



# תל"מ – פורום לתשתיות לאומיות למחקר ופיתוח

מיסודה של האקדמיה הלאומית הישראלית  
למדעים

---

המלצות ועדת בדיקה מקצועית לבחינת הצורך והאפשרות  
להקמת תשתית למו"פ בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים

מרץ 2019

## תוכן עניינים

3	.....תקציר מנהלים	
6	.....1. הוועדה	
6	.....1.1 חברי הוועדה	
7	.....1.2 מנדט הוועדה	
7	.....1.3 עבודת הוועדה	
7	.....1.3.1 פגישות	
9	.....1.3.2 ביקורים	
10	.....1.3.3 מקורות מידע	
11	.....2. מדע וטכנולוגיות קוונטים - רקע	
11	.....2.1 מדע וטכנולוגיות קוונטים	
13	.....2.2 תחומי העיסוק במדע וטכנולוגיות הקוונטים ומצב הידע בישראל	
16	.....3. הצעת ות"ת ורשות החדשנות	
16	.....3.1 תוכנית הוועדה המייעצת לות"ת להקמת תוכנית לאומית אקדמית (ההצעה אומצה על-ידי ות"ת בפברואר 2018)	
17	.....3.2 דוח צוות התייעצות לנושא הפן התעשייתי בתוכנית הקוונטים הלאומית (רשות החדשנות בשיתוף מפא"ת)	
19	.....4. רציונל עבודת הוועדה	
20	.....5. אפיון הצורך והתועלות הצפויות	
23	.....6. מסקנות	
28	.....7. המלצות	
28	.....7.1 תוכנית לאומית למדע וטכנולוגיות קוונטים ומטרות העל	
28	.....7.2 אסטרטגיה להשגת מטרות העל	
29	.....7.3 מבנה ניהולי מוצע לתוכנית הלאומית	
32	.....7.4 תכולות מומלצות לתוכנית הלאומית	
41	.....8. הפן התקציבי בתוכנית המומלצת	
46	.....9. חזון לתקופה שלאחר תום החומש הראשון	
48	.....10. משמעויות אי-מימוש התוכנית הלאומית המומלצת	
56	.....11. סיכום	
57	.....12. תודות	
58	.....13. נספחים	
58	.....א. נספח תקציבי	
78	.....ב. יעדים עקרוניים – אבני דרך לתכולת התוכנית המומלצת	
84	.....ג. כתב מינוי הוועדה	

## תקציר מנהלים

ועדת הבדיקה המקצועית לבחינת הצורך והאפשרות להקמת תשתית למו"פ בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים מונתה ב-27.08.2018, על בסיס החלטת פורום תל"מ מיום 12.04.2018. תחום הקוונטים, העוסק בתופעות תת-אטומיות, טומן בחובו פוטנציאל לקפיצות מדרגה במספר רב של עולמות ידע וטכנולוגיה מרכזיים. ניצול תופעות קוונטיות עומד כבר היום בבסיסן של רבות מהטכנולוגיות המוכרות לנו, וביניהן פוטוניקה ומוליכים למחצה במיקרואלקטרוניקה, ואפליקציות, כגון GPS (Global Positioning System) ו-MRI (Magnetic Resonance Imaging). חלק מהיישומים הקוונטיים אף מהווים שינוי פרדיגמה של ממש (לדוגמה במערכות חישוב ועיבוד מידע) ומאפשרים קפיצת מדרגה איכותית ביכולות.

לאור ההשפעות המהפכניות של תחום הקוונטים על מערכות רבות בתחומי התעשייה, התשתיות, הביטחון, הבריאות, התרופות והחומרים, והצפי להתרחבות השפעות אלה ולהאצתן, החליטו המדינות והתאגידים המובילים בעולם לרכז מאמץ מיוחד בתחום זה. בין מדינות אלה ניתן למנות את ארה"ב, האיחוד האירופי, סין, בריטניה, גרמניה ומדינות רבות נוספות, שהגדירו תכניות לאומיות במאות מילונים עד מיליארדי דולרים על-פני תקופות זמן של עד עשור. בין התאגידים המובילים ניתן לציין את Google, IBM, Intel, Airbus, Toshiba, Alibaba וחברות נוספות שבחרו להשקיע מיליארדי דולרים בקידום תחום הקוונטים, מתוך הבנה שתחום זה, שנמצא עדיין בראשיתו, עתיד להשפיע באופן דרמטי על היבטים רבים בהתקדמות האנושית. לפי נתוני חברת הייעוץ דלויט צפויה צמיחה משמעותית בהכנסות המבוססות על טכנולוגיות קוונטיות עד ל-50 מיליארד דולר בעוד עשור בתחומי התקשוב לבדם<sup>1</sup>. בנוסף למדינות המובילות, גם מדינות קטנות (פינלנד, הולנד, דנמרק, סינגפור) יזמו תוכניות לאומיות הכוללות כבר עתה הכשרות במגוון מקצועות קוונטיים בכל התארים האקדמיים תוך התמקדות בפיתוח כוח האדם וברמתו לאור מספר השנים הנדרשות להכשרה כזו (שמונה שנות לימוד במקרים מסוימים).

במסגרת פעילותה קיימה הוועדה פגישות רבות, בין היתר עם גורמי ממשל וחברי תל"מ, גורמי ביטחון, גורמי תעשייה, חוקרים מהאקדמיה ומומחים זרים מובילים בתחומם ברמה העולמית. הוועדה ערכה ביקורים במוסדות האקדמיים השונים וכן בגופים שונים בתעשייה. כמו כן, סקרה הוועדה תוכניות דגל שונות שיושמו במדינות אחרות בעולם. בפרט חשוב לציין כי עבודת הוועדה התבססה על עבודות המחקר ומסקנות הוועדות שקדמו לה - הצעת ות"ת והצעת רשות החדשנות (ומפא"ת), ומסמכים נוספים.

בתום העבודה הנרחבת שהתבצעה, מסקנת הוועדה בנושא זה הינה חד-משמעית: **קיים צורך קריטי בייזום תוכנית לאומית למחקר ופיתוח בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים**. למדינת ישראל האפשרות וההזדמנות להיות מדינה מובילה בתחומי עיסוק מסוימים, ובעלת יתרון יחסי באחרים. **קיומה של תוכנית לאומית בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים חיוני לחוסנה של מדינת ישראל** ויתרום להעמקת המחקר האקדמי, להרחבת הבסיס התעשייתי, ליצירת הזדמנויות כלכליות משמעותיות, ולקידום דרמטי של היכולות הביטחוניות הישראליות. לחילופין, אם לא יבוצעו השקעות משמעותיות ברמת תוכנית לאומית, שיביאו את ישראל ליכולת מובילה בתחומים מסוימים למול מדינות אחרות, מדינת ישראל לא תוכל להמשיך ולהתקדם טכנולוגית, הן כמדינה למימוש צרכיה ויעדיה, הן למחויבותה לאיכות חיי אזרחיה והן לפיתוח משק ותעשייה מתקדמת.

<sup>1</sup> TMT (Technology, media, and Telecommunications) Predications 2019 report – Deloitte Insights

התוכנית המומלצת, אשר מפורטת במסמך זה, כוללת מספר נדבכים הנובעים ממסקנות הוועדה והסוללים את הדרך למימוש וקידום התוכנית הלאומית. הוועדה זיהתה פער משמעותי בתחום ההון האנושי, המתחיל כבר באקדמיה וכפועל יוצא מכך גם בתעשייה, עקב הרף הגבוה הנדרש ממומחים בתחום. הוועדה הצביעה על תחום החישה הקוונטית (מדידות אולטרה מדויקות של זמן ותדר, שדות מגנטיים, גרביטציוניים, תאוצות, דימות ואחרים), כתחום בו ניתן לבסס את מעמדה של מדינת ישראל כמובילה ומתחרה משמעותית מול המדינות המתקדמות בעולם. בתחום החישוב הקוונטי (המבוסס על יכולת לביצוע חישובים באמצעות סיביות קוונטיות - qubits), מעריכה הוועדה כי מדינת ישראל תוכל לפתח יתרון יחסי בעיקר בתחומי הרבדים העיליים של החישוב והסימולציות הקוונטיות (תוכנה, אלגוריתמים, אימות ועוד), אך לשם כך עליה לבנות יכולות עצמאיות גם בייצור חומרה (מימוש מעבדים קוונטיים). כמו כן, ממליצה הוועדה להגדיל את ההשקעה בתחומים נוספים הכוללים תקשורת קוונטית, חומרים קוונטיים ויסודות תורת הקוונטים, הן בהעמקת המחקר האקדמי והן בהרחבת היריעה לכיווני התעשייה. כל אלו משתקפים בתכולת התוכנית המומלצת הכוללות בין היתר:

1. קידום ומיקוד הון אנושי על-ידי קליטת אנשי סגל, בניית תוכניות לימודים אקדמיות, הקמת מעבדות מחקר, משיכת חוקרים מחו"ל, מתן מלגות ועוד.
  2. רכישת "זמן ענין" לחומרת המעבדים הקוונטיים המובילים כיום לצורך קידום תחומי הרבדים העיליים של החישוב והסימולציות הקוונטיות.
  3. פיתוח תשתיות חומרה לאומיות למחשוב קוונטי, הן באקדמיה והן במרכז מו"פ יישומי ייעודי שיוקם לשם כך.
  4. הרחבת הפיתוח המערכתי והמחקר בתחום התקשורת הקוונטית והאצת פרויקטים מרכזיים בתעשייה ובביטחון בתחום החישה הקוונטית. זאת בנוסף לתקצוב עבור מחקר אקדמי ישיר באמצעות הרחבה מסוימת במנגנון קרן ות"ת-מפא"ת.
  5. עידוד כניסת תעשיות חדשות לתחומי החישה, התקשורת, החומרים, החישוב הקוונטי ותחומים נוספים, ותמיכה בהקמת תשתית רכיבים קוונטים אשר תשרת את התעשייה.
  6. הקמת תשתית חומרה משותפת באקדמיה שתשרת מספר תחומים וקבוצות מחקר שונות.
  7. השקעה בביסוס שיתופי פעולה בינלאומיים.
- סך התקציב הנדרש לצורך מימוש התוכנית המומלצת עומד על 1,452 מ"ח. תקציב זה ינוצל על-פני שנת התארגנות ועוד חמש שנות החומש הראשון, כאשר חלוקת התקצוב הפנימית המומלצת משקפת את מסקנות הוועדה. תחומי המיקוד שהוגדרו (פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית, ומרכיבי החישוב הקוונטי השונים) מהווים כ-13.8% ו-22%, בהתאמה, מהתקציב הכולל (כ-201 מ"ח וכ-322 מ"ח בהתאמה), תשתית החומרה המשותפת באקדמיה מהווה כ-20% מהתקציב הכולל (כ-290 מ"ח, כולל כוח האדם הטכני הייעודי הנדרש לתפעול הציוד), וכן נושא ההון האנושי על כלל היבטיו מהווה כ-17.4% מהתקציב הכולל (כ-252 מ"ח). 'מרכז הכובד' של התוכנית המוצעת, המתייחס כאמור לחומש הראשון, הינו באקדמיה, וזאת בהלימה לשלב המוקדם יחסית בחיי הטכנולוגיה בו אנו נמצאים במרבית התחומים. הוועדה מדגישה כי לצורך מימוש הפוטנציאל של התוכנית הלאומית תידרש תמיכה ממשלתית גם מעבר לחמש השנים הקרובות ותקצוב נוסף מעבר לנקוב בדוח. עוד צופה הוועדה כי לאחר החומש הראשון, יתאפשר להכווין את המאמצים בכיוון היישומי יותר, העברת 'מרכז הכובד' לתעשייה באופן מדורג, וכן לשנות את ההתייחסות לתתי-התחומים השונים בהתאם להבשלתם והיתרונות היחסיים שיתפתחו.

