים משתנה כפונקציה של דרגת הצפיפות מראות כי מקדם החדירות נע בין 1×10^{-7} מ"שנייה בדרגת צפיפות של 100% ל- 1×10^{-5} מ"שנייה בדרגת צפיפות של 90% סטנדרד פרוקטור. בדיקות חדירות הידראולית בשטח הראו תוצאות בתחום של 10^{-6} עד 10^{-8} מ"שנייה.

5.4.6. מנת תיסבולת קליפורניה - מת"ק

ערכי המת"ק המעבדתיים של אפר פחם מרחף ותחתי גבוהים בדרך כלל מ-15% ויכולים להגיע ל-30% ואף יותר. אפר פחם דרום אפריקאי, המציג צמנטציה עצמית ההולכת ומתעצמת עם הזמן, יכול להגיע לערכי מת"ק מעבדתיים של 40% ויותר עם חלוף הזמן והתגברות הריאקציה הפוצולנית העצמית.

שני סוגי אפר הפחם, ואפר הפחם המרחף במיוחד, מושפעים מתיחום הגליל המעבדתי (confinement) הגורם לערכי צפיפות וחוזק מעבדתיים שלא תמיד ניתן להשיג בתנאי השטח. התנהגות זאת של אפר הפחם אופיינית גם לחומרים נטולי קוהזיה אחרים כגון חול דיונות. בתנאי שטח אפשר לצפות ששני סוגי אפר הפחם ישיגו ערכי מת"ק שלא יפחתו מ-12%.

6. ייצוב וטיוב קרקעות חרסיתיות עם אפר פחם מרחף**6.1. כללי**

סוגים מסוימים של אפר פחם מרחף יכולים לשמש באופן כלכלי לייצוב (Stabilization) או טיוב (Improvement) של קרקעות חרסיתיות. התהליכים הללו גורמים להורדת הפלסטיות של החרסית וריסון רגישותה לתנודות בתכולת הרטיבות, לשיפור עבדותה, ולגידול בפרמטרי התיסבולת של הקרקע המיוצבת או המטויבת. השגת יעדי הייצוב או הטיוב תלויה בכמות אפר הפחם המעורב לתוך הקרקע, ו/או בתכולת התחמוצות של קלציום ומגנזיום באפר הפחם שהן הגורם האחראי לתהליכי הייצוב והטיוב. מכאן אפשר להבין שלא כל סוגי אפר הפחם המרחף מתאימים לייצוב/טיוב קרקע חרסיתית.

6.2. אפר פחם לטיוב/ייצוב קרקע

סוגי הפחם הנשרפים בתחנות הכוח בארץ אינם מניבים אפר פחם מרחף מסוג "C" אלא מסוג "F". יחד עם זאת, אפר הפחם ממקור דרום אפריקאי, המהווה כ-60% מאפר הפחם המיוצר בארץ, על אף היותו מסוג "F", מכיל בין 10% ל-12% תחמוצות של קלציום ומגנזיום. נתון זה מציב את אפר הפחם הזה ברשימת המייצבים הפוטנציאליים של חרסית "שמנה" מכיוון שתוספת של 30% אפר פחם דרום אפריקאי בקרקע חרסיתית אקווילנטית להוספה של כ-3.0% עד 3.5% סיד. אפר הפחם הדרום אפריקאי מתקרב לקטגוריה של "self-cementing ashes".

6.3. מכניזם הטיוב/ייצוב של חרסיתות עם אפר פחם מרחף

כאשר מערבבים קרקע חרסיתית עם אפר פחם מרחף עתיר תחמוצות של קלציום ומגנזיום מתרחשות הריאקציות הבאות:

- א. החלפת קטיונים.
- ב. פלוקולציה ואגלומרציה.
- ג. קרבונציה.
- ד. ריאקציה פוצולנית.

החלפת קטיונים ותהליכי הפלוקולציה והאגלומרציה מתרחשים באופן מיידי וגורמים לירידה בפלסטיות, לשיפור העבדות ולריסון פוטנציאל התפיחה וההתכווצות של החרסית.

