

פיתוח תבנית הסתברותית להערכת חשיפה במקומות עבודה בישראל

ד"ר אשר פרדו*
ד"ר מיכאל מיימן**
מר מיכאל זילברמן**
גב' נילי גרינברג***
מר אלכס טקצ'מן****
מר סלבה אומנסקי*

* המוסד לבטיחות ולגיהות
** אמפימד אינפורם ביורו בע"מ
*** ענף בריאות תעסוקתית, צה"ל
**** קרן מעבדות גיהות בע"מ

המחקר בוצע במימון הפעולה המונעת במשרד התמ"ת

חודש שבט התש"ע
ינואר 2010

תודת החוקרים נתונה :

למוסד לבטיחות ולגיהות על התמיכה והאכסניה לביצוע המחקר

לפעולה המונעת על המימון המחקר והתמיכה בו

לגב' נילי גרינברג שהייתה מיוזמי המחקר וסייעה רבות בביצועו במגזר הצבאי

תקציר מורחב

מבוא

קיימות מספר גישות להערכת חשיפה תעסוקתית נשימתית, כאשר העיקריות בהן הן אלו המטפלות בהערכה איכותנית או "חצי-כמותית" (Semi-quantitative exposure) assessment ובהערכה כמותית. הערכה איכותנית מבוססת על פרמטרים שונים, רובם תיאוריים, ודרגת החשיפה מבוטאת בד"כ

על סקלה אורדינלית של רמות חשיפה (חשיפה נמוכה, בינונית וגבוהה), ללא מימד כמותי שהתקבל בשיטות מדידה יעודיות. הערכה איכותנית או חצי-כמותית מתבצעת בד"כ בעזרת סקר סיכונים שנערך במקומות עבודה בשיטת ה- *Walkthrough*. בהשוואה לשיטה החצי-כמותית, השיטה הכמותית להערכת חשיפה נשימתית מבטיחה יותר ספציפיות ודיוק, היות שהיא מסתמכת על מדידה, שנערכת במקומות העבודה, אולם הניטור התעסוקתי מתבצע אחת לתקופה מסויימת והתוצאה תלויה בתנאים שנוצרו במקום העבודה בעת לקיחת דגימות. הסיכוי להערכה שגויה אינו נמוך כאשר מחפשים מיתאם בין הערכה בשיטות חצי-כמותיות לבין תוצאות של ניטור סביבתי ולכן פותחו בעשורים האחרונים גישות הערכה שונות ומודלים סטטיסטיים כדי להגביר את דיוק ואמינות ההערכה האיכותנית ביחס לכמותית. אסטרטגיות ההערכה הגיהותיות העמידו את התהליך הטכנולוגי (process) במקום עבודה כיחידה בסיסית למיון קבוצת עובדים בעלת חשיפה דומה, המהווה אלמנט מרכזי בגישה תקנית להערכת חשיפה. על אף השימוש בתהליך כגורם בסיסי בתבנית להערכת חשיפה פוטנציאלית, נוצר קושי לאפיין חשיפה באופן ממצה רק ע"י מיון כוח עבודה לפי תהליכים ועיסוקים. קושי זה הביא להמלצות מקצועיות להתמקד גם באפיון מטלות (tasks) בעת הערכת חשיפה איכותנית וכמותית והגדרת קבוצה בעלת חשיפה דומה. פירוק התהליך להירארכיה נוספת של מטלות ואיסוף מידע עליהן יצר אפשרות לאיפיון חשיפה מדוקדק יותר ולצמצום טעויות בהערכת החשיפה ומיון עובדים לקבוצות בעלות חשיפה דומה. חלוקת תהליך למטלות צמצמה את האפשרות למסך שיאי חשיפה בעת הערכת רמת חשיפה נשימתית ממוצעת ומשוקללת על פני תהליך ארוך. אולם, גם לשיטה זו נמצאו מבקרים שהראו שלא בכל מקרה הערכת חשיפה על פי מטלות היא יתרונית ולא בכל מקרה מתקבלת התאמה גבוהה בין רמות חשיפה ממוצעות המתקבלות על סמך שילוב תהליכים בהערכה לעומת אלו המתקבלות על סמך שילוב מטלות. יש, איפוא, לחפש שילוב מתאים לגופו של עיסוק ותרחיש חשיפה. אחת ההמלצות להתמודד עם מורכבויות שונות בהערכת סיכון בריאותי בתרחישי חשיפה, ועם שיפור ההתאמה בין הערכה איכותנית וחצי כמותית של חשיפה לבין הערכה כמותית היא שימוש בתבניות (מטריצות) חשיפה הסתברותיות. תוצאת התרומה היחסית של כל מאפיין בתבנית וגורם האינטראקציה בין המאפיינים מספקת מוצר משוקלל המוגדר כדרגת חשיפה. המתודולוגיה של תבניות חשיפה נמצאת בשימוש רחב והוכיחה עצמה כיעילה בהערכת הסיכונים בעבודה. בין הענפים, שלגביהם כדאית הערכה הסתברותית של תבניות חשיפה ובעלת תרומה מרבית נבחר ענף המוסכים וטיפול ברכב. המחקר הנוכחי שם לו למטרה לבנות תבנית (מטריצה) שניתן יהיה לאמוד באמצעותה את ההסתברות לדרגות חשיפה שונות לגורמי סיכון במוסכים כתלות בתנאי העבודה והחשיפה של תרחיש נתון בעבודת מוסך. המחקר בוחן כלי בקרה המכוון להפרדת התהליך למטלותיו וניתוח החשיפה בכל אחת מהן על מנת לצמצם את אי הוודאות בגילוי חשיפות חריגות קצרות. כמטרה נוספת הציב לעצמו המחקר לפתח תוכנה ממוחשבת לתבנית החשיפה על פי מודל.

