



פוטנציאל השימוש באפר פחם תחתי (Bottom Ash) כחומר מלוי לעטיפת צנרת תת-קרקעית לתשתיות מים, ביוב, ניקוז ותקשורת

מוגש למנהלת אפר הפחם

על ידי

פרופ' אמריטוס נפתלי גילי

הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית
הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל



פוטנציאל השימוש באפר פחם תחתי (Bottom Ash) כחומר מלוי לעטיפת צנרת תת קרקעית לתשתיות מים, ביוב, ניקוז ותקשורת

פרופ' אמריטוס נפתלי גלילי
 הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית
 הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
 נובמבר 2006

<u>עמ'</u>	<u>תוכן העניינים</u>
iii	<u>תקציר מורחב</u>
1	1. <u>מבוא</u>
1	2. <u>תפקידי חומר המילוי בהנחת צנרת טמונה בקרקע</u>
3	3. <u>תכונות ושימושי אפר הפחם בראי התקינה</u>
5	4. <u>תכונות אפר הפחם כחומר הנדסי</u>
5	5. <u>השימוש באפ"ת על-פי התקינה להנחת צנרת</u>
5	5.1 צנרת בטון ללא לחץ לביוב וניקוז
8	5.2 צנרת בטון להולכת זורמים בלחץ
8	5.2.1 תנאי הנחה לצנרת קשיחה
8	5.2.2 תנאי הנחה לצנרת קשיחה למחצה
11	5.3 תכנון והנחת צנרת פלדה להולכת מים
12	5.4 תכנון והנחת צנרת פיבגלס (GRP) להולכת מים ושפכים
12	5.4.1 סיווג חומר המילוי להנחת צנרת GRP
13	5.4.2 הקריטריונים לבחינת ההתאמה של חומרי המילוי לקרקע הטבעית באתר
13	5.4.3 תנאי הנחת צנרת GRP לפי ASTM
14	5.5 תכנון והנחת צנרת PVC
16	5.6 צנרת תרמופלסטית לביוב ושימושי זרימה ללא לחץ
16	5.7 צנרת תרמופלסטית להולכת מים ושפכים בלחץ
17	5.8 הצעת התקן האירופי PrEN 1046-96 להולכת מים ושפכים בצנרת פלסטית
18	5.9 סיכום תנאי ההנחה הנדרשים בתקינה עבור אפ"ת כחומר מילוי
19	6. <u>חישובי עיווי (Deflection) עבור צנרת טמונה במילוי אפ"ת</u>
19	6.1 חישובי שקיעה יחסית בצנרת פלדה
21	6.2 חישובי שקיעה יחסית של צנרת PE, PVC, GRP
22	6.3 הערות לבדיקה החישובית
23	7. <u>סיכום</u>
25	<u>נספח א': בדיקות מעבדה לדירוג וסיווג אפר פחם תחתי כחומר מבני</u>
28	<u>נספח ב': חישובי שקיעה עבור צנרת פלדה טמונה במעטפת אפר פחם תחתי</u>
31	<u>רשימת ספרות</u>



רשימת ציורים

7	<u>ציור 1:</u> צנרת בטון לביוב וניקוז ללא לחץ בתנאי הנחה סטנדרטיים
9	<u>ציור 2:</u> צנרת בטון להולכת זורמים בלחץ – סוגי הנחה לצנרת קשיחה
10	<u>ציור 3:</u> צנרת בטון להולכת זורמים בלחץ – סוגי הנחה לצנרת קשיחה למחצה
11	<u>ציור 4:</u> אזור המעטפת המצופף בצנרת פלדה
14	<u>ציור 5:</u> הנחיות כלליות להנחת צנרת פיברגלס (GRP)
15	<u>ציור 6:</u> מבנה חתך התעלה בתקינה לצנרת תרמופלסטית
27	<u>ציור א'-1:</u> פילוג גודל אפר פחם גלמי - תחנת הכוח רוטנברג, מדגם 1A

רשימת טבלאות

6	<u>טבלה 1 -</u> תכונות אפר פחם תחתי ממוין ונתונים מייצגים של המנהלת
12	<u>טבלה 2 -</u> קטגוריות קשיחות הקרקע עבור צנרת GRP
19	<u>טבלה 3 -</u> סיכום תנאי ההנחה המתאימים לשימוש באפ"ת
20	<u>טבלה 4 -</u> חישובי שקיעה יחסית של צנרת פלדה (מים) בקשיחויות שונות
22	<u>טבלה 5 -</u> שקיעה יחסית של צנרת GRP, PVC, PE בקשיחויות שונות
25	<u>טבלה א'-1 -</u> ריכוז תוצאות בדיקות מעבדה מיום 23.01.06, אפ"ת גולמי וממוין
26	<u>טבלה א'-2 -</u> ריכוז תוצאות בדיקות מעבדה מיום 23.04.06, אפ"ת גולמי
29	<u>טבלה ב'-1 -</u> חישוב שקיעה לצנרת פלדה - $D = 10-3/4"$, $ts = 3.18$ mm
30	<u>טבלה ב'-2 -</u> חישוב שקיעה לצנרת פלדה - $D = 10-3/4"$, $ts = 3.97$ mm



