



מדינת ישראל  
משרד האנרגיה והמים  
המכון הגיאולוגי

State of Israel  
Ministry of Energy and Water Resources  
Geological Survey

# בחינת פוטנציאל שחרור מתכות מתערובות צמנטיות המכילות אפר מרחף – בחנ"מ

נדיה טויטש ואולגה ברלין

## תקציר

אפר פחם מרחף יכול לשמש כתוסף מינרלי בתערובות צמנטיות המיועדות ליישומים שונים בתת הקרקע כגון בחני"מ וגראוט הנפוצים ביישומי תשתית.

השימוש באפר פחם כתוסף מעלה את החשש שמרכיבים בו ישתחררו מהתערובת הצמנטית לסביבה בכלל ולמי תהום בפרט. שאלה זו נבחנה במסגרת העבודה הנוכחית באמצעות ניסויי מיצוי בתנאים שונים. בעבודה זו נבדקו ריכוזי המתכות שהשתחררו מתערובות של בחני"מ וגראוט שהכילו ריכוז גבוה של אפר פחם מרחף בשלושה זמני אשפחה שונים. מטרת העבודה היא בדיקת הפוטנציאל לשחרור יסודות מזהמים שמקורם באפר מרחף בתערובות הצמנטיות ביישומי תשתית. לעבודה זו חשיבות שכן ישנו חשש שמתכות מאפר הפחם המצוי בתערובות אלו ימצא את דרכו לסביבה.

דו"ח זה מפרט את הבחינה של תערובת בחני"מ בלבד.

אפר הפחם CerD ממקור קולומביאני (שנדגם בתחנת הכוח רוטנברג ב- 17.3.11) נבחר לתהליך המיצוי בשל הריכוזים הגבוהים של יסודות מזהמים בו וכן בשל האקטיביות הפוצולנית הנמוכה יחסית שלו. בגלל תכונות אלו, הוא צפוי לשחרר מזהמים בריכוז גבוה.

לניסוי הוכנו קוביות של תערובות צמנט הכוללות אפר וכרקע גם כאלו שלא הכילו אפר (רפרנס). הקוביות (10\*10\*10 ס"מ) יוצרו במעבדת מכון התקנים והושארו לשלושה זמני אשפחה שונים: 7, 28 ו- 90 ימים על פי תקני הבטון. כלומר 7 ימים בתנאי רטיבות וטמפרטורה מבוקרים ולאחר מכן בתנאי חדר. הליך המיצוי נעשה על פי הפרוצדורה האירופאית EA NEN 7375:2004 המורכבת משמונה שלבי מיצוי בהם מוחלפים מי התשטיפ (מיום אחד ועד 64 ימים). הפאזה הנוזלית המתקבלת בכל אחד משלבי המיצוי נבדקת לתכולת יסודות קורט שלחלקם פוטנציאל זיהום:

Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Th, U, V, Zn

בכל אחד מהשלבים נמדדו רמת החומציות והמוליכות של התמיסה. התנודות החזקות ברמת החומציות ובמוליכות של התשטיפים בתחילת תהליך המיצוי ובמיוחד אלו שעברו 7 ימי אשפחה מעידים שהתערובות הצמנטיות לא הגיעו לבגרות (aging).

ריכוזי המרכיבים הכימיים מחושבים לכל אחד משלבי המיצוי וכן מחושב ריכוז מצטבר מנורמל לשטח פנים שאותו ניתן להשוות לקריטריון בר שימוש. בהיעדר קריטריון אחר, הושוו התוצאות לקריטריון ההולנדי לחומרי בנייה. מרבית היסודות הנבדקים השתחררו בריכוזים נמוכים מאד וחלקם אפילו מתחת לסף המדידה. מבין שלושת המתכות סלן, אנטימון ומוליבדן שריכוזם באפר גבוה, רק ריכוזי הסלן גבוהים מהקריטריון ההולנדי. מכאן שהתוצאות הראשוניות מצביעות על כך שאין חשש ממשי לשחרור מתכות מאפר הפחם כאשר הוא מוסף לתערובות צמנטיות.

בהמשך יש לבחון את השפעת תנאי האשפחה על ריכוזי המתכות שהשתחררו במהלך המיצוי. צפוי כי האשפחה בתנאי חדר (בקוביות של 28 ו-90 ימי אשפחה) גרמה לשקיעת קלציום קרבונט בפני השטח של הקוביות ומכאן לשינוי במנגנון השחרור של המתכות.

## מבוא

שימוש באפר פחם בישראל בתחום התשתיות, הבניה והחקלאות תלוי באפיון האפר והגדרתו כ- "אפר בר שימוש". קריטריון זה הוא תלוי יישום ונקבע על סמך הערכת שטיפת המתכות תחת התנאים הסביבתיים הנוצרים ביישום האפר הספציפי. אפר מרחף יכול לשמש כמלאן פוצולני (כלומר, התקשות בתגובה עם סיד ומלוי חללים) בתערובות צמנטיות המיועדות ליישום למטרות שונות בתת הקרקע.

