

# נוטכנולוגיה: האתגר הגיהותי



”  
חזון הנבו:  
”אני רוצה לבנות ביליון  
בתי חרושת זעירים ודומיהם  
המייצרים בו-זמנית”  
(ריצ'רד פיינמן, 1959,  
חתן פרס נובל לפיזיקה)  
“

**בד בד עם התועלת המבטיחה והפוטנציאל הכלכלי הטמונים בטכנולוגיית הנוטכנולוגיה החדשה, היא מעוררת דאגה בהקשר לבריאות ובטיחות העובדים. ננוטכנולוגיה מציבה אתגר בפני הגיהות התעסוקתית בכל הנוגע להערכת הסיכון, מדידתו ובקרתו בסביבת העבודה**

מאת ד"ר אשר פרזו

## הגדרה והתפתחות

”חלקיק ננו” מוגדר כאחד בעל קוטר מספיק קטן כדי ליצור ישות הנבדלת בתכונות פיזיקליות וכימיות ברורות מהתווך הכללי שבו הוא נמצא. הבדלי הגדלים בתחום יוצרים הבדלים בתכונות ובהתנהגות החלקיקים, אך הגדרת הטכנולוגיה איננה מביאה זאת בחשבון.

לידת הרעיון התפיסתי של שליטה באמצעים טכנולוגיים על אטומים ומולקולות, או על מיקטעים שלהם, בתחום הגודל הנומטרי, ניתובם וניצולם לבניית מבנים חומריים שונים תוך השגת דרגה של ”דיוק-על”, מיוחסת לפיזיקאי הדגול ריצ'רד פיינמן שתיאר ב-1959 את רעיון הנוטכנולוגיה כבר-השגה. יחד עם דברים אחרים, הוא ניבא שניתן יהיה לאחסן מידע בצפיפות אדירה ושניתן יהיה לסייע בהתמודדות עם בעיות בכימיה ובביולוגיה ע”י

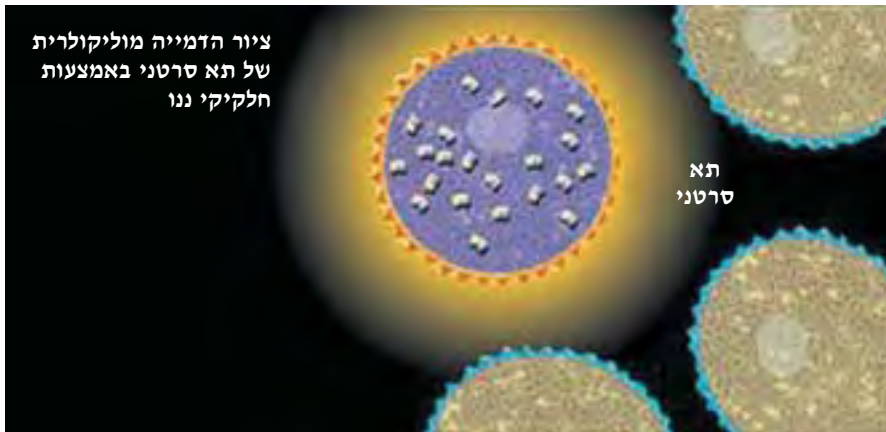
”נוטכנולוגיה” מוגדרת כתחום טכנולוגי העוסק בייצור, יישום, מחקר ופיתוח של תבניות, כלים ומערכות שצורתם ומידותיהם מוגבלים לתחום הגודל 1-100 ננומטר. ההגדרה מתייחסת גם לחלקיקים ממקורות שונים שגודלם נופל בתחום הגודל הזה. החלק התחתון של התחום מתאים לגדלים של אטומים ומולקולות ומגיע לגבולות הגודל האלמנטרי של חומר, בעוד שגודלם של חלקיקים ממקורות מוגדרים רבים נופל בחלק העליון של התחום.

asherp@osh.org.il

הכותב הוא יועץ המוסד לבטיחות ולגיהות בנושאי בריאות וגיהות בתעסוקה. מאמר זה נכתב בעקבות הרצאה בנושא, שהושמעה בכנס השנתי לבטיחות ולגיהות בתעסוקה, דצמבר 2006.

