

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

חקירת המשך

חלק ראשון – תכונות בסיסיות

דו"ח סופי

מוגש למנהלת אפר הפחם

אוקטובר 2009

רעננה

תוכן עניינים

1	1. חקירה ראשונה שבוצעה	1
4	2. עיקרי החקירה הנוכחית	4
4	2.1 כללי	4
4	2.2 הפרוגרמה לחקירה המעבדתית	4
7	3. אפיון מרכיבי התערובת	7
7	3.1 כללי	7
7	3.2 תכונות אפר התחתית	7
8	3.3 תכונות אגרגט הדולומיט	8
8	3.4 תכונות הביטומן האספלטי	8
10	4. אפיון התערובת האספלטית	10
10	4.1 מערכות מרשל תקניות	10
12	4.2 תכונות השפעת תכולת אפר התחתית על אחוז החלל ותכולת הביטומן האופטימאלית	12
20	5. סיכום מסקנות והמלצות	20
22	6. רשימת מראי מקום	22

הערכת המקטע הדק באפר תחתית לשימוש כמרכיב אגרגטי בתערובות אספלטיות חמות

חקירת המשך, חלק א' – תכונות בסיסיות

1. חקירה ראשונית שבוצעה

דו"ח זה הינו חלק שני בחקירה מעבדתית, שמטרתה הכללית העיקרית הינה לבדוק את ההיתכנות הטכנולוגית וההנדסית של השימוש המעשי באפר פחם תחתית, שהנו תוצר לוואי בשריפת הפחם בתחנות כוח, בתערובות אספלטיות לסלילת מיסעות כבישים ושדות תעופה.

חקירה מעבדתית ראשונית בנושא בוצעה והושלמה בטכניון בשנים 2005-2006, בה נבחנו תכונות האפר, האגרגט, ותערובות אספלטיות בהרכבי אפר שונים. החקירה הוגבלה לבדיקות קונבנציונאליות הבוחנות פרמטרים מפרטיים סטנדרטיים. בנוסף בוצעו גם בדיקות קיים מואצות בהשריה חמה לפרקי זמן משתנים וכן בדיקת גלגל נע. חקירה זו סוכמה בדו"ח מחקר טכניוני (מ.מ. 1).

עקב המגבלות התקציביות, חקירה ראשונית זו היוותה בעצם רק שלב ראשון בחקירת ההיתכנות הכוללת המתוכננת, והיקפה היה תחום לבחינה ראשונית של תערובות אספלטיות בחקירה מעבדתית מצומצמת בעזרת סדרת בדיקות תקניות ובדיקות נבחרות נוספות.

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

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

- אפיון מעבדתי של אפר פחם תחתית והשוואתו עם חול מחצבה דולומיטי.
- אפיון תכונותיהן המיידיות של תערובות אספלטיות הכוללות אפר תחתית בסדרת מערכות מרשל והשוואתן עם תערובת בקרה קונבנציונאלית מאגרגט דולומיטי 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 המחוּספס, 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 והנזילות יורדים עם הוספת והגדלת תכולת אפר התחתית בתערובת. 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 נזילות 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 התערובת האספלטית ללא אפר הפחם. המסקנה היא כי אפר פחם התחתית איננו אינרטי בלבד, אלא הנו כנראה גם אקטיבי מבחינת התרומה לחיזוק האדהזיה בין הביטומן לאגרגטים 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 הנע 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 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. 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.

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 התערובת בניסיונות מרשל התקניים והן בבדיקות עמיסה תחת מחזורי 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.

2. עיקרי החקירה הנוכחית

2.1 כללי

החקירה הראשונית התרכזה בתערובות אספלטיות צפופות. השימוש בתערובות אלה הולך ומתמעט בימים אלה. בהמשך, ולאור הצלחת החקירה הראשונית, חקירת המשך זו באה לבחון את היתכנות השימוש בתוספת אפר תחתית גם תערובות אספלטיות הנפוצות כיום בכבישי הארץ תחת עומסי הידוק גבוהים יותר. הכוונה היא לתערובות אספלטיות חמות שהרכבן אומץ בפרויקט המחקר האמריקאי SHRP (Sstrategic Highway Research Project) בפלח המחקר האספלטי שכונה – SuperPave.

תערובות אלה מתאימות לתערובות תא"מ ("S") הישראליות הנפוצות כיום גם בשכבת הציפוי העליונה וגם בשכבות תחתונות. כמו כן על מנת לבחון את הטכנולוגיה בתנאים המתאימים לעמיסה גבוהה, הודקו מדגמי התערובות ב-75 הקשות לכל צד. בנוסף, תכונות התערובות ייבחנו ברגישות לסטיות בתכולת המלאן, וכן בשימוש בתוספת מלאן מאפר פחם מרחף.

עד עתה הושלם החלק הראשון בחקירת המשך זו, הנוגע לתכונות הבסיסיות של התערובות האספלטיות החדשות בשיטת מרשל לקביעת השפעת תכולת אפר התחתית, והוא מוצג בדו"ח המשך זה.

החקירה עצמה בוצעה במעבדות המבדקה לבנין ותשתית, בהנחיית פרופ' אילן ישי.

2.2 הפרוגרמה לחקירה המעבדתית

הפרוגרמה לחקירה המעבדתית בשלב המשך, כפי שהוגשה למבדקה, מסוכמת להלן:

א. מטרות החקירה

באופן כללי ניתן לסכם את מטרותיה העיקריים של החקירה כדלקמן:

1. אפיון הנדסי מעבדתי המשכי של אפר תחתית, אגרגטים, ביטומנים ותערובות אספלטיות בעזרת סדרת בדיקות פיסיקליות והנדסיות תקניות להערכת התכונות התפקודיות והמכניות של המרכיבים והתערובת במצב ראשוני ובתנאי קיים מואצים.

2. בחינה מיוחדת של התנאים והפרמטרים הנוספים הבאים:

- שימוש בתערובות תא"מ – S.
- הידוק ב-75 הקשות משני צידי המדגמים.
- רגישות בסטיות בתכולת המלאן.
- שימוש בתוספת מלאן מאפר פחם מרחף.

3. השוואת אפיון תערובות האפר כנגד תערובות אספלטיות קונבנציונליות שהוכנו באותם מינונים ועם אותם האגרגטים.

4. השוואת תכונות האפר ותערובותיו עם קריטריונים ודרישות תקניים ומפריטיים, וסווג ייעודם והתאמתם ההנדסית.

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

ב. תכנית החקירה המעבדתית

החקירה המעבדתית תכלול את מערכות הבדיקות והמאפיינים הבאים:

1. **בדיקות לאפיון אפר התחתית והאפר המרחף (סוג אחד מכל אחד):**

- בבדיקות התקניות לאגרטים
- בדיקות מיוחדות (כגון: הרכב כימי, תכונות מינרלוגיות, אפיניות לביטומן, וכד')

2. **בדיקות תקניות לאפיון האגרטים (סוג אחד)**

3. **בדיקות ביטומן (סוג אחד):**

- צמיגות מוחלטת ב- 60°C .
- צמיגות קינמטית ב- 135°C .
- חדירות תקנית.
- נקודת התרככות.
- רקיעות תיקנית.
- חשיפה לקיים מואץ בקרומים דקים בתנור (TFOT) למישכי זמן משתנים עד 24 שעות.
- בצוע חוזר של בדיקות הביטומן לאחר החשיפות בתנור.
- הרכב כימי של הביטומן הטרי והמזוקן.
- אפיון לפי ת"י 161 חלק 1 החדש המסווג ביטומנים לפי הביצועים (PG Grading) (מיוני 2006).

