



חיילים אמריקאים מאמנים חיילים מונגולים בפינוי מוקשים. מונגוליה, 2016 | צילום: Hilda Perez, באדיבות חיל הנחתים של צבא ארה"ב

## פיתוח חיישנים מיקרוביאליים לגילוי מרחוק של מוקשים מוטמנים בקרקע

שמרון בלקין<sup>[1]</sup>, \* שרון יגור-קרול<sup>[1]</sup>, יוסי קבסה<sup>[2]</sup>, ויקטור קורומה<sup>[2]</sup>, טלי ספטון<sup>[2]</sup>, יונתן ענתי<sup>[2]</sup>, חנית זהר-פרץ<sup>[3]</sup>, צחי רבינוביץ<sup>[3]</sup>, עמוס נוסינוביץ<sup>[3]</sup> ואהרון אגרנט<sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> המחלקה למדעי הצמח והסביבה, המכון למדעי החיים, האוניברסיטה העברית בירושלים

<sup>[2]</sup> המחלקה לפיסיקה יישומית, ביה"ס להנדסה ולמדעי המחשב, האוניברסיטה העברית בירושלים

<sup>[3]</sup> המכון לביוכימיה, מזון ותזונה, הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים

\* shimshon.belkin@mail.huji.ac.il

המתרחשות עם הזמן, הופכים משימה זו לקשה ומסובכת. אולי מפתיע, אבל גם כיום השיטות המקובלות לגילוי מוקשים מוטמנים מחייבות נוכחות פיזית בשטח הנבדק; מעבר לסיכונים הברורים לעוסקים בכך, יעילותן של שיטות אלה נמוכה מאוד. יש לפיכך צורך אמיתי בטכנולוגיה מינה לגילוי מרחוק של מוקשים; נכון להיום, טכנולוגיה כזו איננה בנמצא.

הפתרון שאנו מציעים לבעיה זו טמון בעובדה שבמהלך הזמן מצטברות מולקולות נדיפות של חומרי נפץ בקרקע מעל המוקש, והן ניתנות לזיהוי ביולוגי. לשם כך פיתחנו זנים של החיידק *Escherichia coli* שבנוכחות של כמויות זעירות של מולקולות כאלה (בעיקר מחומר הנפץ טי-אן-טי ונגזרותיו) הופכים לפעילים אופטית באחת משתי דרכים – יצירת אור בגופם (נהורנות ביולוגית, ביולומינסנציה) או סינתזה של חלבון פלואורני ירוק (fluorescent), מולקולה הפולטת אור ירוק בתגובה להקרנה. פעילות אופטית זו ניתנת לצילום ולכימות מרחוק, וכך אפשר ליצור "מפה" של מיקום המוקשים בשטח הנבדק.

ערכנו ניסוי שדה, ובו חיידקים פלואורניים כאלה קובעו בכדוריות פולימריות קטנות (כ־100,000 חיידקים בכל כדורית שקוטר כ־3 מ"מ) (איור 1א) ופוזרו על פני שטח שהוטמנו בו

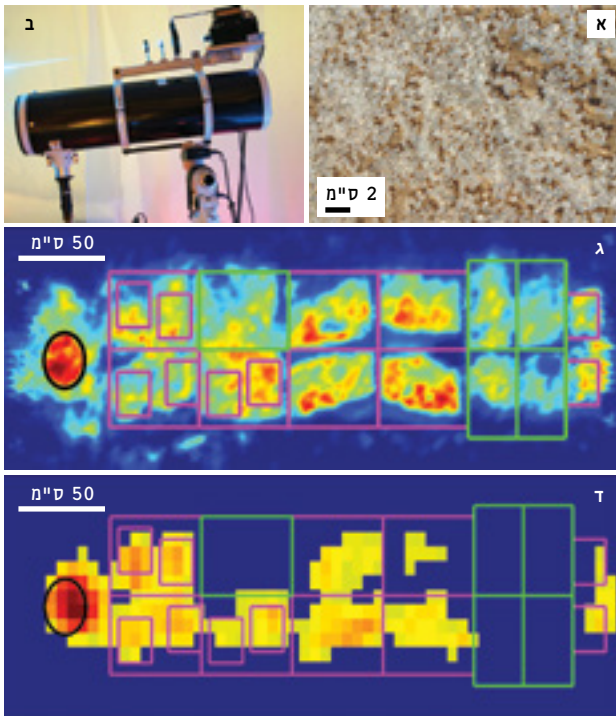
ברחי העולם פזורים מאות מיליוני מוקשים, שרידי מלחמות עבר, שגורמים מדי שנה למותם או לפציעתם של אלפי אנשים. עיקר הקושי בפינוי שדות מוקשים אלה איננו כרוך בסילוקם של המוקשים, אלא באיתורם: היעדר תיעוד מסודר, ותזוזות

