

אפר פחם : ניתוח סקירה ספרותית והבטי גיהות ובריאות

דר' אשר פרדו, 2004

האגף לגהות תעסוקתית וסביבתית, המכון הארצי לבריאות תעסוקתית וסביבתית

1. הקדמה

הסקירה התבקשה ע"ע מנהלת אפר הפחם ומסתמכת על חומר ספרותי שהוגש לנו בשתי חוברות מאוגדות ועל חומר רלוואנטי נוסף. החומר הספרותי שנאסף בחוברות כלל:

א. גליונות בטיחות של אפר פחם (Material Safety Data Sheet –MSDS).

ב. מאמרים מקצועיים

ג. פרסומי גופים ומוסדות מקצועיים וחברות.

רוב החומר הספרותי שהוגש לנו דן באפר מרחף. החומר הן באפר תחתית מצומצם יותר.

2. תקציר

אפר פחם הוא שם קיבוצי לתוצרי השריפה המוצקים של פחם על סוגיו השונים. בישראל הפחם הוא בעיקר ביטומני. שריפת פחם יוצרת כ- 11% אפר הממוין לאפר תחתית, או פסולת אפר סיגית ולאפר מרחף. הראשונים מהווים כ- 12% - 15% מהאפר בעוד שהאחרון מהווה כ- 85% - 88% מהאפר. הרכבו הבסיסי של האפר הוא תערובת של חומרים אנאורגניים מינרליים שלא עברו שריפה יחד עם עקבות מתכות ושאריות של תרכובות פחמניות.

רוב האפר המרחף מסולק מהגזים העולים בארובה באמצעות משקע אלקטרוסטטי ואמצעים נוספים ויש אפשרות לסילוק נוסף של תחמוצות גופרית באמצעות תהליך דסולפוריזציה. עקב השריפה והטמפרטורות הגבוהות חלים שינויים פיסיקליים וכימיים במרכיבי האפר ביחס לצורת הופעתם במקור הפחם. האפר המותך מתגבש בעיקר לחומר אלומינו-סיליקטי אמורפי וזכוכיתי. רוב חלקיקיו של האפר המרחף הם כדוריים בעלי דפנות חלקות וחלקם מזוות ואי-רגולרי, בעוד שחלקיקי אפר התחתית מזוותים ובעלי שטח פנים נקבובי. ההרכב הכימי מכיל, בנוסף לזכוכית האלומינו-סיליקטית, גם קוורץ, מוליט, מגנטיט, המטיט, תחמוצות של אלומיניום, ברזל, סידן, מגנזיום, נתרן ואשלגן, ועקבות של מתכות כבדות כגון בריום, כרום, נחושת, טונגסטן, ארסן, קובלט, עופרת, ניקל, קדמיום וכספית.

השימוש המוביל באפר פחם במדינות שונות הוא לבקרת שלג וקרח, כמרכיב בבטון קל לבניה וכחומר מילוי בייצור מלט, צבעים, ציפויים שונים, גומי, דבקים וחומרי אטימה. ענף חומרי הבניין והמלט צורך כמויות גבוהות של אפר פחם.

גורמי החשיפה באפר פחם, העלולים להוות סיכון בריאותי פוטנציאלי לעובדים בו נובעים מתכולתם בפחם הטבעי. גורמים אלו הם אפר הפחם עצמו, צורן דו-חמצני גבישי, מתכות כבדות, תרכובות של פחמימנים ארומטיים פוליציקליים וקרינה מייננת שמקורה באיזוטופים רדיואקטיביים טבעיים בפחם. אולם תהליך השריפה והשינוי החל בחלק מהחומרים יוצרים היבט סיכון שונה לחלוטין מזה של הפחם ושוני זה מתבטא גם בהעדר תחלואה ספציפית של עובדים באפר פחם בהשוואה לעובדים בפחם כגון במכרות פחם.

א. גודל החלקיקים הרלוואנטי לשקיעה בריאות ואפשרות להתפתחות שינויים בריאה הוא גודל בר-נשימה המגיע עד 7 מיקרומטר (קוטר אווירודינמי). באפר מרחף מגיע המקטע של גודל זה לכ- 30%, אולם מחד גיסא יש לזכור שרובו מסולק ע"י משקע אלקטרוסטטי בטרם הגיע לאטמוספירה והפך לזמין לנשימה, ומאידך, אין החומר האלומינו-סיליקטי ותחמוצות מינרליות אחרות גורמים לנזק ספציפי ומיוחדות להם תכונות של "אבק מטריד". ריכוז המרכיבים המינרליים האלה באוויר אינו חורג מהרמות המירביות שנקבעו עבור כל מרכיב בנפרד וממילא לא נקבעה רמה משותפת לכלל התערובת. מקטע החלקיקים ברי הנשימה באפר תחתית הוא 0.4% בלבד וחלקם אינו מגיע לריחוף עקב כליאתם בין חלקיקים גסים מאד.

ב. גורם הסיכון שמעורר בד"כ את הדאגה הגדולה ביותר בהקשר לאפר פחם הוא צורן דו-חמצני גבישי חופשי (סיליקה) הן בגלל הפוטנציאל הפיברוגני שלו ויכולת לגרום לסיליקוזיס והן בגלל הכרתו כגורם מסרטן לאדם. סוג הסיליקה הגבישית באפר הוא קוורץ בלבד. תהליך השריפה משנה את מופע הסיליקה בהשוואה למופע בפחם. באפר המרחף טבוע חציה בפאזה הזכוכיתית של החלקיקים ולכן חלק זה אינו רלוואנטי כפוטנציאל נזק. רוב החלק שאינו טבוע בפאזה הזכוכיתית מורכב מחלקיקים גסים שאינם ברי נשימה. מקטע הקוורץ בר הנשימה מהווה כ- 0.1% - 0.2% מכלל האפר המרחף, אך רוב חלקיקיו נתונים בתוך חלקיקי האפר ולא על שטח פניהם. השפעות פיברוטיות של קוורץ מיוחסות לתגובות של פני השטח של החלקיקים, אך הריכוז הנמוך של קוורץ בר-נשימה באפר המרחף יחד עם העובדה שחלקיקיו שקועים בחלקיקי האפר ופני השטח שלהם חבויים מסבירים את העדר הממצאים של סיליקוזיס והשפעות קוורץ אחרות במחקרים אפידמיולוגיים על עובדים חשופים לאפר פחם מרחף. ריכוז הסיליקה החופשית ברת הנשימה באפר תחתית הנמצא בשימוש נמוך אף הוא (0.001%) ואינו מהווה מקור לחשיפה גבוהה מרמת הפעולה בתקן הישראלי לחשיפה תעסוקתית, למעט מקרים קיצוניים של פיזור אפר תחתית על פני משטחים נרחבים, שם עלול פיזור רחב של אבק ע"י רוח או כלים מכניים כבדים להביא לריכוזים נקודתיים משמעותיים של סיליקה חופשית ברת נשימה באוויר.

ג. ריכוזן של מתכות כבדות באפר מרחף גבוה מזה באפר תחתית, אך בשני המקורות מהווים ריכוזי המתכות ריכוזי עקבות ופוטנציאל הפיזור שלהם באוויר, לפי אומדן במחקרים, נמוך בשלושה סדרי גודל מהרמה המירבית התעסוקתית המותרת לחשיפה.

ד. חלקן של תרכובות הפחמן, שהן ברובן פחמימנים ארומטיים פוליציקליים, מוגדרות, אמנם, כמסרטנות לאדם, אך, למרות העדר נתונים כמותיים על פיזורן באוויר ופוטנציאל חשיפה, נמוך אומדן ריכוזיהן הרבה יותר מריכוזן בפליטות משריפת דלק על סוגיו השונים.

ה. רמת הקרינה המייננת הנובעת מהרדיונוקליאטידים של אורניום, תוריום ואשלגן ובנותיהם, שנמצאים באופן טבעי בפחם, נמוכה מאד על אף אפקט העשרה במעבר מפחם לאפר. רמות מדודות מצביעות על תוספת של 1% - 5% מעל רמת קרינת הרקע

בסביבה הטבעית ובכל מקרה מדובר על רמות שנתיות הנמוכות בשלושה סדרי גודל מתקנים תעסוקתיים לחשיפה מותרת (מאיות מיליסיוורט לעומת 50 מיליסיוורט מותרים) ורמות הדומות לאלו הנפלטות מסוגים שונים של קרקע וסלעים.

