

מנהלת אפר הפחם



מחוז ת"א והמרכז



הערכה מבנית של סוללות אפר פחם בכביש 57

דו"ח סיכום ונתוני מעקב מיוני 2004

אפריל 2005

יונה - ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ

רח' שמשון 37, חיפה 34678
טל. 04-8246959, פקס 04-8340459
email: yona@yonaltd.com
website: www.yonaltd.com

הוכן על ידי:





תאריך: 5/5/2005

מספרנו: 05/315

לכבוד
מר עמרי לולב, מנהל
מנהלת אפר הפחם
רח' לינקולן 20
תל אביב 67134

עמרי שלום,

הנדון: הערכה מבנית של כביש 57; דו"ח סיכום ומעקב

הננו מתכבדים להגיש בזאת דו"ח סיכום ומעקב של פרויקט ההערכה המבנית של קטעים נבחרים בכביש 57 בהם הוכנסו שכבות מילוי וחיזוק של אפר פחם מרחף ותחתי לצד חומרים קונבנציונאליים. הדו"ח מדווח על התוצאות שנאספו בשלבי ביצוע שונים של הכביש החל מאוקטובר 2000 וכלה בנובמבר 2001, עת נפתח הכביש לתנועה, ושל בדיקות מעקב שנערכו בחודש יוני 2004 לאחר כשנתיים וחצי של שירות.

אנחנו מודים לך ולמנהלת על העידוד והתמיכה הכספית המתמשכים בקידום פרויקטים חשובים כגון זה המדווח בדו"ח זה.

בכבוד רב,

יונה - ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ

ד"ר מריו הופמן

הערכה מבנית של סוללות אפר פחם בכביש 57

דו"ח סיכום ונתוני מעקב מיוני 2004

תוכן העניינים

1	מבוא ורקע	1
1	הקדמה	2
2	מטרות העבודה	3
3	תיאור העבודה	4
3	4.1 כללי	4.1
3	4.2 קטעי הסקר ושלבי הבדיקות	4.2
4	4.3 קרקע וחומרי סלילה	4.3
4	4.3.1 קרקע שתית	4.3.1
4	4.3.2 אפר פחם מרחף	4.3.2
4	4.3.3 אפר פחם תחתי	4.3.3
4	4.3.4 חומרי מילוי/חיזוק	4.3.4
4	4.3.5 חומרי סלילה אחרים	4.3.5
4	4.4 מדידת שקיעות ופרמטרים	4.4
4	4.4.1 ציוד	4.4.1
4	4.4.2 שקיעה מכסימלית	4.4.2
4	4.4.3 שטח אגן השקיעות	4.4.3
5	4.4.4 קשיחות דינמית	4.4.4
5	4.4.5 מקדם הצטופפות	4.4.5
5	5. תוצאות	5
5	5.1 פרמטרי אגן השקיעות	5.1
5	5.1.1 קשיחות דינמית	5.1.1
6	5.1.2 שטח אגן השקיעות AREA	5.1.2
8	5.1.3 אחידות הקטעים	5.1.3
8	5.2 מקדם הצטופפות (SF)	5.2
10	5.3 מודול אלסטיות	5.3
12	5.4 הערכה מבנית של הקטעים ברמת האספלט	5.4
13	6. מעקב מבני	6
13	6.1 סקר נזקים חזותי	6.1

13	.....	6.2	קידוחי ניסיון
14	.....	6.3	הערכה מבנית
14	.....	6.3.1	פרמטרי שקיעה
15	.....	6.3.2	פרמטרי הערכה
16	.....	.7	סיכום ומסקנות
16	.....	.8	הכרת תודה
16	.....	.9	רשימת מראי מקום



הערכה מבנית של סוללות אפר פחם בכביש 57

דו"ח סיכום ונתוני מעקב מיוני 2004

1. מבוא ורקע

(א) אפר פחם מרחף ותחתי, המתקבלים כתוצר לוואי משריפת פחם ליצירת חשמל, משמשים בארץ לסלילת כבישים מאז שנת 1997. עד סוף 2004 יושמו כ-1 מיליון טון של שני סוגי אפר הפחם בשכבות מילוי ושכבות חיזוק (capping layers) בכבישים רבים.

(ב) במסגרת עבודות ההרחבה של כביש 57 שכלל מילויים עם שני סוגי אפר הפחם, החליטו מע"צ ומנהלת אפר הפחם לבצע מעקב מבני בשלבי הביצוע השונים באמצעות מדידה ופענוח של אגני שקיעות עם מכשיר ה-Heavy Weight Deflectometer (HWD). מעקב מבני זה נעשה על קטעי כביש שכללו אפר פחם מרחף, אפר פחם תחתי, וחומרי סלילה "קונבנציונאליים".

(ג) המעקב הנ"ל נועד לספק מענה לסוגיות הבאות:

1. לאתר נקודות חולשה ולאמוד אחידותם של מבני המיסעה השונים,
2. לחשב פרמטרי עומס-דפורמציה כגון מודול אלסטיות, קשיחות, וכד',
3. להעריך את דרגות ההידוק של חומרי המילוי השונים,
4. להשוות בין מיסעה "קונבנציונאלית" למיסעות מושתתות על שני סוגי אפר הפחם עד שלב הפתיחה לתנועה, ו-
5. לבצע מדידת מעקב והשוואה מבנית של המיסעות השונות כשנתיים לאחר פתיחתן לתנועה.

(ד) הפרוגרמה מומנה במשותף ע"י מע"צ – מחוז ת"א והמרכז ומנהלת אפר הפחם. האגף לחומרים ומחקר ומדור תכן המבנה של מע"צ ליוו אותה מקצועית. חברת יונה – יעוץ וניהול הנדסי בע"מ הייתה אחראית על הביצוע, ניתוח הממצאים וכתבת דו"ח זה.

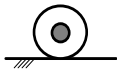
(ה) דו"ח זה מסכם את הממצאים העיקריים של הפרוגרמה ומציג מסקנות והמלצות לגבי התנהגותן של מיסעות הכוללות שכבות מבניות של אפר פחם מרחף ותחתי.

2. הקדמה

השימוש במדידת שקיעות להערכה מבנית, ניטור ובקרת איכות של שכבות שתית ושכבות גרנולריות הפך לפופולארי בעשור האחרון (1,2)¹. מגמה זאת הינה חדשה יחסית בהשוואה לשיטות "החישוב לאחור" המשמשות להערכה מבנית של מיסעות גמישות וקשיחות כבר למעלה מ-25 שנה (3).

ההערכה המבנית הבלתי הרסנית של שתית המיסעה, של שכבות חיזוק ושל שכבות מצע ותשתית, תוך כדי התקדמות הביצוע, היא מאוד מפתה מאחר והיא מספקת מידע יותר מהותי בהשוואה למדדים הפשוטים ולרוב אמפיריים המתקבלים במבחנים הנהוגים בבקרת איכות שגרתית (4). לפענוח השקיעות, מקובל להחליף את השתית והשכבות הגרנולריות במודל אלסטי ליניארי ואיזוטרופי המוכר כמודל בוסניסק (1),

¹המספרים בסוגריים מתייחסים למראי מקום הרשומים בסוף הדו"ח.



5). השקיעות המדודות משמות לחישוב מודול אלסטיות בפני השטח, קשיחות, או מודול k אקוויוולנטי (6). נעשו גם ניסיונות להעריך את דרגת הצפיפות (1,7) או הצפיפות עצמה (8). שיטות תכן גרמניות (10) וצרפתיות (9) ומספר נהלי בקרת/אבטחת איכות (QC/QA) קיימים דורשים קבלת ערכי תסבולת מינימאלית או מודול אלסטיות נתון במפלס השתית או שכבות החיזור לפני שמתירים פיזור של שכבות עליונות נוספות. למרות השימוש ההולך וגובר של השיטות הללו, נראה שיש להן בסיס תיאורטי חלש או חסר, וזאת בעיקר בגלל ההתנהגות המכאנית המאוד מורכבת של קרקעות וחומרים גרנולריים.

