



שימושי אפר פחם בסלילה ותשתיות

סקירת מחקרים ועבודות בהיגוי צוות מקצועי – הנדסי (סלילה)¹ מנהלת אפר הפחם

אוקטובר 2016

הוכן בסיוע
דר' מריו הופמן

¹ חברים בצוות לדורותיו ושותפים בדיוניו: דר' מריו הופמן, פרופ' אילן ישי, אינג' נעם לבנה, אינג' לאריסה ליאחובצקי, אינג' שמעון נסיכי.



**סקירת מחקרים ועבודות
אוקטובר 2016
שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

תוכן עניינים

עמ'

סלילת כבישים

אפר פחם כחומר מילוי מבני בסוללות כבישים

- 1 ❖ בחינת היתכנות הנדסית-כלכלית – דר' מריו הופמן
 - 2 ❖ ניסוי בכביש הגישה לג'יסר-א-זרקא – דר' מריו הופמן
 - 2 ❖ הערכה מבנית בכביש 57 – דר' מריו הופמן
 - 2 ❖ ייצוב/טיוב חרסית "שמנה" עם אפר מרחף
 - 2 ❖ ניסוי בכביש 55 – דר' מריו הופמן
 - 3 ❖ בחינה מעבדתית – דר' מריו הופמן
- אפר מרחף כקשרן כבישים הידראולי

- 3 ❖ היתכנות היישום – קרן בנימין, פרופ' אילן ישי, דר' מריו הופמן

תערובות אספלט

- 4 ❖ היתכנות יישום אפר פחם תחתית (אפ"ת) – גלי ישראל, פרופ' אילן ישי
- 5 ❖ מחקר המשך לבחינת יישום אפ"ת – פרופ' אילן ישי
- 6 ❖ היתכנות יישום אפר פחם מרחף (אפ"מ): בדיקות מעבדה – אינג' נתן לבנת
- 6 ❖ ניסוי בכביש 789 עם אפ"מ – אינג' יהודה זיס, אינג' נתן לבנת

ייצוב שבילי עפר

- 7 ❖ בחינת השימוש באפ"ת כאגרגאט בתערובת לייצוב: ניסויי שטח בפארק איילון – דר' רפאל ירון, אינג' מוחמד חביב-אללה ואדריכל ארז לוטן

מתקנים תת קרקעיים

- 8 ❖ אפ"ת למילוי בורות למתקני גז ודלק – אינג' ישע ברגר
- 8 ❖ אפ"ת לעטיפת צנרת לתשתיות שונות – פרופ' נפתלי גלילי

עבודות תשתית

- 9 ❖ מפרט לשימוש באפר בעבודות תשתית ובתשתיות תת-קרקעיות קשיחות – דר' אריה סידס, אינג' אירית סחר

איטום

- 10 ❖ בחינה מעבדתית לשימוש בחרסית מעורבת עם אפ"מ לאיטום מטמנת חירייה – אינג' שמואל גפן



**סקירת מחקרים ועבודות
אוקטובר 2016
שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

סלילת כבישים

אפר פחם כחומר מילוי מבני בסוללות כבישים

ראשיתו של לימוד יישום אפר פחם בסלילה בארץ הינו ב- 1994 בבחינת ההיתכנות ההנדסית- כלכלית של ניצול עודפי אפר לסלילת כבישים שבוצעה ע"י דר' מריו הופמן מחברת "יונה" – ייעוץ וניהול הנדסי בע"מ, מטעם חברת כביש חוצה ישראל בשיתוף עם מנהלת אפר הפחם. בחינת ההיתכנות כללה שלושה שלבים: סקר ספרותי, בחינת התכונות ההנדסיות ובחינת הכדאיות הכלכלית של השימוש באפר פחם.

במסגרת **סקר הספרות** שבוצע ב- 1995 ע"י חברת "יונה" נמצא כי בעולם קיימים מפרטים בהם דרישות לגבי חומרי פסולת לכבישים, ושל אפר פחם בפרט. כן נמצא בסקירה שבעולם כבר בוחנים ומיישמים זה זמן רב את השימוש באפר פחם כחומר מילוי מבני בסוללות בייצוב תשתיות ומצעים בכבישים, ואפר מרחף ותחתית כמלאן ואגרואט בתערובות אספלט, בהתאמה. המסקנות העיקריות מן הסקר הספרותי הן שקיים בארץ פוטנציאל לשימוש באפר כחומר מילוי מבני משום שביישום זה האפר מפיק את התרומה המבנית בעצמו ללא אינטראקציה עם חומרים אחרים כאגרואטים וביטומן באספלט. לעומת זאת הפוטנציאל לאפר בתערובות אספלטיות נמוך יותר בארץ משום שיש שפע של מלאנים רגילים ממקור גירי או דולומיטי.

בבחינת התכונות הנדסיות של אפר מרחף לסלילת כבישים, כחומר מילוי בלבד וכתוסף מייצב/מטייב של חרסית פלסטית "שמנה", נמצא כי האפר מתאים הן לבניית סוללות מבניות בכבישים והן כמטייב הגורם לירידה בפלסטיות של החרסית המתבטא בשיפור העבידות ובהורדת פוטנציאל התפיחה. בנוסף, ניתן לקבל הגדלת תסבולת בהשפעת ריאקציות פוצולניות ותהליכי חילוף קטיונים, פלוקולציה ואגלומרציה המתרחשים בערבוב קרקע חרסיתית עם אפר עתיר תחמוצות של קלציום ומגנזיום.