מאמר [1] שתיאר חלק מתוצאות המחקר, זיכה את החוקרים בפרס למצינויות בתחום מדעי הסביבה לשנת 2019 מטעם קרן Strage אוניברסיטת בן-גוריון בנגב. החוקרים הראשיים בשלוש קבוצות המחקר מהאוניברסיטה העברית שהיו שותפות לעבודה שתוצאותיה תוארו במאמר זה הם פרופ' אהרון אגרנט (שאחראי לפיתוח המערכת האלקטרואופטית), פרופ' עמוס נוסינוביץ (האמון על קיבוע החיידקים בכדוריות פולימריות) ופרופ' שמשון בלקין (מפתח החיישנים המיקרוביאליים).

**מקורות**

[1] Belkin S, Yagur-Kroll S, Kabessa Y, et al. 2017. Remote detection of buried landmines using a bacterial sensor. *Nature Biotechnology* 35: 308-310.

מראש מוקשים נגד אדם וכמויות שונות של חומרי נפץ. באמצעות מערכת אלקטרואופטית ייעודית (איור 1ב) מופתה הפלואורנות (fluorescence) של האזור הנבדק בתחילת הניסוי ובסיומו מעמדה קרקעית במרחק של כ-30 מטר (איור 1ג), ואותרו מקומותיהם המדויקים של המוקשים וחומרי הנפץ ברמת דיוק של סנטימטרים בודדים (איור 1ד). ככל הידוע לנו, זהו התיאור הראשון בספרות המדעית לגילוי מרחוק של מוקשים מוטמנים. בימים אלה אנו שוקדים על פיתוח מולקולרי של הדורות הבאים של החיישנים, במטרה להפוך את תגובותיהם למהירות יותר, חזקות יותר, ובעיקר רגישות יותר, ולאפשר את מיפוי פעילותם גם מהאוויר.



**איור 1.** שימוש בחיישנים מיקרוביאליים לגילוי מרחוק של מוקשים מוטמנים בקרקע

א. כדוריות פולימריות שקופות בקוטר 3-4 מ"מ, שהחיישנים המיקרוביאליים "כלואים" בהן (כ-100,000 תאים בכל כדורית).

ב. מערכת הסריקה. שני מרכיבי העיקריים הם מכשיר לייזר לעירור מרחוק של הפלואורנות החיידקית וטלסקופ אסטרונומי לקליטה ולכימות של האותות שפולטים החיישנים.

ג. מפת אזור הניסוי, כפי שמתקבלת מהאותות הפלואורנטיים המוקרנים מהחיידקים, כ-22 שעות לאחר פיזור החיידקים. ככל שהצבע אדום יותר, האות חזק יותר.

ד. מיקום המוקשים וחומרי הנפץ המוטמנים, כפי שנקבע לאחר תרגום ועיבוד של האותות הפלואורנטיים.



יערות העולם פרוסים על פני 40 מיליון קמ"ר, כשליש מהשטח היבשתי של כדור הארץ, ונחשבים לתצורת הצומח היצרנית ביותר על פני האדמה. כרבע מאוכלוסיית העולם תלוי באופן ישיר בעצים למחייתו, ושירותי המערכת המגוונים שמספקים היערות הכרחיים לקיום התהליכים האקולוגיים הבסיסיים על פני האדמה. לאור החשיבות העצומה של היער ותרומתו הישירה והעקיפה

**התוכנית האסטרטגית של האו"ם ליעור**

**אסף קרואני**

מנהל מחלקת ניהול יער, מחקר וקשרי חוץ, אגף הייעור, קרן קימת לישראל

AsafK@kkk.org.il