1. בשימוש העיקרי של אפר תחתית בתשתיות קרקע ומצע מרחף אין סכנה לזיהום מי תהום במתכות כבדות וחומרים אחרים כיוון שפוטנציאל ההתמצות של מתכות אלו מהאפר נמוך ואינו מגיע, לדוגמה, לריכוזים המופיעים בקריטריון להגדרת פסולת אינרטי ע"י האיחוד האירופי.

המסקנה המתבקשת מהסטטוס הסיכוני של אפר פחם, וביחוד אפר תחתית, היא שניתן להתייחס אליו כאל חומר אינרטי שהאבק הנוצר ממנו הוא אבק מטריד, וכפסולת משריפת פחם הוא יכול להיות מוגדר כפסולת אינרטי שאינה מחייבת תקינה כלשהי.

יתירה מזאת, נתוני מחקר והיסטוריה רפואית מצביעים על כך שחשיפה לאפר פחם בתהליכים שונים אינה גורמת למחלות ריאה ולא הובאו ראיות משכנעות של פניאומוקוניוזות או פוטנציאל פיברוגני באדם, למעט פניאומוקוניוזות בעובדי מכרות פחם לשעבר. על אף סיכון לשינויים אפשריים בחומר הגנטי בתא אצל עובדים חשופים לאפר פחם לא נמצאה עליה בתמותה מסרטן ספציפי בקרב עובדים אלה ולא נמצא הבדל בשינויים בחומר התורשתי בתא בין קבוצת ניסוי לקבוצת בקורת. ואמנם, אפר הפחם אינו מוגדר כחומר מסוכן או פסולת מסוכנת בתקנות של מדינות מובילות והוא אושר לשימוש כתוסף בייצור מלט ולכיסוי קרקע.

על אף האמור לעיל, מחקרים על השפעות בריאותיות ופוטנציאל רעילות בחיות ותאים הדגימו ציטוטוקסיות בסוגי תאים שונים, פעילות המוליטית בתאי דם, פעילות מוטגנית חלשה, כנראה, בגלל נוכחות פחמימנים ארומטיים פוליציקליים, פעילות פיברוגנית מסויימת ואפשרות של השפעה על המערכת החיסונית. כמו כן, הודגמו ליקויים בתיפקודי ריאות וסימפטומים נשימתיים אחרים בעובדים שנחשפו לריכוזים גבוהים של אפר פחם ולתקופות ארוכות. הנתונים שהצטברו ממחקרים על אפר פחם (בעיקר אפר מרחף) אינם מאפשרים לבדד את השפעתו על הריאות והגוף מהשפעת הסיליקה ואינם מאפשרים להסיק אם הוא ממסך או בולם את רעילות הסיליקה או מהווה תוספת לרעילות זאת. ידוע שריכוזים גבוהים של אפר פחם מרחף עלולים לגרום לגירוי ויובש של הממברנות הריריות באף ובגרון ולגירוי וכאב עיניים כמו גם להחמרת מחלות נשימתיות. יבוש העור ושחיקתו ע"י אפר פחם עלולים לגרום לגירוד, קשקשת ואדמומית, ואפר רטוב וחומצי עלול לגרום לגירוי עור.

בשיקלול הנטייה להגדיר את אפר הפחם כאינרטי יחד עם המידע על השפעות מתונות של גירוי ויובש בדרכי הנשימה ובעור, אפשרות החשיפה הנמוכה לסיליקה גבישית והראיות ממחקרים על חיות, מומלץ להתנהג בעבודה עם אפר פחם על פי הוראות המצויות בגליונות בטיחות (MSDS), לרבות אמצעי מגן הנדסיים ואישיים והוראות עזרה ראשונה.

2. תוצרי שריפת פחם, מיונם והרכבם

אפר פחם הוא שם קיבוצי לתוצרי השריפה המוצקים של פחם על סוגיו השונים שהם: ביטומן, תת-ביטומן, אנתרציט, ליגניט. בישראל הפחם הוא בעיקר ביטומני.

קיים דמיון בין אפר פחם לאפר וולקני ובתכולתו יש סיד, ברזל, אלומיניום, חול סיליקה וחימר. כמו כן, הוא מכיל עקבות בסדר גודל של חל"מ של תחמוצות יסודות טבעיים הנמצאים גם באדמה, סלעים ופחם.

האפר הנוצר משריפת פחם (בעיקר בתחנות כח), ובעיקר פחם אבקתי (טחון), מוגדר כחומר אנאורגני בלתי ניתן לבעירה והוא מכיל חלקיקים גסים ועדינים. (1) מקטע אחד בו מכיל בעיקר חלקיקים גסים השוקעים בתחתית הכבשן ומסווגים לאפר תחתית (bottom ash) או פסולת אפר סיגית (boiler slag) כתלות בתהליך השריפה, ואילו מקטע החלקיקים הקטנים יותר מסווג כאפר מרחף (fly ash) ומסולק בד"כ מארובות הכבשן באמצעות מתקנים כגון משקע אלקטרוסטטי, מסנני שקים, או מתקני שטיפה שונים.

עקב תכולת גופרית בפחם באחוז משתנה (2% - 3.5%) והצורך לעמוד בתקני זיהום אוויר, מצויידות תחנות כח בד"כ במתקנים לסילוק תרכובות חלקיקיות וגזיות של גופרית מפליטות שריפת הפחם. תוצר סילוק זה, הנקרא תוצר דסולפוריזציה של גזי הארובה (Flue Gas –FGD Desulfurization) ומכיל בעיקר תחמוצות גפרית, מטופל בסיד וקרבוניטים (גיר) ליצירת משקעים גופרתיים, כגון גבס, הכוללים גם שאריות סיד ואפר מרחף.

התהליך השכיח ביותר של שריפת פחם בתחנות כח הוא זה של שריפת פחם ביטומני טחון דק לאבקה (PFA-pulverized fuel ash) בכבשנים קונבנציונליים בטמפרטורה מעל 1400°C. בטכנולוגיה זו תחתית הכבשן יבשה או רטובה (האפר נשמר במצב מותך). האפר הנוצר מהשריפה מהווה כ- 11% ממסת הפחם המקורית. (1) האפר המותך בטמפרטורה זו הוא אלומינו-סיליקטי במהותו ומתגבש לחלקיקים אמורפים זכוכיתיים כדוריים או מזוותים בעלי פני שטח חלקים.

בטכנולוגיות אחרות מיושמת שריפת מצעים זורמים (fluidized bed combustion), שם הפחם מעורב עם חומר סופח, כגון אבן סיד או חומרי מצע אחרים, טמפרטורות השריפה נמוכות יותר (800°C - 1000°C) ואיו צורך בניקוי תרכובות גופרית מהפליטות. התערובת העדינה רוכשת תכונות של זורם במהלך השריפה כדי לאפשר שריפה שלמה וסילוק גזי גפרית. החלקיקים האלומינו-סיליקטים הנוצרים בתהליך זה הם אי-רגולריים. (2) ואפר התחתית והאפר המרחף כוללים גם שאריות של חומר סופח שלא הגיב.

אפר מרחף

המקטע הבולט ביותר באפר הוא מקטע האפר המרחף, הנפלט בארובת הכבשן ומהווה כ- 88% מכלל מקטעי האפר. (2) טיפול במשקע אלקטרוסטטי בלבד מסלק למעלה מ- 99.5% מחלקיקי האפר המרחף, אך כ- 0.1% של החלקיקים נפלטים לאוויר הסביבה. שילוב של טיפול במשקע אלקטרוסטטי יחד עם תהליך הדסולפוריזציה (FDG) מקטין עוד את תכולת הפליטה לאוויר והאבק הנפלט נקרא אבק מרחף.