בחני"מ (בטון בעל חוזק נמוך מבוקר; Controlled Low Strength Material - CLSM) וגראוט הינם שני סוגי תערובות צמנטיות בהם אפר פחם יכול לשמש כמוסף מינרלי בתערובת. בחני"מ נועד למלא חללים (תעלות, בורות וכד') כתחליף למילוי חוזר של קרקע או כתחליף למילוי בחול טבעי או במוצרי מחצבה דקים. הגראוט נועד למילוי סדקים בסלע ו/או מילוי בין הבטון היצוק כעטיפה לסלע. בשל הכמות המועטה של אפר הפחם בתערובת הבחני"מ שימושו ביישומי תשתית מינורי ואילו בגראוט השימוש באפר פחם נפוץ יותר. מאידך, בשל יעוד הגראוט בעיקר למילוי תשתיות, השימוש בו הוא בכמות מוגבלת.

ביישומי תשתית עשויים הבחני"מ והגראוט לבוא במגע עם מי נגר ואף עם מי תהום ולפיכך יש לבחון את מידת השטיפה של יסודות מזהמים כתוצאה מהוספת אפר לתערובת. מסקירה כללית של מחקרים שנעשו על תערובות צמנטיות המכילות אפר פחם לייעודי תשתית, עולה כי רובם המכריע עוסק בתכונות הפיסיקליות-הנדסיות של החומר. מעט מחקרים בחנו השפעה סביבתית בשטיפת יסודות. במחקרים אחדים נמצא כי ריכוזי היסודות המזהמים בתשטיפים נמוכים מרמת הסף המוגדרת ע"י רשויות הגנת הסביבה לסיכון מי התהום וכי העיסה הצמנטית מפחיתה את מסיסות המזהמים שבאפר. ממצאים דומים התקבלו בבדיקות ראשוניות מצומצמות שנעשו במכון הגיאולוגי בעבר. הדו"ח הזה סוקר את הרקע והשיטות שישומו לבחינת בחני"מ וגראוט ומתמקד בתוצאות בדיקת הבחני"מ בלבד.

## מטרת המחקר

לבדוק באם מתקיים חשש משחרור יסודות מזהמים שמקורם באפר מרחף בתערובות הצמנטיות המשמשים למילוי חללי קרקע וסלע ביישומי תשתית. בהתבסס על ממצאי העבודה ניתן יהיה להגדיר תנאים לשימוש באפר מרחף לייעודי תשתית בתערובות צמנטיות.

## מתודולוגיה

אפר פחם שולב בתערובות מייצגות של בחני"מ המשמשות בישראל. קוביות הוכנו מתערובות אלו במכון התקנים הישראלי. התערובות נבדקו על פי הפרוצדורה האירופאית EA NEN 7375:2004 המכונה גם tank test ומשמשת לאפיון תשטיפים של מרכיבים אי-אורגניים ממונולית המיוצר מפסולות מוצקות כולל פסולות חומרי בנייה. פרוצדורה זו דומה לפרוצדורה האמריקאית (EPA 1315 Mass Transfer Rates in ) Monolithic and Compacted Granular Materials using a Semi-dynamic Tank Leaching Procedure) שעברה לאחרונה אשרור (EPA, 2012a) אך עדיין לא התפרסמה. תרומת האפר בתערובות נבחנת בהשוואה לתערובות ללא אפר. תהליך המיצוי כולל שמונה שלבים משש שעות ועד ל-64 ימים

ומבוצע על קוביות שהושארו לזמני אשפרה שונים (7, 28 ו-90 ימים). המיצוי לכל הרכב קובייה ולכל זמן אשפרה בוצע בדופליקט.

## **שיטות עבודה**

### **1. הכנת הקוביות**

הכנת קוביות של  $10 \times 10 \times 10$  ס"מ בתערובות מייצגות של בחנ"מ (טבלה 1) וגראוט יוצרו במעבדת מכון התקנים על פי הנחיות אינג' גדעון אירוס, יועץ מנהלת אפר הפחם. הקוביות יוצרו בתוך תבניות פלסטיק שנוקו מראש על מנת למנוע זיהום מהתבניות. האפר שנבחר למיצוי הוא CerD שהינו אפר ממקור קולומביאני שנדגם בתחנת הכוח רוטנברג ב-17.3.11 ומאופיין בריכוזים גבוהים של יסודות מזהמים ובעל אקטיביות פוצולנית נמוכה יחסית ולכן צפוי לשחרר מזהמים בריכוז גבוה.

