

**העיתון המודפס**

העמוד הראשון  
כל חדשות היום  
חדשות חוץ  
מאמרים  
כתבות  
מכתבים למערכת  
כלכלה  
שוק ההון  
גלריה  
ספורט  
גיליון יום שישי  
תרבות וספרות  
גלריה יום שישי

**מוספים**

**מוסף הארץ**  
הארץ שלנו  
מלה הארץ  
אריה כספי  
אזור הדמדומים  
סודות מהמטבח  
תגובות  
תשבצים  
מוסף גדל"ן  
ספרים  
מוסף בריאות  
קפטן אינטרנט

השבוע החולף

הקריקטורה היומית

84 שנות הארץ

תורניות חירות



מתוך המערכת ליהוי הפנים. החידוש הוא במעבר לדגימה תלת ממדית במקום דו ממדית

[אשובב דוע](#)
[אדך זה עובד](#)
**המהדורה המודפסת << מוסף הארץ****מצאו את ההבדלים**

מאת מרב סריג. צילומים: ירון קמינסקי

### התאמים אלכס ומיכאל ברונשטיין הצליחו לעשות את הבלתי אפשרי: לפתח מערכת זיהוי פנים שיכולה להבדיל אפילו בין שניהם

בטכניון הם נחשבים לתופעת טבע, "האחים ברונשטיין" שמה. תאומים זהים לחלוטין, אלכס (הבכור) ומיכאל, בני 22, בעלי מניירות דומות להפליא, שמתעניינים באותם תחומים, לומדים באותה פקולטה (הנדסת חשמל), לוקחים אותם הקורסים ומסיימים באותו ממוצע ציונים, מקסימום בהפרש של עשירית הנקודה. סטודנט בטכניון מספר שבמסדרונות המוסד קשה להתעלם מהם: שני ילדים טובים שמתלבשים אותו הדבר - אפודות סרוגות, עניבות, סוודרים - צועדים בעליצות עם תיק הג'יימס בונד, באותה יד כמובן, תוך שהם משכיבים אחד את השני מצחוק.

באחרונה, בהנחיית פרופ' רון קימל מהפקולטה למדעי המחשב, הצליחו השניים לפתח מערכת זיהוי פנים תלת ממדית, שמשוגלת להבחין אפילו בין שני תאומים זהים; עד כה לא דווח בחוגי הפיתוח המדעי על מערכת שיכולה להבחין בין תאומים זהים, מה שמסמן את המערכת של הברונשטיינים כחידוש מהפכני. מערכות זיהוי הפנים הקיימות מבוססות ברובן על צילום דו ממדי, וניתן לשטות בהן בקלות בשל תלותן בתנאי תאורה ובשינויים בתנוחת הראש והבעות הפנים. המערכת של הברונשטיינים פותרת את רוב הקשיים של המערכות הקיימות ומבטיחה לספק דיוק מרבי ותגובה מיידית, ובעלות נמוכה. בעולם של אחרי 11 בספטמבר עשוי המוצר שלהם להיות הדבר הבא בתחום האבטחה.

אבל הסיפור של הברונשטיינים הוא לא רק סיפור של גאונות, הוא גם סיפור של עלייה מוצלחת. השניים, בני 22, לא ימאי שרוב הזמן לא נמצא בבית ולאם מורה לאנגלית, עלו מרוסיה לפני 12 שנה. "לא





אלכס (מימין) ומיכאל ברונשטיין.  
יכול להיות שאם אנחנו לא משלימים  
אחד את השני, אז אנחנו לפחות  
משלימים את עצמנו

עלינו מטעמי ציונות", מספרת האם, אולגה. "אבל רוסיה של אחרי הפרסטרויקה היתה מדינה שבורה, לא יכולת לדעת מה יהיה מחר. פחדנו שבגלל המצב יחפשו שיער לעזאזל ויאשימו בסופו של דבר את היהודים, אז עזבנו".