שיטות מחקר

במחקר נכללו 50 מוסכים, מתוכם 35 מוסכים אזרחיים ו-15 מוסכים צבאיים (סדנאות). המדגם כלל מוסכים מאזור הצפון, המרכז (לרבות אזור ירושלים) והדרום.

מאגרי נתונים של סקרים וניטורים סביבתיים שנאספו במשרד התמ"ת בשנים האחרונות שימשו כבסיס למיין תהליכי עבודה במוסכים. בכל מוסך התבצע מיון תהליכים ומטלות ונערך סקר לאיפיון תהליכי העבודה והמטלות ולאיפיון משתני החשיפה הרלוואנטיים. נבחרו קטיגוריות התהליכים השכיחים ביותר על מנת להשיג מספר מספיק של תצפיות לצורך הסקת מסקנות והשגת מטרות המחקר. לאיסוף נתוני הסקר במוסך שימש שאלון מובנה. השגת פרטי הנתונים התבססה על תצפיות במוסך ועל מידע מבעלי המוסך ועובדיו. לאחר זיהוי התהליכים הנפרדים במוסך פורק כל תהליך למטלות על פי שלביו. בכל תהליך כיחידה שלמה ובכל מטלה בתהליך נאספו בנפרד נתונים שהיוו את המשתנים הבלתי תלויים: משך, תדירות, שיטת עבודה מאפיינת, גורמי סיכון כימיים נוכחים והרמה המרבית שלהם המותרת לחשיפה, כמות גורם הסיכון בעת ביצוע התהליך או המטלה, צורת הופעת גורם הסיכון באוויר בעת החשיפה, אמצעי הבקרה הנדסיים, ניהוליים ואישיים בכל תהליך ובכל מטלה.

כל משתנה בלתי תלוי כלל מספר קטגוריות והסוקר בחר כתשובה את הקטגוריה המתאימה לתיאור המצב. לכל קטיגוריה ניתן ציון המתאר את דרגתה על סולם דרגות איכותי על פי תרומתה היחסית לפוטנציאל החשיפה בתרחיש העבודה והחשיפה הנתון. ציון של כל קטגוריה נורמל בהשוואה לציון המקסימלי באותה קטיגוריה. המשתנים חולקו לשלושה גושים וציון כל גוש נבנה כציון משוקלל של הציונים החלקיים וגורם האינטראקציה בין המשתנים בגוש. ציוני שלושת הגושים אוגדו לציון אחד שהוגדר כדרגת חשיפה פוטנציאלית עבור תרחיש עבודה וחשיפה נתון בתהליך עבודה במוסך.

תבנית חשיפה הוגדרה כמטריצה המאגדת בתוכה צירוף דרגות של קטגוריות מכל גושי המשתנים כאשר הצירוף, כאמור, משקף תרחיש עבודה וחשיפה נתון בתהליך. דרגת החשיפה הפוטנציאלית האיכותנית שהושגה מאיגוד הציונים החלקיים המשוקללים מייצגת את התבנית.