הקרבוניצה היא תהליך בה הופך הקלציום החופשי במגע עם האוויר לקרבונט. תהליך זה איננו רצוי מבחינת הייצוב משום שחלק מהקלציום החופשי "מתבזבז" כאשר הוא מגיב עם דו-תחמוצת הפחמן שבאוויר במקום להגיב עם הקרקע.

הריאקציה הפוצולנית נמשכת זמן ממושך והיא תלויה בתנאי הטמפרטורה, הלחות והצפיפות. בתהליך זה מגיבים הסיליקטים והאלומינטים בקרקע החרסיתית עם הקלציום והמגנזיום שבאפר הפחם. כתוצאה מריאקציה זו מתקבלת צמנטציה של הקרקע וגידול בפרמטרי החוזק שלה.

הקו המפריד בין "טיוב" קרקע (Soil Improvement) ו-"ייצוב" קרקע (Soil Stabilization) הוא דק ושרירותי. ההבחנה מפרידה בין פעולה של שיפור בפלסטיות ובעבירות של החרסית בלבד (טיוב), לפעולה בה מושגת גם תוספת משמעותית בתיסבולת הקרקע (ייצוב).

6.4. תכונות הנדסיות של חרסית מיוצבת באפר פחם מרחף

6.4.1. כללי

כיום יש נתונים מקומיים על התכונות ההנדסיות של קרקע חרסיתית מיוצבת באפר פחם דרום אפריקאי. עבודות מוקדמות שנעשו עבור חברת כביש חוצה ישראל ומע"צ [3, 7] ועבודה מקיפה יותר שנעשתה עבור חברת דרך ארץ [8] מציגות תמונה רחבה של התכונות ההנדסיות של חרסית "שמנה" מיוצבת עם אחוזים משתנים של אפר פחם ממקור דרום אפריקאי.

6.4.2. פלסטיות

טבלה מס' 3 מציגה את השפעת אפר הפחם הדרום האפריקאי על גבולות הסומך של חרסית "שמנה" מאזור חולדה. אפר הפחם ניטל ישירות מהסילו בתחנת הכוח בחדרה (יבש) ובמצב זה האפר מציג תכונות ייצוב אופטימליות שקשה אולי להבטיח בפרויקט בקנה מידה גדול. אי לכך, נבדק גם אפר פחם שעבר מספר מחזורי הרטבה וייבוש (רטוב) על מנת לדמות מצב של אפר פחם שניטל מערמות.

טבלה מס' 3: השפעת אפר פחם מרחף על גבולות הסומך של חרסית

תכולת אפר פחם, %	גבול נזילות, %	גבול פלסטיות, %	מדד פלסטיות, %
0	63	25	38
10	53	26	27
30 (יבש)	42	29	13
30 (מורטב)	49	29	20
50	36	32	4

טבלה מס' 3 מראה כי כבר בתוספת של 10% אפר פחם חלה ירידה ניכרת בגבול הנזילות ובמדד הפלסטיות של החרסית. בתוספת של 30% אפר פחם יבש הירידה היא משמעותית. ההבדל בין התרומה של 30% אפר פחם יבש לעומת אפר הפחם הרטוב מצביע על אובדן יעילות הייצוב הכימי של אפר הפחם עקב קרבונציה של חלק מתחמוצות הקלציום. יחד עם זאת, ההשפעה של אפר הפחם הרטוב על הפלסטיות של החרסית עדיין ניכרת.

6.4.3. מנת תיסבולת קליפורניה – מת"ק

טבלה מס' 4 מציגה נתוני מת"ק מעבדתיים של חרסית פלסטית מאזור חולדה מיוצבת בתכולות משתנות של אפר פחם ממקור דרום אפריקאי "יבש" ו-"מורטב" לאחר זמני אשפרה בסביבה רטובה כמצוין בטבלה.

(א) מקרה מס' 1 מייצג את המת"ק של החרסית לאחר 96 השרייה במים בצפיפות המתאימה ל-92% ממודיפייד פרוקטור ותכולת רטיבות סביב גבול הפלסטיות. הערך של 8.3% מתקבל תחת עומס נגדי של 50 ליבראות.