4. **בדיקות תערובות אספלטיות (4 מינונים בשילוב מלאן אפר מרחף ובשינוי תכולת המלאן, ותערובת קונבנציונלית אחת):**

- מערכות מרשל מלאות.
- בדיקות קיים בהשריה חמה ממושכת עד 14 יום (בתנאי אופטימום).
- בדיקות לחריצה במערכת גלגל נע (בתנאי אופטימום).
- בדיקות חיכוך בעזרת מטוטלת בריטית (בתנאי אופטימום).

ג. חומרים

אגרגטים: האגרגט יהיה דולומיטי ממחצבת חברת מדן בע"מ. האגרגט יובא למעבדה מחולק לפרקציות המחצבתיות מה"פוליה" ועד לחול המחצבה הדק. תאום להבאת האגרגטים יעשה ע"י מינהלת אפר הפחם. תובא כמות כוללת של כ-1000 ק"ג.

אפר תחתית ואפר מרחף: סוגם יבחר ע"י מינהלת אפר הפחם. הם יובאו למעבדות איזוטופ בשקי ניילון אטומים בכמות של כ-200 ק"ג מכל אפר. התאום יעשה ע"י מינהלת אפר הפחם.

ביטומן: בחקירה ישמש ביטומן מסוג PG 68-10. הביטומן יובא מבתי הזיקוק או מאחד ממפעלי האספלט, בכמות של כ-50 ק"ג. התיאום יעשה ע"י המעבדה.

ד. זרוג התערובת האספלטיית

התערובת האספלטיית תהיה מסוג תא"מ-S-19 (גרגריר מכסימאלי של 19 מ"מ – 3/4"). במעבדה יורכבו תערובות בקו הדירוג המרכזי של תחומי הדירוג לפי פרק 34 של המפרט הכללי של מע"צ).

ה. ביצוע החקירה

החקירה תבוצע ותנוהל במעבדות המבדקה לבנין ותשתית בכפר אתא. את החקירה ינחה וילווה מקצועית פרופ' אילן ישי במסגרת משרדו "ד"ר אילן ישי – תשתיות תחבורתיות".

3. אפיון מרכיבי התערובת

3.1 כללי

כאמור, חקירה זו מהווה שלב המשך במחקר מוצע כולל לבחינת תכונות תערובות אספלטיות חמות המכילות אפר פחם תחתית. בחקירה המשך זו נבחנה תוספת אפר התחתית בפרקציות הדקות בלבד, כאשר אפר זה מחליף אחוז מסוים מחול המחצבה שבתערובת, המורכבת ברובה מאגרגטים דלומיט ממחצבת חברת מדין באזור להבים בדרום. בהיקפה המוסכם, החקירה התרכזה בסדרת בדיקות אינדיקטיביות תקניות לאפיון אפר התחתית והאגרגטים המינרליים במדגמי הבקרה, וכן מערכות מרשל מלאות בהשוואת תערובות אספלטיות המכילות אפר תחתית למול תערובת הבקרה התקנית המורכבת מאגרגטים מינרליים רגילים בלבד.

שלב ראשון בבדיקות היה אפיון מרכיבי התערובת.

3.2 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 תחתית זה, שסופק למחקר בגודלו הסופי ע"י מנהלת אפר הפחם, מוצג בטבלה מס' 3.1.

טבלה מס' 3.1: תכונות אינדיקטיביות בסיסיות של אפר התחתית שנכלל בחקירה

גבולות אטרברג	ש.ע.ח.	תכולת רטיבות	200#	80#	40#	20#	10#	4#	3/8"	נפה מס':
			0.075 mm	0.18 mm	0.425 mm	0.85 mm	2.0 mm	4.75 mm	9.5 mm	
%		%	%	%	%	%	%	%	%	
NP	60.0	9.32	20.0	31.0	51.0	61.0	80.0	99.0	100.0	הרכב ותכונות של אפר פחם
			2396	1690						צפיפות ממשית ממוצעת (ק"ג/מ"ק)
				1930						צפיפות ממשית במצב רווי יבש פנים
				2220						צפיפות נדמית ממוצעת (ק"ג/מ"ק)
				14.04						ספיגות (%)

ניתן לראות שאפר התחתית הינו בעל גרגיר מכסימאלי של כ-5 מ"מ. צפיפותו הממשית הממוצעת הינה נמוכה, וההבדל בינה לבין הצפיפות הנדמית הממוצעת מתבטא בספיגות גבוהה למים בשיעור של כ-14%. אפר התחתית עשיר יחסית במלאן, בתכולה של כ-20%. האפר הינו בלתי פלסטי ובעל שווה ערך חול גבוה בשיעור של 60%.

3.3 תכונות אגרגט הדלומיט

תכונות האגרגט הדלומיטי ששימש כמרכיב שלד התערובת העיקרי מוצג בטבלה מס' 3.2 :

טבלה מס' 3.2: תכונות אינדיקטיביות בסיסיות של האגרגט הדלומיטי המהווה את המרכיב העיקרי בשלד הגרירים של התערובות האספלטיות שנחקרו

גבולות אטרברג	ש.ע.ח.	200#	80#	40#	20#	10#	4#	3/8"	1/2"	3/4"	נפה מס' :
		0.075 mm	0.18 mm	0.425 mm	0.85 mm	2.0 mm	4.75 mm	9.5 mm	12.5 mm	19.0 mm	
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
								19.0	82.0	100.0	עדס
						2.0	30.0	99.0	100.0		סומסום
NP	57.0	22.0	31.0	41.0	57.0	89.0	100.0				חול מחצבה
		2845	2660					2710	2710	2700	צפיפות ממשית ממוצעת (קג/מ"ק)
			2740					2730	2730	2720	צפיפות ממשית ממוצעת במצב רווי יבש פנים (קג/מ"ק)
			2900					2780	2770	2760	צפיפות נדמית ממוצעת (קג/מ"ק)
			3.16					0.92	0.81	0.81	ספיגות ממוצעת (%)
								21.0			שיעור התנגדות לשחיקה - דירוג B (לוס אנג'לס) (%)
									23.0		פחיסות (%)
									18.0		מאורכות (%)

מתקבל כי אגרגט דלומיט זה עונה על כל דרישות ת"י 8 עבור אגרגטים לתערובות אספלטיות וכן על כל דרישות המפרט הבין משרדי פרק 51, והמפרט לסלילה של מעצ – החברה הלאומית לדרכים בישראל, לגבי תערובות אספלטיות סוג א'.

3.4 תכונות הביטומן האספלטי

הביטומן האספלטי שנבחר להרכבת התערובות האספלטיות בחקירה זו הוא ביטומן בסיווג PG 68-10. ביטומן זה הוא הנפוץ ביותר בהרכב תערובות תא"מ לשכבות נושאות ותחתונות כאחד.

תכונות הביטומן האספלטי שהובא למעבדה מסוכמות בטבלה מס' 2.3, והן מלמדות שהביטומן עומד בכל הקריטריונים של ביטומן אספלטי בסיווג PG 68-10.

