



# חלקיק הננו - נעלם אחד גדול

## בטיחות וגיהות בעבודה עם חומרים ננו-טכנולוגיים (חלק שני)

בחלק הראשון דנו בתיאור חומרי הננו והיישומים.

חלק זה של המאמר מתרכז בשיטות הבקרה וההערכה האפשריות והקיימות, ועוסק בנושאי בטיחות וגיהות

מאת ד"ר חיים גורדון

הכותב הוא ד"ר לכימיה פיזיקלית ופני שטח מהטכניון בחיפה, מומחה למערכות אפיון ננוטכנולוגיות ומערכות ריק אולטרה גבוה (UHV), מייסד ומנהל חברת אל-סול טכנולוגיות בע"מ [www.elsolab.co.il](http://www.elsolab.co.il)

### רמות מרביות המותרות לחשיפה

רמות מרביות מותרות לחשיפה (Occupational Exposure Limits - OELs) שימושיות בהפחתת סיכונים בריאותיים הקשורים לעבודה ומאפשרות לתת הנחיות על בסיס כמותי ולהעריך את הפוטנציאל לחשיפה ואת חשיפת העובד לסיכונים בעת ביצוע בקרה הנדסית או אחרת. נכון לעכשיו, אין תקנים רגולטוריים לננו חומרים בארה"ב.

עם זאת, המכון הלאומי לבטיחות ולבריאות תעסוקתית בארה"ב - NIOSH, פרסם לאחרונה עלוני מידע (CIBs) לגבי גבולות חשיפה תעסוקתית לננו חומרים. בעלון מידע על טיטניום דו-חמצני (TiO<sub>2</sub>) ממליץ NIOSH על מגבלות חשיפה של 2.4 מ"ג/מ"ק לאבקה דקה ו-0.3 מ"ג/מ"ק לאבקה אולטרה-דקה (ultrafine) כממוצע משוקלל זמן (TWA) עד ל-10 שעות ביום בשבוע עבודה של 40 שעות (NIOSH 2011). בעלון מידע על צינוריות פחמן (CNT) ממליץ NIOSH שחשיפת העובד תהיה מוגבלת ללא יותר מ-1 מיקרוגרם/מ"ק (NIOSH 2013).

מכון התקנים הבריטי, לדוגמה, הוציא הנחיות דומות לחומרי-ננו שונים, וממליץ לעבוד עם מגבלות חשיפה המבוססות על סיווגים שונים, כגון מסיסות, צורה ומבנה ובעיות בריאותיות פוטנציאליות, הקשורות לחלקיקים של אותו הרכב כימי של החומר, אך בצורות מבנה גדולות יותר של אותו החומר. בדומה לכך, פרסם המכון לבטיחות העובד בגרמניה הנחיות דומות (IFA 2009).

בהיעדר הנחיות ממשלתיות או הסכמה על גבולות חשיפה, חלק מהיצרנים פיתח המלצות OELs עבור מוצרי ננו המיוצרים על ידם. לדוגמה, חברת באייר (Bayer) ביססה OEL על הערך של 0.05 מ"ג/מ"ק עבור צינוריות פחמן (multiwalled) Baytubes®. מתוצרתם. עבור צינוריות Nanocyl CNT's, הריכוז ללא השפעה

באוויר מוגדר כ-2.5 מיקרוגרם/מ"ק לשמונה שעות חשיפה יומיות. גישה נוספת שניתן לנקוט כאשר לא קיימות רמות מרביות מותרות לחשיפה תעסוקתית (OELs) היא המושג As Low As Reasonably Achievable - ALARA כנמוך וסביר שניתן ליישום. זו, בדרך כלל, המטרה לכל החשיפות התעסוקתיות. תפיסה זו שימושית במיוחד כאשר OELs נעדרים, או במקרה של מזהמים עם רעילות בלתי ידועה.

### שיטות בקרה ושיטות הערכה

אסטרטגיית בקרת החשיפה והיררכיה של בקרות ושליטה על חשיפות היא השיטה הבסיסית והמסורתית של הגנת העובדים מפני סיכונים תעסוקתיים. היררכיה של בקרות שימשה תמיד כאמצעי לקביעה כיצד ליישם בקרות אפשריות ויעילות. איור 4 מתאר את ההיררכיה הזאת.