בבחינת הכדאיות הכלכלית נמצא כי השימוש הישיר באפר בסוללות מילוי וכמייצב של חרסית מקומית יכול להניב חיסכון מוחשי על פני חומרי מילוי רגילים, אם כי צריך לקחת בחשבון בעיקר את עלויות הובלת החומר שכן הובלת חרסית נעשית מקרבת המילוי ועל כן העלות במקרה זה היא אפסית. נמצא כי השימוש באפר להקמת סוללה עדיף על פני שימושים אחרים לסלילת כביש בגלל הניצול "נטו" של אפר פחם המחליף 1:1 חומרי מילוי אחרים.

לסיכום, **בחינת ההיתכנות** הראתה כי קיימת תועלת כלכלית ופוטנציאל הנדסי בשימוש באפר פחם להקמת סוללות מבניות בכבישים.



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
 שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

בחינת יישום האפר בשטח ע"י דר' מריו הופמן מחברת "יונה", נעשתה בהקמת סוללה **בקטע ניסוי בכביש הגישה לג'יסר-א-זרקא** ב-1997 שם נעשה שימוש ב-14 אלף טון אפר מרחף ואותה כמות של אפר תחתית בשכבות מהודקות עם עובי מצטבר של עד 2.5 מטר. קטע הניסוי איפשר לקבלן ולמע"צ להכיר את החומר ואת שיטות העבודה המתאימות. במיוחד בלט הצורך להכניס מפלסת לעבודה על מנת לעבד את השכבה לעובי ולרטיבות הנדרשים. כמו כן הובן שיש לשלוט ביתר הקפדה על תכולת הרטיבות בשכבה. המסקנות מעבודה זו היו שאפר תחתית מתנהג כחול גס והוא מאד עביד ונוח לפיזור והידוק; שהאפר המרחף הוא חומר דק מאד שמחייב הרטבה מתמדת על מנת למנוע התייבשות ופיזור ברוח; שבמצב מורטב הוא מתהדק ומתפזר בקלות בעזרת כלי הסלילה המקובלים, ובהרטבת יתר הוא מתרכך ועלול להציב קשיי עבירות לכלי הרכב.

פרויקט שטח מבוקר נוסף בוצע מטעם מע"צ ומא"פ בכביש 57 בין השנים **2000 – 2004** (וכלל הערכה מבנית של קטעים נבחרים בכביש שנשללו במסגרת הרחבתו, בהם הוכנסו שכבות מילוי וחזזוק של אפר מרחף ותחתית לצד חומרים קונבנציונליים. ההערכה המבנית בוצעה באמצעות מדידה ופענוח של אגני שקיעה עם מכשיר HWD ובוצעה השוואה מבנית-הנדסית בין המיסעות השונות ומעקב כשנתיים לאחר פתיחת הכביש. הממצאים הצביעו על רמת מיסעה המושתתת על אפר דומה לזו עם חומרי סלילה קונבנציונליים וכל קטעי הכביש בניסוי הפגינו רמת שירות נאותה ונמצאו מתאימים לעמוד בציפיות התכנוניות ונפחי התנועה העתידיים החזויים.

ייצוב/טיוב חרסית "שמנה" עם אפר מרחף

קטע ניסוי נוסף נבחר בכביש "עוקף הוד השרון" לבחינת יישום אפר מרחף עתיר תחמוצות קלציום ומגנזיום לייצוב קרקעות חרסיתיות ע"י הורדת הפלסטיות, שיפור העבידות והגדלת החוזק של החרסית. הניסוי בוצע ב-1999, בקטע באורך 300 מטר בכביש 55 (בכביש זה, שהיה הראשון בביצוע מסחרי, הונחו 10 אלף טון אפר מרחף ו-90 אלף טון אפר תחתית בסוללות הכביש). בקטע הניסוי נעשה שימוש ב-30% אפר דרא"פ עשיר (כ-10%) תחמוצות קלציום ומגנזיום בשתית מיוצבת שעובייה נע בין 25 ל-30 ס"מ. המטרות היו לימוד שיטות העבודה ובדיקות דרישות האיכות והבקרה; בדיקת התכונות ההנדסיות של מדגמי הקרקע החרסיתית המיוצבת באפר בתנאי שטח והשוואה למדגמי מעבדה; השוואת התסבולת של המיסעה המושתתת על השתית המיוצבת ביחס לשתית רגילה; מעקב אחר התנהגות הכביש בטווח הארוך. הניסוי נועד לבדוק את הירידה בפלסטיות, השיפור בעבידות, והגידול בחוזק של החרסית המיוצבת כתוצאה מהריאקציות בין החרסית וה"סיד" שנתרם ע"י תחמוצות הקלציום והמגנזיום שבאפר המרחף. הניסוי הניב מסקנות באשר לציוד ולמימונות הנדרשת לביצועו. בדיעבד דרישות האיכות של הפרויקט התמלאו באופן חלקי בלבד. למרות זאת הניסוי הראה תוצאות מטיחות ונמצא כי הושגו רוב מגמות הטיוב של הקרקע המיוצבת: שיפור בעבידות, ירידה בפלסטיות ובפוטנציאל התפיחה של החרסית וגידול בתסבולת ובחוזק. הומלץ להמשיך לעקוב אחר קטע



**סקירת מחקרים ועבודות
אוקטובר 2016
שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

הניסוי לטווח הארוך. ממצאים דומים התקבלו ב- 2002 במסגרת **בחינה מעבדתית של חרסית מיוצבת באפר מרחף**, שבוצעה אף היא ע"י דר' הופמן מ"יונה" בהזמנת חברת "דרך ארץ".