טבלה מס' 2.3: תכונות הביטומן האספלטי בסיווג PG 68-10 שנכלל בחקירה

תוצאות הבדיקה			
סעיף מהתקן	תכונה הנבדקת	תוצאה	דרישה
1	טמפרטורה (°C) ב- $G^* / \sin \delta$ kPa 1	<250	230 מינ'
2	גזירה דינמית בתדירות של 10 רדיאן לשנייה (kPa) בטמפרטורה 68 °C	1.14	1.00 מינ'
3	גזירה דינמית $G^* / \sin \delta$ בתדירות של 10 רדיאן לשנייה (kPa) בטמפרטורה 68 °C	3.46	2.20 מינ'
התכונות הנבדקות בשאריות הביטומן בבדיקת קרום דק מסתובב בתנור RTFOT			
4	פתח במסה ב- $G^* / \sin \delta$ ומ בטמפרטורה 163 °C (%)	0.02	1.0 מקס'
5	גזירה דינמית בתדירות של 10 רדיאן לשנייה (kPa) בטמפרטורה 34 °C	1300	5000 מקס'
התכונות הנבדקות בשאריות הביטומן בבדיקת קרום דק מסתובב בתנור ונתא לחץ PAV			
6	קשיחות בזחיל $G^* \sin \delta$	53.2	100 מקס'
קליפורניה טסט 16.8 °C			
7	שיעור הדחילה M	0.362	0.3 מינ'
8	מיסכות באריכלוראפילן (%)	99.4	99 מינ'

4. אפיון התערובות האספלטיות

4.1 מערכות מרשל תקניות

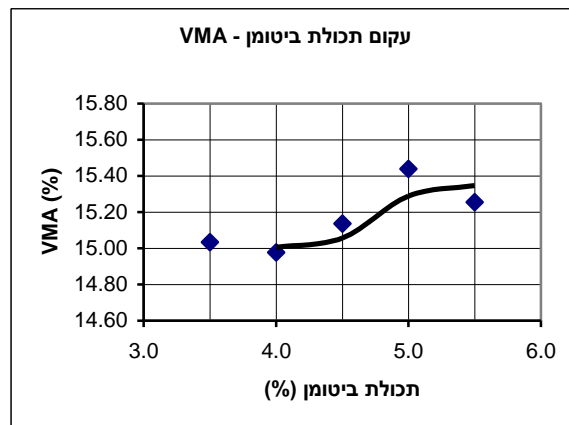
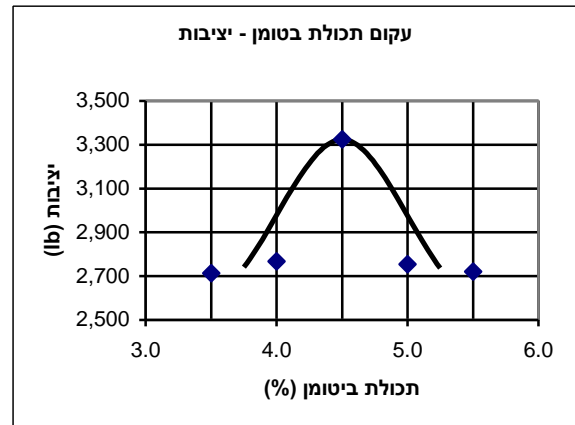
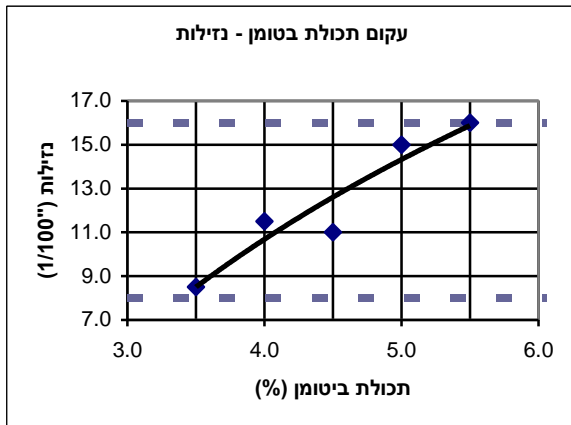
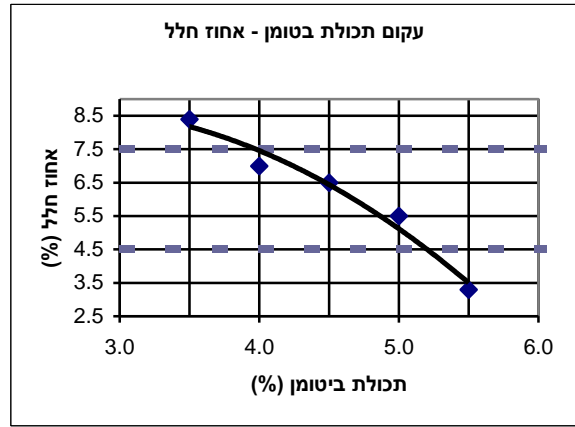
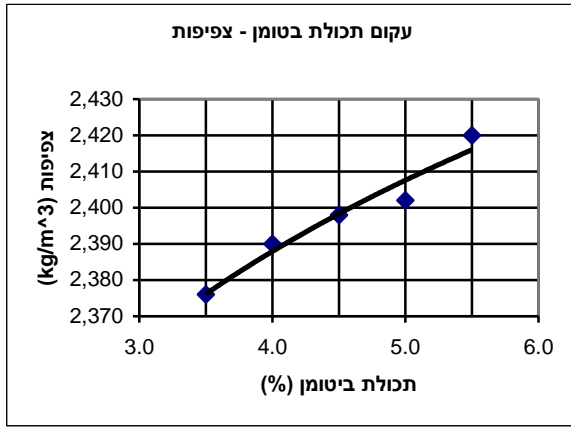
ארבע מערכות מרשל תקניות, בדירוג תערובת תא"מ 19 מ"מ, הוכנו ונבדקו לקביעת השפעת תוספת אפר פחם תחתית דק על תכונותיה המיידיות של התערובת האספלטית החמה. תערובות אלה כללו תוספת אפר תחתית במינונים הבאים: 0% (בקה), 5%, 10% ו-20% (אחוזים משקליים).

בכל המדגמים נבדקו וחושבו יחסי משקל-נפח המתבטאים בצפיפות, אחוז החלל בתערובת, ואחוז החלל בתערובת היבשה (VMA). כמו כן נבדקו הפרמטרים המיכניים המתבטאים ביציבות ובנוזילות. תוצאות הבדיקות עבור כל ארבעת המערכות מסוכמים בטבלה מס' 3.1.