בעיני התאומים הקטנים, אז בני עשר, זה נשמע כמו הרפתקה מעניינת. "היינו ילדים תמימים שלא ממש מבינים מה צפוי להם", אומר מיכאל. המשפחה נקלטה בירושלים וכעבור כמה חודשים עברה לקרית חיים ומשם לחיפה. "לא היינו מודעים לבעיות שכרוכות בשינוי דרסטי שכזה. אפשר לומר שהיינו חסינים מפני קשיי העלייה הזאת. שמחנו לעלות והיום, במבט לאחור, זאת היתה אחת החוויות החזקות והטובות בחיים שלנו. כמי שעוסקים במדע, יש לדעתנו אפילו יתרון בלפעול במדינה קטנה כמו ישראל, כי יותר קל לבלוט".

### פצצות וטילים

לא שהם לא נשלחו לחוג נגינה (אלכס): "למרות שאנחנו מאוד אוהבים מוסיקה, לא הצליחו ללמד אותנו לנגן על שום דבר", ולא שהם לא הלכו לחוג לריקודים סלוניים - אולגה: "רציתי שידעו לרקוד יפה", אלכס: "היינו כישלון גמור גם בזה". אבל הסקרנות למדע אחזה בהם כבר בינקות. בגיל שש הם פיתחו "רובוט קטן כזה שנוסע", זוכר מיכאל, ואחר כך עברו לאנטומיה. "מילאנו את הבית במודלים תלת ממדיים של איברי גוף שבנינו בעצמנו מפימו". אולגה: "הייתי חוזרת הביתה מהעבודה והיו מחכים לי דגמים לאפות בתנור".

ממודלים תלת ממדיים הם עברו למינרלים. "אספנו אבנים ובחדר שלנו היו אפילו כמה מינרלים לא מאוד נפוצים", אומר מיכאל. "כשעלינו לארץ נאלצנו להשאיר את אוסף האבנים בחדר". בגיל 13, בישראל, הם החלו להתעניין בכימיה. מיכאל: "ליתר דיוק התעניינו בכל דבר שמתפוצץ והתחלנו לבנות טילים ופצצות". את אמצעי הלחימה הם בנו מגפרורים ומאבק שריפה של קליע של א-16, ו"מעבדת הניסויים שלנו היתה חורשה מבודדת בקרית חיים".

לילה אחד, משחזרת אולגה, "הייתי לבד עם הבנים בבית והלכתי אליהם לחדר לראות אם הם ישנים. הם היו ערים לגמרי. שאלתי מה קרה והם ענו: 'יש פצצה במרפסת ואנחנו פוחדים שהיא תתפוצץ'. לא ידעתי מה לעשות. הם עשו משהו ופתאום הבינו שהוא עלול להיות מסוכן ופחדנו נורא. התקשרתי לסבא שלהם, שהיה פרופ' לכימיה במוסקווה ושאלתי אותו איך מנטרלים את הדבר הזה". אלכס: "באותו לילה נשבענו לה שנפסיק עם זה ובתמורה קיבלנו אקוריום עם דגים".

בגיל 15 הם עברו למחשבים. "לפני שהיה מקרר בבית היה מחשב לילדים", אומרת אולגה בגאווה. כבר ברוסיה הם למדו בעזרת ספרים את שפת התכנות "בייסיק" וניסו את התוכנות שפיתחו על מחברת, וכשקיבלו בארץ את המחשב הראשון, "שהיה 'פרימיטיווי מאוד, ישר ניסינו את כל הידע התיאורטי שהיה לנו. וזה עבד, לרוב".

למעט שלושה חודשים שבהם הופרדו ביסודי הם מעולם לא נפרדו ולמדו תמיד באותן כיתות. בתיכון "היינו תלמידים גרועים, עצלים ובטלנים", הם מעידים. "עד שהמורה למתמטיקה אמר לנו שאם נמשיך ככה הוא יוריד אותנו הקבצה. פחדנו מגורל איום ונורא והתחלנו ללמוד. סיימנו בגרות חמש יחידות מתמטיקה בכיתה י"א".