בהיבט הניהולי, הוועדה קובעת כי תוכנית לאומית מעין זו חייבת להיות מנוהלת הן ברמה האופרטיבית היום-יומית, והן ברמה האסטרטגית על-ידי מנגנון ניהולי גמיש, זריז, בעל סמכות אופרטיבית, מקצועי, ועצמאי ככל שניתן, תוך שמירת האינטרסים של כלל הגופים השותפים ובראייה כוללת ומאוזנת. מתוך כך, שירטטה הוועדה מבנה ניהולי הכולל וועדת היגוי (מורכבת ממובילי הגופים השותפים בתל"מ) האחראית לראייה מערכתית של הנושא הלאומי על כלל היקפו ומשמעויותיו, מועצה מדעית מייעצת (ממומחים בעלי שם בתחום המדעי והטכנולוגי באקדמיה ובתעשייה) אשר תפקידה להמליץ על נושאי וכיווני המחקר, וכן גוף אופרטיבי קטן ובראשו מנהל התוכנית העוקב ומבקר באופן שוטף אחר פעילויות התוכנית בגופים השונים.

אם לא תמומש תוכנית לאומית שכזו, מדינת ישראל תייצר פער טכנולוגי שעלול להיות בלתי ניתן לגישור כבר בשנים הקרובות, ותלות טכנולוגית שתהווה מגבלה על החוסן הלאומי. המשמעות הינה נחיתות מובנית מול מדינות ושחקנים 'זרים' אחרים, שימשיכו להתקדם בקצב מהיר וידחקו את ישראל מזירות פעילות הולכות ומתרחבות בתחומים קריטיים בהיבטי ביטחון, כלכלה, בריאות, חינוך משק ותעשייה. מדינת ישראל איננה יכולה להרשות לעצמה להיות במצב שכזה.

לסיכום, תחום מדע וטכנולוגיות קוונטים הינו תחום מבטיח ביותר הנמצא עדיין בראשיתו. לישראל יש בו צורך אסטרטגי ופוטנציאל דרמטי לשימור וחזוק החוסן הלאומי, הביטחוני, האקדמי, והעסקי. כיוון שהתחום דורש תשתית אנושית מגוונת שהכשרתה אורכת זמן רב ומצויים בו כבר עתה מספר מובילים, נדרש מאמץ מרוכז למיצוי הפוטנציאל של התחום. לשם כך מתכבדת הוועדה להציג להלן את הצעתה לתוכנית לאומית המשלבת את כל השותפים הפוטנציאליים על-מנת לבסס יכולת מקומית ומעמד תחרותי בזירה הבינלאומית.

## 1. הוועדה

### 1.1. חברי הוועדה

- **ד"ר ארנה ברי (יו"ר הוועדה)** – לשעבר המדענית הראשית לישראל וראש מנהל המו"פ התעשייתי של משרד המסחר והתעסוקה בממשלת ישראל. שימשה כיו"ר קרן BIRD וכיו"ר איגוד קרנות ההון סיכון של ישראל (IVA), ועמדה בראש קרנות הון משותפות עם קנדה, הממלכה המאוחדת, קוריאה הדרומית וסינגפור. בתפקידה האחרון שימשה כסגנית נשיא Dell EMC ומנכ"לית מרכז המצוינות של החברה בישראל. בעלת תואר דוקטור במדעי המחשב, ומרצה רבות בגופים אקדמיים ובנושאי ביטחון ומדיניות.
- **פרופ' ניר דודזון (חבר ועדה)** – פיזיקאי ניסיוני בתחום פיזיקה אטומית וקוונטית ובפרט אטומים מקוררי-לייזר, ספקטרוסקופיה אטומית מדויקת בתחום האופטיקה רדיו ומיקרוגל, אינטרפרומטרים אטומים, חיישנים קוונטים וכן בפיזיקה של לייזרים. דיקאן הפקולטה לפיזיקה במכון ויצמן.
- **פרופ' רוני קוזלוב (חבר ועדה)** – האוניברסיטה העברית. תאורטיקן בתחום הדינמיקה הקוונטית, שליטה ובקרה קוונטית, ותרמודינמיקה קוונטית. אל"מ (מיל'). שימש כ-9 שנים בתור יו"ר תחום המדעים המדויקים בקרן הלאומית למדע.
- **מר אילן פלד (חבר ועדה)** – אל"מ (מיל'). פרש לאחר שירות של 20 שנה ביחידה למחקר ופיתוח של מערכת הביטחון, תפקיד אחרון סגן מדעי לראש מו"פ. עד שנת 2018, ניהל במשך 20 שנה את תוכנית הסיוע של משרד התעשייה/הכלכלה לבניה וחיזוק התשתית הטכנולוגית בתעשייה הישראלית, ובכלל זה קידום ועידוד שתי"פ אקדמיה-תעשייה, המוכרת כתוכנית מגני"ט של משרד המדען הראשי. בוגר האוניברסיטה העברית במתמטיקה ומוסמך אוניברסיטת ת"א במנהל עסקים וחקר ביצועים.
- **מר משה לוינגר (חבר ועדה)** – סמנכ"ל פיתוח במעבדת המחקר של IBM בחיפה. אחראי על כ-150 חוקרים בתחומי: סייבר, טכנולוגיות ענן, ואימות חומרה ותוכנה. כמו כן, אחראי על צוות החישוב הקוונטי בחיפה שהינו חלק מהמאמץ הגלובלי של IBM בתחום. הצוות הישראלי מתרכז בתחומי תוכנה שונים עבור המחשב הקוונטי של IBM.
- **ד"ר משה שוקר (חבר ועדה)** – חוקר ברפאל, ממקימי המעבדה לאופטיקה קוונטית בחברה. בעל תואר דוקטורט בפיזיקה מהטכניון בתחום הקוונטים. כיום, נמצא בשבתון בארה"ב ב-National Institute of Standards and Technology ועוסק בפיתוח חיישנים קוונטיים העושים שימוש באטומים קרים.
- **תא"ל (מיל') מוטי בסר (חבר ועדה)** – מילא שורה של תפקידים בסקטור העסקי ובסקטור הציבורי ובכלל זה היועץ הכספי לרמטכ"ל וראש אגף התקציבים של משרד הביטחון, מנכ"ל משרד מבקר המדינה, מנכ"ל בורסת היהלומים, מנכ"ל הבונדס באנגליה. יועץ ודירקטור בסקטור העסקי, בסקטור הפרטי ובמערכת הבנקאית. חבר בוועדה מייעצת לשר הביטחון, יועץ לניהול משאבים של ראשי שירות הביטחון הכללי, חבר בחבר הנאמנים של המכון הטכנולוגי חולון (HIT). מוסמך למדעים בהנדסת תעשייה וניהול של הטכניון בחיפה, מוסמך אוניברסיטת תל אביב בחוג למדיניות ציבורית בתחום מנהל ותקצוב ציבורי.

- **מר גדי לוי (מרכז ועדה)** – סמנכ"ל האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים. כלכלן בעל ניסיון בבחינת תשתיות מחקר ופיתוח ותקצובן.
- **ד"ר טל דוד (מרכז ועדה)** – ראש ענף טכנולוגיות קוונטים ואלקטרואופטיקה במפא"ת. בתפקידו זה, מוביל את תוכנית המדע והטכנולוגיה הקוונטית, ואחראי על תחומים נוספים. בעל תואר דוקטור בפיזיקה קוונטית מאוניברסיטת בן גוריון בתחום פיסיקה של אטומים קרים. בעל ניסיון בחברת אלקטרואופטיקה ובתעשייה הביטחונית בתחום מערכות חישה מגנטית קוונטית.

גבי דריה פודשיבלוב – אגף החשב הכללי, משרד האוצר (משקיפה)

## 1.2. מנדט הוועדה

ועדה זו מונתה בחודש אוגוסט בשנת 2018 על-ידי יו"ר תל"מ (פורום לתשתיות לאומיות למחקר ולפיתוח), הפרופ' שמעון אולמן. תפקיד הוועדה היה **לבחון את הצורך והאפשרות להקמת תשתית למחקר ופיתוח בתחום מדע וטכנולוגיית קוונטים**. במסגרת עבודת הוועדה היה עליה להתייחס לנושאים הבאים:

- 1.2.1. בחינת ההצעות שקדמו לעבודת הוועדה, ובהן את הצעת ות"ת והצעת הרשות לחדשנות.
  - 1.2.2. בחינת תוכניות ומודלים מקבילים במדינות אחרות ובדיקת אפשרות לקיום שיתוף פעולה.
  - 1.2.3. המלצה על אבני דרך לפיתוח תשתיות המחקר האקדמי והיישומי בתחום מדע וטכנולוגיית קוונטים.
  - 1.2.4. אפיון מודל פעילות לתשתית תוך התייחסות לתשתיות ולהיבטים מדעיים/טכנולוגיים, ארגוניים, כלכליים ותקציביים.
- לפרטים נוספים אודות מנדט הוועדה ראו את כתב המינוי לוועדת הבדיקה המקצועית לבחינת הצורך והאפשרות להקמת תשתית למו"פ בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים מתאריך 27.8.2018. כתב המינוי מצורף למסמך זה כנספח, ראו סעיף 13ג.

## 1.3. עבודת הוועדה

### 1.3.1. פגישות

להלן רשימת בעלי תפקיד וחברות עימם נפגשה הוועדה כחלק מפעילותה:

#### 1.3.1.1. ממשל וחברי תל"מ

- פרופ' שמעון אולמן – יו"ר תל"מ
- מר שאול מרידור – ראש אגף התקציבים במשרד האוצר
- פרופ' יפה זילברשץ – יו"ר ות"ת
- ד"ר עמי אפלבוים – יו"ר רשות החדשנות
- ד"ר אהרון אהרון – מנכ"ל רשות החדשנות
- ד"ר דני גולד – ראש מפא"ת

- מר אבי ענתי – סמנכ"ל תכנון, תיאום ובקרה, משרד המדע
- ד"ר אביב זאבי – ראש זירת תשתית טכנולוגית, רשות החדשנות
- ד"ר פדיל סאלח – ראש תחום פיזיקה ומתמטיקה שימושית, משרד המדע
- מר דן סקר – ראש תחום ICT ב-ISERD, רשות החדשנות

#### 1.3.1.2 ביטחון

- ד"ר משה גולדברג – ראש היחידה למחקר ותשתית טכנולוגית במפא"ת
- ד"ר נדב כהן – רמ"ח תשתיות אופ"ק במפא"ת

#### 1.3.1.3 אקדמיה

- פרופ' אורי סיון – נשיא הטכניון הנכנס, עמד בראש התוכנית הלאומית האקדמית של ות"ת לתחום הקוונטים
- פרופ' יצחק בן ישראל – ראש סדנת יובל נאמן למדע, טכנולוגיה וביטחון, ראש מרכז הסייבר באוניברסיטת תל אביב ויו"ר סוכנות החלל הישראלית במשרד המדע והטכנולוגיה.
- בנוסף התקיימו פגישות עם חוקרים שונים בביקורים באוניברסיטאות השונות.

