



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

חקירת היתכנות ראשונית
דו"ח מסכם – גרסה סופית

מאת

אילן ישי גלי ישראל

מוגש למנהלת אפר הפחם



מחקר מס' 2000977

דו"ח מחקר מס' 306-2006

227 9078

פברואר 2006



000007778827



תוכן עניינים

1.	הקדמה	2
1.1	מטרה כללית והיקף	2
1.2	מטרות חקירת ההיתכנות הכוללת ושליביה	2
2.	רקע מכין	4
2.1	סליחה ומחזור	4
2.2	אפר פחם תחתית – כללי	5
2.3	פוטנציאל התשתית התחבורתית	5
3.	אפיון כללי של אפר פחם תחתית	6
3.1	תיאור כללי ושימושים	6
3.2	תכונות אופייניות של אפר פחם תחתית	7
3.3	תכונות אפר פחם תחתית בחקירה זו	10
4.	חקירה מקומית מקדימה	12
4.1	כללי	12
4.2	תכונות אפר הפחם	12
4.3	תכונות תערובות אספלטיות	14
5.	חקירת תערובות אספלטיות חמות המכילות אפר פחם תחתית	17
5.1	כללי	17
5.2	תכונות אפר התחתית	17
5.3	התכונות המיידיות של התערובות האספלטיות	17
5.3.1	כללי	17
5.3.2	תערובות מרשל תקניות	17
5.3.3	השפעת תכולת אפר התחתית על תכולת הביטומן האופטימאלית	22
5.3.4	השפעת תכולת אפר התחתית על תכונות התערובת האספלטית	23
5.4	תכונות הקיים של התערובת האספלטית	27
5.5	התנהגות התערובת האספלטית תחת תנועת גלגל נע מחזורית	29
6.	סיכום מסקנות והמלצות	31

הערכת המקטע הדק באפר תחתית לשימוש כמרכיב אגרגטי בתערובות אספלטיות חמות

חקירת היתכנות ראשונית

1. הקדמה

1.1 מטרה כללית והיקף

המטרה העיקרית של חקירה זו הנה לבדוק את ההיתכנות הטכנולוגית וההנדסית של השימוש המעשי באפר פחם תחתית, שהנו תוצר לוואי בשרפת הפחם בתחנות כוח, בתערובות אספלטיות למיסעות כבישים ושדות תעופה. חקירה זו הנה ראשונית ותתרכז בשלב זה במעבדה בלבד, בה ייבחנו תכונות האפר, האגרגט, ותערובות אספלטיות בהרכבי אפר שונים. כמוסכם, החקירה תוגבל לבדיקות קונבנציונאליות הבוחנות פרמטרים מפרטיים סטנדרטיים. בנוסף יבוצעו גם בדיקות קיים מואצות בהשריה חמה לפרקי זמן משתנים וכן בדיקות גלגל נע.

הצלחת בחינת ההיתכנות עשויה להוביל לבחינות טכנולוגיות וכלכליות נוספות לקראת יישום המעשי של השימוש באפר תחתית כחומר סלילה. בתוצאות חיוביות, יתבטא סיכום החקירה גם בהמלצות ראשוניות הנוגעות להמשך מחקר מקיף וכולל לקראת יישום הנדסי בתנאי ייצור וסלילה ריאליים.

עקב המגבלות התקציביות, החקירה המסוכמת בדו"ח זה מהווה בעצם רק שלב ראשון בחקירת ההיתכנות הכוללת המתוכננת, והיקפה תחום לבחינה ראשונית של תערובות אספלטיות בחקירה מעבדתית מצומצמת בעזרת סדרת בדיקות תקינות ובדיקות נבחרות נוספות.

1.2 מטרות חקירת ההיתכנות הכוללת ושלביה

באופן כללי ניתן לסכם את מטרותיה העיקריים של חקירת ההיתכנות הכוללת כדלקמן:

1. אפיון הנדסי מעבדתי ראשוני של אפר פחם תחתית, האגרגטים, הביטומנים ותערובות אספלטיות בעזרת סדרת בדיקות פיסיקליות, הנדסיות תקינות, ואחרות להערכת התכונות התפקודיות והמכאניות של המרכיבים והתערובת במצב ראשוני ובתנאי קיים מואצים.
2. השוואת אפיון תערובות האפר כנגד תערובות אספלטיות קונבנציונאליות שהוכנו באותם מינונים ועם אותם אגרגטים מינרליים.
3. השוואת תכונות אפר התחתית ותערובותיו עם קריטריונים ודרישות תקינים ומפרטיים, וסווג ייעודם והתאמתם ההנדסית.

4. מתן המלצות ראשוניות להתאמת התערובת ליישומים השונים ולמינונים אופטימאליים להשגת תוצאות מרביות.

5. מתן המלצות להמשך ולכוון המאמץ ההנדסי בנושא.

בהתאם, שלבי החקירה למימוש מטרות אלה הנם :

1. אסוף נתונים, חומרים ואינפורמציה זמינה על ניסיון קודם בטכנולוגיה זו בארץ ובעולם.
2. תכנון ובצוע חקירה מעבדתית לאפיון מרכיבי התערובת (אפר תחתית, אגרגטים, וביטומן).
3. תכנון ובצוע חקירה מעבדתית לאפיון תערובות אספלטיות מאפר למול תערובות רגילות.
4. ניתוח התוצאות, הסקת המסקנות ומתן ההמלצות ההנדסיות
5. סכום החקירה על כל שלביה בדו"ח סופי מסכם.

דו"ח זה מסכם שלב מקוצר בחקירת ההיתכנות הכוללת בהיקף מצטמצם שהוסכם עם מנהלת אפר הפחם.

2. רקע מכין

2.1 סלילה ומיחזור

בעשורי השנים האחרונים חלה הידרדרות משמעותית במצבן הפיסי וברמת התפקוד של רשתות הדרכים הארציות, העירוניות והצבאיות בארץ. הידרדרות זו נוצרה עקב הגידול המהיר בנפחי התנועה ועומסים. בניגוד לגידול בהיקף ועלויות האחזקה והשיקום של מערכות הכבישים, רמת ההשקעה בתשתית התחבורתית נשארה קבועה ולעיתים אף פחתה. במקביל להידרדרות מצב רשת הכבישים גדלה גם צפיפות כלי הרכב בדרכים העירוניות והבין-עירוניות ומצב התנועה וצפיפותה הנו לעיתים ללא נשוא. מצב כולל זה, ללא טיפול דרסטי, עלול היה להביא לקריסת התשתית התחבורתית בארץ. מצב דומה, אם כי בהחמרה פחותה, מאפיין גם את רשת שדות התעופה האזרחיים והצבאיים בארץ.

במטרה לפתור מבעוד מועד בעיה חמורה זו, מסתמנת בעשר השנים האחרונות תחילתה של תנופה בפיתוח רשת הכבישים העירונית והבין-עירונית ושדות התעופה. דבר זה מתבטא בעבודות סלילה רבות בכל רחבי הארץ בשיקום המסעות, בבניית מחלפים, בהרחבת כבישים ובתוכניות מעשיות לסלילת כבישים ושדות תעופה חדשים (כביש חוצה ישראל, כביש מס' 90, כבישי רוחב, נתבי"ג 2000, שדה תעופה תמנע בנגב וכד'). מגמת פיתוח דומה מסתמנת גם לגבי רשת הרכבות בישראל. מבצע שיקום ופיתוח התשתית התחבורתית הפך בימים אלה כתוצאה לקדימות לאומית ממעלה ראשונה. כיום קיימות תכניות להקצאת כמה עשרות מיליארדי שקלים בפיתוח ותחזוקת התשתית התחבורתית בארץ לתקופת חומש. בנוסף, באם תחול פריצת דרך בהסכמי השלום, צפויה תנופה נוספת בפיתוח תשתיות תחבורתיות חדשות בארץ, ברחבי הרשות הפלסטינית וגבולותיה ובמרחב כולו.

עבודות הסלילה הרבות המתבצעות והצפויות בעתיד הלא רחוק באזורנו הן עתירות חומרים. עשרות מיליוני טונות של אגרגטים מינרליים וחומרי מחצבה נדרשים כדי לסלול ולשקם את שכבות המצע, התשתית והשכבות האספלטיות של מסעות הכבישים, הרכבות ומסלולי התעופה. אגרגטים אלה נכרים במחצבות קיימות שיגדלו ויתרחבו ויחייבו גם פתיחתן של מחצבות חדשות בכל רחבי הארץ. הדבר יגרור אחריו פגיעה רצינית בנוף הארץ, צריכת אנרגיה רבה ופגיעה כללית בשימור ואיכות הסביבה.

פתרון חדשני, אך חלקי, לבעיה זו הנה טכנולוגיות המיחזור, או השימוש החוזר בחומרי המסעות. החידוש בגישה זו הוא בכך שבעוד שבנוהלים המקובלים מבוצעים הסלילה והשיקום בתומרים חדשים, הרי שבנוהל זה משתמשים בחומרי המיסעה המשוקמת או בחומרים ממסעה ישנה אחרת, וזאת תוך כדי העדפה על פני שימוש בחומרים החדשים. טכנולוגית מיחזור המסעות תפסה תנופה בשנים האחרונות במשק הסלילה בארץ, זאת כתוצאה של חזון ופעילות מחקרית מכינה אינטנסיבית במכון לחקר התחבורה שבטכניון ובמע"צ.

פתרון חלקי נוסף לחסכון בשימוש באגרגטים חדשים ולמניעת פתיחתן של מחצבות חדשות היא מיחזור ועיבודם מחדש של חומרי פסולת מוצקה שונים, ומוצרי לוואי של תעשיות ומתקני אנרגיה (כגון תחנות כוח), והכללתם כמרכיב וכתוסף חליפי חלקי לאגרגטים המינרליים שבחומרי הסלילה. התערובת האספלטית מהווה כיום את המרכיב הבלעדי כמעט לשכבות המסעה העליונות של מירב הכבישים והמסלולים בארץ. בהכנה מחקרית וטכנולוגית מתאימה, סביר להניח כי ניתן יהיה להחליף עד בין 5-15% מהאגרגטים

שבתערובת האספלטית במקטעים מתאימים של פסולות מוצקות, כגון: פסולת זכוכית, אפר פחם תחתית, וכד', וזאת בפוטנציאל שוק מקומי של כמה מאות אלפי טונות בשנה.

2.2 אפר פחם תחתית - כללי

בתהליך שריפת הפחם בתחנות כוח חשמליות משתייר ומופק מוצר לוואי בצורת אפר. לאפר זה שני מרכיבים עיקריים: האפר המרחף (Fly Ash), שהנו מלאני דק גרגירי, ואפר התחתית (Bottom Ash), שהנו יחסית גס גרגירי ומודרג. לאפר המרחף תכונות אינרטייות וקשרניות כאחד, והוא משמש בסלילה בארץ ובעולם כחומר אינרטי למילוי, כמלאן תחליפי לתערובות אספלטיות, כקשרן לייצוב קרקעות, וכד'. לאפר התחתית קיימים גם שימושים בסלילה כחומרי מילוי בתחזר עלות נמוך ביותר, וכן בשימושים חקלאיים (בפרקציות גסות בעיקר) בכדאיות גבוהה יחסית. כמעט ולא נבחנה היתכנות השימוש באפר פחם תחתית בתערובות אספלטיות לסלילה.

בארץ, בתנאי שריפה וייצור חשמל מרביים מעריכים את כמויות האפר הכולל בכ-1.3 מליון טונות לשנה. מתוך כמות זו כ-10% הנו אפר פחם תחתית, דהינו כ-130,000 טונות לשנה. מתוך כמות זו כמחצית מהחומר הוא חולי דק-גרגירי בגודל גרגיר מרבי של עד 5 מ"מ.

פוטנציאל הניצול החוזר העיקרי של אפר התחתית הוא ביישומים חקלאיים. ניצול זה הנו במקטעים הגסים בלבד. לעומת זאת, עד עתה לא נמצא כל שימוש הנדסי כלכלי במרכיב החולי הדק של אפר התחתית.

2.3 פוטנציאל התשתית התחבורתית

התשתית התחבורתית חופנת בתוכה פוטנציאל אדיר לניצול ומיחזור פסולת מוצקה ומוצרי לוואי תעשייתיים. אפר פחם, סיגי פלדה, פסולת גומי (צמיגים), פלסטיק וזכוכית ניתנים לשילוב והחלפה בשכבות המיסעה השונות. התערובת האספלטית המשמשת לשכבות העליונות-נושאות של מסעות כבישים ומסלולים מהווה פוטנציאל משמעותי מעשי למיחזור וקליטת כמויות גדולות של אפר פחם תחתית.

בארץ מיוצרים כיום כ-5 מיליון טונות של תערובות אספלטיות לסלילה בשנה. בתוספת אפר תחתית בשיעור של 10-15 אחוזים ממשקל התערובת, פוטנציאל השוק המרבי יכול להגיע בשנים הקרובות עד לכדי אפשרות קליטה של בין 500,000 ועד 750,000 טון אפר פחם תחתית לשנה. גם ניצול חלקי של פוטנציאל זה בשיעור של חמישית מהתחום התחתון שווה ליותר מכל כמות אפר התחתית המופקת בשנה בארץ. פוטנציאל זה, שהינו מעשי וריאלי ביותר, יכול ליצור מצב חיובי למדי בו הביקוש לאפר פחם תחתית יהיה גדול מההיצע הקיים. מצב זה ימריץ את פיתוחן של מערכות איסוף ויפתח את המודעות הכללית למיחזור פסולת מוצקה ומוצרי לוואי בקרב האוכלוסייה.

3. אפיון כללי של אפר פחם תחתית

3.1 תיאור כללי ושימושים

תהליך הפקת חשמל בתחנות כוח המופעלות ע"י פחם כולל טחינת הפחם ושריפתו. מבין החומר שאינו נשרף כ-80% הינם אפר הפחם המרחף והשאר הוא אפר פחם תחתית. אפר פחם תחתית מורכב מגרגירים אפורים כהים, גסים וזוויתיים. הם נקבוביים ופריכים (בספרות מדמים אותם ל"פופקורן") וגודל חלקיקיו נע בין גודל של חצץ לגודל של חול דק. אפר פחם תחתית מכיל אלומינה, ברזל, סיליקה וכמויות קטנות של מגנזיום, סידן וגופרה.