הרעיון מאחורי ההיררכיה של בקרות הוא ששיטות המופיעות בחלק העליון של הפירמידה שבאיור 4 יעילות יותר בהפחתת הסיכון מאלה המופיעות באזור התחתון. יישום היררכיה מסוג זה מוביל בדרך כלל לתכנון מערכות בטוחות יותר לעובדים ולבאים במגע עם תהליכי הייצור. במערכות אלה, כאשר משתמשים בשיטת ההיררכיה שתוארה קודם, הסיכון במחלה או בפציעה פוחת באופן משמעותי.

תהליך הנקרא "מניעה בעת תכנון" (מב"ת) או באנגלית Prevention through Design (PtD) הוא הבאה בחשבון של סכנות בתחילת תהליך התכנון ו/או עיצוב המוצר. תהליך זה הוא עיקרון בסיסי של PtD. כאשר המהנדסים, המנהלים ובעלי המפעלים פועלים בשיתוף פעולה כבר מתחילת הפרויקטים, ניתן ליישם את נושא הבטיחות ביעילות רבה יותר.

יותר לעובדים. לפעמים ניתן להחליף חומר ננו ספציפי בחומר ננו אחר, כאשר ניתן להעריך כי בחלק מהמקרים הוא עשוי להיות מסוכן פחות וגם יספק את הביצועים הרצויים.

## בקרה הנדסית

בקריות ורכיבי פיקוד (Engineering Controls) מכל הסוגים מגנים על העובדים על ידי הסרת תנאים מסוכנים בצורה עצמאית ואפילו אוטומטית. לדוגמה, אוורור מקומי הלוכד ומסיר פליטות מזיקות לאוויר, או על ידי הצבת חיץ הנדסי בין העובד ומקור הסיכון. בקריות הנדסיות מתוכננות היטב יכולות להיות יעילות מאוד בהגנה על עובדים והיו בדרך כלל מהסוג "הפסיבי", כלומר, ללא אינטראקציות עם העובדים. חשוב לתכנן בקרה הנדסית כך שלא יפריע לפיריון העובד ולקלות שבה בוצעה העבודה לפני הכנסת הבקרה ההנדסית. אם הבקרה ההנדסית שתוכננה הופכת את התהליך לקשה, מסורבל או אטי, המפעיל עלול לנסות לעקוף את הבקרות האלה. באופן אידיאלי, בקרות הנדסיות צריכות להפוך את הפעולה לקלה יותר לביצוע. המלצה טובה על שימוש בבקרה הנדסית היא "לתכנן כך שהביצוע קל יותר כאשר הפעולה נעשית בדרך בטוחה". עיקרון זה חל גם על אמצעי בקרה מינהלית. העלות הראשונית של בקרות הנדסיות או בקרים תעשייתיים יכולה להיות גבוהה יותר מאמצעי בקרה מינהלית ו/או ציוד מגן אישי (PPE). עם זאת, בטווח הארוך, עלויות התפעול הן לעתים קרובות נמוכות יותר, ובמקרים מסוימים יש חיסכון בעלויות בתחומים אחרים של התהליך. יתרון אחר בשימוש בבקרות הנדסיות הוא השליטה העצמאית, ולעתים האוטומטית, על התהליך, וכך הן לעתים יעילות יותר מאמצעי בקרה ניהולי או ציוד מגן אישי. גם בטיחותו של העובד עולה בשימוש בבקרות הנדסיות. שימוש בבקרות הנדסיות מפחית את הפוטנציאל של עובד להגיע לרמות חשיפה גבוהות עקב התנהגות לא נכונה, שעשויה להיגרם מסיבות שונות כמו לחץ, רצון לקדם דברים תוך עקיפת נהלים וכו'. לכן, כאשר הביעור ו/או החלפה אינם באים בחשבון, החלופה הרצויה ביותר להקלה ולהפחתה של הסיכונים לעובדים היא בקרות הנדסיות.

בקריות שנעשו על ידי בקרים הנדסיים מקנות שליטה יעילה ברוב תהליכי הייצור של חומרי הננו. ברוב המקרים, בקרות הנדסיות הן יותר מעשיות מאשר ביעור או החלפה, כיוון שהפוטנציאל של חומרי הננו הוא גבוה, ושיטת בקרה הנדסית צריכה להיות הגנתית יותר מאשר בקרה מינהלית או ציוד מגן אישי. בקרות הנדסיות מתחלקות לשתי קטגוריות רחבות: בקרות אוורור ובקרות ללא אוורור.