הינדוס מחודש של דברים באמצעות יחידות מבנה אטומיות ומולקולריות. נקודת זינוק בנושא חלה ב-1981 כאשר קבוצת מדענים מחברת IBM פיתחה מיקרוסקופ סורק שבו השתמשו במחטים עדינות וזורם חשמלי נמוך במיוחד לקביעת הגובה של אטומים בודדים. בנוסף ליכולת להגיע להדמיה חזותית של מולקולות - המיקרוסקופ היה מסוגל לגעת, להזיז ולמקם באופן מדויק אטומים בודדים. מאז השתפרה בקביעות היכולת להציג ולטפל בחומר ברמה האטומית.

נוטכנולוגיה משתמשת בחלקיקים מהונדסים, מכוונים, המשמשים כחומרי גלם ואבני בניין. בניגוד לגישה שאליה אנו רגילים, ולפיה אנו מקטינים פריטים תוך יציאה מפריט גדול והקטנתו באמצעים העומדים לרשותנו, גישת הנוטכנולוגיה הפוכה ולפיה נדרשת יכולת לבנות פריטים מיחידות בנייה בגודל אטומי או מולקולרי. יש להבדיל בין חלקיקי ננו מהונדסים לבין חלקיקים על-עדינים (ultrafine) שהם בעלי תחום גודל דומה, אך נוצרים בתהליכים טבעיים ומלאכותיים, באופן מקרי ובלתי נשלט, כתוצרי לוואי בלתי מכוונים, כגון תוצרים של תהליכים אטמוספריים ותוצרי שריפה.



דקות של חומרים מגנטיים. יישומים אחרים עוסקים בזיכרון מגנטי לא מתכלה, חיישנים לכלי רכב, גלאי מוקשים ומצפני מצב מוצק. מוצרים רבים נהנים מתכונות מיוחדות של חומרי ננו, ביניהם צבעי מגן וציפויים נגד קורוזיה, שריטות וקרינה, ציפויים מונעי סינוור במכוניות, מכשירים לחיתוך מתכות, מוצרים קוסמטיים ומוצרי הגנה מקרינת שמש, כדורי טניס ארוכי חיים, אריגים נעדרי כתמים, חומרי דבק דנטליים, דיו, תחבושות לכוויות ולפצעים שטוחים.

נדגיש פיתוחים נוספים המתבססים על ננוטכנולוגיה במספר תחומים:

● **רפואה** - גבישי ננו מוליכים למחצה שהפלאואורסצנטיות שלהם מאפשרת לבדוק נימי דם עמוקים בעור, בעומק גדול פי 2 מזה שמאפשרים חומרים קונבנציונליים ובחמישית עוצמת הקרינה הנדרשת. כמו כן, היכולת לחדור אל גרעין התא נחקרת כאפשרות לטיפול בגנים פגומים וככלי להחדרת תרופות ביישומים רפואיים.

● **תאורה** - נקודות קוואנטיות מהוות מרכיבים בייצור דיודות פולטות אור (LEDs) בצבעים שונים.

● **לוחמה כימית** - חיישנים אלקטרו-מכניים המסוגלים לגלות ולזהות מולקולה בודדת של חומר המשמש ללוחמה כימית.

● **גילוי חומרי נפץ** - מדענים פתחו חיישן העשוי מכבלי ננו סיליקוניים המצופים בפולימר כימי, המשמש לגילוי חומרי נפץ מסוימים. חיישן זה, הזוהר כאשר מקרינים עליו אור אולטרה-סגול מפסיק לזהור אם הוא בא במגע עם חומר הנפץ. החיישן מסוגל לגלות כמויות חומר זעירות היוצרות באוויר ובמים ריכוזים בסדר גודל של חלקים לביליון (ppb) ולכן החיישן מאפשר לגלות עקבות של חומרי נפץ טריים וישנים.

● **סיבים** - סיבים בעלי חוזק גדול פי כמה מהחוזק של סיבי משי וסיבים של חומרים מרוכבים (קוולאר).

● **אגירת נתונים** - מכשירים לאחסון נתונים בצפיפות גבוהה ביותר.

● **איכות הסביבה** - פיתוח חלקיקי ננו של ברזל המסוגלים לסלק מזהמים כימיים עיקריים ממי תהום באתר תעשייתי ביעילות של 96%.

מגיע גם לתחום העליון של הננו, ועליהם נמנים צברי חלקיקים על-עדיניים. לקטגוריה זו שייכים גם תבניות או חלקיקים שאינם מתאימים לקטגוריות אחרות.