בחינות ההיתכנות והניסויים בשדה שצוינו לעיל היוו את הבסיס לכתיבת הגרסה הראשונית של מפרטי מע"צ לשימוש באפר פחם בסלילת כבישים: **מפרט כללי להקמת סוללה מבנית בכבישים** ע"י הנחה, פיזור וכבישה של אפר מרחף או תחתית ב- 2000, **ומפרט כללי לייצוב קרקע חרסיתית עם אפר מרחף** (טיוטה) ב- 2001. המפרט הכללי של מע"צ לעבודות סלילה וגישור, פרק 51: עבודות סלילה, תת-פרק 03: שכבות מצע ותשתית אגו"מ כולל היום הנחיות מפורטות ליישום ולבקרת האיכות של אפר פחם, מרחף ותחתית, בסלילת כבישים.

ב- 2003 נערך ע"י חברת "יונה" **מדריך שימושי אפר פחם בסלילת כבישים** הסוקר את שימושי אפר פחם הבולטים שישומו או נבדקו בארץ בתחום זה: אפר כחומר מילוי "נטוי", כמלאן בתערובות אספלט, לייצוב תשתית עם אפר וסיד ולייצוב/טיוב חרסית "שמנה" עם אפר מרחף. המדריך נועד לסייע למשתמשים באפר ביישומים אלו במתן מידע הנדסי ראשוני לגבי סוגי האפר והיישומים האפשריים, תוך הדגשת התכונות ההנדסיות של סוגי האפר הישראלי ומאפייני ביצוע ובקרת איכות של פרויקטים שבוצעו בארץ.

אפר מרחף כקשרן כבישים הידראולי (HRB - Hydraulic Road Binder)

מחקר מעבדתי שבוצע בטכניון ע"י קרן בנימין במסגרת לימודי תואר שני בהנחיית פרופ' אילן ישי ודר' מריו הופמן שהחל ב- 2004 וסוכם ב- 2006, בחן את **היתכנות השימוש באפר מרחף כמרכיב עיקרי (90%) בקשרן כבישים הידראולי**. הקשרן הוא אבקה המורכבת בעיקר מתוצרי לוואי תעשייתיים בהם גם אפר מרחף, ומטרתו לקשור חומרים אינרטיים וע"י כך לחזקם. הוא יכול לשמש ליישומים רבים במיסעה כגון בשכבות מצע ותשתית, כשכבת חיזוק, ולייצוב וטיוב קרקעות למטרות סלילה. יתרון כלכלי לשימוש בקשרן הוא חיסכון בחומרי סלילה יקרים. באירופה ובמיוחד בצרפת הצטבר בשנים האחרונות ניסיון בייצור ושימוש קשרנים הידראוליים המכילים בין השאר אפר פחם מרחף, ומכונים FABM- Fly Ash Bound Mixtures. במידת הצורך מוסיפים ל- FABM כמויות מצומצמות (עד 10% של סיד כבוי $(Ca(OH)_2)$) להגברת ריאקציית ההידרציה ושל גבס $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ לשיפור השליטה בזמן הדרוש להתקשרות התערובת. הגבס מגיב עם האלומינה והסיד הכבוי ליצירת המינרל אטרנגיט הממלא חללים באפר ובכך תורם להתפתחות החוזק. עם זאת, תוספת שעולה על 10% גבס עלולה לפגום בחוזק וליצור חומר סדוק ורך.



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
 שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

המחקר כלל בדיקות של תערובות באחוזים משתנים של אפר מרחף דרום אפריקאי עשיר קלציום (10.33%) במצב יבש מהסילו, סיד וגבס (עד 10%), שכללו: בדיקת קיים במחזורי הרטבה וייבוש, בדיקת דפורמציה תחת העמסת גלגל נע ובדיקות כימיות (SEM, XRD). כמו כן, הושו התוצאות לאפר דרא"פ מורטב מערימה ואפר אינדונזי דל-קלציום (1.9%). התוצאות הושו עם תקנים ומפרטים מהעולם לחומרים מיוצבים ולתקן אירופאי לתערובות קשרניות עם אפר פחם.