מקובל למדוד שקיעות עם ציוד סטטי (ניסיון פלטת ההעמסה) אך נהוג בעיקר למדוד עם מכשירים נגיפתיים (Impulse). הכי פופולריים הם ה-Falling Weight or Heavy Weight Deflectometer (FWD/HWD), מכשיר ה-TRL Foundation Tester (TFT), פלטת העמסה דינמית גרמנית, הדינפלאק הצרפתי, מכשירים ידניים כגון ה-4,6 mini-FWD, Prima 100. המכשירים הללו משתמשים בפלטות העמסה מעגליות ברדיוס בין 90 ל-450 מ"מ, ומספר ומיקום משתנים של גיאופונים למדידת השקיעות. למרבה הצער, סוגי ציוד שונים הפועלים בשיטות העמסה שונות נותנים תוצאות שלא תמיד ניתן להשוות (1,11). על אף זאת, אין ספק ששיטות ההערכה הבלתי הרסניות מאוד שימושיות לבדיקת חומרים חדשים לגביהם לא נצבר ניסיון לאורך זמן.

דו"ח זה מציג את הממצאים של סקר מיוחד שתוכנן לבחון את יחסי עומס-דפורמציה של מילויים ושכבות חיזוק עשויים מאפר פחם מרחף ותחתי, ולהשוות אותם עם חומרים קונבנציונאליים. הסקר בוצע במספר שלבים במהלך הביצוע והחיים של כביש מס' 57: א) ברמת השתית ושכבות החיזוק (Capping Layer), ב) ברמת המצעים, ג) ברמת האספלט בסמוך לפתיחת הכביש לתנועה, ו-ד) כשנתיים וחצי לאחר פתיחתו של הכביש לתנועה. הממצאים של שלושת השלבים הראשונים פורסמו בדו"ח מקיף² וגם במאמר שהוצג באנגליה³.

3. מטרת העבודה

המטרה העיקרית של העבודה הייתה להעמיק את הידע לגבי התנהגותם המבנית של אפר פחם מרחף ותחתי בסוללות כבישים ובשכבות חיזוק, והשוואתם לחומרי סלילה קונבנציונאליים. ההתנהגות המבנית נבחנה בעזרת המדידה והפענוח של אגני שקיעות עם מכשיר ה-HWD.

המטרות הספציפיות של העבודה היו:

- א) להעריך את ההומוגניות של קטעי סלילה עם סוגי אפר הפחם ואיתורם של אזורי חולשה או אי-אחידות.
- ב) לחשב מודולים אלסטיים ופרמטרי תסבולת של החומרים השונים בשלבי ביצוע שונים תוך כדי התקדמות הסלילה.
- ג) לנתח את הידוקם והצטופפותם של החומרים הקונבנציונאליים והלא קונבנציונאליים בעזרת מדידות עוקבות של עד 8 הפלות של משקולת ה-HWD.
- ד) להשוות את ההתנהגות המבנית הכוללת ולהעריך את רמת השירות העתידית של הקטעים הקונבנציונאליים והלא קונבנציונאליים לאחר השלמתם ברמת השכבה האספלטית.

² "הערכה מבנית של סוללות אפר פחם בכביש 57", דו"ח מסכם, הוגש למע"צ, מחוז ת"א והמרכז ולמנהלת אפר הפחם ע"י יונה – יעוץ וניהול הנדסי בע"מ במרץ 2002.

³ Hoffman, M. S., "Load-deformation behavior of fly-ash and bottom-ash capping and fill layers based on FWD deflection measurements", Pavements Unbound – Dawson (ed.), 2004 Taylor & Francis Group, London.



ה) לבצע מעקב מבני וחזותי ולהעריך את הצפי התכנוני של כל הקטעים של הפרוגרמה כשנתיים לאחר פתיחת הכביש לתנועה.

4. תיאור העבודה

4.1 כללי

הסקר בוצע במהלך עבודות השיקום וההרחבה של כביש 57 בקטעים נבחרים בין יד חנה לכפר יונה. הוא הקיף 3 שלבי ביצוע במהלך הסלילה ושלב אחד של מעקב לאחר פתיחתו של הכביש לתנועה כמפורט:

א) שלב 1, באוקטובר 2000, במפלס המילוי של אפר פחם מרחף ותחתי ומעל לשתי מהודקת,

ב) שלב 2, בנובמבר 2000, לאחר ששכבות אפר הפחם כוסו עם שכבת מצע או שכבת חיזוק ומעל לשכבת מצע בקטע "קונבנציונאלי",

ג) שלב 3, בנובמבר 2001 מעל לשכבת האספלט בסמוך לפתיחת הכביש לתנועה, ו-

ד) שלב 4, ביוני 2004, לאחר כשנתיים וחצי של שרות.

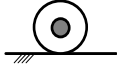
אורך קטעי הבדיקה נע בין 120 ל-240 מ'. מדידת השקיעות עם HWD נעשו במרווחים של 20 מ' על גבי מספר פסי מדידה לרוחב הכביש. ההומוגניות של כל קטע נאמדה ע"י השוואת פרמטרי אגן השקיעות לאורך ולרוחב כל קטע. הסקר בחן גם תופעות של אי-ליניאריות ע"י הפעלת 2 רמות עומס בחלק מהקטעים והשלבים.

4.2 קטעי הסקר ושלבי הבדיקות

טבלה מס' 1 מתארת את החתכים הטיפוסיים ואת שלבי הבדיקה. בטבלה, BA מסמל "Bottom Ash" או אפר פחם תחתי, ו-FA מסמל "Fly Ash" או אפר פחם מרחף.

טבלה מס' 1: שלבי הסקר וחתכים טיפוסיים

עובי השכבה, ס"מ					סימון הקטע	שלב מס' / תאריך
אספלט	תשתית	מצע	מילוי / חיזוק	אפר פחם		
שתית חרסיתית מהודקת					A-1	1
-	-	-	-	120 BA	B-1	אוקטובר 2000
-	-	-	כיסוי דק	160 FA	C-1	
-	-	18	45	-	A-2	2
-	-	18	-	150 BA	B-2	נובמבר 2000
-	-	-	40	160 FA	C-2	
20	17	38	45	-	A-3	3
15	17	18	-	150 BA	B-3	נובמבר 2001
15	17	18	100	160 FA	C-3	
אותם החתכים של שלב 3					A-4	4
					B-4	יוני
					C-4	2004



4.3. קרקע וחומרי סלילה

4.3.1. קרקע שתית

קרקע השתית נעה לחלופין בין שתית רזה (A-6) לחרסית שמנה (A-7-6) עם גבול נזילות בין 40% ל-55%, אינדקס פלסטיות בין 15% ל-30% ובין 45% ל-95% עובר נפה 200#. ערכי מת"ק מעבדתיים נעו בין 6% ל-8%.

4.3.2. אפר פחם מרחף

אפר הפחם המרחף הובל ישר מהערימה בתחנות הכוח וכלל את הסוגים רגילים המתקבלים בארץ משריפת פחם ליצירת חשמל. החומר הדק דמוי פודרה בצבע אפור היה לא-פלסטי, עם 85% ל-95% עובר נפה 200#. הצפיפות המעבדתית המכסימלית (באנרגיית מודיפייד פרוקטור) נעה בין 1,050 ל-1,200 ק"ג/מ"ק עם רטיבות אופטימאלית של 28% ל-38%. ערכי מת"ק מעבדתיים נעו בין 12% ל-20%. האובדן בהצתה (כמות הפחם הלא-שרוף) הוגבל לערך מרבי של 8%. כל פעם שהובחנו שינויים בתכונות אפר הפחם המרחף בוצעה מערכת צפיפות-רטיבות חדשה לצרכי בקרת איכות בשדה.