### שימושים ופיתוח

חומרי ננו וחלקיקי ננו כחומרי ייצור נמצאים בשימוש ביישומים אלקטרוניים, מגנטיים ואופטרוניים, בהדמיה רפואית, ביישומים פרמצבטיים, קוסמטיים, קטליטיים, יישומי אנרגיה שונים ובתעשיית חומרים. שפופרות ננו פחמניות חזקות פי מאה וקלות פי שש מפלדה, והן מוליכות חום כיהלום. בסידור מסוים של שפופרות אלה, האטומים שלהם מוליכים חשמל לא פחות טוב ואולי אף יותר טוב מתילי נחושת. בסידור אחר הם פועלים כמוליכים למחצה. תכונות אלה מנוצלות בפיתוח של מוצרים שונים. לדוגמה, כשמטביעים שפופרות ננו פחמניות בסיב החזק ביותר המשמש לייצור אפודי מגן נגד ירי (סיבי זיילון) הן משפרות את חוזק הסיב ב-60% ומכפילות את יכולת ספיגת האנרגיה של האפוד. שיפור באחוז דומה מושג בהספק הכוח של תאי אנרגיה כאשר לייצורם משתמשים בשפופרות ננו-פחמניות. מחשבים נישאים וטלפונים סלולריים המכילים תאי אנרגיה שבהרכבם כלולות שפופרות ננו-פחמניות מסוגלים לפעול שבועות ברציפות. דוגמה נוספת לשימוש בשפופרות היא ייצור של מחבטי טניס. הטמעת השפופרות בנקודות שבהן מופעל על המחבט המעמס הגבוה ביותר משפרת את בלימת הזעזועים ע"י המחבט. תכונות הולכת החום של השפופרות יכולה להיות מנוצלת לחימום מישטחים כגון סדין חשמלי, כנפי מטוס שקפאו עליהם מים ונייר ציפוי על קירות קרים. ואכן, חברת IBM פיתחה טרנזיסטורים עתירי כוח; וגם חברות כמו אינטל, מוטורולה, סמסונג ודו-פונט פיתחו יישומים שונים של שפופרות ננו-פחמניות. וכך, שימוש רב קיים בפיתוח של תהליכי ליטוש מכני-כימי, סרטי הקלטה מגנטיים, סוככי שמש, סימון ביולוגי, ציפויים בעלי מוליכות חשמלית, סיבים אופטיים. רוב הכוננים הקשיחים במחשבים מכילים ראשי (מוקדי/מרכזי) עמידות מגנטית אשר מאפשרים הגדלה משמעותית של קיבולת הזיכרון באמצעות שכבות ננומטריות

חלקיקי ננו מכוונים הם בעלי תכונות ספציפיות (גודל, צורה, תכונות שטח פנים, כימיה) ומהווים אוכלוסייה הומוגנית, וגם צורות צבורות שלהם, כגון: אירוסולים, אבקות וקולואידים, תשקפה את אותן התכונות והאחידות. ננו-אירוסול ייחשב כזה שנגיש לאינטראקציות כימיות, פיזיקליות או ביולוגיות באמצעות חלקיקיו הבודדים, ולכן הצבר האירוסולי הגדול יותר מבטא בהתנהגותו את התנהגות החלקיקים הבודדים המרכיבים אותו. לעומת זאת, חלקיקים על-עדיניים בלתי מכוונים, מהווים אוכלוסייה בעלת תכונות פיזיקליות וכימיות הטרוגניות. דוגמה לחלקיקים על-עדיניים בתחום הננו, שהגיהות הקלאסית עוסקת בחשיפה תעסוקתית אליהם ובבקרתם באופן שוטף, הם נדפים הנפלטים בתהליכי ריתוך, פיח מתהליכי בעירה, תוצרי שריפות יער ואבק מתהליכים גיאולוגיים ותהליכי בנייה והריסה.

### סיווג

מורפולוגיית החלקיקים מהווה בסיס שימושי לסיווגם. מבחינים ב-4 קטגוריות של חלקיקי ננו:

● **שפופרות ננו** - אלה הן שפופרות המורכבות בעיקר מאטומי פחמן המסודרים בשכבה גלילית אחת או יותר. השפופרת היא מבוך פולימרי מוליך חשמל, המתבטאת בשימושיה בכל טכנולוגיה שבה מנוצלת זרימת אלקטרונים. שפופרות אלה הן בעלות חוזק משיכה גדול ויכולות לשמש כסיבים המגלים מוליכות גבוהה, שטח פנים גדול ותכונות אלקטרוניות מיוחדות. שפופרות ננו מורכבות גם מסיליקון וגרמניום. שימושיהן נחקרים בהרכבי פולימרים, מיסוך אלקטרומגנטי, פליטת שדות אלקטרוניים אל מסכים (צגים) שטוחים, קבלי-על, סוללות, אחסון מימן.

