

אוקטובר 2026

אקוסיסטם הקוונטום הישראלי

מקרה בוחן: כיצד מייצרים חדשנות פורצת דרך בהשקעה ממוקדת



תוכן העניינים

03	דברי פתיחה
04	הקדמה
05	סיכום מנהלים
06	מבוא
07	1 נושאים ואבני בניין
07	1.1 יכולות פורצות דרך
08	1.2 יכולות טרנספורמטיביות והתוכנית הלאומית בתחום הקוונטי (2019 עד 2025)
11	1.3 חדשנות פתוחה ומסחר
15	1.4 העלאת המודעות
16	1.5 פיתוח הון אנושי ומצוינות אקדמית
17	1.6 ביטחון לאומי וכלכלי
20	1.7 אבטחת סייבר, פרטיות ומוכנות לאימוץ בישראל
22	1.8 ממשל, חדשנות אחראית ותקינה
23	1.9 קיימות ועמידות ארוכת טווח של האקוסיסטם
24	2 תוכנית פעולה בפועל
25	2.1 על בסיס אחריות, מי יזם את האסטרטגיה?
25	2.2 מבוסס היקף גיאוגרפי: מודל יישום לאומי
25	2.3 לקחים מעשיים מפיתוח אקוסיסטם הקוונטום בישראל
26	3 סיכום והצעדים הבאים
27	נספחים
27	נספח א' - מדריך החברות
28	נספח ב' - טבלת התאמה מפורטת בין תשעת הנושאים של תוכנית הפעולה
30	מחברים
31	הערות סיום

כתביתור: ד"ר חזה מפורסם על ידי רשות החדשנות ו-C4IR ישראל. הדו"ח מתבסס על מקורות ציבוריים, נתונים מוסדיים ותובנות נבחרות של מומחים, ומטרתו להדגיש מאפיינים נבחרים של האקוסיסטם הקוונטי בישראל ולקחים רלוונטיים בתחום המדיניות, ולא לספק הערכה מקיפה של התחום.

דברי פתיחה

בעוד טכנולוגיות קוונטיות מתקדמות בהתמדה לקראת מססחור, ישראל נערכת לקראת הפרק הבא. השלב השני המוצע של "התוכנית הלאומית לקוונטים" מסמן מעבר אסטרטגי מבניית יכולות בסיסיות לעבר מיצוי הערך הכלכלי, החברתי והלאומי. כעת מתמקדים בהעמקת היתרון התחרותי הטכנולוגי של ישראל בתחומי החומרה, התוכנה, מערכות הבקרה, האלגוריתמים, טכנולוגיות החישה והתקשורת הקוונטית המאובטחת; בהרחבת ההון האנושי והמציאות המחקרית; בחיזוק שיתופי הפעולה עם התעשייה, הממשלה ושותפים בינלאומיים; ובאבטחת התשתית ושרשראות האספקה הנדרשות להנהגה טכנולוגית לטווח ארוך. החדשנות הקוונטית היא מטבעה גלובלית, ושיתוף פעולה מתמשך עם שותפים ברחבי העולם יהיה חיוני להאצת ההתקדמות המדעית, לקידום חדשנות אחראית, ולהפיכת פריצות דרך טכנולוגיות להשפעה מעשית. הניסיון של ישראל מראה שגם מדינה קטנה יחסית יכולה למלא תפקיד משמעותי בעיצוב עתידן של טכנולוגיות פורצות דרך, כאשר חזון ארוך טווח משולב עם מציאות מדעית, תרבות יזמית והשקעה ציבורית מכוונת מטרה. לסיום, ברצוני להודות לחוקרים, ליוזמים, למובילי התעשייה, למקבלי ההחלטות, לשותפים הממשלתיים ולשותפים הבינלאומיים הרבים, אשר מומחיותם ומסירותם תרמו הן לפיתוח האקוסיסטם הקוונטי בישראל והן להכנת דו"ח זה. מאמציהם המשותפים מהווים דוגמה לרוח השיתוף שתמשיך להניע את החדשנות והמנהיגות בשנים הבאות. המהפכה הקוונטית השנייה כבר בעיצומה. ישראל שואפת לא רק לקחת בה חלק, אלא גם להיות שותפה בעיצוב עתידה.

בעשור האחרון, טכנולוגיות קוונטיות התפתחו מתחום מדעי מבטיח לתחום אסטרטגי בעל השלכות מרחיקות לכת על הצמיחה הכלכלית, החוסן הלאומי, הגילויים המדעיים והמובילות הטכנולוגית. ברחבי העולם, ממשלות ותעשיות משקיעות סכומים נכבדים כדי להבטיח לעצמן מקום במה שרבים רואים כמהפכה הטכנולוגית הבאה. עבור ישראל, טכנולוגיות קוונטיות מהוות לא רק הזדמנות מדעית, אלא גם המשך טבעי ליכולתנו ארוכת השנים להפוך מחקר מעמיק לחדשנות בעלת חשיבות עולמית. במסגרת השלב הראשון של התוכנית הלאומית לקוונטים של ישראל, שהושקה בשנת 2019, קיבלה ישראל על עצמה מחויבות לאומית מכוונת ומתואמת לתחום המדע והטכנולוגיה הקוונטית. בשיתוף פעולה, משרדי הממשלה, מוסדות המחקר, האקדמיה, התעשייה וארגוני הביטחון הניחו את היסודות לבניית אקוסיסטם החדשנות הקוונטית. מאמצים אלו סייעו למצב את ישראל בין המרכזים העולמיים המובילים לחדשנות קוונטית. מה שהופך את אקוסיסטם החדשנות הקוונטית של ישראל לייחודי במיוחד אינו גודלו, אלא יכולתו ליצור השפעה. בהסתמך על רשת צפופה של חוקרים, חברות סטארט-אפ, משקיעים, תאגידים רב-לאומיים ומוסדות ציבוריים, יצרה ישראל סביבה שבה רעיונות עוברים במהירות מהמעבדות ליישומים בעולם האמיתי. כיום, חברות ישראליות מקדמות את תחומי המחקר הקוונטי, החישה, התקשורת, מערכות הבקרה, ואורקסטריציה של התוכנה, אבטחת הסייבר ויישומים המבוססים על טכנולוגיה קוונטית, ותורמות יכולות חיוניות לכלכלה הקוונטית העולמית המתהווה.

צחי שנר

ממלא מקום מנכ"ל
וראש החטיבה הטכנולוגית
רשות החדשנות



הקדמה

התוכנית הלאומית לקוונטים בישראל: הצעה לשלב השני, לשנים 2027 עד 2031

הוועדה הלאומית המליצה על תוכנית חומש לשנים 2027 עד 2031. בהתבסס על הלקחים שהופקו מהתוכנית הראשונה ועל ההשקעה המוצלחת של אקוסיסטם קוונטי פעיל, הכיוונים המוצעים לשלב השני כוללים את ההמלצות הבאות: מינוף והרחבת שיתופי פעולה בין לאומיים; הבטחת שרשראות אספקה ותשתיות קריטיות בתחומי הפוטוניקה, הקריוגניקה והייצור; חיזוק המצוינות האקדמית וההכשרה לתואר דוקטור; מתן עדיפות לתוכנה ולאגוריתמים קוונטיים; עידוד תעשיות שאינן מתחום הקוונטום וגופים ממשלתיים לפתח מקרי שימוש; הרחבת תוכניות להכשרת כוח אדם ולשימור כישרונות; והקמת גוף ייעודי לניהול התוכנית הלאומית.

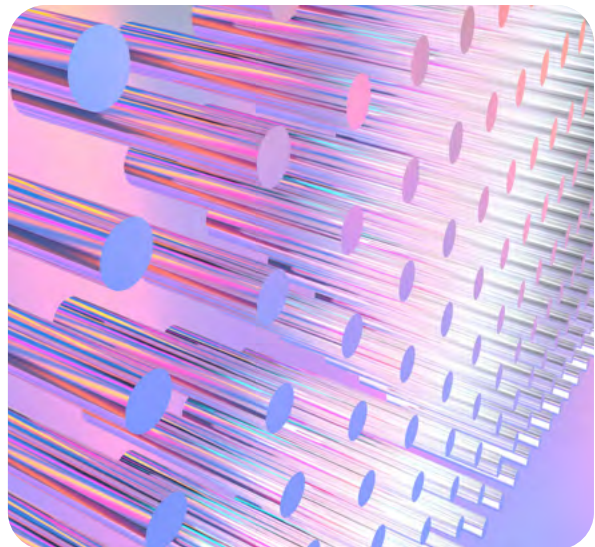
לקחים עבור אקוסיסטמים לאומיים אחרים בתחום הקוונטום

1. התבססות על מוסדות קיימים. מסחור טכנולוגיות קוונטיות יעיל יותר כאשר הוא משולב במערכת חדשנות מבוססת, ולא כאשר הוא נתמך באמצעות כלים ספציפיים למגדר בודד.
2. יש לשמור על גמישות טכנולוגית. תמיכה במספר מסלולי חומרה ותוכנה היא בעלת ערך רב כל עוד הזירה הטכנולוגית העולמית נותרת בלתי יציבה.
3. השקעה בתשתית משותפת. מתקנים לאומיים מפחיתים את חסמי הכניסה, תומכים בפיתוח הון אנושי ומאפשרים שיתופי פעולה בין האקדמיה לתעשייה.
4. פיתוח מכוון של צד הביקוש. אקוסיסטם חזק של מחקר וסטארט-אפים אינו מוביל באופן אוטומטי לאימוץ הטכנולוגיה בקרב בנקים, מערכות בריאות, חברות אנרגיה או גופים ממשלתיים.
5. להקצות אחריות ברורה לניהול התוכנית. יש להשלים את התיאום בין גופי המימון השונים באמצעות גוף שיהיה אחראי על היישום, המעקב, שיתוף הפעולה הבין-לאומי ופיתוח האקוסיסטם.

לקחים אלה הם מסקנות אנליטיות שהוסקו מהמקרה הישראלי ומה-Quantum Economy Blueprint של ה-World Economic Forum².

דו"ח זה מציג את אקוסיסטם החדשנות הקוונטית של ישראל באמצעות מבנה בהשראת ה-Quantum Economy Blueprint של הפורום הכלכלי העולמי, תוך התמקדות במודל המוסדי של ישראל, בתשתיות, בחוזקות המחקר, ובנתיבים המתהווים להשפעה כלכלית ואסטרטגית. הוא נועד לסייע לקובעי מדיניות, מובילי תעשייה, חוקרים ושותפים בינלאומיים להבין כיצד ישראל מתרגמת השקעה מוקדמת בתחום הקוונטום ליכולת לאומית ארוכת טווח¹.

הדו"ח מתאים את ארכיטקטורת תשעת הנושאים של ה-Quantum Economy Blueprint להקשר הישראלי, תוך שילוב מיפוי אקוסיסטם, ניתוח תוכניות ציבוריות, סקירת תשתיות ושיקולי אימוץ מגדרי. במקום להשוות את ישראל למדינות אחרות, הדו"ח מציע חקר מקרה לאומי ממוקד שעשוי לשמש גם כמקור התייחסות מעשי לממשלות ולבעלי עניין המגבשים אסטרטגיות בתחום הקוונטום. תוכנית הקוונטים הלאומית הראשונה של ישראל גובשה בשנים 2019-2020, לפני פרסום ה-Quantum Economy Blueprint של ה-World Economic Forum בינואר 2024. לפיכך, ההתכנסות בין התוכנית של ישראל לבין ה-Blueprint משקפת מענים מקבילים לדרישות האסטרטגיות של תחום הקוונטים, ולא יישום ישיר של ה-Blueprint. בדו"ח זה משמשת תוכנית הפעולה (Blueprint) כמסגרת ניתוחית שדרכה ניתן להעריך את הניסיון של ישראל ולזהות סדרי עדיפויות לשלב 2 של התוכנית הלאומית לקוונטים של ישראל (INQI).



סיכום מנהלים

QuamCore, Quantum Art, Quantum Source, LightSolver, OPSYS Technologies ועוד. המרכז הישראלי למחשוב קוונטי (IQCC) מציב את ישראל בקרב קבוצה מצומצמת של מדינות שלהן גישה למגוון פלטפורמות קוונטיות, ובהן פלטפורמות המבוססות על מוליכי-על, פוטוניקה וקיויביטי ספין. הוא מאפשר בדיקת אלגוריתמים, ביצוע מבחני ביצועים (benchmarking), תהליכי עבודה היברידיים והכשרה מעשית של כוח אדם, בעוד ששדרוגים מתוכננים – ובהם מעבד מוליך-על בעל 49 קיויביטים – מרחיבים את היכולת הלאומית העצמאית בתחום.

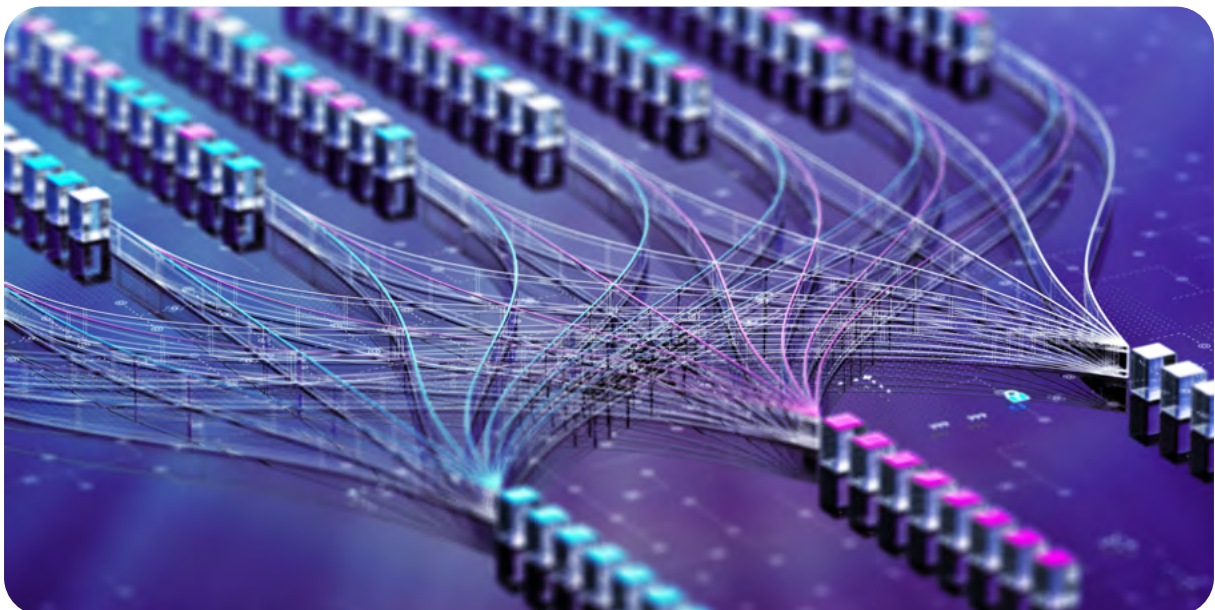
למרות המומנטום המדעי והתעשייתי החדק, רמת המוכנות לאימוץ הטכנולוגיה נותרת לא אחידה. בסקטורים של הביטחון, התעופה, החלל והתקשורת המאובטחת כבר ניתן לראות סימנים ראשוניים של אימוץ הטכנולוגיה, בעוד שבתחומי הבריאות, הפיננסים, האנרגיה והלוגיסטיקה נדרשות תוכניות פיילוט מובנות, הרחבת כוח האדם, הגברת המודעות בקרב מנהלים ומסגרות לשילוב הטכנולוגיה. האתגרים המרכזיים כוללים מחסור בכוח אדם מיומן, תלות בחומרה ממקורות חיצוניים, מספר מצומצם של מקרי שימוש מאומתים, ופערים בתיאום בין-ממשלתי. במבט לעבר השלב השני המוצע של התוכנית הלאומית לקוונטים, לשנים 2027 עד 2031, סדרי העדיפויות של ישראל צריכים לכלול: הרחבת כוח העבודה המיומן בטכנולוגיות קוונטיות; קידום יכולות אסטרטגיות בשרשראות האספקה בתחומי הפוטוניקה והקריוגניקה; האצת תוכניות פיילוט לאומיות לאימוץ בתעשייה; חיזוק שיתוף הפעולה בין האקדמיה לתעשייה באמצעות מתקני ניסוי משותפים; והקמת מנגנוני ממשל שיתאמו בין מערכת הביטחון, האקדמיה והמגזר הפרטי. באמצעות פעולה מתואמת תוכל ישראל לחזק את מעמדה העולמי כמרכז לחדשנות קוונטית זריזה ומוכוונת השפעה.

אקוסיסטם החדשנות הקוונטית של ישראל נכנס לשלב מכריע, שבו השקעות היסוד שבוצעו בשנים 2019 עד 2025 מתורגמות לתוצאות מדעיות, תעשייתיות ואסטרטגיות הניתנות למדידה. בעשור האחרון, ישראל בנתה את אחת מסביבות החדשנות הקוונטית המרוכזות והזריזות ביותר בעולם, באמצעות מינוף המצוינות האקדמית, העומק הטכנולוגי המונע על ידי צרכי הביטחון, הזריזות היזמית וההתערבות הלאומית המתואמת.

מאפיין בולט של האקוסיסטם הקוונטי בישראל הוא היעילות ההונית שלו: ההשקעה הציבורית, המרוכזת יחסית, סייעה להניע פעילות נרחבת במגזר הפרטי, הקמת חברות והשקעות הון סיכון. תוצאה זו משקפת לא רק את התוכנית הלאומית בתחום הקוונטי, אלא גם את מערכת החדשנות הישראלית הרחבה יותר, שעליה נבנה הסקטור הקוונטי.³

ההשקעות הלאומיות במסגרת התוכנית הלאומית הראשונה בתחום הקוונטי (INQI) היוו זרז להתפתחות מבנית מהירה: עשרות מעבדות מחקר חדשות, המרכז הישראלי למחשוב קוונטי (IQCC) ויותר מעשרים חברות סטארט-אפ הפועלות בתחומי החומרה, הבקרה, התוכנה, החישה והתקשורת המאובטחת, שזכו לתמיכה בשלבים המוקדמים מטעם הרשות הלאומית לחדשנות טכנולוגית בישראל ("רשות החדשנות"). הישגים אלה משקפים לא רק את היכולת המדעית, אלא גם את היעילות של מודל החדשנות הישראלי, המכוון למשימות.