האפר המרחף שסולק מגזי הפליטה ע"י משקעים אלקטרוסטטיים מורכב מחלקיקים כדוריים אמורפיים. קירור מהיר של האפר ממצב מותך בכבשן גורם להוצרות חומר בלתי גבישי (זכוכיתי) המכיל 60% - 80% של זכוכית אלומינו-סיליקטית (2) וכמויות קטנות של מרכיבים גבישיים כגון, קוורץ, מוליט, מגנטיט והמטיט. (3)

בנוסף, כוללת התכולה ברזל וסידן באחוזים משתנים כתלות במקור הפחם (לדוגמה, 4.2% ו-2.4%, בהתאמה), אחוזים בודדים של פחם שלא נשרף ועקבות מתכות כבדות. דוגמה לתחומי ריכוזי העקבות של מתכות כבדות מובאת להלן:

בריום – מעל 1000 חל"מ;

ונדיום, כרום, נחושת, טונגסטן – מעל 100 חל"מ;

ארסן, קובלט, עופרת, מוליבדן, ניקל, סלניום – עשרות חל"מ;

אנטימון – חל"מ בודדים;

קדמיום, כספית – ריכוז נמוך מ-1 חל"מ.

גודל החלקיקים באפר המרחף קטן בד"כ מ-250 מיקרומטר, צורת רובם כדורית וצפיפותם נעה בתחום 0.6 – 3 גרם/סמ"ק. טמפרטורת ההתכה שלהם גבוהה מ- 1000°C והם בעלי מוליכות חומנית נמוכה ואדישות כימית. התפלגות גודל ממוצע של החלקיקים כוללת שלושה מקטעי גודל עקריים: 5 – 10 מיקרומטר, 20 – 50 מיקרומטר, 60 – 90 מיקרומטר.

האפר המרחף מכיל לעתים מקטעי משנה המוגדרים במונחים שונים:

סנספֶר (cenosphere) הוא מקטע המהווה עד 2% מהאפר המרחף ומורכב מחלקיקים כדוריים חלולים ואינרטיים בעלי דפנות זכוכיתיים, שגודלם בין 10–350 מיקרומטר והם מורכבים בעיקר מסיליקה ואלומינה ומלאים באוויר או גזים. החלקיקים נוצרים מהאפר כשהוא במצב מותך. עקב משקלם הסגולי הנמוך של החלקיקים הם צפים על פני השטח בבריכות אפר. הם משמשים לשיפור איכות הביצוע של צבעים, ציפויים ודבקים.

מיקרוספֶר הוא מקטע של חלקיקים מוצקים של אפר מרחף שגודלם עד 5 מיקרומטר.

פוזולן הוא חומר סיליצי או אלומיני (אלומיניום סיליקטי) אשר בנוכחות לחות וטמפרטורות רגילות וכאשר הוא טחון דק מגיב עם תחמוצת הסידן ליצירת חומר בעל תכונות של מלט. הוא קיים גם באופן טבעי במקור וולקני. על פי החוזק המלטי של המוצר מגדירים אינדקס פוזולני.

אפר אמוניאקלי הוא אפר מרחף שמכיל אמוניה או מלחי אמוניה כתוצאה מתוספת שלהם לאפר כדי לשפר את סילוק תחמוצות החנקן מגזי השריפה ואת הפעולה של המשקע האלקטרוסטטי. אמוניה נספח על שטח הפנים של חלקיקי האפר המשוקעים במשקע.

תוצרים פחמניים, כגון פחמימנים ארומטיים פוליציקליים, הנוצרים משריפה בלתי שלמה של הפחם ושל פאזות תרמופלסטיות.

הגדרת סוג, איכות וכ"ו של אפר מרחף לצורך שימוש כמרכיב בבטון נעשית לפי שורת קריטריונים כאשר אחד מהם הוא תכולת הסידן באפר. מקורו של אפר פחם מקבוצת סיווג C הוא בד"כ פחם ליגניט ופחם תת-ביטומני ומקורו של אפר פחם מקבוצה F הוא פחם ביטומני ופחם אנתרציט. (4)

ההבדל בין שתי קבוצות השיוך הוא בתכולת הסידן הגבוהה יותר בסיווג C, ולפי קריטריון אחר, כפי שנדרש בתקן (ASTM), עד 50% צירוף של תחמוצת סיליקה, תחמוצת אלומיניום ותחמוצת ברזל תלת ערכי בסיווג C ועד 70% תערובת זו בסיווג F. תכולת ה- SiO_2 ואלומיניום אוקסיד גבוהה בד"כ בפחם ביטומני מאשר בפחם מסוג אחר. תכונותיו של אפר פחם בעל תכולה גבוהה יותר של סידן טובות יותר לשימוש כמרכיב בבטון מחוזק, אם כי סוג זה של אפר עמיד פחות לריאקציות כימיות של הסיליקה האלקלית שבו עם מלחי גופרית (סולפטים) בסביבה.

אפר תחתית ופסולת סיגית

אפר תחתית הוא צבר של חלקיקי אפר הנוצר בכבשנים של פחם אבקתי כאשר תחתית הכבשן אינה בהכרח שומרת את האפר מותך. גודל החלקיקים אינו מאפשר את ריחופם בפליטות הארובה והם מתנגשים בקירות הכבשן ונופלים דרך פתחים למתקן איסוף הנמצא בתחתיתו. החלקיקים מזוותים ובעלי שטח פנים נקבובי ומתאפיינים בעיקר בסדר גודל של מילימטרים (קטן מ- 12.7 מ"מ). בתחנות כח רגילות מהווה אפר התחתית כ- 12% מכלל האפר הנוצר ותכולת המתכות הכבדות בו נמוכה בהשוואה לאפר מרחף.

אפר סיגי נוצר בתהליך שונה מעט מתהליך הווצרות אפר תחתית. (5) בתחתית הכבשן נשמר האפר במצב מותך במשך כל תהליך השריפה של הפחם ובשלב מסוים הוא נשפך מתחתית הכבשן דרך פתח לבור איסוף מכיל מים. מגע האפר המותך עם המים המכבים יוצר התגבשות מיידית של פתיתים גסים, קשים ושחורים, מזוותים ובעלי טקסטורה זכוכיתית. האפר הסיגי הוא אמורפי והרכבו דומה להרכב אפר תחתית. גודל הרוב המכריע של החלקיקים נע בין 0.5 ל- 5 מילימטר. בתהליך הפקת אפר סיגי ניתן להשיג עד ל- 50% של מקטע זה מכלל האפר הנוצר בטכנולוגיה של כבשן רגיל ועד 80% בטכנולוגיה של כבשן ציקלוני המשתמש בפחם כתוש. המשמעות היא הפחתת כמות האפר המרחף.

הרכבם הכימי של אפר תחתית ואפר סיגי ממקור ביטומני כולל צורך דו חמצני (כ- 50%) בעיקר אמורפי ומעט גבישי, תחמוצת אלומיניום (כ- 25%), תחמוצת ברזל (כ- 10%), סיד (כ- 1%), תחמוצת מגנזיום (כ- 5%), תחמוצת נתרן (כ- 1%) ותחמוצת אשלגן (כ- 0.2%). ההרכב משתנה כתלות במקור הפחם ומכיל בד"כ גם סולפטים בכמות נמוכה מ- 1%. ה- pH של אפר תחתית וסיגי עשוי להיות נמוך מ- 5 ולכן עלול אפר זה להיות קורוזיבי במידה מסויימת.

3. שימושים של אפר פחם

השימוש המוביל באפר פחם במדינות שונות הוא לבקרת שלג וקרח, כמרכיב בבטון קל לבניה וכחומר מילוי בייצור מלט, צבעים, ציפויים שונים, גומי, גב שטיחים, דבקים וחומרי אטימה. בעשרים השנים האחרונות יש נטייה למחזר אפר פחם כחומר מילוי בעיקר בענף הבניין. 10% - 65% ממלט פורטלנד מורכב מאפר פחם. אפר תחתית הוא מרכיב בבטון המשמש לבניית משטחים, מגרשי חנייה וסכרים וכמו כן בייצוב קרקע וכחומר מילוי עדין באספלט. (6,4) באפר סיגי דומים השימושים והוא משמש גם כמרכיב בייצור רעפים וכחומר לשחיקת משטחים.