4.3.3. אפר פחם תחתי

אפר הפחם התחתי הובל אף הוא ישר מהערימה בתחנות הכוח. החומר דמוי חול גס בצבע אפור היה לא-פלסטי, עם 15% ל-35% עובר נפה 200#. הצפיפות המעבדתית המכסימלית (באנרגיית מודיפייד פרוקטור) נעה בין 1,250 ל-1,350 ק"ג/מ"ק עם רטיבות אופטימאלית של 20% ל-35%. ערכי מת"ק מעבדתיים נעו בין 20% ל-35%. האובדן בהצתה (כמות הפחם הלא-שרוף) הוגבל כמו במקרה של אפר פחם מרחף.

4.3.4. חומרי מילוי/חיזוק

חומרי המילוי הוגבלו ל-100% עובר נפה 3", בין 25% ל-80% עובר נפה מס' 4, בין 0% ל-25% עובר נפה 200#, גבול נזילות קטן מ-35%, אינדקס פלסטיות קטן מ-10%, ומת"ק מעבדתית גדולה מ-20% בתחום רטיבות של 3%.

4.3.5. חומרי סלילה אחרים

שכבות מצע, תשתית (אגו"ם) ושכבות האספלט עמדו בדרישות המפרטיות של "הספר הירוק" של מע"צ.

4.4. מדידת שקיעות ופרמטרים

4.4.1. ציוד

אגני השקיעות נמדדו עם מכשיר HWD דגם 8081. בשלבים 1 ו-2 נמדדו השקיעות עם פלטת העמסה בקוטר 45 ס"מ. בשלבים 3 ו-4 קוטר הפלטה היה 30 ס"מ. אגני השקיעות נמדדו בעזרת 7 גיאופונים שמוקמו במרכז פלטת ההעמסה ובמרחקים של 30, 60, 90, 120, 150 ו-180 ס"מ ממרכז הפלטה.

4.4.2. שקיעה מכסימלית

השקיעה המכסימלית, D_0 , נמדדה עם הגאופון הממוקם במרכז פלטת ההעמסה. הערכים המדווחים מתאימים להפלה השלישית של משקולת ההעמסה, אלא אם כן מצוין אחרת.

4.4.3. שטח אגן השקיעות

שטח אגן השקיעות חושב בעזרת הביטוי הבא (12):



$$AREA = 6(1 + 2D_1 / D_0 + 2D_2 / D_0 + D_3 / D_0) \dots [1]$$

כאשר, AREA הוא שטח אגן השקיעות מבוסס באינצ'ים, D_0, D_1, D_2 ו- D_3 הם השקיעות במרחקים של 30, 60 ו-90 ס"מ, בהתאמה. לפי ההגדרה, שטח אגן השקיעות יכול לקבל ערך גבולי עליון של 36 במקרה שכל הגיאופונים מראים את אותה השקיעה. ערכי שטח גבוהים מתאימים למיסעות "קשיחות" יותר ביחס לשתי (יחס מודולים $E_p/E_{subgrade}$ גבוה).

4.4.4 קשיחות דינמית

הקשיחות הדינמית [Impact Stiffness Modulus (ISM)] מוגדרת כיחס בין העומס המופעל בזמן המדידה לשקיעה המכסימלית המתקבלת והיא מבוססת ביחידות של טון/ס"מ. ה-ISM אקוויולנט למקדם קפיץ ומאפשר השוואה ישירה של השפעת רמת העומס על השקיעה המכסימלית.

4.4.5 מקדם הצטופפות

מקדם הצטופפות (Seating Factor – SF) חושב עבור מספר נקודות נבחרות של קטעי שלב 2 בהתאם לגישה מוצעת ע"י (7) van Gurp et al. המטרה הייתה לבחון את האפשרות לקשור בין פרמטרי השקיעה ודרגת הצפיפות של התווך. לשם כך, נמדדו שקיעות עם ה-HWD במהלך 8 הפלות רצופות של משקולת המדידה באותה נקודה בשתי רמות עומסים. מקדם ההצטופפות חושב עפ"י הביטוי הבא:

$$SF = 1 - \frac{d_7 + d_8}{d_1 + d_2} \dots [2]$$

כאשר:

$SF =$ מקדם ההצטופפות, ו- d_i הוא השקיעה המכסימלית הנמדדת במכה ה- i .

הנחת היסוד היא ששתי או שכבה מהודקים היטב צריכים להפגין ערכי SF קרובים ל-0, מאחר וכל ערכי השקיעות אינם משתנים מהפלה להפלה והגורם הימני במשוואה [2] שואף ל-1. מצד שני, ככל שערכו של SF גדל ומתקרב ל-1 סימן שהשתיית "חלשה" והיא מתהדקת לאחר כל הפלה של משקולת המדידה.

5. תוצאות

5.1 פרמטרי אגן השקיעות

5.1.1 קשיחות דינמית

טבלה מס' 2 מציגה את הממוצע, סטיית התקן ומקדם השונות של ערכי ISM שנמדדו בקטעי הפרוגרמה בשלושת שלביה הראשונים.



טבלה מס' 2: קשיחות דינמית – ISM, בטונות/ס"מ

קטע C-1		קטע B-1		קטע A-1		ערך
עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3	עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3	עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3	
52.8	52.8	31.7	28.2	28.9	30.7	ממוצע ISM
8.1	9.4	2.1	2.2	4.4	6.3	סטיית תקן
15.3	17.8	6.6	7.8	15.2	20.5	CV (%)
קטע C-2		קטע B-2		קטע A-2		ערך
עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3	עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3	עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3	
64.4	61.4	46.6	44.0	74.9	74.3	ממוצע ISM
8.1	5.6	4.5	3.8	15.2	8.9	סטיית תקן
12.6	9.1	9.6	8.6	20.3	12.0	CV (%)
קטע C-3		קטע B-3		קטע A-3		ערך
עומס 7.5 טון		עומס 7.5 טון		עומס 7.5 טון		
414.4		158.7		254.7		ממוצע ISM
24.0		11.9		17.3		סטיית תקן
5.6		7.5		6.8		CV (%)

הערה: בשלבים 1 ו-2 פלטת העמסה בקוטר 45 ס"מ, בשלב 3, של 30 ס"מ.

מתוך נתוני הטבלה ניתן לציין מס' נקודות:

א) השתית המהודקת מפגינה "החלשה" מסוימת (softening) כאשר הקשיחות יורדת עם עליית העומס, בעוד ש קטע אפר הפחם התחתי (B-1) מפגין "הקשחה" בשיעור מזערי. שני הקטעים הללו מפגינים ערכי ISM דומים בסדר גודל של 30 טון/ס"מ, וערך זה נמוך ב-75% בקרוב מערך ה-ISM המתקבל בקטע המילוי עם אפר פחם מרחף.

ב) כצפוי, קטעי שלב 2 מפגינים ערכי ISM גבוהים מקטעי שלב 1. מאחר ושכבות החיזוק לא אחידות ביחס לשלב 1, אזי לא ניתן להשוות את הערכים באופן ישיר. קטע אפר הפחם התחתי, למשל, שחוזק עם רק 18 ס"מ של מצע, מפגין גידול של כ-50% בערך ה-ISM. לעומתו, קטע המילוי עם אפר פחם מרחף, אשר חוזק עם שכבה דקה של חומר capping, מפגין עלייה של 20% בערך ה-ISM (קטע C-2).