#### 1.3.1.4 תעשייה

- ד"ר שלמה מרקל – סגן נשיא חברת Broadcom העולמית
- ד"ר יהושע (שוקי) גלייטמן – לשעבר המדען הראשי במשרד התמי"ת, יו"ר ומנכ"ל קרן צמיחה סינית-ישראלית
- ד"ר איתן יודלביץ' – מנכ"ל קרן BIRD
- רפא"ל – ד"ר אירית אידן (סמנכ"ל למו"פ), ד"ר שפר מלצר (מדע"ר), ד"ר עמית בן קיש (סגן למו"פ, חטי' חימוש), ד"ר שי רחימי (ראש שטח טכנולוגיות, חטי' מנור), ד"ר אלעד גרינפלד (מח' פיסיקה ניסויית, חטי' חימוש), מר שגב בן יצחק (ר' מחלקת מערכות זעירות, חטי' מנור), מר אור כץ (מח' פיסיקה ניסויית, חטי' חימוש), ד"ר אלון גבאי (מח' מערכות זעירות, חטי' מנור), ד"ר רן פישר (מח' פיסיקה ניסויית, חטי' חימוש), מר חן אבינדב (מח' פיסיקה ניסויית, חטי' חימוש)
- מר חמי פקר – מוביל החדשנות בחברת Motorola Solutions ובעל ניסיון עתיר במערכת הביטחון
- ד"ר אייל איצקוביץ' – קרן פיטנגו



- חברת AccuBeat – מר בני לוי (מנכ"ל), ד"ר אבינעם שטרן (נשיא ומדע"ר), מר שמי פרוזות (סמנכ"ל טכנולוגיות), ד"ר אמיר וקסמן (פיסיקאי ומוביל פרויקט שעון אטומים קרים)
- מר נמרוד כהן – שותף מנהל TAU Ventures
- גבי לידיה לזנס – בעבר סגנית המדען הראשי במשרד התמי"ת לנושאי כספים וחיזוי. יוזמת תוכניות חדשות מול משרד האוצר.
- ד"ר יהודה נווה – חברת IBM, חיפה
- חברת QuantLR בתחום התקשורת הקוונטית – מר יניר פרבר, פרופ' חגי אייזנברג, ד"ר ניצן ליבנה
- חברת Quantum Machines בתחום המחשוב הקוונטי – ד"ר איתמר סיוון, ד"ר יונתן כהן
- ד"ר אלעד מנטוביץ' – חברת Mellanox
- ד"ר מיכה לאור – חברת Cisco

#### 1.3.1.5 גורמים מחו"ל

- ד"ר וולטר קופאן (Walter G. Copan) – תת מזכיר המסחר של התקנים וטכנולוגיות ומנהל NIST
- פרופ' דנה אנדרסון (Dana Anderson) – JILA אוניברסיטת קולורדו ארה"ב, מנכ"ל ColdQuanta. היה מעורב בתוכניות הלאומיות לחקר קוונטים בארה"ב, בבריטניה ובדרום קוריאה.
- פרופ' גיון מרטיניז – ראש מעבדת חישוב קוונטי של google בעל-מוליכים.

#### 1.3.2 ביקורים

כחלק מפעילות הוועדה, התקיימו סיורים בגופים הבאים:

- רפאל (חטיבת חימוש, חטיבת מנו"ר)
- הטכניון (כולל הצגות של IBM ושל מלאנוקס שם)
- אוני ת"א (TAU Ventures)
- מכון וייצמן
- תע"א - רמתא
- אוני בן גוריון
- אוני בר אילן
- האוני העברית
- חברת AccuBeat

בנוסף, במסגרת פעילות הוועדה הגיע פרופי דנה אנדרסון לארץ וערך סיור מקיף בתעשייה ובאקדמיה. לפרופי אנדרסון ניסיון נרחב בהקמת פרויקטים בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים והוא היה שותף להקמת התוכניות הלאומיות של ארצות הברית, של בריטניה ושל דרום קוריאה. במהלך ביקורו, הוועדה אספה רשמים ותובנות שהפרופי העלה על-מנת לקדם את התוכנית הלאומית של מדינת ישראל.

### **1.3.3. מקורות מידע**

מידע חיצוני - בוצעו התייעצויות עם המומחים מחו"ל שהוזכרו, וכן נסקרו פרסומים מתוכנית הדגל האירופית בטכנולוגיות קוונטים, מהמרכז הקוונטי בדלפט (Delft), הולנד, מהתוכנית הלאומית של סינגפור, מהתוכנית הלאומית האזרחית האמריקאית, ומהתוכנית הלאומית הבריטית.

## 2. מדע וטכנולוגיות קוונטים - רקע

### 2.1. מדע וטכנולוגיות קוונטים

תורת הקוונטים היא מאבני היסוד של הפיסיקה המודרנית במאה האחרונה ומתארת את ההתנהגות של חלקיקים (כדוגמת אטומים, מולקולות ופוטונים) ברמה המיקרוסקופית. התורה הצליחה לחזות באופן מדויק אוסף גדול של תהליכים יסודיים, וכבר כיום היא עומדת בבסיסם של מגוון עצום של יישומים בטכנולוגיה המודרנית (כולל לייזרים, רכיבים אלקטרוניים מתקדמים, אלקטרואופטיקה ועוד). בשנים האחרונות מתגבשת הערכה בקרב גופי מחקר ופיתוח כי אוסף מסוים של תחומי עיסוק בתורת הקוונטים צפוי להניב מגוון יישומים חדש שיכול להשפיע באופן ניכר בשנים ובעשורים הבאים על התעשייה האזרחית ועל מערכת הביטחון. אוסף תחומים ויישומים אלו מכונה לעיתים תחומי האינפורמציה הקוונטית (Quantum Information Science, QIS) או מדע וטכנולוגיית הקוונטים (Quantum Science and Technology, QST), והם יוגדרו במפורש בהמשך הדוח. ההשפעה של תחומים אלו על התעשייה האזרחית ועל נושאים של ביטחון לאומי מכונה לעיתים "המהפכה הקוונטית השנייה" ("second quantum revolution") כדי להבדילם ממגוון היישומים הקיימים הנשענים על היבטים פשוטים יותר של תורת הקוונטים. כבר כיום נעשה שימוש הן מסחרי והן ביטחוני בהתקנים קוונטיים כגון: שעונים אטומיים, מדידי ניווט, תקשורת קוונטית ועוד. עם זאת, מכיוון שהתחום עדיין בראשיתו (בעולם כולו), אין וודאות כי היישומים החדשים הללו יתממשו כולם, אך רבים מהם יכולים ליצור, מהפכה מהותית בתחומים רבים, שכן אלו טכנולוגיות פורצות דרך. במידה ומחשוב קוונטי יהפוך למציאות הוא יכול להשפיע על כמעט כל תחום בתעשייה האזרחית (תרופות, אנרגיה, חלל ועוד רבים).

הערכה זו הניעה מדינות רבות בעולם לקיים תוכנית לאומית בנושא מדע וטכנולוגיות קוונטים, מתוך כוונה להאיץ את המחקר הבסיסי, את פיתוח אבני הבניין הטכנולוגיות, ואת העברת הידע הזה לתעשייה האזרחית ולמערכת הביטחון. בטבלה הבאה מתוארים מספר מאפיינים של חלק מהתוכניות הלאומיות בנושא במדינות שונות בעולם:

טבלה 1: תוכניות לאומיות במדע וטכנולוגיות קוונטים ברחבי העולם

מדינה	שם התוכנית	היקף כספי כולל (בד"כ ל-5 שנים) [M\$] <sup>2</sup>	הערות
האיחוד האירופאי	Quantum Flagship	1100	צפוי לגדול עד פי שלושה בהיקף <sup>3</sup>

<sup>2</sup> רוב הנתונים בפרק זה אודות ההיקף הכספי הכולל לקוחים ממצגתו של פרופ' דנה אנדרסון. מצגת זו הוצגה בפני פורום משרד האוצר בזמן שהותו בארץ, במסגרת עבודת הוועדה.

<sup>3</sup> <https://qt.eu>

הוקמה וועדת היגוי במשרד המדע של הבית הלבן	1635	National Quantum Initiative Act	ארה"ב
פרטים לא מלאים	2400		סין
	1000		קנדה
כנראה חלק בחפיפה לתוכנית האירופאית	780		גרמניה
	358	UK National Quantum Technologies Programme	אנגליה
	300		יפן
קיים מרכז מחקר קוונטי מרכזי של המדינה: Center for Quantum Computation & Communication Technology	280 <sup>4</sup>		אוסטרליה
לסינגפור תוכנית משותפת עם בריטניה לפיתוח בתחום ה-QKD <sup>5</sup>	79	CQT – Center for Quantum Technologies	סינגפור

לצד התוכניות הלאומיות הגלויות קיימים בעולם מספר מאמצים מקבילים ומסווגים לפיתוח יישומים שנוגעים לביטחון לאומי.

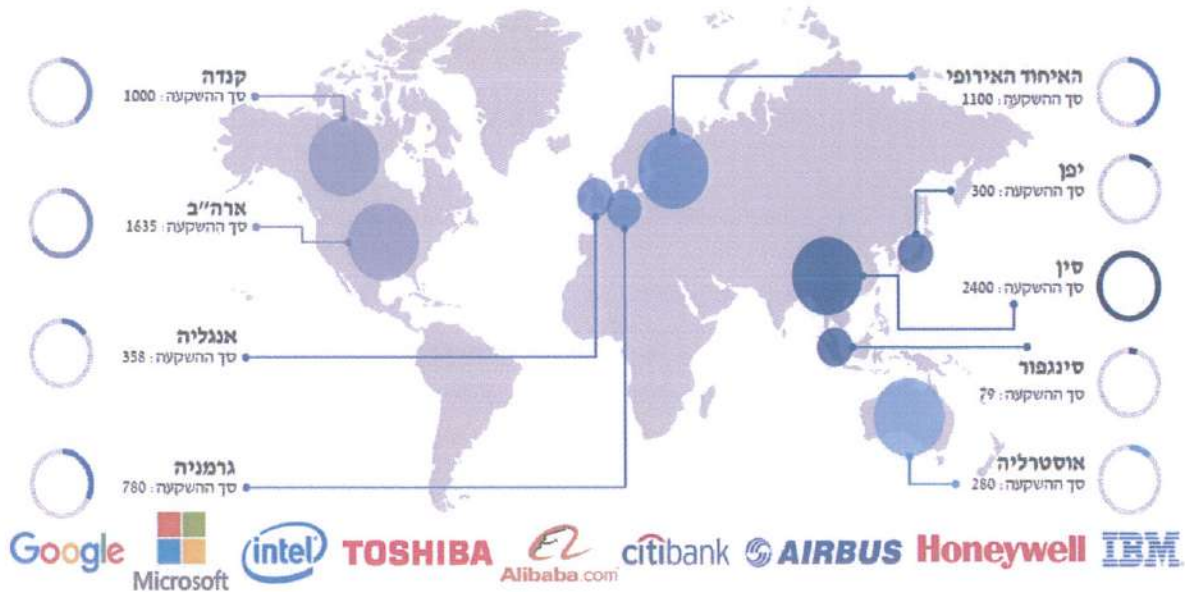
במקביל לתוכניות הלאומיות החלו מספר רב של חברות (כגון, IBM, Google, Alibaba, ועוד רבות) להשקיע סכומי כסף משמעותיים בפיתוח התחום (בפרט המחשוב הקוונטי) – מתוך הערכה כי הוא יוכל להשפיע על עסקיהן בטווח הנראה לעין. אין נתונים גלויים על ההשקעה הכספית של כלל<sup>6</sup> התאגידים הגדולים, אך ההשקעה הכוללת היא של מאות רבות של מיליוני דולרים בשנה (לשם המחשה, בחברת Google עובדים לפחות מאה עובדים על פרויקט מחשוב קוונטי ב-Superconducting qubits ובטכנולוגיות נוספות). היקף ההשקעה הנרחב של חברות אלו מעיד כי הן מעריכות שיישומים מתחום האינפורמציה הקוונטית עשויים להשפיע באופן ניכר על התעשייה עתירת הידע (היי-טק), בתחומים מגוונים כגון טכנולוגיות מידע, בנקאות ופיננסים, תחבורה חכמה, תחומי החומרים והתרופות, ועוד.