התוצאות הראו שאפר דרא"פ יבש עומד בתקנים ובמפרטים השונים, הינו בעל חוזק גבוה יחסית לחומרים מיוצבים, בעל קיים גבוה, אינו מתפורר ונסדק במעברי גלגל ולכן יכול להיות מרכיב בקשרן הידראולי, גם ללא התוספים, אם כי תוספת גבס וסיד שיפרה את תכונות האפר בשל הריאקציות הכימיות שהוזכרו לעיל. לעומת זאת, התוצאות שהתקבלו עבור האפר הדרא"פ המורטב והאינדונזי היו פחות טובות משמעותית בסדר גודל של עד מאות אחוזים, זאת מאחר והאקטיביות של אפרים אלו נמוכה יותר בשל מיצוי האפקט הפוצולני והתרחשות קרבונציה באפר המורטב וכמות הסיד הנמוכה באפר האינדונזי, כאשר באחרון תוספת סיד וגבס אמנם שיפרה משמעותית את תכונותיו, אך באופן חלקי שאינו מספק את כל דרישות התקנים. כן נמצא קשר חיובי ישר בין משך האשפחה לערכי המת"ק של האפר הדרא"פ היבש. ערכי המת"ק המיידים עמדו בדרישת המינימום באירופה ל- FABM (25%) הן בתערובות ללא אשפחה והשרייה והן בתערובות ללא אשפחה ועם השרייה במים למשך 4 ימים. כלומר, האפר המרחף מתנהג כחומר הידראולי המסוגל להתחזק גם מתחת למים. לסיכום, ניתן להרכיב קשרן הידראולי עם אפר מרחף, גבס וסיד, כאשר יעילותו ותכונותיו ההנדסיות והכלכליות תלויות ביחסי מרכיבים אלו, בסוג (מכרה) ותכונות האפר (יסודות עיקריים), מצב טרום שימוש (מורטב, יבש) וזמן ההכשר הניתן לתערובת המהודקת.

תערובות אספלט

במחקר היתכנות שנערך בטכניון ע"י גלי ישראל בהנחיית פרופ' אילן ישי במסגרת לימודיה לתואר שני וסוכם ב- 2006, ומחקר המשך משלים ע"י פרופ' ישי שסוכם בשני שלבים ב- 2009 ו- 2011, נעשו בדיקות אינדיקטיביות תקניות ומערכות מרשל מלאות לבחינת כושר קיים, שיפור ההתנגדות לנזקי מים, החלקה וחריצה של בטון אספלט עם מרכיב חולי (קטן מ- 5 מ"מ) של אפר פחם תחתית באחוזים שונים (5, 10 ו- 20) המתקבל כשארית ניפוי המקטע הגס לאפר לחקלאות, וכן של אפר פחם מרחף כמחליף מלאן גירי, בהשוואה לתערובת בקרה המכילה אגרגאטים מינרליים רגילים. מחקר היתכנות מ- 2006 הורכב מארבעה שלבים עיקריים הכוללים אפיון התערובת האספלטית ומרכיביה, תוך השוואה בין תערובות אספלטיות רגילות לתערובות עם אחוזים שונים של אפר תחתית, לבחינת השפעת תכולת האפר על תכונות תערובת אספלטית רגילה. האפר שנבדק אופיין במשקלים יחסיים נמוכים ביותר, המתבטאים גם בספיגות גדולה יותר למים בהשוואה לערכים מקובלים באגרגאטים מינרליים רגילים. זה נובע מהאופי הנקבובי



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
 שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

הפריד, ומהטקסטורה המיוחדת של חלקיקי האפר. בחקירה המקדימה נמצאה השפעה חיובית והדרגתית לתוספת אפר בשיעור של כ- 10% (המהווה 1/2-1/3 ממקטע החול) על תכונות תערובת אספלטיית רגילה, תוך שמירת תכונות התערובת העומדות בקריטריונים ההנדסיים והכלכליים המקובלים. הדבר מתבטא בכמה מישורים: בבדיקת התכונות המיידיות של התערובות בבדיקות מרשל שהראו שעם הגדלת אחוז האפר ערכי הצפיפות, היציבות והנזילות יורדים בתערובת, כצפוי לאור תכונות האפר, וגם תכולת הביטומן האופטימאלית עולה, ולכך יש משמעות כלכלית בהיות הביטומן המרכיב היקר בתערובת. לכן הוחלט להסתמך על קריטריון היציבות המכסימלית כקריטריון לקביעת תכולת הביטומן האופטימאלית, ולפי קריטריון זה נצפתה עלייה מתונה יותר בתכולת הביטומן, ונמצא שהיא תהיה מזערית בלבד באם מגבילים את תכולת האפר בתערובת ל-10%. תערובות בהרכב אפר זה הציגו ערכי יציבות נאותים העומדים בדרישות הטיב של כל סוגי התערובות האספלטייות מסוג א'; בבדיקות קיים מואצות בהשריה חמה ממושכת (60 מ"צ למשך 24 שעות) המהווה מדד לעמידת התערובת האספלטיית בפני נזקי רטיבות, חלה עלייה בחוזק כל התערובות האספלטייות, שהתעצמה עם תוספת האפר, ועל פי זה הוסק כי האפר אינו אינרטי לחלוטין אלא תורם לחיזוק האדהזיה בין הביטומן לאגרטים בתערובת ובכך תורם לדחיית נזקי הרטיבות הגורמים בדר"כ להתקלפות הביטומן. יש לציין כי תופעה דומה מושגת כאשר מוסיפים לתערובת אספלטיית רגילות למים מלאן סיד הידראטי או מוספים מחזקי אדהזיה. עובדה זו מהווה יתרון וערך מוסף חשוב לתוספת אפר פחם לתערובת; בבדיקות העמסה תחת מחזורי גלגל נע לקביעת ההתנגדות לדפורמציה משתיירת בנתיב הגלגל (חריצה) נמצא אמנם ששיעורי החריצה בתערובות עם האפר היו גדולים משל תערובות הבקרה ללא אפר אך בסה"כ כולם היו נמוכים ביותר (מתחת 0.7 מ"מ) בערכם המוחלט בהשוואה לבדיקות דומות שנערכו במחקרים רבים על תערובות אספלטייות קונבנציונאליות באותו המכשיר.