אפר פחם משמש כחומר מילוי בר-זרימה, כאשר אחוזו בחומר משתנה בהתאם לתכונות הנדרשות ויכול להגיע לאחוז גבוה. (7) בשימוש זה משתמשים בו לתשתיות כבישים, מצע גיבוי לדפנות תעלות המנקזות סחף סופות, דפנות עיליות תומכות בכבישים ורחובות, מילוי חללים של קווי צינורות שלא בשימוש ומילוי בורות. בעת שימוש באפר פחם כמרכיב בחומר מילוי בר-זרימה נבדקים בחומר זה היבטים של חוזק חומרים, עמידותו לאורך זמן, יציבות ועמידה בלחץ אנכי וציד, כושר תמיכה ונשיאת משקל, זמן הקשייה, תכונות חיכוך, דליפה מחוץ למסגרת מבנה, התכווצות נפח וחדירות.

שימוש באפר פחם מצמצם את הצורך בשימוש בחומרי אבן, שדרושה אנרגיה להפקתם, ומצמצם את גזי החממה הנפלטים מתהליכים תעשייתיים. עקב כך עלה השימוש בו בעולם ובארה"ב,

לדוגמה, הופקו ב- 1998 כ- 75 מיליון טון אפר פחם שהתפלגו באחוזים ל- 60% אפר מרחף, 13.6% אפר תחתית, 1.4% פסולת כבשן סיגית ו- 25% תוצרי דסולפוריזציה (חומר גבס). (3)

4. פוטנציאל חשיפה תעסוקתית וסביבתית לאפר פחם

גורמי החשיפה והסיכון הבולטים באפר תחתית ומרחף, שעליהם נתנו את הדעת הקהילה המדעית והבינלאומית, רשויות סטטוטוריות של איכות הסביבה במדינות שונות וגופים מתקנים ומפתחי תקנים בבריאות תעסוקתית הם חמישה:

- א. אפר הפחם עצמו ותכולתו המינרלית והאלמנטית
- ב. צורן דו-חמצני גבישי חופשי (סיליקה חופשית)
- ג. מתכות כבדות
- ד. תרכובות פחמניות ובעיקר ארומטיות
- ה. קרינה מייננת שמקורה ביסודות טבעיים בפחם.

אפר מרחף

אפר

קיימות הערכות שונות לגבי אחוז האפר המרחף הנפלט לאטמוספירה אחרי הפעלת שיטות טיפול בו כגון משקע אלקטרוסטטי ומשטפים. האומדן הגבוה הוא 5.5% (6) פרופורצית המקטע בר השאיפה (inhalable) של חלקיקי אפר פחם משתנה בהתאם לסוג הפחם ותהליך השריפה. המקטע בר הנשימה (respirable) נע סביב 30%, אך עשוי להגיע גם עד 50%.

צורן דו חמצני גבישי חופשי (סיליקה חופשית)

במחקר שנערך בהולנד (8) נמצא ש- 50% מהקוורץ שהיה בפחם נשאר באפר המרחף לאחר השריפה והקוטר האווירודינמי בחציון המסה היה 31 מיקרומטר. כמות זו קטנה בד"כ מ- 5% מכלל כמות אפר הפחם, אולם במקורות שונים וכתלות בסוג הבעירה, היא עשויה להגיע גם עד 15% מכלל אפר הפחם. במקטע העדין שבאפר קיימת תכולת קוורץ המהווה רק 16% מתכולת הקוורץ במקור הפחם או כ- 1.6% - 5% מכלל האפר המרחף (קוטר אווירודינמי בחציון המסה - 10 מיקרומטר). שארית הקוורץ - כ- 50% מהתכולה שהיתה במקור הפחם טבועה בפאזה הזכוכיתית של החלקיקים. המקטע בר הנשימה של קוורץ, הרלוואנטי כסיכון בריאותי, הוא רק חלק מהמקטע העדין לעיל ואחוזו המשקלי נאמד בכ- 0.1% - 0.2% מכלל האפר. חלקיקי הקוורץ החופשי ברי הנשימה מופיעים כחלקיקי חול מזוותים בלתי מותכים בתוך חלקיקי האפר (בניגוד לחלקיקים הגסים שאינם ברי נשימה, מסתם גדולה ביחס לחלקיקים הקטנים והם מופיעים באופן חופשי באפר). השפעות פיברוטיות של קוורץ מיוחסות לתגובות של פני השטח של החלקיקים, אך הריכוז הנמוך של קוורץ בר-נשימה באפר המרחף יחד עם העובדה שחלקיקיו שקועים בחלקיקי האפר ופני השטח שלהם חבויים מסבירים את העדר הממצאים של סיליקוזיס והשפעות קוורץ אחרות במחקרים אפידמיולוגיים על עובדים חשופים לאפר פחם מרחף.

מתכות כבדות

באחת העבודות על חשיפה תעסוקתית לאפר פחם מרחף בתוך תחנות כח (9) חושו כמויות מתכות כבדות הנקלטות בגוף מהאפר על סמך מספר החלקיקים בסמ"ק אוויר, מסת החלקיק לפי צפיפותו ונפחו, האחוז המשקלי של המתכת בחלקיקים ונפח האוויר הננשם ע"י עובד במשמרת עבודה בת 8 שעות. המתכות שכמותיהן חושו הן ניקל, קדמיום, עופרת ואבץ. גזירת ריכוז המתכת באוויר מנתונים אלה מראה שריכוזי הניקל (שמקורו בניקל אוקסיד בלתי מסיס לאחר התכת האפר), הקדמיום, העופרת והאבץ באוויר היו, בהתאמה, 0.12, 0.003, 0.362 ו- 0.942 מיקרוגרם/מ"ק כאשר הרמות המירביות המותרות לחשיפה, בהתאמה, הן 200, 10, 100 מיקרוגרם/מ"ק ולאבץ כמתכת בלבד לא נקבעה רמה מרבית מותרת. יצוין שהריכוז המחושב לעיל נגע למקטע בר-נשימה בלבד המהווה עד 50% מכלל אפר הפחם המרחף, דהיינו, ריכוז המתכות בכלל האבק בפועל גבוה פי 2 לפחות, אולם גם הכפלת הריכוז נותנת ריכוז נמוך בהשוואה לתקני חשיפה תעסוקתיים.

הריכוז המחושב של כלל המקטע בר הנשימה של אפר מרחף באוויר היה 0.51 מ"ג/מ"ק בהשוואה לתקן תעסוקתי למקטע זה, המקביל למקטע זהה של חלקיקים בלתי מסווגים (בישראל), והוא בגובה 3 מ"ג/מ"ק.

תרכובות פחמניות ארומטיות

שאריות של תרכובות פחמן באפר מרחף כוללות בעיקר תרכובות של פחמימנים ארומטיים פוליציקליים שחלקן ידוע כגורם מסרטן באדם. לא נמצאו נתונים כמותיים לריכוזים של תרכובות אלה באפר או באוויר, אך ריכוזיהם, כנראה, נמוכים בהרבה מריכוזים של תרכובות אלה בפליטות משריפת דלק בנייני ודיזל בכלי רכב, במטוסים ובכלים ימיים.

קרינה מייננת

בפחם קיימת תכולה של איזוטופים רדיואקטיביים טבעיים (NORM -Natural Occuring) ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K (Radioactive Materials) וכתוצאה מכך גם באפר. יסודות אלה הם: ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K ובנותיהם. שכיחות האורניום ברוב המכריע של 2300 מדגמי פחם בארה"ב היתה 1 – 4 חל"מ כאשר ריכוז עד 20 חל"מ היה נדיר. (10) שכיחות זהה נמצאה לגבי תוריום. השכיחות דומות לשכיחות יסודות אלה בסוגים שונים של קרקע וסלעים כגון בזלת וצפחות, אך נמוכה מהתכולה בסוגים אחרים כגון סלעי גרניט וסלעים פוספטיים.

עקב אפקט הריכוז הקיים באפר פחם לאחר שריפת הפחם עולה רמת הרדיונוקליאטידים באפר פי 10 בערך מרמתם בפחם ונעה בין 10 – 40 חל"מ. ריכוז זה מצוי באופן טבעי בסלעי גרניט, צפחות מסוימות ופוספטים.

