

## הערכת המקטע הדק באפר פחם תחתית לשימוש כמרכיב אגרגטי בתערובות אספלטיות

### חמות- חקירת היתכנות ראשונית - דו"ח מסכום

אילן ישי וגלי ישראל, 2006

המכון לחקר התחבורה, הטכניון

המניע למחקר הנוכחי הוא חיפוש אחר פתרונות לבעיית הצריכה הרבה של אגרגטים מינרליים וחומרי מחצבה המשמשים לסלילה ושיקום התשתית התחבורתית בארץ שנמצאת בתנופת פיתוח בשנים האחרונות. כרייה והפקת חומרים אלו פוגעת בנוף ובסביבה ומלווה בצריכת אנרגיה רבה. פתרון חלקי לבעיות אלו הוא מציאת תחליף לחומרי גלם אלו, בהם אפר פחם תחתית. עד כה לא נמצא שימוש הנדסי כלכלי במרכיב החולי הדק של אפר התחתית (גודל גרגיר מרבי עד 5 מ"מ), שמוערך בכמחצית מסך כמות אפר התחתית המופקת לשנה העומדת על 130,000 טונות.

מחקר מקומי מקדים בחן תערובות אספלטיות קרות שהכילו אפר פחם תחתית במערכת מרשל לקביעת תכונות הצפיפות, היציבות (חוזק), והנזילות (דפורמציה בתנאי הרס) בתלות בתכולת האמולסיה האספלטית. על אף התאמת תכונות אלה לקריטריונים המקובלים בתערובות אספלטיות רגילות, המחקר קבע כי לא ניתן להשוות את תכונות האפר שנבדקו עם תכונות אגרגטים מינראליים רגילים, אך הוצע לבחון אותן יחד עם התכונות ההנדסיות של התערובות המהודקות הכוללות אפר תחתית, והמייצגות את השכבות השונות.

מטרת המחקר הנוכחי היא לבדוק את ההיתכנות הטכנולוגית וההנדסית של השימוש המעשי באפר פחם תחתית בתערובות אספלטיות למיסעות כבישים ושדות תעופה.

המחקר הורכב מארבעה שלבים עיקריים באפיון התערובת האספלטית ומרכיביה, תוך השוואה בין תערובות אספלטיות רגילות לתערובות באחוזי אפר פחם תחתית שונים, לבחינת השפעת תכולת אפר התחתית על תכונות תערובות אספלטיות רגילה:

#### **1. אפיון הנדסי מעבדתי של אפר פחם תחתית והשוואתו עם חול מחצבה דולומיטי, להערכת התכונות התפקודיות והמכאניות של המרכיבים והתערובות במצב ראשוני ובתנאי קיים מואצים-**

באופן כללי לאפר פחם תחתית תכונות ייחודיות בסדר גודל דומה לאגרגטים מינראליים רגילים, כאשר הוא קל יותר, נקבובי יותר, ובעל כושר מכני נמוך יותר. אפר פחם התחתית שנבחר היה במקטע הדק (גודל גרגיר מכסימלי של 5 מ"מ), ודירוג (אחוז עובר נפה) האפר תאם באופן עקרוני את דירוג חול המחצבה של האגרגט הדולומיטי בתערובות הבקרה, שאותו הוא החליף חלקית בתערובות אספלטיות חמות, כאשר האפר הינו דק רגירי יותר בפרקציות הדקות ועשיר יותר במלאן שרובו בפרקציות הטיניות (מלאן גס יחסית). האפר נמצא כבלתי פלסטי, ובעל משקל יחסי נמוך בהשוואה לחול האגרגטי המינראלי הרגיל. המשקל היחסי הנמוך מתבטא גם בספיגות גדולה יותר למים. זה נובע מהאופי הנקבובי והפריך של חלקיקי אפר הפחם. ערכים אלו עלולים להתבטא בצפיפות נמוכה בשכבות המיסעה, ובתכולת רטיבות גבוהה בתערובות גרנולאריות או תכולת ביטומן אופטימאלית בתלות באופי השכבה. האופי הנקבובי והפריך של האפר מתבטא גם בשחיקה גבוהה, תוך השארת חלקיקי אפר עגולים יחסית ובעלי כושר מכני גבוה בהמשך השחיקה.