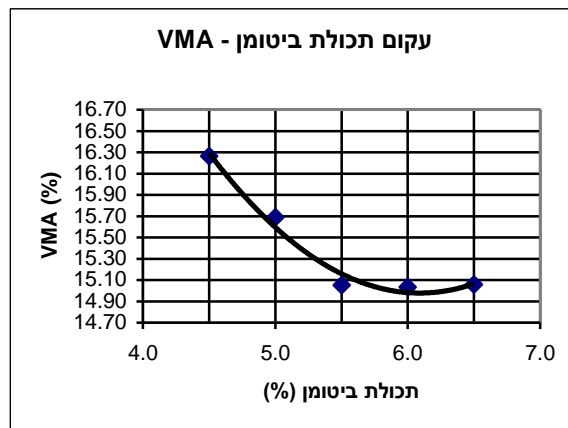
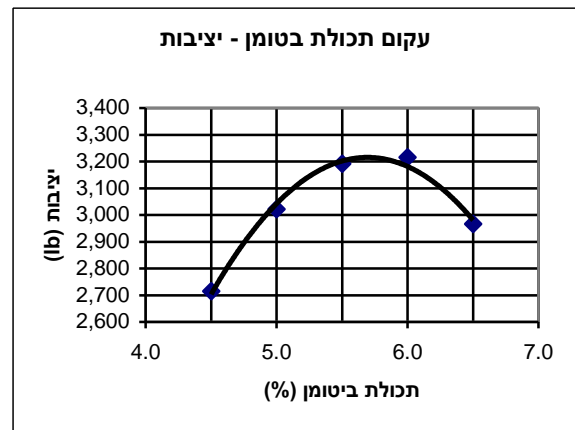
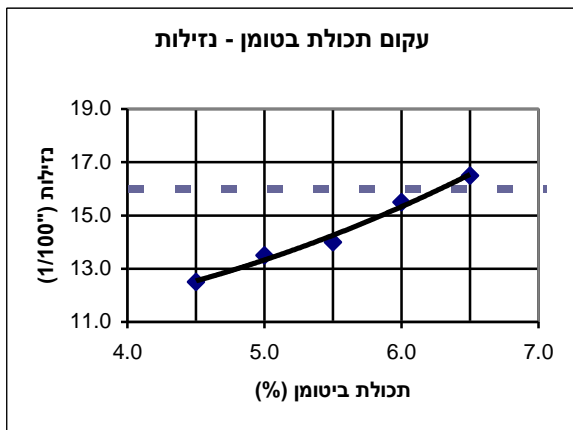
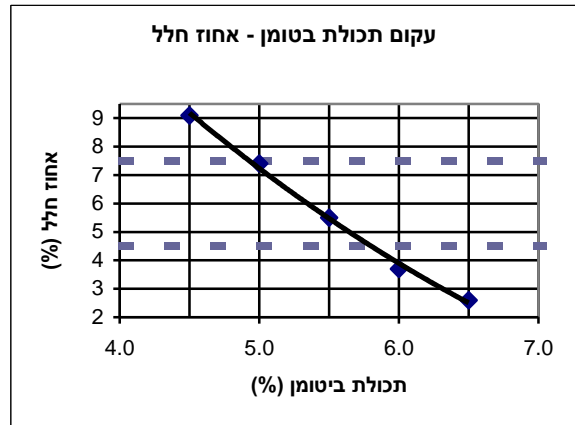
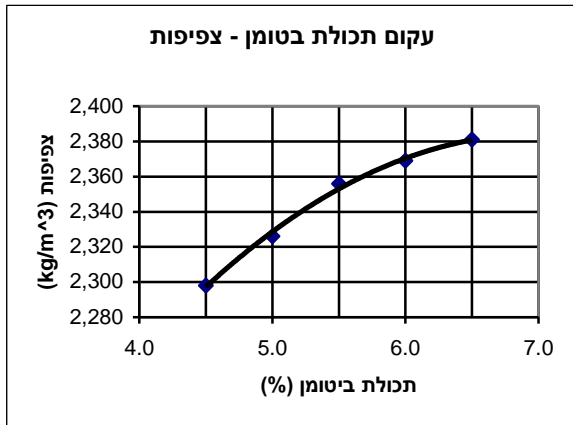
טבלה מס' 3.1: סיכום תוצאות בדיקות מרשל עבור ארבע תערובות אספלטיות תא"מ 19 מ"מ עם תכולות אפר פחם תחתית שונות (הודק ב-75 הקשות משני הצדדים).

VMA	צפיפות משוקללת (kg/m ³)	אחוז חלל (%)	צפיפות תיאורטית (kg/m ³)	חוזק משתייר (%)	נזילות (1/100")	יציבות ליבראות	צפיפות (kg/m ³)	תכולת ביטומן (%)	תכולת אפר פחם
VMA	γ_{sb}	P_a	γ_{mm}				γ_{mix}	P_b	
15.03	2,699	8.4	2,593	77	8.5	2,714	2,376	3.5	ללא אפר פחם
14.98	2,699	7.0	2,571	79	11.5	2,768	2,390	4.0	
15.14	2,699	6.5	2,565	89	11.0	3,324	2,398	4.5	
15.44	2,699	5.5	2,541	85	15.0	2,754	2,402	5.0	
15.25	2,699	3.3	2,504	87	16.0	2,721	2,420	5.5	
16.26	2,621	9.1	2,527	98	12.5	2,715	2,298	4.5	5%
15.69	2,621	7.4	2,512	89	13.5	3,022	2,326	5.0	
15.05	2,621	5.5	2,494	82	14.0	3,192	2,356	5.5	
15.03	2,621	3.7	2,460	97	15.5	3,215	2,369	6.0	
15.06	2,621	2.6	2,445	76	16.5	2,966	2,381	6.5	
16.21	2,548	9.1	2,473	92	6.5	2,729	2,247	5.0	10%
15.61	2,548	7.8	2,468	85	9.0	2,902	2,275	5.5	
16.02	2,548	6.6	2,437	81	11.5	3,180	2,276	6.0	
15.73	2,548	5.0	2,418	78	8.5	3,129	2,296	6.5	
15.27	2,548	3.2	2,398	97	13.5	2,696	2,321	7.0	
18.12	2,413	9.9	2,357	81	10.0	2,286	2,124	7.0	20%
17.36	2,413	5.2	2,287	92	10.0	2,451	2,167	8.0	
18.34	2,413	4.8	2,275	71	11.0	2,449	2,165	9.0	
18.45	2,413	5.1	2,291	93	13.5	2,575	2,174	9.5	
18.64	2,413	2.2	2,229	88	15.5	2,322	2,181	10.0	