(ב) מקרה מס' 2 מייצג את המת"ק של אפר הפחם היבש שנגזר מיידית לאחר הידוק ללא השרייה במים וללא אשפרה.

(ג) מקרה מס' 3 מייצג ערכי מת"ק של אפר פחם יבש לאחר השרייה של 96 שעות ו-2 זמני אשפרה. ניתן לראות שמייד לאחר ההשריה במים, ללא אשפרה לפני ההשריה, אפר הפחם מפגין מת"ק של 394%. עם אשפרה מוקדמת של 7 ימים ולאחר מכן השריה במים למשך 96 שעות, אפר הפחם היבש מפגין מת"ק של 501%. שיעורי המת"ק הגבוהים הללו מצביעים בברור על צמנטציה עצמית שמתרחשת באפר פחם זה. העובדה שאפר הפחם מתקשה גם מתחת למים מקנה לו תכונות של קשרן הידראולי.

(ד) מקרה מס' 4 מייצג מצב דומה למקרה מס' 3 עבור אפר פחם מורטב במקום יבש. ערכי מת"ק של 88% לעומת 400% עד 500% שנתקבלו במקרה של אפר פחם יבש מצביעים על אובדן כושר הצמנטציה של אפר הפחם המורטב, כנראה כתוצאה מקרבונציה של חלק מתחמוצות הקלציום במהלך מחזורי הרטבה וייבוש.

(ה) מקרים 5, 6 ו-8 מתארים ערכי מת"ק של חרסית מיוצבת עם 10%, 30% ו-50% אפר פחם יבש בזמני אשפרה משתנים. התמונה שמתקבלת היא מאוד ברורה: תוספת של אפר פחם מרחף והארכת זמני האשפרה תורמים להגדלת המת"ק. כך למשל, חרסית מיוצבת עם 30% אפר פחם יבש לאחר 7 ימי אשפרה מפגינה מת"ק מעבדתית של 56%, ולאחר 28 יום מת"ק של 72%. אותה חרסית עם 30% אפר פחם מורטב (מקרה מס' 7) מפגינה ערכי מת"ק של 31% ו-56% לאחר 0 ו-7 ימי אשפרה, בהתאמה. ניתן לראות שאפר הפחם המורטב יעיל במידה דומה לאפר הפחם היבש במבחן המת"ק. כנראה שחלק ממכניזם הייצוב של החרסית הוא ממקור מכני ולא כימי.

טבלה מס' 4: ערכי מת"ק מעבדתיים של חרסית פלסטית מיוצבת עם אפר פחם מרחף

מקרה מס' מקרה	הרכב התערובת	ימי אשפרה	מת"ק, %
1	רק קרקע	0	8.3
2	רק אפר פחם יבש ללא השרייה במים	0	28
3	רק אפר פחם יבש לאחר 96 שעות השרייה	0	394
		7	501
4	רק אפר פחם מורטב לאחר 96 שעות השרייה	0	88
		7	88
5	קרקע עם 10% אפר פחם יבש	0	19
		7	20
		28	34
6	קרקע עם 30% אפר פחם יבש	0	37
		7	56
		28	72
7	קרקע עם 30% אפר פחם מורטב	0	31
		7	56
8	קרקע עם 50% אפר פחם יבש	0	76
		7	177

6.4.4. שיעור ולחץ תפיחה

טבלה מס' 5 מראה את ההשתנות של שיעור ולחץ התפיחה בקונסולידומטר של חרסית פלסטית מאזור חולדה בתלות בתכולת אפר פחם דרום אפריקאי "יבש" לאחר 7 ימי אשפרה.