**2. השפעת תכולת אפר פחם תחתית על תכונותיהן המיידיות (ללא אשפרה) של תערובת אספלטיות חמות (צפיפות, אחוז החלל, דרגת רוויית הביטומן, יציבות (חוזק) ונזילות (דפורמציה בתנאי הרס)) הכוללות אפר תחתית (0%-בקה, 5%, 10% ו-20%) בסדרת מערכות מרשל והשוואתן עם תערובת בקרה קונבנציונאלית מאגרגט דולומיטי בלבד-** לפי קריטריון אחוז החלל, תכולת הביטומן האופטימלית בתערובת המכילה אפר פחם תחתית היתה צפויה לעלות, בשל כליאת הביטומן בנקבובים הרבים של חלקיקי האפר. אולם בשל חריגה של אחוזי החלל בתערובת מערכי הטיב המותרים, הוצע במחקר זה להשתמש כתחליף בקריטריון המכאני המסתמך על היציבות המכסימלית, כקריטריון לקביעת תכולת הביטומן האופטימלית. תוצאות הבדיקות אכן הראו על עלייה עקבית בתכולת הביטומן האופטימלית עם עלייה בתכולת אפר פחם תחתית בתערובת. על פי קריטריון אחוז החלל, תוספת של עד 10% ושל 20% אפר לתערובת גרמה לעלייה של 1.1-1.2% ו-2.6-2.9% בתכולת הביטומן, בהתאמה. עלייה מתונה יותר נצפתה על פי קריטריון היציבות המכסימלית: בתוספת אפר תחתית עד 10% ושל 20% חלה עלייה של 0.4% ו-1.5% בלבד בתכולת הביטומן, בהתאמה. פירוש הדבר הוא שבתכנון תערובות אספלטיות עם אפר תחתית בהסתמך על קריטריון היציבות המכסימלית, תכולת הביטומן האופטימלית לביצוע תהיה מזערית בלבד באם מגבילים את תכולת האפר בתערובת ל-10%.

כאמור, בהתאם למגמות ולדיון בנושא השפעת תכולת האפר על תכולת הביטומן האופטימלית, נקבע כי בתערובת עם אפר פחם מתאים יותר להשתמש בקריטריון היציבות המכסימלית כבסיס לחלות תנאי אופטימום. על בסיס קריטריון זה נבחנו תכונות התערובות שהכילו אפר פחם תחתית בתכולות ביטומן אופטימאליות. נמצא כי עם עלייה בתכולת האפר חלה ירידה הדרגתית בצפיפות, ביציבות ונזילות התערובת, כצפוי, תוך שמירת תכונות התערובת העומדות באופן כללי בקריטריונים המקובלים. הירידה ביציבות מוסברת בהקטנת הכושר המכני של חלקיקי האפר. הירידה בנזילות מוסברת בנקבוביות הרבה של חלקיקי האפר שבגללה חלק נכבד מהביטומן בתערובת "נבלע", בחלליהם החיצוניים של החלקיקים ואינו תורם להגדלת הדפורמציה בעת ההרס. למרות הירידה בערכים לעיל, ערכי היציבות המוחלטים עמדו בדרישות הטיב הנדרשות. לסיכום, למרות ההשפעה הרבה שיש לתכולת האפר על תכונות התערובת, השפעה זו אינה דרמטית והרסנית, אלא הדרגתית תוך שמירת תכונות התערובת העומדות בקריטריונים המקובלים. גם הגדלת תכולת הביטומן, בתנאי אופטימום הנקבעים לפי היציבות המכסימלית, היתה מתונה, ובתכולת אפר תחתית בשיעור של עד 10% הינה בתחום סביר גם מהבחינה הכלכלית.