רוב הרדיונוקליאטידים הבלתי נדיפים, כגון אלו של אורניום, תוריום ואשלגן, נשארים באפר תחתית ואפר סיגי ובאפר המרחף שסולק מגזי הארובה באמצעות טיפול במשקע אלקטרוסטטי. לעומת זאת, רדיונוקליאטידים גזיים, כגון ראדון, נפלטים לאטמוספירה מהארובה. באפר המרחף מתרכז האורניום יותר בחלקיקים העדינים (ברי נשימה).

בסדרת מחקרים שנערכו בין 1975 – 1985 בארה"ב הוסק שרמת הקרינה המייננת המירבית לפרט החי 1 ק"מ מתחנת כח מודרנית אקוילנטית לתוספת של 1% – 5% מעל רמת קרינת הרקע בסביבה הטבעית. תוספת מנת הקרינה לאוכלוסיה הכללית, שנובעת משריפת פחם נכללת בקטיגורית תרומת הקרינה המהווה פחות מ- 1% מסך התרומות של קרינה מייננת לאוכלוסיה

ממקורות שונים כאשר המקורות הטבעיים ביניהם (כגון ראדון) אחראים על 82% מסך תרומות אלה. (10) תוספת זו, בכל מקרה, אינה עולה על הרמות המירביות המומלצות ע"י הארגון הבינלאומי להגנה מקרינה (ICRP). (6) פליטת גז ראדון מאפר פחם נמוכה מפליטתו מקרקע המכילה כמות אורניום דומה. מוצרי בטון המכילים אפר פחם תורמים פחות מ- 10% לרמת הראדון הכללית בתוך מבנים.

אפר תחתית

בסקירה על השלכות בעייתיות אפשריות מהיווצרות ושימוש באפר פחם תחתית (11) נדונו שלושה נושאים:

1. זיהום אטמוספירי מחלקיקי האפר המרחפים באוויר
2. קרינה רדיואקטיבית מאיזוטופים טבעיים בפחם
3. נדידת יסודות וחומרים רעילים מפסולת האפר אל קרקע ומי תהום.

זיהום אטמוספירי

מקטע החלקיקים הרלוואנטי ביותר לדיון בחשיפה תעסוקתית הוא של החלקיקים שגודלם עד 10 מיקרומטר, המהווים גודל בר-נשימה. מקטע זה עשוי להגיע (משקלית) ל- 30% באפר מרחף, אך רק ל- 0.4% באפר תחתית. אחוז הצורך הדו-חמצני גבישי חופשי (כקוורץ) במקטע זה מגיע באפר תחתית ל- 0.5% בעוד שבחלקיקים שגודלם מעל 40 מיקרומטר הוא מגיע ל- 7%. הסיבה להבדל היא התגובה בין הסיליקה הגבישית לבין תחמוצות מינרליות אחרות היוצאת לפועל במידה רבה בחלקיקים קטנים ובמידה מעטה בחלקיקים גדולים.

השימוש העקרי בישראל באפר תחתית הוא כמצע מנותק בחקלאות, בעיקר בחממות, לאחר שהוצא ממנו מקטע החלקיקים שגודלם קטן מ- 2 מ"מ. סינון זה מקטין עוד את תכולת החלקיקים ברי הנשימה ואיתם גם את תכולת הסיליקה הגבישית חופשית ברת הנשימה עד לכ- 0.001% מכלל האפר התחתית. תכולת סיליקה זו קטנה מ- 500 גרם לשטח אדמה מכוסה באפר פחם שגודלו 1000 מ"ר וכמות אפר התחתית המכסה אותו היא כ- 50 טון.

רוח ומים (גשם) מהווים גורם ארוזיה ונשא לאפר פחם ולכן עלולים לגרום לארוזיה בתשתיות קרקע המכילות אפר זה. אמנם, הערכים לעיל מצביעים מחד גיסא על פוטנציאל פיזור אטמוספירי נמוך של צורך דו-חמצני גבישי חופשי בחלקיקי אפר פחם ברי נשימה אם מתייחסים לגובה שכבת העירוב האטמוספירית (מאות מטרים), מה גם שהפיזור יהיה מפני השטח בלבד של שכבת הכיסוי ולא מכל עומקה. אבל מאידך, בשטחים נסיוניים שכוסו באפר פחם, הראו מדידות שנערכו בזמן פעילות בשטח, שריכוז כלל החומר החלקיקי המרחף גבוה מהרמה המרבית שנקבעה כתקן זיהום אוויר ע"י המשרד לאיכות הסביבה (0.6 – 0.75 מ"ג/מ"ק לעומת 0.3 מ"ג/מ"ק מותר ל- 3 שעות). חישובים תיאורטיים מראים שאם כל כמות הסיליקה הגבישית ברת הנשימה תתפזר מפני שכבת כיסוי של מצע מנותק ששטחו 1000 מ"ר, בהנחה שפני שכבה זו מכילים כ- 10% מכלל אפר הפחם שפוזר, דהיינו 50 גרם סיליקה, אזי יהיה צורך שכמות זו תתפזר בנפח של 500,000 מ"ק אוויר כדי לא לעלות על הרמה המרבית התעסוקתית המשוקללת המותרת לחשיפה למקטע בר-נשימה של סיליקה חופשית שהיא בגובה 0.1 מ"ג/מ"ק. נפח זה שווה ערך לשטח בן 1000 מ"ר שגובה שכבת האוויר מעליו הוא 500 מ"ר, או שטח של 50,000 מ"ר (50 דונם) שגובה שכבת האוויר מעליו 10 מטר.

מחקרים בהולנד הראו שריכוז הקוורץ בר- הנשימה באוויר כתוצאה משימוש באפר תחתי לא חרג מהתקן הסביבתי התעסוקתי המותר שם (0.075 מ"ג/מ"ק), אך ריכוז זה גבוה מרמת הפעולה הנהוגה בארץ למקטע בר-נשימה של סיליקה חופשית (0.05 מ"ג/מ"ק), שחשיפת עובד מעליה מחייבת תחילת פיקוח סביבתי ורפואי עליו, והוא גבוה מהרמה התעסוקתית המירבית העתידית בישראל לחשיפה למקטע זה (0.05 מ"ג/מ"ק).

ריכוז המתכות הכבדות באפר תחתי נמוך מזה שבאפר מרחף ולכן, בהתחשב באומדנים שנעשו לעיל לגבי אפר מרחף, החשיפה התעסוקתית למתכות אלה מזיהום אוויר באפר תחתי זניחה בהשוואה לתקני חשיפה תעסוקתיים.

קרינה מייננת

ריכוזי רדיונוקליאטידים באפר תחתי נמוכים מאד והמנה השנתית, בהנחה של חשיפה במשך 500 שעות, היא 2.5 – 3 מילירם (0.025 – 0.03 מיליסיוורט) לעומת 5000 מילירם (50 מיליסיוורט) מותרים לעובדים לשנה לכל הגוף ו- 100 מילירם (1 מיליסיוורט) לכל הגוף לשנה לאוכלוסיה הכללית.

זיהום מי תהום

ריכוז תחמוצות מינרליות באפר תחתי גבוה בממוצע מריכוזים מקבילים באפר מרחף כאשר התחמוצות המובילות הן צורן דו-חמצני (אמורפי וגבישי), תחמוצות אלומיניום ותחמוצות ברזל. המצב הפוך כאשר מדובר ביסודות קורט שהם בד"כ מתכות כבדות. ריכוזן בסדר גודל של חלקים למיליון בודדים עד אלפים (כתלות בסוג המתכת) גבוה באפר מרחף יותר מאשר בתחתי, אך ריכוזן גבוה בשני סוגי האפר מהריכוז המקביל בסוגי קרקע שונים.

הריכוז של מתכות קורט באפר תחתי והיחס בין שטח הפנים של גרגיריו לשטח הפנים של חלקיקי אפר מרחף מקטין את פוטנציאל ההתמצות של מתכות ממנו למי תהום ומשווה אותו לזה הנגרם מסלעי משקע. פוטנציאל ההתמצות של מתכות כבדות מאפר תחתי נמוך מהריכוזים המופיעים בקריטריון להגדרת פסולת אינרטי ע"י האיחוד האירופי.

