



מנהלת אפר פחם

<http://www.coal-ash.co.il>



הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל  
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית  
המכון לחקר התחבורה

# שימוש באפר פחם מרחף כקשרן כבישים הידראולי ליצירה ולחיזוק שכבות מיסעה מבניות

## תקציר דו"ח מסכם

מאת

קרן בנימין פרופ' אילן ישי וד"ר מריו הופמן

פרויקט מחקר טכניוני מס' 2000973

במימון מנהלת אפר הפחם

יולי 2006

חיפה

## תקציר

מחקר מעבדתי זה עסק בפתרונות הנדסיים למציאת שימושים הולמים לפסולות תעשייתיות המיוצרות מידי שנה והופכות למפגע סביבתי. המחקר בחן שימוש באפר פחם מרחף, הנוצר משריפת פחם ליצירת חשמל בארץ, כמרכיב עיקרי בקשרן כבישים הידראולי האמור לשמש לחיזוק ויצירת שכבות מיסעה מיבניות.

קשרן כבישים הידראולי הנו חומר יישומי חדש יחסית, המוכר בעשור האחרון. רוב הניסיון איתו הצטבר במדינות אירופה ובעיקר בצרפת ובאנגליה. ע"פ טיוטת תקן אירופאי משנת 2000 הקשרן הוא אבקה המורכבת בעיקר מתוצרי לוואי תעשייתיים, כמו אפר הפחם המרחף, ומטרתה לקשור חומרים אינרטיים וע"י כך לחזקם, בדומה לפעולה של צמנט פורטלנד. יישום זה טרם נוסה בארץ. האפשרות של שימוש בקשרן זה על בסיס אפר פחם מרחף מהווה עליית מדרגה טכנולוגית ביחס לשימוש בחומרי סלילה קיימים. כמו כן מדובר ביישום "תעשייתי", מקצועי ומתוחכם אשר דורש מיומנות ובקרת איכות יותר קפדנית.

במסגרת המחקר בוצעה תחילה סקירת ספרות שנחלקה לשני חלקים:

1. בחלקה הראשון הוגדר הקשרן ההידראולי, לפי טיוטת תקן אירופאי משנת 2000, הוצגו מרכיביו ותוארו תכונותיו ההנדסיות באופן כללי. לאחר מכן הוצגו החומרים בהם נעשה שימוש במחקר זה, כמרכיבים בקשרן. המרכיב העיקרי (בתכולה של 90%) היה אפר פחם מרחף. הסקירה פרטה את סוגי האפר המרחף הקיימים, תכונותיו הפיסיקליות והכימיות של האפר המאפשרים לו להתנהג באופן "אקטיבי" כמרכיב עיקרי בקשרן. כמו כן, הוצגו היתרונות האפשריים של הוספת סיד וגבס כמרכיבים משניים במטרה לשפר את תכונות הקשרן.

2. בחלקה השני, התייחסה הסקירה לשימושים שונים של אפר פחם מרחף בסלילה הקיימים כיום בארץ ובעולם באופן כללי, וליצוב חומרי מיסעה ותערובות קשרניות (Fly Ash Bound Mixtures) עם אפר מרחף באופן מפורט יותר ובהתאם לתקנים אירופאים משנת 2004. מספר המאמרים והעבודות שנמצאו בנושא קשרן הידראולי ותערובות הקשרניות עם אפר פחם היה מצומצם יחסית וזאת בשל כך שיישום זה חדש יחסית, כפי שצוין.