ככלל, קיימים מספר שימושים הנדסיים עיקריים באפר פחם תחתית:

- מלאן מבני.
- חומר מילוי למיסעות ולקרקע תומכת מיסעות.
- אגרגט ומלאן לאספלט.
- שימוש בגות.
- "ניקוי – חול" (ניקוי בלחץ).
- שליטה בכמויות הקרח והשלג בכבישים.
- סינון ופילטרציה.
- אגרגט בצמנט ומוצרי בטון.

ביחס לחומרים פסולת אחרים המשמשים כאגרגטים וכמלאנים, אפר פחם תחתית אינו מסוכן, עלותו נמוכה יותר, התועלת מיחידת משקל אחת שלו גבוהה יותר והוא מרוכז יותר, כך שניתן להשתמש בו בשכבות עבות יותר. בדיקות ברחבי העולם אף הראו כי השימוש באפר פחם תחתית מפחית התקפות סולפטיות ביסודות מבטון כאשר הוא משמש כמלאן. בדיקות שנערכו בארצות הברית הוכיחו כי אפר פחם תחתית אינו רעיל ואינו פוגע בסביבה ולכן מומלץ להשתמש בו למטרות מבניות.

השימושים העיקריים באפר פחם תחתית בתחום התשתיות התחבורתיות הינם:

א. חומר מילוי

אפר פחם תחתית על כל מרכיביו, הגסים והדקים, משמש כמילוי אינרטי בסוללות כבישים ומסילות ברזל. האפר מיושם במצבו הטבעי תוך כדי תכנון ובקרה על הצפיפות והחוזק. בארץ יושם שימוש זה הן בכבישי מע"צ והן בכביש תוצה ישראל.

ב. מצעים ותשתיות גרנולרית

אפר פחם תחתית משמש גם כאגרגט גרנולארי למצעים ושכבות תשתית בלתי מיוצבות בעבודות סלילה, בעיקר במקטעים הדקים. על מנת למלא את הדרישות בעבודות מסוג זה, יש לערבב פרקציות דקות של אפר פחם תחתית עם אגרגטים מינראליים רגילים לפני השימוש בו בשכבות מצע ותשתית. לעיתים נדרשים גם

ניפוי וגריסה של אפר פחם תחתית, לפני השימוש בו, מאחר וחלק מגרגיריו נחשבים גדולים מדי (מעל 19 מ"מ).

ג. אגרגט בתערובות אספלטיות:

אפר פחם תחתית משמש כתחליף לאגרגט הדק בתערובות אספלטיות חמות. בשל כושרם המיכני הנמוך יחסית של גרגירי אפר הפחם, נהוג להשתמש באפר פחם תחתית בתדירות גבוהה יותר בשכבות התשתית של המיסעות (תשתיות אספלטיות), מאשר בשכבות העליונות.

לצורך השימוש באפר פחם תחתית בעבודות הסלילה נהוג בדרך כלל לנפות את החלקיקים הגדולים יותר של אפר פחם תחתית ולערבב את החלקיקים הדקים הנותרים עם שאר האגרגטים בתערובת האספלטית. כמו כן, נדרש להוציא את הסולפידי מתוך אפר פחם תחתית לפני השימוש בו מאחר והוא חומר יקר, בלתי יציב ויוצר כתמים אדומים כאשר נחשף למים למשך תקופה ארוכה מדי.

האיגוד האמריקאי לאפר פחם דיווח לדוגמא כי בשנת 1996 נעשה שימוש בכ-16,000 טון אפר פחם תחתית בתערובות אספלטיות.

ד. אגרגט מיוצב:

אפר פחם תחתית משמש גם בשכבות מיוצבות בעבודות שונות. תערובות מייצבות מכילות לרוב מלבד אפר הפחם גם אגרגטים מינראלים רגילים וחומרים קשרניים שונים, שמטרתם לקשר בין האגרגטים ולהקנות לתערובת חוזק נשיאה גדול יותר. בעת השימוש באפר פחם תחתית כאגרגט מיוצב, יש לשמור על רמת הרטיבות של התערובת ועל גודל הגרגירים בה. כמו כן נהוג לסלק מאפר פחם תחתית חומרים מזיקים כגון סולפידיים לפני השימוש בו.

ה. חומר מילוי במבנים תומכים:

אפר פחם תחתית משמש כחומר מילוי במבנים תומכים כגון קירות תומכים, תמיכות לגשרים, תמיכות לסכרים ותעלות. בכדי שאפר התחתית יתאים לעבודות אלו יש להביא את תכולת הרטיבות שלו למצב אופטימאלי, לסלק ממנו את הגרגירים המזיקים (הבלתי יציבים) ולוודא שהחומר הנותן אינו קורוזיבי. כמו כן, יש לנפות את הגרגירים הגדולים (שגודלם עולה על 19 מ"מ).

ו. אגרגט במילוי נוזלי:

אפר פחם תחתית משמש כאגרגט בתערובות מילוי נוזליות. מאחר וברוב תערובות אלו נעשה שימוש באנרגיית הידוק נמוכה, אין צורך בהכנת מיוחדת של אפר פחם תחתית לפני השימוש בו. אין צורך להביאו לתכולת רטיבות כלשהי מאחר וניתן לשלוט בכמות המים בתערובת הנוזלית ובכך להגיע לרמת הנוזילות הרצויה של התערובת.

3.2 תכונות אופייניות של אפר פחם תחתית

לאפר פחם תחתית גרגרים זוויתיים עם טקסטורת מעטפת נקבובית מאוד. גודל גרגרי האפר נעים מגודל של חצץ ועד לגודל של גרגר חול דק. אפר פחם תחתית הוא חומר מדורג היטב בדרך כלל, למרות שלעיתים ניתן למצוא מגוון של גרגירים בגדלים שונים בתוך דגימות הנלקחות מתחת הכוח בזמנים שונים. אפר פחם

תחתית הוא ברוב המקרים בעל גרגרים בגודל של חול, בדרך כלל 90%-50% עובר נפה 4 (4.75 מ"מ), 60%-10% עובר נפה 40 (0.42 מ"מ), 10%-0% עובר נפה 200 (0.075 מ"מ), כאשר בדרך כלל גודל הגרגר הגדול ביותר נע בין 19 מ"מ ל-38.1 מ"מ.

בטבלה מס' 3.1 שלהלן ניתן לראות השוואה בין אנליזות ניפוי שונות של אפר פחם תחתית :

טבלה מס' 3.1: השוואה בין אנליזות ניפוי שונות של אפר פחם תחתית; אחוזים עוברים (לפי FHWA *)

Sieve Size	Bottom Ash		
	Glasgow, WV	New Haven, WV	Moundsville, WV
38 mm (1-1/2 in)	100	99	100
19 mm (3/4 in)	100	95	100
9.5 mm (3/8 in)	100	87	73
4.75 mm (No. 4)	90	77	52
2.36 mm (No. 8)	80	57	32
1.18 mm (No. 16)	72	42	17
0.60 mm (No. 30)	65	29	10
0.30 mm (No. 50)	56	19	5
0.15 mm (No. 100)	35	15	2
0.075 mm (No. 200)	9	4	1

המשקל היחסי של אפר פחם תחתית הוא פונקציה של ההרכב הכימי שלו: ככל שתכולת הפחמן גבוהה יותר, כך המשקל העצמי נמוך יותר. אפר פחם תחתית בעל משקל עצמי נמוך יותר הוא בעל טקסטורה נקבובית יותר, המתבטאת ביכולת נמוכה לעמוד בהעמסה או בהידוק. בטבלה 3.2 ניתן מוצגות מספר תכונות פיסיקליות אופייניות של אפר פחם תחתית. ניתן לראות כי בהשוואה לאגרגטים אפר התחתית הנו בלתי פלסטי, בעל ערכי משקל יחסי וצפיפות נמוכים, אך בעל ערכי ספיגות הדומים לאלה של אגרגטים רגילים.

טבלה מס' 3.2: תכונות פיסיקליות אופייניות של אפר פחם תחתית (לפי FHWA *)

Property	Bottom Ash
Specific Gravity ⁽⁶⁾	2.1 - 2.7
Dry Unit Weight ⁽⁶⁾	720 - 1600 kg/m ³ (45 - 100 lb/ft ³)
Plasticity ⁽⁶⁾	None
Absorption ⁽⁴⁾	0.8 - 2.0%

מבחינת ההרכב הכימי, אפר פחם תחתית מכיל בעיקר סיליקה, ברזל ואלומינה, וכמויות קטנות של סידן, מגנזיום, וסולפט. הרכב זה עשוי להשתנות בהתאם למקור ממנו מגיע הפחם אל תחת הכח. טבלה מס' 3.3 מציגה הרכבים כימיים טיפוסיים של אפר פחם תחתית, בהתאם לסוג הפחם ולמקור ממנו הוא מגיע:

טבלה מס' 3.3: הרכבים כימיים טיפוסיים של אפר פחם תחתית באחוזים משקליים (FHWA)

Ash Type:	Bottom Ash				
Coal Type:	Bituminous		Sub-bituminous	Lignite	
Location	West Virginia	Ohio	Texas		
SiO ₂	53.6	45.9	47.1	45.4	70.0
Al ₂ O ₃	28.3	25.1	28.3	19.3	15.9
Fe ₂ O ₃	5.8	14.3	10.7	9.7	2.0
CaO	0.4	1.4	0.4	15.3	6.0
MgO	4.2	5.2	5.2	3.1	1.9
Na ₂ O	1.0	0.7	0.8	1.0	0.6
K ₂ O	0.3	0.2	0.2	-	0.1

בשל נוכחות של מלח ולעיתים תכולת PH נמוכה, עלול אפר פחם תחתית לפתח תכונות קורוזיביות. לכן, דרושה בדיקה מעמיקה של תכונות אפר פחם תחתית לפני השימוש בו בעבודות כגון סכרים, תעלות וכדומה, בהן יש סיכוי רב יותר לקורוזיה.

טבלה מס' 3.4 מציגה את טווחי התכונות הנדסיות העיקריות של אפר פחם תחתית ממקורות טיפוסיים:

טבלה מס' 3.4: טווחי התכונות הנדסיות העיקריות של אפר פחם תחתית ממקורות טיפוסיים (ע"פ FHWA)

Property	Bottom Ash
Maximum Dry Density kg/m ³ (lb/ft ³) ⁽⁷⁾	1210 - 1620 (75 - 100)
Optimum Moisture Content, % ⁽⁷⁾	Usually <20 12 - 24 range
Los Angeles Abrasion Loss % ⁽⁴⁾	30 - 50
Sodium Sulfate Soundness Loss % ⁽⁴⁾	1.5 - 10
Shear Strength (Friction Angle) ⁽⁶⁾	38 - 42° 32 - 45° (<9.5 mm size)
California Bearing Ratio (CBR) % ⁽⁶⁾	40 - 70
Permeability Coefficient cm/sec ⁽⁶⁾	10 ⁻² - 10 ⁻³

כפי שניתן לראות בטבלה לעיל, בהשוואה עם אגרגט מינראלי רגיל, הצפיפות היבשה המקסימלית של אפר פחם תחתית נמוכה בדרך כלל בכ-25%-10% ותכולת הרטיבות האופטימאלית שלו גבוהה יותר. ערכי השחיקות גבוהים יחסית והאפר המהודק הנו בעל ערכי מת"ק התואמים חומרי מצע מהודקים.

באופן כללי מתקבל כי, לאפר פחם תחתית תכונות ייחודיות בסדר גודל דומה לאגרגטים מינראלים רגילים כאשר הוא קל יותר, נקבובי יותר, ובעל כושר מיכני נמוך יותר.

3.3 תכונות אפר התחתית בחקירה זו

כאמור, אפר פחם תחתית שנכלל בחקירה זו כלל את המקטע הדק בלבד של אפר הפחם התחתית הכולל שהושג בתהליך בעירת הפחם. אפר זה הנו בעל גרגיר מכסימלי מעשי בגודל של כ-5 מ"מ. דירוגו של אפר פחם זה מוצג בטבלה מס' 3.5, וזאת בהשוואה לחול המחצבה המינראלי הרגיל ששימש ליצירת מדגמי הבקרה, ושיוחלף באפר התחתית בקומבינציות הניסוי השונות.

טבלה מס' 3.5: אנליזת ניפוי של אפר פחם תחתית ושל חול מחצבה שנכללו בחקירה

אחוז עובר (%)		נפה (מס'/מ"מ)
חול מחצבה	אפר פחם תחתית	
100	100	3/8 (9.50)
100	97.6	4 (4.75)
84.6	89.5	10 (2.00)
52.5	68.1	20 (0.85)
39	48.8	40 (0.425)
28.3	39.2	80 (0.180)
20.5	26.9	200 (0.075)

ניתן לראות כי דירוג אפר התחתית וחול המחצבה תואמים באופן עקרוני כאשר אפר הפחם הנו דק גרגירי יותר בפרקציות הדקות ועשיר יותר במלאן. באם משווים את דרוג אפר הפחם הנ"ל הדירוגים המוצגים בטבלה מס' 3.1, ניתן לראות שהוא תואם את אפר התחתית מ-Glasgow (שהנו גם במקטע דק), כאשר האפר הישראלי עשיר כמעט פי שלושה בכמות המלאן. יתר אפרי התחתית בטבלה מס' 3.1 כוללים גם את הפרקציות הגסות, ולכן אינם ברי השוואה ישירה.

תכונותיו האינדיקטיביות של אפר פחם תחתית שנכלל במחקר מוצגות ומושוות בטבלה מס' 3.6. ניתן לראות כי אפר התחתית הנו בלתי פלסטי, ובעל משקל יחסי נמוך בהשוואה לחול האגרגטי הרגיל. בתכונות אלה הוא תואם גם את הערכים המוצגים בטבלה מס' 3.2 לגבי אפרי תחתית מחו"ל. יש לציין כי למרות תכולת המלאן הגבוהה יחסית, נמצא באפר התחתית שיעור שווה-ערך-חול גבוה יחסית בהשוואה לחול המחצבה.