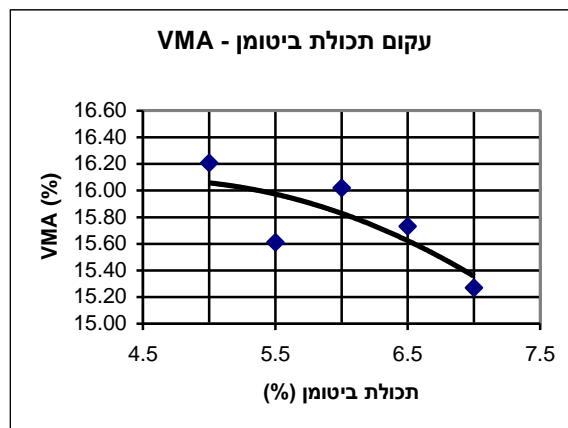
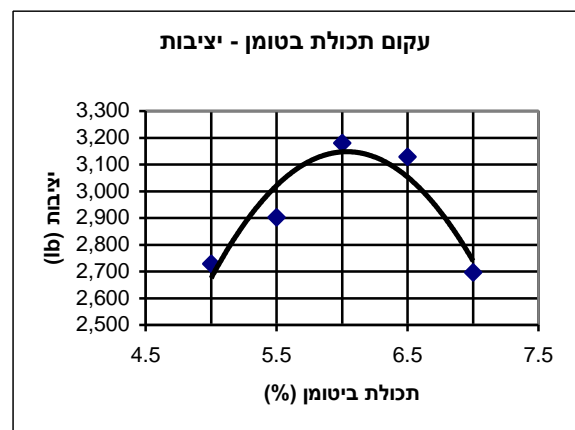
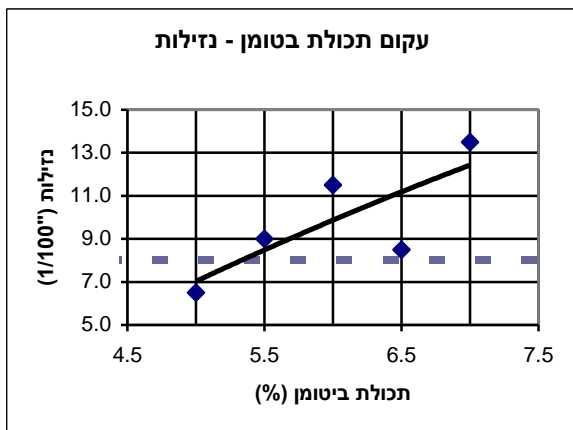
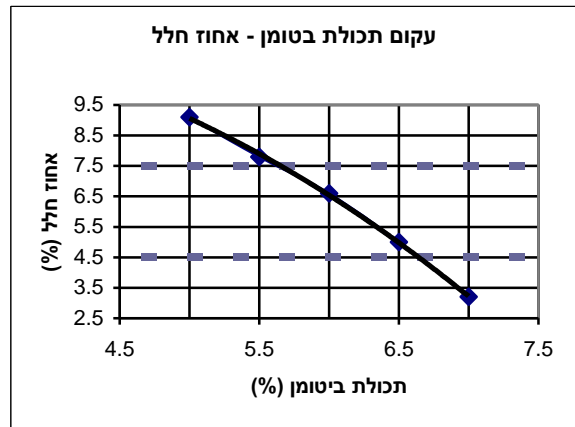
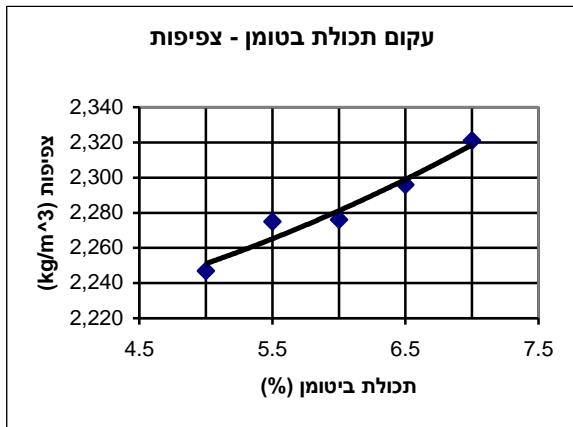
ביטוין הגראפי של מערכות מרשל אלה מוצג בציורים מס' 3.1 עד 3.4 להלן :



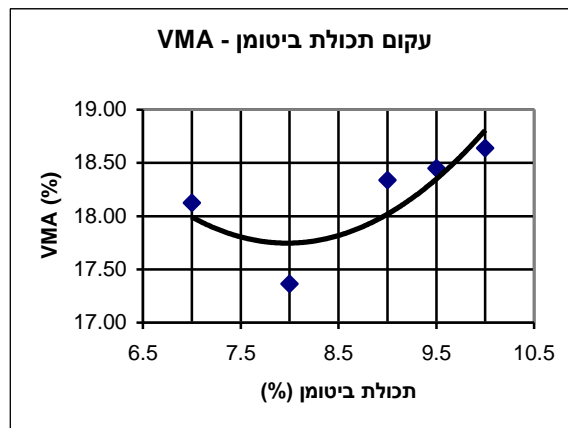
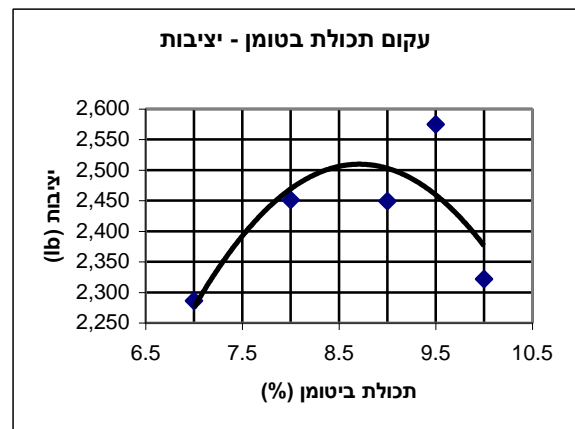
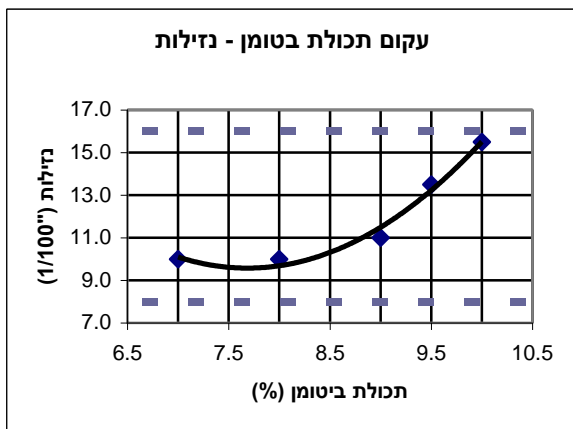
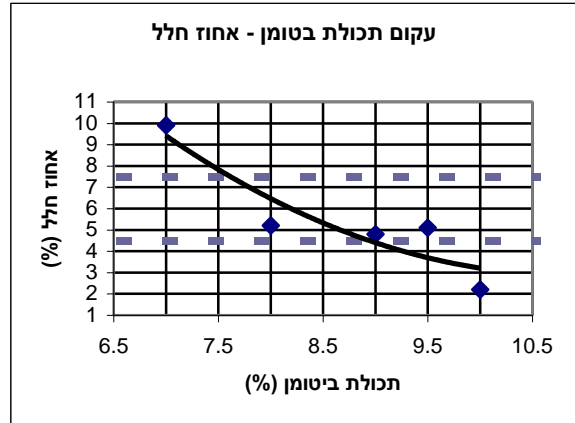
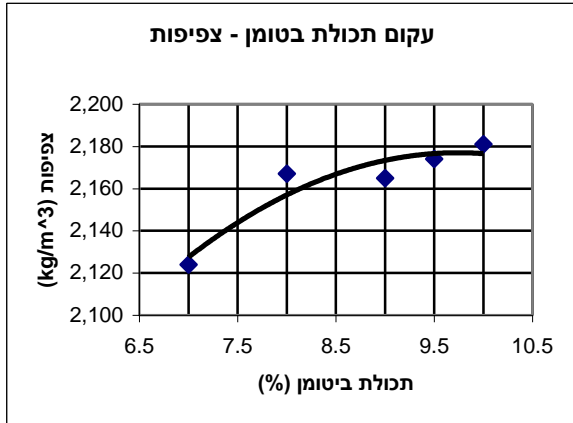
ציור מס' 3.1: מערכת מרשל של תערובת הבקרה תא"מ 19 מ"מ מאגרסט דולומיט ללא כל אפר תחתית



ציור מס' 3.2: מערכת מרשל של תערובת תא"מ 19 מ"מ עם מאגר גט דולומיט בתוספת 5.0% אפר תחתית במקטע הדק