הסקר הספרותי הווה נדבך מכין למחקר המעבדתי שמטרתו הייתה בחינת קשרן הידראולי, המכיל אפר פחם מרחף ממקור דרא"פ, הנוצר בארץ ונבדק ישירות לאחר הוצאתו מהסילו, כמרכיב עיקרי. כמו כן נבדק כיצד תורמים סיד וגבס (בתכולה כוללת של עד 10%) לשיפור תכונות הקשרן. לשם כך נבדקו 5 צירופים באחוזים משתנים של אפר פחם, סיד וגבס. כמו כן הוגדרו שתי מטרות משניות: 1. השוואת התוצאות לאלו המתקבלות עבור אפר פחם ממקור אחר (אפר אינדונזי), ו-2. השוואת התוצאות לאלו המתקבלות באותו האפר לאחר שימורו בערימה.

הבדיקות שנבחרו ובוצעו הם: בדיקות צפיפות-רטיבות-מת"ק, בדיקות חוזק בלא כלוא, ניסיון הבקיעה, בדיקת קיים במחזורי הרטבה וייבוש, בדיקת דפורמציה תחת עמיסת גלגל נע ובדיקות כימיות (XRD, SEM).

התוצאות שהתקבלו הושוו עם תקנים ומפרטים לחומרים מיוצבים ולתקן אירופאי לתערובות קשרניות עם אפר פחם, בניסיון למצוא קשר בין הבדיקות המכאניות לבדיקות הכימיות, ע"י השוואה בין הצירופים השונים שנבדקו, בין צירופים עם סוגי אפר שונים, ובין אפר מהסילו ומערימה.

תוצאות הבדיקות הראו, שאפר פחם מרחף, ממקור דרא"פ שנלקח מהסילו, עמד בדרישות תקנים ומפרטים שונים ברחבי העולם, הנו בעל חוזק גבוה יחסית לחומרים מיוצבים, בעל קיים גבוה, אינו מתפורר או נסדק במעברי גלגל עליו ולכן יכול להיות מרכיב בקשרן הידראולי. תוספת של סיד וגבס אכן משפרת את תכונותיו של האפר. שיפור זה מושג בשל הריאקציות הכימיות שעוברים האפר והתוספים.

בהשוואה של צירופים שהכילו אפר דרא"פ לאלו שהכילו אפר ממקור אינדונזי נמצא שלמקור הפחם וכן להרכבו הכימי של האפר השפעה ניכרת על תכונותיו כקשרן. אפר אינדונזי הכיל סיד חי בכמות מזערית של 1.9%, לעומת האפר הדרא"פ שהכיל כמות של 10.33%. כמות הסיד הנמוכה, ככל הנראה, השפיעה בצורה משמעותית על תוצאות הבדיקה ולכן הייתה ירידה בעשרות אחוזים בתוצאות. האפר האינדונזי אינו אקטיבי, בניגוד לאפר הדרא"פ, ולכן תוספת של סיד וגבס שיפרה באופן משמעותי יותר את תכונותיו.

בהשוואה בין אפר דרא"פ שנלקח ישירות מהסילו לבין אפר ששהה בחוץ, בערימה שהורטבה, נמצאה ירידה בסדר גודל של מאות אחוזים בחוזק ואפר זה לא עמד בדרישות המפרטים והתקנים לחומרים מיוצבים. יחד עם זאת, סדרת הבדיקות שבוצעה באפר מערימה הייתה מצומצמת ולכן דרושה חקירה נוספת, נרחבת יותר, לפני שניתן יהיה להסיק מסקנות פסקניות.

בהסתמך על מחקר זה, אפשר לקבוע כי ניתן להרכיב קשרן הידראולי יעיל בקומבינציות של אפר פחם מרחף עם גבס וסיד. יעילותו של הקשרן, ותכונותיו ההנדסיות והכלכליות, תלויים בסוג ותכונות אפר הפחם המרחף, שיטת הטיפול המקדים באפר, פרופורציות המרכיבים וזמן ההכשר הניתן לתערובת המהודקת. יעילותו ואפשרות יישומו המעשי של הקשרן ההידראולי הנ"ל אמורה להיבחן בהמשך בתנאים ריאליים בשדה הן בתנאי ניסוי מבוקרים או בסלילה מעשית המלווה במעקב צמוד.