ניתוח השוואתי של חשיפה לסיליקה גבישית בבתי מלאכה לעיבוד שיש כבסיס להתאמת אמצעי בקרה למניעת החשיפה.

ד"ר אשר פרדו*
מר סלבה אומנסקי*
ד"ר רז דקל**

* המוסד לבטיחות ולגיהות
** המחלקה לרפואה תעסוקתית - קופ"ח מאוחדת

המחקר בוצע במימון הפעולה המונעת והמחקר בבריאות ובבטיחות בעבודה, במנהל הבטיחות והבריאות התעסוקתית במשרד הכלכלה

חודש תשרי התשע"ה
אוקטובר 2014

רעיון המחקר, ביצועו, ממצאיו ומסקנותיו הם פרי העבודה של חוקרי המוסד לבטיחות ולגיהות.
המחקר מציג ממצאים חדשים וניתוחם ביחס לפיזור של אבק מכיל סיליקה וחשיפה תעסוקתית בתהליכי עיבוד אבן שיש טבעית ומלאכותית בישראל.

תודת החוקרים נתונה :

למוסד לבטיחות ולגיהות על התמיכה והאכסניה לביצוע המחקר.

לפעולה המונעת על מימון המחקר והתמיכה בו.

למנהל הבטיחות והבריאות התעסוקתית על הסיוע והתמיכה.

תוכן עניינים

עמ'

תקציר 7

מבוא ורקע מדעי 9

מטרת המחקר 14

שיטות עבודה ומחקר 15

אוכלוסיית המחקר 15

שיטות המחקר 15

עיבוד נתונים 16

תוצאות המחקר 17

איפיון תהליכים וגורמים המשפיעים על פיזור חלקיקים

ועל חשיפה לסיליקה בבתי מלאכה לעיבוד שיש 17

נתוני מקומות עבודה ובדיקות..... 27

תכולת סיליקה גבישית באבק 28

השפעת סוג האבן על פיזור אבק באוויר ועל רמות חשיפה 29

השפעת סוג האבן ותנאי התהליך על החשיפה לסיליקה

ועל פיזור אבק באוויר 34

חשיפה ממוצעת ומשוקללת של עובדים בתהליכי עיבוד

שיש על פני יום עבודה 36

תרומת סוג התהליך לפיזור אבק מכיל סיליקה 40

התפלגות גודל של חלקיקים ואיפיון צורה 52

דיון 63

פרק ישומי 70

ביבליוגרפיה 78

רשימת טבלאות

עמ'

טבלה מס 1: השפעת אמצעי בקרה על רמות סיליקה באוויר 12

טבלה מס' 2: מאפייני תהליכים בעיבוד שיש סינתטי וטבעי, המשפיעים על חשיפה תעסוקתית לסיליקה גבישית 26

טבלה מס 3: מיון הבדיקות הסביבתיות בבתי מלאכה לעיבוד שיש 27

טבלה מס' 4: תכולת הסיליקה באבק מעיבוד אבן שיש 28

טבלה מס' 5: רמות סיליקה באוויר על פני משך תהליך בתהליכי עיבוד של אבן שיש מלאכותית 31

טבלה מס' 6: רמות סיליקה באוויר בתהליכי עיבוד של אבן שיש טבעית עם וללא תהליך התזת חול 33

טבלה מס' 7: התפלגות ריכוזי סיליקה ממוצעים על פני תהליך על פי תנאי תהליך, סוג האבן ומקטע האבק הנדגם 35

טבלה מס' 8: ריכוזים ממוצעים ומשוקללים של סיליקה על פני יום עבודה כתלות בסוג אבן השיש המעובדת (ממיין ראשי) ותנאי התהליך 38

טבלה מס' 9: ריכוזים ממוצעים ומשוקללים של סיליקה כתלות בתנאי התהליך (ממיין ראשי) וסוג אבן השיש המעובדת 38

טבלה מס' 10: סוגי תהליכים שנבדקו ומשכם ומאפייני עיבוד 41

טבלה מס' 11: ריכוזים ממוצעים של סיליקה גבישית חופשית באוויר בעיבוד רטוב ויבש של אבן שיש 43

טבלה מס' 12: ריכוזים ממוצעים של סיליקה גבישית חופשית בשני מקטעי אבק על פי תהליך העיבוד 44

טבלה מס' 13: ריכוזי סיליקה גבישית במקטע בר-נשימה (דגימות שטח) בתהליכי עיבוד פרטניים 46

טבלה מס' 14: ריכוזי סיליקה גבישית במקטע בר-נשימה (דגימות אישיות) בתהליכי עיבוד פרטניים 48

טבלה מס' 15 : קצב יחסי של קליטת מסת אבק מרחף על מסנן הדגימה 51

טבלה מס' 16: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליכי עיבוד של שיש 54

טבלה מס' 17: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליכי עיבוד של שיש 54

רשימת איורים

עמ'

איור מס' 1: יחס בין מסת סיליקה גבישית במקטע בר נשימה לבין מסתה במקטע כלל האבק במדגם מעיבוד יבש של אבן שיש מלאכותית 29

איור מס' 2: מתאם בין כמות הסיליקה במקטע אבק בר-נשימה לבין כמותה בכלל האבק במדגם מזווג מאבן שיש מלאכותית 30

איור מס' 3: מתאם בין כמות הסיליקה במקטע אבק בר-נשימה לבין כמותה בכלל האבק במדגם מזווג מאבן שיש טבעית 31

איור מס' 4: מקטע רמות גבוהות מרמות מרביות מותרות לחשיפה בדגימות אישיות משוקללות על פני משך עבודה בתהליכים 32

איור מס' 5: חשיפה ממוצעת משוקללת יומית לסיליקה גבישית (דגימות אישיות) במקטעי אבק שונים על פי סוג אבן השיש 37

איור מס' 6: אחוזי חריגה של ממוצעי חשיפה משוקללים (על פני יום עבודה) מרמה מרבית מותרת 39

איור מס' 7: אחוזי מקרים של חשיפה אישית משוקללת על פני יום עבודה בהם נשמית חד פעמית (PF=10) לא תגן מחשיפה קבילה עליונה כתלות בסוג אבן השיש ותנאי העיבוד 40

איור מס' 8: ריכוזים ממוצעים של סיליקה גבישית חופשית באוויר בתהליכי עיבוד אבן שיש כתלות בסוג האבן המעובדת. 42

איור מס' 9: ריכוזי סיליקה גבישית חופשית באוויר במקטע בר-נשימה בתהליכי עיבוד שיש 45

איור מס' 10: יחס בין ריכוזי סיליקה באוויר בתהליכים יבשים לבין הריכוזים בתהליכים רטובים בשני סוגי אבן השיש במקטע בר נשימה ובמקטע כלל האבק. 50

איור מס' 11 : השוואה בין תהליך יבש לרטוב בקצב קליטה של מסות סיליקה וכלל אבק על מסנן הדגימה במקטע בר-נשימה של אבק מרחף 52

איור מס' 12: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך ליטוש גס – משטחי קוורץ מלאכותיים 53

איור מס' 13: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך כרסום ידני בעזרת כוסית – משטחי קוורץ מלאכותיים 53

איור מס' 14: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך ליטוש גס – משטחי קוורץ מלאכותיים 55

איור מס' 15: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך כרסום ידני בעזרת כוסית - משטחי קוורץ מלאכותיים 55

איור מס' 16: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך ליטוש עדין - משטחי קוורץ מלאכותיים 56

עמ'

איור מס' 17: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך חיתוך אוטומטי - משטחי קוורץ מלאכותיים 56

איור מס' 18: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך חיתוך ידני – משטחי קוורץ מלאכותיים 57

איור מס' 19: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך חיתוך עדין – אבן שיש טבעית 57

איור מס' 20: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך חיתוך אוטומטי – אבן שיש טבעית 58

איור מס' 21: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך ליטוש גס ועדין – אבן שיש טבעית 58

איור מס' 22: ספקטרוגרמה אלמנטרית של תכולת החלקיק בתמונה 9a. 60

איור מס' 23: שכיחויות של יסודות חומרים בדוגמת אבק המתפזר בעיבוד אבן שיש טבעית 60

איור מס' 24: ספקטרוגרמה אלמנטרית של חלקיק בתמונה 9b.

איור מס' 25: שכיחויות של יסודות חומרים בדוגמת אבק המתפזר בעיבוד אבן שיש מלאכותית 61

איור מס' 26: תרומת תהליכים לפיזור סיליקה גבישית ולחשיפה 71

<u>רשימת תמונות</u> **<u>עמ'</u>**

תמונות 1 ו-2 : עובד בתהליך חיתוך רטוב 20

תמונות 3 ו-4: עבודה עם אבן אופן לליטוש גס 21

תמונות 5 ו-6: אביזרים לליטוש עדין 22

תמונות 7 ו-8: סוגי נייר לליטוש עדין 23

תמונה מס' 9: חלקיקים בלתי רגולריים מזוותים שהתפזרו מעיבוד אבן שיש טבעית ואבן מלאכותית. 59

תמונה מס' 10: חלקיק אבק שנפלט במהלך עיבוד אבן שיש מלאכותית. 62

תקציר

סיליקה גבישית חופשית גורמת למחלת ריאות כרונית (סיליקוזיס). נתונים מצביעים על עלייה במספר המקרים החדשים של סיליקוזיס המתגלים בשנים האחרונות בישראל, כאשר הקבוצה הגדולה של המקרים מגיעה מענף עיבוד שיש. נערכו מחקרים וסקרים בנוגע לחשיפה תעסוקתית לסיליקה בעבודה בשיש, אולם חסר ניתוח פרטני של סביבת העבודה ובעיקר הסביבה התהליכית על מנת ליצור בה היראכיה של סיכון הן מבחינת הגורם (החומר הסיליקוטי) והן מבחינת תהליכי עבודה ומוקדי פיזור. שאלות כגון, האם עבודה בכל סוגי השיש יוצרת סיכון דומה, או האם ביצוע כל סוג תהליך בשיש יוצר סיכון דומה הן שאלות שיקשה לענות עליהן ללא ניתוח פרטני יותר במפעל.

המחקר התמקד בבדיקת הפיזור של סיליקה באוויר כתלות בתהליכי העיבוד ובשיטות העבודה במטרה להבין את מאפייני החשיפה, לדרג את היראכיית הסיכון בתהליכי עיבוד שיש וליצור תשתית להתאמת אמצעי בקרה.

אוכלוסיית המחקר הורכבה מבתי מלאכה לשיש בגדלים שונים ונבדקו מערכי עבודה באבן שיש מלאכותית ואבן שיש טבעית ממקור גירני וגרניט. באוכלוסיית המחקר נבדקו פיזור הסיליקה וחשיפת העובדים בצירופים שונים של סוג החומר, תהליך העיבוד, שיטת העיבוד ומקטע האבק (כלל אבק או מקטע בר-נשימה) שבו מופיעה הסיליקה. בכל מקום עבודה נערך סקר בשיטת התצפית ותחקיר/תשאול, מלווה בשאלון לאיסוף נתונים, וניטור סביבתי תעסוקתי לבדיקת רמות האבק באוויר וריכוזי הסיליקה הגבישית-חופשית באבק. אבק נקבע בשיטה גרבימטרית ומסת הסיליקה באבק נקבעה בשיטת הדיפרקציה של קרני X. נבדקה התפלגות גודל החלקיקים וצורת החלקיקים אופיינה בעזרת מיקרוסקופיה אלקטרונית.

התכולה הממוצעת של סיליקה במקטע בר-נשימה של אבן שיש מלאכותית היתה 41.5% וזו באבן שיש טבעית היתה 16%. הממוצעים הגיאומטריים של ריכוזי הסיליקה שנמדדו במקטע בר נשימה בדגימות אישיות על פני משך תהליך בלבד בתהליכי עיבוד של אבן שיש מלאכותית וטבעית היו, בהתאמה, 0.158 מ"ג/מ"ק ו- 0.099 מ"ג מ"ק. ההבדל ביניהם לא היה מובהק למרות שמובהקות נמצאה בהבדל המקביל בדגימות שטח. עליה בריכוז הממוצע בעיבוד אבן שיש טבעית נובעת מתרומת תהליך התזת החול שבלעדיו היה ההבדל בין ממוצעי הריכוז בשני סוגי האבן המעובדת מובהק. החשיפה הממוצעת ומשוקללת של עובדים לסיליקה (מקטע בר-נשימה) בעיבוד יבש ורטוב של אבן שיש מלאכותית היתה, בהתאמה, 0.55 ו- 0.038 מ"ג/מ"ק, כאשר ההבדל בין הערכים מובהק והחשיפה בעיבוד יבש גבוהה מהחשיפה המרבית המותרת. החשיפה המקבילה בעיבוד יבש ורטוב של אבן שיש טבעית היתה 0.07 ו- 0.087 מ"ג/מ"ק, כאשר ההבדל בין הממוצעים אינו מובהק והחשיפה נמוכה מהרמה המרבית המותרת. אחוזי החריגה מרמה מרבית מותרת בכלל התוצאות בעיבוד יבש של אבן שיש מלאכותית הגיעו ל- 60% ובעיבוד רטוב ל- 4.5% בעוד

שבעיבוד יבש של אבן שיש טבעית לא נמצאו חריגות ובעיבוד רטוב הגיעו החריגות ל- 25%, כנראה בגלל הבדל בסוג תהליכי העיבוד המתבצעים באופן יבש לעומת סוג התהליכים בעיבוד רטוב. מבין תהליכי העיבוד היבשים נמצא כרסום ידני בעזרת כוסית כתהליך היוצר את הריכוזים הגבוהים ביותר של סיליקה במקטע בר נשימה בעיבוד אבן שיש מלאכותית ואחריו תהליך החיתוך הידני באבן אופן. באבן שיש טבעית נמצא תהליך החיתוך הידני במסור כתורם לריכוז הסיליקה הגבוה ביותר. בעיבוד רטוב נמדדו הריכוזים הגבוהים ביותר בתהליך הכרסום הידני בעזרת כוסית בעיבוד שני סוגי אבני השיש. הריכוזים הנמוכים ביותר של סיליקה התקבלו בעיבוד רטוב במכונות ממוחשבות (CNC).

גודלי חלקיקים ברי נשימה – עד 10 מיקרומטר - דומיננטיים בהתפלגות הגודל של החלקיקים באבק, אולם עיקר המסה נמצא בחלקיקים הגדולים. בתמונות חלקיקים נמצאו חלקיקים לא רגולריים מזוותים באבק.

ההבדל בתכולת הסיליקה בין אבן שיש מלאכותית לאבן טבעית הוא הגורם העיקרי להסבר ההבדל ברמות החשיפה לסיליקה בתהליכי העיבוד של שני סוגי האבן. שיש מאבן גרניט הוא התורם הדומיננטי לריכוז הסיליקה באוויר בעיבוד אבן שיש טבעית. הרטבת תהליך מקטינה באופן משמעותי ביותר ומובהק את ריכוז הסיליקה באוויר בהשוואה לעיבוד יבש, אך אינה מונעת חשיפות חריגות לסיליקה בקרב חלק מהעובדים הן בעיבוד אבן שיש מלאכותית והן בעיבוד אבן שיש טבעית. שימוש בנשמיות חד פעמיות כאמצעי הגנה אינו מונע חשיפה בלתי קבילה ונמצא כי בעת שימוש באמצעי זה 33% ממעבדי השיש המלאכותי בעיבוד יבש ו- 7% ממעבדי שיש טבעי בעיבוד רטוב חשופים חשיפה חריגה. לאחר איפיון תהליכי העיבוד ובחינת פרופיל העבודה בבתי המלאכה הוסק שמדידת החשיפה המשוקללת של על פני יום עבודה עלולה לעוות את דרגת החשיפה האקטואלית האמיתית עקב מיתאר העבודה ושינויים גדולים מאד בחשיפה בתהליכים נפרדים וקצרים. ולכן הצגת החשיפה המשוקללת של העובד על פני תהליך עיבוד מסויים עדיפה על פני הצגת חשיפה משוקללת על פני יום עבודה בן 8 שעות. כמו כן, עקב סתירה אפשרית בין מסקנות המתקבלות ממדידת ריכוז סיליקה במקטע כלל האבק לבין מסקנות ממקטע בר-נשימה ועקב פגיעת הסיליקה באזור חילוף הגזים בלבד מומלצת הצגת החשיפה האישית לסיליקה רק דרך מדידת ריכוזה במקטע בר נשימה.

תהליך עיבוד שיש במכונות ממוחשבות סגורות (CNC) הוא המבטיח ביותר מבחינת צמצום החשיפה והבאתה לרמות חשיפה קבילות. בהעדר אפשרות לעיבוד בתהליך זה יבטיח שילוב של עיבוד רטוב עם יניקה מקומית צמצום חשיפה לרמות קבילות.

מבוא ורקע מדעי

המחקר עסק באיפיון הפיזור של סיליקה גבישית חופשית בתהליכי עיבוד של אבן שיש מלאכותית וטבעית בבתי מלאכה לעיבוד שיש, והערכת הפוטנציאל לחשיפה תעסוקתית לסיליקה הנגרמת מתהליכי העיבוד. סיליקה גבישית חופשית גורמת למחלת ריאות כרונית (סיליקוזיס). נתוני משרד הכלכלה בישראל מצביעים על עלייה במספר המקרים החדשים של סיליקוזיס המתגלים בשנים האחרונות, כאשר הקבוצה הגדולה של המקרים מגיעה מענף עיבוד שיש. הקשר הנסיבתי המסתמן בין החשיפה לסיליקה גבישית לבין התחלואה בתהליכי העיבוד נראה ברור ברמת סביבת המאקרו, אולם חסר ניתוח פרטני של סביבה זו על מנת ליצור בה היראכיה של סיכון הן מבחינת הגורם (החומר הסיליקוטי) והן מבחינת תהליכי עבודה ומוקדי פיזור. שאלות כגון, האם עבודה בכל סוגי השיש יוצרת סיכון דומה, או האם ביצוע כל סוג תהליך בשיש יוצר סיכון דומה הן שאלות שיקשה לענות עליהן ללא ניתוח פרטני יותר במפעל. חשיבותו של המחקר היא במטרתו לנתח סביבה זו ולהגיע למיקודים שינסו להסביר קשר יותר חזק בין מאפייני החשיפה למאפייני הסיכון. סקרים קודמים שנערכו בענף השיש בנושא וניטורים שוטפים שנערכים מפעם לפעם לא עסקו בניתוח היראכיית הסיכון בתוך מכלול הפעילויות המתבצעות בבית מלאכה או מפעל לעיבוד שיש. העובדה שאמצעי מיגון שונים הקיימים בבתי המלאכה לא הצליחו להקטין את התחלואה מלמדת שיש, כנראה, צורך לחדד את הדיון בהתאמתם, יתרונם ומגבלותיהם של האמצעים השונים ולשם כך יש לצבור מידע על גורמים שונים המייצרים את הסיכון הבריאותי כגון אופי העבודה, סוגי החומרים ושיטות העיבוד ביחס ליכולת האמצעים השונים לבקרם באופן משביע רצון. המחקר מנסה לערוך אינטגרציה של האינטראקציה בין מטריצת הגורמים הבונים סביבה עוינת - גוש הגורמים הקשורים בחומר ותכונותיו כחומר שוקע ומרחף, גוש התנאים והאמצעים המגדילים או מקטינים את פיזור האבק ועוצמת החשיפה, לבין הרצפטור (העובד) הקולט ומושפע ממטריצה זו, ולדרג דרגות סיכון שונות בסביבת העבודה הזו. קרוב לוודאי ששום חשיפה לחלקיקים ספציפיים לא נחקרה כה רבות כמו החשיפה התעסוקתית לסיליקה גבישית חופשית (צורן דו חמצני גבישי חופשי), וכתוצאה מכך קיימת ספרות מדעית ענפה בהיבט החשיפה ותוצאותיה. אולם הספרות הדלה על סוגיית ההתאמה של אמצעי בקרה על פי מאפיינים תהליכיים של החשיפה במפעלים לעיבוד שיש מצביעה על הצורך להרחיב את המידע על כך כדי לשפר את האמצעים.

המחקר התמקד בבדיקת הפיזור של סיליקה באוויר כתלות בתהליכי העיבוד ובשיטות העבודה במטרה להבין את מאפייני החשיפה, לדרג את היראכיית הסיכון בתהליכי עיבוד שיש וליצור תשתית להתאמת אמצעי בקרה.

סיליקה היא מינראל גבישי טבעי הנחצב ממחצבות, משמש תעשיות רבות כחומר גלם, ומקנה להם תכונות קשיות, בידוד, הולכה חשמלית, ברק וכו'. הופעתה באבן שיש טבעית תלויה במקור המסלעי של המחצב ובתכולת הסיליקה הגבישית בו. קרום כדור הארץ מורכב משלושה סוגי סלעים: סלעי מגמה או לבה מותכת, סלעי משקע וסלעים מטאמורפיים. מקורו של סלע אבן גיר ודולומיט הוא בסלעי משקע, ושיש, שמקורו בסלעים אלה, הוא תולדה של סלע מטאמורפי שנוצר מגיבוש חוזר של אבן גיר תחת לחץ וחום ומכיל מעט מאד סיליקה גבישית, או לא מכיל אותה כלל. שיש גרניט בא מסלע גרניט שהוא סלע מגמתי ומכיל אחוזים ניכרים של סיליקה גבישית חופשית. ספיחת מים באבן שיש טבעית נמוכה ביותר ומגיעה עד 1% משקלי כתלות בסוג הגיאולוגי של האבן.

בשימושי התעשייה המודרנית מייצרים לוחות ומוצרים מאבן שיש מלאכותית (משטחי קוורץ מלאכותיים). חומרי הגלם של אבן שיש מלאכותית מכילים סיליקה גבישית באחוזים ניכרים היכולים להגיע עד 93% קוורץ. מקור אחר הוא אבן OPAL. ספיחת המים נמוכה מאד – 0.02% משקלי.

המשקל הסגולי של אבן שיש גירנית משתנה ונע בין 2.55 – 2.7 גרם/סמ"ק. המשקל הסגולי של שיש גרניט הוא 2.65 – 2.75 גרם/סמ"ק ואילו זה של אבן שיש מלאכותית הוא 2.41. הקשיות של שיש גירני היא 3-4 בסולם Mohs (10 הגבוהה ביותר) היא 4 בעוד זו של שיש גרניט ואבן שיש מלאכותית היא 6-7 ו- 7, בהתאמה. כיום שכיחותה של אבן שיש טבעית בבתי מלאכה לעיבוד שיש קטנה יותר, וקיימת הסכמה שסיכוני החשיפה אליה קטנים יותר.

אבן שיש מלאכותית משמשת בעיקר לייצור שיש למטבחים ואבן שיש טבעית משמשת במטבחים, לחיפוי קירות, ריצוף, מדרגות, יצור כלים סניטריים, תעשיית מצבות וציפוי הגנתי.

תיעוד רב קיים לגבי חשיפה כרונית ובמקרים מסוימים גם חשיפה אקוטית לאבק המכיל סיליקה והשפעותיו הבריאותיות (*IARC, 1997; WHO, 2000; Calvert et al., 2003*; *Simcox et al., 1999; Hnidzo et al., 1991; Malmberg et al., 1993; Hnidzo et al., 1990; Rego et al., 2008; Graham et al., 1991*). סיליקוזיס היא מחלה ריאתית פרוגרסיבית הנגרמת מחשיפה לאבק של סיליקה גבישית. נוסף על כך, quartz – α, החלק הגבישי של הסיליקה, מסווג כחומר קרצינוגני לאדם (IARC, group 1). מעשנים נמצאים ברמת סיכון גבוהה יותר; עישון וסיליקה גורמים לאפקט סינרגיסטי הגורם למחלות ריאה חסימתיות. חשיפה לסיליקה גבישית נקשרת למחלות ריאה אחרות כגון, שחפת (*Chen et al., 1997; Althouse et al.,1995*), סרטן ריאות (*Cherry et al., 1998; Costello et al., 1995; Koskela et al., 1994*) COPD -ו (*WHO, 2000; Calvert et al., 2003*). לאחרונה תומכים מחקרים בקשר בין חשיפה לסיליקה לתחלואה כלייתית ולמחלות אוטואימוניות וביניהן סקלרודרמה (טרשת רקמות חיבור), זאבת אדמנתית מערכתית ודלקת מפרקים שגרונית (*WHO, 2000; Calvert et al., 2003*). נכון לשנת 1990 בארה"ב היו חשופים כ- 3 מיליון עובדים לחלקיקי סיליקה (*NIOSH, unpublished data, 1990*). בין

השנים 1982 – 1995 מתו בארה"ב כ- 7422 אנשים מסיליקוזיס, כאשר כ- 6185 מהם מתו בסבירות של למעלה מ- 80% כתוצאה מחשיפה לסיליקה גבישית. (*Calvert et al., 2003*).
חשיפה לסיליקה ממשיכה להיות גורם סיכון משמעותי לעובדים המתעסקים בה. משרד התמ"ת פרסם לאחרונה נתונים על מקרי סיליקוזיס בשנים האחרונות. בין השנים 2006 – 2009 התגלו 25 מקרים חדשים של סיליקוזיס כאשר 19 מתוכם התגלו במפעלים לעיבוד שיש. רק בשנת 2009 דווח על 14 מקרים חדשים, 13 מתוכם בענף השיש, ולעומת שנים קודמות נראית ההארעות החדשה כעליה במספר המקרים. מספר הנפגעים המלא אינו ידוע ויתכנו מצבי חולי סמויים. משרד התמ"ת מעריך שקיימים כ- 470 מפעלים לעיבוד שיש ובהם למעלה מ- 2500 עובדים. חציון ותק העבודה הוא 20 שנים.
רובו הגדול של עבודות מדעיות בתחום מתרכז בענפי תעסוקה גדולים כגון, חציבה ובנין בהם קיימת חשיפה מסיבית לחלקיקי סיליקה (*Flanagan et al., 2006*). לעומת זאת תשומת לב מועטה בעבודות מדעיות ניתנה למקומות עבודה קטנים יותר, כגון בתי מלאכה לעיבוד ועיצוב לוחות שיש ותעשיות לייצור לוחות השיש. חשיפה לסיליקה בעיבוד שיש והרמות הגבוהות של אבק בתהליכים אלו ידועים היטב. בארה"ב שלושה מכל ארבעה חותכי לוחות בטון המשתמשים במסורי דיסקה חשמליים ידניים חשופים חשיפת יתר לסיליקה גבישית (Fairfax et al., 2004). חשיפה גבוהה מהמותר שכיחה בעבודה בעיבוד לוחות שיש גרניט למטבחים (Simcox et al., 1999).
כגודל הבעיה של חשיפה לסיליקה בעבודות בנין ובמפעלים לעיבוד שיש, כל גם העיסוק בנושא הבקרה ובמניעה של החשיפה ויישום אמצעי בקרה הנדסיים ואישיים מתאימים. טעות היא לחשוב שניתן ליישם שיטות הגנה גורפות עבור כל תהליכי הייצור והעיבוד של שיש. ככל שהרמה המרבית המותרת לחשיפה לחומר כימי קטנה יותר, כך נוצרים קשיים גדולים יותר בניצול היראכיית הגנה הנדסית מסויימת לצמצום החשיפה לתחום קביל ביחס לרמה המרבית המותרת. איוורור מקומי, לדוגמה, הוא היראכיית הגנה מומלצת לחומרים שהרמה המרבית המותרת לחשיפה אליהם גבוהה מ- 0.1 מ"ג/מ"ק בעוד שהרמה המרבית של סיליקה נמוכה מערך זה. הכלה מלאה (full containment) היא היראכיית הגנה המתאימה לחומרים שהרמה המרבית המותרת לחשיפה אליהם נמוכה מ- 0.1 מ"ג/מ"ק ויש בה אמצעי הגנה מגוונים, אך לא כל אמצעי עשוי להתאים לתנאי העבודה בתהליכי עבודה מסויימים בשיש. במקרים כאלה יתכן ויש צורך בשילוב היראכיות הגנה או ביישום פתרון יחודי המתאים לגופה של החשיפה ותנאיה ותנאי העבודה.
השיטות העיקריות המוצעות לבקרת סיליקה בענפי תעשיה שונים הן שיטות עבודה רטובות ויניקה מקומית. על אף יעילותן של שיטות אלה, הן לא תמיד מצמצמות את החשיפה לרמות נמוכות מהרמה המרבית המותרת לחשיפה לסיליקה עבור מקטע אבק בר נשימה (0.05 מ"ג/מ"ק, רמת פעולה: 0.025 מ"ג/מ"ק). עבודות אחדות על יעילותם של אמצעי בקרה הנדסיים עסקו בעיקר בעבודות בנין ולא בשיש. הטבלה הבאה מראה רמות ממוצעות של

מקטע בר-נשימה של סיליקה גבישית ללא הפעלת אמצעי בקרה ועם הפעלתם (Flynn & Susi, 2003).

טבלה מס 1: השפעת אמצעי בקרה על רמות סיליקה באוויר

ריכוזי סיליקה במקטע בר-נשימה בעבודות בנין (מ"ג/מ"ק)					
	ללא יניקה מקומית צמודה לכלי העיבוד	יונק בספיקה נמוכה צמוד לכלי העיבוד	יונק בספיקה גבוהה צמוד לכלי העיבוד	שואב אבק צמוד לכלי העיבוד	תהליך רטוב
הסרת טיח בדיסקה זוויתית	3.04	1.02	0.47		
שיוף שטח פני בטון בדיסקה	29.16	2.36	1.70		
שיוף שטח פני בטון בדיסקה	0.66			0.13 – 0.00	0.02

הטבלה מראה שריכוזי הסיליקה גבוהים בהרבה מקרים למרות הפעלת האמצעים. עבודות אלה מדגישות שחסרים נתונים על פרמטרים חיוניים של אמצעי בקרה, כגון קצבי ספיקות של מים ואוויר בעת שימוש באמצעי הבקרה, ועל שיטות העבודה. העבודות מדגישות את הצורך במחקר שיביא בחשבון נתונים מסוג זה כדי לקבוע מה האמצעים הנחוצים ויעילותם הצפויה.
נסיון לבדוק בתנאי מעבדה יעילות של הרטבה במים בעת חיתוך אריחי בטון של גגות בהשוואה למצב של העדר בקרה הראה יכולת צמצום של עד 99% בריכוזי מקטע האבק בר הנשימה של סיליקה כתלות בקצב הזרמת המים על כלי העיבוד, בעוד ששימוש ביניקה מקומית צמצם את ריכוזי האבק עד 91% מהריכוז שנגרם ללא יניקה (Carlo et al., 2010). על אף היות המים, לכאורה, אמצעי אפקטיבי לצמצום החשיפה לסיליקה, השימוש בהם עלול לעתים להיות בעייתי בגלל האפקט הארוזיבי שלהם, דהיית צבע של שטח הפנים בחלק המעובד, סכנת החלקה, צורך בבידוד חשמלי וניקוז. חסרונות אפשריים ביניקה מקומית צמודה לכלי העבודה כוללים צורך בהקפדה על מהירות לכידה מספקת של היניקה, הגדלת משקל הכלי, חיבורי חשמל ותחזוקת מפוח.
מחקר אחר על שיוף קירות גבס (Young-Corbett & Nussbaum, 2009) הראה יעילויות בקרה נמוכות יותר שהגיעו לצמצום 88% מריכוז האבק בר-נשימה כאשר השתמשו במשייף בעל יניקה מקומית, ול- 60% כאשר השתמשו בספוג שיוף רטוב.
אמצעי מגן נשימתיים אישיים חד פעמיים, כגון נשמית, בוודאי שאינם מתאימים להגנה כיוון שמקדם ההגנה שלהם נמוך (Lawrence et al., 2006). מסיכות שלמות מחוברות למפוח

או לקו אוויר עשויות ליצור הגנה מספקת בתהליכים מסויימים, אך אינן נוחות לשימוש לזמן ארוך במשך יום העבודה.