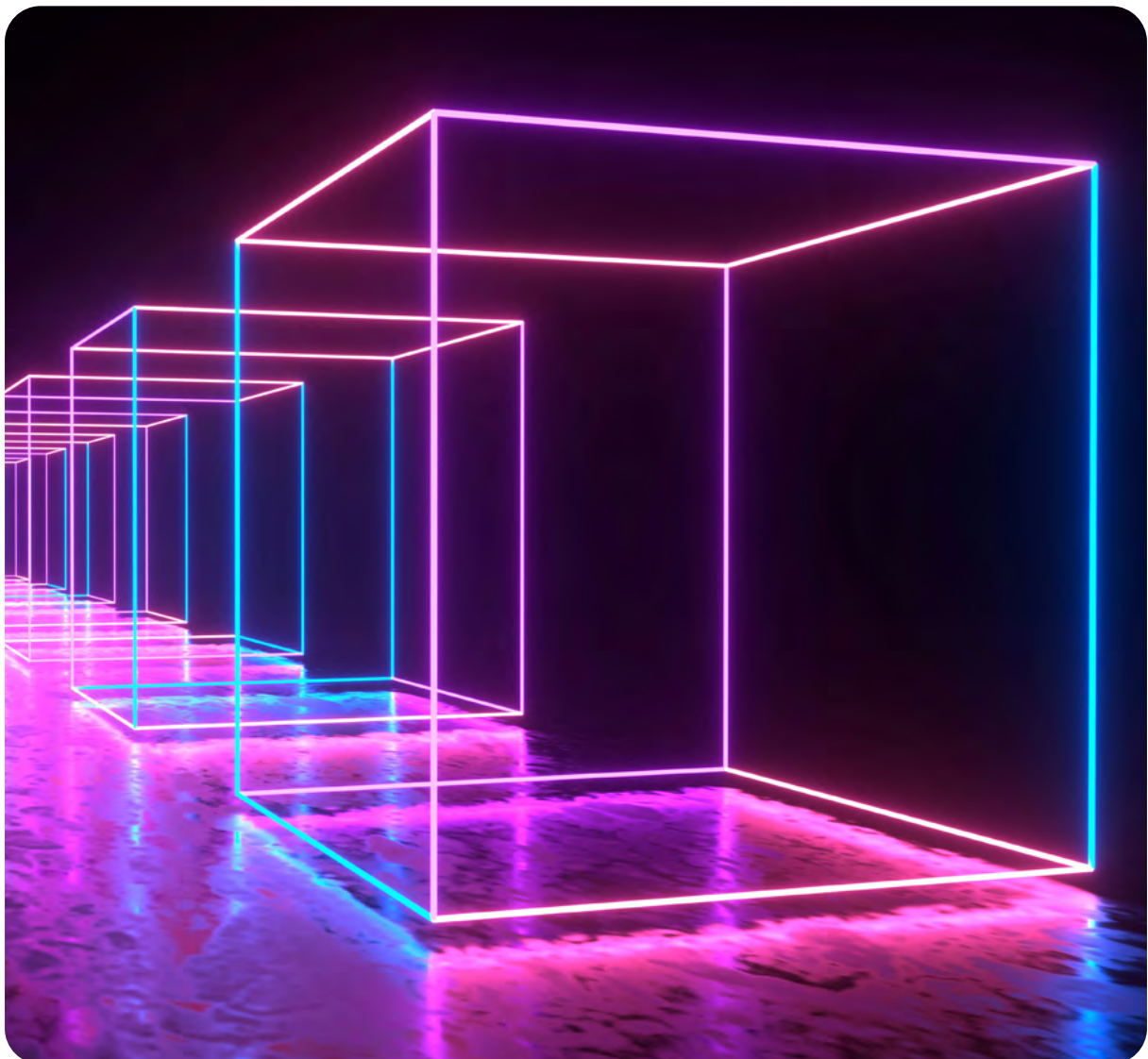
קהילת המחקר בישראל מתאפיינת במגוון יוצא דופן של תחומי מומחיות, ובהם קיויביטים מוליכי-על, יונים לכודים, פוטוניקה, התקנים המבוססים על מרכזי NV ביהלום, אופטיקה קוונטית, טכנולוגיות לתיקון שגיאות, קריפטוגרפיה ואלגוריתמים היברידיים קלאסיים-קוונטיים. עוצמה מדעית זו מזיינה באופן ישיר אקוסיסטם תעשייתי חזק, הכולל את Quantum Machines, Classiq,

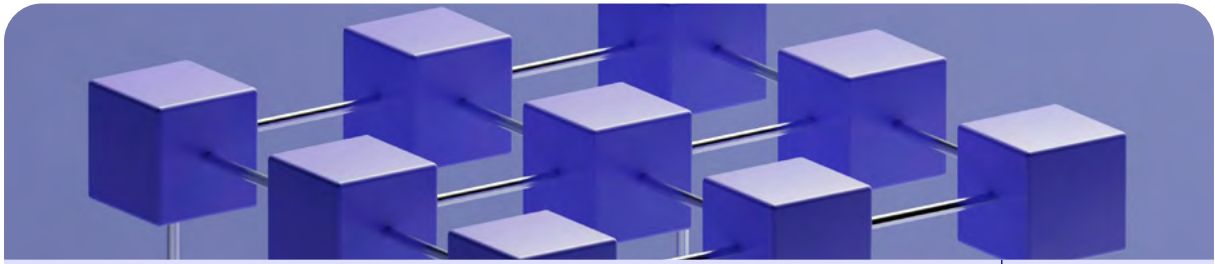


מבוא

כלי תמיכה ציבוריים במחקר ופיתוח ומסלולים מבוססים שאפשרו לחוקרים להתקדם ממחקר במעבדות אקדמיות להקמת חברות. לפיכך, תחום הקוונטום בישראל התפתח כהמשך טבעי לתרבות מסחור קיימת, ולא כתחום עצמאי שנבנה מאפס. תשתית מוסדית זו סייעה לקצר את הדרך מתגליות מדעיות לפעילות מסחרית מגובה במימון, ותרמה ליכולת למנף השקעה ציבורית לגיוס השקעות פרטיות בהיקף גבוה יחסית.⁴ דו"ח זה בוחן את האקוסיסטם הקוונטי של ישראל כמקרה בוחן לאופן שבו השקעה ציבורית ממוקדת, מצוינות מדעית ותשתיות לאומיות מתורגמות ליכולות מסחריות ואסטרטגיות מתפתחות. הדו"ח מדגיש את תחומי החוזקה היחסיים של ישראל, מזהה פערים שנותרו באימוץ הטכנולוגיות ובפיתוח האקוסיסטם, ומציג תובנות ולקחים מעשיים שעשויים להיות רלוונטיים גם למדינות אחרות המגבשות אסטרטגיות לאומיות בתחום הקוונטום.

טכנולוגיות קוונטיות עוברות בהדרגה מתחום המחקר האקדמי למעמד של נכסים אסטרטגיים ברמה הלאומית. מדינות רואות במחשוב קוונטי, בחישה קוונטית ובתקשורת קוונטית מרכיבים מרכזיים בחוסן הכלכלי העתידי, ביכולות הביטחוניות ובהובלה המדעית. האקוסיסטם הקוונטי בישראל התפתח במהירות הודות להשקעה ציבורית מתואמת, ליוזמות מחקר מוכוונות משימה ולריכוז גבוה של הון אנושי מדעי איכותי. דו"ח זה מתמקד בישראל כמקרה בוחן, במטרה להציג מסגרת ידע מעשית ושימושית, שאינה תלויה בהשוואה בין מדינות. לא ניתן להבין את האקוסיסטם הקוונטי בישראל במנותק ממערכת החדשנות הרחבה שבתוכה הוא פועל. עוד קודם להתפתחות תחום הקוונטום, הייתה בישראל סביבה בשלה למסחור טכנולוגיות דיפ־טק, שכללה חברות מסחור ידע מנוסות, משקיעי הון סיכון, תוכניות האצה,





נושאים ואבני בניין

1

או העלות הכרוכים בפיתוחן גבוהים מדי עבור גוף יחיד. מאגדים אלה יוצרים קניין רוחני משותף, הזדמנויות להכשרה מתקדמת ותשתיות מחקר ארוכות טווח. בנוסף לכך, רשות החדשנות משקיעה בתשתיות לאומיות בקנה מידה גדול המשמשות כמעבדות ניסוי לטכנולוגיות מהדור הבא. בתחום המחשוב והתקשורת הקוונטיים, הקימה ישראל מעבדות לאומיות, רשתות הדגמה, וכן גישה למעבדים קוונטיים הטרוגניים, פלטפורמות למעבדים מבוססי מוליכות-על, יונים כלואים, פוטוניקה ואטומים ניטרליים. תשתיות אלה מקלות מאוד על כניסתן של חברות סטארט-אפ וחוקרים לתחום, בכך שהן מספקות ציוד יקר, צוות טכני מיומן וסביבות בטוחות לניסויים.

רשות החדשנות מממנת גם תוכניות האצה, חממות ותוכניות מסחר מוכוונות מטרה, המסייעות להפוך פריצות דרך מדעיות למוצרים מוכנים לשוק. בתחום הקוונטי, הדבר כולל תמיכה בחברות סטארט-אפ המפתחות רכיבי חומרה, כלים לאבטחת סייבר עמידים בפני התקפות קוונטיות, מערכי תוכנה מתקדמים ואלגוריתמים היברידיים (קוונטיים-קלאסיים) ליעול, לכימיה ולחומרים.

תיאום בין-ארגוני

התוכנית הקוונטית הלאומית הראשונה של ישראל יושמה באמצעות פעילות מתואמת בין מספר גופים ציבוריים. המועצה להשכלה גבוהה, באמצעות הוועדה לתכנון ולתקצוב (ות"ת), תמכה בפעילות האקדמית; רשות החדשנות הישראלית תמכה במחקר ופיתוח תעשייתי ובמאגדים שיתופיים; המינהל למחקר ופיתוח אמצעי לחימה ותשתית טכנולוגית (מפא"ת) קידם מחקר המונע מצורכי יישום; ומשרד החדשנות, המדע והטכנולוגיה תמך בשיתוף פעולה אקדמי ובין-לאומי. משרד האוצר הקצה תקציבים בסיסיים ותמך בתיאום בין-ארגוני באמצעות פורום תל"ם, הפורום הבין-מוסדי לתיאום השקעות לאומיות בתשתיות מחקר ופיתוח.⁵ שלוש תכונות מבדילות את המודל הזה: הוא מכון

בחלק הראשון של דו"ח זה מוצגים הנושאים המרכזיים ואבני היסוד המאפשרות את התפתחותה של הכלכלה הקוונטית בישראל. נושאים אלה הותאמו כך שישקפו את נקודות החוזק הייחודיות של מדינת ישראל, ובהן חדשנות מכוונת משימה, קשרים הדוקים בין האקדמיה לתעשייה, תשתיות לאומיות ופיתוח טכנולוגיות בעלות יישומים ביטחוניים.

1.1

נושא 1: יכולות פורצות דרך

מודל החדשנות של ישראל מבוסס על שילוב ייחודי של השקעה ציבורית אסטרטגית, כלי מדיניות גמישים ושיתוף פעולה הדוק בין האקדמיה, מרכזי מחקר ופיתוח רב-לאומיים, מוסדות מחקר ממשלתיים והתעשייה, במיוחד בתחום הטכנולוגיות הדו-שימושיות. במרכז האקוסיסטם, רשות החדשנות משמשת כגורם מאיץ לאומי לפיתוח טכנולוגיות פורצות דרך בעלות פוטנציאל עולמי. המודל מדגיש זיהוי מוקדם של תחומים מתפתחים שבהם ישראל יכולה לבסס מנהיגות טכנולוגית, ולאחר מכן התערבות ממוקדת כדי לצמצם כשלים בשוק ולהאיץ את המסחר.

תוכנית הקוונטום נשענת על מגוון כלי התמיכה של רשות החדשנות, המלווים חברות לאורך כל שלבי החדשנות: החל ממחקר ופיתוח בשלב מוקדם וחממות טכנולוגיות, ועד להרחבה תעשייתית וכניסה לשווקים בינלאומיים. מנגנונים אלה כוללים מענקי מו"פ מותנים, חממות טכנולוגיות, תמיכה בפעילות מו"פ רב-לאומית, תוכניות מו"פ תעשייתיות דו-צדדיות ומסלולים ייעודיים לחברות העוברות משלב המחקר לשלב הייצור המסחרי. בתחומי מחקר פורצי דרך כגון טכנולוגיות קוונטיות, רשות החדשנות פועלת באמצעות מערך כלים מותאמים אישית שנועדו לתת מענה לכל שלב בתהליך המחקר והפיתוח. קולות קוראים תחרותיים להקמת מאגדים למחקר יישומי מאפשרים לאוניברסיטאות, למכוני מחקר ולחברות מובילות לפתח במשותף יכולות יסוד שהסיכון

למשימה ולא לתחום; הוא משלב השקעה מצד ההיצע עם מעורבות של משתמשי קצה מהמגזר הציבורי; והוא מאפשר הקצאה מחודשת של משאבים במהלך היישום, בהתאם להתפתחות התנאים הטכנולוגיים והסביבתיים. מאפיין מובהק במודל הישראלי הוא הדגש על שותפויות אסטרטגיות. ישראל מקיימת שיתופי פעולה עם ארצות הברית, אירופה ואסיה בתחום מדע הקוונטים, תוך ניצול מימון משותף למחקר, גישה למתקנים ברחבי העולם והשתתפות במאמצי תקינה בינלאומיים. שותפויות אלו מחזקות את יכולתה של ישראל לנווט בנוף הקוונטי העולמי, המתפתח בקצב מהיר. מאפיין מרכזי של המודל הישראלי הוא יצירת ביקוש מכוונת. רשות החדשנות מקדמת אימוץ מוקדם של פתרונות מבוססי קוונטום במגזר הציבורי, בתעשייה ובתשתיות קריטיות, באמצעות עידוד תוכניות פיילוט בתחומים כגון ביטחון, בריאות, לוגיסטיקה ופיננסים. גישה זו מאיצה את תהליך הלמידה הארגונית ומסייעת לחברות מקומיות לאמת את הטכנולוגיות שלהן באמצעות

משתמשים אמיתיים ובהקשרים תפעוליים. מערכת החדשנות הישראלית משלבת גם את פיתוח ההון האנושי ככלי מדיניות מרכזי. באמצעות מלגות, תוכניות הכשרה מקצועית מחודשת ותוכניות לימודים משותפות לאקדמיה ולתעשייה, המדינה מטפחת דור חדש של מהנדסי קוונטום, מפתחי אלגוריתמים ומומחי חומרה. מאגר הכישרונות הזה חיוני לשמירה על התחרותיות הלאומית בטווח הארוך. לבסוף, המודל מתאפיין תהליכי הערכה והתאמה מתמשכים. רשות החדשנות עוקבת אחר ההתפתחויות העולמיות, מתייעצת עם מומחים ומעדכנת את הכלים שלה באופן מתמשך, כדי להבטיח שישראל תישאר בחזית הטכנולוגיות פורצות הדרך. בתחום הקוונטי, אחד התחומים בעלי החשיבות האסטרטגית הגדולה ביותר במאה ה-21, גישה אדפטיבית זו תומכת בפיתוח אקוסיסטם גמיש, מחובר ברמה הגלובלית ומונע על ידי חדשנות.

1.2

נושא 2:

יכולות טרנספורמטביות והתוכנית הלאומית בתחום הקוונטי (2019 עד 2025)

התוכנית הלאומית לטכנולוגיות קוונטיות, שפעלה בשנים 2019 עד 2025, הניחה את היסודות לאקוסיסטם הקוונטי המודרני של ישראל. היא תמכה בהקמת עשרות מעבדות מחקר חדשות, בגיוס אנשי סגל צעירים בתחום ההנדסה הקוונטית ובשיפורים משמעותיים בתשתית הלאומית. היוזמה הקוונטית הלאומית הראשונה, שהושקה בשנת 2019, סימנה את תחילתו של מאמץ לאומי מתואם לבניית היכולות של ישראל בתחומי המחשוב הקוונטי, התקשורת, החישה והטכנולוגיות התומכות. עד סוף שנת 2025, התוכנית מימשה בפועל כמעט את מלוא התקציב המתוכנן, דבר המעיד על מחויבות מוסדית חזקה ועל צמיחה מהירה של האקוסיסטם הלאומי. ההקצאה הכוללת המתוכננת, בסך של כ-413 מיליון דולר, תואמה לביצוע מוערך של כ-409 מיליון דולר, כולל חלוקת העלויות הצפויה עם התעשייה והאקדמיה; סביר להניח שההוצאה בפועל תהיה גבוהה אף יותר לאחר שייכללו הנתונים המלאים לשנת 2025. ארבעה גופי מימון עיקריים – ות"ת, רשות החדשנות, מפא"ת ומשרד המדע – נשאו בנטל התפעולי של התוכנית, כאשר כל אחד מהם תרם בהתאם לתחומי אחריותו ולסדרי העדיפויות האסטרטגיים שלו. סכום ועדת התכנון והתקצוב (ות"ת) עמד על כ-149 מיליון דולר, בהשוואה לתוכנית המקורית שעמדה על כ-145 מיליון דולר, או כ-168 מיליון דולר אם כוללים את חלוקת העלויות הפערים העיקריים ביחס לתכנון התוכנית היו גיוס איטי מהצפוי של סגל אקדמי חדש ועיכובים ברכישת ציוד למוסד. רשות החדשנות חרגה באופן משמעותי מתחזיות התקציב המקוריות שלה. רשות החדשנות השקיעה כ-87 מיליון דולר במענקים, כמעט כפול מהתקציב המתוכנן,