## בקרה מינהלית

בקריות מינהליות ושימוש בציוד מגן אישי (צמ"א, PPE) נועדו לתת מענה להגנה על העובד בעבודה בתהליכים בעלי סיכונים רבים, כאשר השיטות הקודמות שהוזכרו אינן ישימות מספיק. סיכונים יכולים להתממש, לדוגמה, כאשר אמצעי בקרה הנדסי שאינו מעשי או שאינו מסוגל להפחית את החשיפה לרמה הדרושה. אז יש צורך בבקרה מינהלית, הכוללת הדרכה ותרגול של העובדים, עבודת משמרות בסבבים קצרים, תחלופה גבוהה של עובדים, עבודה לפי לוח פעילויות קבוע וקשיח ואסטרטגיות אחרות לצמצום החשיפה. תכניות בקרה מינהלית ותכניות צמ"א



איור 4. ייצוג גרפי של היררכיה של בקרות

ביעור וחילוף הם בדרך כלל האמצעים היעילים ביותר, כל עוד הם מתוכננים ומתבצעים בשלב התכנון או הפיתוח. כאשר זה נעשה בשלב מוקדם מספיק, יכול יישום בשלב זה להוביל לחיסכון משמעותי. לדוגמה, חיסכון בעלות של ציוד המגן, חיסכון בעלות הוצאה ההתחלתית הראשונה וחסכון בעלות התפעולית למערכות אוורור. ביעור או חילוף בתהליך קיים עשויים לגרום שינויים גדולים בציוד ו/או בנהלים, אשר יפחיתו את הסיכונים.

## ביעור

ביעור (Elimination) היא הגישה הרצויה ביותר בהיררכיה של בקרות. כפי שהמילה מרמזת. הרעיון מאחורי הביעור הוא להסיר לחלוטין את המפגע, לבטל את הסיכונים. בדרך כלל, קל יותר להשיג זאת בשלב התכנון. דוגמה לפעולת הביעור בתהליך תעשייתי יכולה להיות הסרת "בדיקת קבלה" של חומר ננו. בבדיקת הקבלה נדרש לפתוח חבילה המכילה את החומר הננו-טכנולוגי עם הפוטנציאל הגלום בפיזור אווירוסולי (aerosolization) של החומרים האלה, מה שעלול לגרום לסכנה פוטנציאלית לבדוק עצמו. לכן, אם הדבר אפשרי, הסרת בדיקת הקבלה משרשרת התהליך יוצרת תהליך בטוח יותר.

## חילוף

בהיררכיה של המניעה, מטרת החלפה (Substitution) היא להחליף סט אחד של תנאים, שבו קיימת רמת סיכונים גבוהה, בסט של תנאים אשר בו הסיכונים נמוכים יותר. דוגמאות לשיטת החלפה הן החלפת ממיס דליק בחומר ממיס על בסיס מים שאיננו דליק. או, לדוגמה, החלפת חומר רעיל מאוד בחומר אחר בעל רעילות נמוכה יותר. אפשרות נוספת להחלפה היא שינוי תנאי התפעול בתהליך, כך שיהיו חמורים פחות, כגון הפחתת לחץ האוויר החדוס. פעולת החילוף של ננו חומר עלולה להיות קשה מאוד, שכן החומר הוכנס לתהליך הודות לתכונותיו הרצויות. עם זאת, חילוף עשוי להיות אפשרי. לדוגמה, החלפת חומר ננו בצורת תרחיף לגרסת אבקה יבשה תפחית את אפשרות הפיזור החלקיקי. כך אפשר לספק רמת הגנה טובה

## הגנה על בריאות העובדים בתעשיית הננו

תעשיית הננו-טכנולוגיה אימצה פתרונות להגנה על בריאות העובדים בתעשיות הרלוונטיות. לדוגמה, בנושא תחלופת אוויר. הפתרונות שנמצאו הם אוורור ועבודה במינדפים מתאימים. פתרונות אלה שימושיים מאוד בתעשיית הכימיה, בתעשיית הפרמצבטיקה, בתעשיית הביולוגית והרפואית ועוד. בתעשיית הננוטכנולוגיה ניקוי הריאקטורים לייצור החומרים הננומטריים היא פעולה שכיחה.