פוטנציאל החשיפה הגבוה לסיליקה בעבודה בשיש יחד עם העובדה שלא קל להתאים אמצעי הגנה סטנדרטי ויש צורך לחקור את החומר, הסביבה ותנאי העבודה כדי להגיע לאמצעי בקרה מתאימים בכל תהליך עבודה בשיש לגופו מודגם היטב בעבודת פיקוח אחת לאורך זמן שנעשתה ע"י מפקחי OSHA וחברת ביטוח במפעל מסויים לעיבוד שיש גרניט ואחר. בעבודה זו מתואר פיקוח ומעקב אחרי המפעל במשך מספר שנים כאשר בכל פעם הותקנו אמצעי בקרה נוספים לבקרת אבק סיליקה לאחר שקודמים לא הספיקו לצמצם את רמת החשיפה מתחת לרמה המרבית המותרת. המחקר מדגים ששילוב אמצעים (יותר מאשר אמצעי אחד) ושינוי שיטות עבודה עשויים להביא לצמצום משביע רצון של החשיפה, אך לא למנעה כליל. כמו כן מדגים המחקר את הצורך בחקירת סוג השיש בשילוב עם שיטת העיבוד הפרטנית ותנאי החשיפה כדי להגיע לפתרון משביע רצון (Fairfax & Oberbeck, 2008).

אספקט נוסף שיש לתת עליו את הדעת מבחינה גיהותית וטוקסיקולוגית כאשר מדובר בהערכת חשיפה לסיליקה גבישית ובעת תכנון הגנה יעילה הוא אחוזי הסיליקה המשתנים בתוך חומר הגלם. אחוזי סיליקה באבן אינם קבועים ומשתנים מחומר לחומר. לדוגמא, אבן גרניט המשמשת בין היתר ליצור לוחות שיש, מכילה 25% – 45% סיליקה גבישית כאשר היא בעלת צבעים בהירים ובין 0% – 15% סיליקה גבישית כאשר היא בעלת צבעים כהים (*Simcox et al., 1999*). סקר שנערך באמצע שנות התשעים של המאה הקודמת ע"י משרד העבודה והרווחה במחצבות ובמפעלים לעיבוד אבן בישראל, לרבות שיש, הראה התפלגות גדולה של אחוז משקלי של סיליקה גבישית ב- 30 מפעלים לעיבוד אבן (לייזר ועמיתים, 1996). רק ב- 21% מהמפעלים לעיבוד אבן לא נמצאה תכולת סיליקה גבישית באבק ואילו ב- 47% מהם היה אחוז הסיליקה באבק גבוה מ- 10%. ב- 7% מהמחצבות היתה תכולת הסיליקה הגבישית באבק גבוהה מ- 10% וב- 34% מהן הגיעה תכולת הסיליקה באבק עד 10%. מחצבות במסלע גיר ודולומיט לא הכילו או כמעט ולא הכילו סיליקה גבישית חופשית. חריגות גבוהות ביותר בריכוזי הסיליקה באוויר ביחס לרמה מרבית מותרת לחשיפה נמדדו בחלק מהמפעלים.

תכולת הסיליקה באבק יכולה להשתנות כתלות בגודל החלקיקים, כאשר התכולה עשויה לעלות עם העליה בגודל. השתנות הגודל של החלקיקים (ואיתו תכולת הסיליקה) תלויה בסוג התהליך ומטלת העבודה ואופי הפעילות ובהיקף האיוורור (Sirianni et al., 2008). השונות שנמצאה מעוררת ספק לגבי ייצוגן של תוצאות חשיפה המושגות ממספר קטן של דגימות אוויר.

תשומת לב מועטה מאד ניתנה לחקירה מדוקדקת של משתני התהליך בתעשיות הבנין והשיש ואספקטים תפעוליים וסביבתיים המשפיעים על חשיפת העובד כמו גם על התאמת

אמצעי בקרה לתהליכים ולפעילויות. חוקרים שמו לב לחשיבות משתנים אלה בהערכת חשיפה והתאמת אמצעי בקרה, אך תיעוד שלהם קיים במידה מסויימת לגבי תעשיית הבנין ולא לגבי תעשיית השיש ועיבודו. מחקרו של Flanagan מדגים היטב את שונות החשיפה לסיליקה כתלות במשתנים כליים, תהליכיים, תפעוליים וסביבתיים בתעשיית הבנין. כלי העבודה והייצור הם רב-גוניים ויוצרים, כתוצאה מכך, חלקיקי אבק סיליקה בגדלים ובכמויות שונים. לשונות זו תרומה שונה לכושר החדירות לדרכי הנשימה ולפעילות הביולוגית של קוורץ (*Nij et al., 2003; Borm et al., 1999*).

אספקטים תפעוליים כגון, סוג הכלי המעבד והכוחות המניעים אותו (פניאומטי, חשמלי, הידראולי וכ"ו), מספר הסיבובים לדקה (סל"ד) של כלי מעבד כגון דיסקת חיתוך לשיוף, זוויות עבודה ספציפיות בהתאם למטלה או התהליך הספציפיים ומרחק העובד משולחן העבודה ומהכלי המעבד לא ממש מקבלים תשומת לב ע"י גיהותנים שמסווגים אותם, ככל הנראה, בתחום ההנדסה. במיוחד כאשר מדובר בחומרים הגורמים למחלות חשוכות מרפא, אספקטים תפעוליים הם נושא למחקר חשוב היכול להשפיע רבות על הבנת משתני החשיפה ועל בחירת אמצעי הבקרה אליהם. לא די בהתאמת אמצעי בקרה על סמך הערכת החשיפה והניטור הסביבתי בלבד. הבנת תופעת פיזור החלקיקים הנוצרת כתוצאה משימוש בכלי העבודה והתנאים הסביבתיים במקום לוקה בחסר בעת תכנון אמצעי בקרה.

התערבות של רשויות אכיפה למניעת סיכונים במקומות עבודה לא בהכרח יוצרת תמיד רמת הצלחה גבוהה בהעדר התמקדות על טיב הסיכון ותכונותיו וטיב האמצעים לבקרת הסיכון העומדים לרשות המפעל. OSHA ניסתה לאתר תעשיות בעלות סיכון בריאותי גבוה כדי ליצור בהן התערבות מונעת. תת-דיווח מצד תעשיות הוא בעיה קשה יותר איתה מתמודדים רשויות החוק והאכיפה. בעיה זו אופיינית יותר למפעלים קטנים (Lofgren, 2008; Lofgren, 1996; Tuskes & Key, 1988). רמת ההצלחה בפרוייקטים אלה היתה שונה מאחד לשני כתלות ברמת המידע, הנתונים וההכוונה הממוקדת על אופי הסיכונים, שעמדו לרשות מפקחי העבודה בבואם למפעל. ככל שרמת המידע שבידי הרשויות היתה גבוהה וספציפית יותר, כך גדלה הצלחת התערבותם במניעה.

מטרת המחקר

ניתוח השוואתי של תרחישי ורמות חשיפה נשימתית לסיליקה גבישית בבתי מלאכה לשיש כתלות בסוג ומאפייני השיש, שיטות עיבוד, איפיון האבק ותנאי החשיפה במקום, וכבסיס לבחירת שיטה מתאימה לבקרת החשיפה.

שיטות עבודה ומחקר

אוכלוסיית המחקר

אוכלוסיית המחקר הורכבה מבתי מלאכה לשיש. עובדי השיש אינם נושא המחקר כיוון שמטרת המחקר היא לבדוק את סביבת העבודה, תהליכים טכנולוגיים ותנאי עבודה וחשיפה במקומות העבודה. המחקר נערך ב- 25 בתי מלאכה ובהם 39 מערכים של עיבוד שיש מאבן מלאכותית ומאבן טבעית בייעודים שונים: שיש למטבחים, שיש לכלים סניטריים, שיש לריצוף, שיש למצבות. סוגי השיש שנבדקו במחקר הם שיש מאבן מלאכותית ושיש מאבן טבעית ממקור גירני וגרניט. בתי המלאכה היו מגדלים שונים. באוכלוסיית המחקר נבדקו פיזור הסיליקה וחשיפת העובדים בצירופים שונים של סוג החומר, תהליך העיבוד, שיטת העיבוד ומקטע האבק (כלל אבק או מקטע בר-נשימה) שבו מופיעה הסיליקה.

שיטות מחקר

המחקר הוא מחקר חתך רוחבי (cross sectional).

1. בכל מקום עבודה נערך סקר בשיטת התצפית ותחקיר/ותשאול, מלווה בשאלון לאיסוף נתונים.

   מרכיבי הסקר כללו את הכרתם ותיעודם של האלמנטים הבאים:

   - סוג החומר בעיבוד ותכונותיו;
   - תהליכי עיבוד ומטלות;
   - אופן עיבוד החומר;
   - כלי העיבוד בכל תהליך ומטלה;
   - שיטת העבודה בתהליך;
   - מוקדי אינטראקציה ומגע בין עובד, חומר וכלי בשיטת העבודה בתהליך ובמטלה;
   - הפעלת כוח ומאמץ פיסי בעבודה;
   - משך עבודה וחשיפה בתהליכים;
   - תדירות חשיפה;
   - אמצעי בקרה הנדסיים, ניהוליים ואישיים לצורך בקרת התהליך והחשיפה;
   - גיהות אישית וכללי התנהגות בעבודה המשפיעים על החשיפה;
   - שיטות ניקוי של עמדת העבודה והעובד.

2. בכל בית מלאכה נערך ניטור סביבתי תעסוקתי לבדיקת רמות האבק באוויר וריכוזי הסיליקה הגבישית-חופשית באבק. הניטור כוון לבדיקת פיזור האבק בתהליך ולהערכת חשיפה אישית של עובדים, לימוד תנאי הפיזור של האבק במרחב העבודה, והסקת יעילות אמצעי הבקרה בשיטות העיבוד ובסביבת העבודה.

3. אבק נדגם בשיטה בלתי רציפה על מסנן PVC (קוטר 25 מ"מ או 37 מ"מ גודל נקבים 5μ) וריכוזו באוויר נקבע בשיטה גרבימטרית. נדגמו מקטע כלל החלקיקים ומקטע בר-נשימה. לדגימת מקטע בר-נשימה שימש ציקלון אלומיניום המפריד את החלקיקים הקטנים כאשר חציון המקטע הוא 4 מיקרומטר. לבדיקת ריכוז הסיליקה באוויר במקטע זה. תכולת הסיליקה בשני המקטעים נבדקה בשיטת הדיפרקציה של קרני X (XRD) במעבדה מתמחה.

4. צורת החלקיקים אופיינה במיקרוסקופיה אלקטרונית סורקת (SEM). איפיון כימי אלמנטרי התבצע בטכניקת EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometry). לצורך המיקרוסקופיה נאסף האבק על מסננים שצופו בזהב מוליך.

5. התפלגות גודל של חלקיקי האבק בתחום 0.1 – 100 מיקרומטר ואיפיון הצורה הדינמית של החלקיק בוצעה באמצעות מכשיר Cis-100 Analyser (Ankersmid, Yokneam, Israel) המצוייד בערוץ וידאו. עקרון הבדיקה מבוסס על תיאוריית זמן המעוף של חלקיק כאשר משך האינטראקציה בין החלקיק לקרן לייזר (הליום-ניאון) מיוחס ישירות לקוטר החלקיק ומספק קריאה ישירה של גודלו.

<u>עיבוד נתונים</u>

נתוני הסקר והניטור הוצלבו ונותחו בחתכים על פי קטיגוריות מובילות כגון סוג השיש, קטיגוריית שיטת העיבוד וכלי העיבוד, קטיגוריית מקטע האבק. ההצלבות בין הפרמטרים השונים והניתוח ההשוואתי שלהם ושל רמות החשיפה הובילו לבניית סיווג מוקדי חשיפה ועוצמתם, וטיב החשיפה בהקשר עם הפרמטרים התפעוליים והסביבתיים ומאפייני החלקיקים והפיזור. המטריצה סיפקה תמונת רשת רחבה של מאפייני החשיפה מול מאפייני החומר ומול רמות החשיפה במטרה לאפשר הבנה טובה יותר של רמת הסיכון בתהליכי העיבוד השונים והכוונה טובה של אמצעי בקרה מתאימים עבור שיטות העיבוד וסוגי הפעילויות.

עיבוד הנתונים נערך בתוכנת אקסל. על הנתונים הופעהל סטטיסטיקה תיאורית. משתנים אינטרואליים או מנתיים תוארו באמצעות מדדי פיזור ומקום (ממוצע, סטיית תקן, תחום וכו'). סוג ההתפלגות של תוצאות המדידות הסביבתיות וטיב התאמתן להתפלגות נבדקו באמצעות מבחן Wilk-Shapiro.

הבדלים בין ממוצעים של פרמטרים רציפים, לרבות רמות החשיפה, נבדקו באמצעות מבחן t. הבדלים הוגדרו כמובהקים ברמה של $p \leq 0.05$. קשרים בין המשתנים נבדקו תוך הפעלת קורלציית ספירמן ורגרסיה לינארית.

תוצאות המחקר

1. איפיון תהליכים וגורמים המשפיעים על פיזור חלקיקים ועל חשיפה לסיליקה בבתי מלאכה לעיבוד שיש

מהסקר הגיהותי שנערך במדגם בתי מלאכה ניתן היה לקבץ ארבע קבוצות גורמים המשפיעים על פיזור חלקיקים ועל החשיפה התעסוקתית לאבק סיליקה גבישית חופשית:

1. חומר הגלם ותכונותיו הפיסיקו-כימיות.
2. גורמים טכנולוגיים הקשורים בתהליכי ושיטות העיבוד של השיש.
3. גורמים אישיים הקשורים בעובדים ושיטות עבודתם.
4. גורמים סביבתיים (סביבת העבודה והסביבה הטבעית).

חומרי גלם

אבן שיש טבעית הוא אבן גירנית (limestone) או אבן גרניט. שיש גירני נוצר מהאבן שעברה התמרה במשך שנים רבות כתוצאה מחום או מלחץ שנוצר במעמקי כדור הארץ. התהליך נקרא "גיבוש חוזר (recrystalization). הקרבונטים המקוריים בסלעי משקע יחד עם חומרים מינראליים ממאובנים עוברים גיבוש חוזר ליצירת גרעינים גדולים של קלציט (calcite). אי נקיונות שנוכחים במינרלים הקרבונטים משפיעים על הרכב השיש הנוצר. בטמפרטורות נמוכות יחסית מתגבשים יחד עם הקלציט מיקרו-גבישים של קוורץ שנוצרו מאי נקיונות של סיליקה. בטמפרטורה גבוהה יותר מגיבה הסיליקה עם הקרבונטים ליצירת פורסטריט (forsterite) ודיופסיד (Diopside). על פי הגדרת התקן האמריקני, שיש הינו סלע גבישי שנוצר מאחד משלושת המינרלים קלציט, דולומיט וסרפנטין, אבל לעתים מיוחס השיש גם לסלעים העשויים ממינרלים אחרים. גרניט הוא כאמור סלע שמקורו במגמה של כדור הארץ.

אבן שיש טבעית , ממקור גירני, דולומיטי או סלעי יסוד (גרניט) עשויה להכיל סיליקה גבישית חופשית באחוזים משתנים הנעים בין 3% ל- 30% בממוצע, כאשר הגרניט מכיל את האחוזים הגבוהים (עד 35%) והשיש הגירני כגון שיש חברון הוא בעל האחוזים הנמוכים של סיליקה. אבן שיש טבעית נפוצה כיום פחות בתעשיה ובבתים, אך עדיין נפוצה בתעשיית מצבות ובמגזרי בניה שונים למטרות ריצוף וחיפוי קירות.

אבן שיש מלאכותית, בניגוד לאבן שיש טבעית, מיוצרת בתנאים מסחריים (סינתטיים) ומרכיביה מכילים חומרים נוספים מלבד מינראלים טבעיים. התוספים הללו, תורמים לתכונותיו של השיש המלאכותי בכך שהם מקנים לו תכונות חוזק שונות בהתאם ליעוד השיש, עיצובים שונים, עמידות בפני שריטות וכו'. מבין סוגי השיש המלאכותי, השימושי הנפוץ ביותר בישראל הוא אבן קיסר וסיליסטון. אבן שיש מלאכותית עשויה להכיל אחוז גבוה של סיליקה גבישית, המגיע לעתים מעל 80% ועד 93%. אבן אופל גם היא סוג אבן

מלאכותית הנמצאת בשימוש. ישנו שיש מלאכותי מסוג קוריאן שאינו בנוי על בסיס סיליקה חופשית או שאחוזי חומר זה כחומר מילוי הם נמוכים.

לרוב, בתעשיות השיש דרישת הלקוח היא לאבן שיש מלאכותית. אבן השיש הטבעית נחשבת יקרה יותר ולא פרקטית בשל מגבלותיה הטבעיות, כגון חוסר גמישות והתפוררות יתרה בעת חיתוך. מסיבות אלה בבתי מלאכה קיימות אבן השיש המלאכותית והטבעית זו לצד זו וכאמור הביקוש לכל סוג משתנה ממקום למקום כאשר הנטייה המועדפת היא לאבן שיש מלאכותית.

הסקר הגיהותי הראה שבבתי המלאכה תהליכי עיבוד של אבן שיש מלאכותית וטבעית דומים ועל העובד לעבור דרך כל תהליכי העבודה ללא תלות בסוג השיש. בתי מלאכה לשיש מחדשים בדרך כלל מלאי שיש לפי הזמנות ולא צוברים מלאים לטווח ארוך. בית המלאכה משאיר בידיו מלאי שיש מסוים רק אם החזרתו אינה כדאית מבחינה כלכלית. בתי מלאכה לעיבוד שיש (כולל בניית מצבות) מתאפיינים בדרך כלל במספר עובדים שנע בין 2 – 6, אך קיימים מפעלים גדולים יותר. המפעלים הגדולים יותר נחשבים למפעלי ייצור וכוללים גם מחלקות של שיווק והפצה שבהם העובדים לא באים במגע עם עיבוד שיש. העבודה בבתי מלאכה קטנים מאופיינת בשני עיסוקים, 1 – עיבוד שיש, 2- הרכבות אצל לקוח. על פי הסקר בבתי המלאכה מסתבר שלהרכבות אצל הלקוח מוקדשים בממוצע 2-1 ימים בשבוע, אולם עיסוק זה נתון לשינויים על פי מידת הביקושים. גם בעת ההרכבה יש חשיפה לאבק שיש עקב צורך בהתאמת מידות סופיות במקום ההתקנה. פעולות אלה הצטמצמו לאחרונה עקב אמצעי התאמה מראש טובים יותר.

בבתי המלאכה לעיבוד שיש אין לבעלים מידע על האחוז המשתנה של הסיליקה בשיש הגלם אותו הם רוכשים. השיש הטבעי נרכש ממקורות שונים והרכבו שונה כתלות במקור הגיאוכימי במקום בו נחצב. המשלוח אינו מצוייד בתעודה או גליון בטיחות שבו מצויין אחוז הסיליקה הגבישית חופשית בשיש. מידע על אחוז הסיליקה בחומר הגלם ההמלאכותי קיים אצל היצרנים, אך אינו מועבר למעבדים בבתי המלאכה הקטנים.

אחוז הסיליקה באבק שבאוויר עשוי להיות שונה מזה בחומר הגלם עקב גירעון סיליקטי משתנה באבן, שינוי בהומוגניות החלוקה של גרעיני הסיליקה במשטח השיש והבדלים בצפיפות המרכיבים הכימיים. אולם, כעקרון, כיוון שתהליכי העבודה דומים בסוגי השיש השונים, ניתן להכליל שככל שאחוז הסיליקה בחומר הגלם גבוה יותר כך גבוהה יותר ההסתברות להימצאות ריכוז גבוה יותר של סיליקה גבישית באוויר וכפועל יוצא גם פוטנציאל החשיפה התעסוקתית.

<u>תהליכי עיבוד (טכנולוגיה) ושיטות עבודה</u>

התהליכים הנפוצים ביותר הם: חיתוך, ליטוש ושיוף, גימור והדבקה. בעבר, רוב תהליכי העבודה היו מתבצעים בחומר "יבש", כלומר, תהליכי חיתוך, ליטוש וגימור השיש היו נעשים ללא מעורבות של מים. שיטת עבודה זו, יוצרת אבק רב וחשיפה חמורה של העובדים לאבק

הסיליקה שנמצא באבן השיש הטבעית והמלאכותית. בשנים האחרונות ,עקב מודעות עולה של העובדים לסיכון למחלת הסיליקוזיס, יושמו בתהליכים השונים שימושים במים, "עבודה רטובה". שיטה זו מפחיתה את פיזור האבק, בכך שהיא מגדילה את משקל חלקיקי האבק וכתוצאה מכך מקטינה את טווח תנועתם, גורמת להגבלת זמן הריחוף באוויר ולשקיעה מהירה שלהם, ומפחיתה את פיזור הסיליקה באוויר ואת חשיפת העובדים אליה.

להלן פירוט התהליכים שמשמשים את תעשיית עיבוד השיש.

1. חיתוך רטוב

חיתוך השיש יכול להתבצע בשיטה חצי אוטומטית או ידנית, כתלות בצורת הגימור הסופי המתבקשת. לרוב, כל חיתוכי השיש מתבצעים בשיטה חצי אוטומטית, על ידי מכונות חיתוך גדולות, אשר חותכות את השיש בצורה אופקית, אנכית או זוויתית. החלק שחותך את השיש נקרא סכין או דיסק. בדרך כלל, בכל מפעל לעיבוד שיש ניתן יהיה למצוא בין 4 – 5 סוגי סכינים: סכין לחיתוך גרניט, סכין לחיתוך שיש חברון, סכין לחיתוך אבן שיש מלאכותית וסכין לחיתוך קרמיקות ופורצלן. הסכין החמישית בדרך כלל היא סכין המשמשת את העובד כדי לעשות עיצובים שונים על השיש, כגון גומות או קשתות החרוטות על השיש. החיתוך במכונה אוטומטית מיושם ביחד עם הרטבה. בסמוך לבית הסכין, נמצא ברז מים, הנפתח בעת הפעלת המכונה. בעת חיתוך השיש, ניתזים רוב חלקיקי האבק הרטובים אל משטח גומי הנמצא מאחורי המכונה, אך קיים גם פיזור של החלקיקים לכיוון העובד והמקומות האחרים. החיתוך הרטוב הוא תהליך ארוך ויכול להתבצע על פני יום עבודה שלם, כתלות באופי המפעל וסוג מוצר שצריך לספק ללקוח. חשיפת העובד בתהליך זה היא לחלקיקי אבק מעורבים - גדולים וקטנים, ובתוכם קיים מקטע בר-נשימה.

2. חיתוך יבש

חיתוך יבש הוא תהליך ידני הנעשה בעזרת כלי עיבוד ממוכנים. קשה לאמוד יחס זמן קבוע בין הזמן המושקע בחיתוך רטוב לבין זה המושקע בחיתוך יבש. בבתי מלאכה קטנים לעיבוד שיש, המבצעים בעיקר הזמנות פרטיות, מתבצע תהליך של חיתוך יבש כהשלמה לחיתוך רטוב. הוא אמנם מצומצם יותר ומסתכם בעיבוד נוסף של הלוחות כדי ליצור פתחים וחורים לכיור בלוח השיש ושימושים נוספים לרבות עבודות תיקון קטנות, אך הוא יכול לתפוס פרופורציית זמן מסויימת ביום העבודה. בבתי מלאכה גדולים יותר העובדים בצורה קבלנית עבור הזמנות של לקוחות גדולים ולא לקוחות פרטיים, יש מאגר גדול יותר של לוחות שיש ומקומות אלה עוסקים במכירת לוחות שיש חתוכים לפי מידות בתהליך חיתוך רטוב, ומעבדים מעט מאד בחיתוך יבש. החיתוך היבש הוא תהליך קצר המתבצע מספר שניות עד דקה אחת. המעורבות הידנית של העובד בתהליך זה גדולה יותר. תהליך החיתוך היבש הוא אמנם קצר, אך פוטנציאל החשיפה בו גבוה מאד מה גם

שהחשיפה בתהליך זה היא לחלקיקי אבק קטנים ויבשים. מעטפת המים הנוצרת סביב חלקיקים בתהליך חיתוך רטוב יוצרת חלקיקים בעלי גודל ומסה גבוהים יותר מהחלקיקים הנוצרים בתהליך החיתוך היבש. עקב כך, טווח הפיזור של החלקיקים היבשים, כתוצאה מהכוח המופעל על השיש ע"י מכונת החיתוך, הוא גבוה יותר (בשל היותם קטנים וקלים מהחלקיקים הנוצרים בתהליך הרטוב) ומשך הריחוף שלהם באוויר ארוך יותר מהחלקיקים הרטובים. משך ריחוף של חלקיקי סיליקה בני נשימה (respirable) החודרים לאזור הריאות וחילוף הגזים עשוי להגיע לשעות כתלות בגודלם. מהירות השקיעה של חלקיקי סיליקה מגובה מטר אחד (נגזר מחוק סטוקס), שקוטרם האווירודינמי הוא 5, 2, 1, 0.5, 0.25 מיקרומטר הוא, בהתאמה, 8, 48, 178, 617, 1947 דקות, כלומר חלקיק בר נשימה עשוי לשהות באזור העבודה של העובד זמן ארוך ביחס לזמן משמרת העבודה. פוטנציאל החשיפה בחיתוך יבש הוא גבוה מאד גם ביחס לתקני חשיפה.

תמונות 1 ו-2 : עובד בתהליך חיתוך רטוב

3. ליטוש

ישנו ליטוש גס וליטוש עדין, הנקרא גם בשם שיוף. באופן עקרוני הליטוש מתבצע לצורך הורדת הקטעים המחוספסים על גבי השיש לאחר שהוא עובר חיתוך. החיתוך משאיר את דפנות לוח השיש גסים ומחוספסים בתחושה ולכן יש להעביר את השיש ליטוש. כלי הליטוש, הם כלים חשמליים העובדים על עקרון של יצירת חיכוך עם פני השטח של

השיש בתנועה סיבובית ועלי ידי כך ליטוש השיש ויצירת פני שטח חלקים ונעימים למגע. כל תהליכי הליטוש באשר הם, יכולים להתבצע בתהליך רטוב או יבש, כאשר בחירת השיטה תלויה בהחלטת הבעלים של המפעל, היות ונדרשת תוספת מחיר להסבה של כלי הליטוש מיבש לרטוב. כתלות בייעוד בית המלאכה, ליטושים עשויים לתפוס פרק זמן ניכר במשך יום העבודה.

3.1 ליטוש גס

ליטוש גס מתבצע על ידי אבן אופן אשר במקרים מסיימים משמשת גם לחיתוך השיש. אבן אופן היא כלי מתכת בעל דיסקה המשמשת את העובד לצורך ביצוע ליטוש גס והורדת שטחי שיש שלא ניתנים לחיתוך. תהליך העבודה עם אבן אופן מתבצע בדרך כלל, ברוב המקומות כתהליך יבש. משך התהליך הוא קצר ונמדד במספר דקות, אך יכול להיות בעל תדירות בינונית עד גבוהה במשך היום ולהגיע למשך מצטבר של שעות בודדות. התהליך יוצר אבק רב, הנראה כענני אבק.
החשיפה של העובד בתהליך זה כוללת חשיפה לחלקיקים ברי נשימה וכאלה שאינם ברי נשימה. ביצוע התפלגות גודל של חלקיקים יכולה לסייע לאמוד את היחסים האיכותיים והכמותיים בין מקטעי הגדלים.

תמונות 3 ו-4: עבודה עם אבן אופן לליטוש גס

3.2 ליטוש עדין

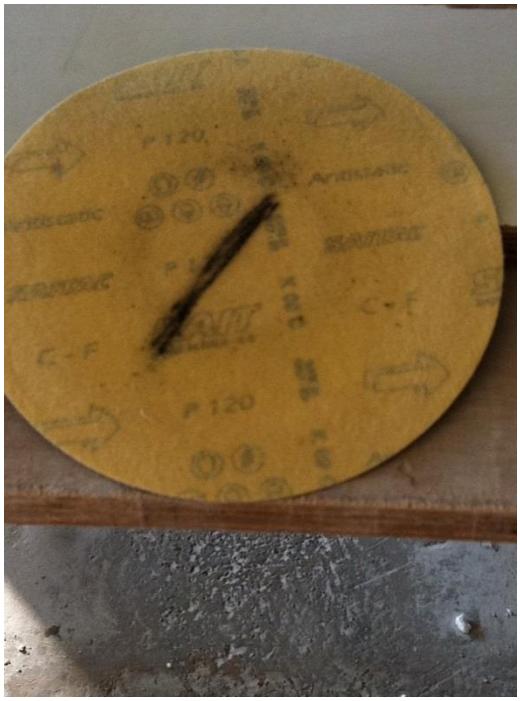
ליטוש עדין מתבצע על ידי אותו כלי עבודה כמו זה של ליטוש גס, אך במקום אבן אופן על הכלי מוברגת תושבת שצידה החיצוני הוא סקוטצ'י, המאפשר הדבקה של נייר שיוף אליה.

קיימים 7 סוגי נייר (מ- 0 עד 6), כאשר ההבדל בין כל אחד למשנהו מתבטא בצפיפות הגרגירים השוחקים לסמ"ר נייר. לדוגמה, נייר שיוף מספר 1 עם סימון 120

P מצביע על כך שהנייר מכיל 120 גרגירים לכל סמ"ר נייר. ככל שמספר החלקיקים גבוה יותר, כך השיוף יהיה עדין יותר, היות ומספר החלקיקים על הנייר גדול יותר והחלקיקים בו קטנים יותר, מה שמאפשר הורדת חספוס באופן עדין יותר מעל פני שטחו של השיש.

ליטוש עדין, הוא תהליך בעל משך חשיפה קצר עד בינוני (15 – 30 דקות), אך יכול להיות בעל תדירות בינונית עד גבוהה במשך היום כך שפרק הזמן המצטבר עשוי להגיע למעלה משעתיים. אם תהליך הליטוש לא מתבצע באופן רטוב, החשיפה המתרחשת היא לחלקיקי סיליקה קטנים יחסית בהשוואה לחיתוך ואפילו לליטוש הגס. נייר השיוף הוא אחד המשתנים המשפיעים על החשיפה כיוון שסוג הנייר משפיע על גודל החלקיקים וכמות החומר החלקיקי המוסר משטח פני השיש והופך לאבק. עם זאת, פיזור האבק בליטוש גס גבוה מזה של ליטוש עדין.

תמונות 5 ו-6: אביזרים לליטוש עדין



סוג נוסף של ליטוש עדין, הוא ליטוש עם נייר תלת שלבי. נייר זה דומה מאוד לנייר השיוף שתואר קודם, ההבדל הוא במבנה הגרגירים. נייר תלת שלבי בנוי מחלקיקי יהלום ונחשב לעמיד יותר לעומת גרגירי הסיליקון קרביד של הנייר הרגיל. שני התהליכים דומים מאוד באופי שלהם מבחינת פיזור וגודל החלקיקים, משך התהליך ותדירות השימוש במשך היום. נייר תלת שלבי משמש את העובדים לתהליכי גימור איכותיים יותר לעומת נייר רגיל. נייר תלת שלבי לעולם לא ישמש לליטוש שפת הקצה (קאנטים) של השיש כמו

שמשמש הנייר הרגיל, אך תמיד ישמש לשיוף פני השטח של השיש. גם תהליך זה יכול להיות תהליך רטוב, אך ברוב המקרים מתבצע כתהליך יבש.

תמונות 7 ו-8: סוגי נייר לליטוש עדין

4. הדבקה

תהליך זה אינו מאופיין בחשיפה של העובד לאבק סיליקה גבישית. החשיפה בתהליך זה, היא לחומרי הקשייה מקשים מסוימים שמכיל הדבק ולממיסים אורגניים המשמשים כמדללי הדבק. משך החשיפה של העובד בתהליך זה קצר או לעתים מעלה משעה ותדירות התהליך נמוכה במשך היום.

<u>גורמים אישיים הקשורים בעובד</u>

הנתונים האנטרופומטריים של העובד, הכוח והמאמץ הפיסי שהוא משקיע בתהליך העבודה ותנוחת העובד ויציבתו בעת ביצוע ידני של תהליך עיבוד תורמים לפיזור חלקיקי אבק ובכך גם על ריכוז הסיליקה באוויר והחשיפה אליה.