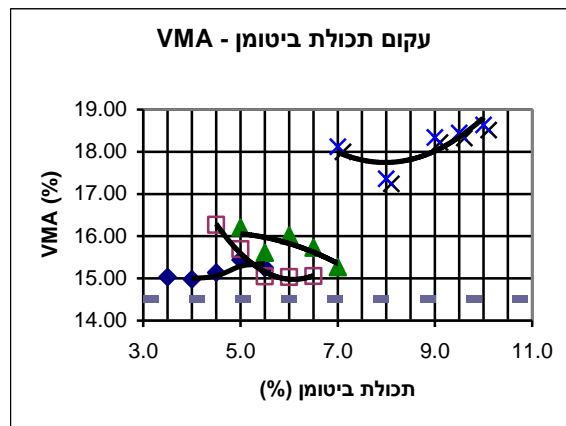
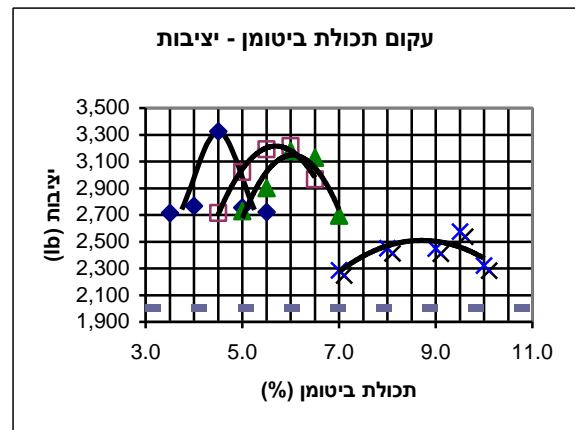
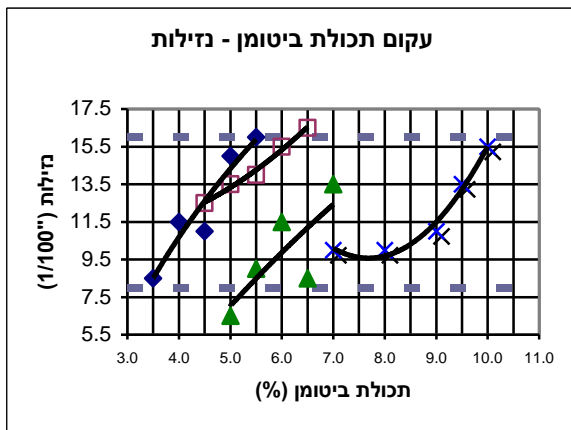
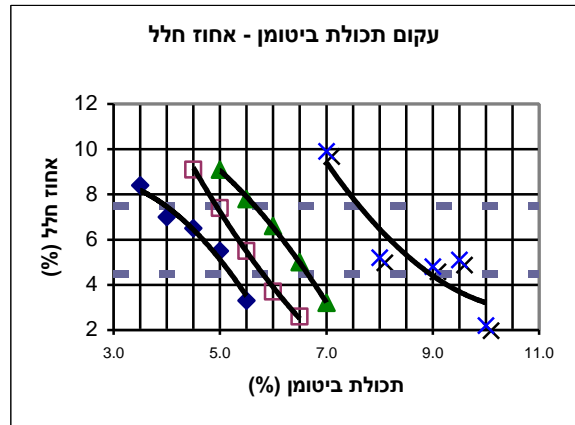
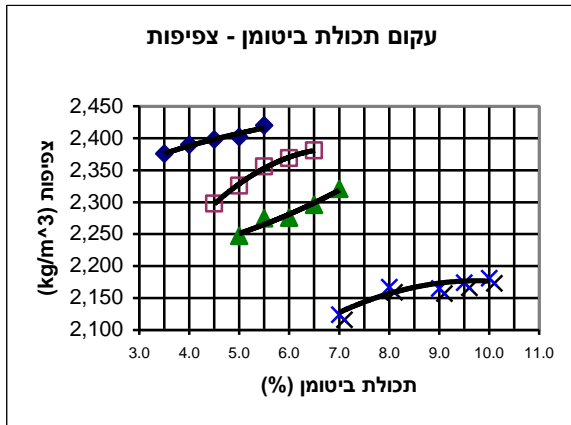


ציור מס' 3.3: מערכת מרשל של תערובת תא"מ 19 מ"מ עם מאגרנט דולומיט בתוספת 10.0% אפר תחתית במקטע הדק



ציור מס' 3.4: מערכת מרשל של תערובת תא"מ 19 מ"מ עם מאגרנט דולומיט בתוספת 20.0% אפר תחתית במקטע הדק

ביטוי כללי השוואתי של כל מערכות המרשל בגרף אחד, מוצג בציור מס' 3.5.



- ללא אפר פחם
- 5% אפר פחם
- 10% אפר פחם
- 20% אפר פחם

ציור מס' 3.5: מערכות מרשל של תערובת תא"מ 19 מ"מ עם מאגרסט דולומיט בתוספת תכולות שונות של אפר תחתית – הצגה השוואתית על גרף אחד

באופן כללי, להוציא את נושא אחוז החלל בתערובת, כל התערובות האספלטיות הכוללות אפר תחתית בתכולות שונות עונות על כל הקריטריונים הנדרשים בתערובות אספלטיות סוג א' לסלילה. תערובות אלה, בתחום רחב של תכולת ביטומן, מציגות ערכים נאותים וגבוהים של צפיפות, יציבות, נזילות וחוזק משתייר (ר' גם טבלה מס' 5.3 בהמשך). נושא אחוז החלל, הקשור ישירות לתכולת הביטומן הנדרשת, יידון בסעיפים הבאים.

בהשוואה כללית בין התערובות השונות, המוצגת בציור מס' 3.5, ניתן לראות את ההבדל ההדרגתי בכל תכונות התערובת בין תערובת הבקרה לבין התערובות המכילות אפר תחתית בשיעורים עולים משתנים. בכל הגרפים בציור (לגבי כל תכונות התערובת) ניתן לראות את העלייה היחסית בתכולת הביטומן הנגרמת עם העלייה בתכולת אפר התחתית בתערובת. כמו כן ניתן לראות את הקפיצה הגדולה יחסית בתכולת הביטומן האופטימאלית שחלה במעבר בין 10% ל-20% בתכולת האפר.

באופן כלל מתקבלות המגמות הבאות עם עלייה בתכולת אפר התחתית בתערובת:

- ירידה בצפיפות התערובת;
- ירידה ביציבות התערובת (רק בתכולה של 20% אפר);
- שמירה על תחום קבוע בערכי אחוז החלל ובערכי הנזילות;
- עליה באחוז החלל בתערובת היבשה (VMA) (רק בתכולה של 20% אפר).

לסיכום, תכונות התערובות האספלטיות המכילות שיעורים שונים של אפר תחתית דק, בתכולת הביטומן האופטימאלית (הנקבעת בהסתמך על קריטריון אחוז החלל), מסוכמות ומוצגות בטבלה מס' 3.2. הבאה:

טבלה מס' 3.2: סיכום תכונות התערובות השונות בתכולות ביטומן אופטימאליות שנקבעו על פי קריטריון מכסימום יציבות

נזילות (1/100")	יציבות (lb)	VMA (%)	אחוז חלל (%)	צפיפות (kg/m ³)	ת. ביטומן אופטימאלית (%)	תכולת אפר פחם תחתית (%)
13.1	3,250	15.2	6.0	2,400	4.7	0
13.8	3,150	15.3	6.0	2,340	5.3	5
10.3	3,150	15.8	6.0	2,285	6.2	10
9.9	2,480	17.8	6.0	2,160	8.2	20

4.2 השפעת תכולת אפר התחתית על אחוז החלל ותכולת הביטומן האופטימאלית

בתנאים אלה, ובהתחשב באספקט הכלכלי הנכבד, מגמה ראשונה שיש לבדוק היא השפעת תכולת אפר פחם תחתית בתערובת על תכולת הביטומן האופטימאלית הנקבעת תקנית בהתאם לקריטריון אחוז החלל. עקב נקבוביותם הרבה של חלקיקי אפר התחתית ומרקמם המחוספס, ניתן היה 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 לפי ערך החציון של תחום אחוז החלל המפורט לסוג התערובת המסוים. באם נשתמש בקריטריון זה, הרי עם עליית תכולת אפר

התחתית בתערובת, יש לצפות לתכולות ביטומן אופטימאליות גבוהות ביותר עקב כמות הביטומן הרבה הנכלאת בנקבובי חלקיקי האפר.