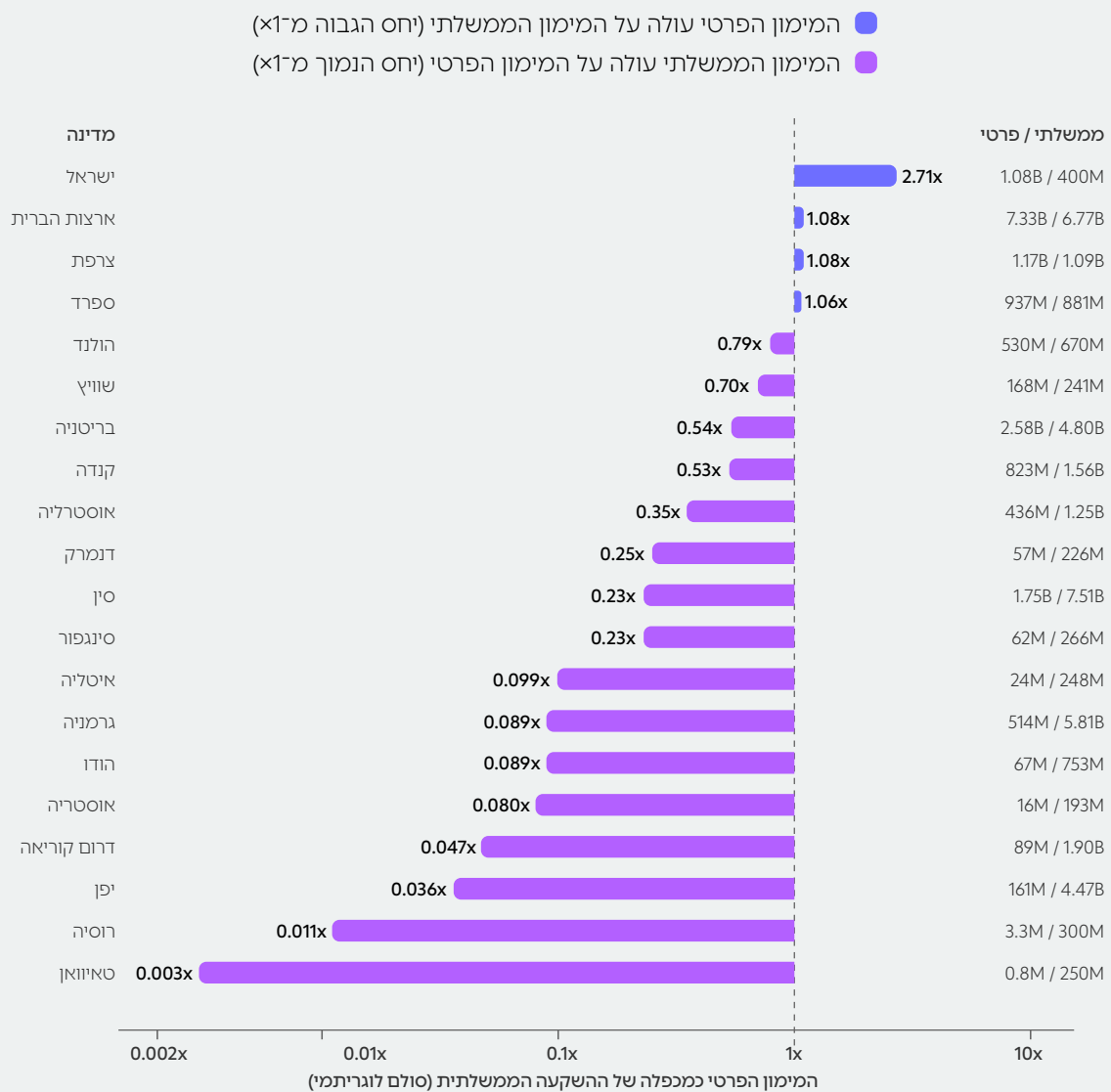
מה שמשקף השקעה כוללת של המגזר הציבורי והפרטי בסך של כ-141 מיליון דולר. הביצוע מעבר לתכנון משקף את העדיפות האסטרטגית שניתנה למדע ולטכנולוגיה קוונטית (QST), ונבע במידה רבה מהקמתם של שלושה מאגדי מחקר ופיתוח נוספים, בתחומי המחשוב הקוונטי, טכנולוגיות קוונטיות פוטוניות ותקשורת קוונטית, מעבר למה שתוכנן במקור, וכן מביטולו של מאגד שני שתוכנן בתחום החישה הקוונטית. גם מפא"ת (המנהל למחקר ופיתוח בתחום ההגנה) חרג מהתקציב המתוכנן, והוציא כ-69 מיליון דולר לעומת כ-67 מיליון דולר שתוכננו, או כ-93 מיליון דולר כולל מימון תואם. הסטיות העיקריות כללו השקעות גבוהות מהצפוי בתחום החישה הקוונטית ובשיתופי פעולה בינלאומיים בתחום טכנולוגיות החישה, לצד עיכובים בתוכניות המחשוב הקוונטי. משרד המדע ניצל כ-7 מיליון דולר מתוך כ-24 מיליון הדולרים שהוקצו במקור, מה שהותיר פער משמעותי שגורמיו מצריכים בדיקה נוספת. לבסוף, משרד האוצר מילא את תפקידו בהקצאת תקציבים בסיסיים, בעוד שהאקדמיה והתעשייה תרמו מימון משלים בסך מוערך של 67 מיליון דולר.⁶ הקשר בין ההשקעה הציבורית לצמיחה העוקבת במגזר הפרטי הוא מאפיין חשוב בביצועי התוכנית. ישראל היוותה נתח קטן יחסית מההשקעה הציבורית העולמית במחקר ופיתוח בתחום הקוונטי, בעוד שזכתה לנתח גדול בהרבה מההון הפרטי העולמי בתחום הקוונטי. אף שיחס המינוף המדויק תלוי במאגרי הנתונים והחישוב עצמו, הדפוס מצביע על כך שהתוכנית הציבורית פעלה במסגרת מערכת חדשנות המסוגלת לתרגם השקעה ציבורית ממוקדת לפעילות פרטית משמעותית.⁷ מעבר לביצוע התקציב, בתקופת התוכנית נרשמה צמיחה דרמטית בתחום הקוונטי האקדמי והתעשייתי בישראל. כשהיוזמה החלה, האקוסיסטם התעשייתי כלל רק כחמש חברות, שרק אחת מהן, Quantum Machines, התמקדה אך ורק ב-QST. עד שנת 2025 הפכה ישראל למרכז חדשנות עולמי, עם יותר מעשרים חברות פעילות בתחומי חומרה ותוכנה למחשוב קוונטי, תקשורת, אבטחת סייבר וחיישה. מספר המועסקים בחברות בתחום הקוונטי הגיע לכ-1,000 עובדים עד שנת 2025, לעומת כ-50 עובדים בשנת 2019.

הצמיחה הייתה משמעותית במיוחד בתחום המחשוב הקוונטי, שבו מספר החברות גדל מאחת ליותר מעשר בתוך שש שנים. כארבע חברות חדשות נכנסו לתחום התקשורת והקריפטוגרפיה הקוונטית, בעוד שתחום החישה נותר מצומצם ויציב. ההשקעות הפרטיות זינקו באופן דרמטי והגיעו לסכום מצטבר של יותר ממיליארד דולר עד סוף שנת 2025. ב-2025 לבדה גייסו חברות קוונטום ישראליות קרוב ל-500 מיליון דולר, המהווים כ-9% מההשקעות הפרטיות העולמיות בתחום ה-QST וכ-15% כאשר לא כוללים את ארצות הברית. בסך ההשקעות

הפרטיות, ישראל דורגה במקום הרביעי בעולם, אחרי ארצות הברית, בריטניה וקנדה. ישראל נחשבת באופן נרחב לאחד המרכזים המובילים בעולם בתחום התוכנה הקוונטית ומערכות הבקרה, ומדורגת בין 2 עד 4 האקוסיסטמים המובילים בעולם בתחום זה. תפקיד זה משקף את העוצמה המשולבת של המחקר האקדמי בישראל, יכולותיה בתחום הנדסת המערכות, התשתית הלאומית, ובסיס תעשייתי הולך וגדל הפועל בתחומי התוכנה, הבקרה, התיאום והפחתת תקלות.

היחס בין הון פרטי להשקעות ממשלתיות, לפי מדינה

היקף המימון הפרטי שגייסו סטארט-אפים בתחום הקוונטום בכל מדינה, עבור כל דולר שהושקע במסגרת תוכניות ממשלתיות.



איור 1: היחס בין הון פרטי להשקעות ממשלתיות, לפי מדינה⁸

מקור: ניתוח והכנת התרשים על ידי מרים שטילמן, בהתבסס על נתוני The Quantum Insider (אוגוסט 2026).

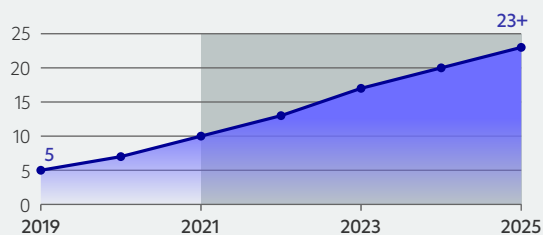
ותפוקת חדשנות. במבט כולל, התקופה 2019 עד 2025 היא השלב המכונן שבו הפכה ישראל משחקנית מתחילה בתחום הקוונטי לאקוסיסטם תחרותי ברמה עולמית וצומח במהירות, הנתמך בהשקעה ממשלתית מתואמת, מנהיגות אקדמית חזקה ומגזר פרטי תוסס יותר ויותר.

מגמות אלה הביאו להכרה בינלאומית הולכת וגדלה. קונסורציום מחקר תעשייתי אירופי שבחן את מרכזי טכנולוגיית הקוונטים העולמיים דירג את תל אביב כמרכז ה-QST השישי בחשיבותו בעולם, בהתבסס על מדדים כגון צפיפות התעשייה, פעילות מחקרית

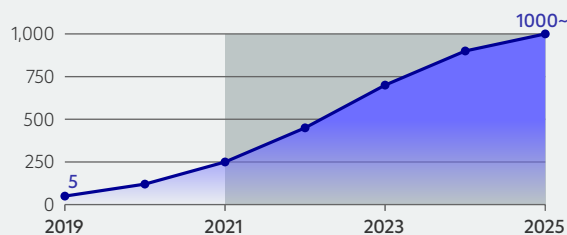
האקוסיסטם הקוונטי בישראל, 2019-2025

ארבעה מדדים במהלך התקופה המשתרעת על פני התוכנית הלאומית הראשונה בתחום הקוונטים

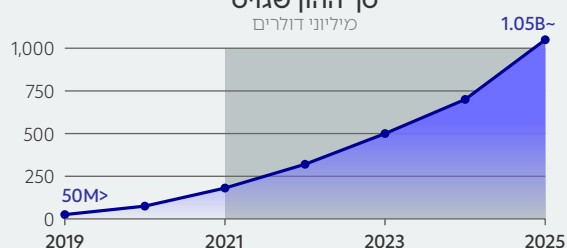
חברות קוונטיות פעילות



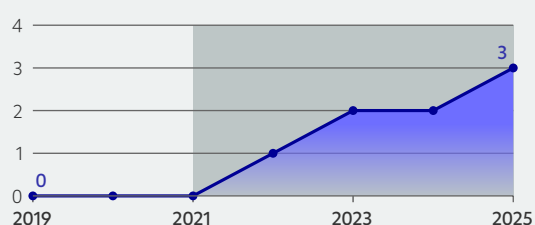
תעסוקה בענף



סך ההון שגויס
מיליוני דולרים

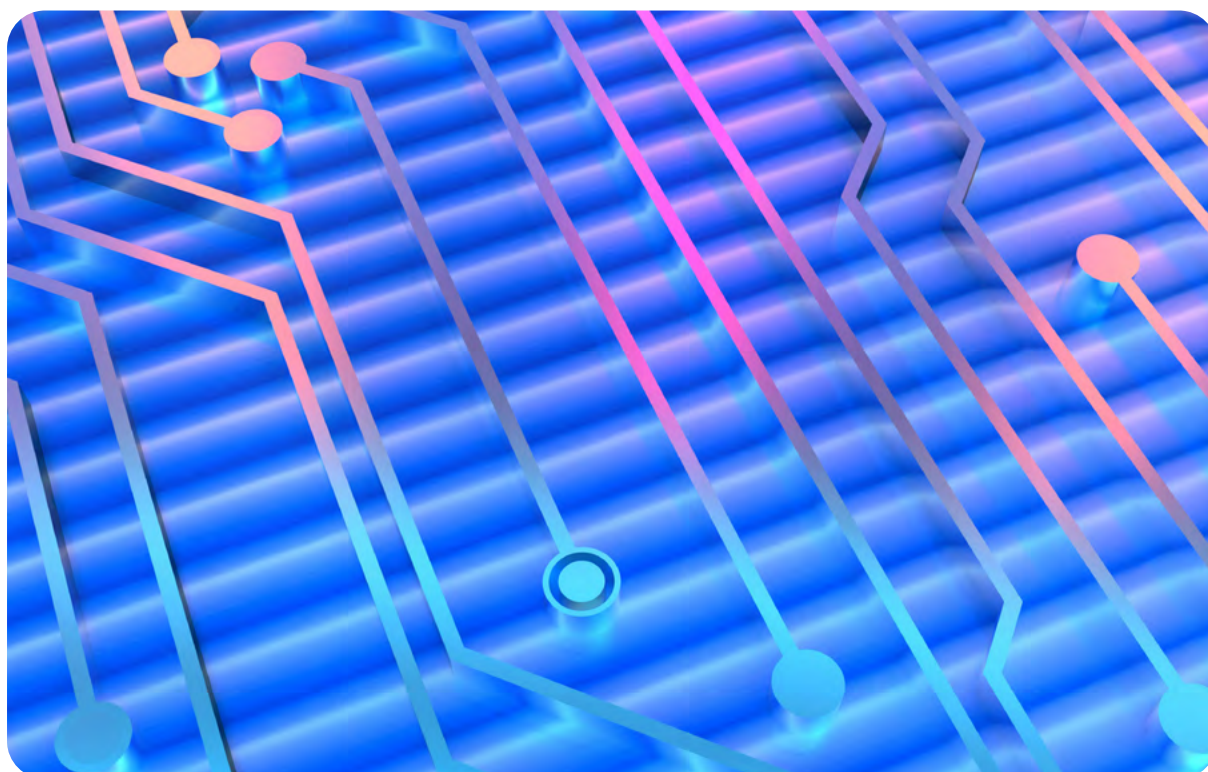


חברות שגייסו מעל 100 מיליון דולר



איור 2: צמיחת אקוסיסטם הקוונטום בישראל במהלך התוכנית הלאומית הראשונה⁹

מקורות: הוועדה הלאומית הישראלית לתוכנית הקוונטית השנייה (2025); QED-C; הודעות החברה. ערכי הקצה מתועדים; ערכי הביניים הם אומדנים המצביעים על המגמה.



חדשנות פתוחה ומסחר

תעשיית הקוונטים בישראל היא מגוונת וכוללת פיתוח קיוביטים בטכנולוגיות מוליכי-על, חלוצי תחום היונים הכלואים, חברות מחשוב פוטוני, מפתחי מרכזי NV והתקנים פוטוניים, וכן ספקי פתרונות אופטימיזציה היברידיים.

כיסוי של כל תחומי הטכנולוגיה הקוונטית

האקוסיסטם התעשייתי של ישראל מכסה את מרבית השכבות במערך הטכנולוגיה הקוונטית. החברות פועלות במגוון רחב של שיטות חומרה, לרבות יונים כלואים, מערכות מוליכות-על, פוטוניקה, אטומים ניטרליים, מחשוב אופטי וגישות המבוססות על מרכזי NV ביהלום. יתרונות נוספים ניכרים בתחומי האלקטרוניקה הבקרתית, תיאום, תכנון אלגוריתמים, הפחתת שגיאות, חישה קוונטית, וכן תקשורת ואבטחה קוונטית. להיקף זה יש חשיבות אסטרטגית, שכן התחום טרם התגבש סביב שיטת חומרה אחת הניתנת להרחבה. האקוסיסטם הכולל פעילות במגוון גישות חשף פחות לכישלון או להבשלה מאוחרת של מסלול טכנולוגי כלשהו, ויוצר הזדמנויות לתשתית משותפת, לחילופי ידע טכני ולפיתוח תוכנה חוצה פלטפורמות.

הפער העיקרי הוא בתחום החומרים הקוונטיים ובתשומות הייצור הייעודיות. לישראל יש יכולת ייצור מקומית מוגבלת בתחומים כגון מצעים מיוחדים, חומרים בעלי טוהר גבוה במיוחד וחומרי גלם מסוימים לייצור. יש לטפל בפער זה באופן סלקטיבי באמצעות השקעה בתשתיות, שותפויות בינלאומיות ואמצעים לחיזוק החוסן של שרשרת האספקה, ולא מתוך הנחה שכל רכיב חייב להיות מיוצר במדינה.¹⁰

דוגמה תמציתית למסלול מסחר זה היא חברת Quantum Source, שגישתה הפוטונית מבוססת על מחקר שפותח במכון ויצמן. התמיכה של רשות החדשנות סייעה בהעברת הידע לחברה, ובהמשך תמכה גם במאגד פוטוניקה בסיליקון בהובלת Quantum Source, שחיבר את הטכנולוגיה שבבסיסו ליישומים תעשייתיים נוספים.¹¹

תוכנה, בקרה ואורקסטריציה כגורם מבדל ישראלי

אחד מתחומי העוצמה המסחרית הקיימים והברורים ביותר של ישראל הוא השכבה שבין חומרת הקוונטים הפיזית ליישומים של המשתמש הסופי: תוכנה, בקרה ואורקסטריציה. חברות ישראליות פיתחו יכולות בתחומי סינתזת אלגוריתמים ברמה גבוהה, בקרת מעבדים, תיאום חומרה והפחתת שגיאות. יכולות אלה הן בעלות ערך רב במיוחד, שכן הן יכולות לפעול במגוון מצבי חומרה שונים, במקום להיות תלויות בהצלחתה של ארכיטקטורת מעבד אחת בלבד.

חברת Classiq מתמקדת בתכנון אלגוריתמים קוונטיים ברמה גבוהה, המותאמים לחומרה; חברת Quantum Machines מפתחת מערכות אלקטרוניות לבקרה ולאורקסטריציה; וחברת Qedma מפתחת יכולות להפחתת שגיאות במעבדים קוונטיים מהדור הנוכחי. יחד, חברות אלה ממחישות תחום שבו החוזקות של ישראל

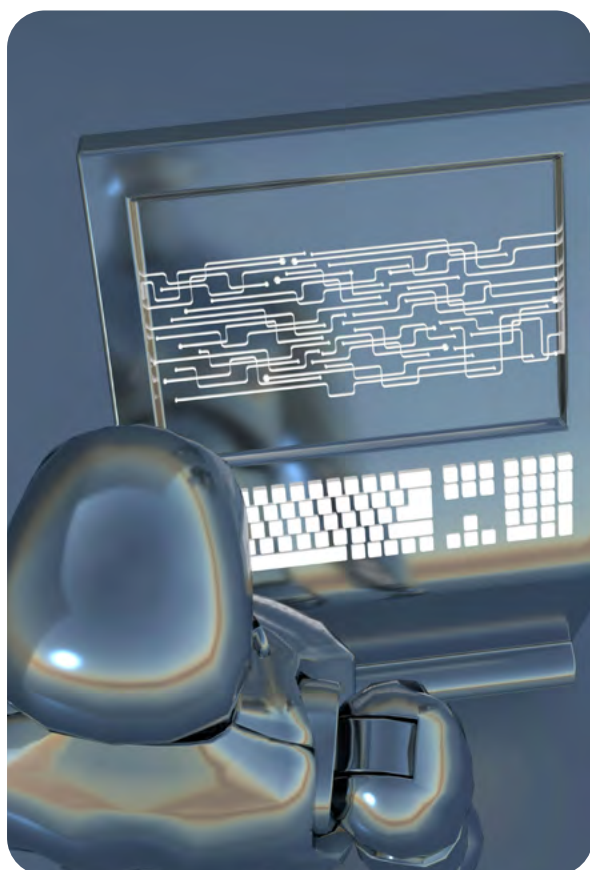
במתמטיקה, בהנדסת מערכות, בתוכנה ובאלקטרוניקה מתקדמת מתורגמות ליתרון תחרותי בתחום הקוונטום.¹² חוזקה זו בתחומי התוכנה, הבקרה והאורקסטריציה מאפשרת לישראל להשתלב בשרשראות הערך הגלובליות של תעשיית הקוונטום, ללא תלות בהובלה בארכיטקטורת חומרה אחת.