**3. השפעת תכולת אפר פחם תחתית על תכונות הקיים של התערובות האספלטיות השונות בהתנגדות לנזקי רטיבות בהשריה חמה ממושכת-** לצורך בחינת השפעה זו הוכנו מדגמי מרשל בתנאי ביטומן אופטימליים (המסתמכים על קריטריון אחוז החלל בתערובת נושאת), והושרו באמבט החם למישכי זמן שונים עד 12 יום. מדגמים זהים, מבחינת תכולת אפר פחם תחתית ותכולת ביטומן, נגזרו בבדיקת מרשל תקנית מיידית (100% חוזק) וכן לאחר 1, 6, ו-12 ימי השרייה חמה, לקביעת חוזקם המשתייר. השרייה חמה ממושכת זו היוותה מאיץ לתנאי הפריזה הקריטיים בתנאי שרות ממושכים ואינדיקציה להתנגדות המדגם לנזקי רטיבות בתנאים אלה. התוצאות שהתקבלו הראו עלייה בחוזק המדגמים האספלטים בכל תקופת ההשרייה, כאשר היא היתה גדולה יותר בתערובות שהכילו הפחם לעומת תערובת רגילה ללא אפר. ההתחזקות הגבוהה ביותר בתערובות שהכילו אפר הושגה לאחר יום השרייה, אך ירדה ל-120-130% חוזק משתייר לאחר 12 יום השרייה, לעומת כ-100% בלבד עבור התערובת ללא אפר. מוסק מכך שאפר פחם התחתית איננו אינרטי בלבד, אלא תורם אף לחיזוק האדהזיה בין הביטומן לאגרגטים בתערובת, ובכך

מסייע בדחיית נזקי המים הגורמים בדרך כלל להתקלפות הביטומן (Stripping). לאור זאת אפר פחם תחתית יכול לשמש גם כמייצב בשדרוג כושר הקיים של התערובת האספלטית, ומכאן חשיבותו כמוסף לתערובות אספלטיות.

**4. אפיון ההתנגדות לחריצה של התערובות האספלטיות השונות בעמיסת הגלגל הנע - תערובות אספלטיות חמות באחוזים שונים של אפר פחם תחתית, נבדקו תחת מעמס גלגל הנע על פניהן הלוך ושוב כדי לקבוע את התנגדותן לדפורמציה משתיירת בנתיב הגלגל (חריצה) כתלות במספר מחזורי ההעמסה של הגלגל. כל תערובת הוכנה בתכולת ביטומן אופטימאלית המתאימה לקריטריון אחוז החלל עבור תערובות נושאות. נמצא כי לאחר כחצי מיליון מחזורי עמיסת גלגל שיעור החריצה המצטבר בתערובות ללא אפר פחם היה כ- 0.15 ס"מ, לעומת 0.45-0.65 ס"מ בתערובות המכילות אפר פחם תחתית. יחד עם זאת, ערכי החריצה המוחלטים בתערובות עם האפר היו נמוכים ביותר (מתחת ל-0.7 מ"מ) בהשוואה לתערובות רגילות, ומצביעים על תערובת אספלטיות בעלות התנגדות גבוהה לדפורמציה משתיירת.**

לסיכום, נמצא השפעה חיובית והדרגתית לתוספת אפר פחם תחתית (בשיעור של כ-10%) על תכונות תערובת אספלטית רגילה, תוך שמירת תכונות התערובת העומדות בקריטריונים המקובלים, כפי שהוכח בבדיקות מרשל ובבדיקות עמיסה תחת גלגל נע. בבדיקות קיים הראו שתחת השרייה חמה ממושכת בתנאי פריזה מואצים, חוזק התערובות שהכילו אפר פחם תחתית עלה על זה של התערובות הרגילות. יישום הנדסי מעשי יותר של אפר פחם תחתית בתנאי ייצור וסלילה נאותים, אפשרי לאחר בחינה מעמיקה ומקיפה יותר של הפרמטרים שנבדקו במחקר.