ג) הקשיחות של קטעי שלב 3 נקבעו לאחר שהושלמה שכבת האספלט. שוב, השוואות ישירות לא ניתן לעשות, אולם כל ערכי ISM הם גבוהים ואופייניים למיסעות גמישות בארץ. בשלב זה כבר אפשר היה לראות את ערכי ה-ISM הגבוהים במיוחד (כ-400 טון/ס"מ) שמתקבלים בקטעי המילוי עם אפר פחם מרחף. נקודה זאת נבדקה במיוחד במעקב שבוצע ביוני 2004 שמדווח בהמשך.

5.1.2 שטח אגן השקיעות AREA

טבלה מס' 3 מציגה את הממוצע, סטיית התקן ומקדם השונות של ערכי שטח אגן השקיעות שנמדדו בקטעי הפרוגרמה



טבלה מס' 3: שטח אגן השקיעות, באינצ'ים

קטע C-1		קטע B-1		קטע A-1		ערך
עומס 2 עד 3 טון	עומס 4 עד 5 טון	עומס 2 עד 3 טון	עומס 4 עד 5 טון	עומס 2 עד 3 טון	עומס 4 עד 5 טון	
10.9	10.7	13.0	12.2	11.0	11.0	ממוצע AREA
0.7	1.0	0.6	0.5	0.7	0.9	סטיית תקן
6.4	9.3	4.6	4.0	6.4	8.2	CV (%)
קטע C-2		קטע B-2		קטע A-2		ערך
עומס 2 עד 3 טון	עומס 4 עד 5 טון	עומס 2 עד 3 טון	עומס 4 עד 5 טון	עומס 2 עד 3 טון	עומס 4 עד 5 טון	
12.2	11.9	15.1	15.0	13.9	13.1	ממוצע AREA
1.2	0.9	0.8	0.9	1.1	0.6	סטיית תקן
9.8	7.6	5.3	6.0	7.9	4.6	CV (%)
קטע C-3		קטע B-3		קטע A-3		ערך
עומס 7.5 טון		עומס 7.5 טון		עומס 7.5 טון		
17.3		22.4		22.8		ממוצע AREA
0.9		0.6		0.8		סטיית תקן
5.2		2.7		3.5		CV (%)

מנתוני טבלה מס' 3 ניתן לציין את הנקודות הבאות:

- א) ערכי ה-Area דומים בשלושת הקטעים של שלב 1 ומשתנים בין 11 ל-13 אינצ'ים. נראה שאין השפעה לרמת העומס על ערכי ה-Area.
- ב) ערכי AREA בשלב 2 גדולים ב-10% עד 20% ביחס לשלב 1. קטע אפר הפחם התחתי מפגין את הערך הגבוה מבין שלושתם.
- ג) ערכי ה-Area בשלב 3 הם גדולים משמעותית מהשלבים הקודמים. בהתבסס על מודל אלסטי דו-שכבתי המוכר כמודל בורמייסטר, "המועמס" בקונפיגורציית העומס של HWD עם פלטה בקוטר 30 ס"מ, אפשר להראות קשר מקורב בין ערך ה-Area לבין היחס המודולארי E_p/E_{sg} עבור מבנים בעלי עובי כולל בין 25 ל-75 ס"מ. הקשר הוא מן הצורה:

$$E_p / E_{sg} = 0.1256e^{0.2095AREA} \dots [3]$$

כאשר:

$$E_p = \text{מודול אקווילנטי של מבנה המיסעה.}$$

$$E_{sg} = \text{מודול אלסטיות של השתית.}$$

בעזרת משוואה [3] וערכי ה-Area שנתקבלו בשלב 3, אפשר לראות שהקטעים A-3 ו-B-3 מפגינים יחס מודולארי של כ-14, בעוד ש קטע C-3 מפגין יחס של 5 בקרוב. מצד שני, נראה שלקטע C-3 מודול שתית יותר גבוה כנגזר מערך ה-ISM הגבוה. כלומר, היחס המודולארי הנמוך בקטע זה הוא עקב מודול שתית גבוה ולא עקב מבנה מיסעה "מחלש".



5.1.3. אחידות הקטעים

אחת ההשערות של הפרוגרמה הייתה שבגלל ששני סוגי אפר הפחם נמשכו מערימות בתחנות הכוח ללא הפרדה או מיון מוקדמים, תתכן אי-אחידות בהתנהגות המבנית של סוללות המילוי. מקור נוסף של אי-אחידות יכול להתקבל כתוצאה מהשימוש בכלי סלילה רגילים בעוד שהיה צורך להשתמש בציוד שונה או מיוחד.

"אחידות" נאמדה בפרוגרמה בשתי דרכים: (א) ע"י בחינת מקדמי השונות של פרמטרי אגן השקיעות שנתקבלו בכל קטע בשלבי המדידה השונים. השערת היסוד הייתה שמקדם שונות גדול מ-25% מצביע על חוסר אחידות, ו-ב) ע"י עריכת מבחן ANOVA (ניתוח שונות) לבחינת ההשערה שפסי מדידה סמוכים מראים אותם פרמטרי שקיעה ברמת מובהקות של 95%.

הממצאים העיקריים של מבחני האחידות הם כדלקמן:

א) קטעי שלב 1: מקדמי השונות של ערכי ISM לא עלו מ-21% ואלה של פרמטר ה-AREA היו מתחת ל-10% עבור כל שלושת הקטעים. קטע B-1 הפגין את האחידות הגבוהה ביותר עם מקדמי השונות הנמוכים ביותר. מבחן ANOVA הראה שוני בין ממוצעי ISM בפסי מדידה סמוכים באזורים מסוימים של קטעים B-1 ו-C-1. נראה שניתן לייחס הבדלים אלו לעובדה שחלקים מהמילויים נשאו תנועת כלי רכב בזמן הביצוע וחלקים אחרים לא.

ב) קטעי שלב 2: שוב, מקדמי השונות של ערכי ISM היו מתחת ל-21% עבור כל הקטעים ומתחת ל-9% עבור ערכי ה-AREA. קטע B-2 הראה אחידות יתרה עם המקדמים הנמוכים ביותר. ANOVA הראה מגמות דומות כמו בשלב 1.

ג) קטעי שלב 3: מקדמי השונות של ערכי ISM ו-AREA היו מתחת ל-9% עבור כל הקטעים. ANOVA לא הבחין בשוני בין פרמטרי השקיעות של פסי מדידה סמוכים.

אפשר לסכם לגבי המבנים עם אפר הפחם, ששני סוגי האפר הניבו מיסעות (קטעים B ו-C) אחידות באותה מידה כמו המבנה המושתת על חומרים קונבנציונאליים. השימוש בציוד ושיטות סלילה רגילים במקרה של שני סוגי אפר הפחם נמצאו מתאימים.

5.2. מקדם הצטופפות (SF)

טבלה מס' 4 מציגה את תוצאות מבחן הצטופפות (Seating Factor – SF) שנעשו ב-4 נקודות בכל אחד מהקטעים של שלב 2 בשתי רמות עומס. מקדם ה-SF מחושב עפ"י המשוואה [2]. הטבלה מראה גם את סה"כ אחוז השינוי בין הפלה מס' 1 ומס' 8 של עומס הבדיקה, והשינוי היחסי בין הפלה 1 ו-3, ובין 3 ו-8.



