



## אפר פחם – רקע כללי

1. **בשריפת הפחם בתחנת הכח מتركזים היסודות בתוצרי הלוואי של תהליך השריפה. מהם תוצרים אלו?**

פחם כמחצב הנכרה מקליפת כדור הארץ מכיל את כל היסודות הטבעיים הקיימים בסלעים ובקרקעות, בכללם מתכות כבדות, סיליקה ויסודות רדיואקטיביים שנקלטו בו במהלך תקופות גיאולוגיות ממושכות ואשר מקורם בחומרים האורגניים (צמחים ובעלי חיים) מהם נוצר הפחם ובמשקעים מינרליים שהצטברו בזמן היווצרות מרבצי הפחם. תוצרים אלו קרויים Coal Combustion Products (CCPs) או Coal Combustion Byproducts (CCBs). הם כוללים את גזי הפליטה, גבס (מהווה כ- 10% - 24% מסך ה- CCP בתחנת כח המפעילה מתקנים להדחת גופרית מגזי הפליטה), סיגים (Boiler slag - חומר גרגרי שחור וקשה הנוצר מהתקררות האפר החם השוקע לתחתית דוד השריפה; מהווה כ- 2.5% - 3% מסך ה- CCP) ואפר פחם (המהווה בין 57% ל- 77% מסך ה- CCP, מתוכם עד כ- 68% בצורת אפר מרחף - Fly Ash והיתר כאפר תחתית - Bottom Ash), בו מتركזים מרבית היסודות המצויים במקורם בפחם. בניגוד לתהליכי שריפת פחמימנים במתקנים תעשייתיים אחרים, תרכובות פחמימנים ארומטיים פוליציקליים (PAH) נוצרות בשריפת פחם בתחנות הכח המודרניות דוגמת אלה שבישראל בריכוזים אפסיים.

2. **מהו אפר פחם?**

בשריפת פחם בדוודים של תחנות כח (בטמפרטורה של כ-  $1300^{\circ}\text{C}$  -  $1700^{\circ}\text{C}$ ) נוצרים אם כן מספר תוצרי לוואי (CCP) וריכוזם הוא כ- 11% בפחם. העיקריים שבתוצרים אלה הם אפר פחם (המהווה כ- 10% מהפחם הנשרף) וגזי פליטה. אפר פחם הוא שם קיבוצי לתוצרי השריפה המוצקים של פחם על סוגיו השונים שהם: ביטומיני, תת-ביטומיני, אנתרציט וליגניט. האפר בישראל מטיפוס F (class F), הנוצר משריפה של פחם ביטומיני. על פי סיווג זה סכום שלושת המרכיבים: סיליקה ( $\text{SiO}_2$ ), אלומינה ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) וברזל ( $\text{FeO}$ ) באפר שווה ל- 70% או יותר, והתכולה הנותרת מורכבת מיסודות עיקריים נוספים וכן יסודות קורט בכמות מזערית. האפר מהווה את השארית הלא שרופה של הפחם והיא נגזרת משאריות אנאורגניות (מינרלים) של סלע שמהוות חלק בלתי נפרד מן הפחם. הרכבו הבסיסי של האפר הוא תערובת של חומרים

אנאורגניים מינרליים שלא עברו שריפה, לרבות יסודות קורט ושאריות של תרכובות פחמימניות (מזהמים אורגניים) שמקורן בחלקיקי פחם שלא נשרפו. ההרכב הכימי של האפר תלוי בסוג האפר (מרחרף או תחתית; להלן פירוט בסעיף הבא), בסוג הפחם, מקורו ויעילות תהליך השריפה. מעל 90% של האפר על סוגיו השונים מורכב מתחמוצות סיליקה, אלומיניום, ברזל, קלציום, מגנזיום, אשלגן, נתרן וטיטניום, כאשר המרכיבים העיקריים בהם הם ארבעת הראשונים.