בתהליך החצי אוטומטי של החיתוך הרטוב העובד אינו מפעיל כוח פיסי ומאמץ בעומדו ליד המכונה ולכן הנתונים האנטרופומטריים שלו ובעיקר הגובה אינם מהווים גורם משמעותי באינטראקציה שבין מכונת העיבוד לבין החלק המעובד. אולם בחיתוך יבש ובתהליכי הליטוש הידני גורמים אלה יכולים להיות בעלי משמעות. שלושת שלבי המטלה בחיתוך יבש: אופקי, אנכי וזוויתי יוצרים תנוחת כפיפה מעט שונה זו מזו ועיוות שונה של העובד כלפי שטח הפנים המעובד. השוני בעיוות יוצר הפעלת כוח שונה של העובד על כלי העיבוד וזה פועל באגרסיביות שונה על המשטח הנחתך. השוני בכוח המופעל עלול להשפיע על עוצמה ומרחק הפיזור של החלקיקים באוויר. שינויים אלה הם קטנים ותרומתם לפיזור אינה ידועה. אחת

הדרכים לבדוק את השוני בהשפעת התנוחה היא לבדוק את ריכוזי הסיליקה באוויר כתלות בזווית החיתוך. גובה העובד ואורך זרועותיו עשויים להשפיע על הנגישות לעיבוד הזוויתי ועל כן בהתאם גם על המאמץ והפעלת הכוח על כלי העיבוד.
הגורמים הנ"ל עשויים להיות שונים בתרומתם גם בתהליכי הליטוש מתוך השוני בין הכוח המופעל בליטוש גס לבין זה המופעל בליטוש עדין, וזאת בנוסף לנאמר לעיל על השוני בניירות הליטוש וצפיפותם.

<u>גורמים סביבתיים</u>

בין גורמים אלה, התורמים יותר לעוצמת החשיפה מאשר לפיזור התהליכי עצמו, ניתן למנות את אופי המבנה שבו מתבצע עיבוד השיש, את מיקום העבודה (חוץ – פנים), את פרישת המכונות וקירבתן בשטח העבודה, את מזג האוויר (טמפרטורה, לחות, רוח) ואת אמצעי הבקרה הסביבתיים. אמצעי הבקרה משפיע, כמובן, גם על הפיזור המרחבי של החלקיקים ועל מרחק הפיזור.
הרבה בתי מלאכה לעיבוד שיש ממוקמים בסככות סגורות או פתוחות ולעתים אפשר לראות תהליך המתבצע בחלל חיצוני. ככל ששטח הסככה או שטח העיבוד קטן יותר יש צפיפות גבוהה יותר של מכונות התורמת לפיזור אבק באוויר בייחוד כאשר מספר תהליכים מתבצע בו-זמנית.
הטמפרטורה והלחות אינן משפיעות על חיתוך רטוב, אבל פיזור חלקיקים מתהליכים יבשים עלול להיות מושפע מרמת הלחות באוויר ומהטמפרטורה. חלקיקים מאד קטנים יושפעו מהאנרגיה התרמית באוויר, המוסיפה לאנרגיה הקינטית שלהם בעת מעופם באוויר. ספיגת לחות סביבתית ע"י חלקיקים עשויה להעלות את משקלם של חלקיקים אלה באופן שולי ביותר. השפעת שינויים אלה על מרחק הפיזור והשקיעה של חלקיקים וכפועל יוצא על ריכוז הסיליקה באוויר באזור הנשימה של העובד היא קטנה ביותר.
לאמצעי הבקרה ההנדסיים תרומה מכרעת בהשפעה על פיזור חלקיקי האבק ועל עוצמת החשיפה. הרטבת חלק השיש המעובד מקטינה באופן חד משמעי את הפיזור, אולם אינה מונעת אותו לחלוטין. החלקיק הרטוב הוא בעל נפח ומסה גדולים מאלה של חלקיקי יבש המתפזר מתהליכי עיבוד יבשים, אם מדובר בגודל מקורי זהה של שני החלקיקים (לפני ההרטבה). ההרטבה, איפוא, יוצרת הקטנת סיכון בריאותי עקב שלושה מרכיבים החוברים לאפקט משותף על החשיפה: א. היא גורמת להגדלת נפח החלקיק ומסתו ולכן לשקיעה שלו לאחר מרחק קצר; ב. היא אינה מאפשרת לחלקיקים לרחף זמן ארוך באוויר; ג. הגדלת הקוטר והמסה של חלקיקים רטובים (מתבטאת בקוטר האווירודינמי) גורמת לאחוז ניכר של חלקיקים אלו לשקוע בחלק העליון של דרכי הנשימה ולא בריאות. אעפ"י כן, רסס המים נושא איתו חלקיקים רטובים המועפים ע"י תהליך העיבוד (חיתוך) ומואצים גם כלפי אזור הנשימה של העובד. בעוד שהסיכון הבריאותי של חלקיקי סיליקה שאינם שוקעים בריאות הוא נמוך בהשוואה לאלו השוקעים בריאות, ההבדל בסיכון אינו בא לידי ביטוי בעת שמודדים ריכוז

מסתי של חלקיקים רטובים באוויר, המושג באמצעות ניטור, אם הניטור אינו מתמקד בדגימה של מקטע בר-נשימה בלבד. זאת, כיוון שהריכוז המסתי תלוי יותר במסה של החלקיק מאשר בגודלו ובניטור כלל החלקיקים אין הריכוז משקף את המקטע שחודר לריאות ולכן גם לא את גודל הסיכון הבריאותי. דוגמה זו יכולה להמחיש עד כמה חשוב לבצע ניטור סלקטיבי (מקטע בר-נשימה), בהתאם למיקום הנזק בדרכי הנשימה, לפי מקטעי גודל של חלקיקי סיליקה, לעומת ניטור בו נדגם כלל המסה של החלקיקים, הכולל גם את אלו שאינם מגיעים לריאות.
איוורור מקומי בתהליכי עיבוד בשיש קיים בתהליכים יבשים, אך יעילותו תלויה מאד במשתנים כגון סוג היונק, מיקום היונק כלפי נקודת הפליטה של האבק, עוצמת הספיקה של היונק, הפרעות סביבתיות מקומיות. בחלק מבתי המלאכה נצפו יונקים שיעילותם פחותה עקב ליקוי ביישום נכון של המשתנים האלה. הפחתת היעילות משפיעה על הפיזור ופוטנציאל החשיפה.
פיזור החלקיקים של אבק שיש ופוטנציאל החשיפה לסיליקה גבישית חופשית יושפעו ישירות מארבע קבוצות הגורמים (ראה לעיל) הפועלות בעיבוד שיש באופן סימולטני.

טבלה מס' 2: מאפייני תהליכים בעיבוד שיש סינתטי וטבעי, המשפיעים על חשיפה תעסוקתית לסיליקה גבישית

תהליך	מטלה/שלב	שיטה/כלי עיבוד	סוג משטח מעבד	תדירות תהליך בשבוע	משך תהליך	מאמץ פיסי מושקע בתהליך	בקרה הנדסית	בקרה אישית	פוטנציאל חשיפה לסיליקה
חיתוך חצי אוטומטי רטוב	אופקי	דיסק חיתוך	שיני סכין	כל יום	15 דקות עד 4 שעות	קל	הרטבה	אין	נמוך
	אנכי	דיסק חיתוך	שיני סכין	כל יום	15 דקות עד 4 שעות	קל	הרטבה	אין	נמוך
	זוויתי	כוסיות חיתוך	שיני סכין	כל יום	15 דקות עד 30 דקות	קל	הרטבה	אין	נמוך
חיתוך ידני יבש	אופקי	דיסק חיתוך	שיני סכין	3 – 4 פעמים בשבוע	עד 15 דקות	בינוני - גבוה	אין	נשמית P3	גבוה
	אנכי	דיסק חיתוך	שיני סכין	3 – 4 פעמים בשבוע	עד 15 דקות	בינוני - גבוה	אין	נשמית P3	גבוה
	זוויתי	כוסיות חיתוך	שיני סכין	1 – 2 פעמים בשבוע	עד 15 דקות	בינוני - גבוה	אין	נשמית P3	בינוני - גבוה
ליטוש	ליטוש גס	אבן אופן	פני שטח האבן	כל יום	עד 15 דקות מספר פעמים ביום	בינוני - גבוה	הרטבה	נשמית P3	בינוני
ליטוש	ליטוש עדין	נייר ליטוש	חלקיקי סיליקון קרביד	כל יום	עד 15 דקות מספר פעמים ביום.	בינוני - גבוה	אין	נשמית P3	גבוה
ליטוש	ליטוש עדין	נייר יהלום	חלקיקי יהלום	כל יום	עד 15 דקות מספר פעמים ביום	בינוני - גבוה	הרטבה	נשמית P3	בינוני
הדבקה	-	דבק	-	כל יום	עד שעה	קל	אין	אין	אין

הטבלה מציגה מאפיינים זהים לגבי אבן שיש מלאכותית ואבן שיש טבעית. דרגות החשיפה הפוטנציאלית הן יחסיות בין התהליכים באותו סוג שיש ולא יחסיות כלפי תקני חשיפה. פוטנציאל החשיפה ביחס לרמות חשיפה מירביות נחקר בשלב ההערכה הכמותית באמצעות מדידות. המאמץ הפיסי מוערך על פי הקבלה להשקעה מטבולית (ואט/שעה) הנהוגה לגבי מעמסים אקלימיים (ACGIH).

2. <u>נתוני מקומות עבודה ובדיקות</u>

בבתי מלאכה לעיבוד שיש נבדקו 39 מערכים של עיבוד שיש מתוכם 17 מערכים של עיבוד אבן שיש מלאכותי (משטחי קוורץ מלאכותיים) 13 מערכי עיבוד אבן שיש טבעית ו- 9 מערכים מעורבים שעסקו בשני סוגי האבן לסירוגין.
בטבלה מס' 3 מוצג סיווג תוצאות הסיליקה הגבישית חופשית על פי מספר ממיינים ובהם סוג האבן המעובדת, אופן העיבוד, אסטרטגיית הניטור הסביבתי-תעסוקתי ומקטע האבק הנדגם.

טבלה מס 3: מיון הבדיקות הסביבתיות בבתי מלאכה לעיבוד שיש

קריטריון מיון ראשי	קריטריון מיון משני	מס' בדיקות	סה"כ
סוג האבן המעובדת	אבן שיש מלאכותית (משטחי קוורץ מלאכותיים)	209	313
	אבן שיש טבעית	104	
אופן העיבוד בתהליך	יבש	120	313
	רטוב	193	
אסטרטגיית הניטור	חשיפת עובד משוקללת (דגימה אישית)	132	313
	איפיון פיזור אבק בתהליך העיבוד (דגימת שטח)	181	
מקטע האבק הנדגם	בר-נשימה	161	313
	כלל אבק	152	

מטרת הדגימות האישיות היתה לעמוד על עוצמת החשיפה של עובדים בעיבוד שיש לסיליקה גבישית חופשית. מטרת דגימות השטח היתה לעמוד על עוצמת הפיזור של האבק המכיל סיליקה כתלות בתהליכי עיבוד שונים וזאת, בין השאר, על מנת להעריך את עוצמת הבקרה הנחוצה בתהליכים השונים , במטרה להביא לצמצום החשיפה של העובדים לתחומי חשיפה קבילים.

3. <u>תכולת סיליקה גבישית באבק</u>

התכולה האחוזית של הסיליקה באבק מעיבוד אבן שיש מלאכותית גבוהה בהרבה ובאופן מובהק ($p<0.0001$) מהתכולה המקבילה באבן שיש טבעית. האחוז המשקלי הממוצע של סיליקה גבישית חופשית בכלל דגימות האבק מתהליכי עיבוד של אבן שיש מלאכותית היה 54.4% ($\pm$29.6%). האחוז המשקלי הממוצע המקביל בתהליכי עיבוד של אבן שיש טבעית היה 14.8% ($\pm$13.6%). התכולה הממוצעת של סיליקה במקטע אבק בר-נשימה מאבן שיש מלאכותית היתה גבוהה מעט מ- 40% בעוד שבכלל האבק הגיעה התכולה לכ- 74%. בהקבלה, האחוז הממוצע של סיליקה גבישית באבק מאבן שיש טבעית הגיע לכ- 16% במקטע בר-נשימה ובכלל האבק. התכולה הגבוהה ביותר של סיליקה גבישית חופשית שנמצאה באבק מעיבוד אבן שיש טבעית הגיעה ל- 42.3% במקטע בר-נשימה ול- 43.4% בכלל האבק, כנראה עקב עיבוד אבן מסוג גרניט. בד"כ היתה תכולת הסיליקה באבק מאבן שיש טבעית נמוכה יותר במידה ניכרת. התכולה המקבילה הגבוהה ביותר שנמצאה בעיבוד משטחי קוורץ מלאכותיים הגיעה ל- 95.9% במקטע אבק בר-נשימה ול- 99.5% בכלל האבק. טבלה מס' 4 מציגה את ההבדלים בתכולת הסיליקה באבק בין אבן שיש מלאכותית לאבן טבעית.

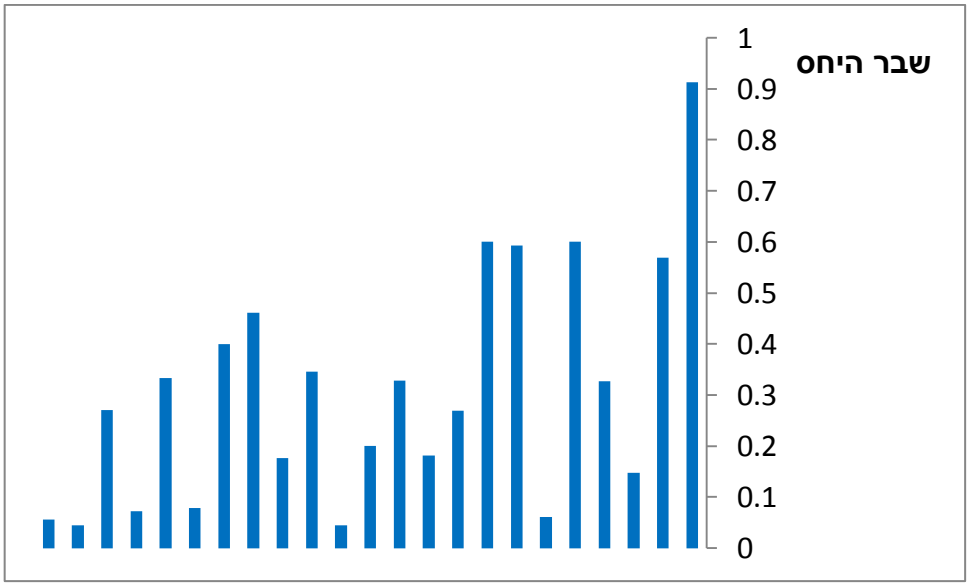
טבלה מס' 4: תכולת הסיליקה באבק מעיבוד אבן שיש.

מקטע אבק	אופן דגימה	תכולת סיליקה באבק (% משקלי)				
		אבן שיש מלאכותית		אבן שיש טבעית		
		N	תכולה ממוצעת	N	תכולה ממוצעת	p
בר-נשימה	אישי	50	41.4 (23.6)	24	15.9 (15.3)	<0.0001
	שטח	56	41.8 (26.7)	31	15.7 (11.8)	<0.0001
כלל אבק	אישי	40	73.6 (23.3)	18	9.7 (9.1)	<0.0001
	שטח	63	63.7 (30.2)	31	16.1 (15.7)	<0.0001

( ) – סטיית תקן

לא נמצא יחס קבוע בין תכולת הסיליקה הגבישית במקטע בר-נשימה לבין תכולתה במקטע כלל האבק. היחס בין כמות הסיליקה במקטע בר-נשימה לבין כמות הסיליקה בכלל האבק משתנה מאד מדגימה לדגימה, כפי שמוצג באיור מס' 1. הבדלים אלה מונעים השגת אפשרות אופטימלית לנבא את כמות הסיליקה במקטע בר-נשימה מתוך כמותה בכלל האבק. מקדם הקורלציה בקו הרגרסיה הלינארית, המוצג באיור מס' 2 עבור אבן שיש מלאכותית הוא 0.646 ברמת מובהקות של 0.00001> ואילו זה באבן שיש טבעית, המוצג באיור מס' 3, הוא 0.796 ברמת מובהקות של $2.7x10^{-5}$. הסבר אפשרי יכול להיות שוני בולט בכלי העיבוד, והרטבת אבק בתהליך העבודה. כמו כן, אביזר הדגימה של אבק בר נשימה אינו בר השוואה לאביזר הדגימה של כלל האבק מבחינת גודל החלקיקים הנלכדים ומסתם. בשיש טבעי התקבלו ערכים רבים נמוכים מסף הגילוי של שיטת הבדיקה ולכן המדגם קטן.

איור מס' 1: יחס בין מסת סיליקה גבישית במקטע בר נשימה לבין מסתה במקטע כלל האבק במדגם מעיבוד יבש של אבן שיש מלאכותית

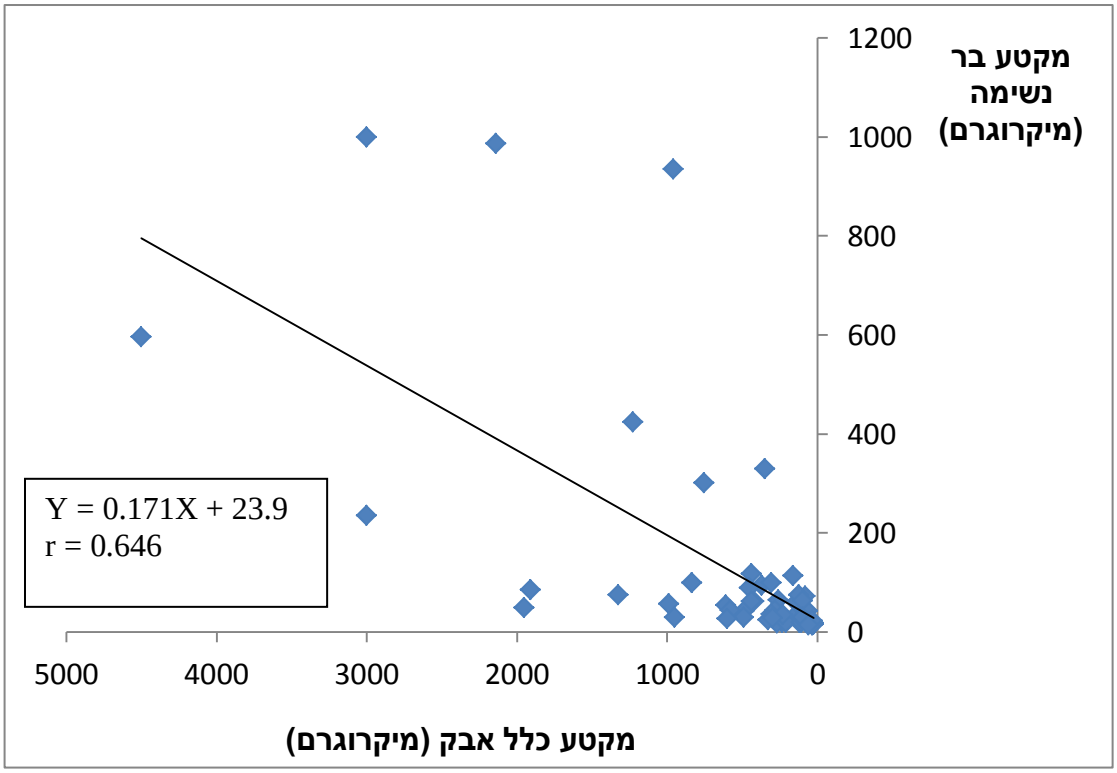


4. <u>השפעת סוג האבן על פיזור אבק באוויר ועל רמות חשיפה</u>

ריכוז הסיליקה הגבישית חופשית באוויר נבדק על פני משך העבודה בתהליכים. התכולה הגבוהה של סיליקה גבישית באבן שיש מלאכותית גורמת להבדלים בריכוזי הסיליקה באוויר בין שני סוגי האבן. טבלה מס' 5 מציגה את הריכוזים הממוצעים בעיבוד אבן שיש מלאכותית בשני מקטעי הדגימה ושני אופני דגימה (אישי ושטח) וטבלה מס' 6 מציגה את הריכוזים הממוצעים באותם מקטעי דגימה בעיבוד אבן טבעית. הריכוזים הממוצעים של סיליקה בדגימות האישיות של כלל האבק נבדלו באופן סטטיסטי מובהק בין שני הסוגים של אבן השיש - $p = 0.0145$, אולם לא בדגימות השטח. במקטע בר-נשימה התקבל מצב הפוך לפיו הריכוזים הממוצעים של סיליקה בדגימות השטח בשני הסוגים של אבן השיש נבדלו באופן

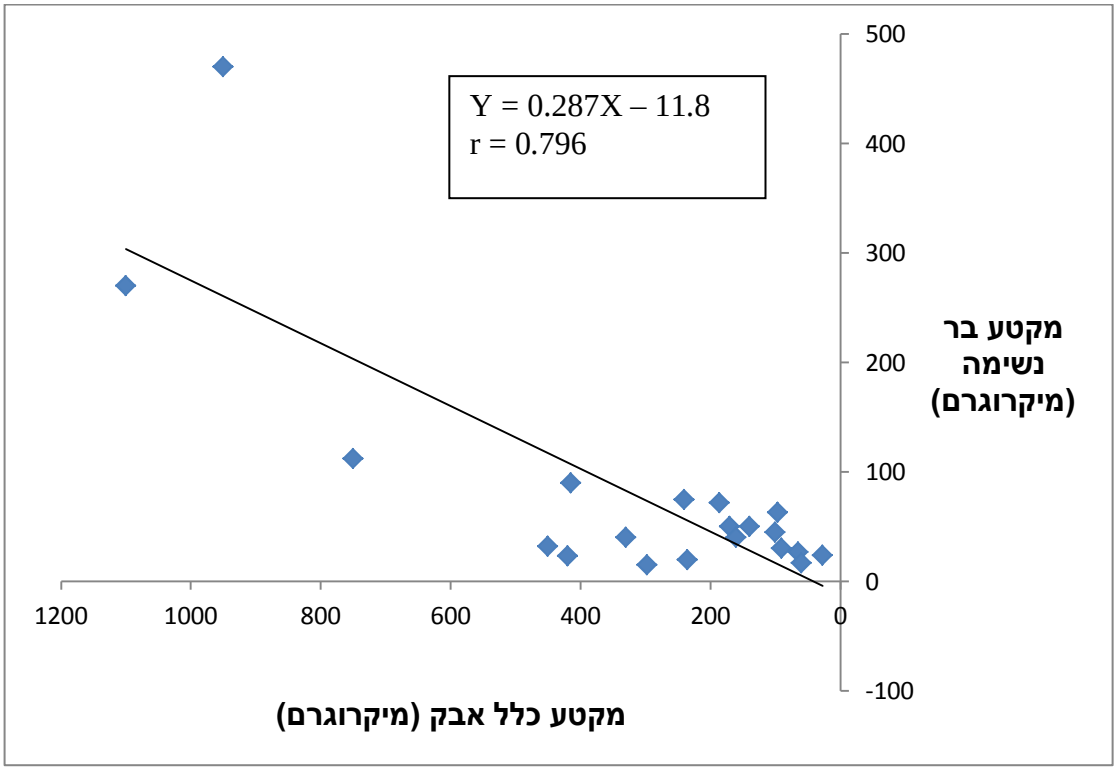
מובהק - p = 0.0075, אך לא בדגימות האישיות (p=0.264). כצפוי, בדגימות האישיות ובדגימות השטח הריכוז הממוצע של סיליקה בכלל האבק נבדל באופן מובהק מאד (p<0,0001) מזה במקטע בר-נשימה בעיבוד אבן שיש מלאכותית. לעומת זאת, בדגימות האישיות באבן שיש טבעית לא נבדלו ממוצעי הריכוזים בין מקטע כלל האבק למקטע בר-נשימה באופן סטטיסטי מובהק (p = 0.09), אך ההבדל היה בעל מובהקות חזקה (p<0.0001) בדגימות השטח.

איור מס' 2: מתאם בין כמות הסיליקה במקטע אבק בר-נשימה לבין כמותה בכלל האבק במדגם מזווג מאבן שיש מלאכותית



הגורם העיקרי שמעלה את ממוצעי הריכוזים באוויר בעיבוד אבן שיש טבעית הוא תהליך ניקוי החול, שמתבצע רק בחלק מבתי במלאכה לעיבוד אבן שיש טבעית. שימוש בהתזת חול קיים לצורך ליטוש וכיתוב על גבי שיש טבעי (יצור מצבות). כיוון שרוב בתי המלאכה לשיש טבעי אינם מבצעים תהליך זה חושב הריכוז הממוצע של סיליקה באוויר בעיבוד אבן שיש טבעית גם ללא התהליך והתוצאות מוצגות בטבלה מס' 6. ניתן לראות הקטנה משמעותית של הריכוזים הממוצעים וסטיות התקן ובמצב זה כל ההבדלים במקטעי האבק ובסוגי הדגימה השונים בין אבן מלאכותית לאבן טבעית מובהקים סטטיסטית.

איור מס' 3: מתאם בין כמות הסיליקה במקטע אבק בר-נשימה לבין כמותה בכלל האבק במדגם מזווג מאבן שיש טבעית



טבלה מס' 5: רמות סיליקה באוויר על פני משך תהליך בתהליכי עיבוד של אבן שיש מלאכותית

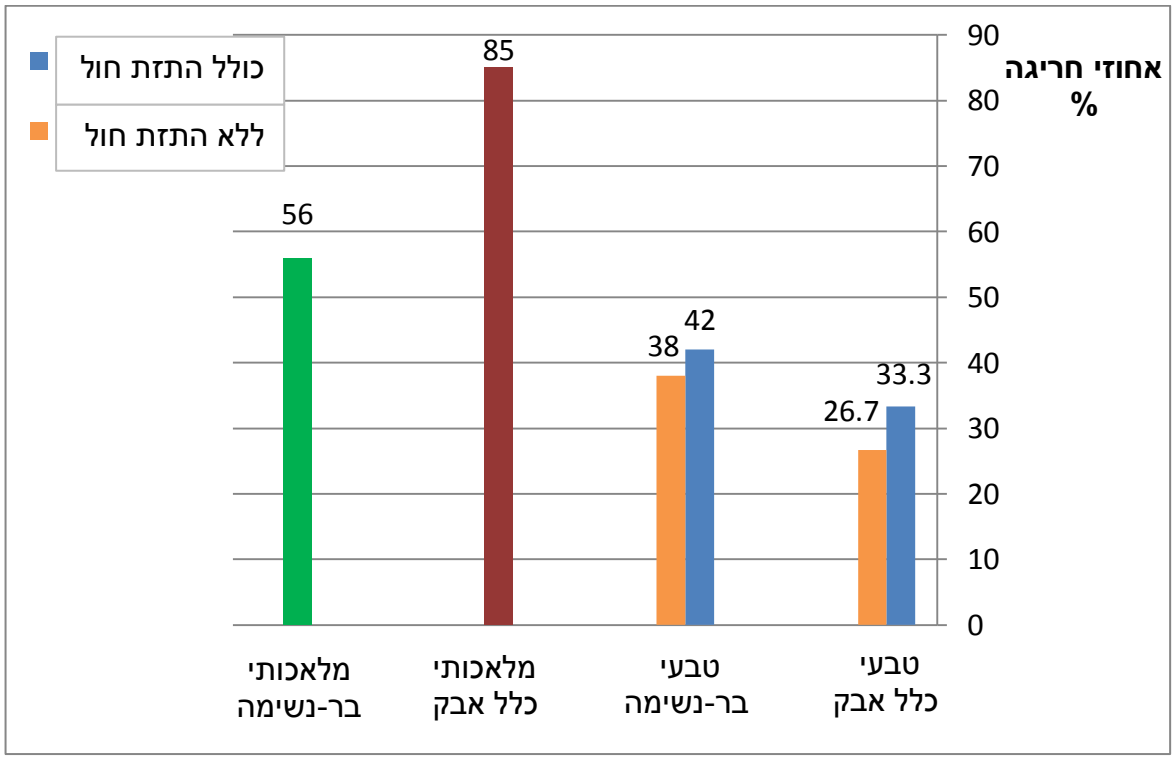
סוג אבן שיש	אופן דגימה	N	ממוצע גיאומטרי (GM) מ"ג/מ"ק	סטיית תקן גיאומטרית (GSD)	תחום ריכוזים מ"ג/מ"ק)	יחס ריכוז ממוצע לתקן חשיפה
כלל אבק	אישי	40	0.91	4.5	30.86 – 0.04	3.0
	שטח	63	2.64	7.4	800.8 –0.03	8.8
בר-נשימה	אישי	50	0.158	4.8	10.71 – 0.01	1.58
	שטח	56	0.469	7.8	458.8 – 0.01	4.69

*הרמה המרבית המשוקללת המותרת לחשיפה היא 0.3 מ"ג/מ"ק עבור כלל האבק ו- 0.1 מ"ג/מ"ק עבור מקטע בר-נשימה.

בהשוואה לרמות מרביות מותרות לחשיפה, אחוז החריגות מרמות אלה בעיבוד אבן שיש מלאכותית גבוה מהמקביל בעיבוד אבן שיש טבעית. אחוזי החריגות בדגימות אישיות מוצגים

באיור מס' 4. אחוזי החריגה במקטע בר-נשימה בעיבוד אבן טבעית גבוהים מאלו במקטע כלל האבק. ממצא זה עקבי עם הממצאים של תכולת הסיליקה באחוזים באבק שיש טבעי בר- נשימה וכלל אבק (טבלה מס' 4) שם אחוזי הסיליקה בדגימות האישיות במקטע בר-נשימה גבוהים מאלו במקטע כלל האבק. ממצא זה עקבי גם עם היחס בין ריכוזי הסיליקה לבין ריכוזי כלל האבק בשני מקטעי האבק. בעוד שריכוז הסיליקה באוויר במקטע בר נשימה מאבן שיש טבעית הגיע ל- 9.3% מריכוז כלל האבק בר הנשימה (0.099 מ"ג/מ"ק ביחס ל- 1.06 מ"ג/מ"ק) בדגימות האישיות, הגיע ריכוז הסיליקה בדגימות האישיות במקטע כלל האבק מאבן שיש טבעית רק ל- 4.75% מריכוז כלל האבק (0.278 מ"ג/מ"ק ביחס ל- 5.85 מ"ג/מ"ק). היחס בין אחוזי התכולה (9.3% לעומת 4.75%) הוא 2:1 בעוד שהיחס בין תקני החשיפה של סיליקה ברת נשימה וסיליקה ככל אבק הוא 1:3 מה שמגדיל את פוטנציאל החריגה של סיליקה ברת נשימה מהרמה המרבית שלה המותרת לחשיפה. כאשר מסירים מהחישוב את רמות החשיפה שנמדדו בתהליך התזת חול בעיבוד שיש טבעי לא חל שינוי גדול באחוזי החריגה מרמות מרביות בעיבוד אבן זו בעיקר כיוון שמספר הדגימות שנלקח לתהליך זה קטן.

איור מס' 4: מקטע רמות גבוהות מרמות מרביות מותרות לחשיפה בדגימות אישיות משוקללות על פני משך עבודה בתהליכים



טבלה מס' 6: רמות סיליקה באוויר בתהליכי עיבוד של אבן שיש טבעית עם וללא תהליך התזת חול

מקטע אבק	אופן דגימה	^1N	^2N	ממוצע גיאומטרי (GM) מ"ג/מ"ק		סטיית תקן גיאומטרית (GSD)		תחום ריכוזים מ"ג/מ"ק)		יחס ריכוז ממוצע לתקן חשיפה	
				כולל התזת חול	ללא התזת חול	כולל התזת חול	ללא התזת חול	כולל התזת חול	ללא התזת חול	כולל התזת חול	ללא התזת חול
כלל אבק	אישי	18	16	0.278	0.185	7.2	4.8	27.5 – 0.02	4.74 – 0.02	0.93	0.62
בר-נשימה		24	21	0.099	0.069	6.4	3.4	19.58 – 0.01	0.55 – 0.01	0.99	0.69
כלל אבק	שטח	31	29	2.44	0.48	5.2	3.8	5.88 – 0.03	4.79 – 0.03	8.1	1.6
בר-נשימה		31	29	0.143	0.13	5.4	5.3	5.37 – 0.01	5.37 – 0.01	1.43	1.3

*הרמה המרבית המשוקללת המותרת לחשיפה היא 0.3 מ"ג/מ"ק עבור כלל האבק ו- 0.1 מ"ג/מ"ק עבור מקטע בר-נשימה.
1 – כולל התזת חול
2 – ללא התזת חול

בהשוואה לרמות פעולה התקבלו אחוזי חריגה גבוהים יותר מהקודמים. באבן שיש טבעית חרגו 55% ו- 54% מהתוצאות של ריכוזי הסיליקה באוויר, בהתאמה, במקטע כלל האבק ובמקטע בר-נשימה, ובאבן שיש מלאכותית חרגו 92.5% ו- 76%מהתוצאות, בהתאמה, במקטע כלל האבק ובמקטע בר-נשימה. כאשר מסירים מהחישוב את רמות החשיפה שנמדדו בתהליך התזת חול בעיבוד שיש טבעי עדיין לא חל שינוי גדול באחוזי החריגה מרמות פעולה בעיבוד אבן זו ואחוזי החריגה הם 53.3% במקטע כלל האבק ו- 52.8% במקטע בר-נשימה.