טבלה מס' 5: שיעור ולחץ תפיחה של חרסית בתלות בתכולת אפר פחם מרחף

לחץ תפיחה, קפ"ס	שיעור תפיחה, %	תכולת אפר פחם, %
600	16	0
160	2.8	10
40	0.9	30
10	0.1	50

שיעור התפיחה המתקבל עם 30% אפר פחם "מורטב" לאחר 7 ימי אשפרה מגיע ל-1.9% ולחץ התפיחה מתייצב על 70 קפ"ס (במקום 0.9% ו-40 קפ"ס עבור 30% אפר פחם "יבש", בהתאמה). מספר מחזורי הרטבה וייבוש בערימה יכולים אכן לגרום לירידה מסוימת ביעילות כושר הייצוב של אפר הפחם, אך היא עדיין נשארת גבוהה וניכרת, בהתייחס לשיעור תפיחה של 16% ולחץ תפיחה של 600 קפ"ס בחרסית הלא מיוצבת.

7. סוגיות ביצוע של סלילה עם אפר פחם**7.1. כללי**

הביצוע של עבודות סלילה עם אפר פחם מרחף או תחתי נעשה בשיטות ובכלים הרגילים המשמשים לסלילה עם חומרים קונבנציונליים. בשנים האחרונות, עם הגברת השימוש של אפר פחם בסלילה בארץ, נכתבו מספר מפרטים והנחיות ביצוע ובקרת איכות המשקפים את הניסיון המקומי שנצבר. הסעיפים הבאים מתארים בקווים כלליים סוגיות ביצוע ובקרת איכות של סלילה עם אפר פחם. הקורא יפנה למפרטים השונים למציאת פרוט יתר על הסוגיות השונות.

7.2. ביצוע של סוללות עם אפר פחם מרחף או תחתי**7.2.1. מפרטים ונוהלים בשימוש בארץ**

א) מע"צ פרסמה בדצמבר 2000 מפרט כללי להקמת סוללות עם אפר פחם המכיל גם הנחיות למתכנן ולמפקח [9].

ב) ביולי 2001 פורסמה גרסה מס' 2 של נוהלי ביצוע ובקרת איכות של עבודות סלילה עם אפר פחם מרחף בסוללות כבישים עבור חברת דרך ארץ [10].

ג) שני המסמכים הנ"ל מכסים את סוגיות הביצוע ובקרת איכות של סוללות (מילויים) עם שני סוגי אפר הפחם. המפרט של מע"צ מאמץ דרישות מינימום לדרגת הצפיפות המושגת באתר לכל סוג אפר פחם, בעוד שמפרט דרך ארץ מאמץ את הבקרה הסטטיסטית לדרגת צפיפות ולתכולת הרטיבות הנהוגה בפרק 51 "הבין-משרדי".

7.2.2. הובלת ואחסון ביניים של אפר פחם מרחף ותחתי

א) ההובלה של שני סוגי אפר הפחם חייבת להיעשות במשאיות מכוסות עם ברזנט למניעת התעופפות אבק. אפר הפחם חייב להיות רטוב (תכולת רטיבות של 15% עד 20%) בזמן ההעמסה.

ב) רצוי להימנע מאחסון ביניים של אפר פחם בערמות בגלל הקושי בשמירה על תכולת רטיבות גבוהה למניעת אבק, והמטרד שזה יכול לגרום לאוכלוסיה הקרובה. אם יש הכרח לערום אפר פחם בטח לפני פיזור, אזי יש לנקוט בכל האמצעים הדרושים למניעת אבק, ובמיוחד הרטבה מתמדת של הערימה.

7.2.3. פיזור אפר פחם

רצוי לפזר את אפר הפחם המרחף והתחתי לשכבה אחידה לפני הידוק בעובי של כ-30 ס"מ באמצעות מפלסת. בעבודות קטנות או במקרים מיוחדים, אפשר לפזר את אפר הפחם עם דחפור.