● **כבלי ננו** - אלה הן תבניות גבישיות המורכבות מחלקיקי ננו מוליכים ומוליכים למחצה, עם יחסי רוחב-גובה גבוהים. הם משמשים כמחברים בין התקנים ננו-אלקטרוניים. ניתן להרכיבם ממתכות שונות כגון: קובלט, זהב, נחושת, תחמוצת אלומיניום, גרמניום וגם מסיליקון ומחומרים קרמיים. שימושיהם העיקריים הם בייצור שבבים אלקטרוניים בתעשיית המוליכים למחצה. בתעשייה זו מגדלים כבלי ננו ע"י שיקוע אדי מתכת על מצעים מיוחדים בשימוש בטכניקות כימיות (CVD) ואלקטרוכימיות.

● **גבישי ננו** - אלה הן נקודות קוואנטיות (אזורים אנרגטיים במבנה הסריג הגבישי שמסוגלים לשחרר מנות של אנרגיה ע"י עירור חיצוני) של מוליכים למחצה וגבישי מתכות ותחמוצות מתכות, המכילות אלפים עד מאות אלפים של אטומים והן מגלות תכונות אלקטרוניות, אופטיות, מגנטיות וקטליטיות חדשניות. גודל הגביש ניתן לשליטה בטכניקת גידול ועל כן אפשר להפיק אורך גל נבחר מקרינת אור הנפלטת ממנו. הגבישים מופקים בתהליכים קולואידליים בכימיה רטובה.

● **חלקיקים אחרים** - צברים שרשרתיים או מסועפים הנוצרים בפאזה גזית בתהליכים פיזיקליים ואחרים. גודלם של צברים אלה

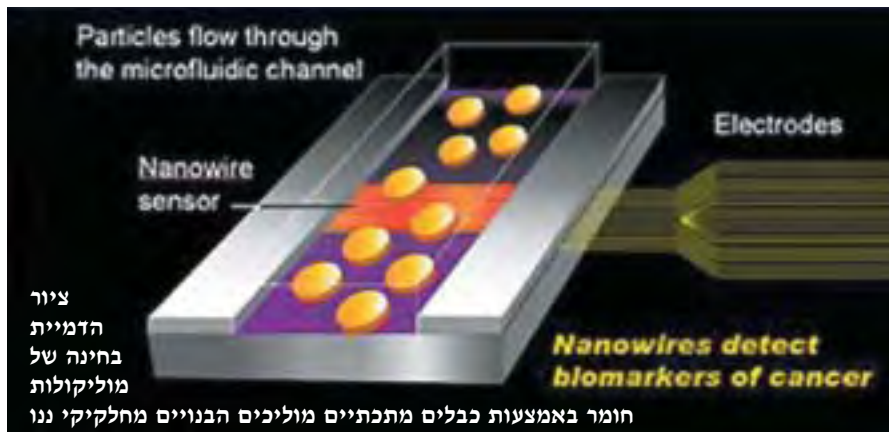
לשינויים בריקמה, למחלה לייפית ולסרטן. יש חשיבות לחקר המנה הקריטית של חלקיקי ננו הגורמת לדלקת עקב פעילות שטח פניהם, ולקביעת רמה מירבית מותרת לחשיפה בהתאם לכך.

בנוסף ליכולתם של חלקיקי ננו לחדור דרך שכבות תאים דקות ולהגיע לזרם הדם הבא מהריאות, קיימת אפשרות להתחברותם לחלבונים פונקציונליים בתא ולשינוי תפקודם של חלבונים אלה. החלקיקים עלולים להיות מוסעים למוח דרך עצבי חוש הריח והם מסוגלים להתגבר על מחסום זרימת מחזור הדם למוח (BBB). יכולתו של חלקיק ננו להתפזר מעבר לריאות מצביעה על אפשרות לפגיעה במערכת אחרות. לדוגמה: חלקיקים הנבלעים ע"י מקרופגים (זולענים - זולל+בולע) ומפונים איתם דרך מערכת העיכול, עלולים לחדור דרך מערכת זו למערכת אחרות, בהן הכבד והכליות שהשפעות עליהם טרם נחקרו. חלקיקי ננו חודרים דרך השלייה ועלולים להיות מסוכנים בשלבים התפתחותיים במהלך ההריון. נמצא גם שחשיפה לחלקיקים על-עדיניים יחד עם אוזון או אנדו-טוקסינים גורמת להשפעה סינרגית של הגורמים. ידוע שחלקיקי ננו מסוגלים לחדור גם דרך העור. חלקיקים של טיטניום דו-חמצני ואבץ חמצני, הנמצאים בשימוש בתכשירים להגנה משיוף, מסוגלים לגרום להיווצרות רדיקלים חופשיים בתאי העור ולגרום נזק לחומר התורשתי בתא (DNA). גם כאן, שטף החומר דרך העור חשוב מהמסה השוקעת על העור. ולכן, בנוסף לריכוז החומר על העור, יש להתחשב גם במספר החלקיקים, שטח העור הבא במגע עם החומר ומשך המגע.