הצלחת בחינת ההיתכנות הראשונית סללה את האישור להמשך מחקר מקיף וכולל לבחינת טכנולוגיות וכלכליות נוספות לקראת יישום הנדסי מעשי של האפר בתנאי ייצור וסלילה ריאליים. מחקר ההמשך בוצע בשני חלקים. החלק הראשון בוצע ב- 2009 ונבחנה בו היתכנות השימוש באפ"ת גם בתערובות אספלטייות חמות מסוג SHRP (Strategic Highway Research Project) הנפוצות כיום בארץ ומתאימות לתערובות תא"מ (תערובת אספלט מבנית) "S". במחקר זה נבדקו במערכות מרשל תכונות מיידיות של התערובות בעומסי הידוק גבוהים יותר כדי לבחון את הטכנולוגיה בתנאים המתאימים להעמסה גבוהה, וגם לאחר תוספת אפר מרחף כמלאן. נמצא כי כל התערובות עונות על כל הקריטריונים הנדרשים בתערובות אספלטייות סוג א' לסלילה ומציגות ערכים נאותים וגבוהים של צפיפות, יציבות, נזילות וחוזק משתייר. יחד עם זאת, גם פה נצפתה עלייה בתכולת ביטומן אופטימאלית עם עלייה בתכולת האפ"ת, אם כי מתונה, ומשיקול זה תכולת אפר של עד 10% סבירה מבחינה כלכלית (עליה של 1.5% בתכולת הביטומן). בחלק השני של מחקר ההמשך מ- 2011 נבדקו גם התנגדות התערובות לנזקי מים, החלקה וחריצה, כאשר תוספת האפר הייתה בשיעור של 10%. כן בוצע אפיון של התערובות במערכות מרשל מלאות



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
 שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

מאחר והאפ"ת שנבחר בשלב זה היה שונה מהאפר בשלב הקודם, בעיקר מבחינת המשקל היחסי המתבטא בספיגות החלקיקים למים שהייתה נמוכה יותר באפר הנוכחי לעומת הקודם (3.7 לעומת 14%). בבחינת כושר ההתנגדות לנזקי מים וטמפי' (בהשרייה חמה ממושכת של 60 מ"צ למשך 30 דקות, 1, 6 ו-14 יום), התנגדות להחלקה (מקדמי חיכוך גבוהים) ולדפורמציה משתיירת (שיעורי חריצה בגלגל נע נמוכים מאד), ההתנהגות של התערובת עם האפר הייתה דומה לבקרה. החיסרון היחיד המסתמן קשור לתכולת הביטומן האופטימאלית הגבוהה יחסית של התערובות עם האפר. לגורם זה השפעה כלכלית בלבד, כך שלאור ממצאי המחקר ניתן להגדיר גם פה את ההשפעה של הוספת אפר בשיעור של עד 10% לתערובות אספלטיות כחיובית, והומלץ לעבור לניסוי שדה.

השפעת הוספת אפר פחם מרחף כמלאן לתערובות אספלט בזלתי נבחנה ע"י אינג' נתן לבנת הן בבדיקות מעבדה ב- 2001-2002 והן בניסוי שטח בכביש 40 ב- 2002, ע"י מרק כץ מ"איזוטופ" בבדיקות מעבדה ב- 2005 ובניסוי שטח בכביש 789 ב- 2005-2006 ע"י יהודה זיס מחברת "יונה" ואינג' נתן לבנת. מזה שנים רבות סללה מע"צ שכבות אספלטיות עם תערובת של אגרגאט גס בזלתי (לשם הגברת מקדם ההתנגדות להחלקה) עם חול קרבונטי (גיר/דולומיט) הודות להתאמה הטובה בין חול זה לביטומן. בניסויי המעבדה המוקדמים שנערכו ב- 2001 התקבל שיפור בהתנגדות להחלקה ולחריצה כתוצאה מהוספת אפר מרחף. השיפור בהתנגדות להחלקה נבחן גם בניסוי שטח בכביש 40 בו הוחלפה מרבית המלאן הגירי-דולומיטי באפר מרחף בשיעור של כ- 5% ממשקל התערובת האספלטית המכונה תערובת אספלטית מבנית (תא"מ), והאגרגט הגס היה דולומיט. הן התערובות הרגילות והן התערובת עם האפר נתנו תוצאות טובות בבדיקות בקרת איכות ועמדו בדרישות המפרטים של מע"צ, למעט הדרישה לצפיפות מקסימלית של 2350 ק"ג/מ"ק שהייתה נמוכה יותר בתערובת עם האפר, ייתכן שכתוצאה מהמשקל הסגולי הנמוך יותר של האפר לעומת המלאן הדולומיטי. סיבה זו קשורה כנראה גם לעומק מירקם נמוך יותר בתערובת עם האפר שבגינו התקבלו ערכי חיכוך נמוכים יותר בתערובת עם האפר לעומת הבקרה בבדיקות עם מכשיר ה- ROAR. מכשיר זה בודק את ההתנגדות להחלקה במהירויות החלקה גבוהות מאד המחקות בלימת חירום, מצב שבו יש חשיבות גדולה ליכולת ניקוז המים מפני המיסעה, הבאה לידי ביטוי בעומק המרקם של המיסעה. זאת לעומת ערכי חיכוך טובים יותר בתערובת עם האפר לעומת הבקרה, שהתקבלו במדידות עם מכשיר מטוטלת בריטית. מתוך תוצאות הניסוי הוסק שכנראה ניתן להשתמש במלאן אפר בתערובות אספלטיות במקום מרבית המלאן הדולומיטי וכי תכונות התערובת והתנהגותה בעת הסלילה ואחריה נראות טובות ונאותות. ממצאי הניסוי שימשו את מע"צ.