שכבה טכנולוגית זו כוללת גם מערכות אלקטרוניות לבקרה מדויקת: חברת Tabor מפתחת ציוד אלקטרוני ליצירת אותות ולמידתם, המשמש להפעלה ולהרחבה של מעבדים קוונטיים בארכיטקטורות שונות.¹³

ההתכנסות בין בינה מלאכותית לקוונטים כנקודת חוזק ישראלית מתהווה

תחום מתפתח שבו ישראל מצטיינת הוא השילוב בין בינה מלאכותית לטכנולוגיות קוונטיות. התכנסות זו פועלת בשני כיוונים: בינה מלאכותית משמשת לשיפור הכיול, הבקרה, הקריאה וניהול השגיאות של מערכות קוונטיות, בעוד ששיטות קוונטיות נחקרות ככלים פוטנציאליים לפתרון בעיות של למידת מכונה ואופטימיזציה. חברות ישראליות פועלות בשני הכיוונים, כולל סביבות פיתוח קוונטיות המונחות על ידי בינה מלאכותית, כיול ובקרה המבוססים על למידת מכונה, הפחתת שגיאות בעומסי עבודה של למידת מכונה קוונטית, ויישומים ראשוניים בתחומי עיבוד תמונות, ייעול תנועה, אבטחת סייבר וזיהוי הונאות.¹⁴

תחום זה מציע מסלול אפשרי ואמין בטווח הקצר, שכן ניתן להעריך מספר יכולות קוונטיות המבוססות על בינה מלאכותית (AI) אל מול אמות מידה טכניות קיימות, מבלי להסתמך באופן מוחלט על הופעתו של מחשוב קוונטי בעל עמידות מלאה בפני תקלות.



מיפוי החברות הישראליות לאורך שכבות הטכנולוגיה הקוונטית

חברות ישראליות הפועלות בשכבות השונות של המחשוב הקוונטי ובתחומי קוונטום משיקים

תחומי קוונטום משיקים

חישה קוונטית

Accubeat שעונים אטומיים	התעשייה האווירית (IAI) מערכות חישה
Rafael מערכות חישה	Elbit מערכות חישה

תקשורת ואבטחה קוונטית

HEQA Security חלוקת מפתחות קוונטית ותקשורת רשת	Qiz Security קריפטוגרפיה פוסט-קוונטית
---	---

שכבות המחשוב הקוונטי

מעבדים קוונטיים (חומרה)

פעילות בכל הטכנולוגיות המרכזיות למימוש קיוביטים

Quantum Art יונים לכודים	Quantum Source פוטוניקה	Qarakal מוליכי-על
LightSolver מערכת חישוב אופטית	Q Factor אטומים ניטרליים	Quantum Transistors מצב מוצק

אלקטרוניקת בקרה וארכיטקטורה

בקרה ברמה גבוהה, יצירת אותות וארכיטקטורת מעבדים

Quantum Machines תיאום וניהול פעולות הבקרה	Tabor יצירת אותות	QuamCore ארכיטקטורה המבוססת על מוליכי-על
--	----------------------	--

תוכנה, אלגוריתמים והפחתת שגיאות

פלטפורמות לתכנון ברמה גבוהה, אלגוריתמים לאופטימיזציה ושיטות להפחתת שגיאות

Classiq פלטפורמה לתכנון אלגוריתמים	Qedma הפחתת שגיאות	Quantimize אלגוריתמים לאופטימיזציה
--	-----------------------	--

חומרים ומצעים

מצעים ייעודיים, איזוטופים, מקורות פוטונים וחומרי גלם לייצור

Raicol גבישים אלקטרו-אופטיים ומקורות פוטונים

מענה מקומי חלקי

בסיס מקומי מצומצם בתחום חומרי הליבה לטכנולוגיות קוונטיות, מעבר לאופטיקה

תשתיות לאומיות ובסיס אקדמי

IQCC תשתית ניסוי לאומית למחשוב קוונטי ולמחשוב עתיר ביצועים	QC Consortium מאגד המחשוב הקוונטי	שישה מרכזים אקדמיים חדשנות ופיתוח אבני בניין טכנולוגיות, מצוינות מחקרית
--	--------------------------------------	---

איור 3: מיפוי החברות הישראליות לאורך שכבות הטכנולוגיה הקוונטית¹⁵

מקור: רשות החדשנות, אפריל 2026. החברות מוצגות בשכבת הפעילות העיקרית שלהן; חלקן פועלות בכמה שכבות.

חברת Heqa Security (QuantLR) מקדמת את תחום התקשורת והאבטחה הקוונטית באמצעות טכנולוגיות QKD. דו"חות חיצוניים מדגישים את היקף ההשקעות הפרטיות בענף. בשנת 2025 גייסו חברות קוונטיות ישראליות כ-500 מיליון דולר, וסך ההון הפרטי שגויס בענף במצטבר הגיע ליותר ממיליארד דולר עד סוף אותה שנה. נתון זה מציב את ישראל בין המערכות האקולוגיות הקוונטיות הפעילות ביותר בתחום ההון סיכון בעולם, למרות אוכלוסייתה הקטנה והמימון הציבורי המוגבל.

חברות כגון, Quantum Machines, Classiq, Qedma ו-Quantimize תורמות לתחומי האורקסטראציה, סינתזת מעגלים, אופטימיזציה ופיתוח תוכנה קוונטית, בעוד שמפעילי תשתית ובוני פלטפורמות ממלאים תפקיד מרכזי בחיבור בין יכולות המחקר למסלולי המסחר. בתחום החישה, החברות AccuBeat, Rafael, IAI/ELTA ו-OPSYS Technologies תורמות טכנולוגיות מתקדמות בתחומי המגנטומטריה, הגרווימטריה, הנדסת שעונים אטומיים ומערכות זיהוי משופרות קוונטיות.

חברות קוונטום ישראליות לפי תחומים טכנולוגיים

חומרה למחשוב קוונטי

LightSolve

מחשוב
אופטי

Qaraka
QUANTUM COMPUTING BY NATURE

מחשוב קוונטי
מבוסס מוליכי-על

Q-Factor

אטומים
ניטרליים



QuamCore
מעבד קוונטי
מבוסס מוליכי-על



Quantum Art
יונים
לכודים

**QUANTUM
SOURCE**

מחשוב קוונטי
פוטוני

**Quantum
Transistors**

שבב קוונטי
מבוסס יהלום

תוכנה ואלגוריתמים

CLASSIQ

תוכנה
קוונטית

QEDMA

הפחתת
שגיאות

QuantyMize
Value, Unlocked

למידת מכונה
קוונטית

מערכות בקרה ורכיבים

QM

QUANTUM MACHINES

בקרה
קוונטית

QuantumPulse Technologies

רכיבים
פוטוניים

**RAICOL
CRYSTALS**

מקורות
פוטונים

TQS

TABOR QUANTUM SOLUTIONS

אלקטרוניקה
לבקרה

חישה ומדידת זמן

AccuBeat
Accurate Frequency & Time

שעונים
אטומיים

IAI

חישה
קוונטית

Opsys
Technologies

חישה
פוטונית

RAFAEL

גרווימטריה
קוונטית

אבטחה ותקשורת

HEQA
SECURITY

חלוקת מפתחות קוונטית
(QKD)

QIZ

קריפטוגרפיה
פוסט-קוונטית

איור 4: חברות קוונטום ישראליות לפי תחומים טכנולוגיים

ובדימות קוונטי, לצד יכולות בטכניקות תהודה מגנטית ובמיקרוסקופיית אלקטרונים ברזולוציה גבוהה. גישות אלו עשויות לאפשר מדידה של תהליכים ביולוגיים ברזולוציה מרחבית וזמנית חסרת תקדים, החל משדות מגנטיים תאיים ופעילות עצבית ועד לדינמיקה מבנית בקנה מידה ננומטרי. אף שהפעילות המסחרית בתחום עדיין מוגבלת, העומק המדעי בישראל והקשרים ההדוקים באקוסיסטם המחקרי שלה מהווים בסיס איתן לחדשנות עתידית בממשק שבין ביולוגיה לטכנולוגיות קוונטיות.¹⁶

תחום מתפתח שבו לישראל חוזקות מחקריות הוא הביולוגיה הקוונטית, שבמסגרתו נעשה שימוש הולך וגובר במדעי הקוונטים הן להבנת תופעות ביולוגיות והן לפיתוח כלים חדשים למדידת תהליכים ביולוגיים. לישראל יכולות מחקריות בעלות הכרה בין-לאומית בכימיית ספין ובסלקטיביות ספין המושרה על ידי כיראליות (CISS), וכן בחישה ביולוגית קוונטית, בחישה באמצעות מרכזי NV



נושא 4: העלאת המודעות

בישראל, העלאת המודעות קשורה קשר הדוק לנראות של התשתית הלאומית, לגישה מעשית למערכות וליכולתם של חוקרים, יזמים, סטודנטים ומשתמשי קצה פוטנציאליים להתנסות בטכנולוגיות קוונטיות בהקשרים מעשיים. לפיכך, מתקנים הנתמכים

על ידי המגזר הציבורי, כגון המרכז הישראלי למחשוב קוונטי (IQCC), ממלאים לא רק תפקיד טכנולוגי, אלא גם תפקיד בפיתוח האקוסיסטם, באמצעות המחשת יכולות, צמצום המורכבות הנתפסת של הטכנולוגיה והרחבת מעגל בעלי העניין המכירים את התחום. Qubit IL משלימה גישה זו, המבוססת על תשתיות, באמצעות קידום אוריינות בתחום הקוונטום, חיזוק המעורבות באקוסיסטם והעלאת המודעות בתעשייה, במגזר הממשלתי ובמערכת החינוך.

מקרה בוחן: Qubit IL - איגוד תעשיית הקוונטים של ישראל

Qubit IL החלה את דרכה בשנת 2018 כקהילה בלתי פורמלית של חוקרים, יזמים ואנשי תעשייה בתחום הקוונטום. הקהילה התגבשה סביב ההבנה כי לא היה גוף אחד שייצג, יחבר ויקדם את תחום הקוונטום בישראל בין הממשלה, האקדמיה והתעשייה. צמיחת הקהילה הובילה להקמתה הרשמית של Qubit IL כעמותה ללא מטרת רווח בספטמבר 2025, במטרה לסייע במיצובה של ישראל כמדינה מובילה בתחום הקוונטום. Qubit IL פועלת בשלושה תחומים עיקריים. הראשון הוא העלאת המודעות, באמצעות תוכניות כגון Quantum Fellows למנהלים בכירים וסדנאות המיועדות לקהל העסקי. מספר המשתתפים בתוכנית Quantum Fellows גדל ליותר מ-100. התחום השני הוא פיתוח האקוסיסטם, לרבות חשיפת

טכנולוגיות קוונטיות ישראליות לשווקים מקומיים ובינלאומיים, עבודה עם נספחים מסחריים וייצוג בכנסים בינלאומיים. התחום השלישי הוא עידוד יזמות, באמצעות שותפויות, האקדמונים ותוכניות מעשיות לפיתוח מיומנויות תכנות. ההאקתון הקוונטי הלאומי מפגיש מדי שנה כ-80 סטודנטים ומהנדסים בתחילת דרכם, ופעילות ההאצה תמכה במחזור ראשון של חמש חברות סטארט-אפ. Qubit IL משתפת פעולה גם עם רשת החינוך ORT בפיתוח מסלול לימודים ייעודי בתחום הקוונטום בבתי ספר תיכוניים. כיום, קהילת Qubit IL מונה כ-3,000 חברים פרטיים ו-15 חברות החברות בארגון, לצד קשרי עבודה עם גופים ממשלתיים, ובהם משרד החוץ, משרד הכלכלה והתעשייה, רשות החדשנות ומטה הבינה המלאכותית במשרד ראש הממשלה.

שדרוגים מתוכננים, ובהם מעבד מוליך-על בעל 49 קיוביטים של Anyon Systems והרחבת יכולות DGX Quantum באמצעות NVIDIA, צפויים לשפר באופן משמעותי את יכולות המחשוב של ישראל. המרכז תומך גם בפיתוח ההון האנושי, באמצעות מתן אפשרות לסטודנטים ולמהנדסים לצבור ניסיון מעשי בעבודה עם מערכות קוונטיות.

מהמודעות לניסוי מובנה

תשתית לאומית כשלעצמה אינה מספיקה ליצירת כלכלה קוונטית מתפקדת. ארגונים בצד הביקוש, ובהם בנקים, חברות אנרגיה, ספקי תקשורת, מערכות בריאות, יצרנים וגופים ממשלתיים, נדרשים גם הם לפתח אוריינות בתחום הקוונטום, לזהות מקרי שימוש רלוונטיים ולבסס יכולות פנימיות להתנסות בטכנולוגיה. הוועדה הלאומית לתוכנית הקוונטים השנייה מצאה כי שיתוף הפעולה המובנה עם תעשיות ישראליות מחוץ למגזר הקוונטום נמצא עדיין בשלב ראשוני. צוותי מחקר ייעודיים, תוכניות פנימיות לפיתוח אוריינות בתחום הקוונטום ותקציבים להוכחת היתכנות עדיין אינם נפוצים בקרב מגזרי המשתמשים הפוטנציאליים.¹⁷ לפיכך, בשלב הבא יש לעבור מהעלאת מודעות כללית להתנסות מובנית. הכלים הרלוונטיים עשויים לכלול פיתוח מקרי שימוש במימון משותף, הערכות מוכנות ארגונית, הוכחות היתכנות הנתמכות על ידי הממשלה ותוכניות ייעודיות המקשרות בין חברות קוונטום למשתמשים פוטנציאליים.

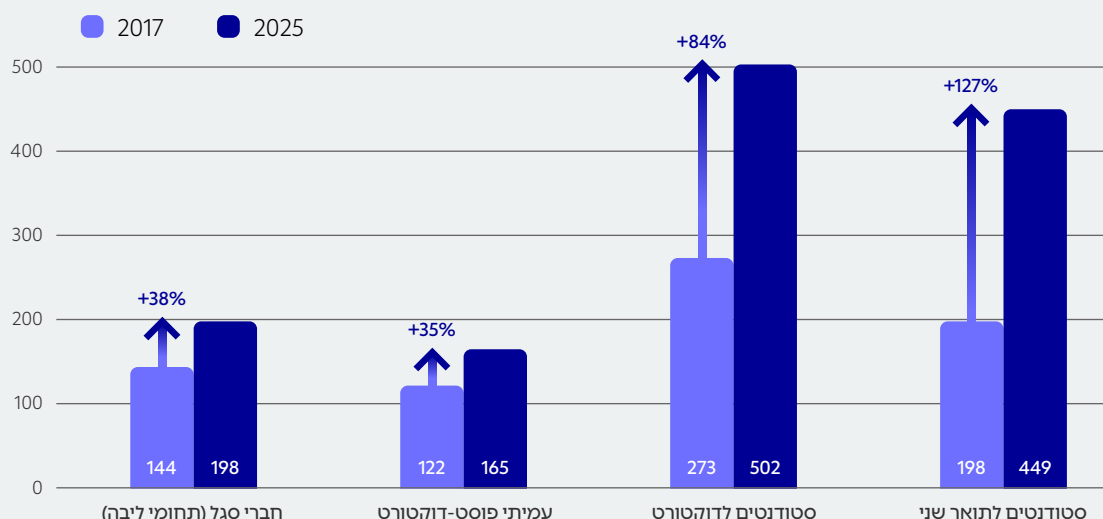
המרכז הישראלי למחשוב קוונטי (IQCC) הוא מתקן לאומי מרכזי המאפשר התנסות במגוון ארכיטקטורות של חומרה קוונטית. המרכז מספק גישה למעבדים המבוססים על מוליכי-על, לארכיטקטורות פוטוניות ולהתקנים המבוססים על קיוביטי ספין, ומאפשר לחוקרים ולחברות לבדוק אלגוריתמים, לבצע מבחני ביצועים של מערכות ולדמות תהליכי עבודה היברידיים.



נושא 5: פיתוח הון אנושי ומצוינות אקדמית

האוניברסיטאות בישראל מתאפיינות בחוזקות בתחומים כגון אופטיקה קוונטית, פוטוניקה, מעגלים מוליכים-על, פיזיקה של יונים כלואים, אלגוריתמים, קריפטוגרפיה ותורת המידע הקוונטי. האקוסיסטם נהנה מתוכניות בינתחומיות המשלבות פיזיקה, מדעי המחשב, מדע החומרים והנדסת חשמל

מספר חברי הסגל האקדמי בישראל בתחומי QST



איור 5: הגידול בכוח האדם האקדמי בתחום הקוונטי בישראל, 2017 עד 2025

מקור: הוועדה הלאומית של ישראל לתוכנית הקוונטום השנייה, 2025, ד"ח פנימי.

מכון ויצמן למדע תורם את יתרונותיו בתחומי יונים כלואים, מערכות מוליכות-על, אופטיקה קוונטית, תיאוריה וקריפטוגרפיה; הטכניון משלב הנדסה קוונטית, פוטוניקה, מערכות מוליכות-על, תיקון שגיאות ותשתית ייצור; האוניברסיטה העברית פעילה בתחומי מערכות מרכזי NV, מידע קוונטי, תקשורת וקריפטוגרפיה פוסט-קוונטית; אוניברסיטת תל-אביב משלבת אופטיקה קוונטית, תקשורת ומחקר בינתחומי, ומארחת את ה-IQCC; אוניברסיטת בן-גוריון תורמת יכולות בתחום השבבים-אטומים, חישה וניווט מדויק; ואוניברסיטת בר-אילן תורמת מחקר בתחום האופטיקה הקוונטית ומדידות רגישות.¹⁸

שיתוף פעולה הדוק בין האקדמיה לתעשייה מאיץ את תכנון הניסויים, פיתוח האלגוריתמים והעברת הטכנולוגיה. סטודנטים וחוקרים עוברים באופן שגרתי לעבוד בחברות סטארט-אפ, במעבדות מחקר בתחום הביטחון ובתפקידים הקשורים לתשתיות לאומיות.

מחקר אקדמי כמנוע להקמת חברות

המערכת האקדמית הקוונטית בישראל משתרעת על פני שש אוניברסיטאות מחקר ומשלבת פיזיקה ניסויית, מדעי המחשב התאורטיים, הנדסה, פוטוניקה, מדע החומרים, קריפטוגרפיה ומידע קוונטי. מאפיין בולט הוא הקשר הישיר בין קבוצות מחקר אקדמיות להקמת חברות תעשייתיות: חברות קוונטיות ישראליות רבות הוקמו על ידי חברי סגל ובוגרי המוסדות המובילים במדינה, או מעסיקות בוגרים וחוקרים ממוסדות אלה בתפקידים טכניים בכירים.