מדידות (בארה"ב) של אורניום ורדיום מומסים במים שבאו במגע עם אפר מרחף הראו שריכוז הרדיום לא עלה על זה המותר לפי תקני מי שתיה (5 פיקוקירי/ליטר) וריכוז האורניום לא עלה על המירבי המוצע במי שתיה (20 חל"ב). (10)

מדידות במי באר בישראל ליד שטח שכוסה באפר תחתי לא הראו תוספת מתכות כבדות למי התהום משטח זה. היסוד היחידי שפוטנציאל חדירתו למי תהום עשוי להיות משמעותי הוא בורון. מחבר הסקירה (11) מסיק שעל אף נוכחות הקוורץ באפר תחתי הוא יכול להחשב כחומר אינרטי וכאבק מטריד וחשיפה אליו אינה גורמת לתחלואה ריאתית. כמו כן, למעט בורון, אין סכנה של חדירה למי תהום בריכוזים מעוררי דאגה. המחבר ממליץ להתייחס לאפר תחתי בישראל כפסולת אינרטי שאינה מחייבת תקינה כלשהי.

תקני חשיפה תעסוקתית

לא נקבעה רמה מירבית מותרת לאפר פחם מרחף או תחתי ע"י התאגדות הגיהותנים התעסוקתיים הממשלתיים בארה"ב (ACGIH) שתקניה אומצו ע"י משרד התעסוקה בישראל, אולם מדינות שונות מסווגות את אפר הפחם כ"אבק מטריד" או חלקיקים בלתי מסווגים. הרמות המירביות המשוקללות עבור סוג זה של אבק הן 10 מ"ג/מ"ק עבור כלל האבק הנשאף ו- 3

מ"ג/מ"ק עבור המקטע בר הנשימה של האבק. רמות מירביות נקבעו גם למרכיבים העיקריים של האפר כלהלן: צורן דו-חמצני גבישי חופשי – 0.3 מ"ג/מ"ק עבור כלל האבק ו- 0.1 מ"ג/מ"ק עבור מקטע בר-נשימה; סיליקה אמורפית – 10 מ"ג/מ"ק עבור כלל האבק הנשאף ו- 3 מ"ג/מ"ק עבור מקטע בר-נשימה; תחמוצת אלומיניום – 10 מ"ג/מ"ק; תחמוצת ברזל – 5 מ"ג/מ"ק; סידן חמצני (סיד) – 2 מ"ג/מ"ק; מגנזיום חמצני – 10 מ"ג/מ"ק; טיטניום דיאוקסיד – 10 מ"ג/מ"ק. גם למתכות נקבעו רמות חשיפה מירביות, אעפ"י שבמקרה של אפר פחם ריכוזיהם באוויר זניחים: עופרת – 0.1 מ"ג/מ"ק; קדמיום – 0.01 מ"ג/מ"ק; ניקל (תרכובות בלתי מסיסות) – 0.2 מ"ג/מ"ק; כרום – 0.5 מ"ג/מ"ק; קובלט – 0.02 מ"ג/מ"ק; ארסן – 0.01 מ"ג/מ"ק; כספית – 0.04 מ"ג/מ"ק; טונגסטן – 5 מ"ג/מ"ק; אנטימון – 0.5 מ"ג/מ"ק; בריום – 0.5 מ"ג/מ"ק; נחושת – 1 מ"ג/מ"ק; מוליבדן – 10 מ"ג/מ"ק עבור כלל האבק הנשאף ו- 3 מ"ג/מ"ק עבור מקטע בר-נשימה.

5. השפעות בריאותיות של אפר פחם

דרכי החדירה הרלוואנטיות של אפר פחם לגוף האדם הן דרכי הנשימה והבליעה. תחום הגודל של חלקיקי אפר פחם מרחף ברי שאיפה הוא 0.1 – 100 מיקרומטר, אך מתוכם אלה המרחפים זמן רב באוויר, ולכן הסיכוי לשאיפתם גבוה, הם אלו שגודלם עד 15 מיקרומטר, כאשר אלו שגודלם בתחום 1 – 4 מיקרומטר שוקעים באזור חילוף הגזים בריאות באחוז גבוה ולכן הסיכון הבריאותי מהם גבוה יותר מהחלקיקים הגדולים יותר. (9) בחלקיקים הקטנים קיימת העשרה בריכוז המתכות הכבדות לעומת החלקיקים הגסים. (6)

זמן מחצית החיים של חלקיקי אפר פחם מרחף בדרכי הנשימה העליונות של חיות ניסוי היה 3 ימים. (6) פינוי חלקיקים ברי נשימה ארוך יותר עם זמן מחצית חיים גבוה מחודש. חומרים מסיסים באפר כגון מתכות חודרים מהריאות לדם ומתפזרים באיברים שונים. בחשיפה לריכוזים גבוהים לזמן קצר ההשפעות האפשריות הן גירוי ויובש באף ובגרון וגירוי עיניים. (6) בחשיפה כרונית הועלה חשד לאפשרות של התפתחות גידולים סרטניים, אולם חשד זה לא הוכח ולא נמצאו מקרים או מחקרים אפידמיולוגיים שמצביעים על סיכון לסרטן.

ב- 1994 תואר מקרה של התפתחות מחלת ריאה חריפה מחשיפה לאפר מרחף ולדעת החוקרים (11) זהו המקרה הראשון מאז תחילת השימוש בפחם בתחנות כח (סוף המאה ה-19). גם מחקרים מאוחרים יותר מצביעים על כך שחשיפה לאפר פחם בתהליכים שונים אינה גורמת למחלות ריאה למעט פוטנציאל נזק הקיים מחשיפה לגופרית דו חמצנית שמקורה בדליפות מהכבשן.

אפר פחם אמנם מכיל 5% - 15% סיליקה גבישית חופשית, אך רובה נתון בחלקיקים כדוריים זכוכיתיים שאינם בעלי קצוות מחוספסים ולכן, בצורה זו, אינם מהווים סיכון דומה לצורות אחרות של סיליקה גבישית ולא מתועדים בספרות מקרי סיליקוזיס. (6)

אפר תחתית מוגדר בגופים שונים כאינרטי.

באוסף של גליונות בטיחות (MSDS) שצורפו כחלק מהסקר הספרותי ששימש בסיס לחוות דעת זו מתוארות באופן דומה השפעות בריאותיות של אפר פחם לטווח קצר וארוך.

נשימה: ריכוזים גבוהים של אפר פחם מרחף עלולים לגרום לגירוי ויובש של הממברנות הריריות באף ובגרון ולגירוי וכאב עיניים. חשיפה ארוכת טווח לריכוזים גבוהים עלולה לגרום לירידה בהתנגדות הריאה לזיהומים והחמרה של דלקת סימפונות כרונית, אמפיזמה בריאות, אלרגיה או אסתמה. (12) המנה הנמוכה ביותר שגרמה להשפעות

רעילות (TCL_0) בנשימה באוגרים היתה 70 מ"ג/ק"ג כאשר ניתנה במשך 6 שעות חשיפה בכל יום לפרק של 86 שבועות, או 200 מ"ג/מ"ק שניתנו במשך 6 שעות בכל יום לפרק של 8 שבועות.

עור: יבוש העור ושחיקתו המכנית ע"י אפר פחם עלולים לגרום לגירוד, קשקשת ואדמומיות. במקרים קיצוניים של חומר רטוב על פני העור עלולה חומציותו לגרום לגירוי עור עד הופעת שלפוחיות.

בליעה: לא דווח על השפעות בחדירה דרך מערכת העיכול. בניסויי חיות בהם ניתנו לחיות מנות גדולות מאד, שאינן רלוואנטיות לחשיפה תעסוקתית, במשך מספר שבועות רצופים נמצאו ההשפעות הבאות:

ריאות: שינויים במשקל הריאה ושינויים במבנה הקנה והסימפונות.

דם: שינויים בספירה אדומה ולבנה.

כבד: שינויים במשקל.

ביוכימיה: שינויים בחלבונים ובאנזימים.

התפתחות: בעוברי חיות נצפו מומים במערכת הקרדיוסקולרית ומערכת שתן-מין לאחר הזנה תוך-קנית של האם בכמויות גדולות (600 מ"ג/ק"ג), שאינן רלוואנטיות לחשיפה תעסוקתית, במשך 5 ימים בתקופת ההריון.