המדגם הטרי הונח לאשפרה במקום מוגן לפרקי זמן של 7, 28 ו-90 יום. תקופות האשפרה השונות נבחרו מסיבות הנדסיות ונועדו לאפשר התחזקות של הבטון. בדרך כלל הבטון משלים את מרבית תהליך ההתחזקות עד 28 יום. אם הבטון לא עומד בדרישת התקן לגיל זה אין פירוש הדבר שיש לפסול את הבטון אלא יש לבדוק אותו בגיל 90 יום. זמן אשפרה של 7 ימים הוא מינימלי ומייצג את השימוש המידי לפני התחזקות הבטון. חשוב לציין שהאשפרה שנערכה לקוביות נעשתה על פי תקני הבטון, כלומר 7 ימים בתנאי רטיבות (95%) וטמפרטורה ( $20 \pm 2$  מעלות צלזיוס) מבוקרים ולאחר מכן המשך אשפרה נערך בתנאי חדר. על פי EPA (2012a) תנאי האשפרה הראשוניים חייבים להישמר למשך כל זמן האשפרה ובמידה שמתקיימת חשיפה לתנאי אחרים, יש לכסות את הקוביות ולנתקן ממגע עם האוויר (EPA, 2012b). מידת ההשפעה של חשיפה מוקדמת זו על תהליכי ההתבגרות של התערובת והשפעתה על ריכוזי היסודות הנמדדים בתשטיפי המיצוי נמצאת בבדיקה. קוביות נוספות של הרכב נתון נוצקו לאפיון פיסיקלי (משקל, שטח פנים וכדומה) וכימי (הרכב יסודות עיקריים ויסודות קורט).

### **2. הליך המיצוי**

הליך המיצוי נעשה על פי פרוצדורה EA NEN 7375:2004 (להלן הפרוצדורה). לאחר זמן אשפרה נתון, הקוביות הוכנסו למיכל שעבר ניקוי מקדים עם  $1M HNO_3$  והונחו על גבי בסיס עשוי גליל מפלסטיק (להבטיח מגע של כל שטח פני הקובייה עם המים). כמות המים הנדרשת לפי הפרוצדורה היא 2 עד 5 מנפח המדגם ובכיסוי של לפחות 2 ס"מ מכל צדדי המדגם. כמות המים שהוספו נעה בין 3 ל-4 ליטר. תהליך המיצוי התרחש ללא ערבוב המים.

המיצוי נערך בשמונה שלבים (טבלה 2) שכל אחד מהם כולל:

- א. מילוי מים נטולי יונים (מים מזוקקים) והשארת הקוביות עד לזמן הדגימה (איור 1).
- ב. ריקון המים למיכל אחר ומילוי מחודש של מיכל המיצוי.
- ג. לקיחת שתי דוגמאות של 50 מ"ל לאנליזות כימיות דרך פילטר חד פעמי של  $45 \mu m$ .

ד. מדידת חומציות ( $\text{pH} \pm 0.05$ ) ומוליכות ( $\pm 1\%$ ) וריקון המים.

הזמן הנדרש מתום היציקה ועד לסיום תהליך המיצוי הוא 154 ימים ולוח הזמנים לבדיקות מסוכם בטבלה 3 וכולל את מספר הקוביות הנמצאות במיצוי בכל שלב.

### 3. אנליזות כימיות

הפאזה הנוזלית המתקבלת בכל אחד מהשלבים נבדקת לתכולת יסודות הקורט

.Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Th, U, V, Zn

באמצעות ICPMS למעט ריכוז כספית שנמדד ב-AF.

### תוצאות בחנ"מ (CLSM)

קוביות הבחנ"מ משלושת זמני האשפרה (7, 28 ו-90 ימים) ומיכל הבלנק עברו את תהליך המיצוי. תוצאות הבלנק מראות שאין כל תוספת חיזונית לתמיסת המיצוי (זיהום) בתהליך הניסוי מתחילתו ועד סופו. ההרכב הכימי של יסודות עיקריים ויסודות קורט מופיע בטבלה 4. ההבדלים הבולטים בהרכב הכימי בין הרכב התערובת הצמנטית עם האפר להרכב הרפרנס ללא אפר הינם בריכוז גבוה של סיליקה בתערובת עם האפר לעומת ריכוז גבוה של מרכיבים קרבונטיים בתערובת הרפרנס. כמו כן בתערובת המכילה אפר ישנה העשרה ברורה במרבית יסודות הקורט. הבדלים אלו נובעים הן מהרכב האפר המוסף והן מהיחס השונה בין המרכיבים האחרים ללא האפר.

ערכי המוליכות וה-pH שנמדדו בשלבי המיצוי השונים מוצגים בטבלה 5. ערכי המוליכות שנמדדו בכל שלב מיצוי מוצגות באיור 2 והשינוי בערכי המוליכות לעומת ערכי ה-pH מוצגים באיור 3. ההבדלים המשמעותיים בשינויים בערכי המוליכות וברמת החומציות מקורם בזמני האשפרה השונים: בזמן האשפרה של 7 ימים ישנם שינויים גדולים ברמת המוליכות ומעט מאד ברמת החומציות לעומת זמן האשפרה הארוך ביותר של 90 יום בו אין כמעט הבדל במוליכות אך ישנו הבדל משמעותי ברמת החומציות. בזמן האשפרה האמצעי של 28 יום, ישנם שינויים במוליכות וברמת החומציות. בשלושת זמני האשפרה רמת החומציות נמוכה יותר (תמיסה חומצית יותר) בקוביות עם אפר לעומת קוביות הרפרנס. בסדרת האשפרה של 7 ימים בה ישנם הבדלים משמעותיים במוליכות, הקוביות עם האפר בעלות מוליכות נמוכה יותר. המוליכות הגבוהה בזמן האשפרה הקצר וכן התנודות החזקות בתחילת המיצוי מעידות על חוסר בגרות (aging) של התערובת. ניתן לסכם ולציין שבגרות התערובות הייתה מביאה לתנאי יציבות הן ברמת החומציות והן במוליכות.