### האתגר הגיהות

נווטכנולוגיה מציבה אתגר בפני הגיהות התעסוקתית בכל הנוגע להערכת הסיכון, מדידתו ובקרתו בסביבת העבודה. הצורך למזער ככל האפשר את חשיפת העובד לחלקיקי ננו מהונדסים הוא תולדה של כמות מוגבלת מדי של מידע על אינטראקציות של חלקיקי ננו עם הגוף, מה שמונע ביטחון (אפילו יחסי) במסקנות על הסיכונים הבריאותיים הנובעים מחשיפה אפשרית. סוגיות רבות לא נחקרו במלואן או לא נחקרו עדיין כלל, או לא עברו התאמה למצב החדש. להלן מספר דוגמאות:

- המידע הנמסר בגיליונות הבטיחות (SDS) מתייחס לחומר ללא התחשבות בגודל חלקיקי; ● לא נקבעה עדיין רמה מירבית מותרת לחשיפה לחומר כלשהו על בסיס תכונות חלקיקי ננו שלו. הרמה המירבית המותרת לחשיפה שנקבעה לחומרים עלבסיס חלקיקים בתחום המיקרומטרים עלולה להיות בלתי מספקת כאשר מדובר במסה המורכבת מחלקיקי ננו מכיוון שרמה זו אינה מתחשבת במספר החלקיקים ושטח פניהם המהווים את הפרמטרים הנכונים להערכת חשיפה לחלקיקי ננו;



ננו עיקריים, המהווים חתך מייצג של הרכב, גודל, שטח פנים, ציפוי ותכונות פיזיקו-כימיות של משפחה זו.

דרך החשיפה העיקרית לחלקיקי ננו היא הנשימה. כאמור, עקב גודלם הזעיר ושטח פנים רחב יחסית לגודלם, חלקיקי ננו מהונדסים עלולים להיות בעלי תכונות כימיות, פיזיקליות וביולוגיות שונות מאלו של חלקיקים גדולים. תכונות אלה עשויות לכלול את היכולת להגיע לאזור נאדיות הריאה, לנוע מהריאות דרך כל רקמות הגוף באמצעות הדם, לחדור מחסומים עוריים, לחדור דרך ממברנות התא ולהגיב עם תכולת התא ברמה מולקולרית.