טבלה מס' 4: מקדמי ההצטופפות (SF) בקטעי שלב 2

קטע C-2		קטע B-2		קטע A-2		ערך	SF
עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3	עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3	עומס 4 עד טון 5	עומס 2 עד טון 3		
0.19	0.32	0.13	0.11	0.27	0.27	ממוצע	
0.050	0.080	0.019	0.008	0.130	0.075	סטיית תקן	
28.9	24.9	14.9	7.3	48.7	27.3	CV (%)	
25.9%	39.7%	18.2%	15.1%	35.3%	34.5%	סה"כ שינוי ב- $D_0 \div 8$	
77%	75%	81%	75%	75%	68%	שינוי יחסי $1 \div 3$	
23%	25%	19%	25%	25%	32%	שינוי יחסי $3 \div 8$	

מתוך הערכים בטבלה מס' 4 ניתן להבליט את הנקודות הבאות:

א) קטע B-2 מפגין ערכי SF נמוכים משמעותית משני הקטעים האחרים וגם אחידות גבוהה יותר כפי שבאה לידי ביטוי במקדם השונות הנמוך. בהתבסס על הגדרת ה-SF, אפשר היה להניח שקטע B-2 מהודק טוב יותר משני הקטעים האחרים. הממצאים של הבקרה הקונבנציונאלית אינם מאששים את הסברה הזאת לאחר שלא נמצאו הבדלים מהותיים בדרגות הצפיפות בין הקטעים. בדיווחיו של (7) van Gurp et al על ערכי SF הוא ציין כי לא מצא שום קשר מובהק בין דרגת צפיפות לערכי SF.

ב) קטעים A-2 ו-C-2 מראים אי אחידות גבוהה של פרמטר SF עם מקדמי שונות גדולים מ-25%. זכור, פרמטרים אחרים של אגני השקיעות לא הפגינו רמות של אי-אחידות כה גבוהות.

ג) לא נבחנה השפעה כלשהי של רמת העומס על ערכי SF. ערכים דומים של SF מתקבלים בשתי רמות העומס בכל אחד מקטעי הפרויקט.

ד) השינוי ב- D_0 בין ההפלה מס' 1 והפלה מס' 8 מגיע ליותר מ-30% בקטעים A-2 ו-C-2. כ-75% משינוי זה מתרחש בין ההפלה הראשונה והשלישית, ורק כ-25% נוסף מתרחש בין ההפלה השלישית והשמינית. שינויים בשיעור כזה גבוה בולטים במיוחד מול השינויים המוכרים בעשרות מיסעות כבישים בארץ, אשר ברמת האספלט מראים שינוי בשקיעה המכסימלית בין ההפלה הראשונה והשלישית בשיעור שהוא בדרך כלל נמוך מ-10%, עם הרבה מקרים שהוא אפילו נמוך מ-5%.

ה) לא מוצג בטבלה מס' 4, נמצא שפרמטר ה-AREA גדל עם מס' ההפלות של העומס בשיעור של עד 15% בקטעים A-2 ו-C-2 ובפחות מ-10% בקטע B-2.

ו) גם לא מוצג בטבלה מס' 4, נמצא שהשקיעות במרחק 30 ס"מ מציר ההעמסה קטנות בין 2% עד 15% בין ההפלה מס' 1 ומס' 8, בעוד שהשקיעות במרחק 90 ס"מ גדלות בשיעור של עד 10% עם מס' הפלות העומס. לא מוצע להסיק מסקנות בקשר לממצא זה בגלל הקוטר של המדגם ובגלל שהשקיעות המדודות במרחק זה קטנות ובסדר גודל של רמת הדיוק של הגיאופונים.

נתוני מבחן ה-SF מבליטים את ההתנהגות המכאנית המורכבת של חומרים גרנולריים. כנראה, גורמים כגון הקוהזיה, זווית החיכוך הפנימי, תכולת הרטיבות, דרוג החומר, וכד' גם משפיעים על מקדם ה-SF. זאת אולי הסיבה למה לא ניתן למצוא פרמטר אחד שיאפשר לקשור באופן מובהק בין דרגת הצפיפות ופרמטרי השקיעה עם HWD. הזמן שעובר מסיום ההידוק והערכתו בבדיקות הצפיפות הקונבנציונאליות,



ובין הזמן שמבוצע מבחן השקיעות עם HWD, והאם הקטע פתוח או סגור לתנועה בין האירועים משפיעים ככל הנראה גם כן על ערכי ה-SF.

5.3. מודול אלסטיות

במסגרת הפרוגרמה חושב מודול אלסטיות או "מודול פני השטח" בקטעים שלב 1 ו-2. המודול "חושב לאחור" בהתבסס על תווך חצי אינסופי אלסטי והומוגני, המוכר כמודל בוסניסק. מודול האלסטיות של התווך ההומוגני חושב עבור שקיעות HWD שנמדדו במרחק 0, 30, 60 ו-90 ס"מ מציר העומס על מנת להבין יותר טוב את יחסי עומס-דפורמציה בנקודות מרוחקות מפלטת ההעמסה.

השקיעות התיאורטיות תחת פלטת העמסה מעגלית במרחקים רדיאליים שונים מ-0 חושבו באמצעות הטבלאות שפותחו ע"י Ahlvin and Ulery (13) עבור מקדם פואסון של 0.5. הביטוי הכללי לחישוב השקיעות במרחק "r" הוא:

$$D_r = \frac{1.5pa}{E_r} \left(\frac{H}{2} \right) \dots [4]$$

כאשר:

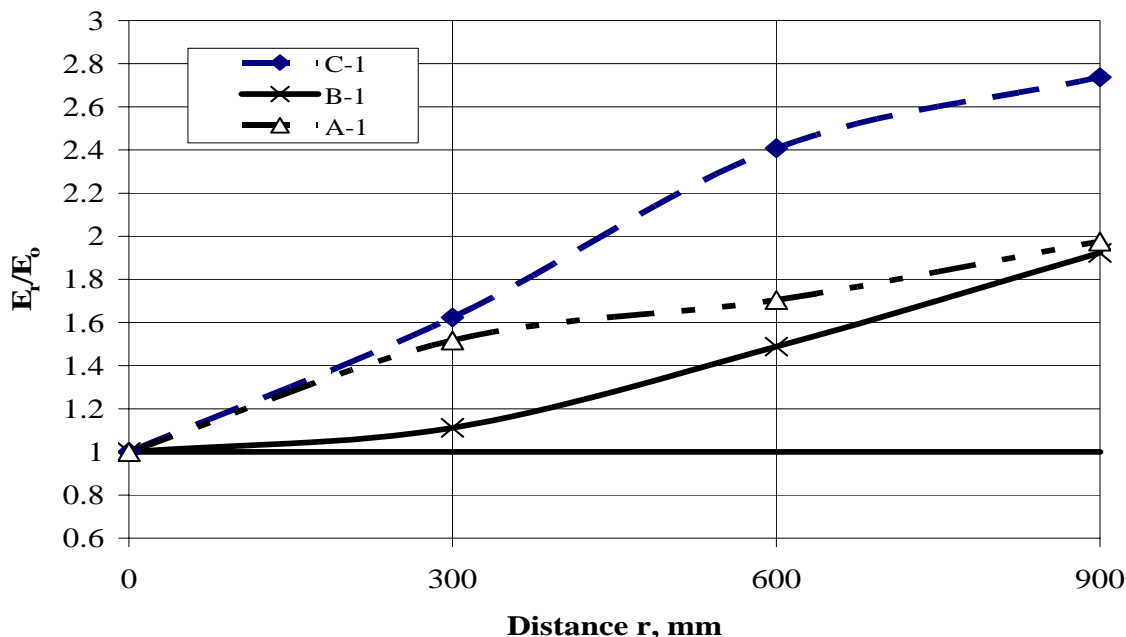
D_r = שקיעה במרחק "r",

p = לחץ על פלטת ההעמסה,

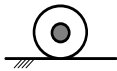
a = רדיוס פלטת ההעמסה, ו-

H = מקדם של Ahlvin and Ulery בתלות ב-r וב-a.

תרשים מס' 1 מראה את ההשתנות של היחס המחושב E_r/E_0 כפונקציה של המרחק "r" עבור פס מדידה טיפוסי של קטעי שלב 1.



תרשים מס' 1: השתנות טיפוסית של מודול האלסטיות המחושב בפני השטח מתוך שקיעות HWD בתלות במרחק מציר העומס; קטעי שלב 1 של הפרוגרמה.