במסגרת **קטע הניסוי שנשלל ב- 2005 באורך של כ-1 ק"מ בכביש 789**, הוחלפו החול והמלאן הקרבונטי (קטע בקרה) בחול בזלתי (חומר פסול כשלעצמו, לפי מפרטי מע"צ) ומלאן אפר מרחף (קטע ניסוי), כדי לבדוק האם ההרכב הזה אינו פוגע בתכונות התערובת והשכבה האספלטית.



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

ממצאי הניסוי מצביעים על דמיון בתכונות התערובות עם האפר לתערובת ללא אפר מבחינת החוזק המשותף לאחר השרייה חמה במים; מבחינת פיזור, הידוק מרקם פני השטח, הצפיפות ונוחות הנסיעה, כלומר עבירות דומה; ומבחינת התנגדות להחלקה. קטע הניסוי נבדק שנית כעבור שנה מהסלילה. נבדקו מספר תכונות: סקר נזקים חזותי, גליות, חריצה, עובי וצפיפות, ואלה הושוו לתכונות התערובת האספלטית הטרייה מיד לאחר סלילתה. בבדיקה לא נצפו נזקים הקשורים לתערובת עם האפר וערכי החריצה היו דומים בין קטע הניסוי לבקרה ואף נמוכים יותר בקטע הניסוי. כלומר, תכונות השכבה האספלטית בקטע הניסוי לא נפלו מאלה של השכבה הרגילה בקטע הבקרה, להוציא בדיקת ההתנגדות להחלקה שלא בוצעה מסיבות טכניות, אך נטען שאם יוכח שפרמטר זה בקטע הניסוי אינו נופל מזה בבקרה, יש מקום להרחיב בהדרגה את השימוש בתערובת האספלטית עם האפר. ממצאי הבדיקות שהתקבלו בניסוי ובמעקב המשך שנה מהיישום הובילו להכרה באפר מרחף כתוסף מינרלי תקני לתערובות אספלטיות חמות (ת"י 362 חלק 1) ותערובות אספלט בזלתיות (המפרט הכללי של מע"צ לעבודות סלילה וגישה, פרק 51: עבודות סלילה, תת-פרק 04: שכבות אספלטיות במיסעות).

ייצוב שבילי עפר

אפר פחם תחתית נבחן ליישום כאגרגאט בתערובת עפר לייצוב שבילים בפארק איילון המיועדים לתנועת הולכי רגל, רוכבי אופניים וכלי רכב קלים. בחינת היישום התבצעה במסגרת ניסוי שנערך בסוף 2005 עד 2006 בפיקוח דר' רפאל ירון, אינג' מוחמד חביב-אללה ואדריכל ארז לוטן. בניסוי נבדק מגוון גדול של תערובות בהרכב חומרים שונים, תוך שמירה על יעדים אדריכליים כגון השתלבות בנוף, הנדסיים (שמישות לאורך כל השנה), כלכליים (עלויות הקמה ואחזקה לאורך זמן) וסביבתיים (חיסכון בחומרי סלילה המקובלים).

בשלב הראשוני של הניסוי נבדקו 18 קטעים באורך כולל של 1.4 ק"מ, מרביתם באורך 100 מטר כ"א ומיעוטם באורך 50 ו-20 מטר. בכל קטע בוצע עיבוד של חומרי בסיס: הקרקע החרסיתית המקומית עם סוגים שונים של חומר מובא שכלל אפר תחתית, פסולת בניין גרוסה או אגרגאט מחצבה גרוס בדירוג דק (ג"ג מרבי 19 מ"מ), ומייצבים שונים שיושמו על חומרי הבסיס: מייצב מסחרי מסוג RBI, מייצב מסחרי מסוג Soiltac, אפר פחם מרחף מורטב (22%-25% רטיבות) או סיד כבוי. אפר התחתית יושם בארבעה קטעים (כל קטע עם מייצב) והמרכיב שלו בתערובת נע מ-37 עד 60 אחוז משקלית. תחילה בוצעו פעולות עיצוב, עיבוד והידוק הקרקע המקומית, לאחר מכן תיחוח וערבוב חומרי הבסיס לשם קבלת תערובת הומוגנית, פיזור המייצבים תוך ערבוב, תיחוח, הרטבה, עיבוד והידוק ובשלב הסופי גימור פני השטח לשם הסדרת צידי הדרך ואשפרה. נמצא שכמעט כל הקטעים תפקדו באופן סביר, כך שניתן לנוע ברכב מסחרי קל על קטעי הדרך ללא השארת חריצים, ותנאי התנועה עליהם היו טובים בהרבה מהתנאים על קטעים לא מטופלים.