לעומת זאת, יש להניח כי תכולת הביטומן האפקטיבית (זו העוטפת את חלקיקי האגרנט 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.

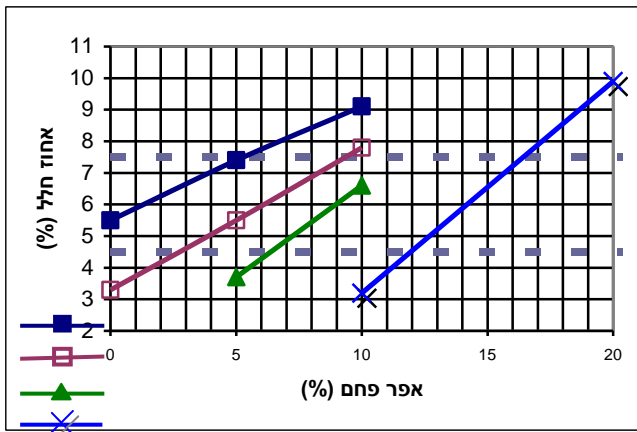
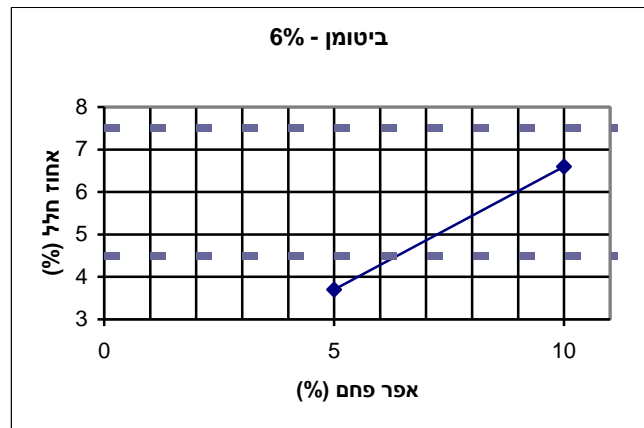
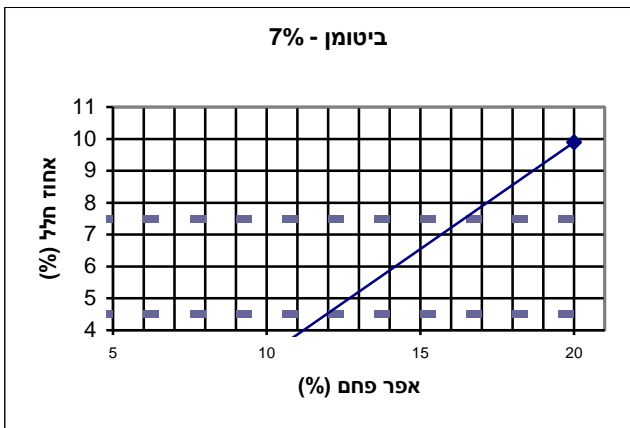
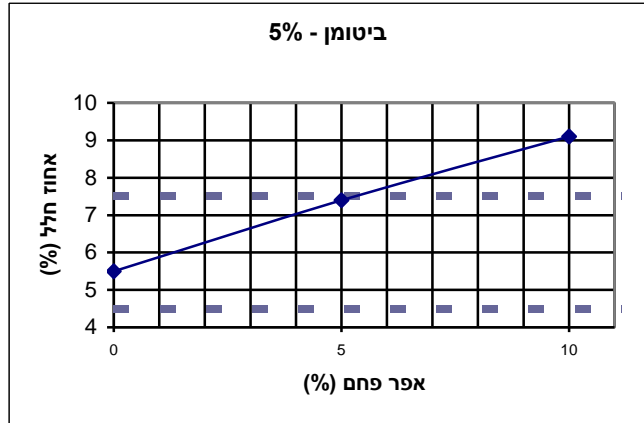
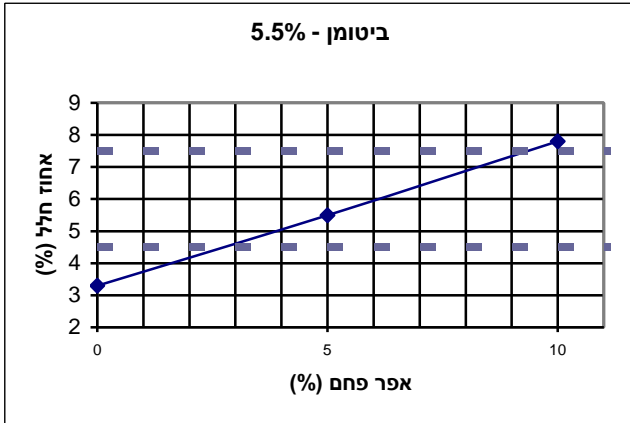
בהסתמך על מערכות המרשל המסוכמות ומוצגות בטבלה מס' 3.1 ובציורים מס' 3.1 עד 3.4, טבלה מס' 3.3 מציגה את השפעת תכולת אפר התחתית בתערובת על תכולת הביטומן האופטימאלית בשתי השיטות. לגבי קריטריון אחוז החלל, נבדקו תערובות אספלטיות תא"מ 19 מ"מ (אחוז חלל בתחום של 4.5-7.5%, וחציון אחוז חלל בשיעור של 6.0%).

טבלה מס' 3.3: 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 % חלל, תערובת תא"מ 19 מ"מ	
4.5	4.7	0
5.8	5.3	5
6.0	5.7	10
8.7	8.2	20

ביטוי גראפי להשתנות אחוז החלל בתערובת בתלות בתכולת אפר הפחם עד שיעור של 10%, עבור שיעורים שונים של תכולת ביטומן בתערובת, מוצג גם בציור מס' 3.6.

התוצאות בטבלה ובציור מורות כי אכן חלה באופן עקבי עליה בתכולת הביטומן האופטימאלית עם עלייה בתכולת אפר פחם תחתית בתערובת. מתקבל כי עד תכולת אפר תחתית של 10% העלייה הינה מתונה על פי שני הקריטריונים, כאשר בהתחשב בקריטריון התקני של אחוז החלל, ערכי תכולת הביטומן האופטימאלית הינם נמוכים יותר מאלה המסתמכים על קריטריון מכסימום היציבות. עלייה משמעותית ביותר בתכולת הביטומן חלה בתכולת אפר תחתית של 20% וזאת עבור שני הקריטריונים. המשתמע הוא כי עד תכולה של 10% אפר תחתית ניתן להמשיך ולהתבסס על קריטריון אחוז החלל, כאשר נבחנת עלייה של 1.5% בלבד בתכולת הביטומן האופטימאלית בהשוואה לתערובת הבקרה התקנית.



עקומת אחוז חלל כנגד תכולת אפר פחם תחתית

- 5% ביטומן
- 5.5% ביטומן
- 6% ביטומן
- 7% ביטומן

ציור מס' 3.6: השתנות אחוז החלל בתערובת תא"מ 19 מ"מ בתלות בתכולת אפר הפחם עד שיעור של 10%, עבור שיעורים שונים של תכולות ביטומן בתערובת

באם משווים תוצאות אלה עם התוצאות שהושגו בחקירה הראשונית המתוארת במראה מקום 1, מתקבל כי חקירת המשך הנוכחית מאופיינת בהשתנות מתונה יותר בערכים המוחלטים של אחוז החלל. הדבר נובע הן מתחומי אחוז החלל הגבוהים יותר בתערובות תא"מ בהשוואה לתערובות הצפופות שנבדקו בחקירה הראשונית. כמו כן מגמה זו נובעת גם מאנרגיית ההידוק הגבוהה יותר שאומצה בחקירת המשך זו.