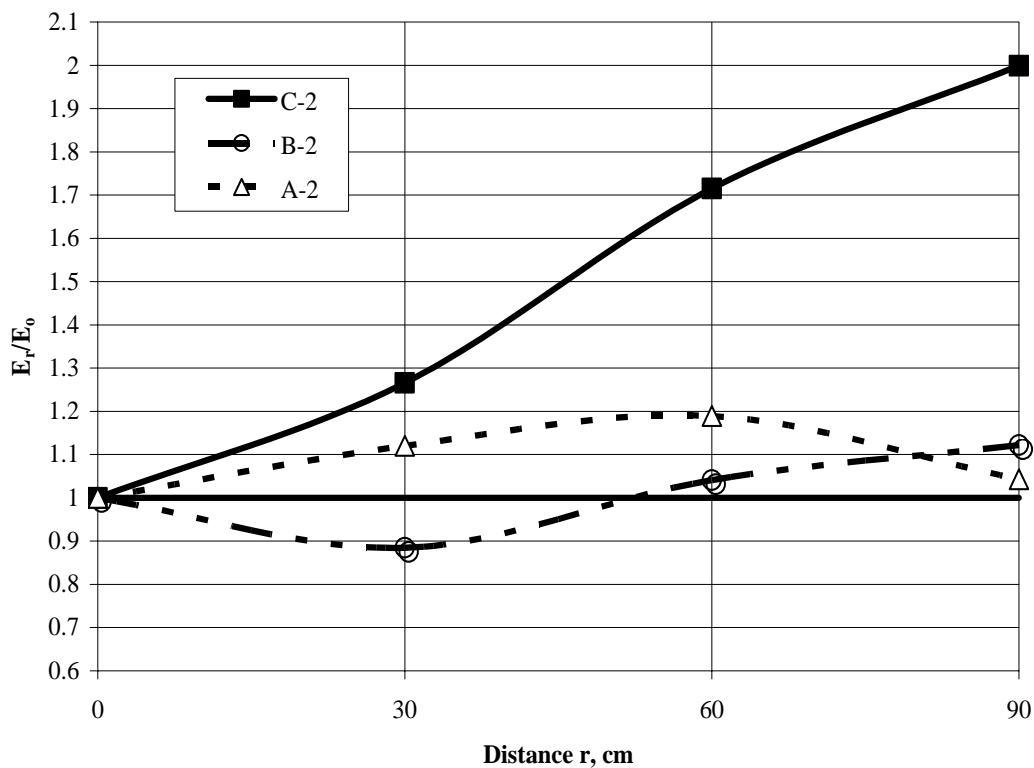
ערכי המודולים E_0 עבור $r=0$ היו: א) 58 מפ"ס בקטע A-1, ב) 61 מפ"ס עבור קטע B-1, ו-ג) 96 מפ"ס עבור קטע C-1.

תרשים מס' 1 מראה שמודול האלסטיות איננו קבוע כפי שאפשר היה לצפות מתוך אלסטי, חצי אינסופי והומוגני. הוא משתנה בפקטור של 2 עד 3 במרחק של 90 ס"מ ביחס לציר העומס.

למרות שהממצא הנ"ל בנוגע להתנהגות הלא ליניארית מוכר, הוא מחזק את הצורך במציאת מודלים יותר מתאימים לתיאור יחסי עומס-דפורמציה של קרקעות וחומרים גרנולריים. את העובדה שמודול האלסטיות האקווילנטי גדל עם גידול המרחק מהעומס אפשר להסביר על רקע תלות במאמצים, היעדר העברה של כוחות גזירה, היעדר רצף, וכד'. מכל מקום, ערכי המודולים המתקבלים בציר העומס בשלושת הקטעים, כולם מעל 50 מפ"ס, הם בגדר הערכים המצופים ברמת השתת.

שוב, והפעם בהתבסס על ערכי מודול האלסטיות E_0 ניתן לסכם שהקטעים המכילים אפר פחם מרחף ותחתי מתנהגים לא פחות טוב, ואולי אף יותר טוב, מהקטע הקונבנציונאלי.

תרשים מס' 2 מראה את ההשתנות של היחס E_r/E_0 בתלות במרחק r עבור פס מדידה טיפוסי של קטעי שלב 2. במקרה זה, ערכי המודולים שנתקבלו בציר העומס היו: א) 163 מפ"ס בקטע A-2, ב) 91 מפ"ס עבור קטע B-2, ו-ג) 137 מפ"ס עבור קטע C-2. אפשר לראות בתרשים שהמודולים גדלו ביחס לשלב 1 ביחס של 1.4 ל-1.8. אפשר גם לראות שההפרדה מהקו $E_r/E_0=1$ התמתנה בקטעים A-2 ו-B-2 לשיעור של $\pm 20\%$. רק קטע C-2 עדיין מתרחק מהנחות המודל האלסטי ההומוגני, עם ערכים שמגיעים לפי 2 מערכו של E_0 בציר ההעמסה. הקטעים עם אפר פחם מרחף ותחתי ממשיכים להראות התנהגות מבנית טובה וברת השוואה עם הקטע הקונבנציונאלי.



תרשים מס' 2: השתנות טיפוסית של מודול האלסטיות המחושב בפני השטח מתוך שקיעות HWD בתלות במרחק מציר העומס; קטעי שלב 2 של הפרוגרמה.



אפשר לסכם שתופעת ההצטופפות המתקבלת במדידת שקיעות עוקבות עם HWD, שתלויה ככל הנראה בצפיפות החומר, בקוהזיה, בזווית החיכוך הפנימי, בתכולת הרטיבות וכד', והתנהגותם של חומרי הסלילה לא ממש בהתאם להנחות הבסיסיות של מכאניקת הרצף והאלסטיות הליניארית, מעלים סימני שאלה ביחס למשמעותו של מודול האלסטיות של פני השטח. שוב, היעדרם של נהלי בדיקה וציוד מדידה אחידים, מוריד עוד יותר מיעילותה של הגישה הזאת.

הוצע שמודלים שיטפלו בכוחות המגע והתזוזות של החלקיקים (במקום במאמצים ועיבורים) בתוך דיסקרטי, לא רציף, יכול לשפר את אפיון התנהגותם של חומרים גרנולריים (14). מודלים כאלה, המכונים Distinct or Discrete Element Models (DEM), יכולים להתייחס לדירוגם של החלקיקים, לצורתם ולדרגת הצפיפות. המודלים דורשים כמויות גדולות של זיכרון מחשב ונמצאים עדיין בשלבי יישום ראשונים. יתכן ומודלים אלה יאפשרו הבנה יותר מעמיקה על יחסי עומס-דפורמציה של חומרים גרנולריים בכלל, ושל אפר פחם מרחף ותחתי, בפרט.

5.4. הערכה מבנית של הקטעים ברמת האספלט

הערכה המבנית של הקטעים בשלב 3 (רמת האספלט) כללה שני חלקים: (א) חישוב לאחור של מודולים אלסטיים של חומרי השכבות והשתית באמצעות התוכנה הידועה MODULUS (15), ו-(ב) הערכה של מספר המבנה האפקטיבי הקיים (SN) ומודול האלסטיות של השתית באמצעות שיטת YONAPAVE (16). טבלה מס' 5 מראה את התוצאות של הערכה הזאת.