כשגמרו תיכון התקבלו לפקולטה להנדסת חשמל בטכניון כעתודאים, עם מילגות

הצטיינות (אלכס הוא בוגר תוכנית המצוינים של הטכניון; שניהם התקבלו לתוכנית, אך היה מקום רק לאחד ומיכאל ויתר). תוך כדי לימודי התואר הראשון, שאותו כבר סיימו מעשית (בהצטיינות), החלו בלימודי התואר השני בהנדסת חשמל. עוד בהיותם סטודנטים שנה ג' לתואר ראשון הם קיבלו אישור להנחות סטודנטים אחרים בפרויקטים ועד היום פירסמו כמה מאמרים במגזינים מדעיים, כולל במגזין היוקרתי "Nature" (בנושא טכנולוגיות ביומטריות), השתתפו בכנסים וזכו לפרסים. בטכניון כבר הציעו להם מסלול ישיר לדוקטורט.

למה חשוב לכם להיות ביחד כל הזמן?

מיכאל: "זה לא עניין עקרוני, אבל מגיל צעיר אנחנו עושים הכל ביחד, כך שקשה לנו לדמיין שזה יכול בכלל להיות אחרת".

מה המשמעות של הזוגיות הזאת?

"קשה לי להגיד משהו אובייקטיבי בעניין הזה, אבל המרצה שלנו בטכניון אומר שאנחנו מבינים טוב מאוד אחד את השני, שאם מישהו מתחיל לדבר, השני תמיד ממשיך אותו בדיוק בנקודה הנכונה, גם אם הוא יצא מהדרך ונכנס אחרי כמה דקות. יכול להיות שאם אנחנו לא משלימים אחד את השני, אז אנחנו לפחות משלימים את עצמנו".

שיעורי בית ועבודות הם מגישים יחד, ממילא כשהם מגישים אותן בנפרד נראות העבודות אותו הדבר ומקבלות כאמור אותם הציונים. מרצים שמקפידים על הגשת עבודות אישיות ויתרו בעניינם מזמן. "הם יודעים שאצלנו זה מקרה אבוד", אומר אלכס. פעם ביקש מהם מרצה לפתור מבחן בית לבד, ואם אפשר אז בצורה שונה. "אז חשבנו ביחד איך לפתור את זה שונה", אומר מיכאל. "אפילו בפסיכומטרי הוצאנו כמעט אותו ציון, 750 ומשהו, עם הפרש של ארבע נקודות".

תקופת הפרידה הארוכה ביותר שלהם היתה כחודש, "כשנסענו לאנגליה לשפר את האנגלית", משחזר מיכאל. "פחדו שאם נהיה ביחד לא נלמד, אז הפרידו אותנו".

ניצלתם פעם את הזהות המוחלטת הזאת ביניכם?

אלכס: "פעם אחת. מיכאל עבר טסט וקיבל רשיון נהיגה ואני לא, אז בינתיים נהגתי עם הרשיון שלו. אנשים נותנים לנו כל מיני רעיונות איך לנצל את זה יותר. הציעו לנו למשל לעשות מנוי אחד לבריכה, אבל אנחנו תמיד הולכים ביחד, וחוץ מזה בטכניון הבריכה חינם. הציעו לנו גם שיטה לקצר את משך התואר בחצי: אחד לומד חצי מהקורסים וניגש לבחינות פעמיים - פעם כמיכאל במועד א' ופעם כאלכס במועד ב' - והשני עושה אותו דבר".

תחרות?

"ממש לא".

בחדר המשותף מוצבות שתי מיטות נוער עם ריפוד משובץ, שני שולחנות ועליהם שני מחשבים. את הקירות מקשטות תמונות שלהם, בכמה מהן מופיעה בחורה. מיכאל ממהר להכריז ש"זאת החברה של אלכס" ושל "אין חברה קבועה אבל יש מתחלפות", כך שמלבד העובדה שמיכאל לא אוהב שעועית ותירס, ואלכס כן, זה ההבדל היחיד ביניהם. אלכס מספר שהכיר את סוזי לפני שנתיים "דרך כל אמצעי התקשורת שעומדים היום לרשות האדם המודרני", כלומר אינטרנט ודואר אלקטרוני. היא איטלקייה והוא נוסע אליה כמה פעמים בשנה. "בספטמבר הייתי אצלה ובפברואר אני נוסע אליה שוב".