תהליך הניקוי המתבצע בכורים (הריאקטורים) לייצור חומרים ננומטרים זוהה כבעל פוטנציאל חשיפה גבוהה לעובדים הנמצאים באזורי הייצור, וגם לעובדים אחרים הנמצאים במפעל - עובדי מינהלה, תחזוקה וניקיון, מחשבים וכל עובד אחר או אדם הנמצאים בסביבה. כדי לברר את הסיכונים הכרוכים בהימצאות בסביבה זו, בוצעו על ידי כמה וכמה חוקרים במשך השנים עבודות מחקר.

בדיקה בכמה מפעלי ייצור הראתה שפעילות ניקוי הכורים תרמה להגדלת ריכוזי המזהמים בסביבת המתקן ולחשיפות, בעיקר לעובדי תפעול ותחזוקה. דליפה מכורים הנמצאים בלחץ חיובי יכולה לתרום לריכוזי רקע גבוהים ולגרום לחשיפה מוגברת לעובדים בכל רחבי המפעל.

כאשר הכורים קטנים יחסית, ישנם מפעלים המציבים כמה מתקנים בתוך ארונות מיוחדים, כדי לא לאפשר לחלקיקים מזהמים להיפלט. מחקרים הראו כי כאשר הכור שוכן במינדף מעוצב היטב, אובדן החלקיקים לסביבה הוא קטן ביותר. כאשר הכורים גדולים יותר, ניתן לבנות ארונות ומאזנים המבודדים את הכור ואינם מאפשרים לזיהומים להיפלט לסביבה (איור 5). מחקרם של Methner et Al (2010) סיכם מדידות אוויר ב-12 מתקנים שונים שעבדו עם חומרי ננו, ובהם נמצא כי החשיפה הגבוהה ביותר שנמדדה התרחשה במהלך משימות הניקוי של הכורים. פעילות הניקיון כללה גירוד וצחצוח של סיגי חומרי הייצור מקירות הכור.



איור 5. מתחם מאוורר לכור בקנה מידה גדול, המשמש לייצור חומרי ננו, כדי להוריד את ערכי פליטת החלקיקים במקום העבודה

עשויות להיות יקרות פחות למימוש בהתחלה, אך בטווח הארוך יקרות מאוד. כמו כן, שיטות בקרה ניהוליות ושימוש בצמ"א להגנה על העובדים הוכחו כיעילות פחות מאמצעים אחרים, ולעתים קרובות נדרש מאמץ משמעותי של העובדים. יישום חשוב של בקרה מינהלית הוא יצירת "יתירות", כלומר, גיבוי לבקרות ההנדסיות. על הבקרה ההנדסית לספק את ההגנה הראשונית לעובד, ועל הבקרה המינהלית לשמש כגיבוי במידה שהבקרה ההנדסית תיכשל.

המכון הלאומי לבטיחות ולבריאות בארה"ב (NIOSH) ממליץ על אסטרטגיות עבודה במתקנים העובדים עם חומרי ננו:

- (1) להעביר תכניות אימון מסודרות, כדי לתרגל את העובדים בטיפול בטוח בחומרי ננו לצורך מזעור הסיכוי לחשיפה משאיפה או ממגע עם העור.
- (2) לספק מידע על התכונות המסוכנות של ייצור החומרים והטיפול בהם, עם הוראות כיצד למנוע חשיפה.
- (3) לעודד עובדים להשתמש במתקני ניקוי ידיים לפני אכילה או עישון, וגם לכבס את הבגדים במקום העבודה.
- (4) לספק אמצעי בקרה והגנה נוספים, לדוגמה, שימוש באזורי חיץ, מתקני טיהור לעובדים - אם המפגע מצדיק זאת - כדי להבטיח כי חומרי ננו אינם מועברים מחוץ לשטח העבודה.
- (5) במקומות שבהם יש אזור בעל פוטנציאל לזיהום, יש לספק מידית מתקנים למקלחת ולחלפת בגדים, כדי למנוע זיהום בשוגג של אזורים אחרים, הנגרמים על ידי העברה של חומרי ננו על הבגדים ועל העור, כולל הבאת בגדי העבודה המזוהמים בחומר הביתה.
- (6) להימנע מטיפול בחומרי ננו באוויר הפתוח, בעיקר אם החומר נמצא בצורת אבקה.
- (7) יש לאחסן חומרי ננו במכלים סגורים היטב בכל מצב אפשרי.
- (8) יש לוודא שאזורי העבודה והציוד ששימשו עם חומרי ננו מנוקים, לכל הפחות, בסוף כל משמרת עבודה באמצעות שואב אבק מסונן (HEPA) או בשיטות ניהול רטובות (כאשר הנוזל שבשימוש אינו יוצר מפגעי בטיחות נוספים). אין להשתמש בניקוי "יבש" במטאטא או באוויר דחוס כדי לנקות אזורי עבודה. הניקוי צריך להתנהל באופן שמונע מגע של העובדים עם פסולת של חומרי ננו.
- (9) יש להשליך את כל חומרי הפסולת בשיטה העומדת בכל דרישות החוק של המדינה והתקנות המקומיות
- (10) יש להימנע מאכילת מזון או שתיית משקאות במקומות עבודה שבהם יש חומרי ננו.