נושא 6: ביטחון לאומי וכלכלי

הנעה על ידי ביקוש מצד משתמשים מתקדמים

ארגוני הביטחון הלאומי והטכנולוגיה המתקדמת בישראל פועלים לא רק כגופים מממנים, אלא גם כמשתמשים ראשונים ומנוסים בטכנולוגיות קוונטיות. הדרישות התפעוליות הקונקרטיות שלהן יוצרות מעגלי משוב קצרים בין המפתחים למשתמשי הקצה, במיוחד בתחומי החישה, התקשורת והמחשוב.



בין השימושים הנמצאים בפיתוח נכללים: מיקום, ניווט ותזמון בסביבות שבהן הניווט הלווייני אינו זמין או אינו אמין; זיהוי רגיש ביותר לצורכי ניטור תת-קרקעי או תת-ימי; צילום בתנאי ראות מוגבלת; ותקשורת מאובטחת. יישומים אלה אינם ייחודיים לישראל, אך הקרבה בין המשתמשים, קבוצות המחקר ומפתחי הטכנולוגיה עשויה לזרז את תהליך האימות ואת מוכנות הטכנולוגיה.¹⁹

AccuBeat מדגימה כיצד טכנולוגיית החישה הקוונטית כבר משולבת בתשתית התפעולית. טכנולוגיות השעונים האטומיים שלה תומכות בתזמון מדויק, בניווט ובסנכרון בסביבות שבהן קיים שיבוש ב-GPS, והן הוטמעו בחלל וביישומים תובעניים אחרים.²⁰

שיתופי פעולה בינלאומיים בתחומי המחקר והתעשייה תורמים גם הם לפיתוח היכולות הקוונטיות של ישראל. גישה למומחיות מחקרית ייעודית, לתשתיות מתקדמות ולשותפים טכנולוגיים בינלאומיים תומכת בפעילות המחקר והפיתוח המקומית ומאפשרת לחברות ישראליות להשתלב בשווקי הקוונטום העולמיים. הדוגמאות הבאות מאירופה ומארצות הברית ממחישות כיצד קשרים אלה תורמים למחקר, לפיתוח טכנולוגי ולמסחר.

ישראל והאיחוד האירופי

חברות בתעשיית הקוונטים הישראלית נמצאות בחזית שיתופי הפעולה הבינלאומיים בפרויקטי הדגמה ואימות טכנולוגיות מתקדמות ויכולות מחקר. במהלך השנתיים האחרונות העניקה רשות החדשנות מענקים בסך כולל של קרוב ל-2 מיליון אירו במסגרת תוכניות המקדמות שיתופי פעולה בין חברות ישראליות למוסדות מחקר מובילים ברחבי העולם, מגרמניה ועד דרום קוריה.²¹

ישראל פיתחה את אחת ממסגרות שיתוף הפעולה הבינלאומיות הפעילות ביותר בעולם בתחום הטכנולוגיות הקוונטיות, כאשר האיחוד האירופי משמש כשותף האסטרטגי העיקרי שלה. ישראל קשורה באופן רשמי לתוכניות המסגרת של האיחוד האירופי למחקר וחדשנות מאז שנת 1996, ושיתוף פעולה זה התעמק עוד יותר עם כניסתו לתוקף של הסכם ההצטרפות של ישראל לתוכנית "Horizon Europe" (תוכנית המסגרת התשיעית) ב-6 בדצמבר 2021. במסגרת זו, ישראל משתתפת במגוון אשכולות של תוכנית "Horizon Europe", לרבות בתחומי הדיגיטל, התעשייה, הביטחון והטכנולוגיות המתפתחות, ובכך הופכת את מדע וטכנולוגיית הקוונטים לעמוד תווך משמעותי בשיתוף הפעולה הדו-צדדי.

בין השנים 2021 ל-2024, חוקרים וחברות ישראליים גייסו יותר מ-1.1 מיליארד אירו במימון במסגרת תוכנית "Horizon Europe".²² מענקים אלה ניתנים במסגרת מגוון כלי מימון הרלוונטיים לתחום הקוונטום, ובהם מועצת המחקר האירופית (ERC), תוכנית ההאצה של מועצת החדשנות האירופית (EIC Accelerator), מאגדים שיתופיים ותוכניות משנה בתחומי הדיגיטל והטכנולוגיות המתקדמות. בסך הכול, 605 חוקרים ישראלים זכו במימון בהיקף של כ-592 מיליון אירו, בעוד ש-386 חברות ישראליות קיבלו 228 מיליון אירו, ולכך נוספו 242 מיליון אירו במסגרת תוכנית ההאצה של מועצת החדשנות האירופית (EIC Accelerator). רבים מהפרויקטים הללו עוסקים בתחומי המחשוב הקוונטי, החישה, הקריפטוגרפיה וחומרים מתקדמים, אשר תואמים באופן ישיר את סדר היום של אירופה בנושאי ריבונות טכנולוגית וחוסן דיגיטלי.

מקרה בוחן: QuantERA, שילוב ישראל באקוסיסטם האירופי למחקר ופיתוח בתחום הקוונטי

הישראלית "רייקול גבישים" משתפות פעולה עם מוסדות מחקר מובילים באירופה בתחום החישה והדמיה הקוונטית המתקדמת. QISS-ME מאחדת את NVIDIA ו-Mellanox עם שותפים מאוסטריה ומגרמניה לפיתוח טכנולוגיה משולבת להפצת מפתחות קוונטיים לסביבות מרכזי נתונים, תוך שיתוף פעולה תעשייתי שנועד להתאים את פעילות המחקר לצורכי היישום המעשיים.

לפיכך, עבור ישראל, הערך האסטרטגי חורג מעבר לגישה למימון הפרויקט. ההשתתפות ב-QuantERA מקשרת בין גורמים ישראליים לבין מומחיות מדעית משלימה, יכולות מחקר ייעודיות ושותפים תעשייתיים; תומכת בשיתופי פעולה בינלאומיים ארוכי טווח ובשיתופי פעולה בין האקדמיה לתעשייה; ויוצרת מסלולים ממחקר חלוצי ועד לאימוץ טכנולוגי ומסחר. כמו כן, הדבר מחזק את שילובה של ישראל בסביבה המחקרית והמדינית האירופית הרחבה יותר, המעצבת את טכנולוגיות הקוונטיות, תוך השלמת היכולות המקומיות באמצעות גישה למומחיות, לתשתיות ולשותפויות הזמינות בכל רחבי האקוסיסטם האירופי הרחב.

QuantERA מהווה דוגמה מובהקת לאופן שבו השתתפות במחקר ופיתוח משותף ברמה האירופית יכולה לחזק ולהרחיב את האקוסיסטם הקוונטי הלאומי של ישראל. התוכנית, שהושקה בשנת 2016 במסגרת תוכנית "Horizon 2020" וממשיכה כיום במסגרת תוכנית "QuantERA III" תחת תוכנית "Horizon Europe", מממנת פרויקטים רב-לאומיים שנועדו לשלב ידע, מומחיות ומשאבים מעבר לגבולות לאומיים. ישראל משתתפת בתוכנית זו מאז הקול הקורא הראשון בשנת 2017, כאשר אוניברסיטאות, מכוני מחקר וחברות ישראליות לוקחים חלק בפרויקטים רצופים בתחומי המחשוב הקוונטי, התקשורת, החישה, הסימולציה ומדעי המידע. בין המשתתפים נמנו אוניברסיטת בר-אילן, אוניברסיטת בן-גוריון, האוניברסיטה העברית בירושלים, מכון ויצמן למדע, Quantum Machines, Raicol Crystals, NVIDIA/Mellanox-1. הערך של השתתפות זו בא לידי ביטוי בהרכבם וביעדיהם של המאגדים שזכו למימון. ב-SPARQL, למשל, אוניברסיטת בר-אילן ויצרנית הקריסטלים

ממחקר פורץ דרך לצמיחה בקנה מידה רחב

התמיכה האירופית באקוסיסטם הקוונטי של ישראל משתרעת על פני כל מחזור החדשנות. מענקי ה-ERC תומכים במחקר חלוצי בהובלת חוקרים במוסדות ישראליים, לרבות פרויקטים שנערכו לאחרונה במסגרת תוכנית "Horizon Europe" באוניברסיטה העברית בירושלים ובמכון ויצמן בתחומי המחשוב הקוונטי וחומרים קוונטיים. במסגרת אתגר הטכנולוגיה הקוונטית של תוכנית ההאצה של מועצת החדשנות האירופית (EIC Accelerator), החברות הישראליות Quantum Transistors ו-CyberRidge קיבלו כל אחת כ-2.5 מיליון אירו לקידום טכנולוגיות בתחום המחשוב הקוונטי והתקשורת המאובטחת. בשלב ההרחבה, Classiq עברה בהצלחה את הערכת ה-EIC STEP Scale Up לשנת 2025 והופנתה לקרן ה-EIC לצורך השקעה פוטנציאלית בסך 10 עד 30 מיליון אירו, בכפוף לבדיקת נאותות. יחד, כלים אלה משלימים תוכניות שיתופיות כגון QuantERA, באמצעות תמיכה ביכולות הישראליות החל ממחקר חלוצי, דרך פיתוח טכנולוגי ועד להרחבת הפעילות בקנה מידה מסחרי. שילובה של ישראל במערכות המחקר הקוונטיות האירופיות מתבצע הן באמצעות שיתופי פעולה מדעיים והן באמצעות השתתפות בתשתיות מחקר גדולות. השותפים הישראליים ממלאים תפקידים פעילים בפלטפורמות אירופיות בתחומי טכנולוגיות קוונטיות, גרפן ומחשוב מתקדם, ותורמים לעיצוב תוכניות מחקר משותפות ומסגרות ניסוי משותפות. שיתוף הפעולה עם גרמניה, ספרד ואיטליה הוא חזק במיוחד, מה שהופך אותן לשותפות התכופות ביותר של ישראל בפעילויות הקשורות לקוונטים במסגרת תוכנית "Horizon Europe".

ברמה התעשייתית, תחום הקוונטים בישראל, הנמצא בצמיחה מהירה, מקיים שיתופי פעולה עם חברות, חברות סטארט-אפ ומוסדות מחקר אירופיים באמצעות ISERD, המינהלת הישראלית למחקר ופיתוח אירופי, הפועלת במסגרת החטיבה הבינלאומית של רשות החדשנות ISERD ממלאת תפקיד מרכזי בהשתתפות של ישראל בתוכניות המחקר והחדשנות של האיחוד האירופי, ובהן Horizon Europe. המינהלת מרכזת את פעילות נציגי ישראל בוועדות הרלוונטיות של התוכניות, מפיצה מידע, מקדמת שיתופי פעולה תעשייתיים ואיתור שותפים, ומעניקה הכוונה לקהילת המחקר והחדשנות בישראל, בתעשייה ובאקדמיה.

[Qubit IL](#), איגוד תעשיית הקוונטום בישראל, משלימה מסגרת מוסדית זו באמצעות חיבור בין חברות ישראליות, קבוצות מחקר, משקיעים ושותפים ממשלתיים לבין בעלי עניין בינלאומיים, ובכך תומכת במיזמים משותפים, בפרויקטי פיילוט חוצי גבולות ובמסלולי מסחר גלובליים. בנוסף, חברות כגון [Quantum Machines](#) עוסקות בשיתוף פעולה בינלאומי באמצעות שותפויות לשילוב טכנולוגיות ובאמצעות מתן גישה למתקני ניסוי קוונטיים הטרונגיים לחוקרים מכל העולם. [המרכז הישראלי למחשוב קוונטי \(IQCC\)](#), הממוקם באוניברסיטת תל אביב, מספק גישה מרחוק למגוון סוגים של מחשבים קוונטיים, וממוקם כמתקן מחקר בינלאומי שנועד לשרת משתמשים הן בישראל והן ברחבי העולם, ובכך מחזק את תפקידה של ישראל כתורמת למחקר ופיתוח קוונטי עולמי. בסך הכול, המעורבות הבינלאומית של ישראל בתחום הטכנולוגיה הקוונטית מעוגנת בתוכנית "Horizon Europe", מתחזקת באמצעות שותפויות דו-צדדיות ומועצמת על ידי שיתופי פעולה מונעי תעשייה, מה שמציב את המדינה כשותפה חשובה במערכות האקולוגיות העולמיות של מחקר, מסחר וחדשנות בתחום הקוונטי.

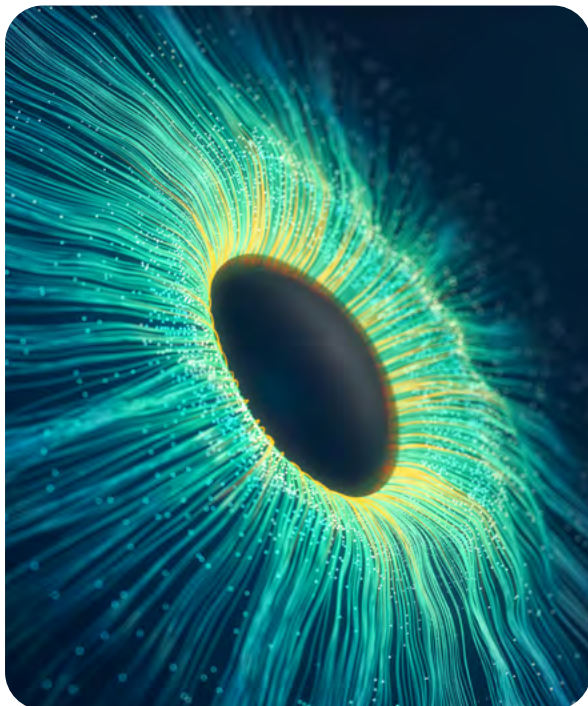
חברות ישראליות נוספות, ובהן Qedma ו-Classiq, מפתחות יכולות תוכנה בתחומי תכנון אלגוריתמים קוונטיים והפחתת שגיאות, הניתנות ליישום בפלטפורמות מחשוב קוונטי שונות. יכולות אלה מאפשרות לחברות ישראליות להשתלב בפיתוח טכנולוגיות קוונטיות בזירה הבינלאומית, ללא תלות בלעדית בחומרה קוונטית מקומית.²⁵

קריפטוגרפיה פוסט-קוונטית ותקינה בינלאומית

קריפטוגרפיה פוסט-קוונטית היא תחום נוסף בעל חשיבות לחברות טכנולוגיה ישראליות הפועלות בשווקים בינלאומיים. באוגוסט 2024 פרסם המכון הלאומי לתקנים ולטכנולוגיה של ארצות הברית (NIST) את שלושת התקנים הסופיים הראשונים שלו לקריפטוגרפיה פוסט-קוונטית, העוסקים בכינון מפתחות ובחתימות דיגיטליות. תקנים אלה משמשים נקודת ייחוס טכנולוגית לארגונים ולספקי טכנולוגיה הנערכים למעבר למערכות הצפנה עמידות בפני איומים קוונטיים.²⁶

תעשיית הסייבר המבוססת של ישראל מספקת תשתית לפיתוח פתרונות אבטחה עמידים בפני איומים קוונטיים. חברות וקבוצות מחקר ישראליות פועלות בתחומי הקריפטוגרפיה, התקשורת המאובטחת וטכנולוגיות סייבר נלוות.²⁷ עבור חברות המפתחות מוצרים ללקוחות בינלאומיים, התאמה לתקנים טכנולוגיים מתפתחים היא שיקול חשוב בפיתוח מוצרים, בתאימות בין מערכות ובאימוץ בשוק.

דוגמאות אלה ממחישות כמה צורות קיימות של שיתוף פעולה בין ישראל לארצות הברית בתחומים הקשורים לטכנולוגיות קוונטיות: מחקר אקדמי משותף, מחקר ופיתוח תעשייתי בתמיכה ציבורית, ושיתופי פעולה מסחריים וטכנולוגיים ישירים. הן ממחישות גם כיצד חברות ומוסדות מחקר ישראליים משתלבים בפיתוח הקוונטום הבינלאומי באמצעות מנגנונים קיימים ויכולות טכנולוגיות ייעודיות.



שיתופי פעולה מחקריים ותעשייתיים בתחום הקוונטום בין ישראל לארצות הברית

חוקרים וחברות טכנולוגיה ישראליות בתחום הקוונטום מקיימים קשרי מחקר ומסחר עם אוניברסיטאות, חברות טכנולוגיה ושותפים תעשייתיים בארצות הברית. פעילות זו מתקיימת באמצעות תוכניות דו-לאומיות קיימות למחקר ופיתוח, שיתופי פעולה ישירים בין מוסדות מחקר ושותפויות טכנולוגיות בין חברות. קשרים אלה ממחישים כיצד יכולות קוונטיות ישראליות מפותחות ומיושמות במסגרת סביבות מחקר ופעילות מסחרית בינלאומיות.

מחקר משותף ומחקר ופיתוח תעשייתי

שיתופי פעולה מחקריים בין מוסדות בישראל ובארצות הברית נתמכים באמצעות מנגנוני מימון דו-לאומיים ותיקים. הקרן הדו-לאומית למדע של ישראל וארצות הברית (BSF), שהוקמה בשנת 1972, תומכת במחקר בסיסי ויישומי משותף של חוקרים משתי המדינות. נוסף על כך, תוכניות המחקר המשותפות של NSF-BSF מאפשרות לחוקרים ישראלים להשתתף בפרויקטים משותפים הממומנים על ידי הקרן הלאומית למדע של ארצות הברית (NSF).²³

שיתופי פעולה בתחום המחקר והפיתוח התעשייתי נתמכים באמצעות קרן BIRD, המספקת מימון לפרויקטי פיתוח משותפים של חברות ישראליות ואמריקאיות. מענקי הקרן יכולים להגיע לסכום של עד 1.5 מיליון דולר לפרויקט, והם מותנים בשיתוף פעולה בין חברות משתי המדינות, בעל יעד מסחרי מוגדר.

דוגמה לפעילות בתחום הקשור לטכנולוגיות קוונטיות היא שיתוף הפעולה בין חברת AccuBeat הישראלית לבין חברת FieldLine Industries מקולורדו, לפיתוח שעונים אטומיים ומגנטומטרים קומפקטיים ובעלי צריכת חשמל נמוכה. הפרויקט ממחיש כיצד מנגנוני מחקר ופיתוח דו-לאומיים קיימים יכולים לתמוך בפיתוח טכנולוגיות ייעודיות בעלות פוטנציאל ליישומים מסחריים.²⁴

שותפויות מסחריות וטכנולוגיות

לצד שיתופי הפעולה המחקריים, חברות קוונטום ישראליות פועלות עם חברות טכנולוגיה אמריקאיות לפיתוח ולשילוב טכנולוגיות מחשוב קוונטי.