רמות סיליקה באוויר נמצאו גם בדגימות שנלקחו באזורי משרדים ובכניסה לאולם עבודה בעיבוד אבן שיש טבעית. מיעוט הדגימות אינו מאפשר הסקת מסקנות, אולם ריכוזי הסיליקה היו נמוכים מרמת הפעולה.

5. <u>השפעת סוג האבן ותנאי התהליך על החשיפה לסיליקה ועל פיזור אבק באוויר</u>

רמות הסיליקה באוויר הושוו בין תהליכים בהם עיבוד האבן הוא יבש וללא הרטבתה לבין תהליכים בהם האבן מורטבת במים במשך כל התהליך לצמצום פיזור האבק. רמות אלה מתבססות על דגימות שטח בתהליכים כדי לנטרל את הגורם המשפיע של ניידות העובדים. באופן כללי, הממוצע הגיאומטרי של ריכוז הסיליקה בתהליכים רטובים באבק אבן שיש מלאכותית היה 0.46 מ"ג/מ"ק (סטיית תקן 4.8) והממוצע הגיאומטרי באבק אבן שיש טבעית היה 0.12 מ"ג/מ"ק (סטיית תקן 4.3). ממוצעים אלה נבדלים באופן מובהק ($p = 0.0002$). הבדל גדול יותר בממוצעי הריכוזים נמצא בתהליכים יבשים. הממוצעים הגיאומטריים של ריכוז הסיליקה היו 8.4 מ"ג/מ"ק (סטיית תקן 7.2) ו- 0.48 מ"ג/מ"ק (סטיית תקן 4.7) באבן שיש מלאכותית ובאבן שיש טבעית, בהתאמה, כאשר ההבדל מובהק באופן סטטיסטי עוד יותר מההבדל בתהליכים רטובים ($p<0.0001$).

השוואה בין תהליך רטוב ליבש באותו סוג של אבן שיש חוזרת על ההבדלים הגדולים. בעיבוד אבן שיש מלאכותית התקבל הבדל סטטיסטי מובהק בין הממוצעים הגיאומטריים של ריכוזי הסיליקה – 0.46 מ"ג/מ"ק בתהליכים רטובים לעומת 8.4 מ"ג/מ"ק בתהליכים יבשים ($p<0.0001$), ובעיבוד אבן שיש טבעית, בהקבלה, 0.12 מ"ג/מ"ק לעומת 0.48 מ"ג/מ"ק ($p = 0.0008$). הממוצע הגיאומטרי של ריכוז הסיליקה בתהליכים רטובים באבן שיש מלאכותית היה כמעט זהה לזה בתהליכים יבשים באבן שיש טבעית. ההרטבה צמצמה את הריכוז הממוצע של סיליקה באוויר פי 18 בעיבוד אבן שיש מלאכותית ופי 4 בעיבוד אבן שיש טבעית. סטיות התקן הגיאומטריות מראות פיזור נרחב של ריכוזים סביב הממוצע.

טבלה מס' 7 מסכמת את ריכוזי הסיליקה באוויר על פני משך התהליך כתלות בתנאיו ובסוג האבן ומקטע האבק הנדגם. בטבלה זו יש התייחסות גם למקטעי האבק השונים ולאופן

הדגימה. על אף גודל מדגם קטן בחלק מהצירופים, ניתן להצביע על מגמה קבועה בממוצעי הריכוזים שהתקבלו. מגמה זו מראה עלייה בריכוזים באוויר עם המעבר מתהליך רטוב ליבש ועלייה גם במעבר מאבן שיש טבעית לאבן שיש מלאכותית. בכל הצירופים המקבילים היו הריכוזים הממוצעים גדולים בתהליכים היבשים לעומת הרטובים.

טבלה מס' 7: התפלגות ריכוזי סיליקה ממוצעים על פני תהליך על פי תנאי תהליך, סוג האבן ומקטע האבק הנדגם

תנאי תהליך	סוג אבן שיש	אופן דגימה	מקטע אבק	N	ממוצע גיאומטרי (מ"ג/מ"ק)	סטיית תקן גיאומטרית
רטוב	מלאכותית	אישי	בר נשימה	37	0.09	3.8
			כלל אבק	31	0.61	3.6
		שטח	בר נשימה	38	0.18	2.8
			כלל אבק	43	1.07	4.4
	טבעית	אישי	בר נשימה	10	0.07	4.4
			כלל אבק	8	0.19	8.0
		שטח	בר נשימה	13	0.055	3.9
			כלל אבק	13	0.254	3.5
יבש	מלאכותית	אישי	בר נשימה	13	0.69	3.3
			כלל אבק	9	3.72	4.2
		שטח	בר נשימה	18	3.49	9.3
			כלל אבק	20	18.54	4.5
	טבעית	אישי	בר נשימה	14	0.13	8.2
			כלל אבק	10	0.37	7.0
		שטח	בר נשימה	18	0.284	5.0
			כלל אבק	18	0.826	3.7

רמות הסיליקה שהתקבלו באוויר אמנם אינן משוקללות על פני יום עבודה, אלא על פני משך התהליכים, אך הממוצעים שהתקבלו מהווים אינדיקציה לפוטנציאל החשיפה ביחס לרמות מרביות מותרות בייחוד בתהליכים ארוכים שעשויים להמשך מרבית היום. הסיכוי לחריגה מחשיפה מותרת בעיבוד רטוב של אבן שיש מלאכותית, למרות ההרטבה, גבוה אם בוחנים את התוצאה במקטע כלל האבק בדגימות האישיות, וגם הסיכוי לחריגה במקטע בר-נשימה גבוה למדי. הסתברות נמוכה יותר לחריגה מרמה מרבית מותרת קיימת בעיבוד רטוב של

אבן שיש טבעית בשני מקטעי האבק. בהשוואה לכך, בעיבוד יבש של שיש גבוהים ממוצעי הריכוזים מרמות מרביות מותרות הן בעיבוד אבן שיש מלאכותי והן בעיבוד אבן שיש טבעית. בחינת המצב כלפי רמת הפעולה בתקן החשיפה מראה כי כל הריכוזים הממוצעים בעיבוד יבש ורטוב בשני סוגי השיש ובשני מקטעי האבק גבוהים מרמת הפעולה.

6. חשיפה ממוצעת ומשוקללת של עובדים בתהליכי עיבוד שיש על פני יום עבודה

מטרת המחקר הראשונה היתה איפיון תהליכי העיבוד ובחינת פרופיל העבודה בבתי המלאכה כדי לעמוד על אמצעי הבקרה הדרושים. הערכת החשיפה של העובדים השתלבה במטרה זו, אך במדגמים קטנים. בנסיון להעריך את החשיפה הממוצעת המשוקללת על פני יום עבודה בהשוואה לרמות מרביות מותרות חושבו הריכוזים המשוקללים על פני 8 שעות ב- 54 דגימות אישיות ארוכות בעבודה בשיש סינתטי מהן 31 של מקטע בר נשימה ו- 27 של כלל אבק, וב- 31 דגימות אישיות בעבודה בשיש טבעי מהן 17 של מקטע בר-נשימה ו- 14 של כלל האבק.

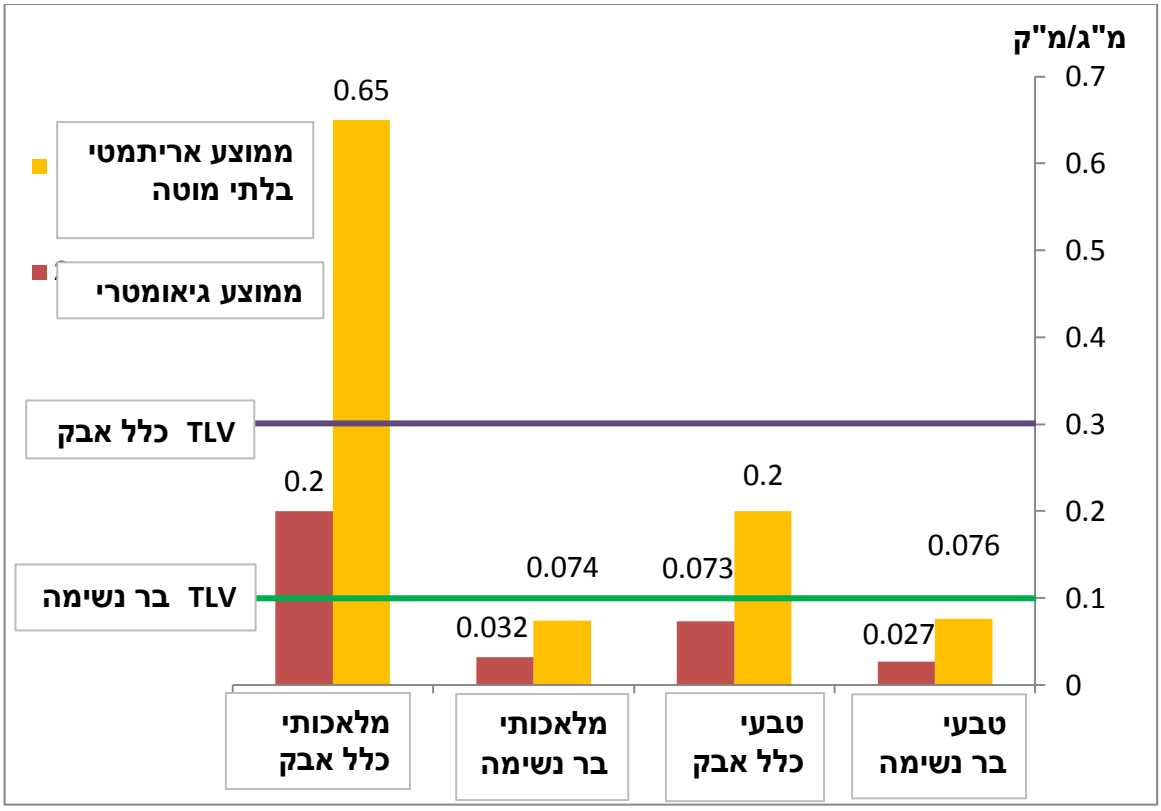
באיור מס' 5 מוצגת החשיפה הממוצעת המשוקללת לסיליקה גבישית חופשית על פני יום עבודה מתוך הנחה שעובד אינו נחשף לסיליקה בפרקי הזמן שאינו עובד בתהליך עיבוד כלשהו ואינו שוהה ליד תהליך כזה. בממוצעים המוצגים אין הפרדה בין עיבוד יבש לרטוב. הבדל קטן ולא משמעותי ברמות הסיליקה בין עיבוד אבן שיש מלאכותי לעיבוד אבן שיש טבעית התקבל עבור מקטע בר-נשימה. אחת הסיבות עשויה להיות התרומה של התזת חול בשיש טבעי לחשיפה הכוללת. החשיפה הממוצעת במקטע בר-נשימה לא חרגה מהרמה המרבית המשוקללת המותרת לחשיפה לסיליקה. לעומת זאת, חרגה הרמה הממוצעת מהחשיפה המותרת כשמדובר במקטע כלל האבק. הממוצע האריתמטי של ההתפלגות הלוג-נורמלית הוא ממוצע בלתי מוטה ומייצג טוב יותר מהממוצע הגיאומטרי את הקשר שבין החשיפה לסיכון לתחלואה. ממוצע זה חרג בכלל האבק הן בעיבוד אבן שיש מלאכותית והן בעיבוד אבן שיש טבעית. משמעות התוצאות ביחס לתקני חשיפה בכלל האבק סותרת במידה מסויימת את משמעות התוצאות ביחס לתקן חשיפה של מקטע בר-נשימה וניתוח משמעויות אלה וההבדלים ביניהן יורחב בדיון.

טבלה מס' 8 מראה שהחשיפה המשוקללת היומית לסיליקה באבק נבדלת באופן מובהק בין תהליכים יבשים לרטובים באבן שיש מלאכותית הן במקטע כלל האבק והן במקטע בר הנשימה. יתרה מזאת, טבלה מס' 9 מראה שבתהליכי עיבוד יבשים יש הבדל מובהק בחשיפה לסיליקה בין אבן שיש מלאכותית לבין אבן שיש טבעית הן בחשיפה למקטע כלל האבק והן בחשיפה למקטע אבק בר-נשימה, בעוד שהבדל זה אינו קיים בתהליכי עיבוד רטובים. במקטע בר-נשימה של סיליקה מתהליכים רטובים נמוך הממוצע הגיאומטרי מרמת

הפעולה של סיליקה ואילו הממוצע האריתמטי הבלתי מוטה, שמשקף נכון יותר את הסיכון מהחשיפה, אינו חורג מהרמה המרבית המשוקללת.

לעומת רמות החשיפה של מקטע בר-נשימה, בכלל האבק בתהליכים רטובים הממוצע הגיאומטרי של ריכוז הסיליקה המשוקלל על פני יום עבודה נמוך מרמת הפעולה או מגיע עד אליה, אך הממוצע האריתמטי הבלתי מוטה, גבוה מהרמה המרבית המשוקללת גם באבן מלאכותית וגם באבן טבעית. שונה המצב בתהליכים יבשים, שם החשיפה המשוקללת לסיליקה חורגת מרמות מרביות מותרות בכלל האבק בשני סוגי השיש ובמקטע בר-נשימה באבן השיש המלאכותית.

איור מס' 5: חשיפה ממוצעת משוקללת יומית לסיליקה גבישית (דגימות אישיות) במקטעי אבק שונים על פי סוג אבן השיש



טבלה מס' 8: ריכוזים ממוצעים ומשוקללים של סיליקה על פני יום עבודה כתלות בסוג אבן השיש המעובדת (ממיין ראשי) ותנאי התהליך

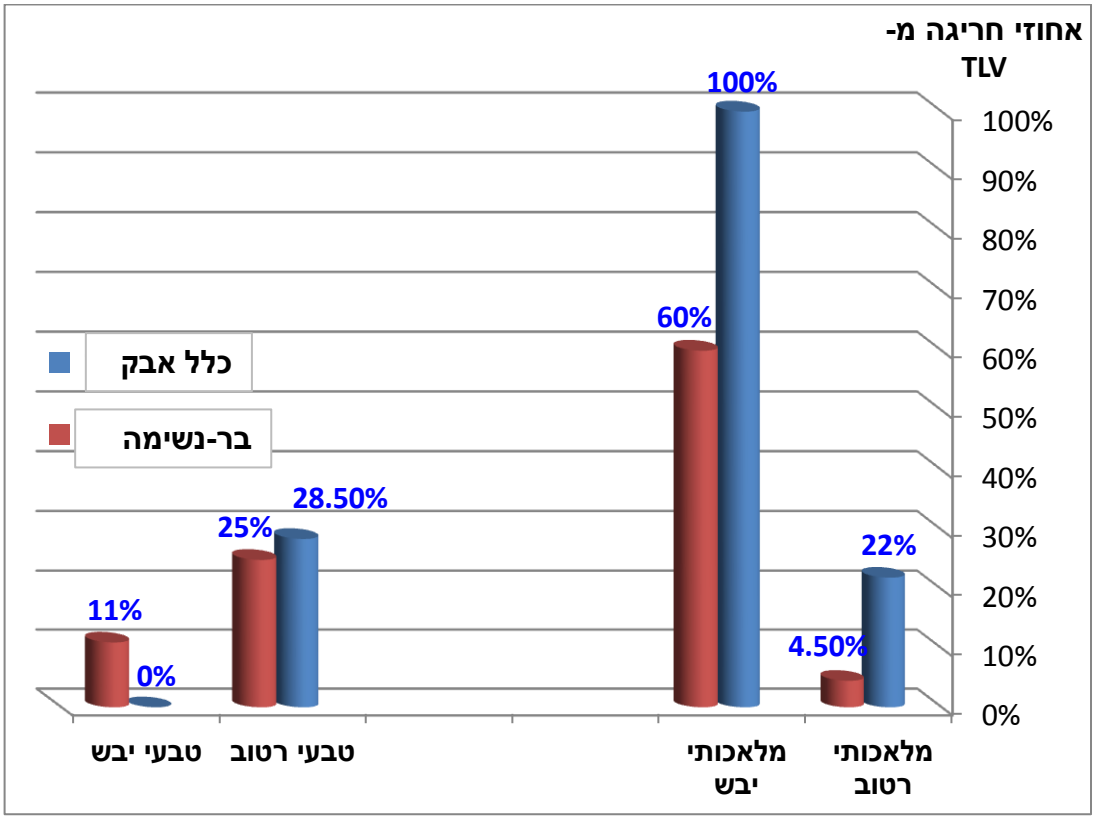
סוג אבן שיש	תנאי תהליך	מקטע אבק	N	ממוצע גיאומטרי משוקלל (GM) מ"ג/מ"ק	סטיית תקן גיאומטרית (GSD)	p	ממוצע אריתמטי בלתי מוטה משוקלל (M) מ"ג/מ"ק	רמה מרבית משוקללת מ"ג/מ"ק
מלאכותית	רטוב	כלל אבק	23	0.134	1.49	0.011	0.41	0.3
	יבש		4	1.2	3.9		3.0	
מלאכותית	רטוב	בר-נשימה	22	0.026	2.43	0.0002	0.038	0.1
	יבש		5	0.21	4.0		0.55	
טבעית	רטוב	כלל אבק	7	0.053	7.0	0.41	0.35	0.3
	יבש		7	0.1	1.7		0.12	
טבעית	רטוב	בר-נשימה	8	0.025	4.8	0.55	0.087	0.1
	יבש		9	0.038	3.1		0.07	

טבלה מס' 9: ריכוזים ממוצעים ומשוקללים של סיליקה כתלות בתנאי התהליך (ממיין ראשי) וסוג אבן השיש המעובדת

תנאי תהליך	סוג אבן שיש	מקטע אבק	N	ממוצע גיאומטרי משוקלל (GM) מ"ג/מ"ק	סטיית תקן גיאומטרית (GSD)	p	ממוצע אריתמטי בלתי מוטה משוקלל (M) מ"ג/מ"ק	רמה מרבית משוקללת מ"ג/מ"ק
רטוב	מלאכותית	כלל אבק	23	0.134	1.49	0.187	0.41	0.3
	טבעית		7	0.053	7.0		0.35	
	מלאכותית	בר נשימה	22	0.026	2.43	0.965	0.038	0.1
	טבעית		8	0.025	4.8		0.087	
יבש	מלאכותית	כלל אבק	4	1.2	3.9	0.0045	3.0	0.3
	טבעית		7	0.1	1.7		0.12	
	מלאכותית	בר-נשימה	5	0.21	4.0	0.028	0.55	0.1
	טבעית		9	0.038	3.1		0.07	

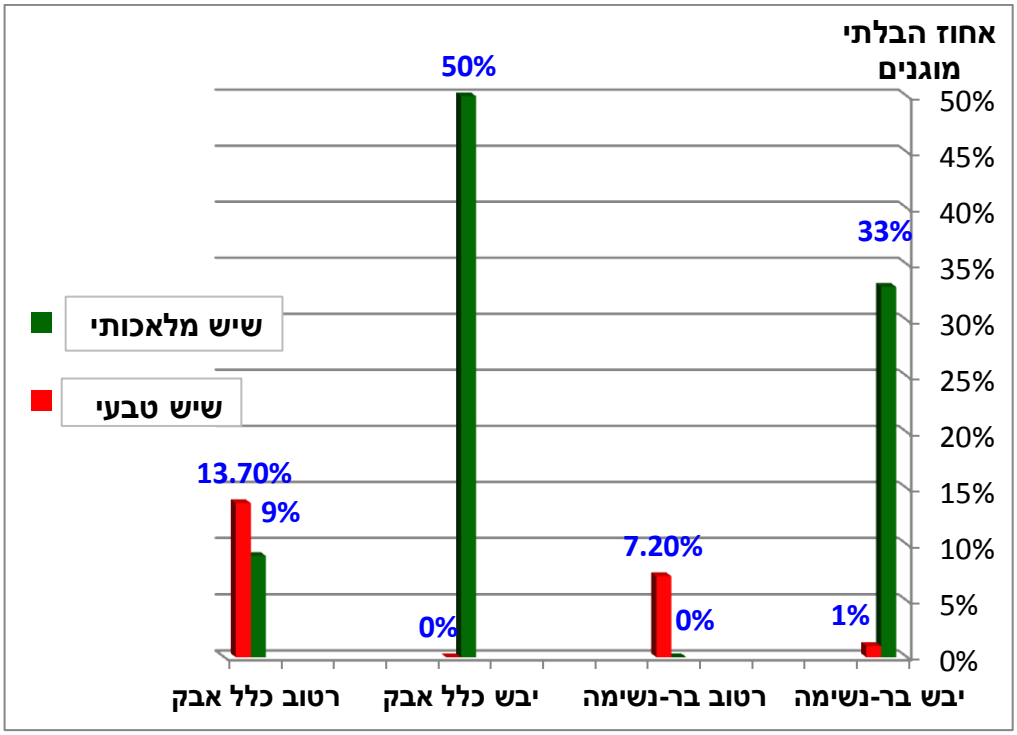
עבודה בתהליכים יבשים באבן שיש מלאכותית גרמה לחריגת החשיפה של עובדים מהרמה המרבית המשוקללת של סיליקה באחוזים גבוהים מאד בדגימות של מקטע בר-נשימה ובכל הדגימות בכלל האבק. הממצאים מוצגים באיור מס' 6. לעומת זאת, אחוז החריגות במקטע בר נשימה בתהליכים בהם יש הרטבה נמוך. אחוזי החריגה של רמות הסיליקה מרמה מרבית משוקללת בתהליכים רטובים בעיבוד אבן שיש טבעית היו גבוהים מהתהליכים המקבילים בעיבוד אבן שיש מלאכותית. באופן לא צפוי התקבל בעיבוד יבש של אבן שיש טבעית אחוז חריגות נמוך יותר מזה שהתקבל באבן זו בעיבוד רטוב. גורמים שונים וביניהם סוג הכלי המעבד, תנאי רוח בסככות עיבוד פתוחות וגודל המדגם עשויים להיות הסיבה.

איור מס' 6: אחוזי חריגה של ממוצעי חשיפה משוקללים (על פני יום עבודה) מרמה מרבית מותרת



על מנת לבדוק את ההסתברות לחשיפה אישית חריגה גם כאשר העובד מוגן בנשמית חד פעמית חושבה הסתברות זו ביחס לנשמית שמקדם ההגנה שלה (PF) הוא 10, כלומר היא מקטינה את ריכוז הסיליקה החודר לתוך חלל המסיכה פי 10 בהשוואה לריכוז שמחוץ למסיכה. איור מס' 7 מציג את אחוזי ההסתברות באוכלוסיית הנבדקים להיות בלתי מוגנת.

איור מס' 7: אחוזי מקרים של חשיפה אישית משוקללת על פני יום עבודה בהם נשמית חד פעמית (PF=10) לא תגן מחשיפה קבילה עליונה כתלות בסוג אבן השיש ותנאי העיבוד.



7. <u>תרומת סוג התהליך לפיזור אבק מכיל סיליקה</u>

תהליכי העבודה בשיש אינם רצופים. כל תהליך חוזר על עצמו מספר פעמים ביום. כדי לאפיין את הפיזור בתהליך נתון ולהשוות בין התהליכים נבחר בכל תהליך פרק אחד של ביצוע.

סמיכות המיכשור לדגימת אבק למוקד הפיזור איפשרה איפיון פיזור בתהליך תוך ניטרול ההשפעה של תהליך שכן עד כמה שאפשר.

המחקר התמקד בתהליכי עיבוד בהם יש פיזור סיליקה גבישית חופשית באוויר בסביבת העבודה. ניתן לקבץ תהליכים אלה לתהליכים הבאים:

- חיתוך
- ליטוש
- כרסום/חריצה
- התזת חול

תהליכי חיתוך של לוחות שיש מאבן טבעית ומלאכותית שכיחים ומתבצעים בד"כ באופן ממוכן ואוטומטי תוך שימוש במים במהלך החיתוך. תהליך זה נמשך מספר שעות והעובד עוסק בהעמסת לוחות שיש לחיתוך, השגחה על פעולת המכונה תוך כדי הטיית הלוחות בכיוונים שונים, העברת הלוחות החתוכים לנקודת מצבור. מתבצעים גם תהליכי חיתוך באופן ידני בעזרת מסור, או אבן אופן ואלה בחלקם הגדול מתבצעים בעיבוד יבש.

בתהליכי ליטוש של אבן טבעית ומלאכותית מבחינים בין ליטוש גס וליטוש עדין כאשר הליטוש הגס משתמש בניירות ליטוש מצופים בחומר אברזיבי בעל גרגירים גסים או באבן אופן עדינה. הליטוש העדין משתמש בנייר ליטוש מצופה בחומר שוחק בעל גרגירים עדינים או ביהלום. כלי העיבוד בשני סוגי הליטוש הוא דיסקת ליטוש. תהליכי ליטוש מתבצעים בעיבוד יבש ורטוב.

.תהליך הכרסום/חריצה חורץ בלוח השיש צורות, שקעים, חורים וכו' כגון חור לכיור, חריץ ניקוז בשיש למטבח. התהליך הוא בד"כ ידני ולעתים קרובות העיבוד הוא יבש.

תהליך התזת החול מבוצע רק בעיבוד אבן שיש טבעית ובד"כ במכונות יעודיות כאשר משך התהליך משתנה לפי כמות החומר או צורך.

תהליכים שבהם העובד אינו נחשף לסיליקה, כגון הדבקת שיש, לא נכללו במחקר.

טבלה מס' 10 מתארת את תהליכי העיבוד, כלי העיבוד בתהליך ואופן העיבוד. פרק רצף בודד של תהליך הוא בד"כ קצר והתהליכים חוזרים מספר פעמים ביום. עובדים עוברים מתהליך לתהליך ועובד אחד יכול לבצע מספר תהליכים עוקבים.

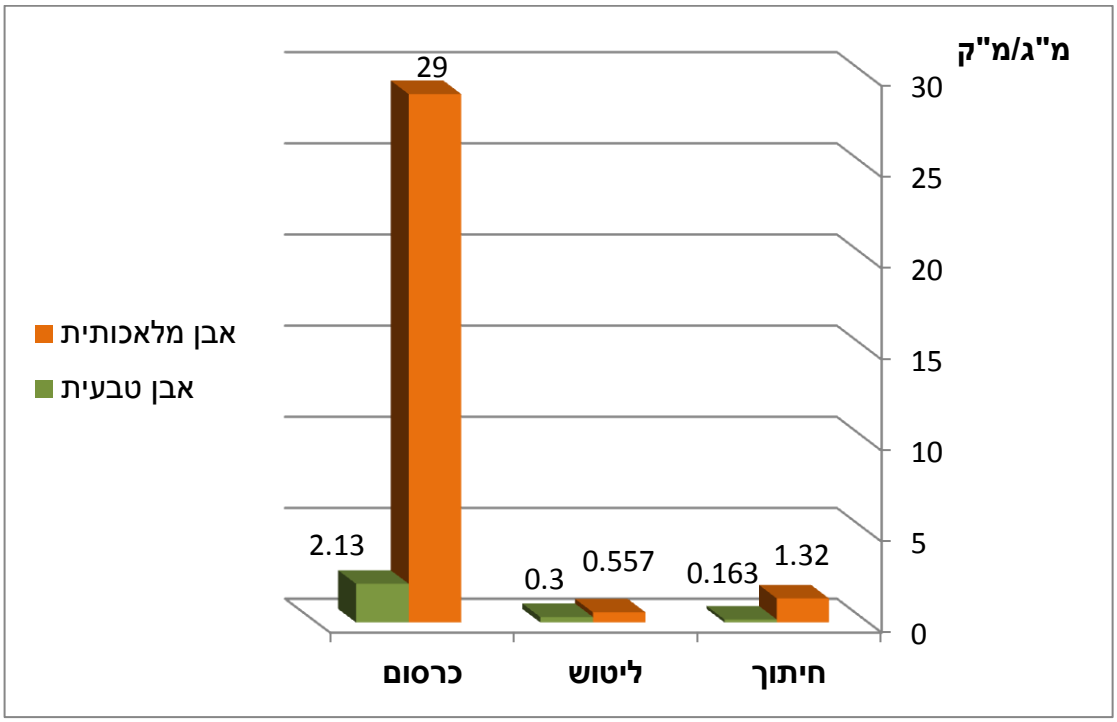
טבלה מס' 10: סוגי תהליכים שנבדקו ומשכם ומאפייני עיבוד

סוג תהליך	כלי עיבוד	אופן עיבוד	פרק זמן ממוצע של תהליך במשמרת ללא חזרות (דקות)	
			עיבוד שיש מלאכותי	עיבוד אבן שיש טבעית
חיתוך במכונת חיתוך אוטומטית	מסור	רטוב	48	168
חיתוך ידני בעזרת אבן אופן	אבן אופן	יבש	11	27
חיתוך ידני בעזרת מסור	מסור	יבש	24	12
חיתוך במכונת CNC	מסור	רטוב	26	לא נוכח
ליטוש CNC	דיסקת ליטוש	רטוב	42	לא נוכח
ליטוש גס	נייר ליטוש או אבן אופן עדינה	רטוב ויבש	24	5
ליטוש עדין	נייר ליטוש עדין או נייר יהלום	רטוב ויבש	38	74
כרסום ידני בעזרת כוסית	כוסית כרסום	יבש	16	25

פיזור האבק המכיל סיליקה משתנה מתהליך לתהליך ותלוי בכלי העיבוד ובאגרסיביות הפעולה של הכלי. משתנה גם הפיזור על פי סוג אבן העיבוד ואופן העיבוד – רטוב או יבש.

איור מס' 8 מציג את ההבדלים בריכוזי הסיליקה הגבישית באוויר בתהליכים השונים כתלות בסוג האבן, אך ללא הפרדה בין עיבוד רטוב ליבש. הריכוזים נמדדו בדגימות שטח כדי לאפיין את עוצמת פיזור האבק בתהליך. הריכוזים המוקטנים בהשוואה לתהליכים יבשים בלבד נובעים מתרומת ההרטבה של האבן בעת העיבוד. הממוצעים הגיאומטריים של ריכוזי הסיליקה בתהליכי חיתוך וכרסום של אבן שיש מלאכותית גדולים בסדר גודל אחד מהמקביל לו בתהליכי חיתוך של אבן שיש טבעית. סטיות התקן הגיאומטריות הגדולות מצביעות על פיזור רחב של ריכוזים סביב הממוצע בתהליכים. לעומת זאת, בתהליכי ליטוש ההבדל בין הממוצע הגיאומטרי של עיבוד אבן מלאכותית לבין זה של טבעית אינו גדול. הבדל הממוצעים בין אבן מלאכותית לטבעית בתהליכי חיתוך הוא מובהק סטטיסטית ($p<0.0001$), אך לא בתהליכי ליטוש ($p=0.115$). בתהליך הכרסום ההבדל התקרב למובהק ($p=0.0625$), אך המדגמים קטנים מאד. במדגמים מעט גדולים יותר ($N\geq10$) צפוי הבדל מובהק.

איור מס' 8: ריכוזים ממוצעים של סיליקה גבישית חופשית באוויר בתהליכי עיבוד אבן שיש כתלות בסוג האבן המעובדת.



טבלה מס' 11 מדגימה את הבדלי הריכוזים של סיליקה באוויר בין תהליכי עיבוד רטוב לבין תהליכי עיבוד יבש בדגימות שטח ללא הפרדה בסוג האבן המעובדת. בחלק מהתהליכים

גבוהים ממוצעי הריכוזים של הסיליקה בתהליכים יבשים ביותר מסדר גודל אחד מהריכוזים המקבילים בתהליכים רטובים. ההבדלים הסטטיסטיים בין ממוצעי הריכוזים של עיבוד יבש ורטוב בתהליכי חיתוך וכרסום היו מובהקים ($p<0.0001$ ו- $p=0.0319$, בהתאמה), אך לא בתהליכי הליטוש ($p=0.0882$).