טבלה מס' 3.6: תכונות אינדיקטיביות בסיסיות של אפר התחתית בהשוואה עם חול מחצבה

תכונה	אפר פחם תחתית	חול מחצבה
משקל יחסי דקים	2.08	2.8
שווה ערך החול (%)	64	57
גבולות אטגברג	N.P	N.P

4. חקירה מקומית מקדימה

4.1 כללי

לפני ההצגה והדיון בחקירת תכונות תערובות אספלטיות הכוללות אפר פחם תחתית, מן הצורך להזכיר ולסכם חקירה מקומית מקדימה בנושא השימוש באפר פחם תחתית בתערובות אספלטיות ובחומרי מצע לסלילה בוצעה בארץ בסוף שנות השמונים. החקירה, במימון ה"חברה הלאומית לאספקת פחם", בוצעה ע"י ל.ק.י. – מהנדסי תחבורה יועצים במעבדות המיבדקה לקרקע ודרכים בטכניון*. אמנם נושא המחקר נקרא "שימוש בפסולת פחם תעשייתית לתערובות אספלטיות ולשכבות מצע במיסעות", אולם באופן מעשי סוג האפר שנחקר הנו אפר פחם תחתית טיפוסי שנוצר בתהליך שריפת הפחם בתחנות כוח לחשמל.

המחקר כלל שלושה שלבים עיקריים:

- הערכת תכונות פסולת הפחם.
- הרכבת והערכת ערובות אספלטיות קרות מפסולת פחם.
- הערכת תכונות פסולת פחם בלתי מיוצבת כחומר מצע.

עיקרי חקירה זו ומסקנותיה, הקשורים לתכונות פסולת הפחם ולתערובות אספלטיות מפסולת פחם, מסוכמים בסעיפים הבאים:

3.2 תכונות אפר הפחם

אפר הפחם הובא למעבדה בשקיות ניילון כתערובת גרנולרית בדירוג וברטיבות טבעית כפי המייצג את החומר לאחר השריפה והטיפול. במצב טבעי זה בוצעו בחומר סדרת בדיקות בסיסיות המייצגות את התכונות האינדיקטיביות והפיסיקליות השגורות לגבי אגרגטים לשכבות מיסעה. תוצאות הבדיקות מסוכמות בטבלאות מס' 4.1 עד 4.3, המובאות כלשונן מפרסום זה*.

טבלה מס' 4.1: הדירוג הטבעי של פסולת הפחם

#200	#80	#40	#20	#10	#4	3/8"	1/2"	3/4"	נפח
23.5	31	41	47	57	72	93	94	100	אחוז עובר

* אילן ישי "שימוש בפסולת פחם תעשייתית לתערובות אספלטיות ולשכבות מצע במיסעות", הוכן ע"י ל.ק.י. עבור החברה הלאומית לאספקת פחם בע"מ

טבלה מס' 4.2: תוצאות בדיקת הידרומטר של החול הדק באפר (עובר נפה #40)

פרופורציה משקלית (%)	מרכיב
73	חול (#40 - #200)
20	טין (5µ - #200)
7	חרסית (< 5µ)

טבלה מס' 4.3: סיכום התכונות האינדיקטיביות-פיסיקליות של פסולת הפחם

תוצאות הבדיקה	התכונה הנבדקת
70%	חכולת רטיבות טבעית (%)
1.75	משקל יחסי מדומה (+#4)
1.24	משקל יחסי ממשי (+#4)
2.14	משקל יחסי מדומה (-#4)
24.0	ספיגות למים (%)
0.53	משקל מרחבי יבש בערימה
N.P.	גבולות סומך
51%	שחיקות לוס אנג'לס - קבוצה B (%)

מתוצאות אלה ניתן לראות כי זירוגו של אפר התחתית מצביע על חומר בעל פילוג גרנולומטרי רציף ומודרג, החומר עשיר במלאן שרובו בפרקציות הטיניות (מלאן גס יחסית).

אפר התחתית שהובא ונבדק מאופיין במשקלים יחסיים נמוכים ביותר, המתבטאים גם בספיגות גדולה ביותר למים. משקלים יחסיים אלה הנם נמוכים, והספיגות למים גבוהה בהרבה, בהשוואה לערכים מקובלים באגרטים מינראליים קונבנציונאליים השימושיים לשכבות המיסעה השונות. ערכים אלה נובעים כמוכח מהאופי הנקבובי והפריך, ומהטקסטורה המיוחדת של חלקיקי אפר הפחם. משמעות ערכים מיוחדים אלה עלולה להתבטא בערכים מוחלטים נמוכים של צפיפות בשכבות מיסעה מהודקות ובערכים גבוהים של תכולות רטיבות בתערובות גרנולאריות או תכולות ביטומן אופטימאליות בתלות באופי השכבה.

האופי הנקבובי והפריך של חלקיקי אפר פחם התחתית מתבטא גם בערכי שחיקות גבוהים מהמקובל. למרות התוצאה הגבוהה, ניתן לקבוע שמחצית מגרגירי החומר הנם קשים ועמידים במבחן השחיקות החמור שבבדיקת לוס אנג'לס. נקבע כי תופעה זו כנראה נובעת מהטקסטורה המיוחדת של החלקיקים שגורמת לשחיקה ושבר רבים בתחילת התהליך, אך משאירה גרעיני חלקיקים עגולים יחסית, ובעלי כושר מיכני גבוה בהמשך תהליך השחיקה.

תכולת הרטיבות הטבעית הגבוהה של החומר כפי שהובא (בשיעור של כ-70%), נובעת כמובן מאופי תהליך האיסוף והטיפול לאחר בעירת הפחם, וכן מהאופי הנקבובי של החלקיקים. נמצא שעם השארת החומר ניח בערימה, חל ניקוז גרביטציוני משמעותי של המים. בכל אופן, הספיגות למים הגבוהה יחסית מרמזת על תכולת רטיבות שירית גבוהה שתאפיין את החומר בחשיפות בתנאים אקלימיים שונים.

באשר לתכונות האפר עצמו, המחקר המקדים קובע כי לא ניתן להשוות ישירות את תוצאות הבדיקות הנ"ל לדרישות מפרטיות עבור אגרגטים למיסעות, היות ואפר התחתית הנו חומר מיוחד בעל אופי ותכונות שהן שונות לחלוטין מאלה המאפיינות אגרגטים מינראליים רגילים. המחקר מציע, לעומת זאת, לבחון את התכונות הנ"ל יחד עם התכונות ההנדסיות של התערובות המהודקות הכוללות אפר תחתית, והמייצגות את השכבות השונות.

4.3 תכונות תערובות אספלטיות

מטרתו העיקרית של המחקר המקדים הייתה לבחון את היתכנותן ותכונותיהן של תערובות אספלטיות בשימוש באפר פחם תחתית כמרכיב הגרנולארי. על מנת להרכיב מוצר כלכלי וזול ככל האפשר, הוחלט לכלול במחקר זה תערובות אספלטיות קרות בלבד, בהן נעשה שימוש באמולסיות אספלטיות כקשרן הביטומני.

במסגרת המחקר המקדים נבחנו חמישה סוגי תערובות בקומבינציות משתנות, כפי המתואר בטבלה מס' 4.4 הבאה:

טבלה מס' 4.4: חישה סוגי תערובות אספלטיות שנכללו במחקר המקדים

סמול התערובת	דרוג	תכולת רטיבות (%)	סוג האמולסיה	תאור מערכת מרשל בגרף בנספח א' בעמוד:
1	טבעי	0	אניונית HFMS-301	14
2	טבעי	5	אניונית HFMS-301	22
3	טבעי	10	אניונית HFMS-301	20
4	לאחר שחיקה בבדיקה L.A.	0	אניונית HFMS-301	17, 18
5	לאחר שחיקה בבדיקה L.A.	0	קטיונית CMS-301	17, 18

יש להדגיש כי דירוגו הטבעי של החומר הוא זה המבוטא בטבלה מס' 4.1, כאשר דרוג החומר לאחר LA הוא זה המאפיין את החומר לאחר ביצוע בדיקת השחיקה בניסיון לוס אנג'לס. במקרה זה הדירוג מאופיין ב-50% מהחומר שעבר נפה מס' 12, והחלקיקים שנתקבלו הנם יותר אחידים, קוביים או מעוגלים. תכולת הרטיבות בניסוי היא תכולת מים מבוקרת שהוספה לאפר לאחר ייבוש מלא בתנור, ולפני ערבובו עם האמולסיה האספלטית. עוד יש להדגיש כי בכל התערובות כל האגרנט היה מאפר תחתית בלבד.

בכל אחת מחמשת התערובות בוצעה מערכת מרשל מלאה בה נקבעו תכונות הצפיפות, היציבות (חוזק), והניזילות (דפורמציה בתנאי הרס) בתלות בתכולת האמולסיה האספלטית. יש לציין כי מערכות מרשל אלו הוכנו ונבדקו בתנאים ובתהליכים המתאימים לתערובות אספלטיות קרות. מתוך מערכות המרשל נקבעו הערכים האופטימאליים בהתאם לקריטריוני מרשל, כמסוכם בטבלה מס' 4.5, הבאה:

טבלה מס' 4.5: סיכום ערכי מרשל אופטימאליים עבור חמשת תערובות אספלטיות קרות

סמון	דרוג	תכולת רטיבות (%)	סוג האמולסיה	תכולת אמולסיה אופטימלית (%)	* יציבות מכסימלית (ליבראוח)	צפיפות בתכולה אופטימלית (ק"ג/מ"ק)	נזילות בתכולה אופטימלית (1/100")	סוג ומאפייני התערובת			
								סוג	תכולת רטיבות (%)	דרוג	סמון
1	טבעי	יבש	HFMS-301	15	1500	1200	11				
2	טבעי	5	HFMS-301	20	1100	1100	10				
3	טבעי	10	HFMS-301	15	1250	1200	9.5				
4	לאחר L.A.	יבש	HFMS-301	15	1400	1400	11				
5	לאחר L.A.	יבש	CMS-301	15	1150	1400	11				

* היציבות לאחר הכשר של 16 שעות בתנור בטמפ' של 60° הגזידה בטמפ' החדר כ-25°C.

בנוסף לסדרת בדיקות זו בה אופיינו התערובות בתנאים מידיים (ללא כל אשפחה), נערכה בדיקה נוספת לקביעת השפעת זמן ההכשר על הקניית החוזק עם הזמן עד למשך 30 יום. סדרה זו נערכה על תערובת מס' 1 בתכולת הביטומן האופטימלית (ר' טבלאות מס' 4.4 ו-4.5).

התוצאות המוצגות בטבלה מס' 4.5 לעיל הושגו במחקר המקדים עם תכונות תערובות אספלטיות קרות בשימוש באגרנטים מינראליים רגילים, והניבו את המסקנות והמגמות הבאות, המאפיינות תערובות אספלטיות קרות המורכבות מאפר פחם תחתית תעשייתי:

1. תערובות אספלטיות מאפר פחם תחתית מייצגות ערכי חוזק נאותים, ואף לעיתים גבוהים יותר בהשוואה לתערובות אספלטיות קרות מאגרנטים מינראליים בשימוש באותן אמולסיות אספלטיות ובאותם תנאי בדיקה.

2. תערובות אלה מייצגות גם ערכי נזילות נאותים התואמים כולן את הקריטריונים המקובלים לתערובות אספלטיות מכל הסוגים.
3. יציבויות מרביות הושגו בתערובות בדירוג טבעי, באפר פחם יבש ובשימוש באמולסיות אניוניות בעלות ציפה גבוהה (HFMS).
4. השימוש באפר פחם תחתית גרוס לאתר ניסיון לוס אנג'לס לא שיפר את יציבות התערובת, אך לעומת זאת, שיפר את הצפיפות. מגמה זו הושגה עקב הצורה והטקסטורה של החלקיקים שהנם יותר קוביים, כדוריים וחלקים.
5. באופן כללי, צפיפות תערובת אפר הפחם, בהשוואה לתערובות אספלטיות קרות מאגרטים מינראליים רגילים, תואמת את יחס המשקלים הסגוליים של החלקיקים.
6. גם התחזקותה של התערובת עם זמן ההכשר טרם ביצוע הבדיקה, נמצאה כנאותה ותואמת תוצאות השוואתיות המושגות בתערובות קרות עם אגרטים מינראליים רגילים. גזירת התערובת, הן בטמפרטורת החדר והן בהשרייה תקנית בטמפרטורה של 60^o צלזיוס, הצביעה על השגת ערכי חוזק גבוהים התואמים גם קריטריונים מוחלטים לתערובות אספלטיות חמות בשימושים שונים.
7. תנאי האופטימום בתערובות אלה הושגו בתכולת אמולסיה גבוהות ביותר (15-20%) שהן למעלה מפי שלוש מתכולות אופטימאליות השוואתיות המושגות בתערובות המורכבות מאגרטים מינראליים רגילים. למגמה זו משמעות כלכלית נכבדה באם משתמשים בתערובות אספלטיות בהם המרכיב האגרטי הנו כולו מאפר פחם תחתית.

5. חקירת תערובות אספלטייות חמות המכילות אפר פחם תחתית

5.1 כללי

כאמור, חקירה זו מהווה שלב היתכנות ראשוני במחקר מוצע כולל לבחינת תכונות תערובות אספלטייות חמות המכילות אפר פחם תחתית. בחקירה מקדימה זו נבחנה תוספת אפר התחתית בפרקציות הדקות בלבד, כאשר אפר זה מחליף אחוז מסוים מחול המחצבה שבתערובת, המורכבת ברובה מאגרגטים זולומיט ממחצבת חברת מדן בדרום. בהיקפה המוסכם, החקירה התרכזה בסדרת בדיקות אינדיקטיביות תקניות לאפיון אפר התחתית והאגרגטים המינראלים במדגמי הבקרה, וכן מערכות מרשל מלאות בהשוואת תערובות אספלטייות המכילות אפר תחתית למול תערובת הבקרה התקנית המורכבת מאגרגטים מינראליים רגילים בלבד. בנוסף בוצעו בדיקות קיים בתנאי השריה חמה ממושכת, ובדיקות השוואתיות בתערובות תחת תנועת גלגל נע מחזורית.

5.2 תכונות אפר התחתית

כאמור, אפר פחם תחתית שנכלל בחקירה זו כלל את המקטע הדק בלבד של אפר התחתית הכולל שהושג בתהליך בעירת הפחם. אפר זה הנו בעל גרגיר מכסימלי מעשי בגודל של כ-5 מ"מ. תכונותיו של אפר זה, שסופק למחקר בגודלו הסופי ע"י מנהלת אפר הפחם, הוצגו בסעיף 3.3 לעיל.

