



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

13 ביוני, 2019

[גיליון קיץ 2019 / כרך 10\(2\)](#)

[בקצרה](#)

שמשון בלקין
המחלקה למדעי הצמח והסביבה,
המכון למדעי החיים, האוניברסיטה
העברית בירושלים

שרון יגור-קרול
המחלקה למדעי הצמח והסביבה,
המכון למדעי החיים, האוניברסיטה
העברית בירושלים

יוסי קבסה,
המחלקה לפיסיקה יישומית, ביה"ס
להנדסה ולמדעי המחשב,
האוניברסיטה העברית בירושלים

ויקטור קורומה
המחלקה לפיסיקה יישומית, ביה"ס
להנדסה ולמדעי המחשב,
האוניברסיטה העברית בירושלים

טלי ספנון
המחלקה לפיסיקה יישומית, ביה"ס
להנדסה ולמדעי המחשב,
האוניברסיטה העברית בירושלים

יונתן ענתי
המחלקה לפיסיקה יישומית, ביה"ס
להנדסה ולמדעי המחשב,
האוניברסיטה העברית בירושלים

חינת זהר-פרץ
המכון לביוכימיה, מזון ותזונה,
הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה,
האוניברסיטה העברית בירושלים

צחי רבינוביץ'
המכון לביוכימיה, מזון ותזונה,
הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה,
האוניברסיטה העברית בירושלים

עמוס נוסינוביץ
המכון לביוכימיה, מזון ותזונה,
הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה,
האוניברסיטה העברית בירושלים

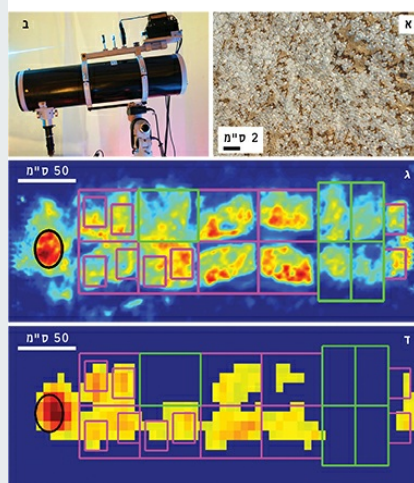
אהרון אגרנט
המחלקה לפיסיקה יישומית, ביה"ס
להנדסה ולמדעי המחשב,
האוניברסיטה העברית בירושלים

ברחבי 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 המתרחשות עם הזמן, הופכים משימה זו לקשה ומסוכנת. 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 אמינה **לגילוי מרחוק** של מוקשים; נכון להיום, טכנולוגיה כזו איננה בנמצא.

הפתרון שאנו מציעים לבטייה 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 (נהורות 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 פולימיריות קטנות (כ-100,000 חיידקים בכל כדורית שקוטרה כ-3 מ"מ) ([איור 1א](#)) ופוזרו על פני שטח שהוטמנו בו מראש מוקשים נגד אדם וכמויות שונות של חומרי נפץ. באמצעות מערכת אלקטרואופטית ייעודית ([איור 1ב](#)) מופתה הפלואורונט (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 בוודים ([איור 1ד](#)). ככל הידוע לנו, זהו התיאור הראשון בספרות המדעית לגילוי מרחוק של מוקשים מוטמנים.

בלקין ש, יגור-קרול ש, קבסה, י ואחרים. 2019. פיתוח חיישנים מיקרוביאליים לגילוי מרחוק של מוקשים מוטמנים בקרקע. *אקולוגיה וסביבה* 10(2): 5-6.



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

א. כדוריות פולימרות שקופות בקוטר 3–4 מ"מ, שהחיישנים המיקרוביאליים "כלואים" בהן (כ-100,000 חאים בכל כדורית).
 ב. מערכת הסריקה. שני מרכיביה העיקריים הם מכשיר לייזור לעירור מרחוק של הפלואורנציה 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.

איור 1

שימוש בחיישנים מיקרוביאליים לגילוי מרחוק של מוקשים מוטמנים בקרקע

א. כדוריות פולימרות שקופות בקוטר 3–4 מ"מ, שהחיישנים המיקרוביאליים "כלואים" בהן (כ-100,000 תאים בכל כדורית).
 ב. מערכת הסריקה. שני מרכיביה העיקריים הם מכשיר לייזור לעירור מרחוק של הפלואורנציה 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.

בימים אלה אנחנו 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.

מאמר [1] שתיאר חלק מתוצאות המחקר, זיכה את החוקרים בפרס למצוינות בתחום מדעי הסביבה לשנת 2019 מטעם קרן Strage ואוניברסיטת 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 פולימרות) 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.