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
 שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

במעקב שבוצע במצב המיסעות בקטעי הניסוי לאחר כ- 9 חודשים, נמצאו שני קטעים שהשיגו יתרון על פני האחרים מבחינת השילוב של עמידות לאורך זמן, השתלבות בנוף ומחירים סבירים: קטע המורכב מ- 23% חרסית מקומית, 71% אפר תחתית ו- 6% סיד כבוי, וקטע המורכב מ- 38% חרסית מקומית, 56% פסולת בניין גרוסה ו- 6% סיד כבוי. בהתבסס על ממצאים אלה **בוצעו שני קטעים בתערובות המומלצות בהיקף יישומי** (חצי ק"מ כ"א). הקטעים הפגינו התחזקות משמעותית של פני השטח ויכולת לשאת תנועה עוברת, גם זמן קצר לאחר סיום הגשמים. בסיום הפרויקט הופק **מפרט**, המגדיר שיטות ביצוע ובקרה המבטיחים השגת ערכי הייצוב הנדרשים.

מתקנים תת-קרקעיים

למטרות שונות כדוגמת תשתיות להולכת מים, ביוב, תקשורת, כבלי מתח, דלקים וגז, עוטפים ומרפדים בחול את המתקנים, הן לצורך הגנה על המתקנים ולהידוק מאוזן לפיזור עומסים והן לחפירה חוזרת לצרכי תחזוקה. מאחר והחול מצוי במחסור בארץ, בייחוד חול הדיונות ה"מתוק" המהווה חומר מילוי מועדף למתקנים תת קרקעיים עשויים ממתכת בשל העובדה שאינו קורוזיבי כחול ים מלוח, מתעורר הצורך בחומרים תחליפיים ליישומים הנ"ל, בהם גם אפר תחתית (אפ"ת) כמענה להתייקרות החול, בעיקר בצפון הארץ (מרחק הובלה גדול יותר ממקורות החול בדרום).

בדיקות התאמת אפ"ת לשמש כמעטפת מתקנים תת קרקעיים עשויים ממתכת נערכו ע"י אינג' ישע ברגר וסוכמו ב- 2004. במתקנים מסוג זה, כדוגמת מכלי דלק וגז, צריך חומר המעטפת לעמוד בדרישות מחמירות למניעת פגיעה מכנית בציפוי, העשוי בדרך כלל חומרים פולימריים, לאפשר חלוקה של העומסים והכוחות המכאניים המופעלים על המתקן מצד התחבורה העוברת מעל, מבלי לגרום לקורוזיה, גם אם מים מחלחלים לסביבת הצובר. ואמנם האפ"ת, המאופיין בפיזור גודל גרגרים אחיד בקירוב, נבדק ונמצא מתאים לתנאים מונעי קורוזיה בזכות מוליכות חשמלית נמוכה (התנגדות סגולית חשמלית למעלה מ- 3000 – 4000 אום לסנטימטר, ערכים שבתקינה הבינלאומית אינם נחשבים כ- "קורוזיביים"), pH גבוה ופילוג אחיד בחומר. המקטע הדק מ- 2 מ"מ של אפר התחתית, המתקבל בהפרדה מהאפר הגולמי ומאופיין בגרגרים כדוריים מלוכדים, מתאים במיוחד לשמש כחומר מעטפת למתקנים בעלי ציפוי רגיש. כך שמבחינת הנדסת קורוזיה אין מניעה להשתמש באפר כמילוי של צוברים המוגנים ממילא בהגנה משלימה של הציפוי.

ב- 2006 נבחן ע"י פרופ' נפתלי גלילי מהפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית בטכניון פוטנציאל השימוש באפר תחתית כחומר מילוי לעטיפת צנרת תת-קרקעית לתשתיות מים, ביוב, ניקוז ותקשורת. נערכה סקירה של התכונות ההנדסיות של האפר כחומר מילוי מבני להנחת צנרת תת-קרקעית, מקומו בתקינה הבינלאומית ותפקידיו כחומר מילוי בהנחת צנרת והתאמתו לדרישות התקינה ליישום זה לסוגיו (הנחת צנרת בטון, פלדה, פיברגלס, PVC ופוליאאתילן). כן בוצעו חישובי



**סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
 שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות**

שקיעות של הצנרת בתנאי הנחה ועומס שונים ורמות הידוק המוגדרות בתקינה, תוך שימוש באפר תחתית (אפ"ת) כחומר מילוי, לצורך בדיקה האם העיווי או השקיעה הטבעית של הצנרת הינה מעבר לגבול המותר לאורך זמן בצנרת זו, ונקבעו עקרונות הנחה לסוגי צנרת שונים. מהסקירה עולה כי האפ"ת, המוגדר כחומר גרגרי עדין עם דקים, נמצא במרכז המלצות חומרי המילוי המוגדרים בתקינה. לכן הוא מתאים כחומר מילוי להנחת צנרת מכל הסוגים שנבחנו, הן כשכבת המצע הראשונית, הן כחומר מילוי לתושבת הצינור, הן כמילוי נוסף עד לציר הצינור בצינורות קשיחים והן כחומר מילוי עד ראש הצינור ומעליו בצנרת גמישה וקשיחה למחצה. פוטנציאל שימוש זה באפ"ת טמון בתכונותיו הבסיסיות: חומר תעשייתי מוגדר היטב, בעל פילוג גרגרים רחב, קל משקל, יציב ומנקז. על סמך תכונות אלו האפ"ת אמור להתאים כחומר מילוי נוח ליישום ולספק תמיכה מבנית לצנרת עפ"י התקינה; לשמש כשכבת מצע המונעת ריכוז מאמצים מתחת לצינור, כמעטפת להגנה על הצינור מפני גושים, אבנים וגופים זרים בקרקע וחלק מחומר הכיסוי לצינור; ולעמוד בקריטריונים למניעת סחיפת דקים אל הקרקע בסביבת הצינור ובכך ליתר את השימוש בבד גיאוטכני הנדרש בעת שימוש בחומרי מילוי גסים יותר. בסיכום הסקירה נקבע כי האפ"ת מתאים לשמש כחומר מילוי להנחת צנרת תת-קרקעית לסוגיה, בתנאי קרקע ועומס שונים, ובכפוף לתנאי ההנחה ולבדיקות מעבדה ושדה עפ"י התקינה המתאימה לצנרת.