טבלה מס' 11 : ריכוזים ממוצעים של סיליקה גבישית חופשית באוויר בעיבוד רטוב ויבש של אבן שיש.

סיווג תהליך	תנאי תהליך	N	ממוצע גיאומטרי (מ"ג/מ"ק)	תחום ריכוזים (מ"ג/מ"ק)
חיתוך	רטוב	72	0.368 (6.9)	18.9 – 0.01
	יבש	37	4.63 (5.6)	184.8 – 0.21
ליטוש	רטוב	61	0.287 (3.7)	5.98 – 0.02
	יבש	50	0.468 (5.4)	16.11 - 0.02
כרסום	רטוב	4	1.71 (1.3)	2.67 – 1.39
	יבש	8	32.5 (10.0)	800.8 – 1.20

( ) - סטיית תקן גיאומטרית

טבלה מס' 12 מציגה ריכוזי סיליקה גבישית באוויר בתהליכים השונים בשני מקטעי האבק שנמדדו ללא הפרדה בין סוג האבן או עיבוד רטוב ויבש. הריכוזים נמדדו בדגימות שטח כדי לאפיין את עוצמת פיזור האבק בתהליך.

בסדרה הבאה של הטבלאות והאיורים מוצגים ריכוזי הסיליקה הגבישית חופשית באוויר שהתקבלו בתהליכי עיבוד פרטניים. הטבלאות והאיורים מציגים את הריכוזים בפילוחים שונים עם דגש על מקטע אבק בר נשימה כדי לעמוד על פוטנציאל הפיזור של אבק מכיל סיליקה בתהליכים ופוטנציאל החשיפה של עובדים. ניתוח הפיזור בתהליכים יכול להצביע על משקלו הפוטנציאלי של כל תהליך בתרומה לפיזור הכללי של אבק ובנגזר מכך את אמצעי ההגנה הדרושים כדי לצמצם את רמות הפיזור בכל תהליך.

טבלה מס' 12: ריכוזים ממוצעים של סיליקה גבישית חופשית בשני מקטעי אבק על פי תהליך העיבוד.

סיווג תהליך	מקטע אבק	N	ממוצע גיאומטרי (מ"ג/מ"ק)	תחום ריכוזים (מ"ג/מ"ק)
חיתוך	בר נשימה	44	0.412 (10.6)	18.88 – 0.01
	כלל אבק	50	1.587 (8.7)	184.8 – 0.03
ליטוש	בר נשימה	34	0.19 (3.4)	2.57 – 0.02
	כלל אבק	35	1.03 (4.0)	16.11 - 0.03
כרסום	בר נשימה	5	16.88 (13.9)	458.8 – 1.20
	כלל אבק	7	9.64 (10.0)	800.8 – 1.50
התזת חול	בר נשימה	2*		2.37 – 0.12
	כלל אבק	2*		5.88 – 0.16

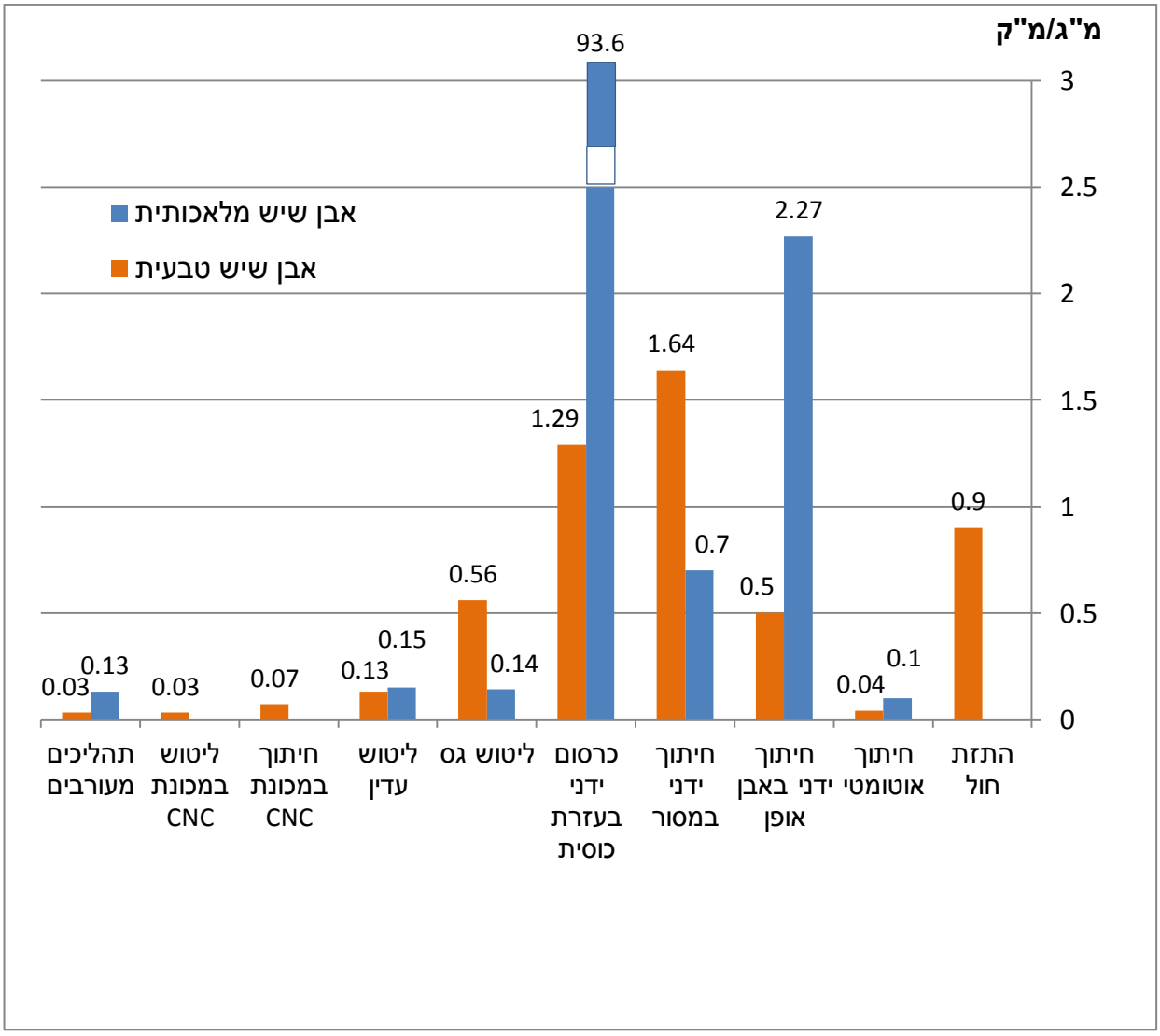
( ) - סטיית תקן גיאומטרית
*- המספר המצומצם של בדיקות עקב שכיחות מעטה של התזת חול במדגם אינו מאפשר חישוב מדדי מקום ופיזור.

איור מס' 9 מדגים את ריכוזי הסיליקה באוויר במקטע בר נשימה כתלות בתהליך ומרכיביו. מתוך התמקדות בהבדל בין סוגי האבן המעובדת אין באיור זה הפרדה בין דגימות אישיות לדגימות שטח או בין עיבוד רטוב ליבש. שוב נצפית מגמה בולטת של ריכוזי סיליקה גבוהים יותר בעיבוד אבן שיש מלאכותית בהשוואה לעיבוד אבן שיש טבעית באותם תהליכי עיבוד למעט תהליך חיתוך ידני במסור וליטוש גס. בכרסום יבש בעזרת כוסית באבן שיש מלאכותית התקבלו רמות סיליקה גבוהות בכמעט שני סדרי גודל מרמת הסיליקה באותו תהליך בשיש טבעי.

טבלה מס' 13 מציגה את ריכוזי הסיליקה הגבישית באוויר שהתקבלו עבור מקטע בר-נשימה בדגימות שטח בתהליכים פרטניים בתוך כל קבוצת תהליכים בעלת מכנה משותף. עקב מספר הדגימות הקטן בכל תהליך פרטני יש קושי להסיק מסקנה חותכת על מגמת ההבדל בין עיבוד רטוב ליבש בתהליך דומה, אך ככלל נשמרת מגמת הבדל זו בעיבוד אבן מלאכותית ואילו ההבדלים בצורות העיבוד של אבן טבעית אינם בעלי מגמה אחידה. יש

להזהר מלשפוט על פי דגימות בודדות אם כי בתהליכים המקובצים נצפה הבדל בריכוזי הסיליקה בין עיבוד רטוב ליבש. גם בהשוואה בין שני סוגי האבן גבוהים יותר ריכוזי הסיליקה בד"כ בעיבוד אבן שיש מלאכותית. ניתן לראות שוב שתהליך הכרסום הידני היבש של אבן שיש מלאכותית יוצר ריכוזי סיליקה גבוהים כמעט בשני סדרי גודל מתהליך הכרסום של אבן שיש טבעית. תהליך זה יוצר את הריכוזים הגבוהים ביותר מבין כל התהליכים גם בעיבוד רטוב. גם בתהליכי החיתוך הידניים בולט ההבדל בין אבן שיש מלאכותית לטבעית בעת שימוש באבן אופן המהווה כלי עיבוד אגרסיבי. בתהליכים יבשים יוצר הליטוש הגס ריכוז אבק גבוה יותר מזה הנוצר בליטוש עדין עקב ההבדל בניירות הליטוש שבשימוש בשני התהליכים כאשר נייר הליטוש הגס מכיל גבישי ליטוש אברזיבי גסים יותר. עיבוד רטוב ממסך את ההבדל בין תהליכי ליטוש גס ועדין.

איור מס' 9: ריכוזי סיליקה גבישית חופשית באוויר במקטע בר-נשימה בתהליכי עיבוד שיש.



*הרמה המרבית המשוקללת המותרת לחשיפה היא 0.1 מ"ג/מ"ק

טבלה מס' 13: ריכוזי סיליקה גבישית במקטע בר-נשימה (דגימות שטח) בתהליכי עיבוד פרטניים

תנאי עיבוד	תהליך	סוג אבן	משך ממוצע (דקות)	N	ממוצע גיאומטרי GM (מ"ג/מ"ק)
יבש	חיתוך במכונת חיתוך אוטומטית	מלאכותית	לא נמצא*		
		טבעית	לא נמצא*		
	חיתוך ידני בעזרת אבן אופן	מלאכותית	12	8	4.68 (4.6)
		טבעית	9	2	0.62
	חיתוך ידני בעזרת מסור	מלאכותית	30	1	0.21
		טבעית	11-12	2	1.64
	ליטוש גס	מלאכותית	70	3	0.87 (4.4)
		טבעית	89	5	0.14 (4.7)
	ליטוש עדין	מלאכותית	73	3	0.61 (3.3)
		טבעית	83	6	0.14 (4.6)
	חיתוך במכונת CNC	מלאכותית	לא נמצא*		
		טבעית	לא נמצא*		
	ליטוש במכונת CNC	מלאכותית	לא נמצא*		
		טבעית	לא נמצא*		
	כרסום ידני בעזרת כוסית	מלאכותית	12	3	93.6 (5.4)
		טבעית	25	1	1.20
רטוב	חיתוך במכונת חיתוך אוטומטית	מלאכותית	98-99	12	0.13 (3.1)
		טבעית	157	10	0.03 (1.8)
	חיתוך ידני בעזרת אבן אופן	מלאכותית	9-10	4	0.57 (1.3)
		טבעית	64	1	0.29
	חיתוך ידני בעזרת מסור	מלאכותית	26	4	0.47 (3.7)
		טבעית	לא נמצא*		
	ליטוש גס	מלאכותית	34	1	0.09
		טבעית	לא נמצא*		
	ליטוש עדין	מלאכותית	14	14	0.16 (2.2)
		טבעית	19	1	0.16

תנאי עיבוד	תהליך	סוג אבן	משך ממוצע (דקות)	N	ממוצע גיאומטרי GM (מ"ג/מ"ק)
	חיתוך במכונת CNC	מלאכותית	25-26	2	0.12
		טבעית	לא נמצא*		
	ליטוש במכונת CNC	מלאכותית	42	1	0.07
		טבעית	לא נמצא*		
	כרסום ידני בעזרת כוסית	מלאכותית	12	2	1.52
		טבעית	18	1	1.39

*- לא קיים או לא היה קיים במדגם
( ) – סטיות תקן גיאומטריות

טבלה מס' 14 מציגה את ריכוזי הסיליקה הגבישית באוויר שהתקבלו עבור מקטע בר-נשימה בדגימות אישיות בתהליכים פרטניים בתוך כל קבוצת תהליכים בעלת מכנה משותף. גם כאן מספר הדגימות בכל תהליך פרטני קטן ומעורר קושי באשר ליכולת להסיק מסקנות חותכות לגבי ההבדל בחשיפת העובדים בין התהליכים השונים. על אף שמשכי הדגימה אינם מאפשרים במקרה זה השוואה לרמות מרביות משוקללות, ניתן להצביע על פוטנציאל לחריגה מחשיפה קבילה בכל תהליכי העיבוד היבשים המתבצעים בשני סוגי אבן השיש. לעומת זאת, בחלק מתהליכי העיבוד הרטובים קיים פוטנציאל חשיפה נמוך מהרמה המרבית המשוקללת לסיליקה גם אם משך העבודה בתהליך יהיה ממושך ורצוף, אך לא נמוך מרמת הפעולה. פוטנציאל לחשיפה גבוהה יותר בעיבוד רטוב קיים בחיתוך ידני בעזרת אבן אופן ובעזרת מסור וכן בליטוש גס ובכרסום ידני בעזרת כוסית. יוצא מן הכלל הוא תהליך העיבוד הרטוב במכונת CNC שפוטנציאל החשיפה בו נמוך ביחס לתקני חשיפה. התהליך שבו התקבלו הריכוזים הגבוהים ביותר בעיבוד יבש הוא חיתוך ידני בעזרת מסור באבן שיש מלאכותית, ואילו בעיבוד יבש של אבן שיש טבעית התקבל הריכוז הגבוה ביותר בתהליך ליטוש גס. במקביל, בעיבוד רטוב התקבלו הריכוזים הגבוהים ביותר בתהליך חיתוך ידני בעזרת אבן אופן הן בעיבוד אבן שיש מלאכותית והן בעיבוד אבן שיש טבעית.

טבלה מס' 14: ריכוזי סיליקה גבישית במקטע בר-נשימה (דגימות אישיות) בתהליכי עיבוד פרטניים

תנאי עיבוד	תהליך	סוג אבן	משך ממוצע (דקות)	N	ממוצע גיאומטרי GM (מ"ג/מ"ק)
יבש	חיתוך במכונת חיתוך אוטומטית	מלאכותית	לא נמצא*		
		טבעית	לא נמצא*		
	חיתוך ידני בעזרת אבן אופן	מלאכותית	4	1	1.59
	חיתוך ידני בעזרת מסור	מלאכותית	30	4	1.94 (2.0)
	ליטוש גס	מלאכותית	162	2	0.45
		טבעית	200	4	0.136 (2.6)
	ליטוש עדין	מלאכותית	27	1	0.11
		טבעית	240	2	0.11
	חיתוך במכונת CNC	מלאכותית	לא נמצא*		
		טבעית	לא נמצא*		
	ליטוש במכונת CNC	מלאכותית	לא נמצא*		
		טבעית	לא נמצא*		
	תהליכים מעורבים	מלאכותית	222	5	0.44 (3.1)
		טבעית	227	5	0.03 (1.9)
רטוב	חיתוך במכונת חיתוך אוטומטית	מלאכותית	198	13	0.084 (2.5)
		טבעית	199	8	0.07 (3.6)
	חיתוך ידני בעזרת אבן אופן	מלאכותית	21	2	2.3
		טבעית	77	1	0.55
	חיתוך ידני בעזרת מסור	מלאכותית	16	1	0.18
		טבעית	לא נמצא*		
	ליטוש גס	מלאכותית	105	2	0.94
		טבעית	לא נמצא*		
	ליטוש עדין	מלאכותית	89	8	0.09 (2.0)
	חיתוך במכונת CNC	מלאכותית	156	2	0.04
		טבעית	לא נמצא*		

תנאי עיבוד	תהליך	סוג אבן	משך ממוצע (דקות)	N	ממוצע גיאומטרי GM (מ"ג/מ"ק)
	ליטוש במכונת CNC	מלאכותית	162	3	0.025 (1.7)
		טבעית	לא נמצא*		
	תהליכים מעורבים	מלאכותית	199	6	0.046 (1.5)
		טבעית	327	1	0.01

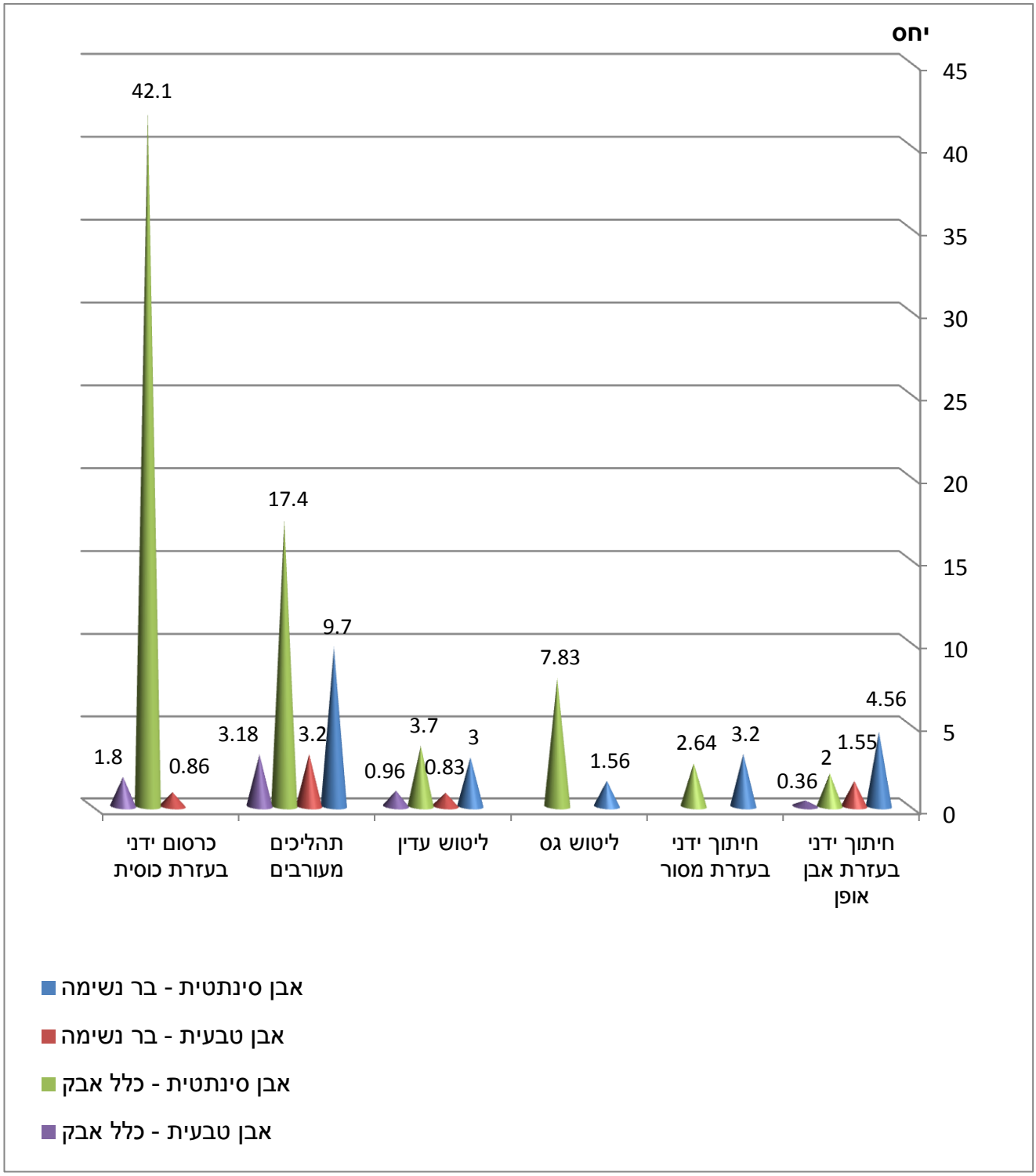
*- לא קיים או לא היה קיים במדגם
( ) – סטיות תקן גיאומטריות

**-הרמה המרבית המשוקללת המותרת לחשיפה היא 0.1 מ"ג/מ"ק

איור מס' 10 מציג את היחס בין ריכוזי סיליקה באוויר בתהליכים יבשים לבין הריכוזים בתהליכים רטובים בשני סוגי אבן השיש במקטע בר נשימה ובמקטע כלל האבק. בולט היחס במקטע כלל האבק בכרסום ידני בעזרת כוסית ובתהליכים מעורבים. לעומת זאת, במספר תהליכים באבן טבעית התקבלו ריכוזים גבוהים יותר בתהליכים רטובים מאשר ביבשים ללא הסבר מניח את הדעת.

ביטוי נוסף להבדל בין תהליכי העיבוד ניתן לראות אם משווים בין הכמויות הממוצעות של אבק מרחף הנקלטות ביחידת זמן על המסנן שמשמש לקליטת האבק. היחסים בין קצבי הקליטה של המסות משקפים את היחסיות בכוח המופעל ע"י כל כלי עיבוד על אבן השיש וכנגזר מכך את פוטנציאל הפיזור היחסי של אבק בין כלי העיבוד השונים בתהליכים. כמויות האבק ששימשו לחישוב היחס אינן כמויות האבק הנפלטות בתהליך כיוון שיעילות האיסוף של החלקיקים ע"י המסנן שונה עבור גדלים שונים של חלקיקים כתלות בקוטר האווירודינמי. כמו כן, הטיה מסויימת עלולה לנבוע מאי האחידות במרחק ובזווית של המסננים קולטי האבק ממוקד הפיזור של האבק בעת הדגימה. טבלה מס' 15 מציגה את היחס בין קצב הקליטה של מסת האבק על מסנן הדגימה בתהליך נתון לבין הקצב הנמוך ביותר בסדרת התהליכים. כרסום ידני בעזרת כוסית הוא התהליך האגרסיבי ביותר בעיבוד הן בתנאי עיבוד יבש והן בתנאי עיבוד רטוב. בעיבוד יבש יש דמיון בין קצבי הקליטה של חלקיקים מרחפים בין תהליך התזת חול ותהליכי חיתוך כשמדובר במקטע בר-נשימה של סיליקה בחלקיקי האבק. הקטנת הפיזור של האבק המרחף בתהליכי עיבוד רטובים מקטינה את היחסים בקצב הקליטה וממתנת את ההבדלים בקצבי הקליטה בין תהליכי העיבוד השונים.

איור מס' 10: יחס בין ריכוזי סיליקה באוויר בתהליכים יבשים לבין הריכוזים בתהליכים רטובים בשני סוגי אבן השיש במקטע בר נשימה ובמקטע כלל האבק.



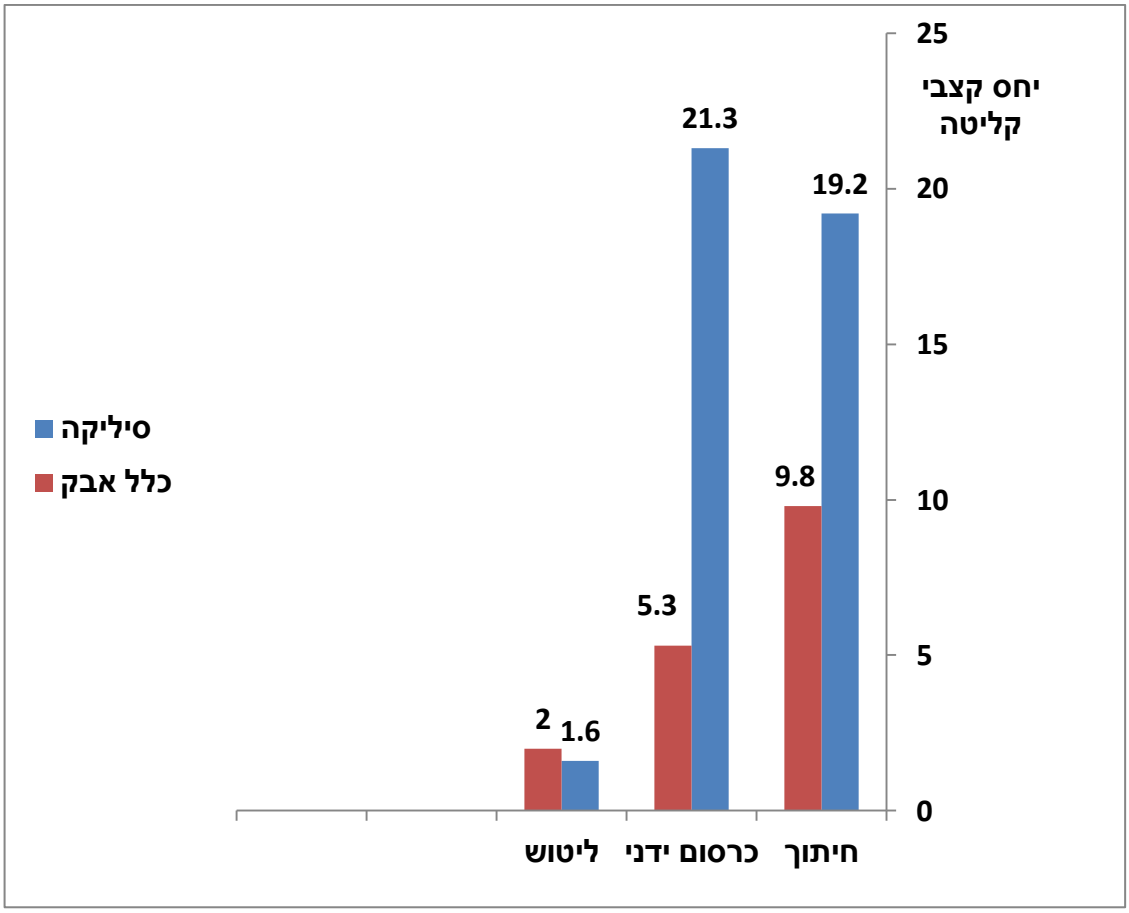
טבלה מס' 15 : קצב יחסי של קליטת מסת אבק מרחף על מסנן הדגימה

תהליך	מקטע אבק	תנאי עיבוד	קצב יחסי של קליטת מסת אבק* (מיקרוגרם/דקה)	
			סיליקה גבישית	כלל האבק
ליטוש	בר-נשימה	עיבוד יבש	1	1
חיתוך			9.2	3.9
כרסום ידני			119.4	46.4
התזת חול			9.5	2.4
ליטוש	כלל אבק	עיבוד יבש	1	1.4
חיתוך			7.3	4.0
כרסום ידני			23.8	8.6
התזת חול			4.2	1
עיבוד CNC	בר-נשימה	עיבוד רטוב	1	1
חיתוך			1.2	1.3
כרסום ידני			14	27.5
ליטוש			1.5	1.6
עיבוד CNC	כלל אבק	עיבוד רטוב	1.7	1
חיתוך			1	1.6
כרסום ידני			2.7	6.3
ליטוש			1.1	1.5

*- ביחס לתהליך בעל הקצב הנמוך ביותר

איור מס' 11 מציג השוואה בין עיבוד רטוב לעיבוד יבש בקצבי קליטה (מיקרוגרם/דקה) של מסות סיליקה וכלל אבק הנקלטות על מסנן הדגימה במקטע בר-נשימה של האבק המרחף. הקטנה משמעותית בקצבי הקליטה נמצאה בתהליכי חיתוך וכרסום כוסית בעוד שהרטבת התהליך תורמת פחות להקטנת קצב הקליטה בתהליכי ליטוש.

איור מס' 11 : השוואה בין תהליך יבש לרטוב בקצב קליטה של מסות סיליקה וכלל אבק על מסנן הדגימה במקטע בר-נשימה של אבק מרחף.



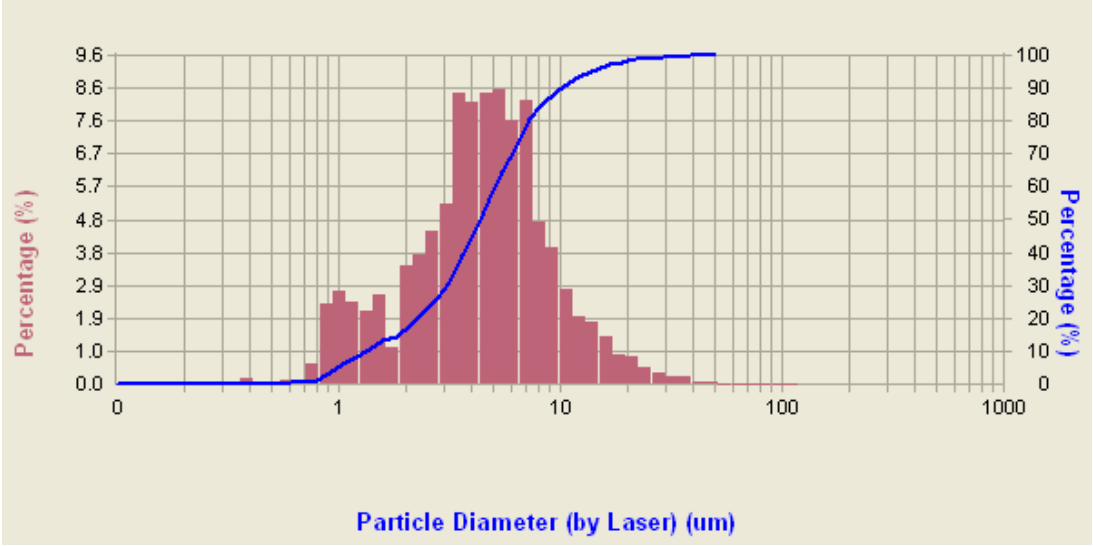
בבחינת אחד ההיבטים של הפרעות לדגימת אבק בתהליכי עיבוד שיש הונחו ראשי דגימה תואמים לאלו המשמשים לדגימת סיליקה באוויר, בסביבה קרובה ורחוקה לתהליכים בעת ביצועם. ראשי הדגימה כללו קסטות פלסטיות ומסננים דגימה מ- PVC. ראשי דגימה הונחו באזורי העבודה של תהליכי ליטוש של אבן שיש מלאכותית וטבעית בעיבוד יבש, תהליכי חיתוך של אבן שיש מלאכותית וטבעית בעיבוד רטוב, ותהליכי ליטוש של אבן שיש מלאכותית בעיבוד רטוב. נמצאו כמויות אבק שנעו בין 3 ל- 52 מיקרוגרם בדגימות של כלל אבק ומקטע בר-נשימה בשני סוגי האבן (מלאכותית וטבעית) הן בעיבוד יבש והן בעיבוד רטוב.