דוגמה לכך היא שיתוף הפעולה בין חברת Quantum Machines הישראלית לבין NVIDIA. פעילותן המשותפת מתמקדת בשילוב מערכות בקרה של מעבדים קוונטיים עם יכולות מחשוב קלאסי מואץ, לצורך תמיכה ביישומים כגון כיוול בזמן אמת, בקרת מעבדים ומחשוב היברידי קוונטי-קלאסי.

שיתוף פעולה זה בא לידי ביטוי גם במרכז הישראלי למחשוב קוונטי (IQCC), שהוקם במסגרת התוכנית הלאומית לקוונטים ומופעל על ידי Quantum Machines. המרכז משלב גישה לארכיטקטורות שונות של מחשוב קוונטי ולמשאבי מחשוב קלאסי, ונבחר כאחד מאתרי ההטמעה הראשונים של NVIDIA DGX Quantum. דוגמה זו ממחישה כיצד ניתן לשלב טכנולוגיה שפותחה על ידי חברה ישראלית עם תשתית מחשוב שמספקת חברת טכנולוגיה גלובלית, במטרה לתמוך במחקר, בניסויים ובפיתוח יישומי מחשוב קוונטי.

אבטחת סייבר, פרטיות ומוכנות לאימוץ בישראל

התשתית הישראלית לאבטחת סייבר והמעבר למערכת מוגנת מפני התקפות קוונטיות

ישראל מתקדמת לקראת המעבר ל"אבטחה קוונטית" מתוך בסיס של אקוסיסטם מבוסס בתחום אבטחת הסייבר, הכולל מומחיות בקריפטוגרפיה, תקשורת מאובטחת, ניתוח איומים ומוצרי סייבר לארגונים.

דבר זה יוצר יתרון מבני: ניתן לפתח אבטחת סייבר פוסט-קוונטית כהרחבה של היכולות הקיימות ברמה הלאומית והמסחרית, ולא כמגזר חדש לחלוטין.²⁸

יש להבחין בין שני מסלולים. הראשון הוא המעבר לקריפטוגרפיה פוסט-קוונטית, לרבות מלאי אמצעי הצפנה, תכנון החלפה ושילוב אלגוריתמים עמידים בפני התקפות קוונטיות במערכות הקיימות. השני הוא פיתוח תקשורת קוונטית והפצת מפתחות קוונטיים ליישומים נבחרים בעלי רמת אבטחה גבוהה.²⁸ קבוצות אקדמיות וחברות ישראליות פועלות בתחומי PQC, QKD, רשתות קוונטיות ויישומים של אבטחה משופרת קוונטית. מסגרת לאומית לניהול הגירה עבור תשתיות קריטיות נמצאת כעת בתהליך פיתוח, וטרם פורסמה לציבור.

מקרה בוחן: עבודה עם מערכות קוונטיות רועשות²⁹

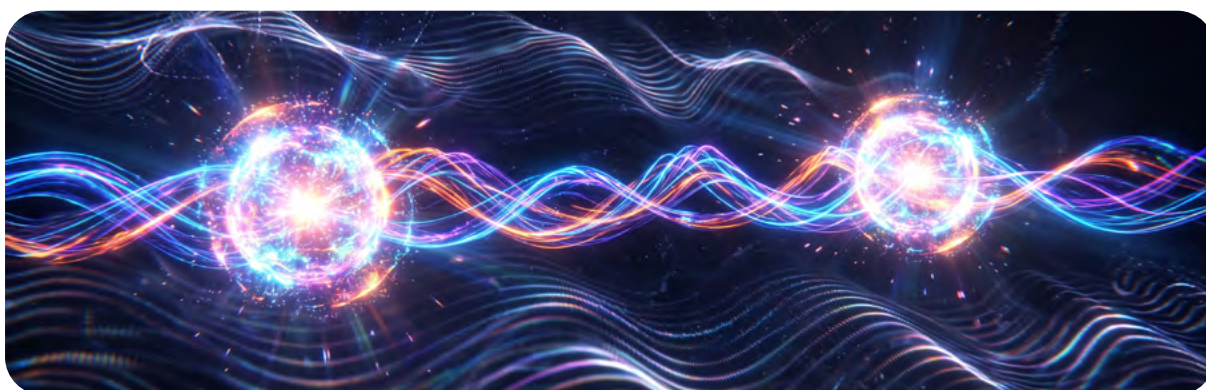
מחשבים קוונטיים בני זמננו עדיין רגישים מאוד לרעש ולשגיאות, ולכן אמינות תוצאות החישוב מוגבלת. חברות ישראליות מתמודדות עם אתגר זה בשכבת התוכנה. Classiq מפתחת כלים ברמה גבוהה המפשטים את מורכבות החומרה וממטבים

יישומים קוונטיים במגוון פלטפורמות, ואילו Qedma מתמקדת באפיון שגיאות ובצמצומן במערכות קוונטיות רועשות. יחד, גישות אלה ממחישות כיצד תוכנה יכולה לגשר בין חומרה קוונטית מתפתחת לבין יישומים מעשיים ואמינים.

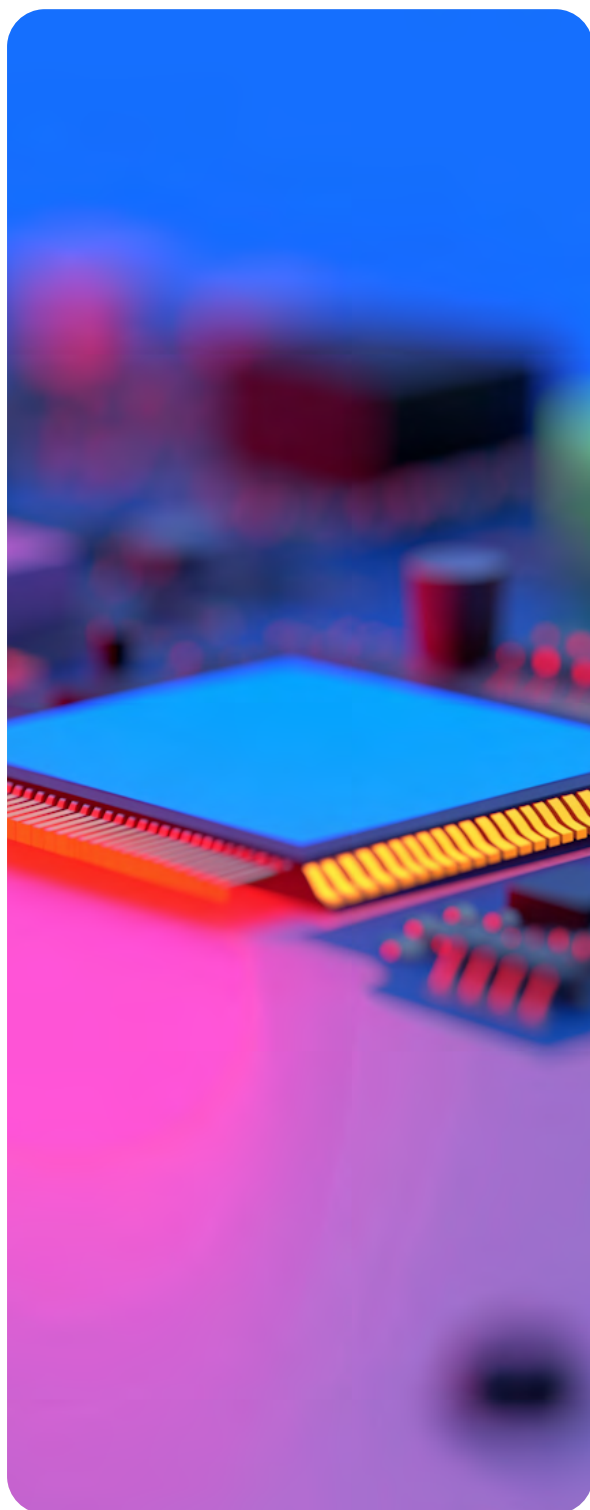
ישראל נמצאת בעמדה טובה יחסית לאימוץ מוקדם של טכנולוגיות קוונטיות, בזכות הבסיס שנבנה בתוכנית הקוונטום הלאומית הראשונה (2019-2025). במהלך תקופה זו התפתח אקוסיסטם מחקרי מגוון, הוקמו תשתיות וסביבות ניסוי לאומיות, וצמחה תעשיית קוונטום בעלת נראות בינלאומית. יותר מעשרים חברות פעילות, מצוינות אקדמית ושיתופי פעולה בינלאומיים, לצד הקמת המרכז הישראלי למחשוב קוונטי (IQCC) והתרחבות שיתוף הפעולה בין האקדמיה לתעשייה, מעניקים לישראל בסיס משמעותי להמשך אימוץ ופיתוח של יכולות קוונטיות. עם זאת, האימוץ בתעשיות שאינן עוסקות בקוונטום עדיין נמצא בשלב מוקדם. יישומים רבים טרם הגיעו לבשלות מסחרית, ובתחומים כמו תקשורת קוונטית מאובטחת, קריפטוגרפיה עמידה בפני קוונטום וחישה מדויקת, קיימות יכולות מחקר ופיתוח משמעותיות אך הפריסה עדיין מוגבלת. בסך הכול, ישראל מוכנה היטב מבחינת המחקר, הפיתוח והאקוסיסטם, אך עדיין מפתחת את יכולתה לאימוץ רחב בממשלה, בתעשייה ובתשתיות חיוניות.²³

היקף אימוץ טכנולוגיות קוונטיות משתנה באופן משמעותי בין המגזרים השונים. ארגוני ביטחון וחברות תקשורת מתקדמות נמנות עם המשתמשים הראשונים בטכנולוגיה זו, בעוד שתחומי הבריאות, הפיננסים, האנרגיה, הלוגיסטיקה והשירותים הממשלתיים יזדקקו לתוכניות פיילוט ממוקדות ולמנגנוני שילוב חזקים יותר. אימוץ טכנולוגיות קוונטום משתנה במידה ניכרת בין מגזרים. ארגוני ביטחון וחברות תקשורת מתקדמת נמנים עם המאמצים הראשונים, ואילו תחומי הבריאות, הפיננסים, האנרגיה, הלוגיסטיקה והשירותים הממשלתיים יזדקקו לתוכניות פיילוט ממוקדות ולמנגנוני אינטגרציה חזקים יותר.

אימוץ טכנולוגיות קוונטום משתנה במידה ניכרת בין מגזרים. ארגוני ביטחון וחברות תקשורת מתקדמת נמנים עם המאמצים הראשונים, ואילו תחומי הבריאות, הפיננסים, האנרגיה, הלוגיסטיקה והשירותים הממשלתיים יזדקקו לתוכניות פיילוט ממוקדות ולמנגנוני אינטגרציה חזקים יותר.



ישראל נכנסת לשלב הבא של המוכנות הלאומית בתחום הקוונטום מעמדת חוזק: היא מהווה מרכז חדשנות קוונטית בעל הכרה עולמית, נהנית מתשתית אקדמית איתנה ומאחד מאקוסיסטמי הסטארט-אפים הקוונטיים הצומחים במהירות בעולם. עם זאת, אימוץ נרחב במגזרים שונים, בגופים ממשלתיים ובתשתיות לאומיות ידרוש השקעה מתמשכת, שילוב טוב יותר של המשתמשים הסופיים, אבטחת שרשרת אספקה חזקה יותר ופיתוח מואץ של מקרי שימוש מעשיים.



עם זאת, רמת המוכנות נותרה לא אחידה בין המגזרים השונים. הטמעת הטכנולוגיה בתחומי תעשייה שאינם קשורים לקוונטים (פיננסים, אנרגיה, לוגיסטיקה, בריאות, ייצור) נמצאת עדיין בשלב מוקדם, כאשר המודעות ליתרונות הקוונטיים מוגבלת ומספר מקרי השימוש המוגדרים היטב מועט.³⁰ בעוד שחברות הסטארט-אפ הקוונטיות בישראל מבשילות במהירות, יישומים רבים עדיין נמצאים בשלב טרום-מסחרי, ולכן אימוץ בקנה מידה נרחב תלוי בהתקדמות הטכנולוגית העולמית ובזמינות האספקה. בתחומים קריטיים כגון תקשורת מאובטחת קוונטית, קריפטוגרפיה עמידה בפני תקיפות קוונטיות וחישה ברמת דיוק גבוהה, ישראל מפגינה יכולות מחקר ופיתוח חזקות, אך פריסה ארצית מוגבלת. בסך הכל, ישראל מוכנה היטב מבחינה של מחקר ופיתוח (מו"פ) ומבחינת האקוסיסטם, מוכנה במידה בינונית מבחינת מוכנות התעשייה, ועדיין מפתחת את יכולתה לאימוץ לאומי נרחב במגזר הממשלתי, בתעשייה ובתשתיות קריטיות.

אתגרים מרכזיים בדרך לאימוץ

- 1. זמינות מוגבלת ובשלות של חומרה קוונטית**
אף על פי שיש לה מתקני ניסוי מקומיים, ישראל, בדומה למדינות אחרות, נאלצת להסתמך על שרשראות אספקה זרות של חומרה קוונטית. הגישה הגלובלית נותרת מוגבלת בשל בקורות ייצוא, ארכיטקטורות קנייניות ומערכות אקולוגיות הנשלטות על ידי ספקים.
- 2. הצורך במקרי שימוש נוספים מהעולם האמיתי**
רוב הענפים עדיין לא זיהו או אימתו יישומים מבוססי קוונטים בעלי החזר השקעה ברוח. היעדר אלגוריתמים ייעודיים לתחום, מאגרי נתונים להשוואת ביצועים וסביבות פיילוט מעכב את תהליך האימוץ.
- 3. מחסור בכוח אדם מיומן והרחבת כוח העבודה**
למרות תוכניות ההכשרה האקדמית המקיפות, הביקוש למהנדסי קוונטים, מפתחי אלגוריתמים ומומחים היברידיים בתחום המחשוב העוצמתי (HPC) והקוונטים עולה על ההיצע. שימור הכישרונות המובילים מהווה אתגר בשל התחרות העולמית.
- 4. שילוב עם תשתיות IT ותשתיות סייבר קיימות**
הטמעת טכנולוגיה קוונטית מחייבת ארכיטקטורת ענן מעודכנת, פרוטוקולי גישה מאובטחים ומעבר לקריפטוגרפיה עמידה בפני התקפות קוונטיות. שינויים אלה כרוכים בהשקעה רבה ובמחזורי תכנון ארוכים.
- 5. אימוץ תעשייתי בתחילת דרכו**
מחוץ לתחום הקוונטי, חברות רבות אינן מכירות את לוחות הזמנים, היכולות ורמות המוכנות בתחום המחשוב הקוונטי. דבר זה גורם להססנות בכל הנוגע ליזום תוכניות פיילוט או להקצאת תקציבים אסטרטגיים.
- 6. הבטחת הביטחון הלאומי והאוטונומיה האסטרטגית**
הטמעת טכנולוגיות קוונטיות בתחומי הביטחון והמודיעין מחייבת יכולות ריבוניות, שרשראות אספקה מאובטחות ופרוטוקולי סיווג מחמירים. תחומים אלה דורשים השקעה מתמשכת.

נושא 8: ממשל, חדשנות אחראית ותקינה

בהקשר הישראלי, ממשל וחדשנות אחראית באים לידי ביטוי פחות באמצעות עקרונות מופשטים בלבד ויותר באמצעות תכנון מנגנוני שיתוף פעולה המפזרים את הסיכון, מגדירים יעדים משותפים ומקשרים בין מחקר חלוצי לצורכי הציבור. מאגדים מכווני-משימה מהווים דוגמה מעשית לאופן שבו תיאום ציבורי יכול לעצב תקנים, להאיץ תהליכי למידה ולכוון חדשנות ליצירת ערך אסטרטגי וחברתי.

ניהול ופיקוח על התוכנית

התוכנית הראשונה הוכיחה כי תיאום בין גופי המימון יכול לתמוך בהקצאת תקציבים ובהתאמה אסטרטגית רחבה. עם זאת, הבדיקה שערכה הוועדה הלאומית זיהתה את היעדרותו של גוף ייעודי לניהול התוכנית ברמה הלאומית כפער מבני משמעותי. לא היה גוף אחד שנשא באחריות התפעולית על כל תחומי יישום התוכנית, שיתוף הפעולה הבינלאומי, ניטור האקוסיסטם ופיתוח עסקי ברמה המדינתית.³¹

לפיכך המליצה הוועדה להקים גוף ניהולי ייעודי לתוכנית השנייה, שיהיה נפרד מבחינה ארגונית מכל גוף מימון בודד. התפקיד המוצע לו יכלול תיאום תוכניות, הערכה תקופתית של האקוסיסטם, שיתופי פעולה בינלאומיים, מעורבות בקביעת תקנים ופיתוח פעילויות מצד הביקוש.³² לצד הגוף הייעודי לניהול התוכנית הלאומית, ארגוני אקוסיסטם יכולים לתמוך ביישום באמצעות כינוס נציגים מהתעשייה, מהאקדמיה, מקרב המשקיעים ומהממשלה סביב סדרי עדיפויות משותפים. Qubit IL, איגוד תעשיית הקוונטום בישראל, כבר תורם לתפקיד רחב זה באקוסיסטם באמצעות בניית קהילה, פעילויות להעלאת המודעות, תוכניות לפיתוח הון אנושי ומעורבות עם בעלי עניין במגזר הציבורי. פעילויות אלה משלימות את פונקציות הממשל הלאומי וניהול התוכנית הייעודיות שעליהן המליצה הוועדה הלאומית, ואינן מחליפות אותן. מטרת תוכנית המאגדים של רשות החדשנות היא לפתח טכנולוגיות גנריות פורצות דרך ולחזק את היתרון התחרותי של ישראל בטכנולוגיות מתפתחות. התוכנית מממנת טכנולוגיות תשתית ומאפשרת שיתוף ידע ושיתוף פעולה בין חברות הפועלות באותו תחום.

מאגד החישה הקוונטית מהווה מודל יעיל למחקר ופיתוח מכוון-משימה. הוא איגד את AccuBeat, רפאל, התעשייה האווירית/אלתא (IAI/ELTA), OPSYS Technologies, וקבוצות מחקר מובילות באוניברסיטאות, במטרה לפתח מערכות חישה מהדור הבא.³³

המאגד הוכיח את היתכנות השגת ביצועי חישה מהמובילים בעולם באמצעות שיתוף פעולה מתואם בין האקדמיה לתעשייה, והוביל לפיתוח אבות-טיפוס של התקני חישה בעלי יישומים בתחומי הניווט, הבדיקה והניתוח הגיאופיזי.

המאגד הוקם במטרה לגשר על פער מתמשך בין מחקר אקדמי ברמה עולמית בפיזיקה קוונטית לבין הצרכים התפעוליים של תעשיות הביטחון, התעופה והחלל והיית טק בישראל, הזקוקות לטכנולוגיות חישה ברמת דיוק גבוהה במיוחד. באמצעות איגוד אוניברסיטאות מובילות, מעבדות ממשלתיות וחברות תעשייתיות, יצר המאגד לראשונה בישראל מערך חדשנות שלם, המשתרע מפיזיקה בסיסית, דרך הנדסת התקנים ועד ליישום בתנאי אמת.