עוד בטרם התאהב באיטלקייה למדו השניים איטלקית מתוך אהבתם לאופרות ("רצינו להבין אותן בשפת המקור"), ובמסגרת תחרות שהתקיימה בטכניון במחלקה ללימודים כלליים הם תירגמו סונטות של שייקספיר לאיטלקית ואף זכו בפרס. בזמנם הפנוי, מלבד לתרגם סונטות, הם הולכים לסרטים "או רואים סרטים בדי-וי-די. אנחנו לא הולכים לפאבים וגם לא למועדונים, אבל קוראים הרבה". כולל ספרות ישראלית, ובמיוחד א"ב יהושע. אלכס: "קראנו אותו בתיכון, והוא הרשים אותנו במיוחד. לא מזמן קראתי את 'המאהב' באיטלקית ונורא נהייתי להשוות בין התרגומים".

### המצאה

מתקפת הטרור של 11 בספטמבר גרמה להם להניח את הסונטות בצד ולהתרכז בפיתוח המערכת לזיהוי פנים. אלכס מספר שכל הפרויקט התחיל כבדיחה. "סמסטר אחד לפני סיום התואר לקחנו קורס שנקרא בשם המפחיד 'גיאומטריה חישובית'. כפרויקט סיום ביקש מאיתנו פרופ' קימל שנשתמש באיזשהו רעיון שהוא וסטודנט שלו לשעבר (אסי אלעד) התחילו לפתח, וכבדיחה הוא אמר לנו: 'נראה אם תצליחו לפתח מערכת שתוכל להבדיל בינכים'. הבדיחה הפכה למשהו מאוד רציני".

מיד לאחר שפיתחו את המערכת רשמו עליה פטנט ברשות לרישום פטנטים בארה"ב (על הפטנט רשומים גם פרופ' קימל והטכניון). בשלב הבא התקשרו ממשרד המדע וביקשו מהם להציג את הפרויקט בתערוכת המדע בירושלים בספטמבר האחרון. אלכס: "סרקנו בתוך ארבעה ימים יותר מ-1,000 אנשים, בהם את שר המדע מתן וילנאי. למרות שהבדיקה נועדה רק לבדוק את המכונה אנשים היו חשדנים נורא, הם שאלו אם אנחנו קשורים לגורם ביטחון כלשהו. אני חייב להודות שהדגם היה מפחיד כי הוא נראה כמו גיליוטינה ואנשים פחדו להכניס את הראש".

את המגבלה הבסיסית של מערכות לזיהוי פנים הם כמובן לא יכולים לפתור: המערכת לא יכולה לזהות פני אדם יש מאין, אלא חייבת לסרוק תחילה את פניו ולשמור את הנתונים במאגר כדי שתוכל לזהותו להבא. עם זאת הם מדגישים שבמקרה של מבוקשים, נמצאות תמונות של רבים מהם בידי הרשויות ובשביל המערכת שלהם זה מספיק. מהו מקור דיוקה החדשני של המערכת? "בשימוש חכם בתלת ממד", מסביר אלכס. "רוב התוכנות המסחריות משתמשות ב-2D ממד. אחרי 11 בספטמבר הוכח שהתוכנות הדו ממדיות לזיהוי פנים לא שוות כלום. מבחנים שנערכו למערכות כאלה העלו סדרה של כישלונות. באחד הדו"חות שחוברו על מערכות לזיהוי פנים שניצבו בשדות תעופה, נכתב שמערכות דו ממדיות לא שוות יותר מהטלת מטבע. זה משהו שנותן תוצאות אקראיות לגמרי".