<u>התפלגות גודל של חלקיקים ואיפיון צורה</u>

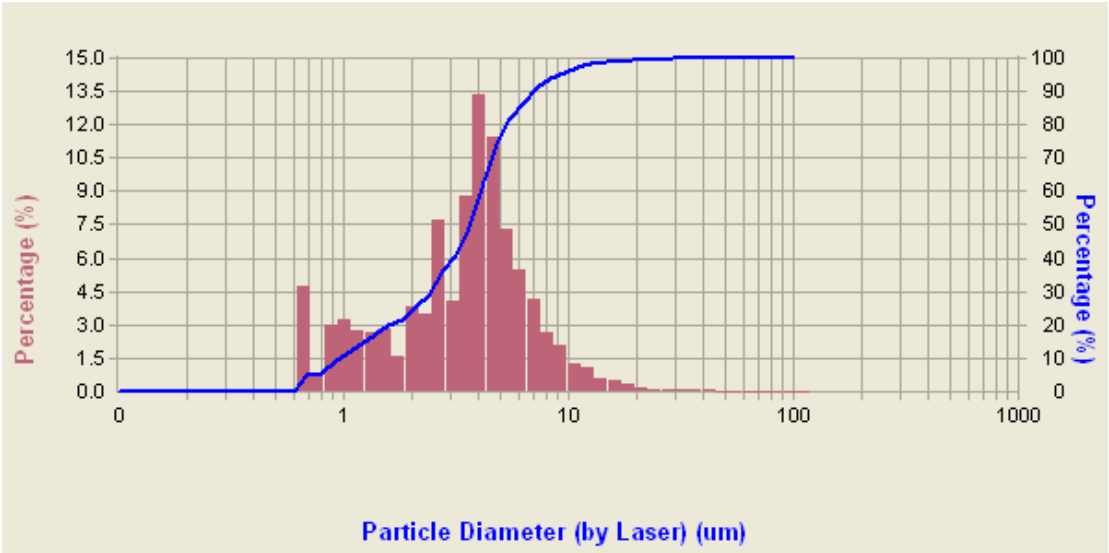
תמונת ההתפלגות של חלקיקי האבק, המתייחסת בעיקר למקטע בר-נשימה בתהליכי העיבוד של אבן שיש מלאכותית ואבן שיש טבעית דומה. התפלגויות החלקיקים מתהליכים שונים מוצגים באיורים מס' 12 – 21. האחוז הגבוה ביותר של חלקיקים נמצא במקטע הגודל 1µ - 5µ. בחלק מהתהליכים מתרכזים למעלה מ- 30% מהחלקיקים בתחום הגודל 0.1µ - 1µ. אחוז החלקיקים בתחום הגודל 5µ - 10µ מגיע בד"כ עד 20% למעט שני תהליכים. טבלאות מס' 16 ו- 17 מציגות את התפלגות הגודל במקטעי גודל פרטניים ומקובצים. איורים

מס' מראים את התפלגויות הגודל כפי שהתקבלו בצורה גרפית במכשיר הספירה המצוייד בקרן לייזר. קשה להצביע על הבדלים מאפיינים בין תהליכי העיבוד השונים, אך הסטה קלה לחלקיקים יותר גדולים מסתמנת בתהליך הליטוש הגס ובתהליך החיתוך האוטומטי במשטחי קוורץ מלאכותיים.

איור מס' 12: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך ליטוש גס – משטחי קוורץ מלאכותיים



איור מס' 13: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך כרסום ידני בעזרת כוסית – משטחי קוורץ מלאכותיים



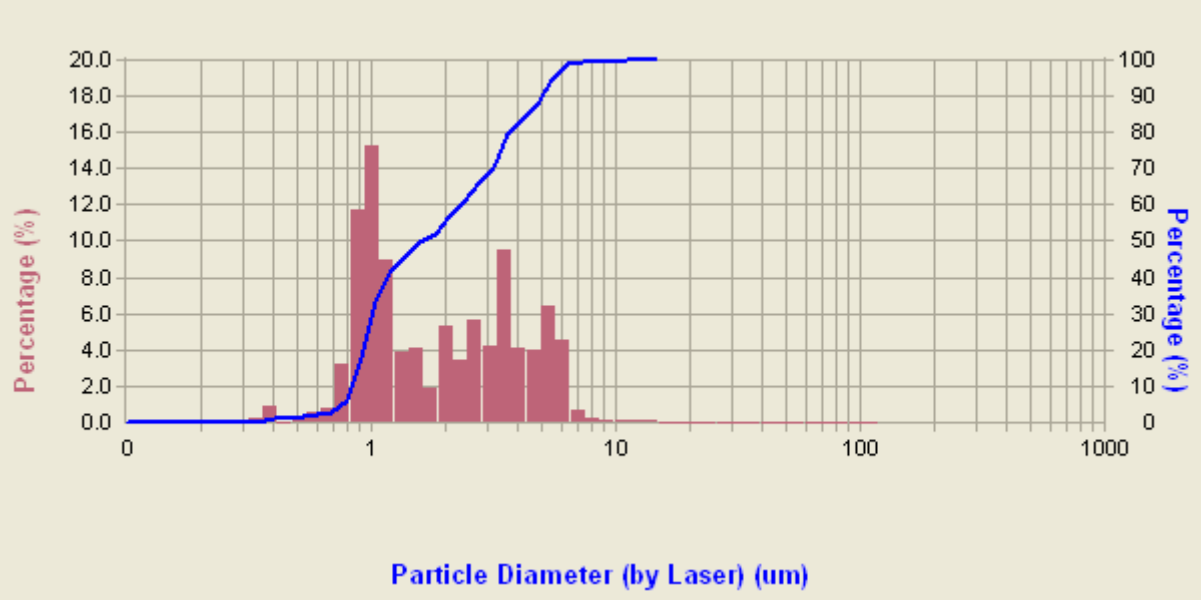
טבלה מס' 16: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליכי עיבוד של שיש

תהליך עיבוד וסוג האבן ←	ליטוש גס - מלאכותית	כרסום ידני בכוסית - מלאכותית	ליטוש גס - מלאכותית	כרסום ידני בכוסית - מלאכותית	ליטוש עדין- מלאכותית	חיתוך אוטומטי - מלאכותית	חיתוך ידני- מלאכותית	חיתוך עדין- טבעית	חיתוך אוטומטי - טבעית	ליטוש גס ועדין - טבעית
מקטע גודל חלקיקים (µM) ↓	אחוז החלקיקים במקטע הגודל (%)									
1- 0.1	6.04	11.80	32.94	33.77	10.36	2.38	37.19	29.93	38.10	31.42
2 – 1	9.89	12.17	21.92	28.64	21.28	5.58	31.46	21.79	31.38	23.18
3 – 2	13.45	14.90	13.01	11.88	17.71	6.84	12.67	9.07	12.73	9.43
4 – 3	15.85	18.59	15.22	5.90	14.17	8.84	8.59	9.00	8.72	8.46
5 – 4	13.10	18.88	6.49	4.76	12.32	6.54	5.08	7.33	4.38	8.03
6 – 5	11.58	9.32	8.70	3.00	8.33	5.25	1.97	5.44	2.10	5.31
7 – 6	8.30	4.53	1.05	2.46	5.14	14.86	1.03	4.2	1.00	3.52
8 – 7	5.88	3.07	0.24	2.62	3.11	10.81	0.64	2.75	0.62	2.58
9 – 8	3.81	1.59	0.1	1.09	1.99	15.25	0.43	2.09	0.39	2.00
10 – 9	2.26	1.43	0.09	1.35	1.38	3.35	0.25	1.26	0.21	1.10

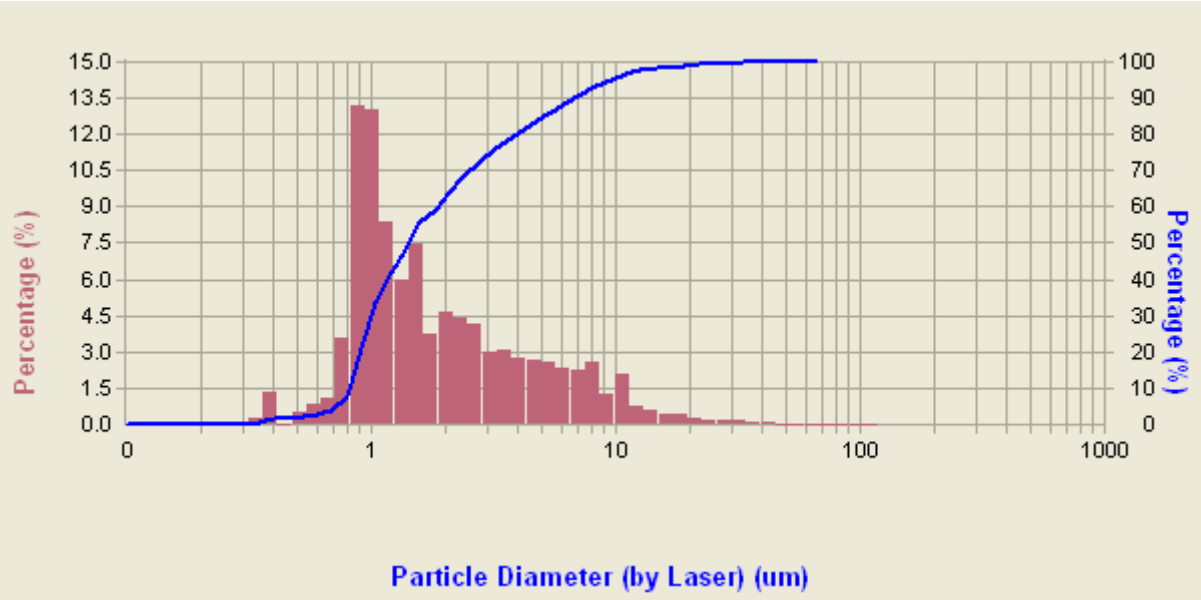
טבלה מס' 17: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליכי עיבוד של שיש

תהליך עיבוד וסוג האבן ←	ליטוש גס - מלאכותית	כרסום ידני בכוסית - מלאכותית	ליטוש גס - מלאכותית	כרסום ידני בכוסית - מלאכותית	ליטוש עדין- מלאכותית	חיתוך אוטומטי - מלאכותית	חיתוך ידני- מלאכותית	חיתוך עדין- טבעית	חיתוך אוטומטי - טבעית	ליטוש גס ועדין - טבעית
מקטע גודל חלקיקים (µM) ↓	אחוז החלקיקים במקטע הגודל (%)									
1 - 0.1	6.04	11.80	32.94	33.77	10.36	2.38	37.19	29.93	38.10	31.42
5 - 1	52.30	64.55	56.64	51.18	65.48	27.80	57.80	47.19	57.22	49.11
10 - 5	31.83	19.94	10.19	10.52	19.95	49.52	4.31	15.74	4.32	14.52
50 – 10	11.61	3.72	0.23	4.52	6.18	20.28	0.7	7.1	0.35	4.89
100 – 50	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.07

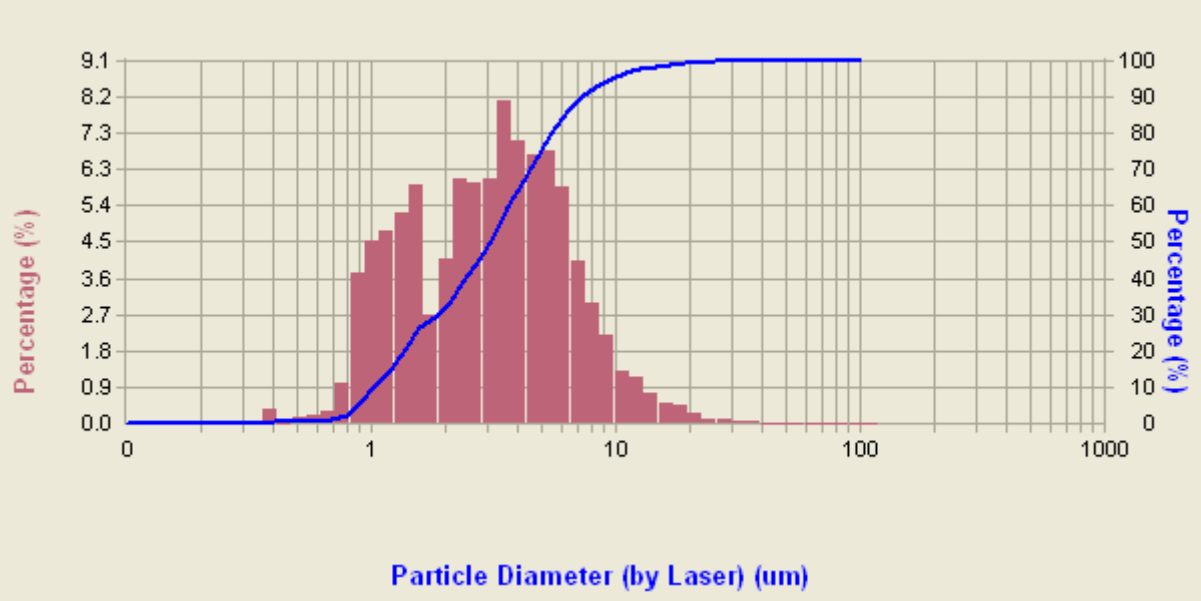
איור מס' 14: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך ליטוש גס – משטחי קוורץ מלאכותיים



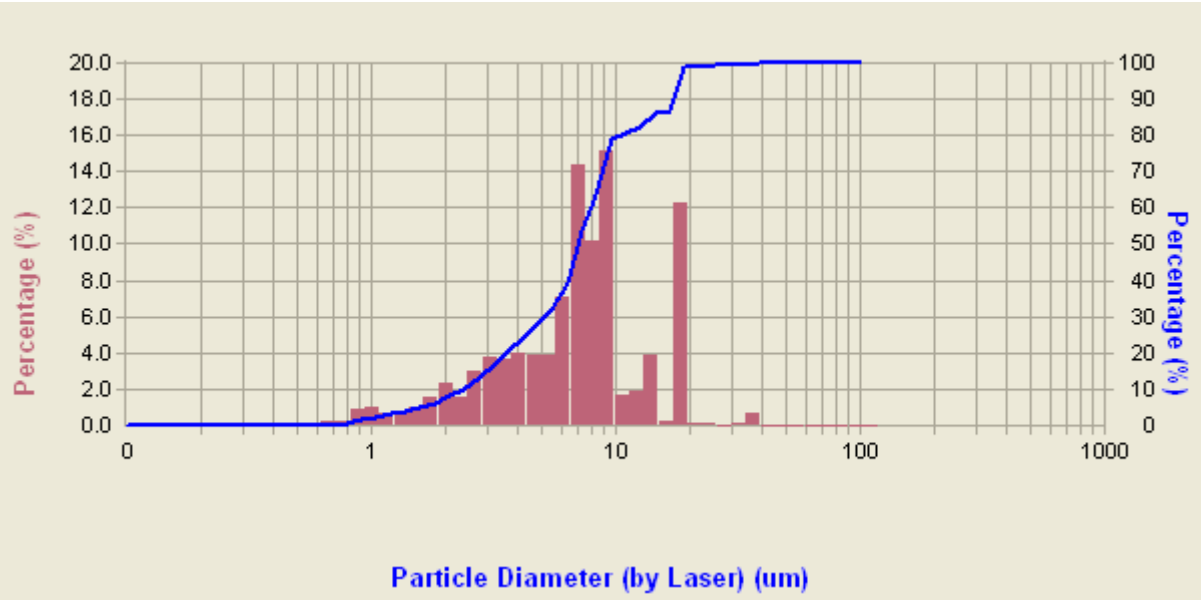
איור מס '15: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך כרסום ידני בעזרת כוסית - משטחי קוורץ מלאכותיים



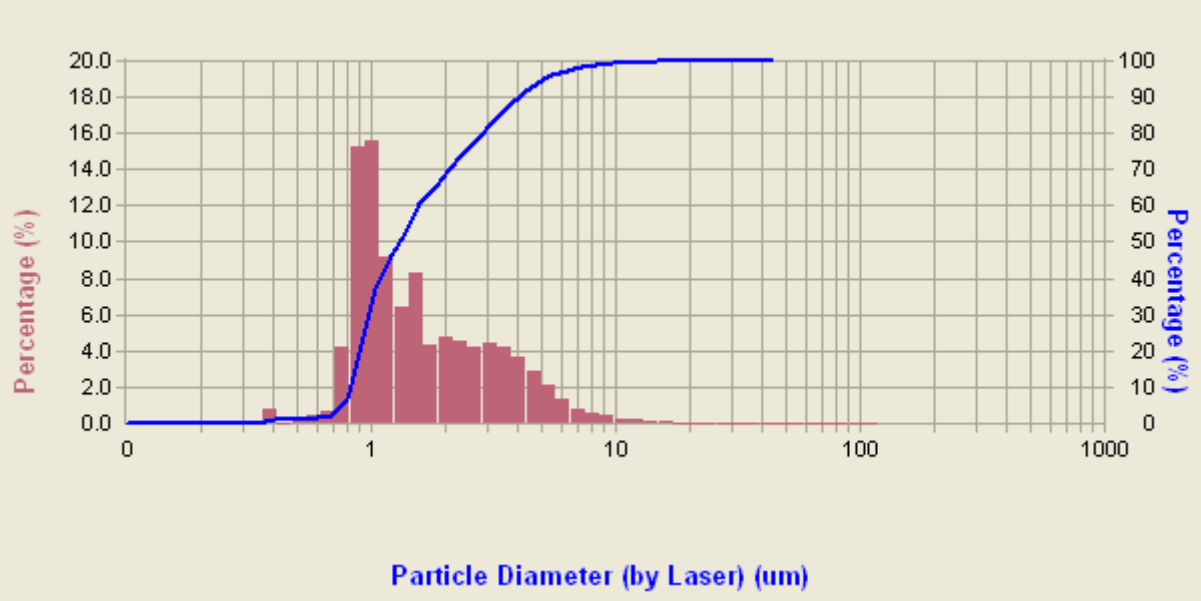
איור מס' 16: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך ליטוש עדין - משטחי קוורץ מלאכותיים



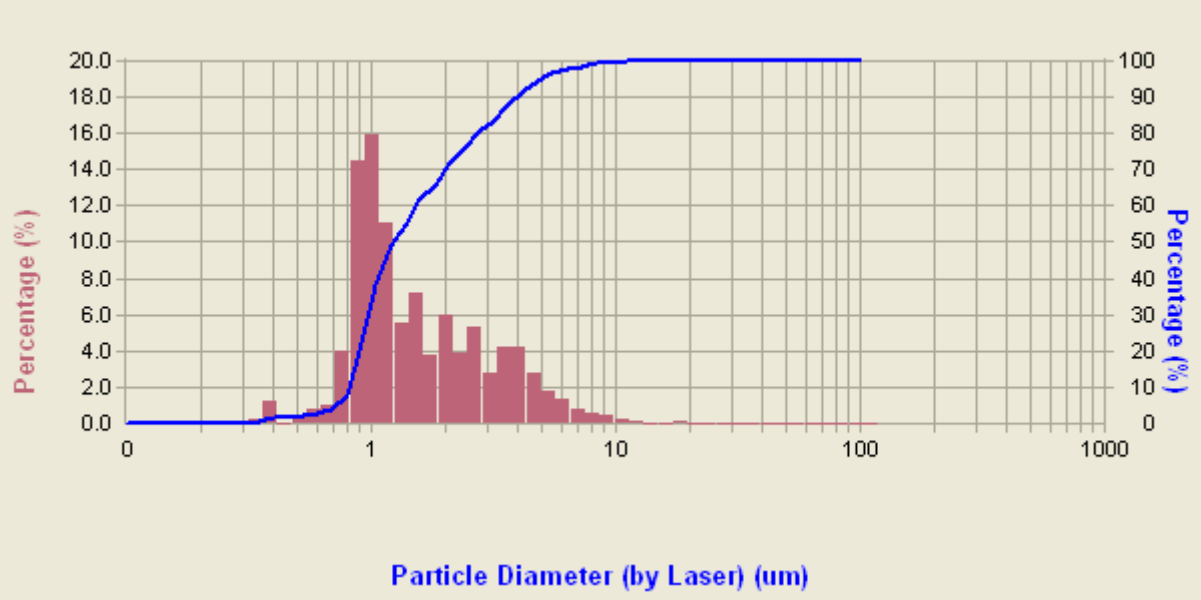
איור מס' 17: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך חיתוך אוטומטי - משטחי קוורץ מלאכותיים



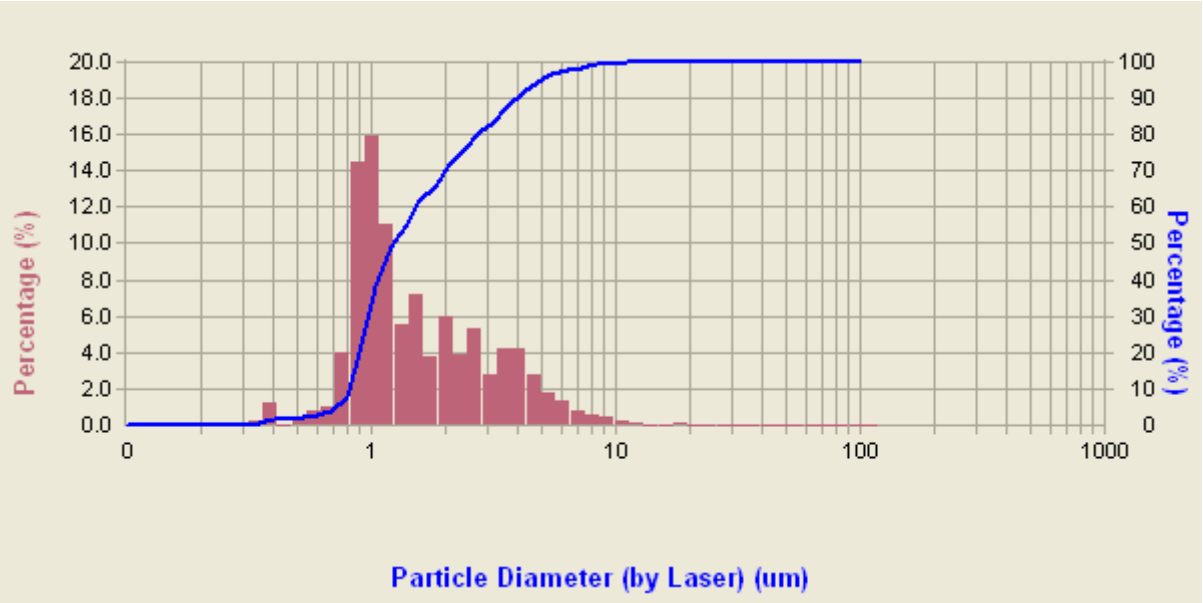
איור מס' 18: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך חיתוך ידני – משטחי קוורץ מלאכותיים



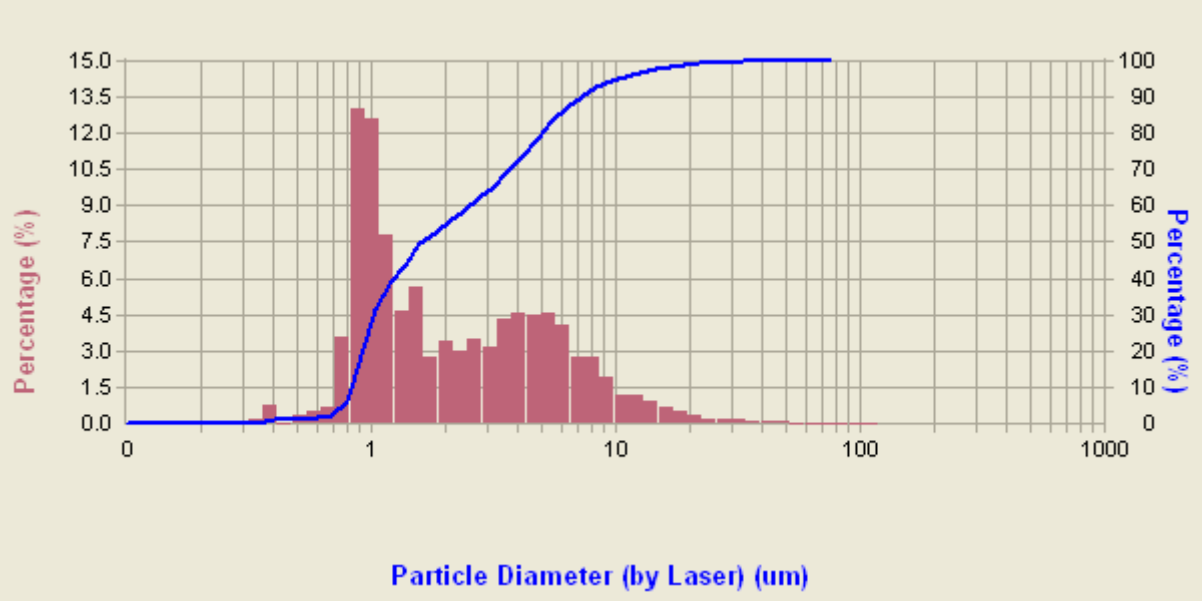
איור מס' 19: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך חיתוך עדין – אבן שיש טבעית



איור מס' 20: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך חיתוך אוטומטי – אבן שיש טבעית



איור מס' 21: התפלגות גודל של חלקיקי אבק בתהליך ליטוש גס ועדין – אבן שיש טבעית

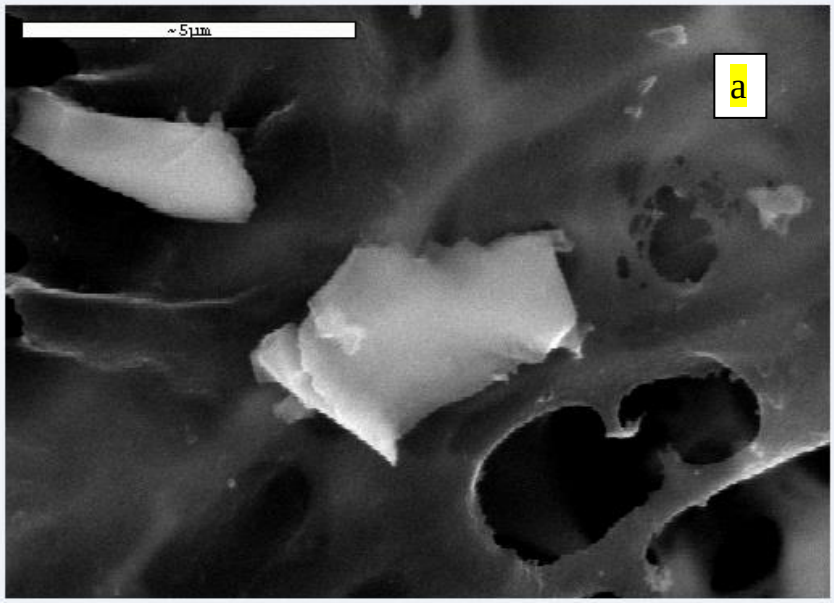


האבק הנפלט בתהליכי עיבוד של אבן שיש מכיל חלקיקים בלתי רגולריים מזוותים בעלי מספר פיאות כפי שניתן לראות בתמונות מס' 9, 10 שצולמו במיקרוסקופ אלקטרוני. בתמונה מס' 9b, הלקוחה מעיבוד אבן שיש מלאכותית ניתן לראות אגרגציה של מיקרו גבישים באותו חלקיק. גודל החלקיקים בתמונה מס' 9 קטן מ- 5 מיקרומטר ובתמונה מס' 10 החלקיק קטן

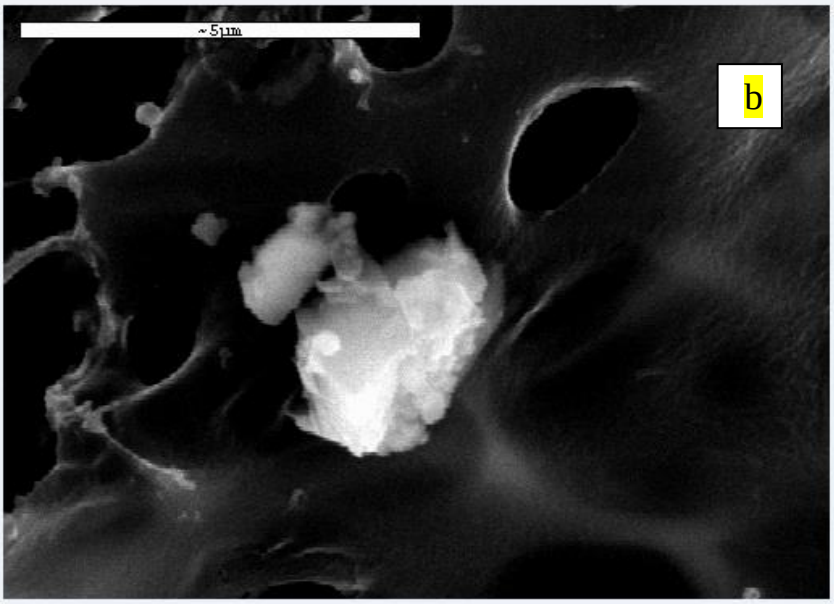
מ- 2 מיקרומטר. גדלים אלה תואמים את הגדלים שנמצאו במסגרת התפלגות הגודל של חלקיקי האבק המוצגת באיורים מס' 12 – 21. הספקטרוגרמות של החלקיקים מוצגות באיור מס' 22 השייך לתמונה מס' 9a ובאיור מס' 24 השייך לתמונה מס' 10b. ספקטרוגרמות אלו מראות נוכחות של יסוד הצורן (Si) ושל חמצן (O) שמקורם גם בתרכובת הסיליקה (צורן דו-חמצני – SiO_2). על פי היחסים המשקליים בטבלאות שבאיורים מס' 23 ו- 25 מקור החמצן הוא גם במולקולות אחרות.

תמונה מס' 9: חלקיקים בלתי רגולריים מזוותים שהתפזרו מעיבוד אבן שיש טבעית ואבן מלאכותית. a – אבן שיש טבעית. - b - אבן שיש מלאכותית.

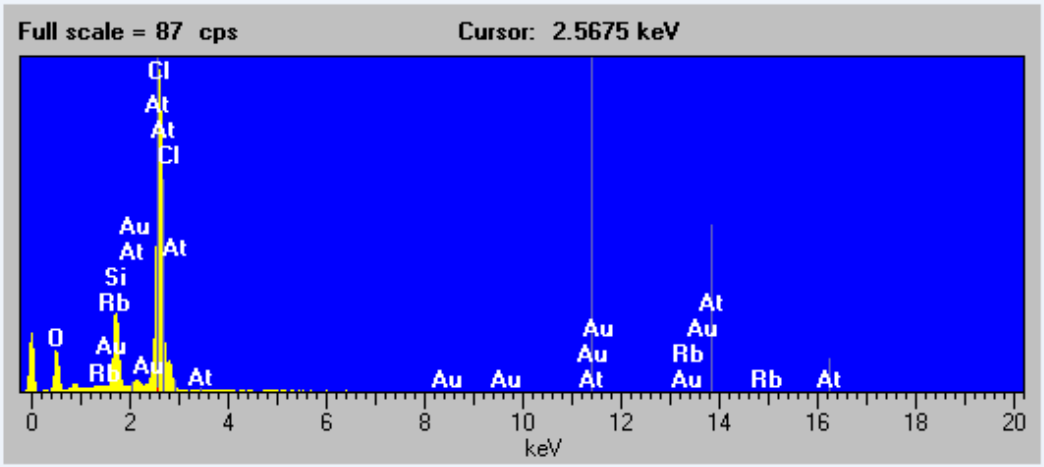
הגדלה פי 12,000



הגדלה פי 14,000



איור מס' 22: ספקטרוגרמה אלמנטרית של תכולת החלקיק בתמונה 9a.



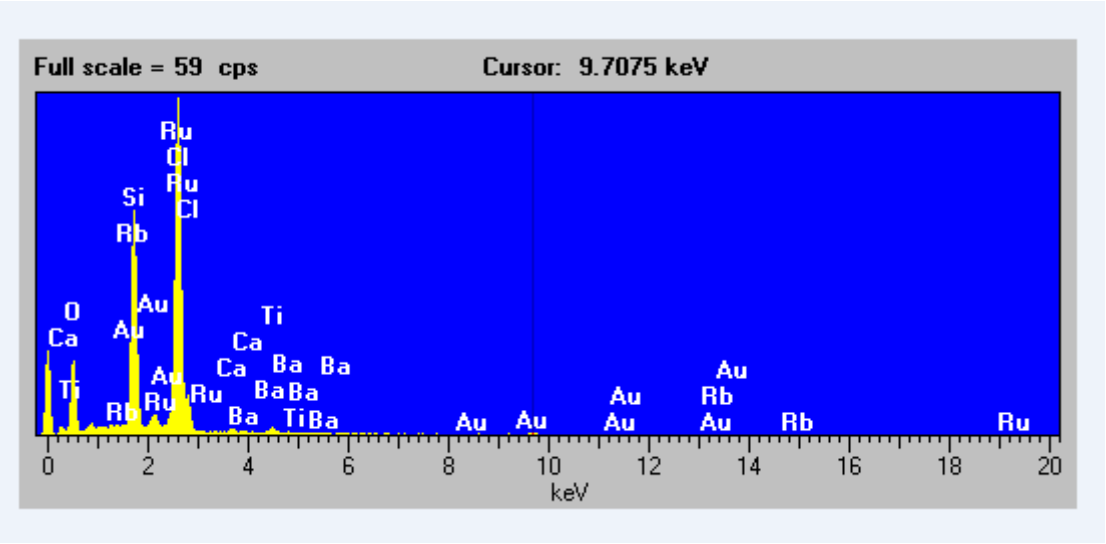
איור מס' 23: שכיחויות של יסודות חומרים בדוגמת אבק המתפזר בעיבוד אבן שיש טבעית (שיך לאיור מס' 22)

Elmt	Spect. Type	Apparent Conc.	Stat. Sigma	k Ratio	k Ratio Sigma
C K	ED	2.896	0.192	0.24133	0.0160
O K	ED	19.716	0.497	0.37026	0.0093
Si K	ED	5.240	0.320	0.11210	0.0068
Rb L	ED	7.002	0.488	0.07002	0.0048
Au M	ED	3.441	0.272	0.03441	0.0027
At M	ED	119.891	1.075	1.19891	0.0107

Elmt	Spect. Type	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.722	1.46	2.09	0.14	10.84
O K	ED	0.699	0.77	14.65	0.34	57.15
Si K	ED	1.021	1.04	2.67	0.16	5.93
Rb L	ED	0.755	1.06	4.82	0.32	3.52
Au M	ED	0.763	1.05	2.34	0.18	0.74
At M	ED	0.849	1.04	73.44	0.46	21.82
Total				100.00		100.00

* = <2 Sigma

איור מס' 24: ספקטרוגרמה אלמנטרית של חלקיק בתמונה 9b.