<sup>4</sup> נתון זה לקוח מדו"ח התקציב הממשלתי של ממשלת אוסטרליה לשנת 2018-19

<sup>5</sup> נתון זה לקוח מכתבה שהופיעה באתר הממשלתי הרשמי של ממשלת בריטניה

<sup>6</sup> ישנה הצהרה של Alibaba על השקעה של 15 מיליארד דולר בתחום החישוב הקוונטי ובתחום הבינה המלאכותית; <https://102.alibaba.com/detail?id=15> (לא ברור על-פני כמה שנים פרושה ההשקעה)

התרשים הבא מציג את התוכניות הלאומיות בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים במדינות מובילות בעולם. הנתונים המופיעים מציגים רק את התוכניות הממשלתיות במיליוני דולרים. משך התוכניות איננו זהה בכל המדינות, אך מדובר על שנים בודדות עד עשור:



איור 1: תוכניות לאומיות בקוונטים במדינות מובילות וחברות מסחריות המשקיעות בתחום

## 2.2. תחומי העיסוק במדע וטכנולוגיות הקוונטים ומצב הידע בישראל

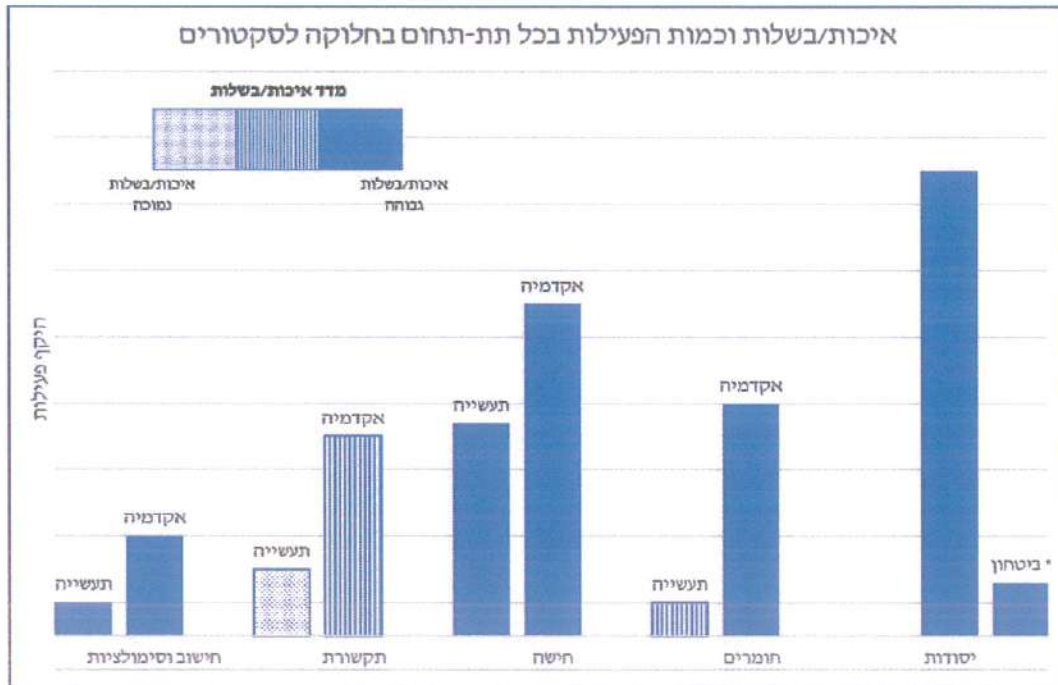
כפי שהוסבר לעיל, מגוון תחומי מו"פ בתורת הקוונטים צפויים להשפיע באופן ניכר על התעשייה האזרחית והביטחון הלאומי. בדוח זה אימצנו את ההגדרה המופיעה בדוח ות"ת לנושא, לתחומי המחקר הכלולים תחת "מדע וטכנולוגיות קוונטים". בטבלה מס' 2 מוצגים התחומים השונים הנכללים במדע וטכנולוגיות הקוונטים, וכן סקירה קצרה של מצבם הידע בישראל, נכון לכתבת דוח זה (לפירוט ראו סעיף 6.9 בדוח).

טבלה 2: תתי-התחומים ומצב הידע הקיים בארץ

שם תחום המחקר	תיאור התחום ויישומים אפשריים	מצב הידע הקיים בישראל (ראו פירוט בסעיף 6.9)
חישוב קוונטי Quantum computation	יכולת גנרית לביצוע חישובים המבוססים על סיביות קוונטיות (qubits). לחישוב כזה יכולת לפתור בעיות שאינן ניתנות לפתרון באמצעות מחשב "קלאסי".	קיימת פעילות אקדמית מועטה (אך ברמה גבוהה). קיימת פעילות תעשייתית קטנה, בעיקר בתוכנה ובהיבטים היקפיים. אין פעילות בתעשייה בנושא חומרה.
סימולציה קוונטית Quantum simulation	מונח זה מתייחס למחשב קוונטי בעל ביצועים חלקיים שאינו יכול לפתור בעיות גנריות, ומוקדש בעיקרו לחישוב תכונות של חומרים (קיימים או עתידיים). סימולציה כזו יכולה להשפיע באופן ניכר,	

	על תהליך פיתוח תרופות, חומרים ליישומי אנרגיה מתחדשת ועוד.	
פעילות מועטה באקדמיה (שחלקה במימון מערכת הביטחון). התחלה ראשונית של פעילות בתעשייה (חברת הזנק).	היכולת לתקשר באופן מוצפן באמצעות שימוש בעקרונות תורת הקוונטים. תקשורת זו צפויה להיות חסינה יותר בהשוואה לשיטות הצפנה שבשימוש כיום (RSA-like), ועשויה אף להיות חסינה מפריצה באמצעות מחשב קוונטי עתידי.	<b>תקשורת קוונטית</b> <b>Quantum communication</b>
קיימת פעילות תעשייתית משמעותית, בעיקר עבור מערכת הביטחון. הפעילות כוללת מו"פ בסיסי וכן פרויקטים שחלקם מומשו כבר. קיימת פעילות אקדמית בהיקף ניכר יחסית.	יכולת מדידת גדלים פיסיקליים שונים, ובכלל זה הדמייה, בהתבסס על תורת הקוונטים ובדיוק גבוה מהקיים היום. נושא זה מתייחס בעיקר למדידת זמן, תדר, שדות מגנטיים, תאוצה, מהירות סיבוב והיבטים שונים של הדמיה (למשל, מכ"מ קוונטי).	<b>חישה ומדידה קוונטית</b> <b>Quantum sensing and metrology</b>
פעילות אקדמית נרחבת יחסית וברמה מדעית גבוהה מאוד. אין פעילות בתעשייה.	היכולת לתכנן חומרים חדשים על בסיס עקרונות תורת הקוונטים וליצר אותם באופן מעשי.	<b>חומרים קוונטים</b> <b>Quantum materials</b>
קיימת פעילות באקדמיה (אך קשה לאפינה במדויק כיוון שמדובר בתחום רחב מאד).	מחקר בסיסי בנושא תורת הקוונטים, וכן נושאים נוספים שיכולים לצוץ בשנים הקרובות.	<b>יסודות תורת הקוונטים וטכנולוגיות חדשניות</b>

להלן תרשים המתאר באופן איכותי בלבד את הבשלות וכמות הפעילות בכל תת-תחום בחלוקה לסקטורים:



איור 2: איכות/בשלות וכמות הפעילות בכל תת-תחום בחלוקה לסקטורים (תעשייה/אקדמיה/ביטחון) – תרשים איכותי בלבד

לאור שפע חומרי הרקע, הן במסמכים הישימים, והן במסמכים רבים נוספים הזמינים פומבית, מסמך זה לא יעסוק באופן מעמיק בסקירת הרקע המדעי-טכנולוגי והמגמות העולמיות, אלא יסתפק בציון נקודות משמעותיות ורלוונטיות במיוחד לעבודת הוועדה. לפרטים נוספים על אודות הרקע המדעי-טכנולוגי וכן למידע נוסף על אודות תתי-התחומים, ראו דוח ועדת התוכנית האקדמית מטעם ות"ת בראשותו של פרופ' אורי סיון, מסמך צוות ההתייעצות של הרשות לחדשנות בשיתוף מפא"ת, מצגת סקירה עולמית של ד"ר ליאת מעוז עבור ות"ת, ומסמך סיכום סקר מפא"ת בנושא חישוב קוונטי.

### 3. הצעת ות"ת ורשות החדשנות

עבודת הוועדה נשענה על עבודת המחקר ומסקנות ועדות שקדמו לה, בהן התוכנית הלאומית האקדמית שהותוותה על-ידי הוועדה המייעצת לות"ת ומסמך רשות החדשנות (ומפא"ת). לאורך דוח זה, ניתן למצוא לא אחת הפניות לאותם דוחות. להלן תמצית המסקנות וההמלצות אשר נכללו בהצעת ות"ת לתל"מ, וכן במסמך המשלים של צוות ההתייעצות לפן התעשייתי מטעם רשות החדשנות (ומפא"ת):

#### 3.1 תוכנית הוועדה המייעצת לות"ת להקמת תוכנית לאומית אקדמית (ההצעה

##### אומצה על-ידי ות"ת בפברואר 2018)

3.1.1. הוועדה האקדמית מטעם ות"ת הגדירה את תתי התחומים אליה התייחסה תחת "מדע וטכנולוגיית קוונטים": חישוב קוונטי, תקשורת קוונטית, סימולציה באמצעות מערכות קוונטיות, מכשור וחיישנים קוונטיים, חומרים קוונטיים, יסודות תורת הקוונטיים, ומדע וטכנולוגיות קוונטיות חדשניים.

3.1.2. התוכנית האקדמית של הוועדה נבנתה מתוך הבנה שהיא תהווה חלק מתוכנית לאומית רחבה יותר המשתלבת עם שאר הגופים הרלוונטיים בתעשייה ובביטחון.

3.1.3. הוועדה סקרה את תמונת המצב בפן האקדמי בלבד, והיא בחנה את מצב האקדמיה בארץ בתחום מדע וטכנולוגיית קוונטים.

3.1.3.1. הוועדה ציינה כי כיום קיימים 144 חוקרים שליבת מחקרם בתחום זה, ועוד 56 בתחומים נוספים. החוקרים בליבת התחום מנחים 471 תלמידי מחקר, ו-122 משתלמים לפוסט-דוקטורט.

3.1.3.2. עוד ציינה הוועדה, על בסיס ניתוח פרמטרים כמותיים לאיכות מדעית, כי שיעור החוקרים המצטיינים בתחום זה גבוה מאוד ביחס למדינות אחרות וביחס לתחומי מדעים פיזיקליים והנדסיים אחרים בארץ. נמצא כי החוקרים הישראליים בליבת התחום הם בעלי תפוקה ואימפקט מדעי גבוהים באופן יחסי.

3.1.3.3. הוועדה ציינה כי קיימים מרכזי מחקר ייעודיים בתחום ב-4 אוניברסיטאות ישראליות (האוניברסיטה העברית, הטכניון, אוניברסיטת בן-גוריון ואוניברסיטת בר-אילן), ובשאר האוניברסיטאות קיימים לרוב מרכזי מחקר בתחומים נוספים. מאז פרסום הדוח מוקמים מרכזים גם במוסדות אחרים.

3.1.4. הוועדה הציגה מספר חסמים לפיתוח התחום באקדמיה, כולל מחסור בתלמידי מחקר, חשיפה מועטה של סטודנטים לנושא, תשתיות מחקר חסרות ועוד.

3.1.5. הוועדה הגדירה מספר תכולות כחלק מתוכנית לאומית אקדמית לפיתוח התחום במערכת ההשכלה הגבוהה בישראל:

3.1.5.1. קרן מחקר וציוד אישי – הקרן תהיה פתוחה לכלל החוקרים באוניברסיטאות המחקר הישראליות, ומטרתה תהיה לתמוך במחקרים רלוונטיים.