לאורך שנות פעילותו, הגיע המאגד לפריצות דרך משמעותיות במספר תחומי חישה, ובהם מגנטומטריה קוונטית, גרבימטריה ומדידת זמן מדויקת. צוותים אקדמיים תרמו להתקדמות בפיתוח חיישנים מבוססי אטומים, מערכות ספין במצב מוצק, ייצוב לייזר וטכניקות לקריאה קוונטית ברעש נמוך, בעוד שהשותפים מהתעשייה התמקדו במזעור, זיווד, התאמה לתנאי סביבה קשים ואינטגרציה המוכנה לשימוש בשטח. בעלי עניין ממערכת הביטחון סיפקו דרישות מבצעיות ממשיות, שאפשרו להעריך את ביצועי המערכות שפותחו במסגרת המאגד לא רק ביחס לאמות מידה מעבדתיות, אלא גם ביחס ליעדי ביצוע ברמת המשימה. מאמצים מתואמים אלה הובילו לפיתוח אבות-טיפוס של התקנים שביצועיהם עלו במידה ניכרת על אלה של טכנולוגיות חישה קלאסיות, ופתחו אפשרויות חדשות לניווט ללא GPS, למיפוי תת-קרקעי, לכלי בדיקה וליישומים בתחום הביטחון הלאומי. תוצאה חשובה במיוחד של פעילות המאגד הייתה פיתוח הון אנושי באחד התחומים עתירי המומחיות ביותר בטכנולוגיה הקוונטית. עשרות פיזיקאים, מהנדסים, מפתחי אלגוריתמים ומעצבי מערכות עברו הכשרה על חומרה קוונטית אמיתית ומערכות חישה משולבות. רבים מהמומחים הללו מכהנים כיום בתפקידים מרכזיים באקוסיסטם הצומח של חברות הסטארט-אפ הקוונטיות בישראל, ביחידות מחקר ופיתוח בתחום הביטחון ובמעבדות תעשייתיות מתקדמות. השפעה זו על כוח האדם, שלעיתים קרובות אינה זוכה לתשומת לב מספקת בהערכות מסורתיות, הפכה לאחת התרומות המתמשכות ביותר של המאגד לחוסנה הטכנולוגי ארוך הטווח של ישראל. מעבר לפיתוח הטכנולוגיה ולבניית כוח האדם, המאגד הקים גם תשתיות משותפות, מתודולוגיות בדיקה ותקנים ראשוניים למערכות חישה קוונטית בישראל. נכסים אלה תומכים כיום במאגדים נוספים למחקר יישומי, בתוכניות פיילוט לאומיות ובשיתופי פעולה בין האקדמיה לתעשייה. הצלחת המאגד הפכה אותו למודל ייחוס ברשות החדשנות הישראלית, המדגים כי מחקר ופיתוח קוונטי רב-שותפים, עתיר סיכון ובעל השפעה רבה יכול לצמצם חסמים, להאיץ את המעבר ממחקר למוצרים ולייצר תועלות אסטרטגיות מדידות למדינה.



נושא 9: קיימות ועמידות ארוכת טווח של האקוסיסטם

יש להבין את המושג "קיימות" בכלכלה הקוונטית לא רק במונחים סביבתיים, אלא גם ככושר העמידות לטווח הארוך של מאגרי הכשרונות, תחזוקת התשתית, המשכיות המימון, שותפויות בינלאומיות מבוססות אמון וגישה מאוזנת למשאבים המאפשרים את הפעילות. עבור ישראל, חוסנו של האקוסיסטם בטווח הארוך יהיה תלוי בשמירה על רציפות בין התוכניות הלאומיות, בשימור המצינונות האקדמית, בצמצום צווארי בקבוק בשרשראות אספקה קריטיות ובהבטחת המשך תרגומן של השקעות ציבוריות ליכולות מדעיות ותעשייתיות בנות-קיימא.

ישראל נותרת תלויה בשרשראות אספקה בינלאומיות בכל הנוגע למספר תשומות קריטיות בתחום הקוונטי, לרבות חומרים מיוחדים, מצעים, מערכות קריוגניות, כלי ייצור ורכיבי חומרה מתקדמים. עצמאות פנימית מלאה אינה ריאלית ואינה בהכרח רצויה. המטרה המדינית הרלוונטית היא ריבונות טכנולוגית סלקטיבית: זיהוי הרכיבים והיכולות בעלי החשיבות האסטרטגית, תמיכה ביכולות המקומיות בתחומים שבהם לישראל יש יתרון משמעותי, והבטחת גישה בינלאומית אמינה בתחומים האחרים.³⁴

קיימות סביבתית

הקיימות הסביבתית טרם שולבה כמרכיב מובנה בתוכנית הלאומית לקוונטים של ישראל. עבודות עתידיות עשויות לכלול ביצוע השוואות ביצועים אנרגטיים של מערכות קוונטיות, קביעת קריטריונים לקיימות בתשתיות לאומיות, ותמיכה ביישומים מבוססי קוונטים העוסקים באתגרים בתחום האנרגיה, האקלים והיעילות במשאבים.³⁵





2 | תוכנית פעולה בפועל

תשתית, יכולות מדעיות, צמיחה תעשייתית ותיאום אסטרטגי פועלים יחד בפועל במסגרת מערכת חדשנות קטנה אך בעלת ריכוזיות גבוהה.

הנושאים שהוזכרו לעיל מתארים את אבני היסוד של הכלכלה הקוונטית של ישראל. פרק זה מיישם את אבני הבניין הללו על מקרה לאומי קונקרטי, ומדגים כיצד ממשל,

טבלה 1: סיכום ההתאמה לתשעת הנושאים של תוכנית האב (Blueprint)

נושא בתוכנית האב (Blueprint)	סיכום הפעילות הישראלית (הנוכחית והמתוכננת)	התכנסות
1. יכולות פורצות דרך	הערכה לאומית מובנית שביצעה הוועדה הלאומית בסוף שנת 2025. היגיון מובנה של שרשרת הערך במבנה המאגדים.	חזק
2. תשתית חומרה ושרשרת אספקה	חברות פעילות בכל תחומי הפעילות העיקריים. IQCC לגישה רב-מודאלית. הפער בחומרים הוכר.	חלקי
3. חדשנות פתוחה ומסחור	שלוש חברות גייסו כל אחת יותר מ-100 מיליון דולר. סך ההון הפרטי שגויס עולה על מיליארד דולר.	חזק
4. העלאת המודעות	פעילות ארצית מצומצמת בתוכנית הראשונה. הוועדה הלאומית מזדהה את הפער כעדיפות עבור התוכנית השנייה.	מתכנס
5. פיתוח כוח העבודה	יעדים של כ-225 קבוצות סגל אקדמי וכ-600 דוקטורנטים עד שנת 2031.	חזק
6. ביטחון לאומי וכלכלי	הביקוש המונע על ידי צרכנים מתוחכמים. מעגלי משוב קצרים. דוגמאות לשימוש מעשי בתחומי PNT, חישה ותקשורת.	חזק
7. אבטחת סייבר ופרטיות	בסיס מסחרי איתן באמצעות ענף אבטחת הסייבר. QKD ו-PQC פעילים. תוכנית ההגירה הלאומית עדיין לא אושרה.	חזק / חלקי
8. ממשל, חדשנות אחראית, תקינה	בתוכנית הראשונה לא היה גוף ניהול ייעודי. ההמלצה המרכזית של הוועדה הלאומית לתוכנית השנייה.	חזק
9. קיימות	עדיין אינו מהווה מרכיב מובנה בתוכנית הקוונטית הלאומית.	מוגבל

מקור: ניתוח של המחברים. השוואה מפורטת מופיעה בנספח ב'.

2.2

מבוסס היקף גיאוגרפי: מודל יישום לאומי

בניגוד למדינות גדולות שעשויות לבנות יכולות קוונטיות באמצעות מספר מרכזים אזוריים, ישראל פועלת על פי מודל לאומי קומפקטי שבו הריכוז הגיאוגרפי מהווה יתרון אסטרטגי. אוניברסיטאות מחקר, חברות סטארט-אפ, מעבדות ביטחוניות, משקיעים ותשתיות לאומיות ממוקמות בתוך אקוסיסטם צפוף יחסית, מה שמאפשר תיאום מהיר, מעגלי משוב קצרים, נייודות מהירה של כוח אדם מוכשר ושימוש משותף במתקנים יקרים. בפועל, משמעות הדבר היא שאסטרטגיית הקוונטים בישראל מיושמת ברמה הלאומית, אך תוך גמישות וקישוריות האופייניות לרוב לאשכול חדשנות יחיד.

2.3

לקחים מעשיים מפיתוח אקוסיסטם הקוונטום בישראל

על ישראל להרחיב את מסלול פיתוח הכישרונות בתחום הקוונטי באמצעות הכשרה מחודשת של מהנדסים, תוכניות לימודים לתארים מתקדמים והכשרה מעבדתית ייעודית המותאמת לתשתית הלאומית. כמו כן, יש לתת עדיפות לחיזוק היכולות המקומיות בתחומי הפוטוניקה, הקריוניקה וכלי הייצור, במטרה לשפר את החוסן לטווח הארוך ולהפחית את התלות האסטרטגית. האסטרטגיה הממשלתית העתידית של ישראל בתחום הטכנולוגיות הקוונטיות צריכה להתבסס על הלקחים שנלמדו מהתוכנית הלאומית הראשונה, וכן על ההכרה הגוברת במדע הקוונטי כגורם המניע הן את התחרויות הכלכליות והן את הביטחון הלאומי. המטרה העיקרית של תוכנית לאומית שנייה צריכה להיות הכוונת פיתוח היכולות המדעיות והטכנולוגיות באופן שיבטיח תועלת כלכלית ארוכת טווח לישראל ולאזרחיה, תוך שמירה על היתרון הטכנולוגי המהווה את הבסיס להגנה הלאומית והרחבתו. כדי לתרגם חזון זה למדיניות מעשית, בולטים מספר כיוונים אסטרטגיים: העמקת שיתוף הפעולה הבינלאומי כל עוד חלון ההזדמנויות הנוכחי נותר פתוח; הבטחת שרשראות אספקה איתנות ועמידות עבור מחשוב קוונטי ורכיבים תומכים; חיזוק המצוינות האקדמית וחיזוק תפקידה של האקדמיה בתמיכה בתעשייה ובמשימות ביטחוניות; מתן עדיפות לתוכנה ואלגוריתמים קוונטיים כיכולת לאומית מרכזית; עידוד תעשיות שאינן קוונטיות וארגוני ביטחון לפתח מקרי שימוש ולבצע ניסויים מוקדמים; הרחבת ההכשרה ושימור כוח עבודה מיומן ביותר; וביצוע הערכות תקופתיות של איכות ובשלות האקוסיסטם הקוונטי האקדמי והתעשייתי בישראל.

ממיפוי פעילותה של ישראל על פי תשעת הנושאים של תוכנית הפעולה עולות שתי תובנות. ראשית, ישראל מפגינה התנסויות חזקה או חלקית בשבעה תחומים, ובפרט בתחומי המסחר, התשתית, כוח העבודה, אבטחת הסייבר והביקוש בתחום הביטחון הלאומי. דבר זה מצביע על כך שמדינות המתייחסות ברצינות לאתגר הקוונטי נוטות לרוב להתכנס סביב תנאים מאפשרים דומים, גם כאשר האסטרטגיות שלהן מפותחות באופן עצמאי. שנית, הפערים העיקריים ביישום נמצאים בתחומי הממשל והקיימות. בשני התחומים הללו, התוכנית מספקת מסגרת אבחון מועילה עבור סדרי העדיפויות שזוהו אך טרם שולבו באופן מלא בתוכנית הלאומית לקוונטים של ישראל.³⁵

2.1

על בסיס אחריות, מי יזם את האסטרטגיה?

האסטרטגיה הקוונטית של ישראל לא נולדה במוסד בודד בלבד, אלא מתוך פעולה מתואמת בין מספר גורמים ציבוריים בעלי תחומי אחריות שונים. המאמץ הלאומי הראשוני עוצב על ידי שילוב תפקידיהם של ועדת התכנון והתקצוב (ות"ת), רשות החדשנות, מפא"ת, משרד המדע ומשרד האוצר, יחד עם אוניברסיטאות מובילות וקהילות מחקר בתחום הביטחון. מודל האחריות המבוצרת הזה משקף את המבנה של מערכת החדשנות בישראל: האקדמיה בונה את העומק המדעי, הממשלה מפחיתה את הסיכונים בהשקעות בחזית החדשנות, גופי הביטחון מגדירים את הצרכים האסטרטגיים, והתעשייה ממירה את היכולות המתהוות למומנטום מסחרי.



סיכום והצעדים הבאים

3

אבטחת התשתית הקריטית ושרשראות האספקה, חיזוק מאגרי הכישרונות, והמרת היתרון המוקדם שהושג ליתרון כלכלי ואסטרטגי בר-קיימא. במובן זה, ישראל מציגה לא רק סיפור הצלחה לאומי, אלא גם מודל מעשי לאופן שבו מערכות חדשנות מרוכזות יכולות להשתתף באופן משמעותי בכלכלה הקוונטית המתהווה.

מסע הקוונטים של ישראל מדגים כיצד מדינה קטנה יחסית יכולה לבנות יכולות יוצאות דופן באמצעות השקעה ציבורית ממוקדת, מצוינות מדעית, תיאום מונחה-משימה וקשרים הדוקים בין האקדמיה, התעשייה והצרכים הלאומיים. השלב הבא יחייב מעבר מהקמת האקוסיסטם ליישום בקנה מידה נרחב: העמקת האימוץ התעשייתי,



נספחים

נספח א': מדריך החברות

– QuamCore מעבדים קוונטיים מוליכים-על. – Quantum Art טכנולוגיות מחשוב קוונטי באמצעות יונים כלואים. – Quantum Machines מערכות בקרה ואורקסטרציה קוונטיות. – Quantum Pulse רכיבים קוונטיים פוטוניים. – Quantum Source טכנולוגיות מחשוב קוונטי פוטוני המבוססות על ייצור דטרמיניסטי של פוטון בודד. – Quantum Transistors מחשוב קוונטי מבוסס יהלום ופוטוניקה של סיליקון. – Quantimize למידת מכונה ואופטימיזציה קוונטית. – Raicol גבישים אלקטרו-אופטיים ורכיבים למקורות פוטונים. – Rafael חישה קוונטית וגרבימטריה. – Tabor מערכות אלקטרוניקה לבקרה בתחום המחשוב הקוונטי.	– AccuBeat שעונים אטומיים ותזמון מדויק. – Classiq תוכנה קוונטית מתקדמת לעיצוב וסינתזה של אלגוריתמים. – (Heqa Security) QuantLR חלוקת מפתחות קוונטיים. – IAI/ELTA מגנטומטריה קוונטית וחישה מתקדמת. – LightSolver מחשוב אופטי בהשראת תורת הקוונטים. – OPSYS Technologies חישה פוטונית. – Q-Factor מחשוב קוונטי באמצעות אטומים ניטרליים. – Qarakal מכשירים קוונטיים מוליכים-על ומערכות קריוגניות. – Qedma הפחתת שגיאות קוונטיות ואפיון רעש. – Qiz Security קריפטוגרפיה פוסט-קוונטית.
---	---

טבלת התאמה מפורטת בין תשעת הנושאים של תוכנית הפעולה

הטבלה המפורטת מרחיבה כל שורה בטבלה 1 וכוללת את המצב הנוכחי, הכיוון המתוכנן, הערכת הפער והנימוקים להתכנסות. התיאורים ברמת הנושאים מבוססים על ההגדרות של תוכנית האב (Blueprint) עצמה.

נושא 1: יכולות טרנספורמטיביות

המצב הנוכחי. הערכה לאומית מובנית שנערכה על ידי הוועדה הלאומית הישראלית לתוכנית הקוונטית השנייה בשנת 2025, בהתבסס על שאלונים שנשלחו לנשיאי אוניברסיטאות ולמנכ"לים של חברות, פגישות עם צרכני טכנולוגיה קוונטית, ודיונים דו-צדדיים עם עמיתים בינלאומיים. היגיון מובנה של שרשרת הערך במבנה המאגד.

הכיוון המתוכנן. ניתוח פורמלי של שרשרת הערך הוגדר במפורש כעדיפות. הערכות איכות תקופתיות של האקוסיסטם האקדמי והתעשייתי נכללו בתכנון התוכנית השנייה.

הערכת פערים. בתוכנית הראשונה, ניתוח שרשרת הערך היה מרומז ולא שיטתי. לא פורסמה מפת שרשרת הערך הלאומית.

התכנסות עם ה-Blueprint. חזק. הסקירה של הוועדה הלאומית לשנת 2025 מקבילה ללוגיקה של ההערכה העצמית של "תוכנית הפעולה", שנערכה באופן עצמאי.

נושא 2: גישה לתשתית החומרה ולשרשרת האספקה

מצב נוכחי. חברות מקומיות הפועלות בתחומי המוליכות-על, יונים כלואים, פוטוניקה, אטומים ניטרליים ומרכזי NV. מרכז ה-IQCC מספק גישה רב-מודאלית למטרות מחקר והכשרה. כיסוי ברוב השכבות של הערימה.

כיוון מתוכנן. מתן עדיפות מפורשת לחוסן שרשרת האספקה בתחומי הפוטוניקה, הקריוגניקה וכלי הייצוא מתוכננת הקמת תשתית לבדיקה ולאפיון ליבות קוונטיות מקומיות.

הערכת פערים. חומרים קוונטיים נותרים תחום שבו קיים פער של ממש. התלות בשרשרת האספקה של חומרה נמשכת, כפי שקורה כמעט בכל המדינות, למעט קבוצה קטנה.

התכנסות עם ה-Blueprint. חלקי. הכיסוי של שכבות הטכנולוגיה הקוונטית רחב במיוחד ביחס לגודלה של הכלכלה הישראלית. פער החומרים ומיפוי שרשרת האספקה הם תחומים שבהם המסגרת של "התוכנית" מועילה באופן ישי.

נושא 3: חדשנות פתוחה ומסחר

מצב נוכחי. מודל המאגדים של רשות החדשנות הישראלית בתחומי המחשוב הקוונטי, הטכנולוגיות הפוטוניות והתקשורת. ישראל פיתחה אקוסיסטם תעשייתי המשתרע על תחומים כגון חומרה קוונטית, תוכנה, בקרה ואורקסטריציה, חישה, וכן תקשורת ואבטחה קוונטיות. יתרונות בולטים ניכרים בתחומי התוכנה והבקרה, ובכלל זה חברות כגון Quantum Machines, Classiq ו-Qedma, לצד פעילות במגוון תחומי חומרה ויישומים מתפתחים המשלבים בינה מלאכותית וקוונטיקה.