"על מערכות תלת ממדיות", הוא ממשיך, "התחילו לדבר בצורה עקיפה כבר ב-1995 כשזיהו פנים בעזרת תמונה רגילה וצילום של פרופיל. אבל הבעיה היא שהפנים הן לא משהו קשיח ואפשר לעוות אותן בצורה משמעותית, כנראה בגלל העובדה הביולוגית שאנחנו היונקים עם הבעות הפנים הכי מפותחות. כשאדם מחייך או כשהוא רציני, משטחי הפנים שלו נראים אחרת".

ואולם התוכנה של הברונשטיינים יכולה לזהות פנים גם אם מעוותים אותן מאוד; הטכנולוגיה שפיתחו מבוססת על יצירת תמונה תלת ממדית והשוואת משתנים גיאומטריים של הפנים כמשטחים גמישים. הרעיון, עד כמה שניתן להסבירו להדיוטות (ראו מסגרת), הוא הפיכת משטח "לצורה קנונית", שבה נשמרים המרחקים בין הנקודות השונות ולכן היא אינה רגישה לשינויים בתנוחה או בהבעה. בכל מקרה כרגע יש להם רק אבטיפוס של התוכנה, אומר מיכאל. "מה שנשאר זה לקבל מימון לפיתוח, כדי שנוכל להפוך אותה למוצר מסחרי שניתן לשווק. זה ייקח כנראה משהו בסדר גודל של שנה וחצי".

הברונשטיינים מבינים היטב את הפוטנציאל הכלכלי שטמון בהמצאה שלהם, אבל

מבחינתם התעשרות היא רק מטרה עקיפה. אלכס: "הרבה יותר מעניינות אותנו השאלות המדעיות שעולות מהפטנט הזה, שאלות שלא הצלחנו לפתור עד עכשיו. למשל, הבעיה של 'ייצוג אינווריאנטי (בלתי משתנה) לטרנספורמציות איומטריות'. גילינו התנהגות מעניינת של שגיאת הייצוג כתלות בצפיפות הדגימה של המשטח".

אתה יכול להסביר?

"המכשיר שלנו הרי לא ממש מצלם את הפרצוף אלא רק דוגם אותו בהרבה נקודות, ומאוסף הנקודות הזה יוצרים לפרצוף ייצוג. אלא שהמרחב שבו יוצרים את הייצוג הזה מוגבל בכמות הנתונים שאפשר לייצג בו ללא שגיאה. לפי האינטואיציה, היית יכולה לחשוב שככל שתנסי להכניס למרחב הזה יותר נקודות, השגיאה בייצוג הפנים תגדל (כי לנתונים 'צפוף' במרחב המוגבל, וזה גורם לעיוותים בחישוב). אבל מהעבודה עם המערכת שלנו התברר שגם אם מגדילים את צפיפות הדגימה (דוגמים יותר נקודות), השגיאה לא גדלה ומתכנסת לקבוע - כך שלמעשה אפשר להסתפק בכמות מוגבלת של נקודות ובמרחב ייצוג ב'ממד נמוך'."

"זה דומה ל'משפט הדגימה' שהוכח בתחילת המאה, ושבצעדיו אי אפשר היה למשל להקליט מוסיקה על גבי סי-די. ההקלטה הדיגיטלית על סי-די מתבססת על אותו רעיון - שלא חייבים את כל הנתונים, כי זה לא יקטין את השגיאה. זה כבר הוכח לגבי אותות חד ממדיים כמו אותות שמע ולכן מיושם במוסיקה, אבל לא באותות מהסוג שאנחנו מתעסקים בהם, שהם מורכבים יותר."

"זו בעיה מדעית-מתמטית שעלתה מהפטנט שלנו ועדיין לא הצלחנו לפתור. משהו דומה הוכח על ידי ג'ון נאש, אבל לא על זה הוא קיבל פרס נובל. הבעיה לא קשורה לביצועי המערכת ולא פוגעת בהם, אבל היא מעלה משפט שהוא אתגר לפתרון. ככה זה בטכנולוגיה, משהו עובד ללא הוכחה מתמטית, ולפעמים הוא גם לא נכון מבחינה מתמטית, אבל עדיין רוצים לנסות להוכיח את הבעיה".