5.3 התכונות המיידיות של התערובות האספלטייות

5.3.1 כללי

בחקירת היתכנות ראשונית זו נחקרו תכונותיה של תערובת אספלטיית תקנית הכוללת אחוזים שונים של אפר פחם תחתית דק-גרגירי. תכונות אלה הושאו להתנהגות תערובת בקרה המורכבת כולה מאגרגט מינראלי זולומיטי. בתערובות הכוללות אפר תחתית, הוחלף חול המחצבה בכמות המתוכננת של אפר תחתית. התערובות הוכנו בתהליך המעבדתי התקני לשיטת מרשל.

נבחרה תערובת אספלטיית צפופה בגרגיר מכסימאלי של $\frac{3}{4}$ (19 מ"מ), בהתאם לקו דירוג אמצעי העונה לתחומי הדירוג אשר בסעיף 51042 במפרט הבין-משרדי מס' 51. התערובת הורכבה ממקטעי גריסה מוכנים שהובאו ישירות ממחצבת מדן, ומביטומן אספלטני בסיווג AC-30.

5.3.2 מערכות מרשל תקניות

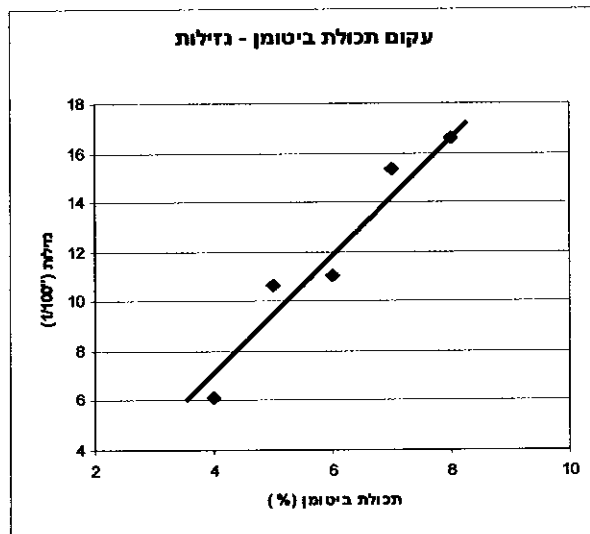
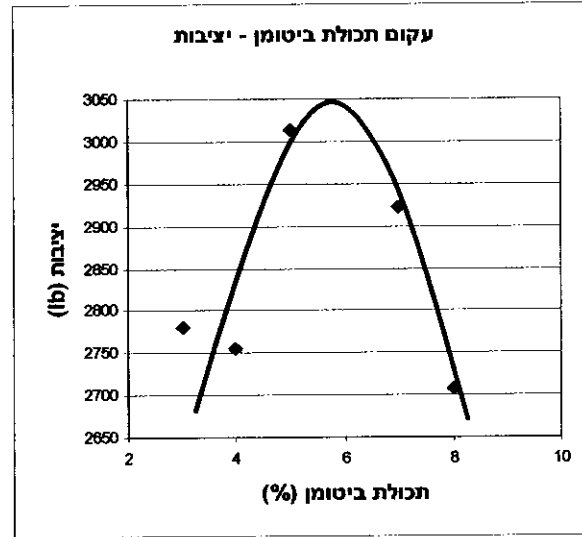
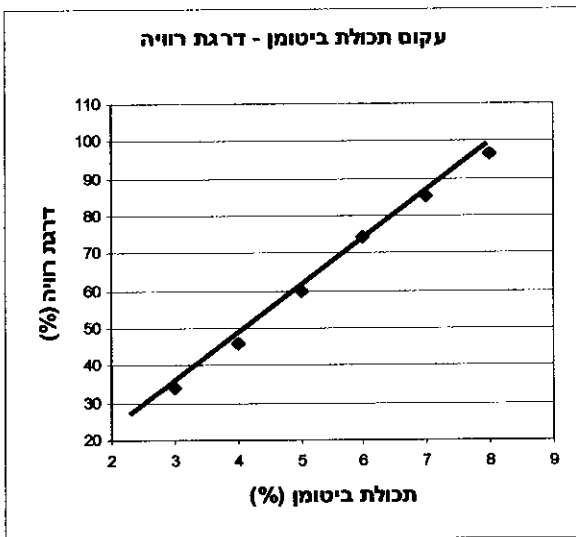
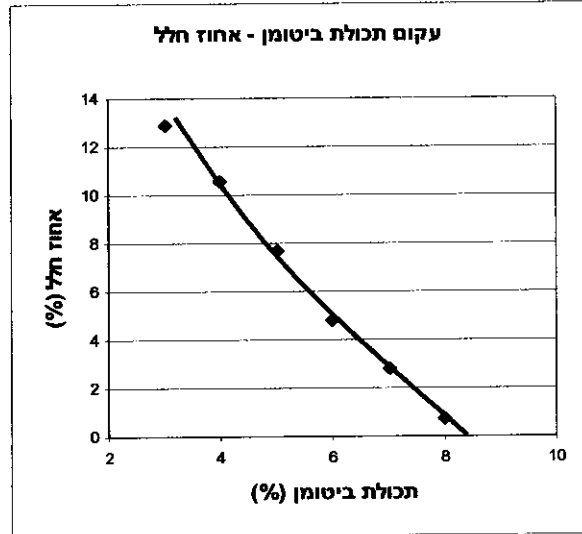
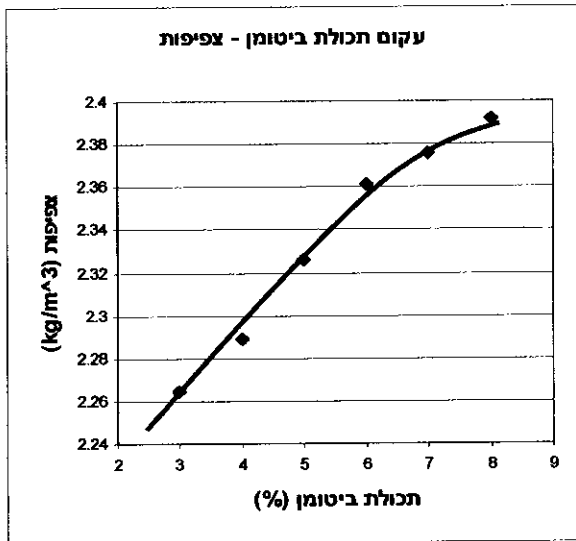
ארבע מערכות מרשל תקניות הוכנו ונבדקו לקביעת השפעת תוספת אפר פחם תחתית דק על תכונותיה המיידיות של התערובת האספלטיית החמה. תערובות אלה כללו תוספת אפר תחתית במינונים הבאים: 0% (בקרה), 5%, 10% ו-20% (אחוזים משקליים).

בכל המדגמים נבדקו וחושבו יחסי משקל-נפח המתבטאים בצפיפות, אחוז החלל בתערובת, ודרגת רוויית הביטומן. כמו כן נבדקו הפרמטרים המיכניים המתבטאים ביציבות ובניילות. תוצאות הבדיקות עבור כל ארבעת המערכות מסוכמים בטבלה מס' 5.1.

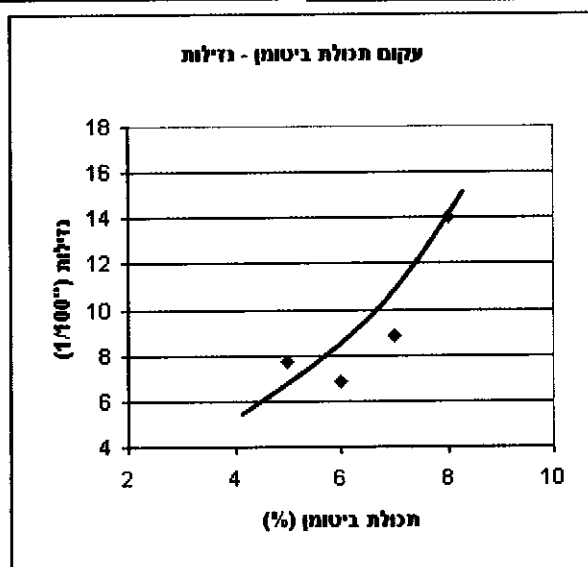
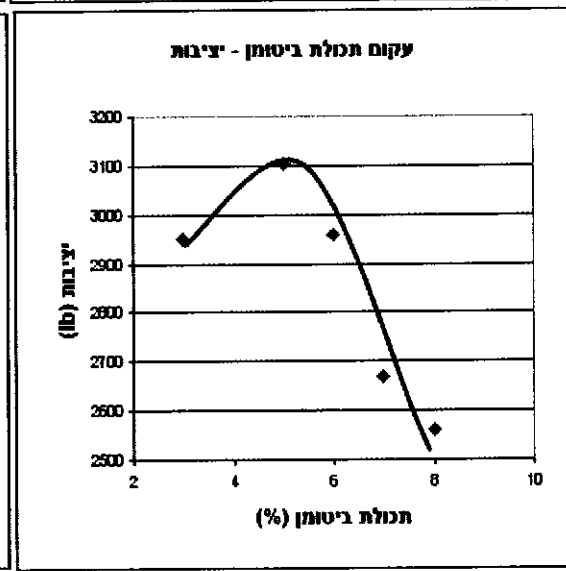
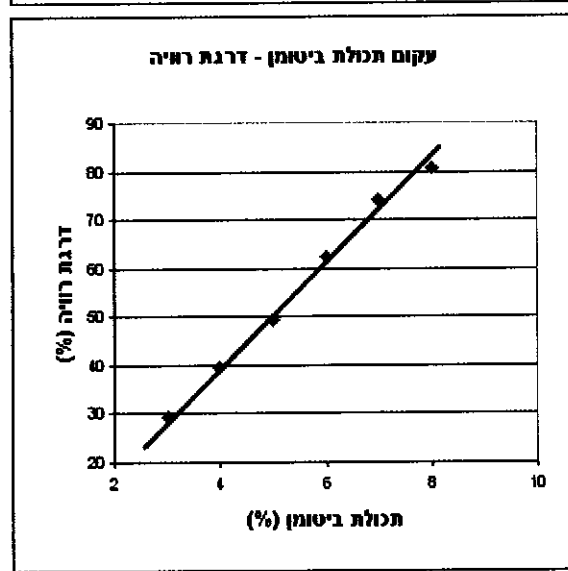
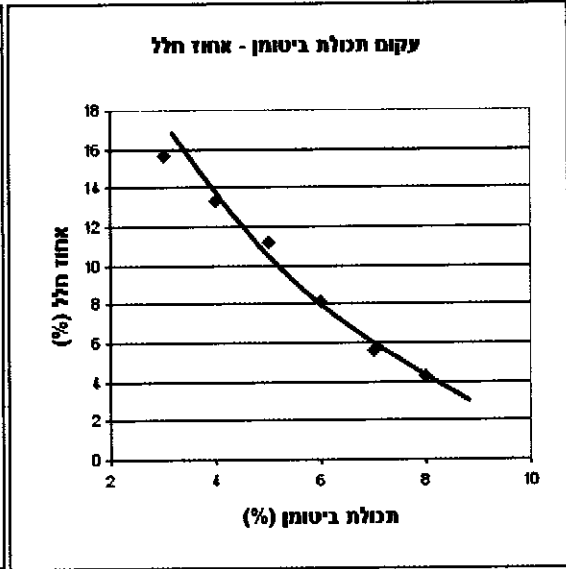
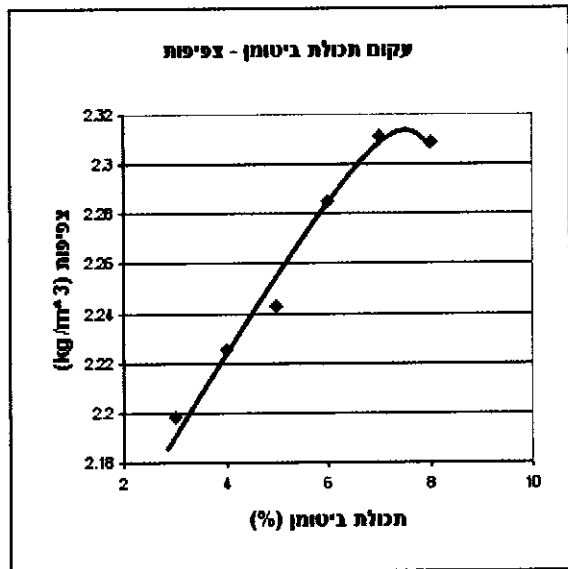
טבלה מס' 5.1: סיכום תוצאות בדיקות מרשל עבור ארבע תערובות אספלטייות עם תכולות אפר פחם תחתית שונות.