7.2.4. הידוק שכבות אפר הפחם

- (א) מכבשים מסוגים שונים יכולים להדק בצורה טובה את שני סוגי אפר הפחם. בארץ נוסו בהצלחה מכבשי פלדה סטטיים וויברציוניים ומכבש פניאומאטי.
- (ב) שני סוגי אפר הפחם מתהדקים מהר לאחר מספר מועט של מעברי המכבש. חשוב להקפיד על תכולת רטיבות אופטימלית בזמן ההידוק (בצד הרטוב) ולשמור על השכבה המהודקת במצב מורטב במשך כל הזמן עד לכיסוייה בשכבה חדשה.
- (ג) רצוי לערוך חלקת ניסוי לקביעת קשר אמפירי בין דרגת צפיפות מושגת למספר מעברי מכבש. קשר כזה יכול לשמש כלי עזר בבקרת ההידוק באתר. בחלקת ניסוי כזאת יש לעקוב אחר תכולת הרטיבות של השכבה המהודקת ולוודא שהיא נשארת קבועה.

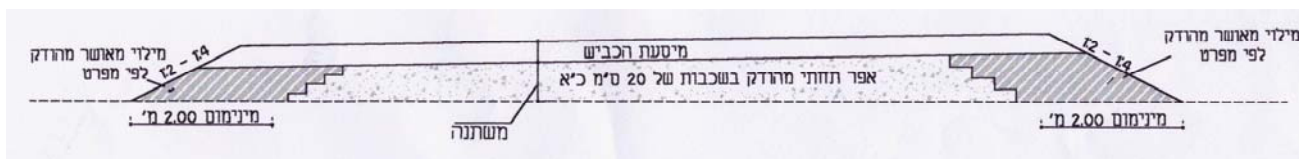
7.2.5. חתך טיפוסי של סוללות אפר פחם

- (א) תרשים מס' 3 מתאר חתך טיפוסי של סוללת אפר פחם מרחף. בגלל הכורח להגן על המדרון של אפר הפחם המרחף מפני ארוסיה של מים ורוח, ועל מנת להבטיח ביצוע איכותי ומבוקר של הכיסוי, נהוג בארץ לבנות מעטפת ברוחב 2 מ' כמתואר בתרשים. במקומות אחרים בעולם מסתפקים בכיסוי של אדמה גננית בעובי 40 עד 50 ס"מ.



תרשים מס' 3: חתך טיפוסי של סוללה עם אפר פחם מרחף

- (ב) מילוי אפר הפחם המרחף מגיע עד 1.0 מ' מתחת לשכבות המבנה המתוכננות, וזאת משיקולי תיסבולת ואחידות המילוי.
- (ג) תרשים מס' 4 מתאר חתך טיפוסי של סוללה עם אפר פחם תחתי. גם במקרה זה מאומצת מעטפת הכיסוי ברוחב 2 מ', אך אפשר להמשיך עם המילוי של אפר פחם תחתי עד לשכבות המבנה המתוכננות.



תרשים מס' 4: חתך טיפוסי של סוללה עם אפר פחם תחתי

7.2.6. בקרת איכות של סוללות אפר פחם

- (א) בקרת איכות הביצוע של סוללות אפר פחם מרחף ותחתי מתרכזות, בעיקר, על פרמטרי הצפיפות ותכולת הרטיבות של השכבה המהודקת.
- (ב) בדרך כלל, מספיק לאפיין את פרמטרי הצפיפות-רטיבות של אפר הפחם על בסיס מנות עיבוד של 2,000 עד 3,000 מ"ר (בעובי שכבה מהודק של כ-20 ס"מ). בעבודות שנעשו בארץ נמצא שאפשר לקבוע ביעילות את ה-"100%" המעבדתי של מדגמי אפר פחם מרחף באמצעות 4 גלילים בקוטר "4 ו-25 הקשות לשכבה באנרגיית מודיפייד פרוקטור לפי תקן ASTM D1557. מעבדת שדה מצוידת בפטיש ידני, מספר גלילים כנ"ל, מאזניים, ומיקרוגל לקביעת תכולת הרטיבות, יכולה לבצע מערכת כנ"ל של "100%" במספר דקות.
- (ג) השימוש בגליל מיוחד להוצאת מדגמי אפר פחם מרחף מהשכבה המהודקת הוכח כיעיל. מד גרעיני עשוי לתת תוצאות צפיפות-רטיבות בלתי אמינות או בלתי אחידות לגבי השכבה המהודקת. שיטת "חרוט החול" נמצאה מתאימה לבדיקת הצפיפות של שכבות אפר פחם תחתי.
- (ד) רצוי לבצע על גבי מילויי אפר פחם גבוהים, ותוך כדי ביצועם, מדי מספר שכבות, בדיקות החדרה עם דקר דרום אפריקאי על מנת לקבוע את פרופיל התיסבולת של המילוי עם העומק. פרופיל כזה יכול לסייע באיתור אזורים בעלי תיסבולת לא-אחידה או תת-תיסבולת המחייבים אולי פעולה מתקנת.