בחשיפה לזמן ארוך לא הודגמו מחלות ריאות כרוניות (לרבות סיליקוזיס) או סרטן כתוצאה מחשיפה לאפר, לסיליקה גבישית ולחומרים אחרים החשודים כמסרטנים. כמו כן לא דווח על השפעות כרוניות על העור או ובחשיפה דרך בליעה.

6. פוטנציאל רעילות

לחלקיקי אפר פחם פוטנציאל לגרום לסיכוני בריאות בדרכי הנשימה של עובדים חשופים. (3) שקיעתם בריאות עלולה להוביל להתמצות של תרכובות גנוטוקסיות לדם ולתאים ולמעורבות של מנגנונים אימונולוגיים. כאשר עומס החלקיקים בריאות עולה, נגרם שפעול של מקרופגים ותאים אפיתליאליים המשחררים מרכיבים שונים וביניהם גורמים מעוררי דלקת, מרכיבים עם חמצן פעיל (רדיקאלי), אנזימים, ציטוקינים ופקטורי גדילה. שחרורם של אלה עלול ליצור גירוי להתפתחות של לייפת (פיברוזה ברקמת הריאה).

ב- review על פוטנציאל רעילות של אפר פחם הובאו הממצאים והדגשים הבאים המובאים להלן. (3)

במחקרי *in vitro* הודגמה ציטוטוקסיות של אפר פחם בתאים מקרופגים ריאתיים ופגוציטים של חיות, בתאי דם אדומים של אדם ובשורות תאים של חיות. בתאי דם היתה לאפר הפחם פעילות המוליטית נמוכה בהשוואה לזו של סיליקה גבישית טהורה למעט פעילות של אפר פחם עשיר בסידן ובעל תכולת סיליקה נמוכה. בכל סוגי האפקטים שנבדקו במחקרים היתה הפעילות הטוקסית של אפר פחם נמוכה משמעותית מזו של סיליקה גבישית חופשית, אך באופן מובהק גבוהה מחומרי בקורת המוגדרים כאינרטיים ובלתי מסווגים. הנתונים לא תמכו בתכולת הסיליקה באפר כגורם מתערב ברעילות, לעומת חשיפה לאבק פחם שם יש לסיליקה תפקיד בהשריית רעילות.

הפוטנציאל הגנוטוקסי והמוטוגני של אפר פחם מרחף הוערך בעיקר באמצעות מבחן Ames ולימפוציטים של אדם. אפר מרחף לא נמצא מוטוגני במבחנים אלה בעוד שפעילותם המוטוגנית של מקטעים אחרים יוחסה לנוכחות פחמימנים ארומטיים פוליציקליים. פעילות של רכיבים בעלי חמצן פעיל בריאות מצביעה על אפשרות לנוזק לממברנת התא דרך על-חמצון של ליפידים, חמצון חלבונים ונוזק לחומר התורשתי בתא (DNA). פעילות זו היתה נמוכה עד זניחה מהשראה של אפר פחם בהשוואה להשראת פעילות דומה ע"י סיליקה ואסבסט.

הפוטנציאל הפיברוגני של אפר פחם במחקרי *in vitro* היה גבוה באפר משריפת פחם אבקתי יותר מאשר באפר ממצע זורם, אך זה האחרון הראה פעילות מוטוגנית, כנראה בגלל נוכחות פחמימנים ארומטיים פוליציקליים.

הפעילות הפיברוגנית של אפר פחם במחקרי *in vivo* היתה מתונה ונמוכה מזו של סיליקה גבישית, ובחלק מהמקרים דומה לפעילות של חלקיקים מטרידים במינון שווה, אך גבוהה בד"כ מהפעילות הביולוגית של מיקה או תחמוצת אלומיניום. המחקרים מצביעים על אפשרות שהסיליקה באפר פחם פיברוגנית פחות מזו באבק פחם, אעפ"י שנתון זה אינו מוצק דיו כיוון שפעילות פיברוגנית השוואתית של סיליקה בפחם ושל אפר פחם לא נבדקה. במחקרים בהם נחשפו קופים ומכרסמים לסדרת ריכוזים של אפר פחם נמצאה עליה מסויימת במקרופגים רק בחשיפה לריכוזים הגבוהים שבסדרה. לעומת זאת, חשיפת חיות לאפר פחם מכיל סיליקה חופשית הביאה לתגובות פתולוגיות טיפוסיות של דלקת בין-תפרית (אינטרסטיציאלית) ופיברוזה. מחקרים שניסו לבדוק השפעה של אפר פחם על המערכת החיסונית בחיות לא הצליחו להביא הוכחות חותכות לכך אם כי נמצאה השפעה על הופעת תאים יוצרי נוגדנים בקשריות לימפה בעיקר כאשר החשיפה היתה לאפר פחם וסיליקה. בנתונים השונים על רעילות אפר פחם לא תועדו השפעות וסיכונים יחסיים לפי מקור הפחם או סוג תהליך השריפה.

חסרים מחקרים אפידמיולוגיים מקיפים על אוכלוסיות עובדים חשופות לאפר פחם, אך נתוני מחקר על עובדי תחנות כח פחמיות בבריטניה לא הצליחו להדגים ראיות משכנעות של פניאומוקוניוזות או פוטנציאל פיברוגני מאפר פחם, למעט פניאומוקוניוזות בעובדי מכרות פחם לשעבר. לעומת זאת, הודגמו ליקויים בתיפקודי ריאות וסימפטומים נשימתיים אחרים בעובדים שנחשפו לריכוזים גבוהים ולתקופה ארוכה בדומה לליקויים המתוארים מחשיפה ממושכת לאבק אנאורגני אחר. אין לשלול החמרה והגדלת שכיחות ההשפעה בקרב מעשנים או עובדים שנחשפו לתערובות של אפר פחם וחלקיקים ממקור אנאורגני אחר לרבות חלקיקי פחם.

על אף סיכון לשינויים אפשריים בחומר הגנטי בתא אצל עובדים חשופים לאפר פחם לא נמצאה עליה בתמותה מסרטן ספציפי בקרב עובדים מסוג זה. במחקרים על השפעות גנוטוקסיות של אפר פחם בבני אדם לא נמצא הבדל בשינויים בחומר התורשתי בתא בין קבוצת ניסוי לקבוצת בקורת. במחקרים אחרים נמצאה עליה באברציות כרומוזומליות בתאי דם פריפריאלי בעובדי מכרות, אך זו יוחסה לחשיפת עובדים לפחמימנים ארומטיים פוליציקליים במכרה ולא לאפר פחם. אין נתונים מספיקים על האפקט של אפר פחם על הופעה והשרייה של סמנים (markers) שנוכחותם חיונית בהתפתחות רעילות של אבק, כגון ציטוקינים, פקטורי גדילה ומרכיבים עם חמצן פעיל. לעומת זאת, קיימים נתונים על השרייה של סמנים אלה כתוצאה מחשיפה לאפר ממקורות שאינם פחם, או אבק פחם ממכרות ואבק סיליקה.

הנתונים שהצטברו ממחקרים על אפר פחם (בעיקר אפר מרחף) אינם מאפשרים לבדוד את השפעתו על הריאות והגוף מהשפעת הסיליקה ואינם מאפשרים להסיק אם הוא ממסך או בולם את רעילות הסיליקה, או מהווה תוספת לרעילות זו. העדר ראיות חותכות על פיברוזה ריאתית בעובדים כתוצאה מחשיפה לאפר פחם יחד עם נתונים שליליים עקביים על אבק מכרות פחם כגורם מסרטן, על אף שהסיליקה הגבישית חופשית הוכרה כמסרטן לאדם, מדגישים את הצורך במחקרים נוספים בנושא.

7. התייחסות תחיקה ותקנות בעולם לאפר פחם

החל מ-1993 לא הכלילה יותר הסוכנות האמריקאית להגנה על הסביבה (EPA) את סוגי אפר הפחם וחזרה וקבעה בחודש מרץ 1999 שפסולת שריפה של דלק פחמי אינה נכללת בתקנות פסולת מסוכנת ואינה דורשת טיפול כלשהו. (11) בעקבות מחאות של ארגונים סביבתיים נערך דיון לשינוי ההחלטה ולמרות זאת, בשנת 2000 הוחלט בשנית שפסולת שריפת פחם לא תשוויה לקטיגוריה של פסולת מזיקה, אך על חלק ממנה, המשמש לכיסוי קרקע ומכרות, יחולו התקנות הקיימות לגבי פסולת לא מזיקה. ה-EPA גם ניפק מדריך לעקרונות של שימוש, ערבוב ובקרת איכות של אפר פחם במוצרי מלט ובטון תוך הדגשה שאין למנוע שימוש בחומר זה, אלא אם כן אינו מתאים מבחינה טכנית.