תכולת אפר התחתית	תכולת ביטומן (%)	צפיפות (kg/m ³)	אחוז חלל (%)	דרגת רוויה (%)	יציבות (lb)	חילות (1/100")
ללא אפר פחם	3	2264	12.9	34.0	2780	9.9
	4	2289	10.6	45.8	2755	6.1
	5	2326	7.7	59.7	3012	10.6
	6	2361	4.8	74.3	2755	11.0
	7	2376	2.8	85.3	2921	15.3
	8	2392	0.7	96.4	2706	16.6
אפר פחם עם 5%	3	2198	15.7	29.2	2951	9.4
	4	2225	13.3	39.6	2819	10.2
	5	2243	11.2	49.5	3101	7.7
	6	2285	8.1	62.2	2957	6.9
	7	2311	5.6	74.2	2670	8.8
	8	2309	4.3	80.8	2558	14.0
אפר פחם עם 10%	4	2109	14.5	36.3	2409	5.4
	5	2140	12.0	46.6	2459	6.1
	6	2188	8.7	59.7	2783	7.7
	7	2239	5.2	74.7	2591	5.1
	8	2245	3.6	83	2463	6.7
	9	2236	2.7	88.0	2521	11.4
אפר פחם עם 20%	5	1975	16.0	37.7	2271	6.1
	6	2000	13.8	46.0	2392	7.2
	7	2018	11.9	53.8	2442	6.2
	8	2070	8.4	65.9	2440	5.9
	9	2092	9.0	67.2	2363	6.1
	10	2095	4.9	80.7	2456	7.0
	11	2110	2.9	88.7	2498	18.1

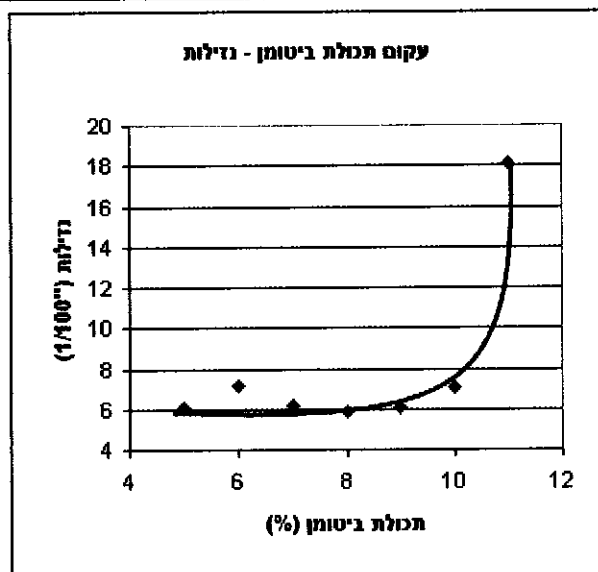
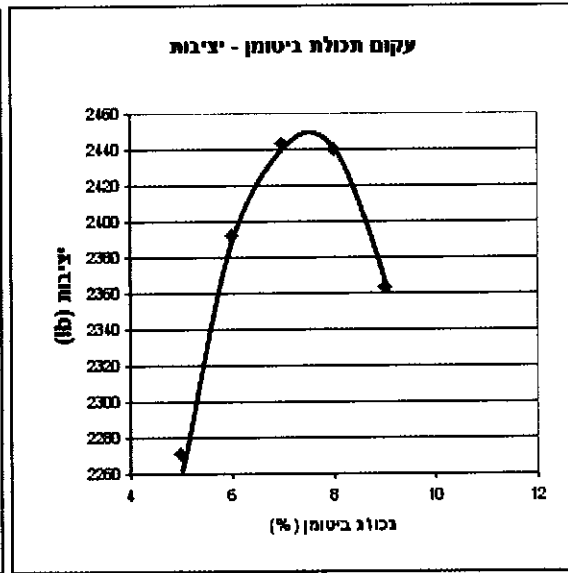
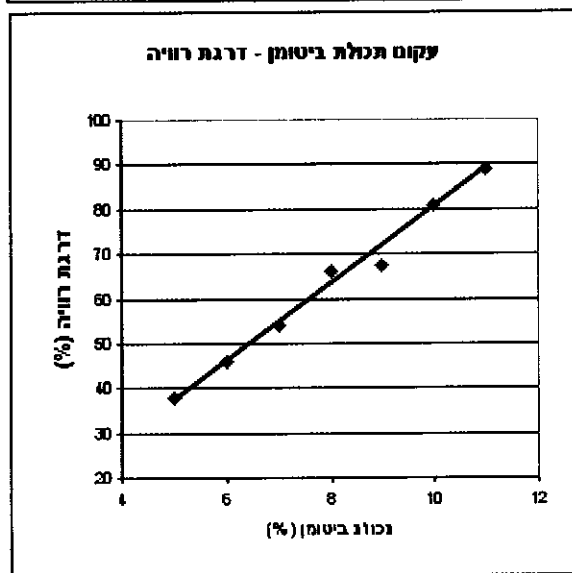
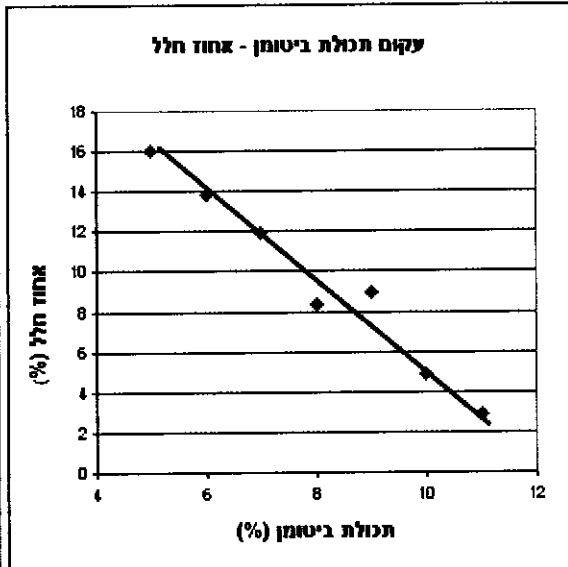
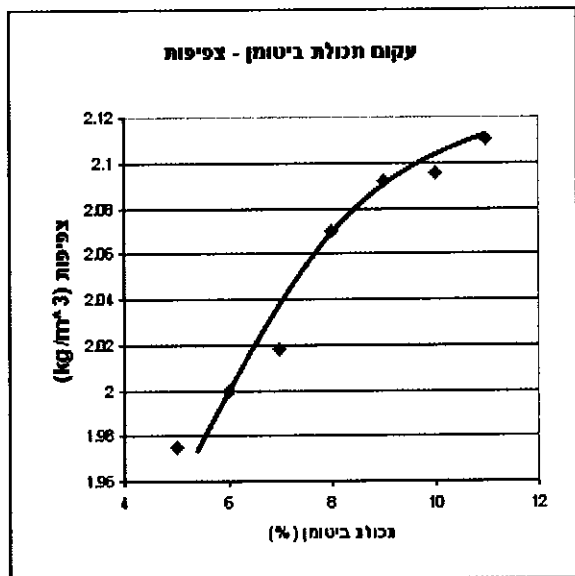
ציורים מס' 5.1 עד 5.4 מציגים את מערכות המרשל, המבטאות את השתנות תכונות התערובת השונות כפונקציה של תכולת הביטומן עבור כל אחד מסוגי התערובת.



ציור מס' 5.1: מערכת מרשל מלאה של תערובת הבקרה – אגרגט דולומיטי ללא אפר פחם תחתית



ציור מס' 5.2: מערכת מרשל מלאה של תערובת אגרגט דלומיטי המכילה 5% אפר פחם תחתית



ציור מס' 5.4: מערכת מרשל מלאה של תערובת אגרגט דלומיטי המכילה 20% אפר פחם תחתית

5.3.3 השפעת תכולת אפר התחתית על תכולת הביטומן האופטימאלית

בהתחשב באספקט הכלכלי הנכבד, מגמה ראשונה שיש לבדוק היא השפעת תכולת אפר פחם תחתית בתערובת על תכולת הביטומן האופטימאלית. עקב נקבוביותם הרבה של חלקיקי אפר התחתית ומרקמם המחוספס, יש לצפות כי עם עליית תכולתו של האפר בתערובת יגדל אחוז החלל בתערובת, תגדל משמעותית ספיגות הביטומן ועמם גם תכולת הביטומן האופטימאלית. בהתאם לתקנים העכשוויים תכולת הביטומן האופטימאלית נקבעת בהתאם לערך החציון של תחום אחוז החלל המפורט לסוג התערובת המסוים. באם נשתמש בקריטריון זה, הרי עם עליית תכולת אפר התחתית בתערובת, יש לצפות לתכולת ביטומן אופטימאליות גבוהות ביותר עקב כמות הביטומן הרבה הנכלאת בנקבובי חלקיקי האפר.

לעומת זאת, יש להניח כי תכולת הביטומן האפקטיבית (זו העוטפת את חלקיקי האגרגט והמשפיעה ישירות על ההתנהגות המיכנית והחוזק של התערובת) תישאר יחסית קבועה ולא תושפע משמעותית עקב עליית תכולת אפר התחתית בתערובת. מכאן יש להניח כי באם תכולת הביטומן האופטימאלית תיקבע בהתחשב בערכי היציבות האופטימאלית, השפעת תכולת אפר התחתית עליה תהיה מתונה יותר.

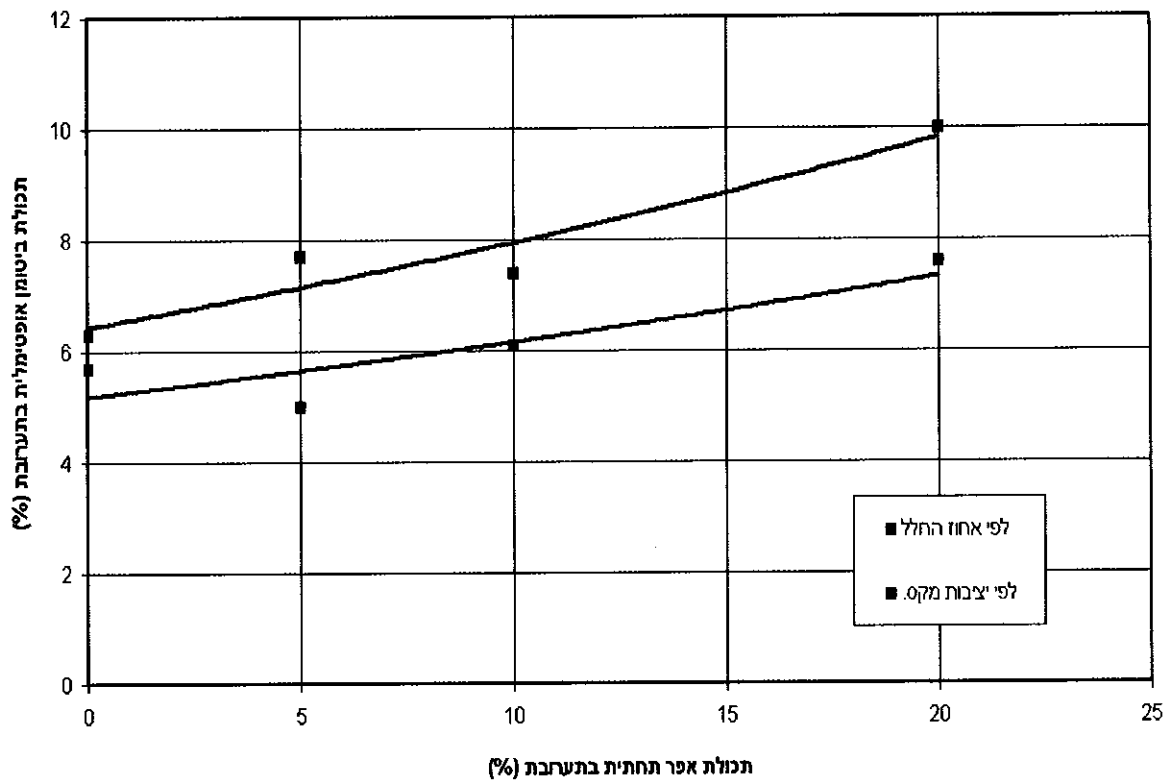
בהסתך על מערכות המרשל, טבלה מס' 5.2 מציגה את השפעת תכולת אפר התחתית בתערובת על תכולת הביטומן האופטימאלית בשתי השיטות. לגבי קריטריון אחוז החלל, נבדקו תערובות אספלטיות מקשרות (חציון אחוז חלל בשיעור של 6.0%) וכן תערובת אספלטיות נושאות (חציון אחוז חלל בשיעור של 4.5%).

טבלה מס' 5.2: השפעת תכולת אפר פחם תחתית בתערובת על תכולת הביטומן האופטימאלית בהתחשב בקריטריוני אחוז החלל וקריטריון מכסימום יציבות

תכולת ביטומן אופטימאלית (%)			תכולת אפר פחם תחתית בתערובת (%)
על פי קריטריון מכסימום יציבות	על פי קריטריון אחוז החלל		
	שכבה אספלטית נושאת, חציון אחוז חלל – 4.5%	שכבה אספלטית מקשרת, חציון אחוז חלל – 6%	
5.7	6.3	5.5	0
5.0	7.9	7.0	5
6.1	7.4	6.7	10
7.6	10.0	9.6	20

התוצאות בטבלה מורות כי אכן חלה באופן עקבי עליה בתכולת הביטומן האופטימאלית עם עלייה בתכולת אפר פחם תחתית בתערובת. העלייה הנה משמעותית ביותר באם תכולת הביטומן האופטימאלית נקבעת בהתחשב בקריטריון אחוז החלל (ובייחוד בתערובת הנושאת), והיא מתונה ביותר באם התכולה האופטימאלית נקבעת בהתחשב בקריטריון היציבות.

ביטוי גראפי לטבלה מס' 5.2 עבור שני הקריטריונים הקיצוניים (אחוז חלל בשכבה נושאת ומכסימום יציבות), מוצג בציר מס' 5.5.



ציור מס' 5.5 : השפעת תכולת אפר תחתית פחם בתערובת האספלטיית על תכולת ביטומן האופטימאלית בהתחשב בקריטריוני אחוז החלל והיציבות המכסימאלית

באופן מעשי מתקבל כי בהתאם לקריטריון אחוז החלל, העלייה בתכולת הביטומן האופטימאלית עם תוספת של 10% אפר תחתית הנה בתחום 1.1-1.2%. קפיצת מדרגה חלה בהגדלת תכולת האפר בתערובת מ-10% ל-20%. במקרה זה חלה עלייה נוספת בתכולת הביטומן האופטימאלית בשיעור נכבד ביותר של 2.6-2.9%. לעומת זאת בהתאם לקריטריון היציבות המכסימאלית, העלייה בתכולת הביטומן היא מתונה ביותר. בתוספת אפר תחתית עד 10% חלה עלייה של 0.4% בלבד בתכולת הביטומן האופטימאלית. בהגדלת תכולת האפר מ-10% ל-20%, העלייה בתכולת הביטומן האופטימאלית היא רק 1.5%. למגמות אלה משמעות כלכלית נכבדה כפי שיסוכם בהמשך.

5.3.4 השפעת תכולת אפר התחתית על תכונות התערובת האספלטיית

לאחר קביעת תכולת הביטומן האופטימאלית עבור תוספות אפר התחתית השונות, ניתן עתה לבחון את השפעת תכולת האפר בתערובת על תכונותיה השונות. בהתאם למגמות ולדיון בנושא השפעת תכולת האפר על תכולת הביטומן האופטימאלית, נקבע כי בתערובת המכילה אפר פחם תחתית מתאים יותר לאמץ ולבחון את קריטריון היציבות המכסימאלית כבסיס לחלות תנאי אופטימום.