תקציר מורחב

נערכה סקירה מקיפה בנושא פוטנציאל השימוש באפר הפחם התחתי (אפ"ת) כחומר מעטפת לצנרת תת-קרקעית. מטרת הסקירה - בחינת פוטנציאל השימוש באפ"ת כחומר מילוי להנחת צנרת תת קרקעית בתשתיות מים, ביוב, ניקוז ותקשורת, תוך ניצול יתרונותיו היחסיים הנובעים מהרכבו המיוחד, ולחסוך בכך במשאבי טבע ואנרגיה הנדרשים לעבודות תשתית ופיתוח. לשם כך נסקרו תפקידי חומר המילוי בהנחת צנרת, מקומו של האפ"ת בתקינה הבין לאומית, תכונותיו כחומר מבני, וכן תנאי ההנחה הנדרשים בתקינה ומידת ההתאמה של האפ"ת לדרישות אלו. הסקירה נחתמה בבדיקה חישובית של השקיעות המתקבלת בצנרת בקשיחויות שונות, כשאפר הפחם התחתי משמש כמצע לצינור וכחומר המילוי לעטיפתו, ברמות הידוק המוגדרות בתקינה. להלן עיקר הממצאים.

1. תכונות כלליות של האפ"ת

אפר הפחם התחתי הינו מוצר לוואי של שריפת הפחם בתחנות הכוח, שמורכב ברובו מסיליקה ואלומינה. החומר דמוי חול אפור המכיל 10% עד 25% דקים. אפר הפחם לסוגיו הינו חומר מילוי הנדסי יעיל. סיווג האפ"ת כחומר הנדסי כפוף לשיטת המיון האחיד לקרקעות השונים. יישום האפ"ת מבוצע לפי שיטות התכנון והבדיקה המתאימות לסוגי קרקע טבעית המקבילים לו, ומעוגן היטב בתקינה ובפרקטיקה ההנדסית. מיון האפ"ת לפי שיטת המיון האחיד הינו SM – אגרגט גרנולרי המכיל יותר מ-12% דקים, ולעיתים SP-SM, SW-SM, SW-SC, שמתאימים כולם לשמש כחומר מילוי תקני להנחת צנרת תת-קרקעית.

2. דרישות התקינה להנחת צנרת תת-קרקעית

במהלך הסקירה נבחנו דרישות התקינה להנחת של צנרת בטון, פלדה, פיברגלס, PVC ופוליאתיילן. על אף השוני הרב בסוגי הצנרת ובתכונותיהם, כל התקנים שנסקרו מחייבים תנאי הנחה דומים: העמקת התעלה והכנת תשתית להנחת הצינור (לכשנדרש), הכנת שכבת מצע והידוק תושבת לצינור, מילוי מהודק נוסף עד ציר הצינור, ובצנרת קשיחה למחצה וגמישה – גם במילוי מבוקר עד מעל ראש הצינור. תנאי ההנחה וסיווג חומר המילוי דומים בתקנים השונים, וכך גם הדרישות המיוחדות לחומר מעטפת: למנוע ריכוז מאמצים בסביבת הצינור, להגנה על ציפוי הצינור, ובהתאם לצורך - למנוע סחיפת דקים בסביבת הצינור.

3. התאמת האפ"ת לדרישות התקינה

האפ"ת לסוגיו מוגדר כחומר גרגרי עדין עם דקים, שנמצא במרכז המלצות חומרי המילוי המוגדרים בתקינה. האפ"ת מתאים לכן כחומר מילוי להנחת צנרת מכל הסוגים שנבחנו, כשכבת המצע הראשונית, כחומר מילוי לתושבת הצינור, כמילוי נוסף עד לציר הצינור בצינורות קשיחים, וגם כחומר המילוי עד ראש הצינור ומעליו בצנרת גמישה וקשיחה למחצה, ברמות הידוק שבתקינה הספציפית לצינורות השונים. האפ"ת מתאים גם לדרישות המיוחדות שבתקינה: בהיותו בעל גודל ופילוג חלקיקים מתאים, חופשי מגושים קשיחים וגופים זרים, ביכולתו לספק תמיכה אחידה והגנה לצינור מפני פגיעת גופים זרים, וכשנדרש - גם למזער תנועת דקים אל ומאת חומר המילוי בעת שיטפונות ובסביבת מי-תהום.