### 3. מהם סוגי האפר השונים?

הפחם הנשרף בתחנות הכח בישראל מכיל 4% – 15% אפר, מותנה במקור הפחם. בין מקורות הפחם המיובא לישראל, הפחמים הדרום אפריקניים, האוסטרליים והרוסיים מאופיינים בשיעור גבוה יחסית של אפר ואילו בפחמים הקולומביאניים והאינדונזיים שיעור האפר נמוך יחסית. 88% – 90% מכמות האפר שמתקבלת משריפת הפחם בתחנות הכוח מן הסוג הקיים בארץ הם אפר מרחרף (fly ash), 10% – 12% הם אפר תחתית (bottom ash). חלק מחלקיקי האפר המרחרף הם סנוספרות (cenosphere – כדור חלול) המהווים עד 5% מכלל האפר ומשקלם המרחבי קל במיוחד: 0.4 – 0.6 גרם לסמ"ק בלבד (להלן – משקל האפר).

גודל (קוטר) חלקיקי **האפר המרחרף** קטן בדרך כלל מ-100 מיקרון; ממוצע הגודל בסביבות 20 מיקרון; כ-20% מעל 45 מיקרון (גודל קריטי כאשר האפר משמש כמוסף לבטון); כ-30% מתחת ל-10 מיקרון (גודל משמעותי ביישומים בהם משמש האפר כמלאן). צורת החלקיקים בדרך כלל כדורית, אך גם מעוגלים לא סימטריים, זוויתיים וכו', כתלות בפחם עצמו, בהרכב המינרלוגי ובתנאי הבעירה. שטח הפנים מצוי בדרך כלל בתחום 1 – 3 מ"ר לגרם. משקלו הסגולי של אפר מרחרף משתנה בהתאם למקור הפחם והרכבו המינרלוגי, בתחום 1.8 – 2.4 גרם לסמ"ק בארץ. עקב צורת חלקיקי האפר המרחרף צפיפותם המרחבית הנדמית (bulk density) תלויה מאד במידת ההידוק שלהם והיא בתחום 0.4 – 1.6 גרם לסמ"ק. האפר המרחרף דומה לאבקה קמחית. צבע האפר נע מאפור בהיר עד אפור כהה כתלות במרכיביו. גוון בהיר מושפע מתכולת הסייד וגוון כהה מושפע מאחוז הפחם הבלתי שרוף וריכוז הברזל. האפר המרחרף מכיל 60% – 80% חרסית המורכבת מתחמוצות אלומיניו-סיליקטיות אמורפיות, וכמויות קטנות של מרכיבים גבישיים כגון, קוורץ, מוליט (מינרל המורכב גם מאלומינוסיליקט), מגנטיט והמטיט.

חלקיקי **אפר התחתית** נקבוביים ופריכים ומתאפיינים בעיקר בסדר גודל של מילימטרים (בד"כ עד 10 מ"מ) הנע בין גודל של חצץ לגודל של חול דק. החלקיקים נראים כחצץ עדין גרוס או חול גס בצבע המשתנה מאפור כהה לחום כהה (תלוי בסוג הפחם הנשרף ותכולת התחמוצות השונות). משקלו הסגולי של האפר גבוה יחסית (בתחום 2.1 – 2.4 גרם לסמ"ק בארץ). בגלל צורת החלקיקים- גסים ומזוותים- צפיפותם המרחבית קטנה בהרבה מהמשקל הסגולי והיא בתחום 0.8 – 1.5 גרם לסמ"ק. שטח הפנים של אפר תחתית נמוך מזה של אפר מרחרף ועומד על כ-0.4 מ"ר לגרם. ניתן להתייחס לאפר תחתית ומרחרף כאל חומר אחד מבחינת האפיון הכימי, שכן הרכבם הכימי דומה מאד והם נבדלים בעיקר במבנה. ההבדל העיקרי בכימיה שלהם הוא בכך שריכוז יסודות הקורט הנדיפים גדול יותר באפר המרחרף.

האפר הוא השארית המוצקה הנותרת משריפת הפחם. ניתן לחלק את התהליך שהפחם עובר בתחנת הכוח לשלושה שלבים: הכנת הפחם לשריפה, תהליך השריפה עצמו והטיפול בתוצרי השריפה. לכל אחד מהם השפעה על האפר ואיכותו.

ההכנה הראשונית היא טחינת הפחם. הפחם מוזן למערכת טחינה המורכבת ממטחנות. אויר ראשוני משמש לייבוש הפחם תוך כדי טחינתו, ולשינוע הפחם הטחון דרך צינורות אל הדוודים. פחות מ- 2% מגרגרי הפחם הטחון הם בגודל מעל 300 מיקרון, 70% – 75% מהם מתחת לגודל 75 מיקרון. תחנה טיפוסית בהספק 500 MW מכילה 6 מטחנות המייצרות כ-200 טון פחם טחון לשעה בעומס מלא. תכונות הפחם העיקריות המשפיעות על טחינתו: דירוג הגודל של גרגרי הפחם, מבנה מינרלוגי, רטיבות, ריכוז נדיפים ותכונות מכניות (קושי).