במודל גרפי שפותח, הוצבו שלושת הציונים המשוקללים משלושת הגושים כנקודות על מערכת צירים אורתוגונאלית היוצרת טטרהאדר מרחבי ישר זווית. חיבור שלושת הנקודות יוצר במרחב הטטרהאדר משולש ששטחו ניתן לחישוב על פי נוסחה. שטח המשולש במרחב הוא דרגת החשיפה הפוטנציאלית האיכותנית ומייצג את תבנית החשיפה. השטח המקסימלי האפשרי להשגה על פי צירופי המשתנים בתרחישי החשיפה שימש כשטח יחוסי אליו הושוו אומדני תבניות החשיפה. שטח זה חולק לשלושה תת אזורים כאשר כל אחד מהם משקף אומדן של פוטנציאל חשיפה: נמוך (אומדן חשיפה פוטנציאלית עד 50% מהרמה המרבית המותרת (TLV)), בינוני (אומדן חשיפה פוטנציאלית בין 50% ל-100% ה-TLV), גבוה (מעל 100% ה-TLV).

בכל תהליך ומטלה נערכו דגימות אוויר להערכת רמת החשיפה לגורמי סיכון כימיים בשיטות בדיקה המבוססות על שיטות תקפות ומאושרות על ידי אגף הפיקוח של משרד התמ"ת. רמות החשיפה שהתקבלו בניטור חושבו כמנת חשיפה. הרמה המירבית המשוקללת (TLV-TWA) שימשה כבסיס

לחישוב מנת החשיפה בתהליך, ורמה מרבית לזמן קצר או רמה הגבוהה פי שלוש מהרמה המרבית המשוקללת שימשה לחישוב מנת החשיפה במטלה.

בכל תהליך ומטלה נבדקה התפלגות מנות החשיפה של החומרים השונים והופעלה סטטיסטיקה תיאורית. נבנו קווי מגמה הסתברותיים לתהליכים ומטלות המתארים את רמות החשיפה על נייר הסתברות כנגד האחוזונים ההסתברותיים של הופעתן. קווי המגמה מהווים נקודת החלטה להמלצה האם עדיף להתמקד בהערכת חשיפה בתרחיש נתון על פי החשיפה על פני תהליך או על פני החשיפה על פי מטלה.

על מנת לחפש מיתאם ניבוי בין תוצאת המודל של תבנית החשיפה הפוטנציאלית בתהליך לבין החשיפה הנשימתית בפועל הושאו תוצאות תבנית החשיפה לתוצאות הניטור המתייחס לאותה תבנית ונקבעה מידת ההתאמה ביניהם. מידת התאמה זו תורגמה לאומדן ההסתברות למנת חשיפה נשימתית בתרחיש נתון כתלות במאפייני החשיפה וגורמיה באותו תרחיש. לצורך שימוש בתבניות חשיפה ע"י משתמשים פוטנציאליים פותחה תוכנה באפליקציית WEB לגישה דרך אינטרנט.

תוצאות

מיון התהליכים הוביל לחמש קטיגוריות בולטות של תהליך ולקטיגוריה ששית המופיעה במוסכים צבאיים בלבד ושכיחותה מעטה. תהליך המכונאות הוא השכיח ביותר ושכיחותו במוסכים האזרחיים הייתה גבוהה מזו בצבאיים. תהליך הצביעה שני בשכיחותו ושכיחות זהה התקבלה לגבי תהליכי המסגרות ותיקון תקרים כאשר תהליך המסגרות שכיח יותר במוסכים הצבאיים מאשר באזרחיים. תהליך תדלוק מלא נצפה בשני מוסכים צבאיים בלבד ולא הופיע באזרחיים.

מגוון רחב של מטלות נצפה בתהליכים שהוכללו במחקר. מספר המטלות בתהליך המכונאות הוא הגבוה ביותר מבין התהליכים כמו גם שכיחות הופעתן של המטלות בתהליך זה.

מגוון גדול של גורמי סיכון כימיים נמצא בשימוש במוסכים. קבוצת הסיכון השכיחות היו ממיסים אורגניים, מתכות, וכן חומרים אנאורגניים ופולימרים אורגניים שצורת הפיזור של רובם מוגדרת כחלקיקים בלתי מסווגים. בנוסף נמצאו שמנים וחומרים סיביים.