הריכוזים של היסודות Hg, Ag, Pb, Th, U היו נמוכים מערכי סף המדידה בכל שלבי המיצוי ומכאן שאין חשש לשחרורם בתנאים אלו. בדומה, ריכוזי ה-Mn, Co, Cu נמצאו נמוכים מערכי סף המדידה במרבית התשטיפים ולכן אף הם לא מעלים חשש. מכיוון שסביר להניח שהכספית מתנדפת במהלך המיצוי ומומלץ לא להמשיך למדוד ריכוז זה.

ריכוזי המרכיבים הכימיים מחושבים תחילה לכל אחד משלבי המיצוי וכן מחושב הריכוז המצטבר המנורמל לשטח הקובייה על מנת להשוות את התוצאות לקריטריון מותר לשימוש:

א. ריכוז היסוד בנוזל התשטיף ( $\mu\text{g/L}$ ) בכל מיצוי – הערך הנמדד.

ב. ריכוז היסוד המצטבר (cumulative) בכל שלבי המיצוי (mg). הריכוז המצטבר של היסוד בפרק זמן (64 יום לכל תהליך המיצוי) מנורמל לשטח הפנים של הדוגמא מוגדר כסך הריכוז המצטבר עד לשלב הסופי (כלומר השלב האחרון וכל הקודמים לו).

ג. ריכוז היסוד המצטבר (cumulative) (סעיף ב') ביחס לשטח הפנים של הדוגמא ( $\text{mg/m}^2$ ) בכל שלבי המיצוי (סכום של 8 השלבים עד 64 יום) – טבלה 6.

שטח פני הקוביות זהה – 0.06 מ"ר.

החזרתיות הטובה בין הקוביות מאותו הרכב ואותו זמן אשפרה (דופליקט) מוצגת בטבלה 7.

מכיוון שנמצאה חזרתיות מצוינת בין קוביות הדופליקט הושווה ממוצע הריכוזים המצטברים ( $\text{mg/m}^2$ ) בכלל תהליך המיצוי (64 ימים) לקריטריון ההולנדי למונולית (טבלה 8). משמעות הערכים המוצגים בטבלה 8 היא שערך הקטן מ-1 מציין העדר תרומה של האפר ואילו ערך מעל 1 מעיד שישנה תרומה מהאפר. הפחתה של ערכי הקוביות ללא האפר מריכוזי הקוביות עם אפר כמו כן חושבה תרומת האפר בלבד וזאת על ידי הפחתה של ערכי המיצוי שהתקבלו מקוביות הרפרנס ללא אפר מקוביות האפר. הפחתה זו אינה מדויקת והינה הערכה בלבד משום שהקוביות אינן זהות בהרכבן (יחסי צמנט-חול שונים).

פרט לסלניום כל הערכים המצטברים ( $\text{mg/m}^2$ ) של היסודות שנמדדו היו נמוכים מהקריטריון ההולנדי לחומרי בנייה. למרות שערכי אנטימון ומוליבדן גבוהים באפר, הם אינם עוברים את סף הרגולציה ההולנדית. ערכי סלניום חורגים מהקריטריון ההולנדי באשפרה של 28 יום (פי 1.8) ו-90 יום (פי 3). בשל הערכים הזוהים בין קוביות האפר ובהפחתה של הרכב קוביות הרפרנס (טבלה 8), ברור שהריכוזים שהתקבלו במיצוי מקורם אך ורק באפר. ערכי הסלן אינם חורגים מהקריטריון ההולנדי ב-7 ימי אשפרה, כנראה בשל ההרכב ה"טרי" של התערובת ובחוסר בתהליך ההתבגרות של התערובת. חשוב לציין שיתכן והקריטריון ההולנדי אינו אופטימלי עבור התנאים בישראל משום שתנאי ניצול התערובות הצמנטיות הינם תלויי מקום (למשל אקלים, סוגי קרקעות וכו'). בהיעדר קריטריון ישראלי וכל קריטריון אחר עד כה, זהו הקריטריון היחיד הניתן להשוואה.

בהיעדר קריטריון אחר, המשמעות של חריגת סלן מהקריטריון ההולנדי משליכה על כמויות האפר והצמנט בתערובת צמנטית מסוג בחנ"מ לשימוש מסוים. ההשפעה של כמות הצמנט על שחרור האפר נבדקה בתערובת גראוט, המכילה כמויות אפר וצמנט גבוהות בהרבה מתערובת הבחנ"מ ובהן לא הייתה חריגה.