7.3. ביצוע של עבודות ייצוב/טיוב חרסית עם אפר פחם מרחף**7.3.1. מפרטים ונוהלים בשימוש בארץ**

- (א) בהנחיה מקצועית של האגף לחומרים ומחקר של מע"צ נכתב מפרט לייצוב קרקע חרסיתית עם אפר פחם מרחף. טיוטא מס' 2 של המפרט נכתבה בחודש אוקטובר 2001 [11].
- (ב) בדצמבר 2002 הוכן, בהזמנת חברת כביש חוצה ישראל, מפרט כללי לטיוב קרקע חרסיתית עם אפר פחם מרחף או סיד לשימושה כחומר מילוי [12].
- (ג) שני המסמכים הנ"ל מכסים את סוגיות הביצוע ובקרת האיכות של עבודות הייצוב/הטיוב של חרסיתות "פלסטיות", וכוללים הנחיות למתכנן וסוגיות הקשורות עם בקרת איכות הביצוע.

7.3.2. אפר פחם מרחף לייצוב/טיוב חרסית

- (א) רק אפר פחם מרחף ממקור דרום אפריקאי, המכיל כ-10% תחמוצות של קלציום ומגנזיום, מתאים לייצוב/טיוב חרסית "פלסטית". חברת החשמל אמורה לספק נתונים על הרכבו הכימי של אפר הפחם, ובתאום מראש, להבטיח אספקה מסודרת רק של אפר פחם זה. מנהלת אפר הפחם יכולה לסייע בתאומים הנדרשים בנושא.

ב) רצוי מאוד, אם הדבר אפשרי, למשוך אפר פחם דרום אפריקאי ישר מהסילו לקבלת תוצאות ייצוב אופטימאליות.

7.3.3. ציוד לייצוב חרסית עם אפר פחם מרחף

א) התוצאות המיחלות של ייצוב/טיוב החרסית עם אפר פחם מרחף מושגות רק אם אפשר להבטיח ערבוב מושלם של חלקיקי החרסית המפוררים עם אפר הפחם המרחף. דבר זה מחייב חרישה ודיסקוס של הקרקע לעידוד ייבושה, ושימוש במתחחת ייעודית לפרור רגבי הקרקע וערבוב הקרקע הדקה והמפוררת עם אפר הפחם והמים לכל עומק השכבה המיוצבת.

ב) מכבש "רגלי כבש" הוא המתאים ביותר להידוק הקרקע המיוצבת. מכבש פלדה סטטי או וויברציוני יכול לשמש ל-"סגירת" פני השטח לאחר הידוקו עם רגלי הכבש.

ג) קיימת אפשרות לבצע את טיוב הקרקע החרסיתית עם אפר פחם מרחף במפעל ערבול כפות תאים קרים בשטח, אליו מביאים את החרסית היבשה והמפוררת, את אפר הפחם המרחף ואת המים. לאחר ערבוב המרכיבים במפעל, התערובת מובלת למקום פיזור מוכנה להידוק.

7.3.4. בקרת איכות של עבודות ייצוב/טיוב חרסית עם אפר פחם מרחף

א) בקרת איכות הביצוע של עבודות ייצוב/טיוב חרסית עם אפר פחם מרחף מתייחסת לטיב האפר (תכולת תחמוצות של קלציום ומגנזיום מינימלית), דרגת התייחוח של הקרקע לפני התייחוח, עומק התייחוח, תכולת אפר הפחם המרחף שנקבעה ע"י המתכנן, ואחידות הערבוב של אפר הפחם, החרסית והמים.