שכיחות תהליכים מעל 4 שעות ביום עבודה היא נמוכה (12.6% מכלל התצפיות) ומשך הזמן השכיח ביותר למחזור תהליך, כפי שנצפה, נע בין 15 – 60 דקות. רוב התהליכים מתבצעים בכל יום (66% מכלל התצפיות) ו-30% מהתצפיות היו של תהליכים המתבצעים 3 – 4 פעמים בשבוע. ב-70% מהתצפיות נכללת בתהליכים עבודה ידנית ממוכנת. כמות החומר המהווה פוטנציאל לפיזור באוויר ושכיחה ביותר בתהליכים, כפי שנאמדה בסקרים, קטנה מ-100 גרם (כ-49% מכלל התצפיות). בתהליך המסגרות נצפתה שכיחות גבוהה של שימוש בכמויות המגיעות עד-1 ק"ג ושכיחות יחסית גבוהה של כמויות גבוהות מ-1 ק"ג. גורמי הסיכון הכימיים שנבדקו הופיעו באוויר בחמישה סוגי מופעים: אבק, סיבים, נדפים, אווירוסול טיפתי ואדים. אחוז התצפיות הגבוה של אדי ממיסים אורגניים נובע מהשימוש בהם במוסכים באופן שכיח בכל חמשת התהליכים שנבדקו. במוסכים אין בדרך כלל אמצעי בקרה הנדסיים. עובדים אינם משתמשים בדרך כלל בציוד מגן אישי נשימתי והשימוש בכפפות פלסטיות להגנה מחומרים הוא דל.

בולט משכן הקצר של המטלות ומשכן של 70% מהן קצר מ-15 דקות. רוב המטלות במוסכים (65%) הן ידניות ממוכנות. מיעוט שימוש בשיטות אוורור ובהגנה אישית נשימתית כמו גם בהגנה עורית מאפיינים גם את המטלות.

פיזור רמות החשיפה באוויר הוא רחב מאוד והתפלגות מנות החשיפה התאימה להתפלגות לוג-נורמאלית. רמות החשיפה לחומרים בתהליכים נמוכות בדרך כלל. הממוצעים הגיאומטריים של מנות החשיפה לא חרגו אף מרמות הפעולה בכל החומרים. למעט מתכות, גם הממוצעים האריתמטיים הבלתי מוטים של מנות החשיפה לא היו גבוהים ממנת החשיפה של רמת הפעולה. הבדלים ברמות החשיפה נמצאו בין מוסכים השייכים למיגזר האזרחי לבין אלו השייכים למיגזר הצבאי.

עקב ההתפלגות הגיאומטרית בעלת זנב ימני ארוך היו הממוצעים האריתמטיים הבלתי מוטים של מנות החשיפה גבוהים מהממוצעים הגיאומטריים. מספר החריגות מרמה מירבית מותרת בתהליכים במוסכים היה נמוך והגיע ל- 4.6%. אחוזי החריגות מהרמה המרבית המותרת על פי קבוצות הסיכון הגיעו בכלל הבדיקות של ממיסים, מתכות, וחלקיקים ל- 3.5%, 4% ו- 8%, בהתאמה. גם במטלות היה אחוז החריגה מעל רמות מרביות מותרות נמוך מאד ואינו עולה על 5%. ממיסים חרגו בתהליך הצביעה והתידלוק, רמות חלקיקים חרגו בתהליך הפחחות ורמות מתכות במטלות ריתוך. קווי המגמה ההסתברותיים של רמות גורמי הסיכון באוויר בתהליכים ובמטלות סמוכים גם הם זה לזה ומצביעים על מגמות התנהלות דומות בין אם החשיפה מנותחת על פי ניטור על פני תהליך או בין אם היא מנותחת על פי ניטור על פני מטלות. פרופיל מנות החשיפה על פני מטלות אינו מצביע על מטלה כלשהי שבה רמת החשיפה חריגה במיוחד ביחס לרמה מרבית מותרת לזמן קצר וממוסכת אם מבצעים מדידה של ממוצע משוקלל על פני מחזור תהליך שלם או משמרת מלאה. רוב דרגות החשיפה שנובאו לתרחישי החשיפה שנצפו במוסך על פי תבנית החשיפה שפותחה שייכות לתחום החשיפה הזניחה עד נמוכה. ההתאמה בין דרגת החשיפה הפוטנציאלית, שחושבה על פי המודל לתצפיות של תרחישי חשיפה, לבין תחום תוצאות הניטור הגיעה ל- 92%. ההערכה הפוטנציאלית על פי המודל היתה גבוהה מתחום החשיפה בפועל (false positive) ב- 2.3% מהתצפיות ונמוכה מתחום החשיפה ב- 5.6% מהתצפיות (false negative), עובדה המצביעה על כך שבמקרים אלה לא חזתה תבנית החשיפה במדויק את רמת החשיפה בפועל והעובד למעשה עלול להיות חשוף מעל המותר או בדרגת חשיפה גבוהה יותר מזו שנחזתה על ידי תבנית המודל.