## ציוד מגן אישי (צמ"א)

ציוד מגן אישי (PPE), לדוגמה, מסכה עם מסנן, כפפות, ביגוד מגן, הוא האפשרות הרצויה פחות לשליטה על היחשפות העובדים לחומרים מסוכנים. צמ"א משמש כאשר בקרה הנדסית ובקרה מינהלית אינן ריאליות או יעילות מספיק בהפחתת החשיפה לרמות מקובלות. זהו קו ההגנה האחרון לאחר בקרות ההנדסה, נוהלי עבודה ובקרה מינהלית. במקרים של שימוש בציוד מגן אישי יש לדאוג מראש לתכנית שמטפלת בסיכונים בכללותם, הכשרת העובדים, בחירת צמ"א ותחזוקתו. התכנית צריכה להיות קיימת כאשר משתמשים בציוד המגן האישי. יש שני סוגים עיקריים של צמ"א: ציוד המגן על עור העובד, וציוד מגן אישי המגן על דרכי הנשימה.

## סיכום

ננו חומרים מוגדרים כחומרים שממד אחד שלהם קטן מ-100 ננומטר. השימוש בחומרים הללו גדל והולך, מפני שהם נותנים פתרונות טכנולוגיים למגוון גדול של יישומים.

חומרי ננו הם בעלי תכונות שיכולות להיות שונות מאוד מתכונותיו של החומר כאשר הוא מופיע בממדים גדולים יותר. חומרי הננו ייחודיים וחשובים מאוד לתהליכים ספציפיים. אך אותם מאפיינים רצויים וייחודיים עלולים גם לגרום להשפעות בריאותיות שליליות על העובדים בתעשיית הננוטכנולוגיה, ובכלל המשתמשים בחומרים אלה.

נכון לעכשיו, הרעילות של חומרי ננו אינה ידועה מספיק, אך מחקרים ראשוניים מצביעים על כך שעלולות להיגרם בעיות בריאותיות הקשורות לחשיפה תעסוקתית. בשל הפוטנציאל להשלכות בריאותיות חשוב לבצע הערכה ובקרה לחשיפות העובדים - ככל האפשר.

## מקורות

1. NIOSH [2013]. Current strategies for engineering controls in nanomaterial production and downstream handling processes. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2014-102.
2. Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity, Cristina Buzea, Ivan. I. Pacheco Blandino, and Kevin Robbie, Biointerphases vol. 2, issue 4 (2007) pages MR17 - MR172
3. Methner M [2008]. Engineering case reports: effectiveness of local exhaust ventilation (LEV) in controlling engineered nanomaterial emissions during reactor cleanout operations. J Occup Environ Hyg 5(6):D63-D69.
4. Yeganeh B, Kull CM, Hull MS, Marr LC [2008]. Characterization of airborne particles during production of carbonaceous nanomaterials. Environ Sci Technol 42(12):4600-4606. ■

תיקון טעות: בחלק הראשון של המאמר שפורסם בגיליון 361 נפלה טעות בעמ' 13. צ"ל: (1 ננומטר =  $10^9$  מטר, או במילים אחרות מיליונית המילימטר) ולא כפי שכתב בטעות.