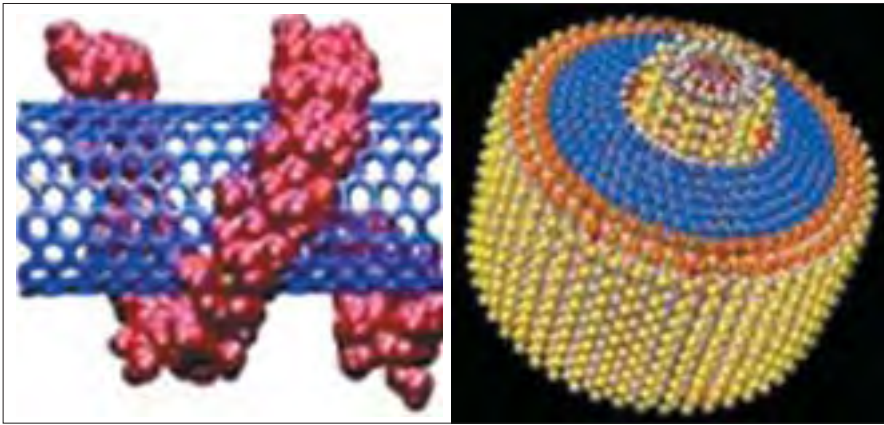
חשיפה לחלקיקים על-עדיניים, המשקפת חשיפה לחלקיקי ננו מהונדסים, גורמת למחלות בדרכי הנשימה. עבודות מחקר ראשוניות הראו ששפופרות ננו פחמניות גרמו לנזק ריאתי בעכברים זמן קצר לאחר חשיפתם למינון נמוך. במחקרים שניסו לקבוע מנה אפקטיבית של חלקיקים על-עדיניים הגורמת להתפתחות דלקת בדרכי הנשימה לא הודגם קשר טוב של מנה-תגובה עם מסת החלקיקים. רעילותם של חלקיקי ננו בלתי מסיסים עלתה עם הירידה בגודלם. תגובה דלקתית של החלקיקים באזור חילוף הגזים היתה תלויה בשטח פני החלקיקים ולא במסה שלהם. עלייה אקספוננציאלית בשטח הפנים ליחידת מסה יכולה לשנות באופן דרמטי את הפעילות הכימית של החומר, כאשר הוא בצורת חלקיקי ננו לעומת תרכובת האם בגודל מקרו. בחשיפה לחלקיקי ננו, מספר החלקיקים, גודלם, מיבנם, שטח פניהם והפעילות הכימית של שטח הפנים רלוונטיים יותר מאשר ריכוז מסתי ופעילות כימית רגילה הנגזרת מפעילות מסה (יחסי מנה-תגובה). ההשערה היא כי ברמה מולקולרית וברמת התא - אינטראקציה של שטח פני החלקיק עם תאי האפיתל בריקמת דרכי הנשימה התחתונות משרה מנגנון של תעוקה חמצנית הכוללת אפשרות של היווצרות רדיקלים חמצניים חופשיים. מבחינה זו, רעילותם של חלקיקים בעלי יכולת גבוהה של תגובה כימית ובעלי שטח פנים קטן היא שוות ערך לזו של חלקיקים בעלי יכולת נמוכה של תגובה כימית ושטח פנים גדול. דלקתיות מתמשכת עלולה להוביל

לנווטכנולוגיה ניתן הכינוי: המהפכה התעשייתית הבאה. הזדמנויות הפז הגלומות בטכנולוגיה זו ליישומים אדירים הביאו להשקעה אדירה בה, של ממשלות, החל מאמצע שנות התשעים וליצירת תשתית לתעשייה עולמית שתגלגל, קרוב לוודאי, טריליוני דולרים בעשור הבא.

### חשיפה תעסוקתית וסיכונים בריאותיים

בד בבד עם התועלת המבטיחה והפוטנציאל הכלכלי הטמונים בטכנולוגיית הנווטכנולוגיה החדשה, היא מעוררת דאגה בהקשר לבריאות ובטיחות העובדים. מספר האנשים העוסקים בה ואשר עלולים להיות חשופים לחלקיקי ננו בייצור ובשימוש אינו ידוע. ב-2004 נאמד מספר המועסקים בחברות, בארה"ב, שכל עיסוקן הוא ננוטכנולוגיה בכ-2,500 עובדים. אמנם לא כל העובדים בחברות אלה חשופים לחלקיקים מהונדסים, אך מאידך המספר אינו כולל חברות שבהן רק חלק מהעבודה מושקע בנווטכנולוגיה. מידע שהצטבר עד כה ממחקרים טוקסיקולוגיים וגייהותיים, על חלקיקים על-עדיניים ונדפים תעשייתיים בגדלי ננו, עשוי לספק רמזים על התנהגותם הצפויה של חלקיקי ננו מהונדסים. אך פיתוח תשובות הולמות ופרוטוקולים מתאימים לגבי בטיחות בנושא אינו מדביק את ההתפתחות המהירה והעצומה שמביאה לגיוסם של עובדים רבים מאוד. יתירה מכך, NIOSH צופה שעובדים לא יעסקו בתוצרים זעירים פשוטים של תהליכי ייצור אלא בחומרים מהונדסים בעלי צורות, מידות ותכונות פיזיקליות וכימיות, שריכוזיהם בסביבת העבודה יעלו בהרבה מעל ריכוזי רקע סביבתיים אפשריים כיום.