הוועדה המייעצת במחלקת הסביבה של האיחוד האירופי אישרה בשנת 2002 את השימוש באפר פחם לכיסוי קרקע תוך קביעת פרוצדורות לוידוא במקום השימוש שסוג הפסולת תואם את ההגדרות במסמך הוועדה, ותוך קביעת קריטריונים וערכי גבול לפסולת בלתי מזיקה, לפסולת מזיקה ולאחסון תת קרקעי. (11)

עקב השינויים שנערכו ב-1990 בפקודת האוויר הנקי בארה"ב, נקבע שאפר פחם כפוף לתקנות הנוגעות לגשם חומצי ויש צורך לצמצם את פליטות תחמוצות הגפרית והחנקן ממנו. (4) טכנולוגיות המשטפים המקובלים (יבש ורטוב) לצמצום גזי פליטה בשריפת פחם מסלקות תחמוצות גפרית מהאפר המרחף, אך לא תחמוצות חנקן. מסיבה זו מוסיפות תחנות כח יחידות המיועדות לטיפול בתחמוצות חנקן.

על פי הרשות האמריקאית לבטיחות ובריאות תעסוקתית (OSHA) לא חלה על אפר פחם ההגדרה של חומר מסוכן כמשמעותו בחוק.

8. בקרה ומניעה

בקרה הנדסית ותהליכית

תכונות אפר הפחם, גודל חלקיקיו והרכבו הכימי מושפעים מ: (2)

- א. מקור הפחם (דרגת הפיחמון, מקור גיאולוגי, ניקוי מוקדם של הפחם) לרבות אחידות הרכבו ודרגת טחינתו לפני השריפה.
- ב. סוג הכבשן וטכנולוגיית השריפה.
- ג. מתקני הסינון והסילוק של האפר הנפלט מהכבשן, כגון משקע אלקטרוסטטי, משטפים ובתי שקים.

בקרה על שלושה גורמים אלה עשויה לצמצם את פליטות אפר הפחם לסביבה, אך מירב ההשקעה בבקרה ובמניעה מתמקד בגורם השלישי.

משקע אלקטרוסטטי מסוגל לסלק כ- 99.5% ומעלה מהחלקיקים המרחפים הנפלטים בשריפת פחם. יעילותו קטנה יותר כאשר תכולת הגופרית בפחם נמוכה מ- 1% עקב הגדלת ההתנגדות החשמלית של החלקיקים. (13) כדי להגדיל יעילות במקרה זה יוצרים בגוף הפליטה גז גופרית תלת חמצנית (SO_3) באמצעות חימצון גופרית לגופרית דו-חמצנית והעברתה על קטליזטור. גז זה סופח מים והופך לחומצה גופריתית הנספחת על חלקיקי האפר ומגדילה את מוליכותם החשמלית לצורך לכידה במשקע האלקטרוסטטי.

סילוק גופרית דו-חמצנית מהאפר המרחף וגזי הארובה נעשה באמצעות תהליך ה-FGD.

טכנולוגיות המשטפים (scrubber) המקובלים (רטוב ויבש) לצמצום גזי פליטה בשריפת פחם סלקו מהאפר המרחף תחמוצות גופרית, אל לא תחמוצות חנקן. (4) עקב החמרת הדרישות לנקיון האוויר מתחמוצות אלו חלה האצה בפיתוח אמצעי בקרה נוספים להפחתת הפחם הבלתי שרוף באפר ולהפחתת התחמוצות וביניהם: טכנולוגיה של תהליך יבש המערב הפרדה סטטית טריבואלקטרית וטכנולוגיה של תהליך רטוב המתבסס על ציפת קצף. בפיתוח נמצאות טכנולוגיות חדשות הכוללות חומרים לוכדי מרכיבים מזהמים באוויר. חומרים אלה אינם מושפעים מסוג אפר הפחם.

תחמוצות חנקן נוצרות בזמן שריפת פחם. ניתוב אוויר המכיל תחמוצות אלו לאזור שריפה בעל טמפרטורה יותר נמוכה ותערובת עניה בחמצן הופך את התחמוצות חזרה לחנקן מולקולרי הנפלט כגז.

באופן מקומי ניתן ליישם בעמדות עבודה איוורור, שאיבה ושינוע במערכות סגורות, ניקוי תדיר בהרטבה או שאיבה בואקום. יש לזכור שקיים סיכון לנפיצות אבק בריכוז מעל 10 גרם/מ"ק.

הגנה אישית וניהולית במקום העבודה (12,14)

- מסיכות מגן כאשר קיים פיזור אבק (מסנן מדרגה P2). במקרה של ריכוזים גבוהים עקב תקלה נדרשת מסיכת פנים מלאה בעלת מסנן מדרגה P3.
- משקפי מגן או מגיני פנים להגנת העיניים.
- ביגוד מלא, כפפות כותנה או עור, שימוש במשחות הגנה לעור. במקרה של מגע עם אפר רטוב מומלץ להצטייד בכפפות פלסטיות (ניאופרן, גומי בוטילי או ניטרילי) ומגפיים בגלל חומציותו של האפר.
- לאחר מגע עם החומר יש לשטוף ידיים או גוף במים וסבון.
- הדרכת עובדים על פוטנציאל החשיפה והסיכונים ועל דרכי ההתגוננות.
- איחסון אפר פחם בחדר יבש. מיכלים, שקים וסילו יהיו סגורים.
- שינוע בעגלות/כלי רכב/מיכליות מכוסים.

עזרה ראשונה

- עניינים: שטיפה מיידית במים זורמים ל- 15 דקות לפחות תוך שמירה על עפעפיים פתוחים.
- עור: אם נגרם גירוי יש לשטוף את העור במים רבים ובסבון לא שוחק. יש לוודא שטיפת קפלי עור ואזורי קיפול.
- נשימה: יש להזעיק עזרה רפואית אם נגרם גירוי נשימתי חזק.
- בליעה: יש להרפות בגדים הדוקים ולא לגרום להקאה. על הנפגע להמצא במצב מנוחה.

9. מקורות ספרות

1. American Coal Ash Association: Frequently asked questions, 2003, www.acaa-usa.org/FAQ.
2. Borm, PJA: Toxicity and occupational health hazards of coal fly ash (CFA). A review of data and comparison to coal mine dust, *Ann. Occ. Hyg.*, **41**, 659-676, 1997.
3. The Fly Ash Resource Center: Coal combustion products (CCBs), 2002, www.geocities.com.
4. Manz,OE: Coal fly ash: A retrospective and future look. Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, **9**, 1-5, 1988.
5. Babcock & Wilcox Company: Steam, its generation and use. New york, NY, 1978.
6. Canadian Centre for Occupational Health and Safety: Chemical hazard summary: Coal-fired fly ash, No. 40, 1987.
7. Coal fly ash. User Guidelines, Anonimus, 1996.
8. Meij, R; Nagengast, S; Winkel, H.: The occurrence of Quartz in coal fly ash particles. The 7th International Symposium on Particle Toxicology, The Netherlands, 1999.
9. Presswood, WG; Huyser, J; Whitaker, CG: Monitoring airborne fly ash by the membrane filter counting procedure. *Ame. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **41**, 33-39, 1980.
10. United States Geological Service (USGS): Radioactive elements in coal and fly ash: Abundance, forms and environmental significance. USGS Fact Sheet ES-163-97, 1997.
11. Nathan, Y: Pollution potential of beneficial uses of bottom coal ash. Geological Survey of Israel, 2003.

12. KEMA status report on the health issues associated with pulverized fuel ash and fly dust, The Netherlands.
13. Best Practice Brochure: Longannet Power Station, No. 001, 2000.
14. Jackson, AW: Fossil fuel power generation. Encyclopedia of Occupational Health and Safety, 4th ed., ILO, Vol. 3, 76.1-76.17, 1998.