3.1.5.2. תמיכה במרכזי מחקר מוסדיים – עיקר המשאבים יוקצה לפיתוח מרכזים באוניברסיטאות השונות, ובכלל זה קליטת אנשי סגל, הקמת מעבדות ותשתיות מחקר, מלגות לסטודנטים ועוד.



- 3.1.5.3. פעילות לאומית, ניהול ועתודה – ערוץ העונה על צרכים לאומיים המשותפים לכלל החוקרים והמוסדות, כגון הוצאות ניהול התוכנית, מלגות לישראלים במוסדות זרים ועריכת כנסים בין-לאומיים.
- 3.1.6. על-פי הוועדה האקדמית, התקציב הכולל הנדרש למימוש התוכנית האקדמית מוערך ב-600 משי"ח ל-5 שנים: 100 משי"ח עבור קרן המחקר וצידוד אישי, 430 משי"ח עבור תמיכה במרכזי מחקר מסדיים ו-70 משי"ח לפעילות לאומית, ניהול ועתודה. תקצוב זה אינו כולל הקמת תשתית לאומית בחישוב קוונטי.
- 3.1.7. דוח הוועדה כלל גם פירוט של עלויות הפרויקט המוצע, לוחות זמנים, פירוט לגבי הכשרת כוח האדם וקשר עם התעשייה ומערכת הביטחון.
- 3.1.8. לפרטים נוספים אודות הצעה זו ראו את דוח ועדת התוכנית האקדמית מטעם ות"ת בראשותו של פרופ' אורי סיון.

## **3.2. דוח צוות התייעצות לנושא הפן התעשייתי בתוכנית הקוונטים הלאומית (רשות**

### **החדשנות בשיתוף מפא"ת)**

- 3.2.1. צוות התייעצות המליץ על מספר צעדים עבור הפן התעשייתי בתוכנית הקוונטים הלאומית:
- 3.2.1.1. הקמת מאגד מגנ"ט בתחום החישה הקוונטית המדויקת. המאגד המוצע כולל שלושה תחומי עיסוק: תחום הזמן והתדר, תחום החישה המגנטית ותחום חישת הגרביטציה. הצוות העריך את עלויות המאגד בכ-45 משי"ח על-פני 3 שנים, כולל השתתפות התעשיות, מהם כ-30 משי"ח השקעה ממשלתית. ההערכה התקציבית הני"ל הייתה נכונה לשעתו, ובזמן כתיבת מסמך זה, הצעת חברי המאגד שקיבלה אישור עקרוני עמדה על כ-55 משי"ח ל-3 שנים. בשלב זה, המאגד בתהליכי הקמה וניסוח תוכניות עבודה מפורטות, שצפויות להיות מאושרות בסוף המחצית הראשונה של 2019. כמו כן, נבחנת אפשרות להרחבת מאגד זה למאגד דו-לאומי בשיתוף גרמניה.
- 3.2.1.2. הקמת תשתית מחקר אקדמית, לרבות מרכזי מו"פ אקדמיים יעודיים לתחום הקוונטים.
- 3.2.1.3. הקמת מרכזי מו"פ יישומיים באופן מדורג לאורך 5 שנים, בעלות כוללת של כ-100 משי"ח על-פני 5 שנים.
- 3.2.1.4. ביצוע עבודת מטה מעמיקה בנוגע לתשתיות הפיסיות הגדולות, על-מנת להעריך באופן מדויק את הצרכים ואת המשמעויות התקציביות.
- 3.2.1.5. מימוש מרחב עבודה בכל מרכזי מו"פ יישומי, בעלות של עד 10 משי"ח נוספים לתקציב כל מרכזי מו"פ.
- 3.2.1.6. בחינת נושא שיעור ההשתתפות העצמית של האוניברסיטאות והתעשיות במימוש התוכנית הלאומית.
- 3.2.1.7. שילוב פורשי תעשייה במסגרת מרכזי המו"פ היישומיים בתקציב של כ-13 משי"ח על-פני 5 שנים.
- 3.2.1.8. שילוב גופים תעשייתיים בתוכניות הלימוד הייעודיות בתחום הקוונטים באקדמיה.

- 3.2.1.9. עבודה משותפת של גופי תעשייה ואקדמיה, להגדרת התמריץ לתעשיות להוציא את כוח האדם שלהן לתארים מתקדמים רלוונטיים.
- 3.2.2. סה"כ ההשקעה הממשלתית שהומלצה על-ידי הצוות, מעבר לתוכנית האקדמית, מסתכם ב-153 משי"ח על-פני 5 שנים.
- 3.2.3. הדוח כלל גם הצעות נוספות שנבחנו על-ידי הצוות, וכן סיכום הערכת עלויות.
- 3.2.4. לפרטים נוספים ראו מסמך צוות ההתייעצות של הרשות לחדשנות בשיתוף מפא"ת.

#### 4. רציונל עבודת הוועדה

עד כה, מרבית פרויקטי פורום תל"מ<sup>7</sup> עסקו במימוש תשתית פיסית משמעותית עבור תחומים, שזוהו על-ידי חברי הפורום, כאסטרטגיים לעתיד המחקר והפיתוח במדינת ישראל. בבואנו לעבודת ועדה זו, היה ברור כי יש לבחון את שאלת התשתיות לתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים בראייה לאומית רחבה יותר. גם בעבודת הוועדה האקדמית שעל בסיסה הובאה ההצעה לשולחן תל"מ, נאמר כי יש לראות את התוכנית האקדמית כחלק מתוכנית לאומית כוללת יותר. בנוסף, התוכנית האקדמית, מטבעה, עסקה בזיהוי וגיבוש הצרכים למערכת האקדמית בלבד, וזו לתקופה מוגבלת של חמש שנים. עבודת הצוות שהוקם ברשות החדשנות בשיתוף מפא"ת נועדה להשלים הסתכלות בראי התעשייה, מעבר לצרכים האקדמיים שהוגדרו.

כבר בתחילת עבודת הוועדה התברר כי אופי הפעילות הנדרשת עבור תחום זה מתבטא בתוכנית לאומית רחבה ומקיפה יותר מהמנדט הרגיל של פורום תל"מ, וכי התקציבים הנדרשים למימוש תוכנית לאומית לתחום מדעי זה גדולים מהתקציבים הסטנדרטיים של שותפי תל"מ, הנשענים באופן עקרוני על התקציבים השוטפים של הגופים.

עבודת הוועדה נעשתה לכן מתוך תפיסה כוללת של צרכי האקדמיה, התעשייה הקיימת והעתידית, ומערכת הביטחון, בראייה רחבה מעבר לתשתיות הפיסיות. על-מנת למצב את ישראל למול התוכניות במדינות אחרות, נדרשת התייחסות בראש ובראשונה לפערי ההון האנושי ולא רק לתשתיות הפיסיות. חשוב לציין שתהליכי הכשרת כוח אדם בתחום זה דורשים זמן רב, ולכן הכרחי להתחיל תהליכים אלו מוקדם ככל הניתן.

יצוין עוד כי במקביל לעבודת ועדה זו, מתקיים גם תהליך לבחינת המיזם הלאומי לחוסן מדעי-טכנולוגי בנושא 'מערכות נבונות', פרי יוזמת רוה"מ שריכזה הוטל על פרופ' אלון במילי יצחק בן-ישראל ופרופ' אביתר מתניה. כחלק מעבודה זו, הוקמה תת-ועדה לנושא כוח המחשוב הדרוש למערכות הנבונות העתידיות. תת-ועדה זו עוסקת הן בצרכים לתשתיות חישוב חזק 'רגילות' (חישוב-על ותשתיות ענן), והן בנושא הקוונטי. על מנת לסנכרן את עבודת שתי הוועדות, הוסכם על שותפי תל"מ ועל מובילי המיזם כי ד"ר ארנה ברי תעמוד בראש שתי הוועדות, שכן יש ביניהן חפיפה משמעותית.

על כן, במסמך זה אנו מביאים המלצה לתוכנית לאומית כוללת לתחום מדע וטכנולוגיות קוונטיים הנשענת על תוצאות בחינת המסמכים המקדימים שהונחו על שולחן תל"מ, אך מקיפה היבטים רבים מעבר לתשתית גרידא. בהמלצות שיובאו בהמשך מסמך זה, אנו כוללים את התכולות הנדרשות, את גובה ואופן החלוקה (ברמת הפעילויות העיקריות) של התקציב הנדרש, מזהים מרכיבים הנמצאים בשלבי מימוש שונים, ומנתחים את ההמלצה בחתכים שונים, כולל חתך גופי התקצוב העיקריים (אקדמיה/ביטחון/תעשייה), חתך הון אנושי לעומת תשתית חומרה, ועוד.<sup>8</sup>

<sup>7</sup> פורום (וולונטרי) של ות"ת, הרשות לחדשנות, משרדי הביטחון, מדע, אוצר, האקדמיה הלאומית למדעים, ולעתים גופים נוספים המצטרפים לפי נושא עניין ספציפי, שמנהלים במשותף פרויקטי תשתית לאומית למחקר.

<sup>8</sup> תכנון תקציבי מפורט יבוצע על-ידי הנהלת התוכניות וגופי התקצוב במהלך שלב ההתארגנות.

## 5. אפיון הצורך והתועלות הצפויות

### 5.1. אפיון הצורך

5.1.1. תורת הקוונטים מתארת כאמור תופעות הבאות לידי ביטוי במערכות פיסיקליות קטנות כגון אטומים, יונים, פוטונים, ועוד. התכונות והתופעות הייחודיות של הפיסיקה הקוונטית מאפשרות מימוש מדידים אולטרה-מדויקים, הצפנה עמידה בפני ציטות ברמה הפיסיקלית הבסיסית ויכולות סימולציה וחישוב מסוימות. באופן טיפוסי, ההתקנים הקוונטיים מציגים רמות ביצועים גבוהות בהרבה מכל חלופה 'קלאסית' אחרת, ובמקרים מסוימים מציגים יכולות שלא ניתן להשיג כלל ללא הטכנולוגיה הקוונטית.

5.1.2. נראה כי התחום הקוונטי יישאר רלוונטי ופורץ דרך למשך שנים רבות, וההכרה בפוטנציאל העצום הטמון בו הביאה מדינות רבות להשקעות ענק בתחום בשנים האחרונות, כפי שפורט בסעיף 2.1 לעיל.

5.1.3. גם חברות מסחריות גדולות, וביניהן Google, Microsoft, Intel, Toshiba, Alibaba, Airbus, Honeywell, Citibank ו-IBM, משקיעות משאבים משמעותיים בקידום התחום ובפיתוח יישומים. במקרים רבים מצליחות החברות לגייס לשורותיהן חוקרים אקדמיים ומפתחים מובילים, והיקף ההשקעות התעשייתיות מוערך במאות מיליוני דולרים לשנה.

5.1.4. השקעת המשאבים הרבים בעולם מעידה על ההבנה כי פריצות הדרך המשמעותיות שהתחום צפוי להביא, יובילו לפתרונות לאתגרים גלובליים, לצמיחה כלכלית משמעותית וליתרונות בזירה הביטחונית.

5.1.5. על-מנת להבטיח את חוסנה הלאומי של מדינת ישראל, עליה להשקיע משאבים בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים. בשלב זה, למדינת ישראל ישנה הזדמנות להשתלב כשחקן מפתח בתחום, ותהיה לכך השלכה כלכלית אדירה. ישראל צריכה לכוון להובלה היכן שידה משגת, שכן טכנולוגיות קוונטיות עתידות להשתלב במנעד רחב של יישומים, המושפעים בחלקם כבר היום מטכנולוגיות אלו.