בהסתמך על טבלה מס' 5.1, ועל ציורים מס' 5.1 עד 5.4, נקבעו תכונות התערובת השונות בתכולות הביטומן האופטימאליות המתאימות ליציבות מכסימאלית, כמסוכם בטבלה מס' 5.3, הבאה:

טבלה מס' 5.3: סיכום תכונות התערובות השונות בתכולות ביטומן אופטימאליות שנקבעו על פי קריטריון מכסימום יציבות

נזילות (1/100")	יציבות (lb)	דרגת רוויה (%)	אחוז חלל (%)	צפיפות (kg/m ³)	תכולת ביטומן אופטימאלית (%)	תכולת אפר פחם תחתית (%)
11.2	3050	70.0	5.2	2340	5.7	0
7.9	3110	50.0	10.6	2250	5.0	5
7.6	2790	62.0	8.4	2195	6.1	10
6.0	2450	60.0	10.1	2055	7.6	20

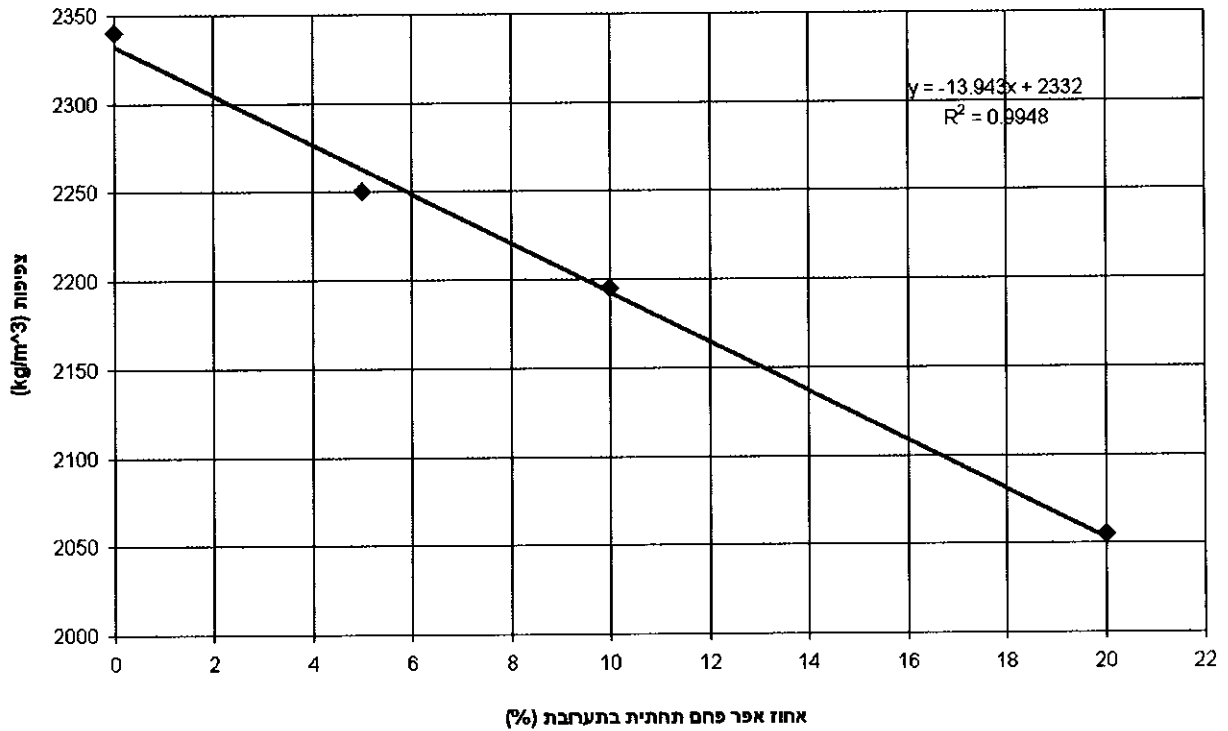
ביטוי גרפי לטבלה מס' 5.3, לגבי השפעת תכולת אפר התחתית על הצפיפות, היציבות ונזילות התערובת האספלטית, מוצג בציורים מס' 5.6 עד 5.8.

באופן כללי, וכמצופה, ניתן לראות כי לתכולת אפר התחתית השפעה רבה על תכונות התערובת בתנאי האופטימאליים (ע"פ קריטריון היציבות המכסימאלית). מתקבל כי עם עלייה בתכולת האפר חלה ירידה הן בצפיפות והן ביציבות. הירידה בצפיפות הנה הדרגתית, והיא נובעת בעיקר עקב המשקל היחסי הנמוך של אפר התחתית המוסף, ויתכן גם עקב התספוס הרב של חלקיקי האפר המפריעים לתזוזת חלקיקים יעילה בעת ההידוק לקבלת מבנה צפוף יותר. ירידה זו בצפיפות מתיישבת גם מגמת העלייה הכללית באחוז החלל עם הגדלת תכולת האפר בתערובת.

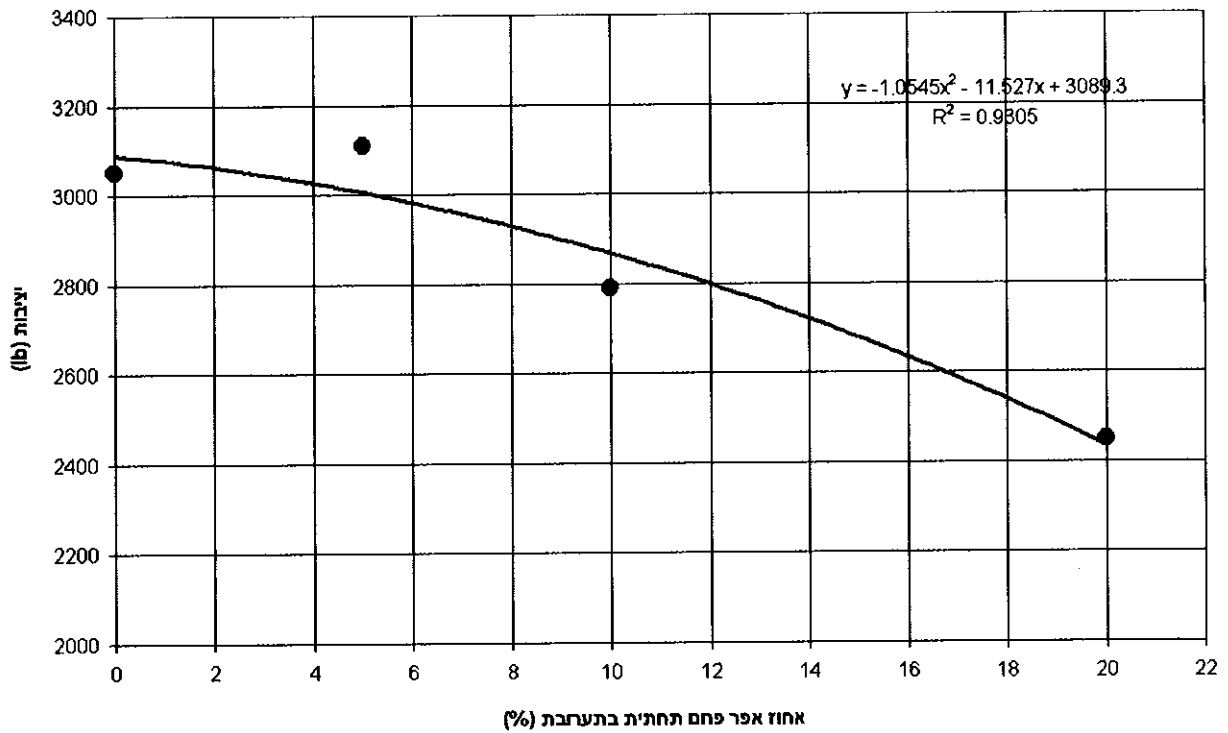
להוציא את התערובת בה תכולת האפר הנה 5% (שהנה תריגה בתוצאותיה), גם הירידה ביציבות (המכסימאלית) עם הגדלת תכולת אפר התחתית הנה הדרגתית. ירידה זו ניתן להסביר הן בהקטנת הצפיפות והן בהקטנת הכושר המיכני של חלקיקי אפר הפחם. למרות מגמת הירידה, ערכי היציבות המוחלטים, בכל תכולות אפר התחתית בתערובת, עומדים בקריטריונים הנדרשים לגבי תערובת אספלטית סוג א' לכל סוגי התערובת.

גם ערכי הנזילות קטנים עם עליית תכולת אפר פחם תחתית בתערובת. ירידה זו חלה למרות העלייה בתכולת הביטומן בתנאי האופטימום הנבדקים. ההסבר לכך הוא כי עקב הנקבוביות הרבה של חלקיקי האפר, חלק נכבד מהביטומן בתערובת "נבלע" בחלליהם החיצוניים ואינו תורם להגדלת הדפורמציה בעת ההרס.

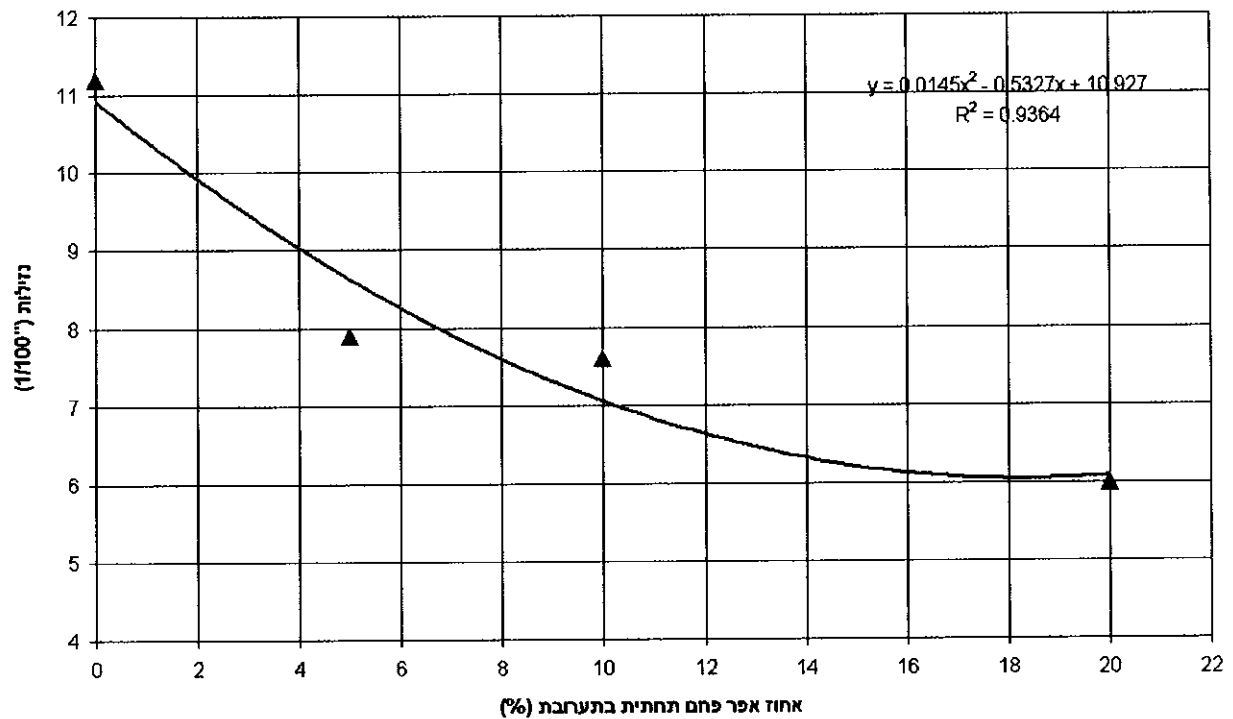
לסיכום ניתן לראות כי למרות ההשפעה הרבה שיש לתכולת אפר פחם תחתית על תכונות התערובת האספלטית, השפעה זו אינה דרמטית והרסנית, אלא היא הדרגתית תוך שמירת תכונות תערובת העומדות באופן כללי בקריטריונים המקובלים. גם הגדלת תכולת הביטומן, בתנאי אופטימום הנקבעים לפי היציבות המכסימלית, הנה מתונה ובתכולת אפר תחתית בשיעור של עד 10%, הנה בתחום סביר גם מהבחינה הכלכלית.



ציור מס' 5.6: השפעת תכולת אפר פחם תחתית בתערובת על הצפיפות בתנאי אופטימום לפי קריטריון היציבות המכסימלית



ציור מס' 5.7: השפעת תכולת אפר פחם תחתית בתערובת על היציבות בתנאי אופטימום לפי קריטריון היציבות המכסימאלית



ציור מס' 5.8: השפעת תכולת אפר פחם תחתית בתערובת על הניזלות בתנאי אופטימום לפי קריטריון היציבות המכסימאלית

5.4 תכונות הקיים של התערובת האספלטית

אחד המדדים לבחינת תכונות הקיים של התערובת האספלטית הוא מידת עמידתה בהשריה חמה וממושכת. קריטריון מפרטי לכך הוא "אחוז החוזק המשתייר" הנמדד לאחר השריית מדגם המרשל במים בטמפרטורה של 60 מעלות צלזיוס למשך 24 שעות. בדיקה מואצת זו מהווה מדד לעמידת התערובת האספלטית בפני נזקי רטיבות.