## סיכום ומסקנות:

אפר פחם מרחף בעל אקטיביות פוצולנית נמוכה יחסית ועם ריכוז גבוה של יסודות מזהמים הוכנס כתוסף מינרלי לתערובות צמנטיות של בחנ"מ וגראוט. זאת על מנת לבדוק את פוטנציאל השחרור של יסודות מזהמים שמקורם באפר מרחף בתערובות הצמנטיות ביישומי תשתית. דו"ח זה פירט את תוצאות תערובת הבחנ"מ עם אפר בהשוואה לתערובת ללא אפר.

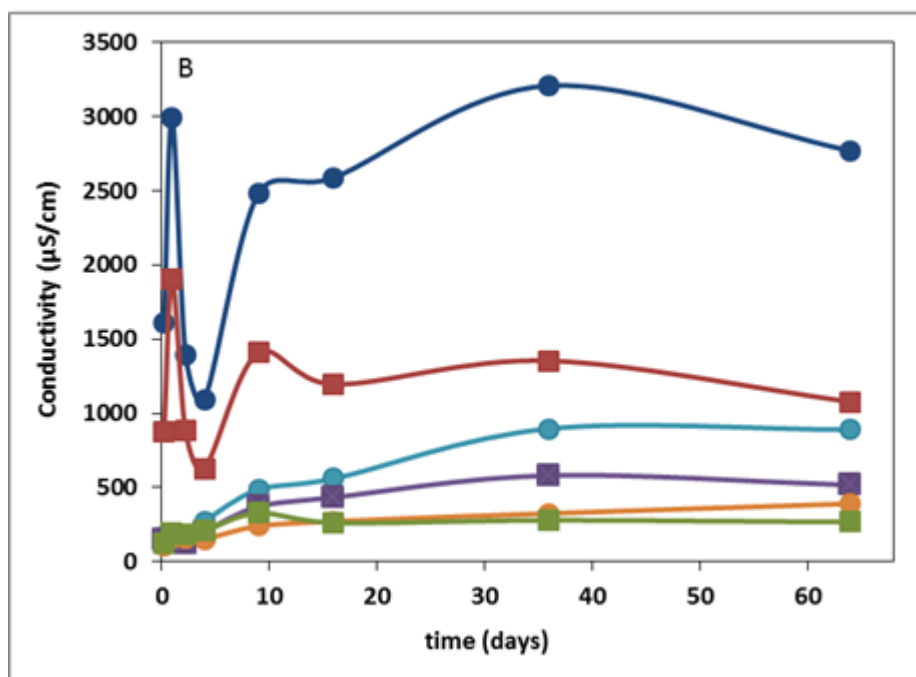
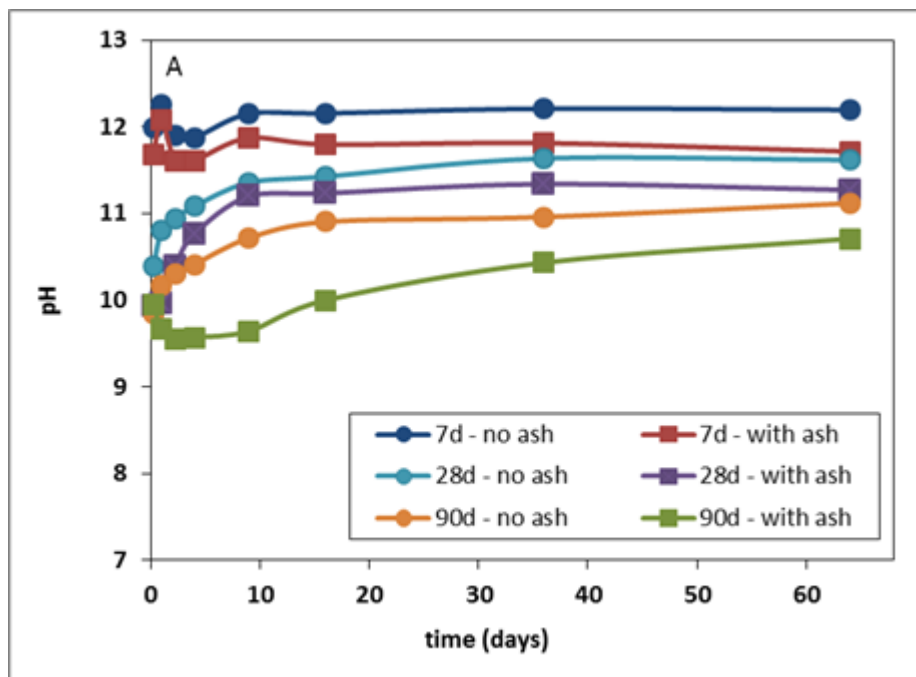
תנאי האשפיה של הקוביות שהוכנו מהתערובות הצמנטיות היו לפי תקני הבטון (רק 7 ימים בתנאי רטיבות וטמפרטורה מבוקרים) ולא על פי התנאים המיועדים לבחינת תהליך המיצוי של המתכות (תנאים מבוקרים במשך כל זמן האשפיה. מידת ההשפעה של החשיפה המוקדמת לתנאים אטמוספריים על תהליכי ההתבגרות של התערובת, על השקעה צפויה של קלציום קרבונט בפני השטח של הקוביות ועל שחרור המתכות בתשטיפי המיצוי נמצאת בבדיקה. בנוסף, מתוך דו"חות שהתפרסמו לאחרונה על ידי EPA, מסתבר שזמני האשפיה הקצרים שנערכו בעבודה זו של 7 ו-28 ימים אינם מספקים משום שזהו זמן קצר מדי להגעה למידת בגרות (aging) מספקת של התערובות הצמנטיות.