כיוון מתוכנן. המשך מימון המאגדים על ידי רשות החדשנות הישראלית. תוכניות חדשות לתמיכה במרכזי מחקר ופיתוח של תאגידים רב-לאומיים בישראל. תמיכה מפורשת בענפים שאינם קשורים לתחום הקוונטי, המפתחים מקרי שימוש, וכן במסלולי מסחר חזקים יותר המקשרים בין מחקר אקדמי, תשתית לאומית ותעשייה.

הערכת פערים. המודעות לתעשייה זו מחוץ לתחום הקוונטי נותרת מוגבלת. רק מקרים ספורים של שימוש מסחרי שאומתו הגיעו לשלב של פריסה נרחבת, והאופי הטרם-מסחרי של יישומים רבים ממשיך להגביל את הביקוש מצד הצרכנים.

התכנסות עם ה-Blueprint. חזקה. צבר הפעילות בתחום המסחר, המאגדים הבין-מגזריים והקשרים בין האקדמיה לתעשייה עולים בקנה אחד באופן טבעי עם הדגש של תוכנית האב (Blueprint) על העברת טכנולוגיה, מסחר ופיתוח האקוסיסטם.

נושא 4: יצירת מודעות

מצב נוכחי. פעילות העלאת המודעות התרחבה מעבר לכנסים אקדמיים ותעשייתיים. Qubit IL תומכת כיום בהרחבת הידע וההבנה בתחום הקוונטום ובמעורבות באקוסיסטם, באמצעות תוכניות ובהן Quantum Fellows, דאנאות, האקתון הלאומי לקוונטום, תוכנית האצה וחשיפת חברות קוונטום ישראליות בזירה הבין-לאומית. תשתיות לאומיות כגון המרכז הישראלי למחשוב קוונטי (IQCC) תורמות אף הן להעלאת המודעות באמצעות מתן גישה מעשית למערכות קוונטיות.

כיוון מתוכנן. העלאת המודעות ומעורבות מצד הביקוש מוגדרת במפורש כעדיפות לשלב הבא. הכיוון כולל שיתוף פעולה מובנה עם מקבלי החלטות, משתמשים בתעשייה ושותפים בינלאומיים, לצד תקשורת יעילה יותר בנוגע ליכולות הקוונטיות הלאומיות.

הערכת פערים. העלאת המודעות לא הייתה בעדיפות גבוהה במימון במסגרת התוכנית הראשונה, והמעורבות המובנית בין תעשיות מחוץ למגזר הקוונטי נותרה בשלביה הראשוניים.

התכנסות עם ה-Blueprint. מתכנס. הדגש של תוכנית האב (Blueprint) על שיח ציבורי רב-רמתי, הקניית ידע למקבלי החלטות והגברת המודעות לאקוסיסטם תואם במידה רבה את הכיוון המתגבש כיום בישראל.

נושא 5: פיתוח כוח אדם

מצב נוכחי. במהלך התוכנית הראשונה בוצע גיוס נרחב של סגל אקדמי וצמיחה משמעותית במספר אנשי הסגל בתחום הקוונטי, בתמיכת השקעות של ועדת התכנון והתקצוב ובתשתית לאומית מורחבת. הכשרה משותפת של האקדמיה והתעשייה, וכן מעבר ישיר של חוקרים ובוגרים לחברות בתחום הקוונטי, תורמים לקיום קשר הדוק בין המחקר לתעשייה.

כיוון מתוכנן. היעדים כוללים כ-225 קבוצות סגל ליבה ב-QST וכ-600 דוקטורנטים פעילים עד תום התוכנית השנייה, לצד קבוצות נוספות בתחומי האלגוריתמים והתוכנה, וכן תוכניות הכשרה מחודשת מתמשכות לקראת מעבר לתפקידים בתעשייה הקשורים לקוונטים.

הערכת פערים. הביקוש למהנדסי קוונטים, חוקרים, מפתחי אלגוריתמים ומומחים בתחום הקוונטי-קלאסי ההיברידי ממשיך לעלות על ההיצע. הלחץ לשמור על עובדים נותר משמעותי בשל התחרות העולמית על כישרונות בתחום הקוונטי.

התכנסות עם ה-Blueprint. חזקה. יעדים כמותיים בתחום כוח האדם, הרחבת המסגרות האקדמיות והכשרה מכוונת לתעשייה עולים בקנה אחד עם נושא פיתוח כוח האדם המובא בתוכנית האסטרטגית.

נושא 6: ביטחון לאומי וכלכלי

מצב נוכחי. משתמשים מתחום הביטחון הלאומי והטכנולוגיה המתקדמת משמשים כ"מאמצים מוקדמים" תובעניים בעלי דרישות תפעוליות קונקרטיות, מה שיוצר מעגלי משוב קצרים בין המשתמשים הסופיים למפתחים. בין מקרי השימוש הנמצאים בפיתוח נכללים מיקום, ניווט ותזמון בסביבות שבהן אין גישה לניווט לווייני, זיהוי רגיש, הדמיה ותקשורת מאובטחת. טכנולוגיות חישה קוונטית, כגון אלה שפותחו על ידי AccuBeat, ממחישות את המעבר מהמחקר ליישומים מבצעיים. ישראל משתתפת גם בתהליכי אימות בינלאומיים ובשיתופי פעולה מחקריים עם שותפים באירופה, בארצות הברית ובאסיה.

כיוון מתוכנן. המשך פיתוח תהליכי אימות המונחים על ידי תרחישי שימוש בתחומי החישה, התקשורת והמחשוב; חיזוק שיתוף הפעולה הבינלאומי; ושיפור החוסן בתשתיות קריטיות וברשתות האספקה.

הערכת פערים. טרם גובשה מסגרת עצמאית לאומית לביטחון כלכלי, המוקדשת באופן ספציפי לתחום הקוונטי, בנפרד ממדיניות רחבה יותר בתחומי החדשנות, הביטחון והתעשייה.

התכנסות עם ה-Blueprint. התאמה חזקה בממדי יצירת הביקוש והיזון חוזה, והתאמה חלקית בממד המסגרת. האופן שבו תוכנית האב (Blueprint) מתייחסת ליישומים דו-שימושיים ולרכש המעודד יצירת ביקוש תואם במידה רבה את אופן הפעולה הקיים של האקוסיסטם בישראל.

נושא 7: אבטחת סייבר ופרטיות

מצב נוכחי. תעשיית אבטחת הסייבר הרחבה בישראל מספקת בסיס מסחרי איתן למעבר לטכנולוגיה עמידה בפני איומים קוונטיים. מחקר ה-PQC מתנהל הן באקדמיה והן בתעשייה, בעוד שחברות עוסקות בתחומי ה-QKD, תקשורת קוונטית ויישומים של אבטחה משופרת קוונטית.

כיוון מתוכנן. המשך שילובן של גישות הצפנה עמידות בפני איומים קוונטיים במוצרי אבטחת סייבר, שיתוף פעולה בינלאומי בנושא תקנים, והכנה למעבר נרחב יותר לקריפטוגרפיה פוסט-קוונטית. כרגע נמצאת בפיתוח מסגרת לאומית לניהול הגירה בתחום התשתיות הקריטיות. **הערכת פערים.** מסגרת לאומית בנושא הגירה טרם פורסמה לציבור, ויהיה צורך בתיאום בין-מגזרי ככל שיתגבר המעבר העולמי לקריפטוגרפיה פוסט-קוונטית (PQC). **התכנסות עם ה-Blueprint.** חוזק בתחום המסחרי והמחקרי, חולשה בתחום המסגרת המדינית הלאומית. הגישה המובנית של תוכנית האב (Blueprint) למוכנות קריפטוגרפית ישימה באופן ישיר בשלב הבא של התוכנית הישראלית.

נושא 8: ממשל, חדשנות אחראית ותקינה

מצב נוכחי. תיאום בין-ארגוני סייע לתוכנית הראשונה באמצעות גופי המימון הציבוריים העיקריים, אך לא היה גוף ייעודי לניהול התוכנית שנשא באחריות התפעולית בכל הקשור ליישום, לניטור האקוסיסטם, למעורבות הבין-לאומית ולפיתוח מצד הביקוש.

כיוון מתוכנן. ההמלצה המרכזית של הוועדה הלאומית היא להקים גוף לאומי ייעודי לניהול תוכניות, הנפרד מבחינה ארגונית מכל גוף מימון בודד. הכיוון המוצע כולל גם שיתוף פעולה בינלאומי הדוק יותר, מעורבות בקביעת תקנים, הערכת האקוסיסטם ופעילות מצד הביקוש.

הערכת פערים. היעדר גוף ייעודי לניהול התוכנית זוהה כפער מבני משמעותי בתוכנית הראשונה. גם מסגרות של חדשנות אחראית המיועדות ספציפית לתחום הקוונטי עדיין אינן מפותחות דיין.

התכנסות עם ה-Blueprint. חזקה. נושא הממשל בתוכנית האב (Blueprint) עונה באופן ישיר על הצרכים שזוהו באופן עצמאי על ידי הוועדה הלאומית של ישראל, במיוחד בכל הנוגע לתיאום תוכניות, יישומן והתחייבות לסטנדרטים.

נושא 9: קיימות

מצב נוכחי. הקיימות עדיין אינה מהווה מרכיב מובנה בתוכנית הלאומית לקוונטים של ישראל. החוסן ארוך הטווח של האקוסיסטם מטופל באופן עקיף באמצעות פיתוח כישרונות, השקעה בתשתיות, חוסן שרשרת האספקה ושותפויות בינלאומיות.

כיוון מתוכנן. נכון לעכשיו, הקיימות אינה מופיעה כעדיפות מפורשת בתוכנית השנייה המוצעת, אם כי העבודה העתידית עשויה לכלול ביצוע השוואות ביצועים בתחום האנרגיה של מערכות קוונטיות, קריטריוני קיימות לתשתיות לאומיות ויישומים המבוססים על טכנולוגיה קוונטית העוסקים ביעילות אנרגטית ויעילות משאבים.

הערכת פערים. מדדי קיימות, השוואת ביצועי אנרגיה של מערכות קוונטיות ותמריצים לשימושים המכוונים לקיימות אינם נכללים עדיין במסגרת הישראלית. **התכנסות עם ה-Blueprint.** מוגבל. זהו אחד התחומים שבהם התוכנית מציעה לישראל את ההנחיות הברורות ביותר לעתיד.

מחברים

רונת אשל

ממלאת מקום סמנכ"ל וראש חטיבת תשתיות טכנולוגיות
רשות החדשנות

שני דיין

מנהלת המרכז הישראלי (C4IR Israel)
רשות החדשנות

ד"ר אביב זאבי בלסיאנו

לשעבר סמנכ"ל וראש חטיבת תשתיות טכנולוגיות
רשות החדשנות

מרים שטילמן-לבזובסקי

שותפה
TAL Ventures

תורמים

פרופ' ניר בר-גיל

פרופסור
האוניברסיטה העברית בירושלים

ד"ר האני ברהום

ראש המחלקה למדעי הטבע, מרכז המו"פ המשולש

פיליפה ביאטו

מנהל תחום טכנולוגיה וחדשנות במרכז לטכנולוגיות
פורצות דרך וחדשנות, הפורום הכלכלי העולמי

ד"ר רעות גיא-כהן

מנהלת מחקר טכנולוגי וביו-קונברג'נס בחטיבה הטכנולוגית
רשות החדשנות

ליאור יפה

מנהל בכיר, אגף ארגונים בינלאומיים
רשות החדשנות

ד"ר עופר כפיר

מרצה בכיר אוניברסיטת תל אביב

דס לורבר

מנהלת תחום ושותפויות ושותף הקשר הלאומית
למכון למחקרי ביטחון לאומי (INSS)

רחל לוטטי

מנהלת תחום ושותפויות ושותף הקשר הלאומית
לטכנולוגיות דיגיטליות ותעשייתיות
ISERD, רשות החדשנות

תמי מזאל-שחר

מנכ"לית Qubit IL

רמי צפון

מנהל תוכנית מו"פ תעשייתית חטיבת תשתיות טכנולוגיות
רשות החדשנות

שלומי קופמן

סמנכ"ל, ראש החטיבה הבינלאומית
רשות החדשנות

עיצוב

ניצן גאיה הלוי

סטודיו איילה הלוי

1. World Economic Forum. Quantum Economy Blueprint. Published 16 January 2024.
<https://www.weforum.org/publications/quantum-economy-blueprint/>
2. Authors' analysis based on the Israeli case study and the World Economic Forum Quantum Economy Blueprint (2024).
3. Quantum Economic Development Consortium (QED-C). State of the Global Quantum Industry 2026. Arlington, VA: SRI International, April 2026; Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, internal report.
4. Israel Innovation Authority. "Quantum Risk and Reward." 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/quantum-risk-and-reward/>; Israel Innovation Authority. "Establishment of Commercialization Accelerators – Innovation Accelerators Fund."
<https://innovationisrael.org.il/en/programs/establishment-commercialization-accelerators/>
5. Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, internal report; Israel Innovation Authority programme materials.
6. Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, internal report. Budget execution data drawn from the National Committee's presentation to the TELEM forum.
7. World Economic Forum, Quantum Economy Blueprint (2024); QED-C quantum industry tracking data (2025); Israel's National Committee on the Second Quantum Program (2025).
8. The Quantum Insider, August 2026
9. Israel's National Committee on the Second Quantum Program (2025); QED-C quantum industry tracking data (2025); authors' estimates.
10. Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, internal report.
11. Israel Innovation Authority. The Race to a Million Qubits. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/the-race-to-a-million-qubits/>
12. Israel Innovation Authority. The Quantum Computer's Brain. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/the-quantum-computers-brain/>; Israel Innovation Authority. Communicating with a Noisy Computer. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/communicating-with-a-noisy-computer/>
13. Israel Innovation Authority. Who Controls the Signal? 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/who-controls-the-signal/>
14. Israel Innovation Authority. The Quantum Computer's Brain. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/the-quantum-computers-brain/>; Israel Innovation Authority. Communicating with a Noisy Computer. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/communicating-with-a-noisy-computer/>; Israel Innovation Authority. The Second Quantum Revolution. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/the-second-quantum-revolution/>; additional company materials for specific use cases.
15. Israel Innovation Authority, April 2026; company information and authors' ecosystem mapping. Companies shown are selected examples and do not represent an exhaustive census.
16. Jani, M., Barhum, H., et al. "Quantum Diamond Microscopy of Individual Vaterite Microspheres Containing Magnetite Nanoparticles." *Nanomaterials* 15, 1141 (2025). DOI: 10.3390/nano1511141; Barhum, H., et al. "In-Brain Multiphoton Imaging of Vaterite Cargoes Loaded with Carbon Dots." *Nano Letters* 24, 8232–8239 (2024). DOI: 10.1021/acs.nanolett.4c00325; Zabelotsky, T., et al. "Creation of Boron Vacancies in Hexagonal Boron Nitride Exfoliated from Bulk Crystals for Quantum Sensing." *ACS Applied Nano Materials* 6, 21671–21678 (2023). DOI: 10.1021/acsanm.3c03395.
17. Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, industry-readiness assessment.
18. Weizmann Institute of Science. "Center for Quantum Science and Technology."
<https://www.weizmann.ac.il/physics/research/centers/>; Technion – Israel Institute of Technology. "The Helen Diller Quantum Center – About Us." <https://quantum.technion.ac.il/Quantum-Center-Technion-Israel/>; Hebrew University of Jerusalem. "Quantum Information Science Center – About."
<https://qcent.huji.ac.il/about/>; Tel Aviv University. "Quantum Research at Tel Aviv University – QuantAU."
<https://quantum.tau.ac.il/about/>; Ben-Gurion University of the Negev. "About Quantum Science at BGU."
<https://www.bgu.ac.il/en/u/research-centers/center-for-quantum-information/about/>; Bar-Ilan University. "Quantum Entanglement Science and Technology Impact Center – QUEST."
<https://www.biu.ac.il/en/research/research-bodies/impact-centers/>
19. Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, internal report; NATO. Summary of NATO's Quantum Technologies Strategy. 16 January 2024.
<https://www.nato.int/en/about-us/official-texts-and-resources/official-texts/2024/01/16/summary-of-natos-quantum-technologies-strategy>
20. Israel Innovation Authority. Setting the Record Straight. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/setting-the-record-straight/>

21. Israel Innovation Authority, internal programme data, 2024–2026.
22. Israel Innovation Authority. Israeli Researchers and Companies Secure Over EUR 1.1 Billion in Horizon Europe Grants. 19 March 2025.
https://innovationisrael.org.il/en/press_release/1-1-billion-to-israel-from-horizon-europe-in-2021-24/
23. U.S.-Israel Binational Science Foundation (BSF). "About the BSF."
<https://www.bsf.org.il/about/>;
U.S.-Israel Binational Science Foundation (BSF). "NSF-BSF Research Grants: About."
<https://www.bsf.org.il/funding-opportunities/nsf-bsf-joint-research-grants/about/>
24. BIRD Foundation. "Funding Opportunities for U.S.-Israel Quantum and Optoelectronics Collaborations."
<https://www.birdf.com/event/funding-opportunities-for-u-s-israel-quantum-and-optoelectronics-collaborations/>;
BIRD Foundation. "The BIRD Model."
<https://www.birdf.com/>
25. Israel Innovation Authority. The Quantum Computer's Brain. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/the-quantum-computers-brain/>;
Israel Innovation Authority. Communicating with a Noisy Computer. 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/communicating-with-a-noisy-computer/>
26. National Institute of Standards and Technology (NIST). NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards. 13 August 2024.
<https://www.nist.gov/news-events/news/2024/08/nist-releases-first-3-finalized-post-quantum-encryption-standards>
27. Israel Innovation Authority. The State of High-Tech 2025. 17 September 2025.
28. National Institute of Standards and Technology (NIST). NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards. 13 August 2024.
<https://www.nist.gov/news-events/news/2024/08/nist-releases-first-3-finalized-post-quantum-encryption-standards>
29. Israel Innovation Authority. "Communicating with a Noisy Computer." 14 June 2026.
<https://innovationisrael.org.il/en/article/communicating-with-a-noisy-computer/>
30. Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, internal report.
31. Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, recommended governance structure for the second programme.
32. Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, internal report.
33. Israel Innovation Authority. "Setting the Record Straight." 14 June 2026; Israel Innovation Authority. "Quantum Leap - A Leap Towards Industrialization of Quantum Devices," Quantum Sensing Consortium presentation, 25 April 2018.
34. World Economic Forum. Quantum Economy Blueprint. Published 16 January 2024.
<https://www.weforum.org/publications/quantum-economy-blueprint/>; Israel's National Committee on the Second Quantum Program, 2025, internal report.
35. Authors' analysis based on the World Economic Forum Quantum Economy Blueprint (2024) and Israel's National Committee on the Second Quantum Program (2025).