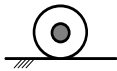
טבלה מס' 5: הערכה מבנית של הקטעים המוגמרים (שלב 3)

MODULUS					YONAPAVE		קטע
שתיית		שכבה גרנולרית		שכבות אספלט			
ממוצע E _{SG} , MPa	ממוצע E _{GR} , MPa	h _{GR} , cm	ממוצע E _{AC} , MPa	h _{AC} , cm	אחזון 30 th אפקטיבי SN	אחזון 30 th אפקטיבי E _{SG} , MPa	
165	430	55	4,400	20	6.2	177	A3
116	210	35	5,220	15	4.6	114	B3
601	750	35	5,700	15	4.1	641	C3

מטבלה מס' 5 אפשר לראות:

(א) שלושת הקטעים מפגינים ערכים שונים של מודול אלסטיות אפקטיבי של השתית בהתבסס על שתי שיטות החישוב. למרות שההשוואה בין שני המודלים חורגת מהיקפו של דו"ח זה, ראוי לציין כי המודל הפשוט של YONAPAVE והמודל הפרטני של MODULUS נותנים תוצאות דומות של מודול אלסטיות של השתית. בנייתו עם MODULUS, "השתית" נמצאת מתחת לעוביו הכולל של מבנה המיסעה, כלומר, 75 ס"מ בקטע A3, ו-50 ס"מ בקטעים B3 ו-C3. עובי המיסעה לא נדרש בחישובי YONAPAVE.

(ב) בשלב זה של ההערכה המבנית הועלתה השערה לפיה מודול האלסטיות המאוד גבוה של השתית בקטע A3 קשור לריאקציה פוצולנית שהתרחשה במילוי עם אפר פחם מרחף מתחת לשכבת ה-capping. נושא זה נבדק בבדיקות המעקב המדווחות בהמשך. אגב, החשש מפני צמנטציה עצמית של סוגי אפר פחם מרחף עתירי תחמוצות של קלציום, עם אפשרות של סדיקה, הוא זה שהוביל להחלטה לאמץ שכבה מפרידה עבה ("buffer") בעובי של 1 מ' בין אפר הפחם ותחתית המצעים.



- ג) כל המודולים המדווחים הם בתחום הנורמות המקובלות. מודול האספלט, למשל, משקף את הטמפרטורות בזמן המדידה שנעו בין 27 ל-38 מעלות צלסיוס, כאשר המודולים הגבוהים מתאימים בדרך כלל לטמפרטורות הנמוכות, וההיפך.
- ד) קטע A3, שהוא בעל המבנה העבה ביותר, מפגין את מספר המבנה – SN - הגבוה ביותר. קטעים B3 ו-C3 מפגינים מספרי מבנה נמוכים יותר בהתאם לעובי מיסעותיהם הדק יותר.
- ה) עבור ערכי ה-SN ומודול השתית שנתקבלו מההערכה המבנית, ובהתבסס על שיטת AASHTO לתכנן מבנה מיסעות גמישות (17), נמצא כי כל שלושת הקטעים צפויים לעמוד בהצלחה עם התנועה החזויה של 20 מיליון צירים אקוויוולנטיים של 8.2 טון במשך 20 שנות התכנון.

6. מעקב מבני

ביוני 2004, כשנתיים וחצי לאחר שהקטע נפתח לתנועה, בוצעה פרוגרמה של מעקב מבני בשלושת קטעי הפרויקט שכללה את האלמנטים הבאים:

- א) עריכת סקר נזקים חזותי לבחינת הסוג, הכמות והחומרה של הנזקים הנצפים במיסעות.
- ב) ביצוע של מספר קידוחים דרך מבנה המיסעה על מנת לבדוק מצב הצמנטציה העצמית של שכבות אפר הפחם המרחף בקטע המתאים.
- ג) מדידה ופענוח של אגני שקיעות עם HWD והשוואת נתוני ההערכה המבנית עם אלה של נובמבר 2001.

להלן מובאים הממצאים העיקריים של האלמנטים הנ"ל.

6.1 סקר נזקים חזותי

- א) לאחר שנתיים וחצי של שירות, ובתוך זה פתיחתו של כביש 6 (כביש חוצה ישראל) במחלף טול כרם, שהביאה תנועה רוחבית רבה לכביש 57, שלושת קטעי הפרוגרמה מפגינים רמת שירות דומה וגבוהה ללא כל נזקים מבניים או תפקודיים.
- ב) אין שום הבדל הנראה לעין בהתנהגותם של שלושת קטעי המבנה השונים. ניתן אפוא לסכם בשלב זה שהכנסתם של שכבות מילוי וחזוק של אפר פחם מרחף ותחתי בחלק ממיסעות הפרויקט תורמת להתנהגות שוות ערך לזאת של חומרי סלילה קונבנציונאליים.

6.2 קידוחי ניסיון



- א) הערכות לביצוע קידוחי ניסיון בשוליים של קטע B (אפר פחם תחתי). הקידוחים באזור אפר פחם תחתי בוצעו עם מקדח ספיראלה בקוטר 6" .



ב) תקריב של אפר פחם תחתני שנקדח בקטע B בו ניתן להבחין במרקם החולי-גס של אפר הפחם התחתני ועל תכולת רטיבות נאותה המקנה יציבות וקוהזיה מדומה לחומר.



ג) ארגו קידוח באפר פחם מרחף (קטע C). הקידוח בוצע במקדח core-driller. ניתן להבחין בגלילים שלמים של עד 10 ס"מ אורך בעלי דרגה מסוימת של צמנטציה. לא ניתן היה להכין מדגם לבדיקת חוזק בלא כלוא, אך לא ניתן היה לשבור את החלקים השלמים בלחץ האצבעות.

6.3. הערכה מבנית

6.3.1. פרמטרי שקיעה

טבלה מס' 6 מציגה את הערכים הממוצעים של הקשיחות הדינמית ISM ושטח אגן השקיעות שנמדדו במסגרת המעקב המבני ב-11/2001 וב-6/2004, לאחר כשנתיים וחצי של שירות.

טבלה מס' 6: פרמטרי השקיעה ב-11/2001 ו-6/2004

קטע C (אפר פחם מרחף)		קטע B (אפר פחם תחתני)		קטע A (קונבנציונאלי)		פרמטר	
6/2004	11/2001	6/2004	11/2001	6/2004	11/2001		
442	414	225	159	323	255	ממוצע	ISM טון/ס"מ
10.7	5.6	21.4	7.5	12.1	6.8	CV (%)	
16.9	17.3	22.7	22.4	21.7	22.8	ממוצע	AREA אינץ'
5.6	5.2	3.0	2.7	4.0	3.5	CV (%)	

מתוך הנתונים ההשוואתיים של טבלה מס' 6 ניתן להבליט את הנקודות הבאות:

- א) הקשיחות הדינמית הממוצעת עלתה בשיעור של פחות מ-10% בקטע C עד כ-40% בקטע B.
- ב) אי-האחידות (מקדם השונות) של הקשיחות הדינמית גם גדלה ב-2004 ביחס ל-2001. ערכי השונות מתקרבים לערכים המקובלים בכבישים קיימים בתנאי שירות.



- (ג) יחד עם זאת, ערכי הקשיחות הדינמית של שלושת הקטעים היו ונשארו גבוהים מאוד ומעל לערכים המקובלים במיסעות גמישות.
- (ד) ערכי שטח אגן השקיעות נשארו די אחידים במשך הזמן בכל שלושת הקטעים. גם האחידות, המבוטאת במקדמי שונות של עד 5%, נשארה גבוהה ואחידה.
- (ה) פרמטרי השקיעה מראים ששלושת הקטעים שמרו על חוסן מבני גבוה ואף גדלו עם הזמן. כשנתיים וחצי של תנועה לא ערערו את מבני המיסעות של שלושת הקטעים.

6.3.2. פרמטרי הערכה

טבלה מס' 7 מציגה את פרמטרי ההערכה לפי שיטת Yonapave בשני תאריכי המדידה.