דיון ומסקנות

המחקר הנוכחי בחן שימוש בתבניות הסתברותיות ואת מעמדם של תהליך (process) ושל מטלה (task) בארגז הכלים של הגיהותן למטרת הערכת חשיפה תעסוקתית נשימתית במוסכים. פירוק תכולת הפעילות המפעלית לתהליכי עבודה תורם לאיתור והבנה של מקורות חשיפה ופוטנציאל העוצמה שלהם ומסייע לדרג סיכונים תעסוקתיים על סולם איכותי של רמות סיכון. אולם במצבים מורכבים או ריבוי תת פעילויות בתהליך עבודה, קיים קושי לאפיין חשיפה באופן ממצה רק ע"י מיון כוח העבודה לפי תהליכים ועיסוקים. עובדה זו הביאה להמלצות מקצועיות להתמקד גם באפיון מטלות בעת הערכת חשיפה איכותנית וכמותית. פירוק תהליך למטלות מסייע בהערכת שיאי חשיפה. במקומות שטיב העבודה בהם תחזוקתי או שירותי, כגון מוסכים, קשה יותר להרכיב קבוצות בעלות חשיפה דומה לצורך הערכת חשיפה ועל כן שימוש בתהליכים ובמטלות במקביל או לסירוגין יחד עם שימוש בקווי מגמה הסתברותיים ככלי להערכת חשיפה בתהליכים ובמטלות מומלץ ועשוי לענות על קושי זה.

ברוב המקרים, היו קווי המגמה ההסתברותיים שהתקבלו במחקר לתהליך ומטלותיו דומים מספיק כדי להסיק שניתוח חשיפה על פי מטלות בענף המוסכים אינו יתרוני במקרים אלה על פני ניתוח חשיפה לפי תהליכים. בחלק קטן מאוד של מדידות חשיפה במוסכים רמת החשיפה במטלה חורגת מרמות מרביות מותרות בעוד שהרמה בתהליך אינה חורגת מרמה מרבית משוקללת. במקרים אלה הערכת חשיפה על פי תהליך ממסכת את המצב לפיו עובדים חשופים מעל המותר בפרקי זמן חלקיים של התהליך, ועלולה ליצור תת הערכה של החשיפה האמיתית. בחלק קטן אחר המצב הפוך ואי חריגה במטלה אינו מרמז על חריגה המתרחשת בתהליך אליו שייכת המטלה.

בחירת המשתנים האופרטיביים שהרכיבו את סקר החשיפה הפוטנציאלית במוסך ואת מודל תבנית החשיפה התבססה על הרעיון של אפשרות להערכת חשיפה נשימתית פוטנציאלית על פי מספר מינימאלי של מאפיינים (משתנים). מודל תבנית החשיפה במחקר יחד עם התוכנה למשתמש מוצעים ככלי עזר לשיפוט המקצועי של הגיהותן, אולם אינם מיועדים לבוא כתחליף לשיפוט המקצועי או הכלים הסטטיסטיים לניתוח חשיפה.

פיתוח תבנית החשיפה הגיע ליכולת ניבוי של תחומי חשיפה בפועל החופפים לתחומים הפונקציונליים בתקנות הגיהות. דרגת הרזולוציה שהושגה בתבנית שפותחה לניבוי רמת החשיפה בפועל אינה רגישה לאבחנה בין רצועות צרות מאד של חשיפה ביחס לרמה המרבית המותרת לחשיפה. תרחישי חשיפה בתהליך נתון, שלגביהם מתקבלת על פי תבניות המודל תת הערכה של חשיפה בהשוואה לרמת חשיפה על פי ניטור במדגם פיילוט, יכולים לשמש כנקודת התרעה לגבי האפשרות לקבל תת הערכה של חשיפה בתרחישים כאלה בעתיד.

יש לעודד שימוש בתבנית חשיפה כיוון שהוא עשוי לסייע לגיהותנים בהערכת חשיפה ויכול לתרום להגברת האחידות של ההערכה ביניהם ולהקטנת השונות בסולם הדרגות של הערכה המורכבת ממשתנים רבים. מומלץ לעודד שימוש בקווי מגמה הסתברותיים המספקים כלי ניתוחי להחלטה אם עדיף שימוש בתהליך או במטלה כמכוון להערכת חשיפה. על אף שמודל התבנית עשוי להיות ישים בתעשיות אחרות, יש לבדוק ישימות זו על פי נתוני ניטור וסקר שנאגרו עבור כל ענף תעשייה.