מחקר שנערך בבריטניה ע"י האקדמיה המלכותית להנדסה, מעלה את האפשרות שחלקיקי ננו מחומר נתון עלולים להתנהג שונה לגמרי מחלקיקים גדולים של אותו חומר, ולכן חיוני לקבוע את ההשפעות החיוביות והשליליות אשר עלולות להיות להם. יש צורך בהבנת מנגנוני הפעולה של חלקיקי ננו במערכות חיות ובהערכת נזק אפשרי לעובדים חשופים. בתכנית הלאומית לטוקסיקולוגיה בארה"ב (NTP) מתבצעים מספר מחקרים שמטרתם להעריך מאפיינים טוקסיקולוגיים של חומרי



ציורי הדמיית מבנה שפופרתי מחלקיקי ננו

רטובות וכן, ניקוי וטיהור מישטחי עבודה, לצמצם את פוטנציאל החשיפה. אסטרטגיות של בקרת חשיפה לחלקיקי ננו עשויות לכלול:

- בידוד וכליאה מוחלטים של התהליך;
- כליאה חלקית יחד עם שיטות איוורור מתקדמות;
- הגבלת כניסת עובדים / צמצום תקופת החשיפה;
- שיטות ניקוי יעילות של מישטחים וקירות;
- גיהות אישית מוקפדת.

עקב היעדר מידע על יעילותן של מסיכות מסוגים שונים, מומלץ שעובדים בחלקיקי ננו יהיו מוגנים בצידוד מגן אישי נשימתי הכולל רק ברדסי מסיכה מחוברים לקו אוויר (לחץ חיובי) או מנ"פ.

### סוף דבר ואולי - התחלה

בנוטכנולוגיה הוא שטח המתפתח במהירות ויש צורך במחקר נמרץ לברור הסיכונים הנלווים לעיסוק בו ולקידום בקרתם וההגנה בפניהם. בנפרד מחקר ההשפעות הבריאותיות מחשיפה תעסוקתית לחלקיקי וחומרי ננו, חוקרים מנסים לנצל את יישומי הנוטכנולוגיה באופן תועלתי להגנה מפני חשיפה, לדוגמה: ייצור חיישנים (גלאים), מסננים ובגדי מגן יותר יעילים.

תכנית המחקר של מרכזי מחקר בנוטכנולוגיה עוסקת בשלבי הפעולה הקלסיים של ניהול סיכונים: זיהוי ואיפיון גורם הסיכון, הערכת חשיפה, הערכת סיכונים, ניהול סיכונים. בארה"ב, לדוגמה, מרכזי המחקר בנוטכנולוגיה 10 תחומי מחקר בעלי חשיבות גבוהה מאד להבנת סיכונים הבריאות הפוטנציאליים מעיסוק בנוטכנולוגיה: מנת החשיפה הפנים-גופית ורעילותה, הערכת חשיפה, הערכת סיכונים, אפידמיולוגיה והשגחה על הבריאות התעסוקתית, בקרה הנדסית והגנה אישית, שיטות מדידה, בטיחות אש ונפיצות, המלצות והנחייה להגנה מפני סיכונים, תקשורת וחינוך ויישומים. טיפול בתחומים אלה יביא לצמצום פערים בהם ולצבירת ידע ומידע הנחוצים להגנה על עובדים בשילוב עם התקדמות אחראית של נוטכנולוגיה

כדי להכיר בתועלותיה. ■

מפתח בחשיפה, כגון כמות החומר בתהליך, צורתו ומופעו בסביבה, גודל חלקיקיו, משך השימוש בו ודרגת ההגנה והבידוד המיושמים. הערכת חשיפה כמותית לאירוסול-ננו צריכה להתבסס על מדידת התפלגות גדלים באמצעות מיקרוסקופ אלקטרוני, ניטור מספר החלקיקים ליחידת נפח באמצעות מכשירים - כגון מוני חלקיקים הפועלים על עיקרון של פיזור אור, וניטור שטח הפנים של החלקיקים באמצעות מכשירי טעינת דיפוסיה או אפיפניומטר (מכשיר הטוען חלקיקים באטומים רדיואקטיביים וקובע את שטח פניהם באמצעות האות הקרינתי הנמדד).

### בקרה ומניעה

המכון הלאומי לבטיחות ולבריאות העובדים בארה"ב (NIOSH), שהוא אחד המובילים במחקר ובצבירת ידע ומידע על התנהגות חלקיקי ננו, יצא בהמלצות ביניים בקשר להגנה על העובד החשוף לחלקיקים בתחום גודל זה, וקבע כי ברוב תהליכי העבודה ניתן ליישם בקרת חשיפה לאירוסול-ננו באמצעות אותן טכניקות הנדסיות קיימות - כגון בידוד ואיוורור מקומי - המיושמות לבקרת חשיפה לחלקיקים גדולים. טכניקות בידוד יעילות בהפרדת העובד מהמקור הפולט, ולפי מידע שהצטבר - מערכת טובה של יניקה מקומית דרך מסנן HEPA יעילה לסילוק חלקיקי ננו. ראיות ראשוניות, הדורשות הכחה נוספת, מצביעות על לכידה יעילה של חלקיקים שגודלם כ-2.5 ננומטר ע"י תווכי סינון של אמצעים קיימים להגנה נשימתית אישית, כגון פיברגלס וסיבי ננו, כאשר יעילות הלכידה אינה נופלת מזו של חלקיקים גדולים יותר. בנוסף, מסייעת שיטה טובה של עבודה, הכוללת עיבוד ושינוע תוך שימוש בשיטות