למעט סלן, תוצאות הריכוז המצטבר מנורמל לשטח פנים של שאר היסודות הכימיים כולל אנטימון ומוליבדן שריכוזם באפר גבוה, הינם נמוכים מהקריטריון ההולנדי לחומרי בנייה. נכון לעכשיו, זהו הקריטריון היחיד אליו ניתן להשוות. מכאן שתוצאות בחינת הרכב הבחנ"מ מצביעות על כך שאין חשש ממשי לשחרור מתכות מאפר הפחם המרחף כאשר הוא מוסף לתערובות צמנטיות.

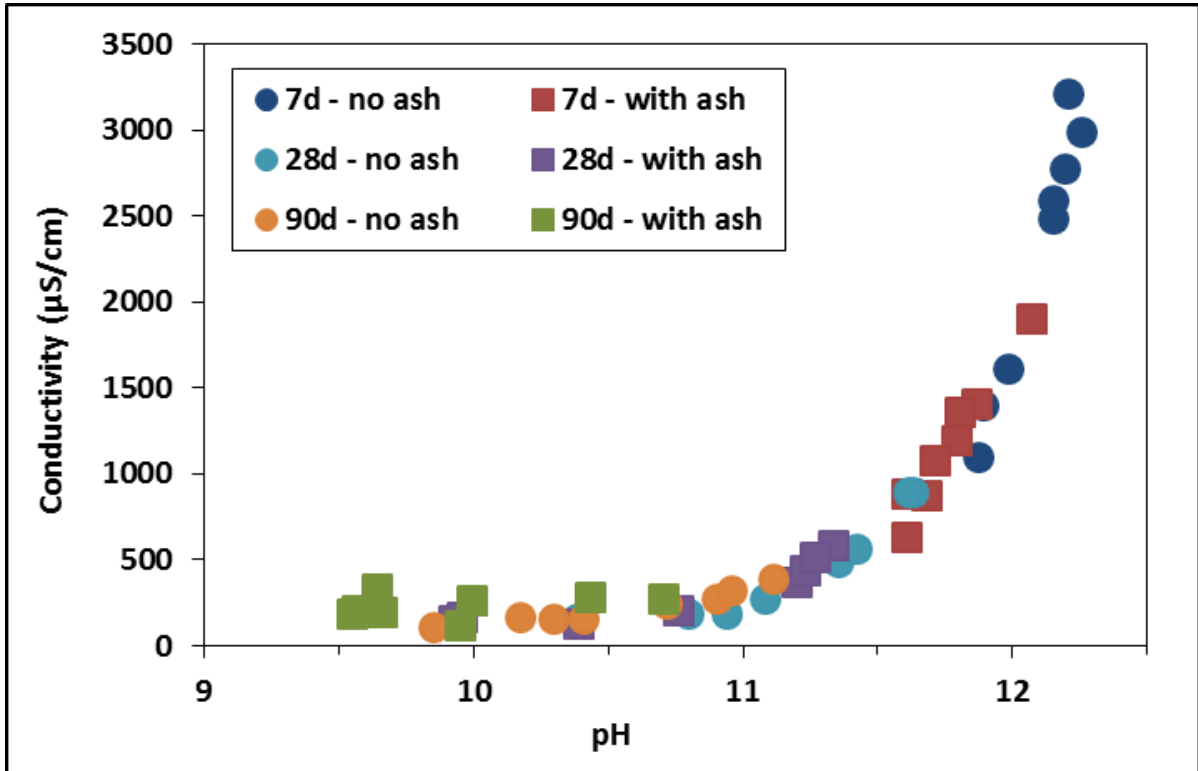


איור 1: הצבת ניסוי המיצוי של קוביות הבחניימ (CLSM) עם אפר וקוביית רפרנס ללא אפר (הרכב נתון בטבלה 1). ניתן לראות בבירור את השוני בהרכב הקוביות.





איור 2: רמת החומציות (A) וערכי המוליכות (B) שנמדדו בתשטיפי קוביות הבחני"מ בשמונת שלבי המיצוי. השינויים בתחילת תהליך המיצוי והתגודות החזקות בסדרת האשפרה של 7 ימים מעידות על חוסר בגרות (aging) של התערובות.



איור 3 : ערכי המוליכות שנמדדו בשלבי המיצוי השונים לעומת רמת החומציות (pH) שנמדדה.