טבלה מס' 7: פרמטרי הערכה (Yonapave) ב-11/2001 ו-6/2004

קטע C (אפר פחם מרחף)		קטע B (אפר פחם תחתי)		קטע A (קונבנציונאלי)		פרמטר	
6/2004	11/2001	6/2004	11/2001	6/2004	11/2001		
703	641	139	114	238	177	אחוזון 30	E_{SG}
12.1	9.0	30.6	10.5	22.9	14.3	CV (%)	Mpa
4.4	4.1	6.0	4.6	6.3	6.2	אחוזון 30	SN_{eff}
9.1	7.5	6.4	6.7	7.4	7.4	CV (%)	אינץ'

מתוך הנתונים של טבלה מס' 7 ניתן לציין את הנקודות הבאות:

- (א) מודול האלסטיות האפקטיבי של השתית גדל בשלושת הקטעים. המגמה דומה למגמה של ערכי הקשיחות הדינמית של טבלה מס' 6. הערכים שומרים על אותו סדר ביניהם עם קטע C (המושתת על מילוי אפר פחם מרחף) עם מודול אפקטיבי מאוד גבוה.
- (ב) גם במקרה של מודול האלסטיות האפקטיבי ניתן לראות גידול באי-אחידותם של שלושת הקטעים עם הזמן כפי שמתבטאת במקדמי השונות היותר גבוהים. כאן המקום לציין כי המדידות בשנת 2001 נעשו בשעות היום, כאשר הכביש היה עדיין סגור לתנועה, עם ה-HWD של מכון התקנים, בעוד שבשנת 2004 המדידות נעשו בלילה, עם הסדרי תנועה מתאימים, עם ציוד המדידה של חברת גיאוכום.
- (ג) מספר המבנה האפקטיבי המוערך ב-2004 דומה לזה של 2001, פרט לקטע B המושתת על אפר פחם תחתי שמראה גידול של כ-30%. אין הסבר לגידול זה פרט לתנאי המדידה השונים, הטמפרטורות שדווחו בזמן המדידה וכד'. יחד עם זה, אחידות ערכי מספר המבנה (באמצעות מקדם השונות) שמרה על ערך גבוה ודומה בכל שלושת הקטעים.
- (ד) פרמטרי ההערכה המבנית והמעקב של טבלה מס' 7 מראים שכל שלושת הקטעים שומרים על חוסן מבני גבוה לאחר שנתיים וחצי של שירות. מודול האלסטיות של השתית ומספר המבנה האפקטיביים המוערכים גם ב-2004 חוזים אורך חיים שיורי (מבחינת תסבולת מבנית) מעל ומעבר לצפי התכנוני.



7. סיכום ומסקנות

- (א) דו"ח זה הציג את הממצאים העיקריים של פרוגרמת הערכה מבנית באמצעות שקיעות HWD של פרויקט ההרחבה של כביש 57 בו הוכנסו שכבות מילוי וחיזוק של אפר פחם מרחף ותחתי לצד חומרי סלילה קונבנציונאליים.
- (ב) הפרוגרמה בחנה את ההתנהגות המבנית של קטעי הכביש במספר שלבים, תוך התקדמות הביצוע, מחודש אוקטובר 2000, ברמת השתית או המילוי, ועד נובמבר 2001 ברמת האספלט לפני פתיחתו של הכביש לתנועה. בחודש יוני 2004 בוצע שלב נוסף של מעקב מבני לאחר כשנתיים וחצי של שירות.
- (ג) פרוגרמת ההערכה המבנית והמעקב מראים ששכבות מילוי וחיזוק של אפר פחם מרחף ותחתי מספקות תרומה מבנית דומה לזאת המתקבלת מחומרי מילוי וחומרים גרנולריים קונבנציונאליים.
- (ד) בעזרת ציוד ושיטות סלילה רגילים, אפשר לבצע שכבות אפר פחם מרחף ותחתי ברמת אחידות דומה לזאת של החומרים הקונבנציונאליים.
- (ה) הדו"ח דן במגבלות המודלים התיאורטיים המקובלים, כגון המודל האלסטי הליניארי של בוסנסק, באפיון מודול אלסטיות או מדד תסבולת של קרקעות וחומרים גרנולריים. הדו"ח התייחס גם לבעייתיות של שימוש בשקיעות HWD לאפיון דרגת הצפיפות של התווד הנבדק.
- (ו) המעקב המבני וחזותי שבוצע לאחר כשנתיים וחצי של שירות מגלה שכל קטעי הכביש, הן אלה המושתתים על אפר פחם מרחף ותחתי, והן על חומרים קונבנציונאליים, מפגינים רמת שירות נאותה ללא כל סימנים של נזקים מבניים או תפקודיים. כל הקטעים נמצאו מתאימים לעמוד בציפיות התכנוניות ונפחי התנועה העתידיים החזויים.

8. הכרת תודה

העבודה המדווחת בדו"ח זה מומנה במשותף ע"י מנהלת אפר הפחם ומחוז תל אביב של מע"צ. עזרתם ותמיכתם לאורך של הפרויקט אפשרו לפרויקט להגיע לסיומו המלא, ועל כן נתונה תודתנו.

9. רשימת מראי מקום

1. Cost Action 336, "Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation", Annex H "FWD Foundation Test", 2000.
2. Stubstad, R. N., "LTTP Data Analysis: Feasibility of Using FWD Deflection Data to Characterize Pavement Construction Quality", NCHRP Web Document 52 (Project 20-50[9], October 2002.
3. STP 1375, "Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli: Third Volume", S. Tayabji and E. Lukanen Editors, ASTM, 2000.
4. Fleming, P. R., Frost, M. W., and Rogers, C. D. F., "A Comparison of Devices for Measuring Stiffness In-Situ", Unbound Aggregates in Road Construction, Edited by A. R. Dawson, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000, pp 193-200.
5. Groenendijk, J. van Haasteren, C. R. and van Nierek, A. A., "Comparison of Stiffness Moduli of Secondary Road Base Materials Under Laboratory and In-Situ Conditions",



- Unbound Aggregates in Road Construction, Edited by A. R. Dawson, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000, pp 201-208.
6. Kamiura, M., Sekine, E., Abe N. , and Maruyama, T., "Stiffness Evaluation of the Subgrade and Granular Aggregates Using the Portable FWD", Unbound Aggregates in Road Construction, Edited by A. R. Dawson, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000, pp 217-223.
 7. Van Gorp, C., Groenendijk, J., and Beuving, E., "Experience with Various Types of Foundation Tests", Unbound Aggregates in Road Construction, Edited by A. R. Dawson, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000, pp 239-246.
 8. Rogers, C. D. F., Fleming, P. R., and Frost, M. W., "Stiffness Behaviour of Trial Road Foundations", Unbound Aggregates in Road Construction, Edited by A. R. Dawson, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000, pp 231-238.
 9. French Design Manual for Pavement Structures, Translation of the December 1994 French Version of the Technical Guide "Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussee – Guide Technique", Published by LCPC and SETRA, May 1997.
 10. RStO 86, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, Ausgabe 1986, Ergänzte Fassung 1989.
 11. Hoffman, M. S., "Loading Mode Effects on Pavement Deflections", ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 109, 5, 1983, pp 651-668.
 12. Hoffman, M. S., and Thompson, M. R., "Comparative Study of Selected Nondestructive Testing Devices", Transportation Research Record 852, TRB, Washington, DC, 1982.
 13. Ahlvin, R. G., and Ulery, H. H., "Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains, and Deflections Beneath a Uniform Circular Load on a Homogeneous Half Space", Highway Research Board Bulletin 342, Publication 1025, Washington D. C., 1962, pp 1-13.
 14. Ullidtz, P., "Analytical Tools for Design of Flexible Pavements", Keynote address at the ISAP, Copenhagen, 2002.
 15. Michalak, C. H., and Scullion, T., "Modulus 5.0: User's Manual", Texas Transportation Institute, College Station, Texas, November 1995.
 16. Hoffman, M. S., "Direct Method for Evaluating the Structural Needs of Flexible Pavements Based on FWD Deflections", Accepted for Publication in the Transportation Research Record (TRR), Journal of the TRB, Washington DC, 2003.
 17. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993, Published by the American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, 1993.