■ לא ברור אם השיטות לדגימת חלקיקים באוויר הקיימות כיום מתאימות לדגימת חלקיקי ננו של המחר. שיטות אלה לא תוקפו (לא עברו validation) במלואן, כאמור, ביחס לדגימת חלקיקי ננו;

■ המסננים הנחשבים כבעלי דרגות העצירה הגבוהות ביותר של חלקיקים (מסנני HEPA) הם אלה שבהגדרתם נועדו לעצור ביעילות של 99.97%, חלקיקים שגודלם גדול מ-300 ננומטר. על פי הגדרה זו, אין מסנן מסוג זה בנוי לעצור ביעילות חלקיקי ננו שגודלם קטן מ-100 ננומטר, אף על פי שמחקרים ראשוניים מצביעים על יעילות עצירה משביעת רצון גם בתחום גודל זה.

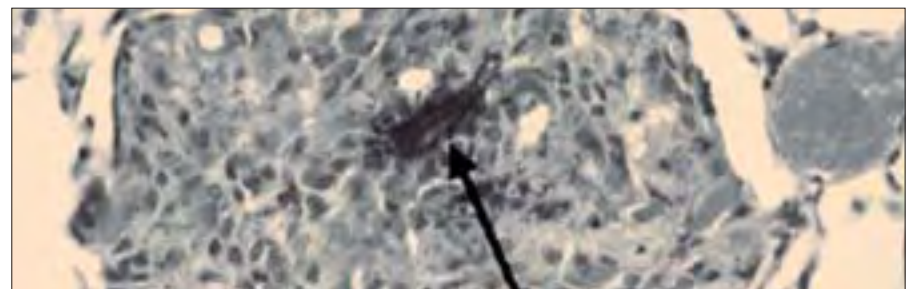
האם יהיה צורך בתפיסה אחרת ואמצעי סינון אחרים שאינם ידועים או שאינם קיימים כיום? לא נחקרה במלואה יעילותם של אמצעי בקרה הנדסיים ואדמיניסטרטיביים. האם מסננים של מסיכות מגן אישיות יתאימו להגנה מפני חלקיקים שמקורם בנוטכנולוגיה כאשר ידוע, לדוגמה, שחלקיקי ננו עשויים לחדור דרך מסנן על פי התיאוריה של ה-thermal rebound (דילוג חלקיקים דרך תווך אשר אמור לעצור אותם).

■ אין עדיין ניצני תחיקה המביאה בחשבון את הסיכונים הבריאותיים הנלווים לשימוש בנוטכנולוגיה החדשה;

■ יש צורך להדריך עובדים בהדרכה רלוונטית בנושא. אך ללא מידע מספיק, יש קושי אמיתי לעשות זאת.

תשובות לשאלות אלה ואחרות חייבות להיצא מהר, כיוון שתוצאות חשיפה עכשווית לחלקיקי ננו עלולות להתבטא, רק, אולי, בעוד 20-30 שנים. חלקיקי ננו מצייבים גם אתגרים בטיחותיים, סביבתיים וחברתיים. אין מספיק מידע על בטיחות חומרים בנושא, בטיחות אש ונפיצות (שטח פנים גדול של החלקיקים) ובטיחות בהובלה, בהתקנה ובשימוש. המידע על התנהגותם של חלקיקי ננו באוויר, במים ובקרקע מוגבל ויכולתם להצטבר בחי ובצומח ובשרשרת המזון אינה ידועה. גם בטיחות המוצר מבחינת שימוש ע"י הציבור הרחב לא נבדקה. אנשים רבים אינם מודעים לתחום החדש הזה ולכן עלולים לעשות שימוש לא נכון במוצרים, או לפתח חרדות מיותרות בעקבות המידע המפורסם על פוטנציאל הסיכון הטמון במגע עם חומרי ננו.

בעת טיפול הגיהותן בתהליך ננו, יהיה צורך בהערכת סיכונים מפורטת, יחד עם הערכת גורמי



חלקיק ננו שגורם לנזק סביבו בריקמת ריאה של חולדה