### 5.2. תועלות צפויות (בחלוקה לתתי-תחומים)

5.2.1. לתחום **החישה הקוונטית** יתרונות משמעותיים ומגוונים בשל הרגישות הגבוהה של תופעות קוונטיות שונות ומשום שהתקנים מסוג זה מסוגלים להגיע לרמות דיוק גבוהות שלא ניתן להשיג באמצעים אחרים. להלן מספר דוגמאות של חלק מהיישומים בתחום זה:

5.2.1.1. ביקוש הולך וגדל לחיישנים מדויקים יותר בתחום הזמן והתדר לתקשורת, בנקאות, כלי תחבורה אוטונומיים ועוד. רוב התשתיות המדינתיות הקריטיות מסתמכות על רכיבי GPS למדידת זמן. אלו נתונות לסכנות אבטחה חמורות, העלולות להוביל לקריסת אותן תשתיות. קל למשל לדמין את משמעות קריסת רשת ה-GPS על רשת החשמל או על תחבורה המבוססת על רכבים אוטונומיים. איומים אלו מדגישים את הצורך בתשתיות זמן ותדר שאינן תלויות במערך ה-GPS. כבר בשנת 2015, נתח השוק הגלובלי

לטכנולוגיות מדידות זמן הגיע ל- 514 מיליון דולר. עד 2024 נתח שוק זה ושוק הניווט עתידיים להגיע ל-15.2 מיליארד דולר<sup>9</sup>.

5.2.1.2. בתחום החישה המגנטית הקוונטית, כבר היום ניתן למצוא שימוש מסחרי במגנטומטרים קוונטיים, אך השימוש בהם מועט בעיקר עקב העלות הגבוהה שלהם. הרגישות הקוונטית מאפשרת הגדלת טווחי הגילוי של מטרות מסוג נתון, מזעור החיישנים, והורדת הדרישות המערכתיות במערכות בהן הם משולבים. נתח השוק הגלובלי הצפוי בתחום זה מוערך ב-4.13 מיליארד דולר ב-2022.

5.2.1.3. תחום חישת הגרביטציה מספק מידע בנוגע למבנה הגיאופיסי במיקום מסוים, ולכן נחוץ לגילוי גז ונפט, מיפוי תת-קרקעי, וחיזוי רעידות אדמה. המגבלה העיקרית לשילוב טכנולוגיות קוונטים ביישום זה היא הקטנת המערכות ויכולת עבודה בסביבה בלתי מבוקרת, מבלי להתפשר על רגישויות המדידה וביצועים נוספים. נתח השוק הגלובלי הצפוי בתחום זה מוערך ב-1.8 מיליארד דולר עד 2024.

5.2.2. **מחשבים קוונטיים** צפויים לפתור בעיות מסוימות ביעילות גבוהה הרבה יותר משניתן לפתור במחשבים רגילים. פיתוח מחשב קוונטי יספק בעתיד את פריצת הדרך המשמעותית ביותר בעולם המחשוב וההצפנה, ויעלה את חשיבותם של תחומי המחקר הנכללים תחת חישוב קוונטי. מלבד זאת, פיתוח תחום המחשוב הקוונטי יתרום רבות גם לעולמות תוכן נוספים, ביניהם ניתן למנות: בינה מלאכותית, תכנון חומרים, פיתוח תרופות, מיצוי מידע מודיעיני ואחר ממאגרי מידע גדולים, השוק הפיננסי, שוק התחבורה החכמה העתידית ועוד. נתח השוק הגלובלי הצפוי בתחום זה מוערך ב-5 מיליארד דולר עד 2024.

5.2.3. שימוש בתופעות קוונטיות צפוי לאפשר **תכנון וייצור חומרים חדשים**, בעלי תכונות פיזיקליות חדשות, כגון רמת המוליכות החשמלית, מוליכות החום והפעילות האופטית של החומר. החומרים הקוונטיים חיוניים הן לצורך מימוש חישוב, תקשורת, חישה וסימולציות קוונטיים, והן בפני עצמם כתחום ממנו עשויים להיוולד שימושים חדשים. נתח השוק הגלובלי הצפוי בתחום זה מוערך ב-7.8 מיליארד דולר לפחות עד 2022<sup>10</sup>.

5.2.4. **סימולטורים קוונטיים** מאפשרים לבצע סימולציות בתחומים שונים, בעיקר בכימיה ובפיזיקה, אשר בשל מורכבות המערכות המסומלצות לא ניתן לבצעם במחשבים רגילים. נתח השוק הגלובלי הצפוי בתחום זה מוערך ב-2.6 מיליארד דולר עד 2024.

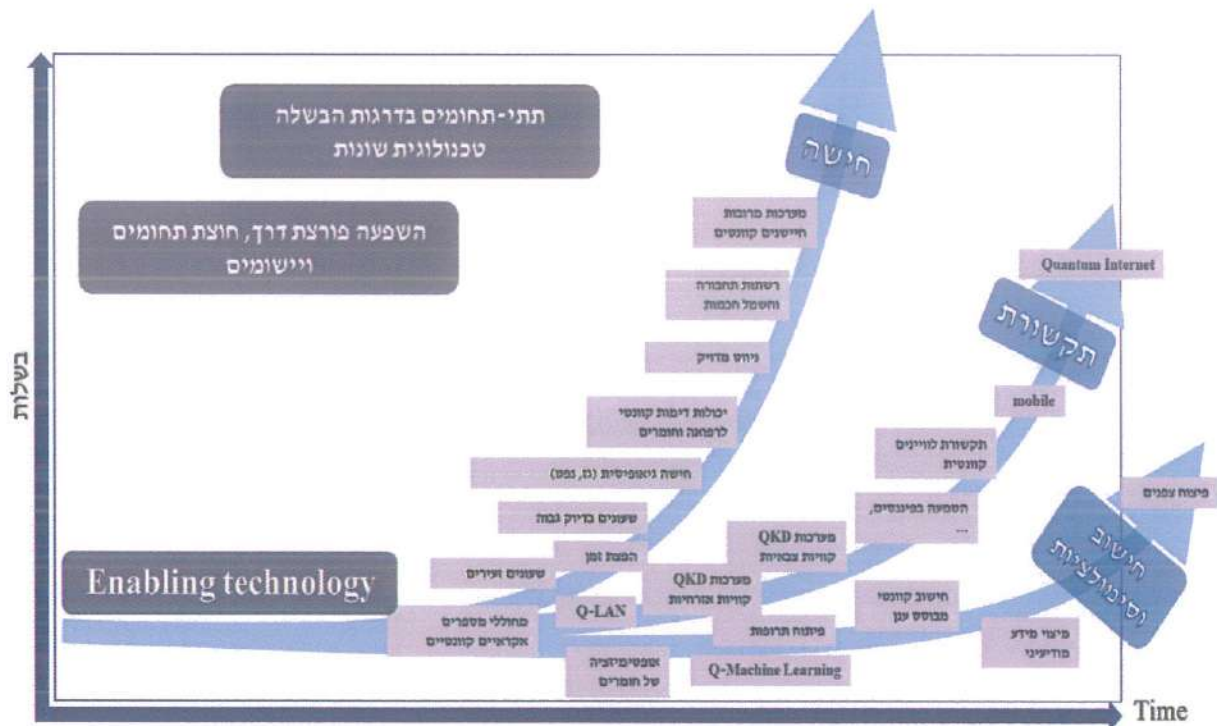
5.2.5. שימוש בעקרונות ותופעות מהפיסיקה הקוונטית מאפשר לממש **מערכות תקשורת** עמידות בפני ציטות ברמה הפיסיקלית (כלומר לא מסתמכות רק על קושי מתמטי ביצירת/פענוח המפתח). כתוצאה מעקרונות הפיסיקה הקוונטית, בערוץ תקשורת מוצפן קוונטית, יריב שמנסה לצותת למידע המועבר בערוץ לא יכול שלא להותיר חותם ולהתגלות באופן מידי. המובילה העולמית הברורה בתחום התקשורת

<sup>9</sup> רוב הנתונים בפרק זה אודות נתחי השוק הגלובליים לקוחים ממצגתו של פרופ' דנה אנדרסון. מצגת זו הוצגה בפני פורום משרד האוצר בזמן שהותו בארץ, במסגרת עבודת הוועדה.

<sup>10</sup> ההערכה מתייחסת לשוק הכולל גם נקודות קוונטיות הרלוונטיות באופן חלקי להגדרת התחום על-פי הוועדה Research and Markets – Global Quantum Dots Market, Analysis and Forecast: 2017-2022

הקוונטית היא סין, שמימשה הן מערכת יבשתית באורך 2000 ק"מ המשרתת את השוק הפיננסי הסיני, והן הדגימה מדעית תקשורת קוונטית באמצעות לוויין. כיום, בשל מגבלות הטכנולוגיה, הקצב של מעי תקשורת קוונטיות מאפשר בעיקר הפצת מפתחות הצפנה ולא הצפנה של כלל התעבורה. מפתחות אלו מספיקים, כדי לממש את הרובד הבסיסי של תקשורת מאובטחת. עם התקדמות הטכנולוגיה, קצבי העבודה של המערכות עולים באופן עקבי, וצפוי כי בעתיד כלל התקשורת תוכל להיות מוצפנת קוונטית. מלבד הפצת מפתחות, ישנם עוד תחומי יישום לתקשורת קוונטית שנמצאים פחות במיקוד המחקרי והיישומי בעולם, אך יכולים להתפתח בעתיד. אלו כוללים למשל חתימות דיגיטליות קוונטיות, מחוללי מספרים אקראיים קוונטיים ועוד. נתח השוק הגלובלי הצפוי בתחום זה מוערך ב-7.6 מיליארד דולר עד 2024.

התרשים הבא מדגים באופן איכותי בלבד את צפי התפתחות תחום מדע וטכנולוגיות קוונטיות בחלק מתתי-התחום כדוגמה:



איור 3: צפי התפתחות תחום מדע וטכנולוגיות קוונטיות בחלק מתתי-תחומים כדוגמה – תרשים איכותי בלבד

כפי שניתן לראות, תתי-התחומים השונים מתפתחים ברמת הבשלות הטכנולוגית בקצבים שונים זה מזה, זאת בהתאם לסטטוס הפיתוח הנוכחי. לאורך תהליך ההבשלה ניתן לראות דוגמאות לטכנולוגיות ויישומים שצפויים לפרוץ, טכנולוגיות אלו חוצות-תחומים ומאפשרות קפיצת מדריגה בפריסה רחבה.

תחום מדע וטכנולוגיות קוונטיות בצמיחה מתמדת, והעיסוק בו רק הולך ומתעצם בקהילה העולמית. כאמור, מדינת ישראל עתידה להפיק תועלות רבות, כפי שפורטו מעלה, אם תבחר להשקיע משאבים בתחום זה. מסמך זה יסקור בהמשכו את מסקנות הוועדה מעבודת המחקר שביצעה, וכן יפרט את המלצותיה של הוועדה לקידום תחום מדע וטכנולוגיות קוונטיות.

## 6. מסקנות

בעקבות המחקר שהתבצע על-ידי הוועדה, הבנת המצב במדינת ישראל כיום, דיונים רבים בין חברי הוועדה וכן דיונים עם גורמים מחוץ לוועדה ואף מחו"ל, התגבשו **המסקנות** העיקריות המובאות להלן. בהמשך, בפרק 7, נביא את **המלצות** הוועדה למימוש התוכנית הלאומית.

6.1. תחום מדע וטכנולוגיות קוונטיים הינו תחום אסטרטגי, שעשוי להוות את אחד התחומים המשפיעים ביותר על המדע, הכלכלה והביטחון בשנים הבאות. דבר זה בא לידי ביטוי בין היתר בתוכניות הלאומיות הגדולות שממומשות וימומשו בכלל המדינות המובילות בעולם, ובהשקעות הגדולות, כולל על-ידי גורמים תעשייתיים משמעותיים בעולם.

6.2. עם זאת, התחום עדיין בשלבי התפתחות ראשוניים יחסית, ובהתארגנות נכונה ישראל יכולה לקחת חלק משמעותי במהפכה הקוונטית.