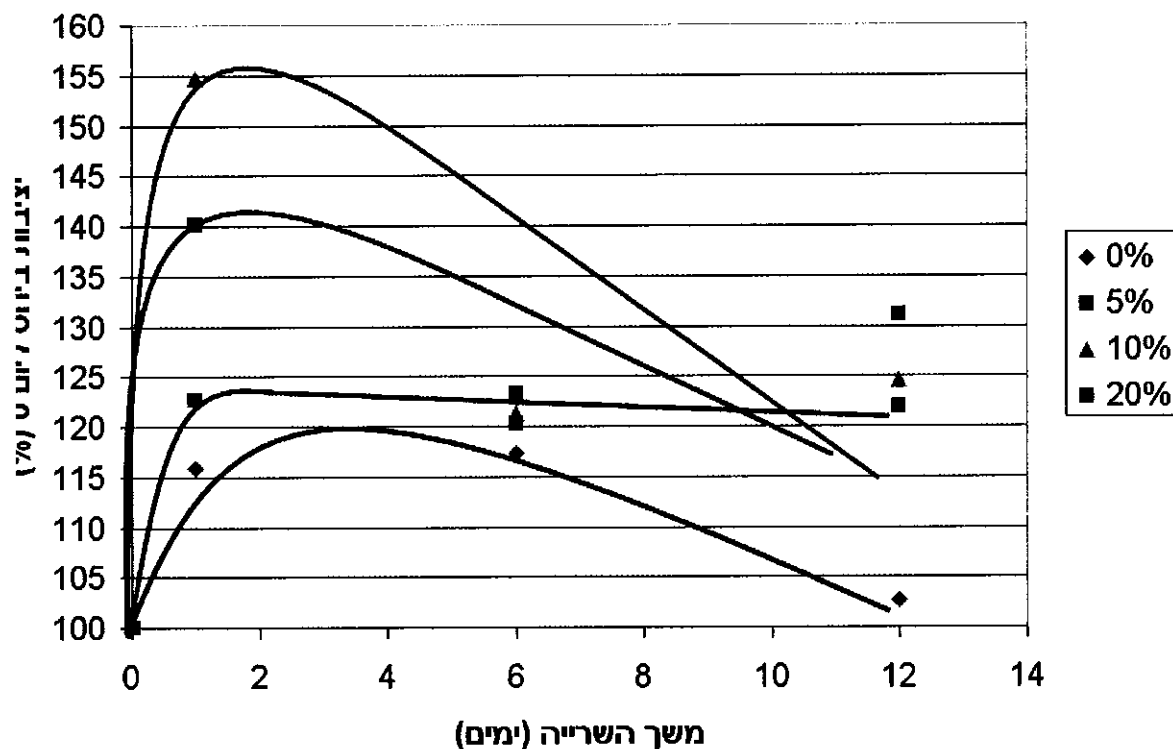
לצורך חקירת השפעת תכולת אפר פחם תחתית על תכונות הקיים של התערובת האספלטית, הוכנו מדגמי מרשל בתנאי ביטומן אופטימאליים (המסתמכים על קריטריון אחוז החלל בתערובת נושאת, ר' טבלה מס' 5.2 לעיל). מדגמים אלה הושרו באמבט החם למישכי זמן שונים עד 12 יום. מדגמים זהים, מבחינת תכולת אפר פחם תחתית ותכולת ביטומן, נגזרו בבדיקת מרשל תקנית מיידית (100% חוזק) וכן לאחר 1, 6, ו-12 ימי השרייה חמה, לקביעת חוזקם המשתייר. השריה חמה ממושכת זו הנה תהליך מואץ לתנאי הפריזה הקריטיים בתנאי שרות ממושכים ואינדיקציה להתנגדות המדגם לנזקי רטיבות בתנאים אלה.

טבלה מס' 5.4 מסכמת את תוצאות בדיקות הקיים בהשריה הממושכת:

טבלה מס' 5.4: סיכום תוצאות בדיקות קיים בהשריה חמה ממושכת עבור ארבע תערובות אספלטיות עם תכולות אפר פחם תחתית שונות ובתכולת ביטומן אופטימאלית מתאימה

תכולת אפר פחם תחתית (תכולת ביטומן) (%)	משך השרייה (ימים)	צפיפות (kg/m ³)	אחוז חלל (%)	דרגת רוויה (%)	יציבות (lb)	נדילות (1/100")
0 (6.3%)	0	2367	4.5	77.0	2975	13.0
	1	2387	3.3	81.4	3445	17.3
	6	2367	4.1	77.8	3490	17.3
	12	2363	4.3	77.1	3055	17.0
5 (7.9%)	0	2310	4.5	80.0	2600	12.3
	1	2316	4.7	78.6	3187	18.9
	6	231	4.9	77.7	3203	20.5
	12	2316	4.7	78.6	3170	23.4
10 (7.4%)	0	2243	4.5	83.3	2533	9.3
	1	2253	3.7	82.2	3918	17.3
	6	2227	4.8	77.9	3073	14.8
	12	2238	4.4	79.7	3156	20.0
20 (10.0%)	0	2100	4.5	81.0	2275	8.8
	1	2112	4.0	83.9	3187	16.1
	6	2115	3.9	84.4	2737	18.0
	12	2117	3.8	84.8	2983	18.3

ביטוי גרפי להשתנות החוזק המשותייר (יציבות משתיירת) של התערובות האספלטיות (בתנאי ביטומן אופטימאליים) בתלות במשך ההשרייה החמה, עבור תכולות אפר פחם תחתית שונות, מוצג בציור מס' 5.9 הבא:



ציור מס' 5.9: חוזק משתייר בתלות במשך ההשרייה החמה עבור תכולות אפר פחם תחתית שונות (בתנאי תכולת ביטומן אופטימאליים המתאימה לקריטריון אחוז החלל עבור תערובת נושאת)

מטבלה מס' 5.4 וציור מס' 5.9 ניתן לראות כי, ללא יוצא מן הכלל, חלה התחזקות במדגמים האספלטיים לכל אורך תקופת ההשרייה. התחזקות זו נצפתה בתערובת הקונבנציונאלית, ללא אפר הפחם, אולם היא מתעצמת עם תוספת אפר הפחם. בתערובות הכוללות אפר פחם תחתית רמת ההתחזקות הגבוהה ביותר מושגת לאחר יום השרייה, אך בזמני השרייה ארוכים יותר היא יורדת ומגיעה עד לערכים של בין 120-130% חוזק משתייר אחרי 12 יום השרייה. זאת לעומת כ-100% בלבד עבור התערובת האספלטית ללא אפר הפחם.

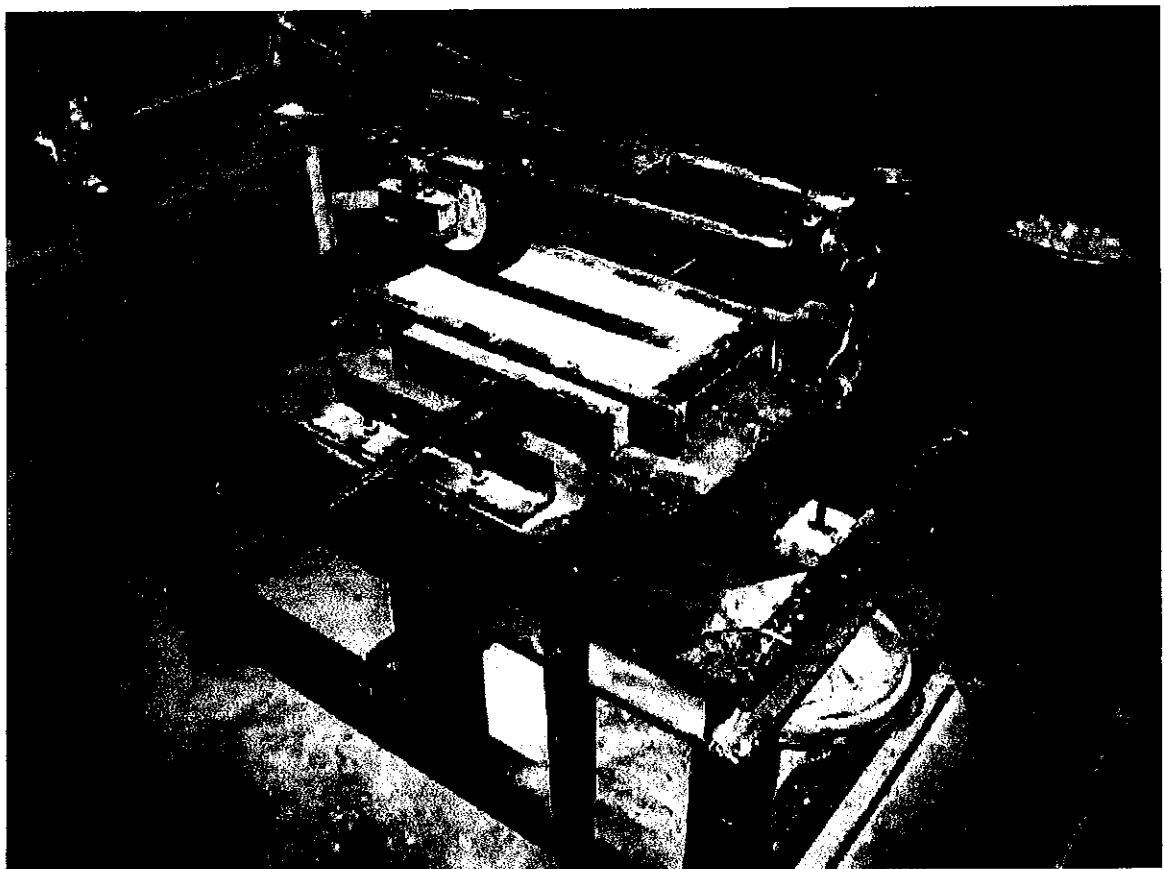
המסקנה המשתמעת היא כי אפר פחם התחתית איננו אינרטי בלבד, אלא הנו כנראה גם אקטיבי מבחינת תרומתו לחיזוק האדהזיה בין הביטומן לאגרגטים בתערובת, ובכך תורם לדחיית נזקי הרטיבות הגורמים בדרך כלל להתקלפות הביטומן (Stripping). יש לציין כי תופעה דומה מושגת כאשר מוסיפים לתערובת אספלטיות רגישות למים מלאן סיד הידראטי, או מוספים מתזקי אדהזיה. עובדה זו מהווה יתרון, וערך מוסף חשוב לתוספת אפר הפחם לתערובת.

5.5 התנהגות התערובת האספלטית תחת תנועת גלגל נע מחזורית

בדיקת הגלגל הנע מאפשרת לקבוע את התנגדות התערובת האספלטית לדפורמציה משתיירת בנתיב הגלגל (חריצה) בתלות במספר מחזורי ההעמסה של הגלגל. בדיקה זו מאפשרת לקבוע מגמות יחסיות בהתנהגות תערובות שונות תחת תנאי העמסה מחזורית זו.

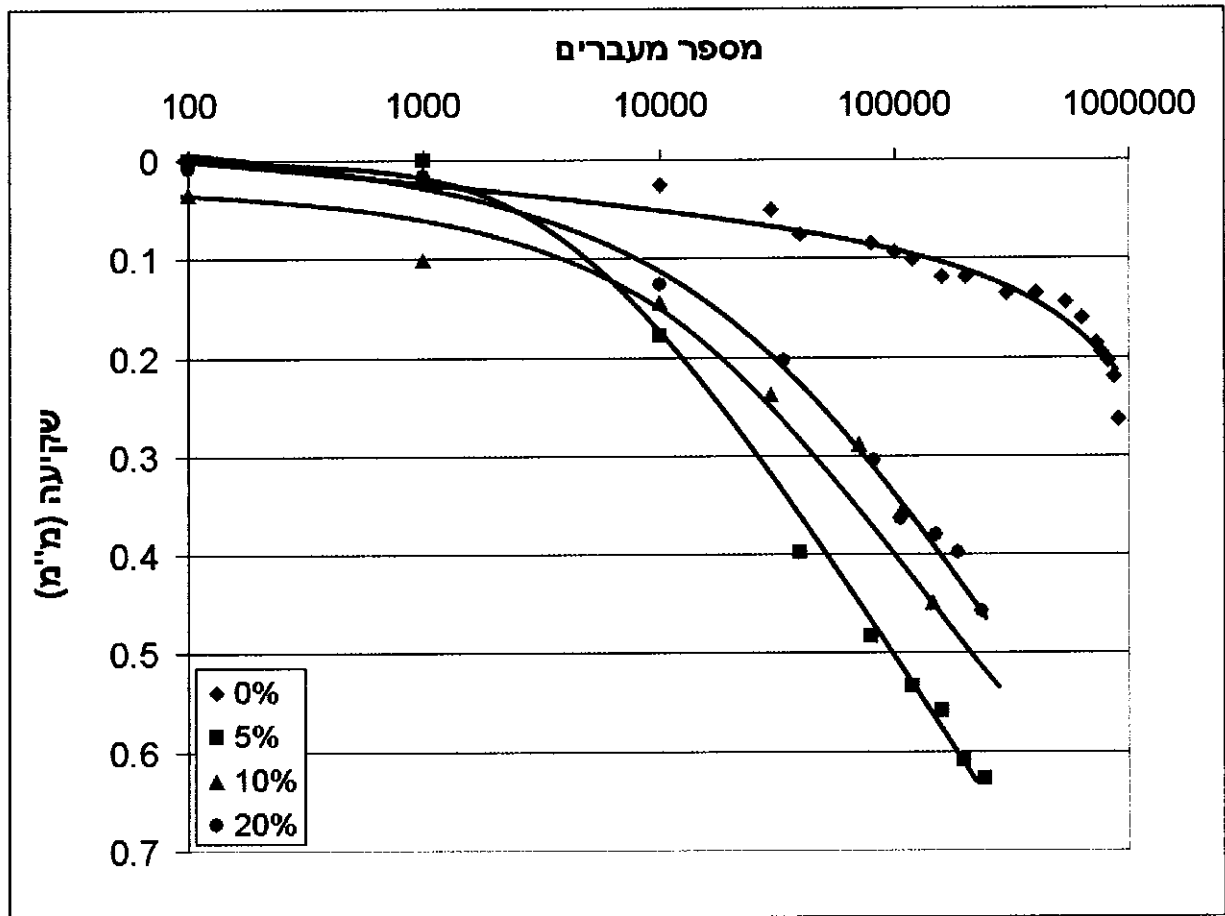
לצורך הבדיקה הוכנו ארבע תערובות אספלטיות חמות, השונות זו מזו בתכולת אפר פחם תחתית בהן. בכל תכולת אפר הוכן המדגם בתכולת ביטומן אופטימאלית המתאימה לקריטריון אחוז החלל עבור תערובות נושאות (ר' טבלה מס' 5.2 לעיל). המדגמים הודקו בתבנית פלדה בשטח של 18 על 28 ס"מ, ובעומק של 4.5 ס"מ, בהידוק סטטי מבוקר ע"י מכש מייכני.