ב) בנוסף לנ"ל, בקרת איכות העבודות מתייחסת לדרגת הצפיפות והרטיבות המושגות בשכבה המהודקת. שיטת הגליל המוחדר יעילה בקביעת דרגת צפיפות בשילוב מיקרוגל לקביעת תכולת רטיבות.

ג) יעילות הייצוב יכולה להיקבע באמצעות גבולות סומך של החרסית המיוצבת/מטויבת בתלול בימי אשפרה. ייצוב יעיל צריך לגרום לירידה בגבול הנזילות ובמדד הפלסטיות ביחס לחרסית הבלתי מיוצבת.

7.4. איכות הסביבה בהקשר לסלילה עם אפר פחם

סלילה עם אפר פחם מרחף או תחתי חייבת בדיקה ואישור של המשרד לאיכות הסביבה. באחריות משרד זה הוכנה מפת רגישויות סביבתיות לסלילה עם אפר פחם ממנה אפשר ללמוד על האזורים השונים בארץ בהם יכולה להיות מגבלה או איסור שימוש של אפר פחם. מנהלת אפר הפחם יכולה לסייע בבדיקת אתרי סלילה פוטנציאליים בהקשר הסביבתי.

רשימת מראי מקום

1. "בדיקת ניצול אפר פחם לסלילת כבישים, שלב א': סקר ספרותי", הוגש לחברה כביש חוצה ישראל בע"מ על ידי יונה- ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, ינואר 1995.
2. "בדיקת ניצול אפר פחם לסלילת כבישים, שלב ג': בחינת הכדאיות הכלכלית", הוגש לחברה כביש חוצה ישראל בע"מ על ידי יונה- ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, מאי 1995.
3. "בדיקת ניצול אפר פחם לסלילת כבישים, שלב ב': תכונות הנדסיות", הוגש לחברה כביש חוצה ישראל בע"מ ע"י יונה – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, פברואר 1996.
4. "מפרט כללי להקמת סוללות עם אפר פחם מרחף", הוגש לחברה כביש חוצה ישראל על ידי "יונה- יעוץ וניהול הנדסי בע"מ" בספטמבר 1995.
5. "ניסוי עם אפר פחם בכביש הגישה לג'יסר-אל-זרקא", הוגש לאגף לחומרים ומחקר של מע"צ ולמנהלת אפר הפחם ע"י יונה – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, ינואר 1998.
6. "ליווי עבודות סלילה עם אפר פחם במחלף גנות", הוגש למחוז תל-אביב והמרכז של מע"צ ע"י יונה – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, מרץ 2000.
7. "ייצוב שתית חרסיתית עם אפר פחם מרחף – דו"ח ביצוע ובקרת איכות", הוגש לאגף החומרים והמחקר של מע"צ ע"י יונה – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, אוקטובר 1999 (מופיע גם כמאמר בתנועה ותחבורה, גיליון 67, מרץ 2002).
8. "בחינה מעבדתית של חרסית מיוצבת עם אפר פחם מרחף", הוגש לחברת דרך ארץ CJV ע"י יונה – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, אוקטובר 2002.
9. "מפרט כללי להקמת סוללות כבישים עם אפר פחם מרחף או תחתי", מע"צ, האגף לחומרים ומחקר, דצמבר 2000.
10. "נוהלי ביצוע ובקרת איכות של עבודות סלילה עם אפר פחם מרחף בסוללות כבישים", גרסה מס' 2, נכתב ע"י יונה – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ עבור חברת דרך ארץ, 31/7/2001.
11. "מפרט כללי לייצוב קרקע חרסיתית עם אפר פחם מרחף", טיוטא מס' 2, הוגש למע"צ, האגף לחומרים ומחקר ע"י יונה – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, אוקטובר 2001.
12. "מפרט כללי לטיוב חרסית עם אפר פחם מרחף או סיד לשימושה כחומר מילוי", טיוטא מס' 1, הוגש לחברת כביש חוצה ישראל בע"מ ע"י יונה – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, 31/12/2002.