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 יפה בקריטריונים המקובלים. גם הגדלת תכולת הביטומן, בתנאי אופטימום הנקבעים לפי הקריטריון התקני של חציון אחוז החלל, הנה מתונה ובתכולת אפר תחתית בשיעור של עד 10%, הנה בתחום סביר גם מהבחינה הכלכלית.

5. סיכום מסקנות והמלצות להמשך

מטרתה העיקרית של חקירת המשך זו הייתה לבחון את היתכנות השימוש בתוספת אפר תחתית גם תערובות אספלטיות הנפוצות כיום בכבישי הארץ תחת עומסי הידוק גבוהים יותר. הכוונה היא לתערובות אספלטיות חמות שהרכבן אומץ בפרויקט המחקר האמריקאי SHRP (Strategic Highway Research Project) בפלח המחקר האספלטטי שכונה – SuperPave, וכן לרמת הידוק גבוהה יותר של 75 הקשות לכל צד בהכנת מדגמי המעבדה.

החלק הראשון של חקירת המשך, המתואר בדו"ח זה, כלל שני שלבים עיקריים באפיון התערובת האספלטית ומרכיביה, והם:

- אפיון מעבדתי של אפר פחם תחתית והשוואתו עם חול מחצבה דולומיטי.
- אפיון תכונותיהן המיידיות של תערובת אספלטיות הכוללות אפר תחתית בסדרת מערכות מרשל והשוואתן עם תערובת בקרה קונבנציונאלית מאגרנט דולומיטי בלבד.

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

1. מבחינת מרכיבי התערובות, אפר התחתית שנכלל בחקירה הינו בעל גרגיר מכסימאלי של כ-5 מ"מ. צפיפותו הממשית הממוצעת הינה נמוכה, וההבדל בינה לבין הצפיפות הנדמית הממוצעת מתבטא בספיגות גבוהה למים בשיעור של כ-14%. אפר התחתית עשית יחסית במלאן, בתכולה של כ-20%. האפר הינו בלתי פלסטי ובעל שווה ערך חול גבוה בשיעור של 60%. כמו כן מתקבל כי אגרנט דולומיט זה עונה על כל דרישות ת"י 8 עבור אגרנטים לתערובות אספלטיות וכן על כל דרישות המפרט הבין משרדי פרק 51, והמפרט לסלילה של מעצ – החברה הלאומית לדרכים בישראל לגבי תערובות אספלטיות סוג א'. לבסוף, תכונות הביטומן האספלטי שהובא למעבדה מלמדות שהביטומן עומד בכל הקריטריונים של ביטומן אספלטי בסיווג PG 68-10.

2. באופן כללי, להוציא את נושא אחוז החלל בתערובת, כל התערובות האספלטיות הכוללות אפר תחתית בתכולות שונות עונות על כל הקריטריונים הנדרשים בתערובות אספלטיות סוג א' לסלילה. תערובות אלה, בתחום רחב של תכולת ביטומן, מציגות ערכים נאותים וגבוהים של צפיפות, יציבות, נזילות וחוזק משתייר. בהשוואה כללית בין התערובות השונות, ניתן לראות את ההבדל ההדרגתי בכל תכונות התערובת בין תערובת הבקרה לבין התערובות המכילות אפר תחתית בשיעורים עולים משתנים. בהקשר זה ניתן לראות את העלייה היחסית בתכולת הביטומן הנגרמת עם העלייה בתכולת אפר התחתית בתערובת. כמו כן ניתן לראות את הקפיצה הגדולה יחסית בתכולת הביטומן האופטימאלית שחלה במעבר בין 10% ל-20% בתכולת האפר.

3. מתוצאות החקירה מתקבלות המגמות הבאות עם עלייה בתכולת אפר התחתית בתערובת:

- ירידה בצפיפות התערובת;
- ירידה ביציבות התערובת (רק בתכולה של 20% אפר);
- שמירה על תחום קבוע בערכי אחוז החלל ובערכי הנזילות;
- עליה באחוז החלל בתערובת היבשה (VMA) (רק בתכולה של 20% אפר).

4. באשר ליחסי אחוז חלל – תכולת ביטומן, התוצאות מורות כי אכן חלה באופן עקבי עליה בתכולת הביטומן האופטימאלית עם עלייה בתכולת אפר פחם תחתית בתערובת. מתקבל כי עד תכולת אפר תחתית של 10% העלייה הינה מתונה על פי שני הקריטריונים, כאשר בהתחשב בקריטריון התקני של אחוז החלל ערכי תכולת הביטומן האופטימאלית הינם נמוכים יותר מאלה המסתמכים על קריטריון מכסימום היציבות. עלייה משמעותית ביותר בתכולת הביטומן חלה בתכולת אפר תחתית של 20% וזאת עבור שני הקריטריונים. המשתמע הוא כי עד תכולה של 10% אפר תחתית ניתן להמשיך ולהתבסס על קריטריון אחוז החלל, כאשר נבחנת עלייה של 1.5% בלבד בתכולת הביטומן האופטימאלית בהשוואה לתערובת הבקרה התקנית.

5. באם משווים תוצאות אלה עם התוצאות שהושגו בחקירה הראשונית, מתקבל כי חקירת ההמשך הנוכחית מאופיינת בהשתנות מתונה יותר בערכים המוחלטים של אחוז החלל. הדבר נובע הן מתחומי אחוז החלל הגבוהים יותר בתערובות תא"מ בהשוואה לתערובות הצפופות שנבדקו בחקירה הראשונית. כמו כן מגמה זו תלויה גם באנרגיית ההידוק הגבוהה יותר שאומצה בחקירת המשך זו.

6. ממצאים ומסקנות אלה מצביעים על כך, כי בדומה לחקירה הראשונית, גם חקירת ההמשך מראה שלמרות 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 הקריטריון התקני של חציון אחוז החלל, הנה מתונה ובתכולת אפר תחתית בשיעור של עד 10%, הנה בתחום סביר גם מהבחינה הכלכלית.

לסיכום, לאור ממצאים אלה, ניתן בהחלט להגדיר גם את תוצאות חקירת ההמשך כחיוביות ביחס להשפעת תוספת מדודה של אפר פחם תחתית (בשיעור של עד 10%) לתערובות אספלטיות רגילות. השלמת חקירת ההמשך תבוצע בחודשים הקרובים בבדיקת הרגישות למים של התערובות האספלטיות הכוללות אפר פחם עד תכולה של 10%, וכן בבדיקת השפעת תוספת אפר מרחף כמלאן לתערובת. כמו כן תיבדק רגישות התערובת בשינויי אחוזי המלאן לשני סוגיו.

6. רשימת מראי מקום

1. ישי, אילן וישראל, גלי "הערכת המקטע הדק באפר פחם תחתית לשימוש כמרכיב אגרגטי בתערובות אספלטיות חמות" חקירת היתכנות ראשונית, דו"ח מסכס. הטכניון, המכון לחקר התחבורה, מחקר מס' 2000977, דו"ח מחקר מס' 306-2005, פברואר 2006.