אבקת הפחם הטחון מוזרקת דרך המבערים לדוד עם זרם אויר ראשוני חם, שם הוא מתערבב עם יתרת האויר הדרוש (אוויר משני) כדי לאפשר הצתה מהירה, ונשרף. חלוקה מרחבית של המבערים על פני קירות הדוד מבטיחה את כמות האויר ואת פיזורו בחלל הדוד הנדרשים להתלקחות מהירה ולבעירה מושלמת. ישנם מבערים הממוקמים בצורה טנגנציאלית במקביל לדפנות הדוד ויוצרים מערבולת להבה טורבולנטית, ואחרים בצורה אופקית משולי הדוד למרכזו. שריפת הפחם נעשית בטמפי שבין  $1300^{\circ}\text{C}$  –  $1700^{\circ}\text{C}$ , התלויה בדירוג הפחם. משך הבעירה הממוצע של גרגר פחם יחיד בדוד הוא בסדר גודל של 0.25 שנייה, ומשך שהייתו הממוצע של האפר הנותר ממנו באזור השריפה הוא 2 – 5 שניות.

בשריפת הפחם נוצר כאמור אפר פחם – מרחף ותחתית. חלקיקי אפר התחתית נוצרים מהתלכדות של חלקיקי אפר לחלקיקים כבדים יחסית שלא עוברים הרחפה ושוקעים בבריכת מים בתחתית דוד השריפה, שם הם עוברים קירור מידי הגורם להשתמרות המבנה הנקבובי של האפר. האפר המרחף שרוי בטמפי של  $1000^{\circ}\text{C}$  –  $1500^{\circ}\text{C}$ . בזמן השהות הקצר מאוד בטמפי אלו מותכים חלקיקי האפר למצב צבירה נוזלי למחצה (Sinter). החלקיקים נסחפים באויר עם גזי הפליטה ועוברים קירור מהיר בדרכם אל מחוץ לדוד. בתנאים אלו הזמן להתגבשות אינו מספיק, והחומר שנוצר בדרך כלל הוא חלקיקים כדוריים אמורפיים בעלי מבנה דמוי זכוכיתי עם דפנות חלקות, בניגוד לחלקיקים הגסים והמזוותים של אפר התחתית.

ביציאתם מהדוד אל הארובה עוברים גזי הפליטה דרך משקעים אלקטרוסטטיים (ESP - Electrostatic Precipitators) המיועדים ללכוד את האפר, שם יורדת הטמפי ל-  $130^{\circ}\text{C}$  -  $180^{\circ}\text{C}$ . במשקעים האלקטרוסטטיים מוצבים לוחות הטעונים במתח גבוה (15 אלף וולט). חלקיקי האפר המרחף המוסעים עם גזי הפליטה והנושאים מטען שלילי נצמדים ללוחות עם המטען חיובי המנוגד למטענם. בצורה זו כ- 99.75% בממוצע מן האפר המרחף מסולק מגזי הפליטה, ומועבר מה- ESP דרך מערכת צינורות יניקה (פנאומטית), לאחסון בממגורות (סילוסים) בחצר תחנת הכוח. החלקיקים הנותרים מהאפר המרחף - כמות המשתנה בהתאם לסוג ESP, מס' הלוחות,

סוג הפחם וכו' - ממשיכים עם גזי הפליטה (50% מכמות זו הם חלקיקים בגודל מתחת ל- 3 מיקרון). בתחנות כוח בהן מותקן FGD (Flue Gas Desulphurization) המטפל בגזי הפליטה (מפחית פליטת תחמוצות גופרית לאוויר), נקלטים כ- 80% מחלקיקי האפר הנותרים ביציאה מה- ESP, כך שרק 0.05% מהאפר המרחף (50% מכמות זו הם חלקיקים בגודל מתחת ל- 0.3 מיקרון), שהם כ- 0.045% מכלל אפר הפחם, נפלטים לסביבה. מידע זה נסמך על תחנות כוח בהולנד (מתוך Meij, 2003; דוח מכון מחקר KEMA הסוקר מחקרים מתקדמים בנושא אפר הפחם) ומייצג גם את ישראל, לאור העובדה שתחנות הכוח דומות בשתי המדינות, כמו גם סל הפחם.