6.3. מדינת ישראל נבנתה בעבר במידה רבה על תחומי ה-ICT, והסייבר. תחום הקוונטים מהווה את הצעד הבא בהתפתחות תחומים אלו, ועל ישראל להמשיך ולפתח את יתרונה בתחומים אלו, בכיוון מדעי-טכנולוגי-יישומי משמעותי זה.

6.4. תחום מדע וטכנולוגיות קוונטים איננו המשך פשוט להתפתחות של תחומי ה-ICT או תחומים טכנולוגיים אחרים, כי אם שינוי פרדיגמה של ממש, מהרמה הפיסיקלית הבסיסית ועד רמת היישומים והפתרונות האפשריים בטכנולוגיות אלו - שינוי פרדיגמה שבחלק מהמקרים ייצור יכולות חדשות ומשנות-משחק, שלא ניתנות כלל למימוש בטכנולוגיות 'קלאסיות'. שינוי פרדיגמה שכזה מחייב, על מנת שישראל תהיה רלוונטית, פיתוח אקו-סיסטם מתאים, מגוון ורחב, וכן צירוף דיסציפלינות ויצירת דיסציפלינות חדשות, שבהווה אינן מיוצגות כמעט או כלל במדינת ישראל.

6.5. ברוב התחומים המצב בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים בישראל הינו בתולי יחסית. יתר על כן, זהו תחום מורכב, ובהיבטים מסוימים נשען על פיתוח ידע וחומרה עמוקים ומסובכים. **מסקנת הוועדה לכן היא שתוכנית לאומית לתחום זה איננה יכולה להיות תחומה למסגרת זמן של 5 שנים בלבד, ועל אף שההמלצות והתקציב שגובשו מתרכזים בחומש הראשון, יש לראות זאת כחלק ממהלך אסטרטגי ארוך טווח לשנים ארוכות, מעבר לחומש הראשון. זוהי גם נקודת המבט במדינות רבות בעולם, כולל האיחוד האירופי, סין וארה"ב.**

6.6. **הפער העיקרי שזוהה הוא בהון האנושי.** זהו משאב הנמצא בחסר באקדמיה וכפועל יוצא מכך גם בתעשייה. חלק מהמסקנות וההמלצות להלן יתייחסו להון האנושי ולדרכים לפיתוחו, אם בהגדלת מספר העוסקים בתחום, בהכשרתם והכוונתם, ואם בפלטפורמות החומרה הנדרשות לפיתוחו בחלק מהמקרים. יש לציין כי משך הזמן הנדרש להכשרת כוח האדם בתחום הינו ארוך (8 שנים), ולכן יש הכרח להתחיל באופן מידי בהכשרתו.

6.7. הוועדה בחנה את חלוקת תתי התחומי שהציעה ועדת ות"ת והחליטה לאמצם. לאור האמור, אנו מזהים את התחומים העיקריים הבאים תחת נושא מדע וטכנולוגיות קוונטים:

6.7.1. חישה קוונטית

6.7.2. חישוב קוונטי

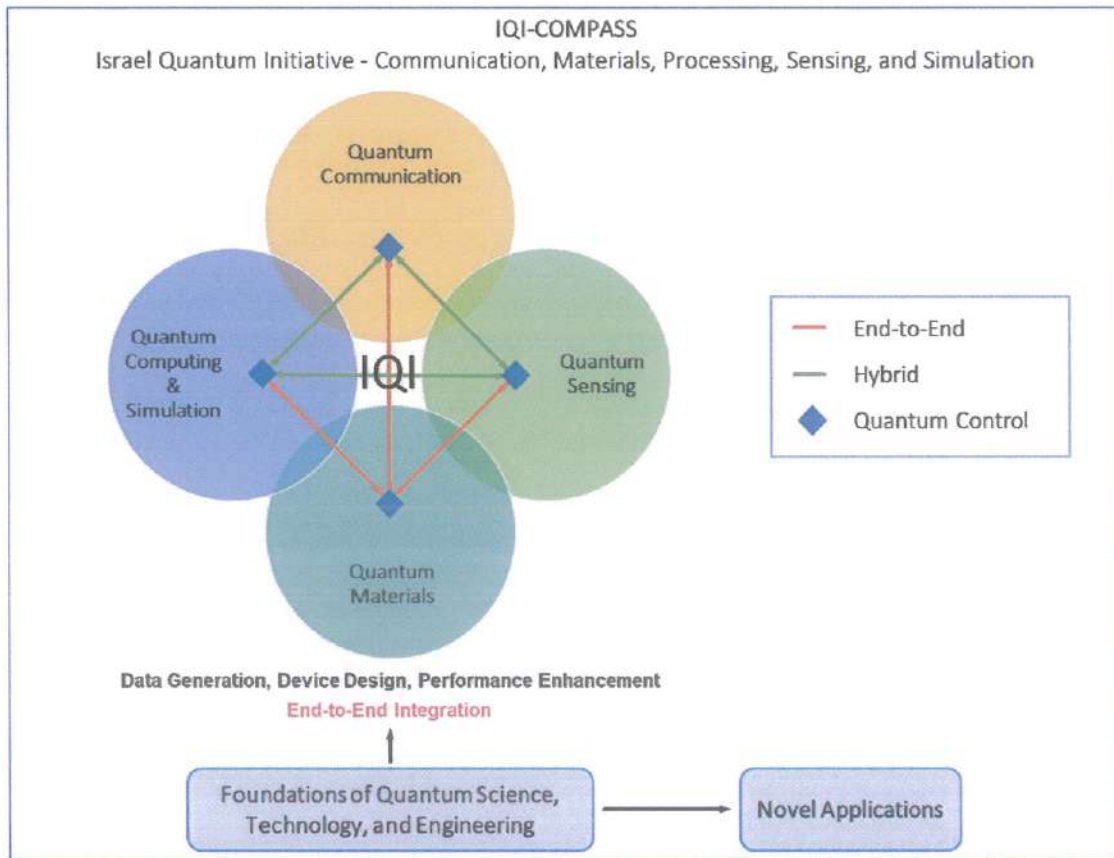
6.7.3. חומרים קוונטים

6.7.4. סימולציות קוונטיות

6.7.5. תקשורת קוונטית

6.7.6. יסודות תורת הקוונטים וטכנולוגיות חדשניות

6.8. על אף שניתן לחלק את תחום מדע וטכנולוגיות קוונטים כך, מסקנת הוועדה היא כי קיימים קשרים בין התחומים, כמודגם באיור הבא:



איור 4: הקשרים בין תתי-התחומים השונים

תתי-התחומים גם חופפים חלקית. לדוגמה, פיתוח חיישנים קוונטיים בעלי רגישות לפוטונים בודדים, נוגע הן לתחום החישה והן לתחום התקשורת הקוונטית. פיתוח חומרים קוונטיים יכול לתרום לפיתוח אפשרויות יישום נוספות במחשוב קוונטי ובחישה קוונטית. תקשורת קוונטית, שבמרבית המקרים תשמש להצפנה ותקשורת חסינה ברמה הפיסיקלית, עשויה להוות רכיב מפתח במחשבים קוונטיים על מנת להעביר את המידע הקוונטי בין חלקי המחשב השונים או בין מעבדים שונים. כני"ל לגבי העברת מידע קוונטי ברשתות קוונטיות בין החיישנים לבין מערכות העיבוד (האינטרנט הקוונטי). קיימת סינרגיה בין תתי-התחומים השונים ולכן לשם הגדלת הסיכוי לקבלת תוצאות קיים צורך בקידום כלל התחומים. בנוסף, יסודות המדע וטכנולוגיות הקוונטים מהווים את הבסיס לפיתוחים היישומיים בכל תתי-התחומים הנ"ל, ואף עשויים לפתוח תחומי יישום חדשים בעתיד.

לכן, הגישה הנכונה הינה גישת 'קצה לקצה', בה ברמת החזון, כלל התהליך של יצירת המידע, העברתו, עיבודו, והיזונו חזרה, נעשים כולם בערוץ הקוונטי. גישה זו תצריך בחלק מהמקרים פיתוח טכנולוגיות היברידיות (בין תתי תחומים קוונטיים, או בין פלטפורמות



פיסיקליות קוונטיות שונות, ואף בין טכנולוגיות קוונטיות וקלאסיות). על כן כאמור, **מסקנת הוועדה היא כי יש לפעול לקידום כלל תתי התחומים (גם אם לא במידה זהה).** 6.9. המצב הקיים בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים בישראל איננו אחיד על פני תתי-התחומים.

6.9.1. בתחום **החישה הקוונטית** קיימת בישראל פעילות תעשייתית משמעותית (במספר קטן של חברות) למעלה מ-10 שנים. פעילות זו מחוברת במידה רבה למחקר האקדמי בתחום החישה הקוונטית, המהווה את אחד מתתי התחומים המובילים באקדמיה בישראל, וישנן מספר דוגמאות להעברת ידע מהאקדמיה לתעשייה בתחום זה. במקרים מסוימים, טכנולוגיה קוונטית כבר משולבת במערכות ביטחוניות מבצעיות, לעיתים כחלק מפתרון בעיות מהבוערות ביותר, המטרידות את מערכת הביטחון. ניתן לומר כי הרמה האקדמית, ועוד יותר מכך הרמה התעשייתית בתחום זה בישראל, גבוהות מאד אך עדיין מצומצמות ביחס לפוטנציאל. לכן, בתחום החישה הקוונטית, בטכנולוגיות בהן קיימת כבר פעילות תעשייתית משמעותית, **מסקנת הוועדה היא כי ניתן לבסס את מעמדה של ישראל כמובילה ומתחרה משמעותית בזירה העולמית. על מנת לבצע זאת, יש צורך בהרחבה והאצה משמעותית של הפעילויות הקיימות.** עם זאת, הפעילות התעשייתית מוגבלת בעיקר לתעשייה הביטחונית, ולנישות מסוימות של החישה הקוונטית, ויש מקום לפיתוח מדע ותעשיות חדשות בתחום זה. לשם כך יש ליצור את התנאים להקמת חברות חדשות ולמשיכת תעשיות קיימות לכניסה לתחומים אלו, כדי לנצל את המצוינות הקיימת לפיתוח יישומים חדשים.

6.9.2. העיסוק ב**חישוב וסימולציות קוונטיות** (שלעיתים מקבלים התייחסות נפרדת ולעיתים נדונים בכפיפה אחת) בארץ, גם ברמה האקדמית הבסיסית ובוודאי בתעשייה, מוגבל ביותר וזאת בניגוד לפוטנציאל העצום הטמון בו והשלכותיו על מגוון תחומים רחב, הן בפן האזרחי-כלכלי והן בפן הביטחוני. ההשקעות הנדרשות למדינת ישראל על-מנת לבסס מעמד דומה למדינות אחרות בתחום הן גדולות. מאידך, הנחת העבודה היא שכאשר טכנולוגיות החישוב הקוונטי יפרצו בעולם, צפוי כי יהיו מגבלות רכש עליהן בישראל (כפי שכבר קורה בתחומים מבוססים יותר כגון חישה קוונטית). על כן, **מסקנת הוועדה היא שבניגוד לתחום החישה הקוונטית ביישומים הקיימים, ישראל לא תוכל בשנים הקרובות להפוך למובילה עולמית בתחום החישוב והסימולציות הקוונטיות, אך בה בעת היא איננה יכולה להרשות לעצמה יצירת פער בלתי ניתן לגישור ביחס להתפתחות העולמית.** הוועדה סבורה כי בתחום זה על ישראל לפתח יכולות של 'מדינת סף' בחישוב וסימולציות קוונטיות, במובן של פיתוח התחום במידה כזו שלמול ההתפתחות העולמית יישמר פער שניתן לגישור אם בנקודת זמן עתידית, תתקבל החלטה מתאימה. פתיחת פער גדול מידי עלולה להיות מסוכנת אסטרטגית, ועלולה לחשוף את ישראל לחולשה משמעותית ביחס לעולם הן בפן הביטחוני והן בפן הכלכלי.