הבדיקה בוצעה במכשיר הגלגל הנע הנמצא בטכניון, במעמס קבוע כאשר המדגם והטבלה שמתחתיו נעים הלוך ושוב בין שתי מסילות בעזרת גלגל אקסצנטרי המונע באמצעות מנוע חשמלי. גלגל המעמס עשוי מגומי קשיח (ר' ציור מס' 5.10). העומס בו הועמס הגלגל היה 16.7 ק"ג, שטח המגע של הגלגל הנו 3.34 סמ"ר, ומכאן לחץ המגע של הגלגל על פני פלטת המדגם הוא 5.0 ק"ג/סמ"ר. מספר המעברים של גלגל המעמס הנו 100 מעברים לדקה. שקיעת החריצה לאחר משכי הרצה שונים של הגלגל נבדקה באמצעות דפלקטומטר, בדיוק של "0.001, בשלוש נקודות בפני המדגם כתלות במספר המעברים של הגלגל הנע. הבדיקה בוצעה בטמפרטורת החדר בשיעור של כ-25 מעלות צלזיוס.



ציור מס' 5.10: מכשיר הגלגל הנע בו בוצעה הבדיקה להערכת חריצת התערובת בתלות במספר מחזורי ההעמסה

בדיקות החריצה בעמיסת הגלגל הנע בוצעו עד למיליון מחזורי גלגל, ותוצאותיהן מוצגות בציור מס' 5.11
הבא:



ציור מס' 5.11: ערכי חריצה בתלות במספר מחזורי הגלגל הנע עבור תכולות אפר פחם תחתית שונות (בתנאי תכולת ביטומן אופטימאלית המתאימה לקריטריון אחוז החלל עבור תערובת נושאת)

ניתן לראות כי קיים הבדל יחסי בערכי החריצה בין תערובת הבקרה ללא אפר תחתית, לבין התערובות האספלטיות הכוללות אפר תחתית בתכולות שונות. לאחר כחצי מיליון מחזורי עמיסת גלגל, שיעור החריצה המצטבר בתערובות הבקרה הנו כ-0.15 מ"מ, בעוד שבתערובות הכוללות אפר תחתית שיעור החריצה נע בין 0.45-0.65 מ"מ, כאשר ההבדל בין סוגי התערובת השונים הנו שולי.

למרות ההבדל בשיעורי החריצה בין תערובת הבקרה לבין התערובות הכוללות אפר פחם תחתית, הרי בהסתמך על הערכים המוחלטים של שיעורי החריצה (שהם פחות מ-0.7 מ"מ בכל המקרים), מתקבל כי ערכים אלה הנם נמוכים ביותר בהשוואה לבדיקות דומות שנערכו במחקרים רבים על תערובות אספלטיות קונבנציונאליות באותו המכשיר. במחקרים רבים, בתערובות אספלטיות רגילות נתקבלו ערכי חריצה בשיעורים בין 1.0 עד 4.0 מ"מ לאחר מספר מחזורים דומה. המסקנה היא כי, למרות ששיעורי החריצה של תערובות אפר התחתית גבוהים יותר מאלו של תערובת הבקרה, הם עדיין נמוכים ביותר בערכם המוחלט ומצביעים על תערובת אספלטיות בעלות התנגדות גבוהה לדפורמציה משתיירת.

6. סיכום מסקנות והמלצות

מטרתה העיקרית של חקירה זו הייתה לבדוק את ההיתכנות הטכנולוגית וההנדסית של השימוש המעשי באפר פחם תחתית, שהנו תוצר לוואי בשרפת הפחם בתחנות כוח, בתערובות אספלטיות למיסעות כבישים ושדות תעופה. חקירה זו הנה ראשונית והתרכזה בשלב זה במעבדה בלבד, בה נבחנו תכונות האפר, האגרנט, ותערובות אספלטיות בהרכבי אפר שונים.

כמוסכם, עקב המגבלות התקציביות, החקירה המוצגת בדו"ח זה מהווה בעצם רק שלב ראשון בחקירת ההיתכנות הכוללת המתוכננת, והיקפה היה תחום לבחינה ראשונית של תערובות אספלטיות בחקירה מעבדתית מצומצמת בעזרת סדרת בדיקות תקניות בלבד. למרות זאת, בוצעו בנוסף גם בדיקות קיים מואצות בהשריה חמה לפרקי זמן משתנים וכן בדיקות בעמיסת גלגל נע.

בתחילת הדרך נקבע כי הצלחת בחינת ההיתכנות זו הנה תנאי לבחינות טכנולוגיות וכלכליות נוספות לקראת יישום המעשי של השימוש באפר תחתי כחומר מוסף בסלילה אספלטית. בתוצאות חיוביות, כפי שאכן התקבלו, יתבטא סיכום החקירה גם בהמלצות ראשוניות הנוגעות להמשך מחקר מקיף וכולל לקראת יישום הנדסי בתנאי ייצור וסלילה ריאליים.

החקירה כללה ארבעה שלבים עיקריים באפיון התערובת האספלטית ומרכיביה, והם:

- אפיון מעבדתי של אפר פחם תחתית והשוואתו עם חול מחצבה דלומיטי.
- אפיון תכונותיהן המיידיות של תערובות אספלטיות הכוללות אפר תחתית בסדרת מערכות מרשל והשוואתן עם תערובות בקרה קונבנציונאלית מאגרנט דלומיטי בלבד.
- אפיון תכונות הקיים של התערובות האספלטיות השונות בהתנגדות לנזקי רטיבות בהשריה חמה ממושכת.
- אפיון ההתנגדות לחריצה של התערובות האספלטיות השונות בעמיסת הגלגל הנע.

הממצאים, המגמות והמסקנות השונים שנתקבלו ממכלול הבדיקות ניתנים לסיכום בנקודות הבאות:

1. אפר פחם תחתית שנכלל במחקר כלל את המקטע הדק של אפר התחתית השלם שהושג בתהליך שריפת הפחם. אפר זה הנו בעל גרגיר מכסימלי מעשי בגודל של כ-5 מ"מ ודירוגו תאם באופן עקרוני את דירוגי של חול המחצבה של האגרנט הדלומיטי בתערובות הבקרה. דירוגו של אפר התחתית תאם גם סוגי אפר תחתית שונים ממקומות אחרים בעולם, כאשר האפר הישראלי עשיר יותר במלאן. האפר שנכלל במחקר נמצא כבלתי פלסטי, ובעל משקל יחסי נמוך בהשוואה לחול המינרלי הרגיל. מצד שני, שיעור שווה-ערך-החול בו הנו גבוה יחסית בהשוואה לחול המחצבה.

2. עקב נקבוביותם הרבה של חלקיקי אפר התחתית ומרקמם המחוספס, יש לצפות כי עם הוספת ועליית תכולתו של האפר בתערובת תקטן הצפיפות יגדל אחוז החלל בתערובת, תגדל משמעותית ספיגות הביטומן ועמם גם תכולת הביטומן האופטימאלית. היות ובתערובות הכוללות אפר תחתית אחוזי החלל חורגים מערכי הטיב המותרים, אין כל הצדקה להשתמש בתערובות אלה בקריטריון אחוז החלל

לקביעת תכולת הביטומן האופטימאלית. כתחליף, מוצע במחקר זה להשתמש בקריטריון המכאני, המסתמך על היציבות המכסימאלית, כקריטריון לקביעת תכולת הביטומן האופטימאלית.

3. באופן כללי, נמצא כי תכולת הביטומן האופטימאלית גדלה עם תוספת והגדלת תכולת אפר פחם תחתית בתערובת האספלטית. באופן מעשי מתקבל כי בהתאם לקריטריון אחוז החלל, העלייה בתכולת הביטומן האופטימאלית עם תוספת של 10% אפר תחתית הנה בתחום 1.1-1.2%. קפיצת מדרגה חלה בהגדלת תכולת האפר בתערובת מ-10% ל-20%. במקרה זה חלה עלייה נוספת בתכולת הביטומן האופטימאלית בשיעור נכבד ביותר של 2.6-2.9%. לעומת זאת בהתאם לקריטריון היציבות המכסימאלית, העלייה בתכולת הביטומן היא מתונה ביותר. בתוספת אפר תחתית עד 10% חלה עלייה של 0.4% בלבד בתכולת הביטומן האופטימאלית. בהגדלת תכולת האפר מ-10% ל-20%, העלייה בתכולת הביטומן האופטימאלית היא רק 1.5%. המשמעות היא כי בתכנון תערובות אספלטיות עם אפר פחם תחתית בהסתמך על קריטריון מכסימום היציבות, תכולת הביטומן האופטימאלית לביצוע תהיה מזערית בלבד באם מגבילים את תכולת האפר בתערובת ל-10%.

4. בהסתמך על מערכות המרשל שבוצעו בתערובות האספלטיות, המבטאות את תכונותיהן המיידיות, נמצא כי ערכי הצפיפות, היציבות והנוזילות יורדים עם תוספת והגדלת תכולת אפר התחתית בתערובות. מגמות אלה היו צפויות והן הוסברו בסעיפי דו"ח זה. באופן מוחלט נמצא כי בתכולת ביטומן אופטימאלית, המסתמכת על קריטריון מכסימום היציבות, תערובות המכילות עד 10% אפר פחם תחתית מציגות ערכי יציבות נאותים העומדים בדרישות הטיב לגבי כל סוגי התערובות האספלטיות מסוג א'. בתנאים אלה מושגים בתערובות ערכי צפיפות של כ-2200 ק"ג/מ"ק וערכי נוזילות של כ-8%. ניתן לראות כי למרות ההשפעה הרבה שיש לתכולת אפר פחם תחתית על תכונות התערובת האספלטית, השפעה זו אינה דרמטית והרסנית אלא היא הדרגתית תוך שמירת תכונות תערובת העומדות באופן כללי בקריטריונים המקובלים. יש לראות ערכים אלה כנאותים בהתחשב בתוסף האפר המיוחד שנכלל בתערובת.

5. בניסיונות הקיים בהשריה חמה ממושכת נמצא כי, ללא יוצא מן הכלל, חלה התחזקות במדגמים האספלטיים לכל אורך תקופת ההשריה. התחזקות זו נצפתה בתערובת הקונבנציונאלית, ללא אפר הפחם, אולם היא מתעצמת עם תוספת אפר הפחם. בתערובות הכוללות אפר פחם תחתית רמת ההתחזקות הגבוהה ביותר מושגת לאחר יום השרייה, אך בזמני השרייה ארוכים יותר היא יורדת ומגיעה עד לערכים של בין 120-130% חוזק משתייר אחרי 12 יום השרייה, לעומת כ-100% בלבד עבור התערובות האספלטיות ללא אפר הפחם. המסקנה היא כי אפר פחם תחתית איננו אינרטי בלבד, אלא הנו כנראה גם אקטיבי מבחינת התרומה לחיזוק האדהזיה בין הביטומן לאגרנטים בתערובת, ובכך תורם לדחיית נזקי המים הגורמים בדרך כלל להתקלפות הביטומן (Stripping) המשתמע הוא כי אפר פחם תחתית יכול לשמש גם כמייצב בשדרוג כושר הקיים של התערובת האספלטית. תכונה זו מהווה ערך מוסף חשוב בכל הקשור בשימוש באפר פחם באפר פחם כמוסף לתערובות אספלטיות.

6. בניסיונות הגלגל הניע נמצא כי קיים הבדל בערכי החריצה בין תערובת הבקרה ללא אפר תחתית לבין התערובות האספלטיות הכוללות אפר תחתית בתכולות שונות. לאחר כחצי מליון מחזורי עמיסת גלגל

שיעור החריצה המצטבר בתערובות הבקרה הנו כ-0.15 מ"מ בלבד, בעוד שבתערובות הכוללות אפר תחתית שיעור החריצה נע בין 0.45-0.65 מ"מ, כאשר ההבדל בין סוגי התערובות השונים הנו שולי. למרות ההבדל היחסי בשיעורי החריצה בין תערובות הבקרה לבין התערובות הכוללות אפר פחם תחתית, הרי בהסתמך על הערכים המוחלטים של שיעורי החריצה (שהם פחות מ-0.7 מ"מ בכל המקרים), מתקבל כי ערכים אלה הנם נמוכים ביותר בהשוואה לבדיקות דומות שנערכו במחקרים רבים על תערובות אספלטיות קונבנציונאליות באותו המכשיר. המסקנה היא כי, למרות ששיעורי החריצה של תערובות אפר התחתית גבוהים יותר מאלו של תערובות הבקרה, הם עדיין נמוכים ביותר בערכם המוחלט ומצביעים על תערובת אספלטיות בעלות התנגדות גבוהה לדפורמציה משתיירת.

ממצאים ומסקנות אלה מצביעים על כך כי, בהסתמך על בדיקת ההיתכנות הראשונית, תוספת אפר פחם תחתית לתערובות אספלטיות רגילות אכן משפיעות בבירור על תכונות התערובת האספלטית. לעומת זאת, השפעה זו אינה דרמטית והרסנית אלא היא הדרגתית תוך שמירת תכונות תערובת העומדות באופן כללי בקריטריונים ההנדסיים והכלכליים המקובלים. הדבר מתבטא הן לגבי התכונות המיידיות של התערובות בניסיונות מרשל התקניים והן בבדיקות עמיסה תחת מתזורי גלגל נע. באשר לקיים תערובות אספלטיות המכילות אפר פחם תחתית, הרי בתנאי פריזה מואצים, תחת תנאי השרייה חמה ממושכת, משמש אפר הפחם כחומר מייצב המחזק את האדהזיה בין הביטומן לחלקיקי האגרגט. מגמה זו מתבטאת בהגדלת חוזקם של המדגמים לאחר השרייה חמה ממושכת בשיעורים העולים על אלה שבתערובות אספלטיות רגילות.

לסיכום, לאור ממצאים אלה, ניתן בהחלט להגדיר את תוצאות החקירה כחיוביות ביחס להשפעת תוספת מדודה של אפר פחם תחתית (בשיעור של כ-10%) לתערובות אספלטיות רגילות. כאמור וכמודגש, חקירה זו הנה ראשונית ומבוססת על מספר קטן של מדגמים ורמות ניסוי. אי לכך, על מנת לעבור לשלבים מעשיים יותר ביישום הנדסי זה מן הצורך לאמת תוצאות אלה בחקירה מפורטת יותר שתכלול תכנית ניסויים מורכבת יותר בה ייבחנו בשנית ויאומתו הממצאים שנתקבלו בתחום רחב יותר של חומרים, שיטות ניסוי רמות ניסוי של הפרמטרים והמשתנים השונים, וניתוחם בכלים סטטיסטיים מהימנים.