אז המשפטים האלה בדרך להפוך לחידות מתמטיות אוניוורסליות?

מיכאל: "דיברנו עם הרבה פרופסורים בטכניון, שדיברו עם פרופסורים בעולם, ובינתיים אף אחד לא הצליח לפתור את המשפטים האלה".

אלכס: "זה אולי לא סיפור גדול לנסח משפט, אבל זה הרבה יותר קשה לפתור אותו. בואי נגיד שהיינו מאוד שמחים אם הם היו פותרים את זה".

### הצעה מג'נרל אלקטריק

הברונשטיינים מבינים את ההתלהבות מהמערכת לזיהוי פנים שפיתחו - "תחום האבטחה והביטחון הוא חזק היום", אומר אלכס - אבל הפטנט הראשון שהם קשורים אליו מרגש אותם יותר. מדובר בפרויקט בתחום ההדמיה הרפואית. ביחד עם ד"ר מיכאל ציבולסקי ופרופ' יהושע זאבי מהטכניון הם הצליחו לפתח מכשיר לזיהוי גידולים סרטניים בשלב מוקדם מאוד. המערכת, שגם עליה רשמו פטנט, נועדה לספק מענה מדויק וזול יותר מהקיים למכשיר הדמייה רפואית שמבוסס על קרינה מייננת באנרגיות גבוהות.

מיכאל: "המכשיר הזה יכול להציל חיים. הוא עשוי להזויל את הטכנולוגיה הקיימת היום של טומוגרפיה פוזיטרונית, שהיא יקרה מאוד. בישראל יש ארבעה מכשירים כאלה בשימוש בבתי חולים מרכזיים וכמובן שסל הבריאות לא מכסה את זה. הרופאים משתמשים בזה רק במקרים נדירים ואנחנו מקווים שהשיטה שלנו לא רק תאפשר להקטין את החשיפה של האדם לקרינה רדיואקטיבית, אלא גם תזויל בצורה משמעותית את עלויות המכשירים עצמם,

כך שיותר בתי חולים ישתמשו בזה. זה אולי נשמע פחות מרשים מזיהוי פנים אבל המטרה נעלה יותר".

ענק הטכנולוגיה ג'נרל אלקטריק - דרך חברת הבת בחיפה "מדיקל סיסטמס", שנחשבת לאחד היצרנים הגדולים בעולם למכשור רפואי - כבר התעניין במוצר. על איזה סכומים מדובר? אלכס: "תלוי באיזה שלב נמכור אותו. אם זה יהיה בשלב הרעיון בלבד, אז זה יכול להיות מספר עם חמישה אפסים, אבל אם נמכור אותו בשלב מתקדם יותר של אבטיפוס, זה יכול להיות גם הרבה יותר, כי תקציבי הפיתוח שלהם הם כמו תקציבים של מדינה קטנה".

מי מנהל את המגעים עם ג'נרל אלקטריק?

"אנחנו שותפים לכל השיחות וכמובן המנחים שלנו".

אז יום אחד תהיו עשירים.

אלכס: "זה לא יזיק לנו".

אתם תמיד מדברים ברבים? אין "אני" בחיים שלכם?

מיכאל: "לפעמים זה נשמע לאנשים מוזר שאדם אחד מדבר ברבים, אבל זה הפך להיות דבר אינטגרלי. בואי נאמר שמתקיימת בינינו תופעה לא לינארית. כשאנחנו נמצאים ביחד - וזה קורה כל הזמן - אחד ועוד אחד שווה שלוש".

\*

 חזור לדף הבית  שלח כתבה  הדפס



[כלכלה Online](#) | [גלריה Online](#) | [ספורט Online](#)

[הרשמה לאתר](#) | [המהדורה המודפסת - עמוד ראשון](#) | [ארכיון הארץ](#) | [תמיכה ושירות](#) | [תקנון האתר](#)

כל הזכויות שמורות, "הארץ" © All rights reserved Ha'aretz