טבלה 1: הרכבי תערובות בחנ"מ (CLSM) לבדיקה (ק"ג).

#	צמנט	אפר פחם	חול מחצבה או מודרג	מים	סה"כ	מוסף כימופיל
1	120	400	1250	250	2020	1.0 ק"ג למ"ק או 1.25%
2	150	-----	1500	300	1950	2.0 ק"ג ל מ"ק

טבלה 2: שלבי המיצוי

משך זמן המיצוי (ימים)	שלב מספר
0.25 ± 10%	1
1 ± 10%	2
2.25 ± 10%	3
4 ± 10%	4
9 ± 10%	5
16 ± 1	6
36 ± 1	7
64 ± 1	8

טבלה 3: לוח זמנים לבדיקת הרכב תערובת עם/ללא אפר פחם לשלוש תקופות אשפרה; יציקה בזמן 0.

ימים	אשפרה 7	אשפרה 28	אשפרה 90	קוביות בהליך מיצוי	בלנק
0-7				0	+
7-28	+			4	+
28-71	+	+		8	+
71-90		+		4	
90-92		+	+	8	
92-154			+	4	

טבלה 4: ההרכב הכימי של יסודות עיקריים ויסודות קורט בתערובת הבחנ"מ

wt. %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	LOI
no ash	< 0.2	1.3	4.1	0.01	0.7	15.0	1.2	36.0	0.08	42.6
w/ash	< 0.2	1.1	22.1	0.02	2.8	10.5	6.8	25.5	0.31	31.3

mg/kg	Ag	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Th	U	V	Zn
no ash	< 0.1	2.1	< 10	77	< 0.2	0.2	2	19	15	2.5	11	6	< 1	< 2	3	3	32	28
w/ash	< 0.1	11	73	474	1.2	0.8	9	54	34	11	34	13	4	7	7	4	116	72

טבלה 5: ערכי המוליכות וה-pH שנמדדו בשלבי המיצוי השונים.

#	type	6h		24h*		2.25d*		4d		9d		16d		36d		64d	
		מוליכות μS/cm	pH	מוליכות μS/cm	pH	מוליכות μS/cm	pH	מוליכות μS/cm	pH	מוליכות μS/cm	pH	מוליכות μS/cm	pH	מוליכות μS/cm	pH	מוליכות μS/cm	pH
<b>7 curing days</b>																	
1	no ash	1513	11.95	2870	12.26	1328	11.86	1053	11.85	2440	12.13	2470	12.14	3300	12.24	2830	12.19
2	no ash	1611	11.99	2990	12.26	1396	11.89	1094	11.87	2480	12.15	2590	12.15	3210	12.21	2770	12.19
3	with ash	874	11.68	1905	12.07	881	11.61	629	11.61	1410	11.87	1196	11.80	1355	11.81	1078	11.71
4	with ash	886	11.70	1876	12.04	858	11.66	637	11.61	1403	11.87	1209	11.81	1365	11.83	1035	11.66
<b>28 curing days</b>																	
6	with ash	146	9.93	163	9.96	123	10.39	200	10.76	372	11.20	434	11.23	581	11.34	517	11.27
7	with ash	130	9.80	177	9.97	125	10.28	189	10.71	374	11.19	396	11.17	562	11.31	527	11.29
8	no ash	145	10.33	192	10.79	199	10.97	289	11.10	501	11.39	597	11.44	918	11.64	948	11.63
9	no ash	157	10.38	183	10.80	184	10.94	273	11.08	487	11.36	560	11.43	897	11.63	890	11.62
<b>90 curing days</b>																	
10	no ash	107	9.85	160	10.17	155	10.30	152	10.41	240	10.72	272	10.90	325	10.96	391	11.12
11	no ash	110	9.73	161	10.32	156	10.35	159	10.57	274	10.85	301	10.99	429	11.15	479	11.27
12	with ash	121	9.76	201	9.71	184	9.33	201	9.46	321	9.63	262	9.94	280	10.40	271	10.75
13	with ash	119	9.95	190	9.66	180	9.55	208	9.57	329	9.64	263	10.00	279	10.43	268	10.71

\*זמני המיצוי של קוביות האשפרה של 7 יום (4-1#): 36 במקום 24 שעות ו-3 (72 שעות) במקום 2.25 ימים (54 שעות).

טבלה 6: ריכוז היסוד המצטבר (cumulative) ביחס לשטח הפנים של הדוגמא (mg/m<sup>2</sup>) בכל שלבי המיצוי (64 ימים).