**5. שימושי אפר פחם נפוצים בעולם בתחומים רבים זה עשרות שנים, בעיקר כחומר גלם בבנייה וכחומר מילוי בתשתיות. האם הם כרוכים בהשפעה על הסביבה?**

ניצול אפר הפחם כמחליף חומרי גלם טבעיים תורם לסביבה. הן בעקיפין: בצמצום כרייה הפוגעת בסביבה, בכלל זה של חומרי גלם המצויים במחסור בארץ; בהפחתת פליטת מזהמים לאוויר, בעיקר CO<sub>2</sub>, הכרוכה הן בכרייה עצמה והן בתהליכים תעשייתיים העושים שימוש בחומרים המוחלפים ע"י האפר, בעיקר במלט ובבטון; וכן בעצם ההימנעות מסילוקו כפסולת; והן ישירות: בנטרול וקיבוע של פסולות מסוכנות; בהפחתת שפיעת רדון במוצרי בנייה ובתשתיות ועוד. אולם מאידך גיסא על יישום שימושי האפר מוטלות מגבלות הנובעות מחשש להשפעות סביבתיות שליליות העלולות להתלוות לשימושים. שני ההיבטים הסביבתיים העיקריים הטעונים התייחסות בשימושי האפר הם פוטנציאל זיהום מי תהום ע"י מתכות כבדות, בעיקר ביישומי האפר הפתוחים (בתשתיות) ופליטת אבק בשימושים השונים באפר מרחף. ההיבט הבריאותי העיקרי כרוך בחשיפת עובדים שעוסקים באפר פחם לחלקיקי אבק בר נשימה המכילים כמות מסוימת של סיליקה גבישית חופשית.

**6. כיצד מתייחסים לאפר פחם בעולם?**

אפר הפחם אינו מוגדר כפסולת מסוכנת Hazardous waste בכל המדינות המפותחות והארגונים הסביבתיים בעולם, אלא כתוצר לוואי תעשייתי (Industrial by-product) שמתאים לשמש כמשאב המחליף חומרי גלם טבעיים. בישראל מוגדר האפר כ"חומר בר השבה הטעון בקרה סביבתית בשימושיו" וכל כמות האפר מנוצלת בצורה מועילה בכפוף לתנאים סביבתיים, כברוב המדינות בעולם.

**7. בישראל פועל גוף בין-משרדי בשם מנהלת אפר הפחם, שקם במטרה לקדם את שימושי אפר הפחם בארץ. מהו מתווה הפעולה של גוף זה?**

ההיתרים הסביבתיים ליישומים השונים של האפר בישראל ניתנים ע"י המשרד להגנת הסביבה, רשות המים וגורמי סביבה ובריאות נוספים, באמצעות מנהלת אפר הפחם (מא"פ), ומותנים בקבלת נתונים על סיכוני הסביבה הכרוכים ביישומים אלה (למשל רגישות מי התהום במקרה של שימושי אפר מרחף כחומר מילוי בתשתיות). בסיס נתונים סביבתיים אודות אפר פחם מתחנות הכוח וממקורות פחם שונים הוכן במשותף ע"י חברת החשמל ומא"פ, בשיטות המאושרות ע"י המשרד להגנת הסביבה. ריכוזי מתכות כבדות בתשטיפי אפר פחם מוגבלים ע"י ערכים מרביים שנקבעו ע"י המשרד להגנת הסביבה. מא"פ מגבשת את ההנחיות הסביבתיות לשימושי האפר, המאושרות ע"י המשרד להגנת הסביבה. ההנחיות הסביבתיות מתבססות על עבודת צוותים מקצועיים-מדעיים אחדים לבחינת שטיפת מזהמים המצויים באפר לקרקע ולמי התהום, לבחינת החשיפה לקרינה רדיואקטיבית ממוצרי בנייה המכילים אפר ולבחינת חשיפת עובדים לסליקה גבישית חופשית באבק אפר מרחף. הצוותים מסתמכים בעבודתם על מחקרים הנעשים בארץ, בחלקם בשיתוף מוסדות מחקר בחו"ל ועל סקרי ספרות של מחקרים בעולם.