4. עיווי צנרת טמונה במילוי אפ"ת

אחד התפקידים מרכזיים של חומר המילוי בהנחת צנרת גמישה וקשיחה למחצה הינו מניעת עיווי או שקיעה טבעתית מעבר לגבול השקיעה המותרת לאורך זמן בצנרת זו: 3% מקוטר הצינור בצנרת פלדה בציפוי במלט פנימי, או 5% בצנרת פיברגלס ובצנרת פלסטית לסוגיה. לשם בחינת ביצועי האפ"ת, נערכה בדיקה חישובית של עיווי הצינורות בתנאי הנחה ועומס שונים, תוך שימוש באפ"ת כחומר מילוי. לשם הדגמה חושב עיווי הצינור הנתון בעומס חיצוני קל ובינוני, עבור צנרת פלדה עם ציפוי מלט פנימי, וכן עבור צנרת פיברגלס (GRP), PVC ופוליאתיילן (PE80) אופיינית, בארבע רמות הידוק של חומר המילוי.



נמצא כי ברמת ההידוק הבינוני המוצע בתקן עבור האפ"ת (85-90% PSD), כל הצינורות שנבדקו עמדו בקריטריון העיווי המותר בעומס קרקע בגובה כיסוי בשיעור 3.0 מ', בעודף ניכר; בעומס קל יותר (בכיסוי 0.9 מ', שמתאים לפרויקטים רבים) עמדו הצינורות השונים בקריטריון העיווי המותר גם ברמות הידוק נמוכות מהמומלץ בתקינה.

חישובי השקיעה נעשו בשיטה הקלאסית, השמרנית, שאינה כוללת את תרומת קשיחות הקרקע באתר ואת תרומת עומק ההנחה להגברת התמיכה של חומר המילוי בצינור, שכלולים בתקנים החדשים. חישובים אלו, שנעשו לפי נתוני ספרות, חייבים על פי התקינה בבדיקות בקרה לפני הנחת הצנרת ובמהלכה, ללא קשר לסוג חומר המילוי, לשם אימות נתוני התכנון.

5. יתרונות השימוש באפר הפחם התחתי להנחת צנרת תת-קרקעית

יתרונותיו העיקריים של האפ"ת כחומר מעטפת לצנרת תת-קרקעית טמונים בתכונותיו הבסיסיות, המתועדות בתקינה שנסקרה:

- האפ"ת הינו חומר מבנה גרגרי קל משקל, יציב ומנקז, שאמור לשמש כחומר מילוי נוח ליישום בדרגת ההידוק הדרושה, ולספק תמיכה מבנית לצינור הטמון כנדרש בתקינה;
- בהיותו מוצר תעשייתי מוגדר היטב, אמור האפ"ת לשמש כשכבת מצע שמונעת ריכוז מאמצים בתחתית הצינור, וכשכבת מעטפת המגנה על הצינור וציפוי מפני אבנים, גושים וגופים זרים המצויים בקרקע, ובחומרים המשמשים להשלמת כיסוי הצינור;
- בהיותו בעל פילוג גרגרים רחב (חומר גרנולרי עם דקים), אמור האפ"ת לעמוד בקריטריונים למניעת סחיפת דקים מהקרקע הטבעית אל סביבת הצינור, ולייתר בכך את הצורך בבד גאוטכני הנדרש בעת שימוש בחומרי מילוי גסים יותר.
- השימוש באפר הפחם כחומר הנדסי מביא בין השאר לשימור קרקע ומשאבי טבע, לחסכון באנרגיה ולצמצום בפליטת מזהמים הכרוכה בניצולה.

כל אלו אמורים להציג את האפ"ת, בכפוף לבדיקות התקן המקובלות, כחומר מבני מועדף להנחת צנרת תת-קרקעית.

ולסיכום: לאור הסקירה שנעשתה והבדיקה החישובית, נמצא כי אפר הפחם התחתי מתאים לשמש כחומר מילוי מועדף להנחת צנרת תת-קרקעית לסוגיה, החל מצנרת בטון קשיחה ועד לצנרת פלסטית גמישה, בתנאי קרקע ועומס שונים. כמו בכל חומר מילוי אחר כפוף השימוש באפר פחם לתנאי ההנחה ולבדיקות מעבדה ושדה על פי התקינה המתאימה לצנרת.

Keywords: Coal combustion products, bottom ash, structural fill, pipe installation; concrete pipe, steel pipe, fiberglass (GRP) pipe, thermoplastic pipes, PVC pipe, PE pipe.