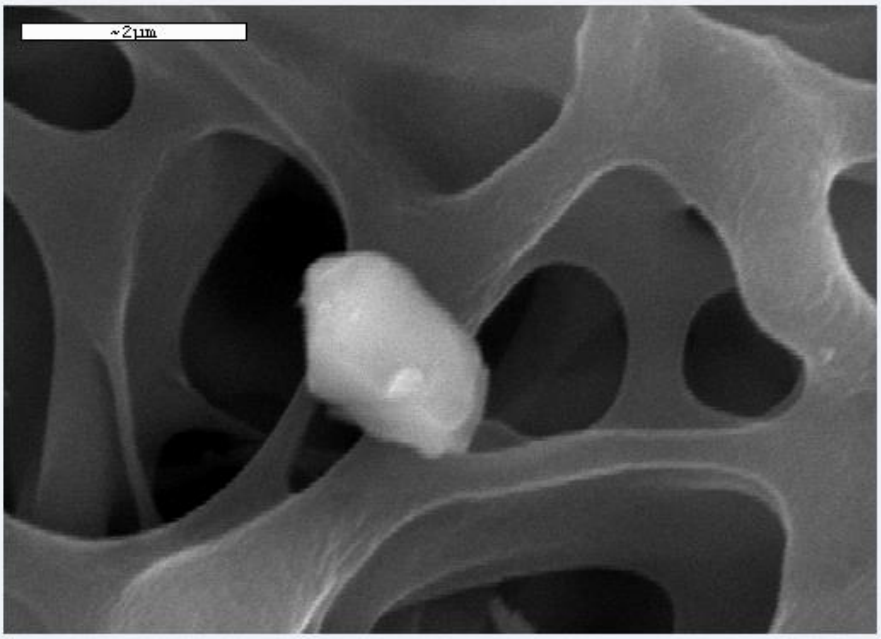
איור מס' 25: שכיחויות של יסודות חומרים בדוגמת אבק המתפזר בעיבוד אבן שיש מלאכותית (שיך לאיור מס' 24)

Elmt	Spect. Type	Apparent Conc.	Stat. Sigma	k Ratio	k Ratio Sigma
C K	ED	6.816	0.327	0.56794	0.02728
O K	ED	26.268	0.646	0.49330	0.01213
Si K	ED	9.211	0.407	0.19702	0.00872
Ca K	ED	0.635	0.100	0.01852	0.00292
Ti K	ED	0.465	0.150	0.00465	0.00150
Rb L	ED	13.415	0.620	0.13415	0.00620
Ru L	ED	55.651	0.726	0.55651	0.00726
Ba L	ED	0.821	0.317	0.01048	0.00405
Au M	ED	1.183	0.276	0.01183	0.00276

Elmt	Spect. Type	Inten. Corrn.	Std Corrn.	Element %	Sigma %	Atomic %
C K	ED	0.725	1.46	5.69	0.27	14.33
O K	ED	0.483	0.77	32.90	0.62	62.24
Si K	ED	0.996	1.04	5.59	0.24	6.02
Ca K	ED	0.917	1.00	0.42	0.07	0.32
Ti K	ED	0.843	1.00	0.33	0.11	0.21
Rb L	ED	0.744	1.06	10.90	0.47	3.86
Ru L	ED	0.792	1.03	42.48	0.56	12.72
Ba L	ED	0.788	1.01	0.63	0.24	0.14
Au M	ED	0.678	1.05	1.05	0.24	0.16
Total				100.00		100.00

תמונה מס' 10: חלקיק אבק שנפלט במהלך עיבוד אבן שיש מלאכותית.

הגדלה פי 18,000



דיון

המחקר בדק שילובים שונים של תאפייני חומר ועבודה בבתי מלאכה לעיבוד שיש כדי לעמוד על פוטנציאל הפיזור של אבק מכיל סיליקה לאוויר בסוג עבודה זה ועל פוטנציאל החשיפה התעסוקתית של עובדים. השילובים שנבדקו הם:

- עיבוד אבן שיש מלאכותית לעומת עיבוד אבן שיש טבעית
- עיבוד רטוב לעומת עיבוד יבש בכל אחד מסוגי האבנים המעובדות
- פיזור סיליקה במקטע בר-נשימה לעומת מקטע כלל האבק בכל אחד מסוגי האבנים המעובדות ובכל אחד מתנאי העיבוד: רטוב-יבש.
- חשיפה אישית של עובדים להערכת פוטנציאל החשיפה לעומת פיזור שטח בסביבת העבודה להערכת התרומה של תהליכי העבודה לפיזור ולחשיפה.

התכולה הממוצעת (באחוזים) של סיליקה גבישית חופשית באבק מאבן שיש טבעית גבוהה מהמצופה לגבי שיש מסוג חברון, אולם בהתחשב בעובדה שחלק מהשיש המעובד הוא מאבן גרניט, שבה אחוז הסיליקה הגבישית עשוי להיות גבוה מ- 30%, האחוז הממוצע שהתקבל משקף את סוגי האבן השונים בעיבוד אבן שיש טבעית. התכולה הממוצעת של סיליקה גבישית חופשית באבן שיש מלאכותית גבוהה באופן מובהק מזו באבן שיש טבעית.
לא התקבל מתאם גבוה בין ריכוזי סיליקה באבק בר-נשימה לבין ריכוזי הסיליקה בכלל האבק. יתכן והעדר מתאם גבוה נובע מהשונות הגבוהה של תכולת הסיליקה בחומר השיש המובא לעיבוד ומהעובדה שסוגי שיש שונים עשויים להמצא בתהליכי עיבוד שכנים באותו זמן. העדר מתאם נמצא גם במדידות שנעשו באוסטרליה ודווחו בדו"ח מדעי ע"י המחלקה לקשרים תעשייתיים (Department of Industrial Relations , 2005).
הממוצע הגיאומטרי של ריכוזי הסיליקה המתקבלים מעיבוד אבן שיש מלאכותית בשני מקטעי הדגימה (0.692 מ"ג/מ"ק) גבוה באופן מובהק ($p<0.0001$) מהממוצע הגיאומטרי המתקבל מעיבוד אבן שיש טבעית (0.214 מ"ג/מ,ק). מובהקות ההבדל מבחינה סטטיסטית בין ממוצעי ריכוזים באוויר ($p=0.0078$) חוזרת על עצמה גם בהבדל בין הממוצע הגיאומטרי של ריכוז הסיליקה ממקטע בר-נשימה של אבן שיש מלאכותית (0.281 מ"ג/מ"ק) וממקטע בר- נשימה של אבן שיש טבעית (0.122 מ"ג/מ"ק).
הבדל מובהק קיים גם בין עיבוד רטוב לעיבוד יבש של שיש (טבלה מס' 7) בשני סוגי האבן. ערכי המובהקות היו $p=0.0002$ עבור ממוצעים שהתקבלו בעיבוד רטוב ו- $p<0.0001$ עבור ממתוצעים שהתקבלו בעיבוד יבש. הבדלים מובהקים בריכוזים הממוצעים של סיליקה התקבלו גם עבור השוואה בין עיבוד יבש לעיבוד רטוב באותו סוג אבן שיש. ההרטבה צמצמה את הריכוז הממוצע של סיליקה באוויר פי 18 בעיבוד אבן שיש מלאכותית ופי 4 בעיבוד אבן שיש טבעית.

בתהליכים יבשים ידניים רכון העובד על מוקד התהליך ורכינה זו מקרבת אותו למוקד הפיזור. בתנאים אלה חשיפתו של העובד גבוהה יותר מאשר בתהליכים ממוכנים/אוטומטיים ובוודאי שהיא גבוהה יותר מאשר בתהליכים ידניים רטובים. הרטבת השיש בעת העיבוד מקטינה מאד את ריכוזי הסיליקה באוויר בהשוואה לריכוז הסיליקה בתהליכים יבשים וכתלות בתהליך. לדוגמה, תהליכים ממוחשבים במכונות CNC הם תהליכים סגורים ורטובים ולכן מקטינים את ריכוז הסיליקה באוויר באחד עד שני סדרי גודל בהשוואה לפיזור אבק בתהליכים יבשים.

עיבוד רטוב כאמצעי בקרה בלעדי לרמות הסיליקה באוויר אינו מבטיח צמצום ריכוזים אל מתחת לרמה המרבית המותרת לחשיפה לסיליקה בייחוד כשמדובר בעיבוד אבן שיש מלאכותית. אמנם החשיפה הממוצעת נמוכה מרמות מרביות מותרות, אך התבוננות באחוזי החריגות של רמות חשיפה לסיליקה מרמות חשיפה מרביות (איור מס' 6) מצביעה על אחוזים ניכרים של חריגה בשני סוגי האבן שהתקבלו מריכוזי סיליקה גבוהים מהממוצע שחושב. מעצם ההגדרה, אחוזי החריגה מרמת הפעולה גבוהים יותר. גם הנתונים המוצגים בטבלה מס' 7 רלוואנטיים לדיון על חשיפה משוקללת וחריגות ממנה כיוון שבבתי מלאכה לעיבוד שיש לא תמיד פעילים העובדים בתהליכים על פני כל יום העבודה ולעתים משך התהליך הוא משך המגע היומי עם אבק השיש. על פי טבלה זו כל הריכוזים הממוצעים בעיבוד יבש ורטוב בשני סוגי השיש ובשני מקטעי האבק גבוהים מרמת הפעולה. לאור הדיון המתקיים כיום על הקטנת הרמה המרבית המותרת לחשיפה בחצי ניתן לומר שהקטנת רמה זו תביא לאחוזים גבוהים מאד של חריגה מרמה מרבית משוקללת מותרת בתנאי תהליכי העיבוד והעבודה כיום, גם כאשר התהליך רטוב, וההסתברות לחשיפה נמוכה מרמת הפעולה במקרה זה היא נמוכה.

מנהל הבטיחות והבריאות התעסוקתית בבריטניה (HSE) אמד את הסיכון לתחלואה בסיליקוזיס כתלות בחשיפה המשוקללת על פני שנות עבודה והגיע לסיכון של 0.25%, 0.5% ו- 2.5% בחשיפות לרמות בגובה 0.02, 0.04 ו- 0.1 מ"ג/מ"ק, בהתאמה. בארה"ב הביא מחקר לאומדן סיכון של 0.54% לחלות בסיליקוזיס בחשיפה מצטברת על פני 45 שנות עבודה לרמה מרבית מותרת של 0.05 מ"ג'מ"ק ו- 0.75% בחשיפה מצטברת לרמה מרבית מותרת של 0.1 מ"ג/מ"ק (Park et al, 2002). התוצאות שהתקבלו במחקר הנוכחי מצביעות על סיכון גבוה יותר למספר לא מבוטל של עובדים שחשיפתם המשוקללת גבוהה מהרמה המרבית המותרת בישראל.

הסיכון היחסי העודף לסרטן ריאות כתוצאה מחשיפה לסיליקה הוערך במספר עבודות מחקר כאשר אין עדיין מסקנה אם עודף זה מתרחש גם ללא הופעת סיליקוזיס לפני התפתחות הסרטן. הסיכון העודף מחשיפה לריכוז בן 0.1 מ"ג/מ"ק (הרמה המרבית המשוקללת המותרת בישראל) במשך 45 שנות עבודה, המהווים חשיפה מצטברת של 4.5 מ"ג/מ"ק-שנה, הוערך ב1.1% - 1.7% (Steenland, 2005) מעל רמת רקע של 3% - 6%. רמות

הממוצע המשוקלל הבלתי מוטה שהתקבלו במחקר זה עבור עיבוד יבש של אבן שיש מלאכותית היו גבוהות פי שתיים מתקן החשיפה המרבית המותרת ובחישוב לינארי נראה שהחשיפה המצטברת לתקופת חיי עבודה עלולה במקרה זה להיות מושגת תוך מחצית התקופה. על פי המודל הלינארי עלול הסיכון העודף להיות מושג תוך תקופת עבודה קצרה יותר אם רמות החשיפה גבוהות יותר כפי שנכון לרמות שנמדדו מעל הממוצע שנמצא במחקר הנוכחי. במחקר נוסף הוערך הסיכון לסרטן לאורך 75 שנות חיים ב- 0.51% כתוצאה מחשיפה לרמה מרבית מותרת בת 0.1 מ"ג/מ"ק במשך 45 שנים החל מגיל 20 (Liu et al., 2013). במחקר אחר הוערך שהסיכון לעודף סרטן מחשיפה מצטברת בתחום 3.0 – 4.5 מ"ג/מ"ק-שנה עלול לעלות ב- 30% (Finklestein, 2002). בתקנון לעישון, הוערך הסיכון היחסי העודף לסרטן ריאות בקרב מקבלי פיצויים לתחלואה מקצועית ב- 1.90 במובהקות גבוהה (Berry, G., Rogers. A. and Yeung, P., 2000 and 2001).

לאחר איפיון תהליכי העיבוד ובחינת פרופיל העבודה בבתי המלאכה הוסק שניתוח המגמה של חשיפת העובד המשוקללת על פני תהליך עיבוד מסויים עדיף על פני הצגת חשיפה משוקללת על פני יום עבודה בן 8 שעות. הסיבות לכך הן:

א. שונות גבוהה במשכי הזמן של ביצוע תהליכי עיבוד שונים.
ב. שעות עבודה בלתי קבועות ולעתים קצרות מ- 8 שעות.
ג. ביצוע תהליך עיבוד נתון ע"י עובדים המתחלפים ביניהם ביום עבודה תוך שונות אישית באופן העבודה ובמאמץ המושקע.
ד. מעורבות עובדים בפעילויות המתבצעות מחוץ לאתר העיבוד במשך יום העבודה (הרכבות אצל לקוחות).
ה. לא ניתן היה להניח בוודאות שבמשך הזמן המשלים את עבודת העובד ל- 8 שעות העובד אינו חשוף לסיליקה, כיוון שהיה קושי לקבל מידע על אופי העיסוק מחוץ לבית המלאכה בשעות המשלימות ל- 8 שעות עבודה.
ו. הערכת חשיפה משוקללת על פני יום עבודה ממסכת אפשרות לבדוק שיאי חשיפה גבוהים יותר מפי 5 מהרמה המרבית המשוקללת על פני תהליך עקב הפסקות העבודה בין עיבוד אחד למשנהו.
ז. מטרת המחקר היא לבדוק את עוצמת הפיזור של האבק כדי להתאים לו בהמשך אמצעי בקרה מתאים. שקלול הריכוזים על פני 8 שעות מקטין את רמות הפיזור המתקבלות על פני זמנים קצרים ומעוות את ההתאמה המיטבית של אמצעי ההגנה לרמות אלו.

חלק מתהליכי העיבוד הם קצרים ונמשכים דקות בודדות או פרק זמן קצר. התהליכים הקצרים מתאפיינים בשימוש בכלי עיבוד אגרסיביים ולכן בפרקי זמן ביצועם מזנק ריכוז

הסיליקה באוויר בייחוד אם שיטת העיבוד יבשה. דווקא התהליכים הקצרים הם יבשים בהרבה מקרים לעומת תהליכים אוטומטיים או ממוכנים ממושכי זמן שבהם ניתן להרטיב את האבק כדי למנוע את פיזורו. מיצוע ריכוזי שיא קצרי מועד על פני משמרת עבודה מלאה, שבחלקה העובד אינו חשוף, מעוות אותם מאד וגורע מיכולת ההתרעה שלהם לגבי חשיפה חריגה. אם לדוגמה, תהליך עיבוד נמשך 5-10 דקות ובמהלכו התקבל ריכוז סיליקה גבוה למעלה מפי 10 מהרמה המרבית המשוקללת עלול הריכוז הממוצע המשוקלל על פני יום עבודה להיות נמוך מהרמה המרבית המשוקללת אם לא מתרחשת חשיפה נוספת ביום העבודה. גם אם תהליך העיבוד הקצר חוזר על עצמו מספר פעמים, עדיין קיימת סבירות לעיוות גדול מאד של תקרת החשיפה אם בשאר חלקי היום החשיפה נמוכה מאד , או מתבצע תהליך עיבוד, כגון ניסור רטוב ממוכן שגורם לחשיפה נמוכה. יתרה מכך, מספר גדול של תוצאות דגימות אישיות (28%) על פני תהליכי עיבוד קצרים הראה רמת חשיפה גבוהה מתקרת חשיפה הגבוהה פי 5 מהרמה המרבית המשוקללת. תקרת חשיפה זו מהווה קריטריון מנחה מקצועי להגבלת חשיפה לחומרים שלא נקבעה להם רמת חשיפה מרבית לזמן קצר (TLV-STEL). רמה כזו לא נקבעה עבור סיליקה גבישית חופשית. כאשר תקרת החשיפה נפרצת, תועלתה של החשיפה המשוקללת על פני יום העבודה היא מזערית ובעצם חשיפתו של העובד חריגה גם אם היא נמוכה מהרמה המרבית המשוקללת. עיוות אפשרי נוסף נובע מחריגה מקריטריון אחר להערכת חשיפה ולפיו יכול עובד להחשף עד לפרק זמן של 30 דקות לתחום הגבוה בין פי 3 לבין פי 5 מהרמה המרבית המשוקללת בתנאי והחשיפה המשוקללת ל- 8 שעות לא חרגה מהרמה המרבית המשוקללת. מספר קטן של תוצאות דגימות אישיות (2.3%) מראה חריגה מקריטריון זה בעיקר עקב חריגה מ- 30 דקות עבודה בתהליך בזמן שהרמה הממוצעת המשוקללת על פני יום עבודה לא חרגה מהרמה המרבית המשוקללת. הדיון כאן מצביע על חסרון העלול להיווצר בהערכת הסיכון של עובדים בעיבוד שיש עקב הערכת חשיפה משוקללת על פני משמרת עבודה, אעפ"י שהערכה כזו נדרשת על מנת להשוות את החשיפה לתקן החשיפה המרבית המשוקללת.

מהיבט החוק והפיקוח על עובדים מושם דגש בכל זאת על הערכת החשיפה המשוקללת על פני יום עבודה. התוצאות במחקר מצביעות על הבדלים בחשיפה זו כתלות בסוג האבן המעובדת ובתנאי ביצוע התהליך. בעיבוד אבן שיש מלאכותית נבדלת החשיפה המשוקללת לסיליקה באבק שעבר הרטבה באופן מובהק מאבק בתהליכים יבשים הן במקטע כלל האבק והן במקטע בר הנשימה (טבלאות מס' 8, 9). לעומת זאת, בעיבוד אבן טבעית לא נמצא הבדל מובהק בין חשיפה משוקללת בתהליכים רטובים לבין זו בתהליכים יבשים, כנראה עקב האחוז הנמוך של סיליקה באבן, אם כי אי המובהקות התקבלה במדגם קטן.

בתהליכי עיבוד יבשים נמצא הבדל מובהק בחשיפה לסיליקה בין אבן שיש מלאכותית לבין אבן שיש טבעית הן בחשיפה למקטע כלל האבק והן בחשיפה למקטע אבק בר-נשימה

(טבלה מס' 9), בעוד שהבדל זה אינו קיים בתהליכי עיבוד רטובים, עובדה המצביעה על כך שהרטבה מפחיתה מאד את פיזור החלקיקים של האבק בכל הגדלים.
השוואת רמות החשיפה לרמות מרביות מותרות, תוך התייחסות למקטע בר-נשימה בלבד ולממוצע האריתמטי הבלתי מוטה (של ההתפלגות הלוג-נורמלית) כמדד מייצג יותר של הקשר בין חשיפה לסיכון, מראה שהרטבת התהליך עשויה להביא את החשיפה הממוצעת המשוקללת אל מתחת לרמה המרבית המותרת על פי תקן החשיפה הישראלי הקיים, אך אינה מבטיחה את צמצום החשיפה הממוצעת אל מתחת לרמת הפעולה על פי תקן זה. כאשר מדובר על חשיפה ממוצעת יש לזכור שחלק מהערכים הפרטניים הגבוהים מהממוצע חורגים מרמות פעולה וגם מרמות מרביות משוקללות.
תמונת המצב שונה אם שיפוט החשיפה נעשה על פי מקטע כלל האבק תוך התבוננות בממוצע האריתמטי הבלתי מוטה. על פי התוצאות במקטע זה, ההסתברות לחשיפה מעל הרמה המרבית המותרת בתהליכים רטובים גבוהה. במחקרים אחרים בד"כ לא נבדק מקטע כלל האבק בעיבוד שיש ולכן השוואת החשיפה לסיליקה בין מקטע זה למקטע בר-נשימה חסרה. השוואה כזו נעשתה במחקר אירני (Golbabahei et al., 2004) לגבי עבודה במחצבה ונמצא בה שרמת הסיליקה בכלל האבק היתה גבוהה בממוצע פי 8 מזו במקטע בר-נשימה עבור סוגים שונים של כלי עבודה. בכל מקרה, עצם השימוש במקטע כלל האבק לקביעת עוצמת החשיפה והשוואתה לתקני חשיפה יוצר עיוות העלול להוביל למסקנות מטעות.
באופן בלתי מפתיע, החשיפה המשוקללת לסיליקה בתהליכים יבשים חורגת מרמות מרביות מותרות בכלל האבק בשני סוגי השיש ובמקטע בר-נשימה באבן השיש המלאכותית, אבל גם כאן שונה משמעות השיפוט של החשיפה הממוצעת כתלות במקטע האבק הנלקח להשוואה. התבוננות בתרומת התהליכים הפרטניים לפיזור אבק מכיל סיליקה ולחשיפת העובד מראה שלתהליכים שונים יש משקל שונה בתרומה (טבלאות מס' 11-14, איורים מס' 8-10).
התהליכים האגרסיביים תורמים תרומה נכבדה ביותר לריכוז הסיליקה באוויר ומשפיעים בכך על הממוצע המשוקלל גם אם משכם קצר. תהליכים כגון כרסום ידני בעזרת כוסית וחיתוך באבן אופן או ניסור יבש עשויים לגרום לחריגה מהרמה במרבית המשוקללת גם אם הם מתבצעים רק מספר פעמים ביום על פני משך זמן קצר. קצב הקליטה של אבק בתהליכים אלו על גבי מסנן הדגימה הוא גבוה בעיקר בתהליכים יבשים (טבלה מס' 15, איור מס' 11). הדעת נותנת, שבקרה ממוקדת של תהליכם אלה תביא להקטנה משמעותית ברמות החשיפה עד לחשיפה קבילה.
שימוש במקטע כלל האבק כמדד לחשיפה לסיליקה מהווה ברירת מחדל להערכה זו ומבחינה היסטורית היה קיים עד לאחרונה בעיקר עקב מגבלות טכניות וטכנולוגיות של שיטת הבדיקה. במדינות אירופה, בארה"ב ובמדינות אחרות בעולם מתבססת הערכת החשיפה שנים רבות על מקטע בר-נשימה בלבד מהטעם שההשפעות הבריאותיות של סיליקה

מתמקדות באזור הנשימה בלבד, קרי הריאות והסימפונות הטרמינליים (אזור חילוף הגזים). מינהל הבטיחות שינה את הנחיותיו במהלך שנת 2014 והורה לערוך ניטור סביבתי-תעסוקתי לסיליקה במקטע בר-נשימה בלבד. עד לשינוי ההנחיות בוצעו דגימות רבות של סיליקה במקטע כלל האבק ע"י בודקים מוסמכים ולמעשה בשנים קודמות היו אלה עיקר הדגימות. המחקר, שהחל זמן רב לפני שינוי ההנחיות, שם לו למטרה לבדוק את ההבדלים בין שני המקטעים והשלכות הבדלים אלה על הגדרת החשיפה התעסוקתית ואפשרויות לצמצומה ועל רלוואנטיות של ביצוע ניטורים סביבתיים למקטע כלל האבק. עקב היסטוריית הניטור בישראל ועל אף המסקנה שניטור כלל האבק עלול לעוות את הסיכון מחשיפה, תמונת החשיפה וההשוואה בין מקטע כלל האבק לבין מקטע בר-נשימה מספקת מידע על חשיפה לסיליקה בעבר ובהווה ועשויה לתמוך בחיפוש קשר סיבתי בין חשיפה לתחלואה, המסתמך על העבר, כיוון שתקופת החביון של מחלת הסיליקוזיס היא ארוכה. בראייה עתידית יש מקום לבטל את הניטור של הסיליקה בכלל האבק.

מציאת כמות של אבק בדגימות שבהן לא בוצעה שאיבת אוויר והן נלקחו מתהליכים שונים ואזורי עבודה מצביעה על אפשרות לחדירת אבק למסנני הדגימה כתוצאה מפיזור רב כוח של חלקיקים ע"י תהליכים אלה. גם התזת המים ויצירת רסס עדין עלולה לגרום לחדירת טיפות מכילות אבק למסנן הדגימה. שמירת נקיון הקסטה, שבה נתון המסנן, לפני האנליזה ובמהלכה מבטלת אפשרות של זיהום מקרי במהלך הטיפול בדגימה. במסננים שהונחו בסביבה הקרובה לתהליכים בעת ביצועם נמצאו כמויות אבק שנעו בין 3 ל- 52 מיקרוגרם בדגימות של כלל אבק ומקטע בר-נשימה בשני סוגי האבן (מלאכותית וטבעית) הן בעיבוד יבש והן בעיבוד רטוב. ממצא זה צריך להבדק יותר כיוון שנוכחות אבק מכיל סיליקה בדגימות ללא שאיבת אוויר עלול להוסיף מסת אבק לדגימה ולעוות את התוצאה המחושבת של ריכוז הסיליקה באוויר.

להבדלים ברמת החשיפה לסיליקה בין מקטע כלל האבק למקטע בר-נשימה יש גם השלכה על האפקטיביות של הגנת העובד בתהליכים. באופן ממוצע, הרטבת תהליך יכולה לצמצם את החשיפה המשוקללת לסיליקה לרמות של סיכון קביל בעבודה באבן שיש מלאכותית ובוודאי בעבודה באבן שיש טבעית, אך כתלות בסוג התהליך ובתנאי עבודה משתנים וכמויות שיש משתנות בעבודה, אין הרטבת תהליך יכולה למנוע באופן מוחלט חשיפות חריגות וחלק מהעובדים ישאר חשוף מעל המותר. הרטבה אינה מונעת חריגות בחשיפה לכלל אבק בעבודה באבן מלאכותית, אך כאמור מקטע כלל האבק כולל מסה גבוהה של חלקיקים שאינם חודרים לריאות ולכן אינם מהווים סיכון לסיליקוזיס. בהשוואה לאפקט ההרטבה על החשיפה, עבודה בשיטות עיבוד יבשות גורמת לחשיפות חריגות לסיליקה בקרב אחוז גבוה של העובדים באבן שיש מלאכותית, אך גם בעבודה באבן שיש טבעית יהיו למעלה מ- 10% מהעובדים חשופים מעל הרמה המרבית המשוקללת. שיפוט על פי מקטע כלל האבק יוביל

לדרישה לאמצעי בקרה יותר דרסטיים כדי להביא את הסיכון לסיכון קביל בהשוואה לשיפוט על פי מקטע בר-נשימה.
היראכיית אמצעי הבקרה ההנדסית המומלצת להפחתת ריכוזי הסיליקה באוויר בתהליכי העיבוד, מהפחתה גבוהה ביותר לנמוכה ביותר, כפי שבאה לידי ביטוי בממצאי מחקר זה היא:

1. עיבוד רטוב במכונות ממוחשבות (CNC).
2. עיבוד רטוב מלווה ביניקה בו-זמנית של אבק.
3. עיבוד רטוב
4. יניקה מקומית צמודה לכלי העיבוד בזמן הפעלתו.

כהשלמה, או כפיצוי על העדר יכולת של אמצעי הנדסי להקטין את הריכוזים לרמות קבילות, יש להשתמש בציוד מגן אישי. כפי שהוצג במחקר זה, נשמיות חד פעמיות להגנה על הנשישמה אינן מסוגלות לספק הגנה זו בחלק רב של המקרים ולכן דרושה הגנה שמקדם ההגנה שלה האו לפחות 50 וגבוה מזה. אמצעים העונים על דרישה זו הם מסיכות שלמות (עם או ללא חיבור לקו אוויר או מפוח מסנן), או חצי מסיכה מחוברת למפוח מסנן או קו אוויר, או ברדס הדוק מחובר למפוח מסנן או קו אוויר. חלק מאמצעים אלה צריך להשקל תוך התייחסות לנוחיות העובד ויכולתו לבצע את תהליך העיבוד.

פרק ישומי

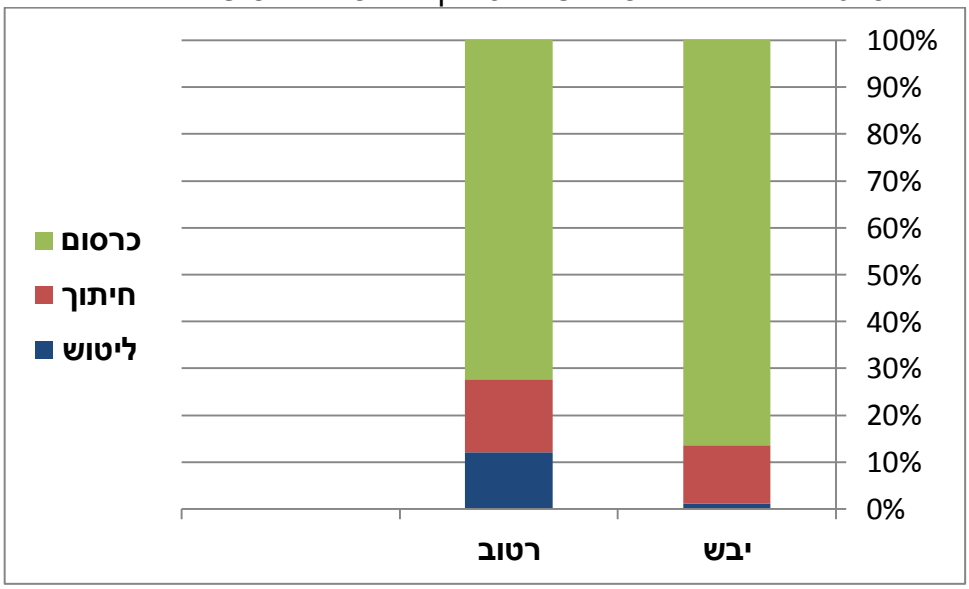
פרק זה מסכם מסקנות ותובנות מהמחקר וממליץ על יישום שינויים הן מבחינת ההתייחסות לעיבוד שיש ותהליכי העיבוד והן מבחינת התייחסות המחוקק והרגולטור לחשיפה התעסוקתית.