עבודות תשתית

מפרט כללי לשימושי אפר פחם בעבודות תשתית ובתשתיות תת-קרקעיות קשיחות (בטון, פלדה)

הוכן ע"י דר' אריה סידס ואינג' אירית סחר ממשד "יותם". המפרט שם דגש על ההיבטים הסביבתיים הנוגעים להובלה, איחסון ויישום האפר באתר העבודה (מניעת אבק, ארוזיה ע"י מים ורוח, חלחול תשטיפים לסביבה). המפרט מהווה תוספת למפרט הכללי לעבודות סלילה, הנהוג בכל פרויקט. יישום אפר בעבודות תשתית שאינן בתחום הסלילה מסווג לאחד משלושת השימושים הבאים המפורטים במפרט:

1. מילוי לעבודות פיתוח - מילוי קונסטרוקטיבי (מבני), המיועד לשאת עומסים סטטיים ודינמיים בנוסף על משקלו העצמי.
2. מילוי לסוללות תפקודיות - מילוי לסוללות שאינן צריכות לעמוד תחת עומסים סטטיים או דינמיים חיצוניים. סוללות אלו צריכות לשאת את משקלן העצמי ונזקי הסביבה בלבד, כגון: סוללות אקוסטיות וסוללות מסתור.
3. מילוי בורות - מילוי של שטח מוגבל הנמצא בנחיתות גובה משאר האזורים הגובלים איתו, ומחייב מילוי כדי להתאימו למפלס הכללי של השטח כגון: מטמנות, בורות שאילה ותיקוני נוף.



סקירת מחקרים ועבודות
 אוקטובר 2016
שימושי אפר פחם בסלילה ובתשתיות

איטום

ב- 2005 נבדקה ע"י אינג' שמואל גפן ואינג' אילן בירנבאום **היתכנות איטום באמצעות חרסית פלסטית מעורבת באפר מרחף**. הבדיקה נערכה בהקשר לחיפוי (capping) מטמנת חירייה במטרה למנוע דליפת גז המתאן הנוצר מהתפרקות הפסולת האורגנית לסביבה. האפר מוסף לצורך הקטנה ונטרול תכונות התפיחה וההתכווצות של החרסית, הנגרמות עקב שינויים בתכולת הרטיבות במחזורי אקלים של ייבוש והרטבה (חרסית מסוג מונטמורילוניט הנפוצה בארץ, בעלת פוטנציאל גבוה לשינויי נפח עקב שינויי רטיבות בקרקע), תוך שמירה על תכונות האיטום של החרסית שהיא חומר בעל מוליכות הידראולית נמוכה, ונטרול פוטנציאל הסדיקה. במחקר נבחנה התנהגות החרסית בתערובת עם אפר מרחף בעת מחזורי ייבוש והרטבה בהם חלה התכווצות או תפיחה של החרסית. נבדקו אפרים ממקורות שונים (דרא"פ וקולומביה) בתערובות באחוזים מ-0 עד 100%. תערובות שלא ניכרה בהן תפיחה והתכווצות נבדקו לקביעת מקדם מוליכות הידראולית, לאחר אשפחה של התערובות, כאשר חלקן עבר הידוק וחלקן לא. הדרישה בעולם היא למקדמי חלחול בסביבות 10^{-10} ס"מ/שניה.

הבדיקות מראות כי:

- הוספת אפר מקטינה באופן ניכר את הפלסטיות ובתכולת אפר מעל 60% מתבטלת הפלסטיות לחלוטין, עם זאת, מידת השפעה זו תלויה בהרכב הכימי של האפר המשקף את תכונת הפוצולניות. תוספת אפר, גם בשיעור נמוך של 15%, מקטינה את שיעור התפיחה הראשונית והחוזרת ואף מפסיקה אותה לחלוטין בהוספת 20% ויותר של אפר דרום אפריקאי.
- רוב תוצאות החלחול נעות בין 10^{-5} ל- 10^{-10} ס"מ/שניה. בתערובות המכילות 20-35% אפר מתקבל מקדם חלחול הקטן לרוב מ- 10^{-5} ס"מ/שניה שנקבע שרירותית כסף עליון מתאים אשר מעליו יכולת האיטום אינה יעילה.
- תערובות עם 25% אפר ומטה הראו תוצאות טובות מבחינת החלחול, אך לא תמיד טובות מבחינת התפיחה.

יעילות האיטום בתערובת חרסית ואפר מרחף הוכחה בפועל **במצרת דלק בבית זיקוק אשדוד** בשנת 2003 בהשגת מקדמי מוליכות נמוכים מ- 10^{-8} 1.5 ס"מ/שניה.