	B	V	Cr	Co	Ni	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Ba
<b>7 curing days</b>												
#1 no ash	0	1.1	11.6	0.079	2.3	0.31	0	0	3.2	0	0	188
#2 no ash	0	1.0	11.1	0.084	2.3	0	0	0	3.2	0	0	185
#3 with ash	17	14.1	14.8	0	0.81	0	0.60	2.1	21.5	0.032	0.58	146
#4 with ash	18	14.4	14.6	0	0.80	0	0.65	2.2	22.4	0.031	0.59	147
<b>28 curing days</b>												
#6 with ash	152	38.8	32	0	0	0	3.4	9.0	38.9	0.051	2.0	2.7
#7 with ash	155	39.4	32	0	0	0	3.5	8.6	39.5	0.054	2.1	2.4
#8 no ash	7.3	4.9	13.6	0	0.36	0	0	0	4.1	0	0	4.6
#9 no ash	6.2	4.6	13.2	0	0.35	0	0	0	3.7	0	0	5.8
<b>28 curing days</b>												
#10 no ash	12.9	6.9	40.1	0.0	0.08	1.5	0.0	0	5.5	0	0	1.4
#11 no ash	10.8	6.4	37.3	0.0	0.09	1.6	0.0	0	5.0	0	0	1.2
#12 with ash	284	42	79.3	0.0	0.17	0.5	4.2	15.0	94	0.21	2.8	2.9
#13 with ash	280	42	75.8	0.0	0.09	1.7	4.3	14.2	93	0.20	2.7	2.5

טבלה 7: הדירות (repeatability) בריכוז היסוד הכולל ביחס לשטח הפנים שהתקבלה לקוביות הדופליקט.

cubes	curing (d)	type	B	V	Cr	Co	Ni	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Ba
#1/#2	7	no ash		<u>1.09</u>	<u>1.04</u>	0.94	<u>1.01</u>				<u>0.99</u>			<u>1.02</u>
#3/#4	7	with ash	<u>0.95</u>	<u>0.98</u>	<u>1.01</u>		<u>1.01</u>		<u>0.92</u>	<u>0.95</u>	<u>0.96</u>	<u>1.04</u>	<u>0.98</u>	<u>0.99</u>
#6/#7	28	with ash	<u>0.98</u>	<u>0.99</u>	<u>1.01</u>				<u>0.99</u>	<u>1.04</u>	<u>0.99</u>	<u>0.94</u>	<u>0.96</u>	1.14
#8/#9	28	no ash	1.19	<u>1.06</u>	<u>1.02</u>		<u>1.03</u>				<u>1.12</u>			0.79
#10/#11	90	no ash	1.19	<u>1.07</u>	<u>1.08</u>		0.87	<u>0.96</u>			<u>1.09</u>			1.18
#12/#13	90	with ash	<u>1.02</u>	<u>1.01</u>	<u>1.05</u>		1.89	0.27	<u>0.99</u>	1.05	<u>1.01</u>	<u>1.01</u>	<u>1.02</u>	1.18

ערכים מודגשים – הדירות <10% ; ערכים מודגשים עם קו תחתי – הדירות <5% ; הדירות נבדקה ביחס שבין שתי קוביות בהרכב זהה שהיו נתונות בזמן אשפחה שווה.  
ההדירות הגרועה של הניקל והאבץ נובעת מהריכוזים הנמוכים שלהם.

טבלה 8 : השוואת הריכוזים המצטברים ( $\text{mg/m}^2$ ) שהתקבלו בתשטיפי קוביות הבחנ"מ (לאחר 64 ימים) לקריטריון ההולנדי למונולית\*.

	curing days	V	Cr	Ni	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Ba
<b>Dutch values</b>		<b>320</b>	<b>120</b>	<b>81</b>	<b>800</b>	<b>260</b>	<b>4.8</b>	<b>144</b>	<b>3.8</b>	<b>8.7</b>	<b>1500</b>
average ash (#3 & #4)	7	0.04	0.1	0.01		0.002	0.5	0.2	0.01	0.1	0.10
ave. ash (#3 & #4)-no ash*	7	0.04	0.03	-0.02		0.002	0.5	0.1	0.01	0.1	-0.03
average ash (#6 & #7)	28	0.12	0.3	0.00		0.013	1.8	0.3	0.01	0.2	0.002
ave. ash (#6 & #7)-no ash*	28	0.11	0.2	0.00		0.013	1.8	0.2	0.01	0.2	-0.002
average ash (#12 & #13)	90	0.13	0.6	0.00	0.001	0.016	3.0	0.6	0.05	0.3	0.002
ave. ash(#12 & #13)-no ash*	90	0.11	0.3	0.00	-0.001	0.016	3.0	0.6	0.05	0.3	0.001

בקריטריון ההולנדי אין ערכים לבור (B) וקובלט (Co).

\*regulatory criteria for construction products as defined in the Dutch Soil Quality Decree (SQD, 2007).

\* תרומת האפר בלבד – הפחתה של ערכי הקוביות ללא האפר מריכוזי הקוביות עם אפר.

## References

EPA (2012a). Interlaboratory Validation of the Leaching Environmental Assessment Framework (LEAF) Method 1314 and Method 1315. # EPA 600/R-12/624.

EPA (2012b). The Impact of Coal Combustion Fly Ash Used as a Supplemental Cementitious Material on the Leaching of Constituents from Cements and Concretes. # EPA 600/R-12/704.

SQD - Soil Quality Decree (Regeling bodemkwaliteit), Staatscourant, December 2007, 247, p. 67 (in Dutch); Values were taken from EPA (2012b).