המחקר מצביע על המסקנות והתובנות הבאות שבעקבותיהן נחוץ יישום שינויים וניתנות המלצות:

1. ריכוזי הסיליקה באוויר גבוהים הרבה יותר בעיבוד שיש מאבן מלאכותית מאשר בעיבוד שיש מאבן טבעית. מסקנה זו מאפשרת הבדל בהתייחסות לאמצעי הבקרה ההנדסיים בשני סוגי העיבוד. אמצעי הבקרה בעיבוד אבן שיש מלאכותית צריכים להיות יותר דרסטיים מאשר האמצעים בעיבוד אבן טבעית. למעט התזת חול שאינה ניתנת להרטבה, הרטבת תהליכי עיבוד בעת עיבוד שיש טבעי עשויה להספיק כדי להביא את ריכוזי הסיליקה באוויר לריכוזים קבילים בתנאי ורמת החשיפה המשוקללת המרבית לסיליקה גבישית חופשית אינה משתנה. אם תופחת רמה זו לחצי, קיימת הסתברות שעיבוד רטוב לא יספיק בכל התהליכים להקטין את ריכוז הסיליקה אל מתחת לרמה המרבית המותרת, כל שכן אל מתחת לרמת הפעולה.
2. עיבוד רטוב אינו מספיק בתהליכי עיבוד של אבן שיש מלאכותית כדי לספק הגנה מתאימה לפחות ל- 95% מהעובדים גם כלפי תקן החשיפה הנהוג כיום למקטע בר-נשימה. בתנאים אלה, יש להפעיל אמצעי בקרה נוסף או לשנות את טכנולוגיית העיבוד
3. הפעלת אמצעי בקרה הנדסיים קפדניים ומשמעותיים בחלק מהתהליכים יותר מאשר בתהליכים אחרים תהיה תועלתית ביותר להקטנת ריכוזי הסיליקה באוויר ותתרום להפחתת הרמות המשוקללות עד לרמות קבילות. התהליכים שבהם צריכים אמצעים אלה להיות מופעלים הם תהליכי כרסום קצרים ותהליכי חיתוך. איור מס' 26 מראה את התרומה היחסית באחוזים של תהליכי כרסום וחיתוך בהשוואה לתהליכי ליטוש. הרטבת תהליך מצמצמת את ההבדל בין התהליכים ברמות האבק המתפזר כיוון שהיא גורמת להקטנה רוחבית של הריכוזים בכל התהליכים, אם כי לא מספיק בחלקם.
4. ניטור סביבתי-תעסוקתי של מקטע כלל אבק על מנת לבדוק את חשיפת העובד אינו מוצדק כיוון שאינו מייצג את מקטע האבק המהווה סיכון לסיליקוזיס ובנוסף הוא עלול לסתור את מסקנות הניטור של מקטע בר-נשימה. מומלץ, איפוא, לעגן את בדיקת המקטע בר הנשימה כמקטע מייצג בלעדי של החשיפה.

5. דגימה אישית אמנם היא הדגימה שמטרתה לקבוע את חשיפת העובד, אולם יש מקום להשתמש בדגימות שטח כאשר המטרה היא לנתח את תהליכי העיבוד הפרטניים במטרה לקבוע את תרומתם לפיזור האבק ולהתאים להם אמצעי בקרה. יתרה מזו, ניטור באמצעות דגימות שטח יכול ללמד על פיזור אבק מחלל עבודה אחד לחללי עבודה שכנים ועל יעילותם של אמצעי ההגנה. ניידות העובדים בין התהליכים והפסקה ברצף העבודה אינה מלמדת על פוטנציאל הפיזור של האבק בתהליכים אם מסתמכים על דגימות אישיות. בדיקת השטח צריכה להיות בעלת מטרה יעודית.

איור מס' 26: תרומת תהליכים לפיזור סיליקה גבישית ולחשיפה



6. בעת ביצוע סקר גיהותי מקדים בבית מלאכה לעיבוד שיש יש לתעד היטב את משכי הזמן שעובד מעורב בתהליך ביחס למשכי הזמן שאינו מעורב, או אינו נמצא באזורי העבודה. הסתבר שההבדל בין פרק הזמן המושקע בעבודה רצופה או לסירוגין בתהליכי עיבוד לבין פרקי זמן שבהם העובד אינו במגע עם החומר עשוי להיות קטן, כלומר פרקי העדר החשיפה עשויים להיות ממושכים וקרובים לפרקי הזמן בהם העובד במגע עם החומר. מצב זה עלול ליצור עיוות בהערכת החשיפה אם מתבססים על חשיפה יומית משוקללת. פרקי זמן קצרים שבהם הריכוז המשוקלל הנמדד גבוה יותר מפי 5 מהרמה המרבית המשוקללת הם בעלי הסתברות הופעה בלתי זניחה בחלק מהתהליכים וממצא זה עלול להיות ממוסך אם מתבססים על מדידת רמה משוקללת יומית בלבד. מומלץ, איפוא, לנתח היטב את מיתאר העבודה והחשיפה כדי לתכנן את הניטור הסביבתי באופן הנכון. לחילופין, ולהגדלת מקדם הבטיחות של העובד כדאי לפעמים להתבסס על ממוצעים משוקללים המושגים על פני תהליך כדי

לקבוע את חשיפת העובד ביחס לתקני חשיפה. במאמר של Garcia et al משנת 2014 נמצא, לדוגמה, שבעבודה של התקנת אריחים לחיפוי גגות היה המשך המצטבר של חיתוך האריחים רק כשעה אחת ביום עבודה בן 8 שעות והמשך המצטבר של ניקוי האריחים במפוח עלים נמשך 10 דקות במשמרת. הריכוז המשוקלל של אבק בר-נשימה המכיל סיליקה על פני משמרת הגיע ל- 3.44 מ"ג/מ"ק ולפי זה הריכוז ב- 10 דקות ניקוי במפוח עלים היה עלול להגיע למעל 150 מ"ג/מ"ק שמהווה חריגה בכל קנה מידה מתקנים מרביים לחשיפה ומעמיד את העובד בסיכון גם בזמן קצר זה. תכנון הבקרה צריך להציב יעד של התמודדות עם ריכוז אבק בר-נשימה בסדר גודל כזה.

7. עבודות ניקוי בלחץ אוויר דחוס אסורות, אך הן מתבצעות בכל זאת. פעולות אלה גורמות להתזה של אבק שוקע שחלקיקיו גדולים ועל כן ריכוז הסיליקה במקטע בר-נשימה אינו נמצא בפרופורציה כלשהי לריכוז האבק המרחף גם אם ענן האבק הנראה הוא סמיך יותר בפרק ההתנקות לעומת הפליטה הנצפית בתהליך עבודה. לתופעה זו יש השלכה על תוצאה אפשרית של ניטור סביבתי אם פרק ההתנקות נכלל בפרק הדגימה.
8. לכיוון הרוח יש השפעה על החשיפה במקומות בהן העבודה מתבצעת בסככות. מומלצת פעילות עובד עם כיוון הרוח ולא נגדה.
9. במקומות שבהם מתבצעים תהליכים שונים בקירבה זה לזה נחשפים עובדים בתהליך אחד לאבק המגיע מתהליך אחר. מדידת חשיפה משוקללת על פני זמן מושפעת פחות מתופעה זו, אך מדידת חשיפה על פני תהליך, במטרה לאפיין את חשיפת העובד בתהליך, עלולה להיות מושפעת מאד מקירבת תהליכים אחרים. מומלץ שעמדות עבודה יהיו מרוחקות זו מזו.
10. אם יקודם תהליך החקיקה לפיו תוקטן הרמה המרבית המותרת לחשיפה לסיליקה במקטע בר-נשימה ל- 0.05 מ"ג/מ"ק יהיה צורך לפני כן לגרום למעבר בתי המלאכה לעיבוד שיש לשיטות עבודה והנדסת תהליכים שונות כדי לעמוד בתקנים אלה.

<u>תכנון בקרה בתהליכי עיבוד בשיש.</u>

היראכיית אמצעי הבקרה ההנדסית המומלצת להפחתת ריכוזי הסיליקה באוויר בתהליכי העיבוד, מהפחתה גבוהה ביותר לנמוכה ביותר, כפי שבאה לידי ביטוי בממצאי מחקר זה היא:

5. עיבוד רטוב במכונות ממוחשבות (CNC).
6. עיבוד רטוב מלווה ביניקה בו-זמנית של אבק.
7. עיבוד רטוב

8. יניקה מקומית צמודה לכלי העיבוד בזמן הפעלתו.

כהשלמה, או כפיצוי על העדר יכולת של אמצעי הנדסי להקטין את הריכוזים לרמות קבילות, יש להשתמש בציוד מגן אישי. כפי שהוצג במחקר זה, נשמיות חד פעמיות להגנה על הנשימה אינן מסוגלות לספק הגנה זו בחלק רב של המקרים ולכן דרושה הגנה שמקדם ההגנה שלה הוא לפחות 50 וגבוה מזה. אמצעים העונים על דרישה זו הם:

- מסיכות שלמות (עם או ללא חיבור לקו אוויר או מפוח מסנן);
- חצי מסיכה מחוברת למפוח מסנן או קו אוויר;
- ברדס הדוק מחובר למפוח מסנן או קו אוויר.

חלק מאמצעים אלה צריך להשקל תוך התייחסות לנוחיות העובד ויכולתו לבצע את תהליך העיבוד.

<u>בקרה המתבססת על עבודה במכונות סגורות בעלות עיבוד ממוחשב (CNC)</u>

בתהליכי חיתוך במכונות ה- CNC התקבלו ריכוזי סיליקה במקטע בר-נשימה בתחום 0.02 – 0.14 מ"ג/מ"ק. בתהליכי ליטוש במכונות ה- CNC התקבלו ריכוזי סיליקה במקטע בר-נשימה בתחום 0.02 – 0.07 מ"ג/מ"ק. העיבוד בתהליכים אלה רטוב. הריכוזים שהתקבלו היו הנמוכים ביותר מאלו שהתקבלו בכל התהליכים האחרים. ריכוזי הסיליקה התקבלו על פני תהליך. שקלול הריכוזים על פני יום עבודה יקטין אותם אל מתחת לרמת הפעולה. תהליך העיבוד במכונות CNC קיים רק עבור אבן שיש מלאכותית. אילו היה קיים עבור אבן שיש טבעית היו הריכוזים נמוכים מרמת הפעולה עקב תכולה נמוכה יותר של סיליקה באבן זו. תהליך ה- CNC מומלץ בעדיפות ראשונה לעיבוד שיש ועשוי להבטיח עמידה בתקני חשיפה מרביים גם אם יוחלט להקטין את הרמה המרבית המשוקללת ל- 0.05 מ"ג/מ"ק.

<u>בקרה המתבססת על עיבוד רטוב</u>

הרטבת תהליך מצמצמת מאד את ריכוזי האבק באוויר ואיתו גם את ריכוזי הסיליקה, אך כפי שהוצג במחקר הנוכחי, עיבוד רטוב אינו מקטין את ריכוז הסיליקה לרמות קבילות בחלק מהתהליכים בשני סוגי אבן העיבוד ולכן יש צורך לתכנן אמצעי בקרה נוספים בשילוב עם הרטבת התהליך וכדי לא להסתמך על הגנה אישית. Carlo ועמיתיו (Carlo et al., 2010) הראו בתנאי מעבדה את יעילות ההרטבה במים בעת חיתוך אריחי בטון של גגות בהשוואה למצב של העדר בקרה. יעילות הצמצום הגיעה עד 99% בריכוזי מקטע האבק בר הנשימה של סיליקה כתלות בקצב הזרמת המים על כלי העיבוד. סביר להניח שבתנאי שדה היתה מושגת יעילות נמוכה יותר של בקרה דומה. שימוש ביניקה מקומית בלבד צמצם את ריכוזי האבק עד 91% מהריכוז שנגרם ללא יניקה. תכולת הסיליקה בבטון נמוכה מתכולתה באבן שיש מלאכותית. מחקר אחר על שיוף קירות גבס (Young-Corbett & Nussbaum, 2009) הראה יעילויות בקרה נמוכות יותר שהגיעו לצמצום 88% מריכוז האבק בר-נשימה כאשר השתמשו במשייף בעל יניקה מקומית, ול- 60% כאשר השתמשו בספוג שיוף רטוב. הרטבה

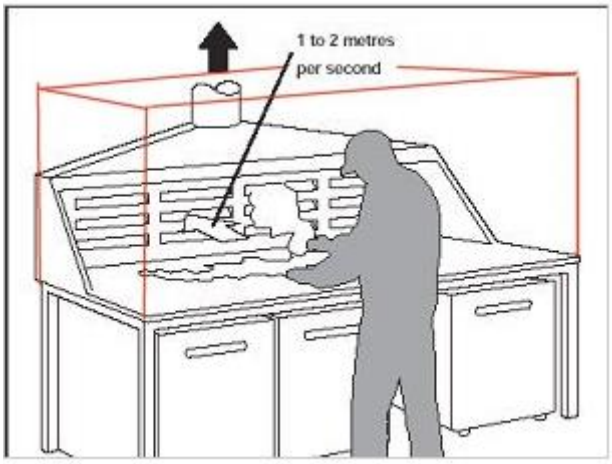
עשויה להספיק עבור תהליכי ליטוש עדין כדי לצמצם את רמת החשיפה של עובדים לרמה נמוכה מהרמה המרבית ויתכן גם מרמת הפעולה, אך בתהליכי חיתוך של אבן שיש מלאכותית וטבעית יתקבל בחלק מהמדידות ריכוז גבוה מהרמה המרבית המותרת לחשיפה, ובתהליכי כרסום כמעט תמיד תהיה רמת החשיפה המשוקללת גבוהה מהרמה המרבית המשוקללת המותרת לחשיפה.

<u>בקרה המתבססת על איוורור מקומי ויניקה צמודה לכלי עבודה</u>

בקרת איוורור יניקה יכולה להיות יעילה אם עיבוד חלק השיש יתבצע במתקנים המתוארים בציורים הבאים הלקוחים מחוברות הדרכה של מינהל הבטיחות והבריאות התעסוקתית בבריטניה. עקרון הפעולה הוא ביצוע העבודה על שולחן בתא בעל מנדף רב חריצי (ציור 1), או בתא המהווה מנדף הליכה (walk-in booth) (ציור 2). התא סגור משלושת צדדיו. זרימת האוויר בשני תאי המנדף צריכה להיות למינרית. אפשרות נוספת היא צינור פלסטי בצורת פרסה, מחורר בצידו הפנימי, ומקיף את עמדת העבודה משלושה צדדים ויש בו פתח המחובר למערכת יניקה (ציור 3). צינור זה עשוי להיות יעיל עם עיבוד החלק נעשה המרכזו במפלס נמוך מגובה הצינור.

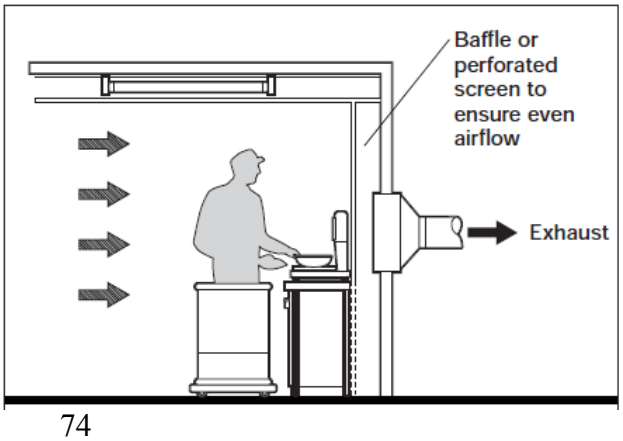
<u>ציור 1</u>

באדיבות HSE – חוברות הדרכה

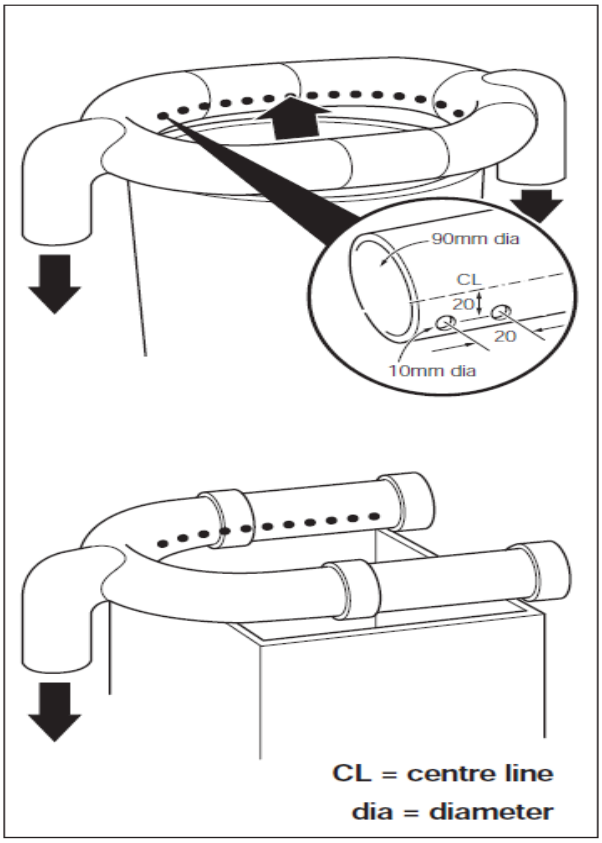


<u>ציור 2</u>

HSE - Control Guidance Sheet 202



ציור 3



חוברות הדרכה באדיבות HSE – Guidance Sheet FLO5

ציור 4

באדיבות ה- CDC בארה"ב

מערכות היניקה המתוארות לעיל עשויות להתאים לתהליכי ליטוש כיוון שתהליכים אלה אינם תופסים מרחב עבודה גדול והכלי המעבד נע על צירי אורך ורוחב קטנים ומלטש בסיבובים קטנים.

בקרת יניקה המסתמכת על צינור יניקה שרשורי שמכוון כלפי מוקד הפיזור אינה בהכרח יעילה דייה בצמצום ריכוזי סיליקה אל מתחת לרמה המרבית המותרת (טבלה מס' 1) (Flynn & Susi, 2003).

מסת האבק הגבוהה ביותר שנאספה על מסנן הדגימה בתהליכי ליטוש במחקר הנוכחי היתה 1,420 מיקרוגרם במשך 6 דקות. בהנחה היפותטית מחמירה של אבק המורכב מ- 100% סיליקה, היה יכול ריכוז הסיליקה באוויר להגיע בפרק זמן זה ל- 118.3 מ"ג/מ"ק. על מנת ליצור מצב בו תא המנדף מצמצם את הריכוז שהתקבל לעשירית הרמה המרבית המותרת (0.03 מ"ג/מ"ק) יש צורך לצמצם את הריכוז פי 3950. ערך זה גבוה מאד ויהיה קשה להשגה. תא מנדף בעל שטח פנים של 2 מ"ר ומהירות פנים של 0.5 מטר/שניה יינק בפרק זמן של 6 דקות 360 מ"ק אוויר, כלומר ריכוז האבק באוויר יהיה 0.33 מ"ג/מ"ק. באופן מעשי ריכוזי האבק נמוכים מ- 118.3 מ"ג/מ"ק ותכולת הסיליקה באבק קטנה מ- 100%. תהליכי ליטוש אינם נמשכים 8 שעות רצופות ולכן הממוצע המשוקלל על פני יום עבודה יהיה קטן יותר. לכן מצופה שתא המנדף יוכל לצמצם את ריכוז הסיליקה באוויר לריכוז נמוך מרמת הפעולה. עקב יכולת תא המנדף ליצור בקרה מתאימה של כלל האבק בתהליכי ליטוש מצופה שרמת החשיפה תהיה קבילה לחלוטין גם במקרה של אבק במקטע בר-נשימה שכמותו נמוכה באחוזים משמעותיים מכמות כלל האבק. אפשרות נוספת לתכנון בקרה יעילה באמצעות תא המנדף היא להגדיל את מהירות הפנים שלו ל- 1 מטר/שניה כדי להבטיח צמצום ריכוזי סיליקה אל מתחת לרמת הפעולה ואף יותר מכך. הגדלת מהירות הפנים עלולה לשנות את משטר הזרימה לטורבולנטי ובכך לאפשר יצור מערבולות צד קטנות הפורצות מחוץ לתא המנדף. תכנון ואיזון מהירות הפנים חיוניים למניעת קונפליקט בין הצורך להגביר ספיקה לבין הסכנה להיווצרות מערבולות צד.

מהירות היניקה של יונק צמוד לראש הכלי המעבד צריכה להיות גבוהה יותר ממהירות הפנים של מנדף בהתחשב בשטח הפנים של היונק. בניסוי שנעשה בתהליך ניסור של אריחים מכילי סיליקה לחיפוי גגות היתה ספיקת היניקה של היונק שהוצמד למסור החיתוך 1.056 מ"ק/דקה. ספיקה זו לא הספיקה להקטין את ריכוזי הסיליקה אל מתחת לרמה המרבית והעובדים נחשפו לריכוז סיליקה ברת נשימה הגבוה פי 8 מהרמה המרבית המותרת לחשיפה בישראל (Garcia et al., 2014). על מנת להביא לריכוזים הנמוכים מרמת הפעולה היתה ספיקת היונק צריכה לגדול פי 16 – 20. יתכן ומבחינה טכנולוגית לא ניתן להשיג ספיקות גבוהות כאלה ובמקרה זה יש צורך בשילוב הרטבה עם יניקה מקומית בתהליך בייחוד בעיבוד אבן שיש מלאכותית. עבודות נוספות הראו גם כן שיניקה מקומית בלבד אינה מספיקה לצמצם את ריכוזי הסיליקה לרמות קבילות (Collingwood & William, 2007)

בקרת תהליכי חיתוך וכרסום שיש המתבססת על יניקה מקומית בלבד בעיבוד יבש עשויה לא להיות יעילה דייה כדי לצמצם את ריכוזי האבק וריכוזי הסיליקה לרמות נמוכות מרמת הפעולה. הריכוזים הגבוהים ביותר שהתקבלו עבור סיליקה במקטע בר נשימה בתהליכי חיתוך הגיעו לכ- 19 מ"ג/מ"ק ואלו בתהליכי כרסום הגיעו למאות מ"ג/מ"ק. כדי להקטין את ריכוז הסיליקה אל מתחת לרמת הפעולה יש צורך בספיקות גבוהות מאד שיביאו עד להקטנה פי 400 בתהליכי חיתוך ועד פי 9200 בתהליכי כרסום. ספק אם ניתן להשיג ספיקות בסדרי גודל של מאות מ"ק/דקה כדי להשיג את הריכוזים הרצויים של סיליקה באוויר ולכן גם כאן יש צורך בשילוב הרטבת התהליך עם יניקה מקומית.

לא נמצאה בספרות עבודה המתארת השוואה של שיטות בקרה הנדסיות בעיבוד שיש. עבודה המשווה שיטות בקרה בהשחזת משטחי בטון מצאה שהרטבה יעילה פחות מיניקה מקומית המתבססת על ציקלון ומסנן HEPA, כאשר ההרטבה הקטינה את ריכוזי הסיליקה ב- 94% בהשוואה לתהליך ללא בקרה והיניקה המקומית הקטינה באחוז גבוה יותר (Akbar-Khanzadeh et al., 2010). אף אחת מהשיטות לא הצליחה להקטין את ריכוז הסיליקה מתחת ל- 0.025 מ"ג/מ"ק שעשוי להוות את רמת הפעולה בישראל אם תוקטן הרמה המרבית המשוקללת ל- 0.05 מ"ג/מ"ק, ואף אחת משיטות הבקרה לא הצליחה להקטין את הריכוז הממוצע בניסויים לרמה המרבית המותרת כיום כאשר מדובר על השחזת בטון.

לסיכום, עיבוד במכונות CNC צריך להיות בעדיפות ראשונה להפעלה כאשר באים לתכנן בקרת חשיפה לסיליקה בתהליכי עיבוד של שיש. מתוך ידיעה שמבחינה טכנולוגית עדיין אי אפשר לבצע את כל הסוגים של תהליכי העיבוד במכונות ממוחשבות וסגורות, העדיפות הבאה בתור היא עיבוד רטוב בשילוב יניקת אוויר מקומית בעמדת העבודה, בייחוד עבור התהליכים היותר אגרסיביים בפיזור האבק עקב הכוח החשמלי והמכני המופעל בכלי המעבד. הרטבה לבד או יניקת אוויר מקומית לבד יתנו מענה בקרה בחלק מהתהליכים, אך יחייבו, כנראה, תוספת הגנה אישית מתאימה בחלק לא מבוטל של המקרים.

ביבליוגרפיה

Akbar-Khanzadeh, F., Milz, S.A., Wagner, S.D.,Bisesi, M.S., Ames, A.L., Khuder, S., Susi, P., Akbar-Khanzadeh, M.: Effectiveness of dust control methods for crystalline silica and respirable suspended particulate matter exposure during manual concrete surface grinding. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 7: 700–711(2010).

Althouse, R.B., Bang, K.M., Castellan,R.M.: Tuberculosis Comortality with Silicosis-United States, 1979–1991. *Appl Occup Environ Hyg.,* 10(12):1037–1041 (1995).

Berry, G., Rogers. A. and Yeung, P.: Lung cancer mortality of compensated silicotics in NSW. Workers' Compensation Dust Disease Board Research Grants Scheme, (2000 and 2001).

Borm, P.J.A., Donaldson, K.: The quartz hazard in the construction industry. *Indoor+Built Environment, 8*(2):107–112 (1999).

Calvert, G.M., Rice, F.L., Boiano, J.M., Sheehy, J.W., Sanderson, W.T.: Occupational silica exposure and risk of various diseases: an analysis using death certificates from 27states of the United States. *Occup. Environ. Med.,* 60:122–129 (2003).

Carlo, R.V., Sheehy, J., Feng, H.A, Sieber, W.K.: Laboratory evaluation to reduce respirable crystalline silica dust when cutting concrete roofing tiles using a masonry saw. *J. Occup. Environ. Hyg.,* 7:245-251 (2010).

Chen, G.X., Burnett, C.A., Cameron L.L.;,et al.: Tuberculosis Mortality and Silica Exposure: A Case-Control Study Based on a National Mortality Database for theYears 1983–1992. *Int. J. Occup. Environ. Health,* 3:163–170 (1997).

Cherry, N.M., Burgess, G.L., and S. Turner.: Crystalline silica and risk of lung cancer in the potteries. *Occup. Environ. Med.,* 55779–55785 (1998).

Collingwood, S., William A. Heitbrink, S.A.: Field evaluation of an engineering control for respirable crystalline silica exposures during mortar removal. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4: 875–887 (2007). .

Costello, J., Castellan, R.M., Swecker, G.S.: Mortality of a cohort of U.S. workers employed in the crushed stone industry. *Ame. J. Ind. Med.,* 27(5):625–640.

Department of Industrial Relations: Workplace Health and Safety Queensland, Submission to the Senate Community Affairs Reference Committee, Inquiry into Workplace Toxic Exposure (2005).

Fairfax, R., Lofgrena, D.J., Johnsona, D.C., Walleya, T.L: OSHA compliance issues silica and noise exposure during installation of fibercement siding. *J. Occ. Environ. Hyg.*, 1: D1–D6 (2004).

Fairfax, R., Oberbeck, B.: OSHA compliance issues exposure to crystalline silica in a countertop manufacturing operation. *J. Occ. Environ. Hyg.*, 5: D81–D85 (2008).

Finklestein, M. M.: Silica, silicosis and lung cancer: A Risk Assessment. *Am. J. Ind. Med.,* 38 (1):8 – 18 (2002).

Flanagan, M.E., Seixas, N., Becker, P., Takacs, B., Camp, J.: Silica exposure on construction sites: results of an exposure monitoring data compilation project. *J. Occup. Environ. Hyg.,* 3:144-152 (2006).

Flynn, M.R., Susi, P.: Engineering controls for selected silica and dust exposures in the construction industry – a review. *Appl. Occup. Environ.Hyg.*18:268–277 (2003).

Garcia, A., Jones, E., Echt, A.S., Hall, R.M.: An evaluation of an aftermarket local exhaust ventilation device for suppressing respirable dust and respirable crystalline silica dust from powered saws. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11: D200–D207 (2014).

Golbabaei, F., Barghi, M.A., Sakhaei, M.: Evaluation of workersw exposure to total, respirable and silica dust and the related health symptoms in Senjedak stone quarry, Iran. *Industrial Health,* 42:29-33 (2004).

Graham, W.G., Ashikaga, T., Hemenway, D., Weaver, S., O'Grady, R.V.: workers exposed to low levels of granite dust. Radiographic abnormalities in Vermont granite. *Chest,* 100:1506-1514 (1991).

Hnizdo, E.: Combined effect of silica dust and tobacco smoking on mortality from chronic obstructive lung disease in gold minters. *B. J. Ind. Med.,* 47:656–664 (1990).

Hnizdo, E., Sluis-Cremer, G.K.: Silica Exposure, Silicosis, and Lung Cancer: A mortality study of south african gold miners. *Br. J. Ind. Med.,* 48:53–60 (1991).

International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Silica, Some Silicates, Coal Dust and Para-aramid Fibrils. World Health Organization (WHO) Ed., Lyon 68: (1997).

Koskela, R.S., Klockars, M., Laurent, H.: Silica dust exposure and lung cancer. *Scan. J. Work. Environ. Health,* 20(6):407– 416m (1994).

Lawrence, R.B., Duling, M.G., Calvert, C.A., Coffey, C.C.: Copmarison of performance of three different types of respiratory protection devices. *J. Occup. Environ. Hyg.,* 3:465-474 (2006).

Liu, Y., Steenland, K., Rong, Y., Hnizdo, E., Huang, X., Zhang, H., Shi, T., Sun, Y., Wu, T., Chen, W.: Exposure-response analysis and risk assessment for lung cancer in relationship to silica exposure: a 44-year cohort study of 34,018 workers. *Am J Epidemiol.*, 178(9):1424-33 (2013).

Lofgren, D.J.: Targeting industries and worksites for OSHA health inspections. *Appl. Occup. Environ. Hyg. 11*:448–456 (1996).

Lofgren, D.J.: Results of inspection in health hazard industries in a region of the state Washington. *J. Occup. Environ. Hyg.,* 5:367-379 (2008).

Malmberg, P., Hedenstrom, H., Sundblad, B.M.: Changes in lung function of granite crushers exposed to moderately high silica concentrations: A 12 year follow-up. *Br. J. Ind. Med.,* 50(8):726–731 (1993).

Nij, E.T., Hohr, D., Borm, P., Burstyn, I., Spierings, J., Steffens, F., Lumens, M., Spee, T., Heederik, D.: Variability in quartz exposure in the construction industry: implication for assessing exposure-response relations. *J. Occup. Environ. Hyg.,* 1:191-198 (2004).

NIOSH, unpublished data, 1990.

Park, R., Rice, F., Stayner, L., Smith, R., Gilbert, S., Checkoway, H.: Exposure to crystalline silica, silicosis, and lung disease other than cancer in diatomaceous earth industry workers: a quantitative risk assessment. *Occup Environ Med.*, 59(1):36-43 (2002).

Rego, G., Pichel, A,. Quero, A., Dubois, A., Martínez, C., Isidro, I., Gil, M., Cuervo, V., González, A.: High prevalence and advanced silicosis in active granite workers: a dose-response analysis including FEV1. *J. Occup. Environ. Med.* 50(7):827-33 (2008).

Simcox, N., Lofgren, D., Leons, J., Camp, J.: Silica exposure during granite countertop fabrication. *App. Occup. Environ. Hyg.,* 14(9):577-582 (1999).

Sirianni, G., Hosgood lll, H.D., Slade, M.D., Borak, J.: Particle size distribution and particle size-related crystalline silica content in granite quarry dust. *J. Occup. Environ. Hyg.,*5:279-285 (2008).

Steenland, K.: One agent, many diseases: Exposure –response data and comparative risks of different outcomes following silica exposure. *Am. J. Ind. Med.*, 48 (1):16 -23 (2005).

Tuskes, P.M., Key, M.M.: Potential hazards in small business — A gap in OSHA protection. *Appl. Occup. Environ. Hyg. 3*:55–57 (1988).

WHO. Crystalline silica, quartz. Concise International Chemical Assessment Document (CICAD) No. 24. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2000.

Young-Corbett, D.E., Nussbaum, A.: Dust control effectiveness of drywall sanding tools. *J. Occup. Environ. Hyg.,* 6:385-389 (2009).

לייזר, מ., ספיטקובסקי, ז., כהן, ר.: סקר ארצי של חשיפה תעסוקתית לצורן דו חמצני גבישי (סיליקה גבישית) של עובדי מחצבות ומפעלי עיבוד אבן בישראל. מדינת ישראל, משרד העבודה והרווחה, אגף הפיקוח על העבודה, המעבדה הארצית לגהות תעסוקתית, 1996 (חוברת).