הוועדה הסיקה כי סביר שהיתרון היחסי שישראל תוכל לפתח מתמקד בתחומי הרבדים העיליים של החישוב והסימולציות הקוונטיות, דהיינו רובדי התיאוריה, האלגוריתמיקה, תיקון שגיאות קוונטי, אימות, תוכנה וכן בהיבטים מסוימים של

החומרה הפריפריאלית של המחשבים הקוונטיים (כלומר לא הליבה הקוונטית עצמה של המעבדים, אלא הטכנולוגיות הקלאסיות של שליטה ובקרה תוך ממשק עם הליבה הקוונטית). עם זאת, **מאחר וכנראה לא ניתן יהיה לרכוש את הליבה הקוונטית עלינו לפתח את ההון האנושי הנדרש ורמה טובה מספיק גם בתחום החומרה. פיתוח ההון האנושי והחומרה כרוכים בהשקעה כספית משמעותית.**

6.9.3. בדומה לתחום החישה הקוונטית, המחקר בתחום **החומרים הקוונטיים** מפותח מאוד באקדמיה הישראלית. זהו תחום העומד בפני עצמו, וכן מזין את שאר תחומי היישום בטכנולוגיות הקוונטיים. היכולת להתאים את החומרים לדרישות החוקרים הכרחית לפיתוח יכולות מתקדמות הן בחישה והן בחישוב. התאמות כאלה קשה לבצע באמצעות מעבדות בחו"ל ולקרבה הגיאוגרפית יש חשיבות רבה, יתרה מכך, יתכן שגם לא ניתן יהיה לרכוש חומרים מסוימים העומדים בבסיס טכנולוגיות קוונטיות בעלות חשיבות אסטרטגית. לכך מצטרף החוסר בתעשייה הישראלית בתחום החומרים בכלל, ובתחום החומרים הקוונטיים בפרט.

6.9.4. בתחום **התקשורת הקוונטית** כמעט ואין פעילות באקדמיה ובתעשייה הישראלית. זהו תחום בעל חשיבות אסטרטגית, הדורש פיתוח מדעי אקדמי קודם לפנייה לתעשייה. ההשקעה המזערית עד כה בתחום זה בארץ לא תאפשר אפילו פיתוח נישות של תחום התקשורת הקוונטית, ועל כן מסקנת הוועדה היא שגם אם תחום זה איננו במוקד העיסוק הנוכחי, הוא חשוב דיו להרחבה משמעותית של העיסוק בו.

6.10. הוועדה מצביעה על כך ש**רובד המדע הגנרי והפיתוח של טכנולוגיות חדשות בתחומי הקוונטים, מהווים נדבכים קריטיים ורוחביים**, שיש להמשיך ולפתח באופן משמעותי, על מנת להזין את התחומים המדעים והיישומיים הני"ל ולאחר כיוונים חדשים. זהו המסד עליו נבנים כלל התחומים, ויש להקדיש לו את האמצעים הנדרשים.

6.11. הוועדה מצביעה על חשיבות השת"פ הבינ"ל בכל הרבדים - אקדמי, תעשייתי, וביטחוני, לשיפור היכולות הישראליות בתחום. חלון ההזדמנויות לשת"פ בינ"ל כיום הינו ייחודי הן בהיבט התוכניות הבינ"ל הנמצאות בתהליך הקמה, והן מחשש להגבלות הצפויות על שיתוף פעולה, עם הבשלת הטכנולוגיה בשנים הקרובות בעקבות ההשקעות הגדולות. **מסקנת הוועדה היא כי יש לחזק ולמקד את השת"פ הבינ"ל הייעודי בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים, ולסייע למנגנוני השת"פ הקיימים בגופי הביצוע השונים, הן ברמה המקצועית הייעודית לתחום הקוונטים, והן בתקציב.**

6.12. כחלק מהראייה הלאומית הכוללת, המביאה בחשבון את פיתוח הידע המדעי, את הפיריון הכלכלי ואת החוסן הביטחוני, ועל סמך לקחים מתוכניות שונות הן בתחום הקוונטי בעולם והן בתחומים אחרים בישראל בעבר, **מסקנת הוועדה היא כי תוכנית לאומית מעין זו חייבת להיות מנוהלת הן ברמה האופרטיבית היום-יומית, והן ברמה האסטרטגית.** המנגנון הניהולי חייב להיות גמיש, זריז, מקצועי, ועצמאי ככל שניתן, תוך שמירת האינטרסים של כלל הגופים השותפים ובראייה כוללת ומאוזנת. **הכוונה איננה ליזום פלטפורמות תקצוב חדשות** (אלא אם תהיה לכך הצדקה מיוחדת. במקרה כזה יוגדר אופן מימוש הפעילות שלא באמצעות מנגנון קיים, בתיאום בין גוף התקצוב ממנו תנוהל הפעילות לבין מנהל התוכנית, ובאישור של ועדת ההיגוי), אלא להתבסס על הפלטפורמות התקצוביות הקיימות בגופי התקצוב באקדמיה, בתעשייה ובביטחון. על המנגנון הניהולי

להוות גורם בקרה ותיאום ביחס לגופי התקצוב, ובעל סמכות מתוקף היותו הזרוע האופרטיבית של ועדת ההיגוי. הוא יסייע בהכוונה ממוקדת של הפעילות בארץ, ומול שיתופי פעולה בין-לאומיים.

6.13. בהתייחס לתחום הימערכות הנבונות, מצאה הוועדה בתיאום עם תת-הוועדה לכוח המחשוב במיזם זה, כי תחום מדע וטכנולוגיות קוונטים, לא רק שאיננו מתחרה טכנולוגי ומדעי עם תחומי החישוב היקלאסיים, אלא במקרים רבים מהווה את ממשיכם הטבעי או הסימביוטי. **מסקנת הוועדה היא שאם יוקם מיזם חישוב-על ו/או ענן ל'מערכות נבונות' טבעי יהיה לבחון שילוביות ברבדים שונים בין שני המיזמים, ובעיקר בהיבטי החישוב הקוונטי.**

## 7. המלצות

לאור המסקנות שהוצגו בפרק 6, הוועדה ממליצה להקים בישראל תוכנית לאומית לתחום מדע וטכנולוגיות הקוונטים. משך התוכנית המומלצת הוא חמש שנים והיא תחל בשנה נוספת שתוקדש להתארגנות, למעט נושאים שכבר הותנעו בגופי התקצוב השונים שלא יעצרו ויעודכנו באופן שוטף על-ידי גוף הניהול של התוכנית בשיתוף עימם. התוכנית תתמוך בפעילות באקדמיה, במערכת הביטחון ובתעשייה האזרחית. המשך פרק זה יציג את מטרות התוכנית, האסטרטגיות המומלצות ותכולות התוכנית המומלצת. פרק 8 יציג את הפן התקציבי בחומש הראשון וניתוח שלו בחתכים שונים. פרק 9 יציג חזון להמשך התוכנית מעבר לחומש הראשון, ללא העמקה או הצגת תקציב מפורט. פרק 10 יציג את המשמעויות של אי-מימוש של התוכנית המומלצת, והישארות במצב הקיים. פרק 11 מסכם את העבודה.

### 7.1. תוכנית לאומית למדע וטכנולוגיות קוונטים ומטרות העל

מטרות העל של התוכנית המוצעת כוללות:

- א. יצירת תנאים שיאפשרו מחקר ברמה גבוהה והיקף ראוי של מחקר מדעי בסיסי בתחומים אלו בישראל (מטרה זו תומכת את מטרות העל הבאות, אך מהווה מטרת על בפני עצמה).
- ב. יצירת סביבה (אקו-סיסטם) שתאפשר התפתחות של תעשייה אזרחית בתחומים אלו בישראל, בפרט בתת התחומים המהותיים לתעשייה עתירת הידע בישראל.
- ג. קיום הידע בישראל יאפשר הבנה ופיתוח יישומים קריטיים למערכת הביטחון. ידע זה יאפשר זיהוי העיתוי הנכון ליישומים קריטיים, ושיתוף פעולה עם מדינות אחרות.

### 7.2. אסטרטגיה להשגת מטרות העל

לאור מטרות העל שגובשו, המלצת הוועדה היא שישראל תאמץ את האסטרטגיה הבאה בכדי לקדם את תחום מדע וטכנולוגיות הקוונטים ברמה הלאומית. חשוב להקדים ולהדגיש כי כל מרכיבי התוכנית צריכים להיות מנוהלים על בסיס מצוינות מדעית ומקצועית. כפי שצוין קודם, הכוונה הכללית היא להשתמש במנגנוני התקצוב התחרותיים הקיימים בגופי התקצוב (אלא אם במקרים מיוחדים יש ליצור מנגנון תחרותי מסוג חדש, מנגנון זה יוקם בתיאום בין גוף התקצוב ממנו תנוהל הפעילות לבין מנהל התוכנית, ובאישור של ועדת ההיגוי)

#### 7.2.1. הגדלת ההשקעה במחקר בסיסי במגוון התחומים של מדע וטכנולוגיות קוונטים

לפי המרכיבים הבאים:

- 7.2.1.1. הגדלת מספר החוקרים הראשיים באקדמיה (PIs) שעוסקים בתחומים שהוגדרו לעיל, גם באמצעות קליטת חוקרים חדשים וגם באמצעות סיוע למעבר חוקרים לתחומים אלו.
- 7.2.1.2. הגדלה וחיזוק של קבוצות מחקר קיימות באקדמיה שעוסקות בתחומים שהוגדרו לעיל.
- 7.2.1.3. הגדלת מספר התלמידים לתארים גבוהים ומשתלמי הבתר-דוקטורט (כולל מחו"ל) בתחומים שהוגדרו.
- 7.2.1.4. התאמת תוכניות הלימודים בלימודי ההסמכה בדיסציפלינות השונות ופיתוח תוכניות לימוד בתחום.

קשת הכלים הנדרשים לפיתוח המחקר וההוראה האקדמית מפורטים בדוח הוועדה המייעצת לות"ת. חלק זה בדוח אם כן, התבסס על מסקנות הוועדה המייעצת.

## 7.2.2. הגדרה של תחומי מיקוד לפעילות הלאומית הישראלית והגדרת אסטרטגיית

### השקעה מותאמת לתתי התחומים :

7.2.2.1. חישה קוונטית כתחום מיקוד בו יש לישראל ידע רחב יחסית, ופעילות להעברת ידע זה ליישומים ביטחוניים ולתעשייה האזרחית.

7.2.2.1.1. פיתוח יישומים ביטחוניים של תחום החישה הקוונטית.

7.2.2.1.2. פיתוח שיתופי פעולה בין האקדמיה לתעשייה שיאפשרו פעילות

תעשייתית בתחום החישה הקוונטית.

7.2.2.2. חישוב וסימולציות קוונטיים. היכולות הקיימות בישראל בתחום זה

מוגבלות מאוד, ומאידך חשיבות התחום לעתיד הינה עצומה בעיקר נוכח המשמעות האסטרטגית הפוטנציאלית. כאמור, מספר רב של מדינות ותאגידים בינ"ל משקיעים סכומי עתק בתחום זה. מטרת ההשקעה במסגרת התוכנית הלאומית הישראלית תהיה מחד פיתוח יתרון יחסי ברבדים העיליים של החישוב הקוונטי (תוכנה, אלגוריתמיקה וכדומה), ומאידך פיתוח חומרה בהיקף שיאפשר התקדמות מהירה במקרה שיתברר שמחשוב קוונטי הופך קריטי ליישומים ביטחוניים ו/או אזרחיים.

7.2.2.2.1. הקמת יכולת מינימלית בישראל בתחום חומרת המחשוב הקוונטי.

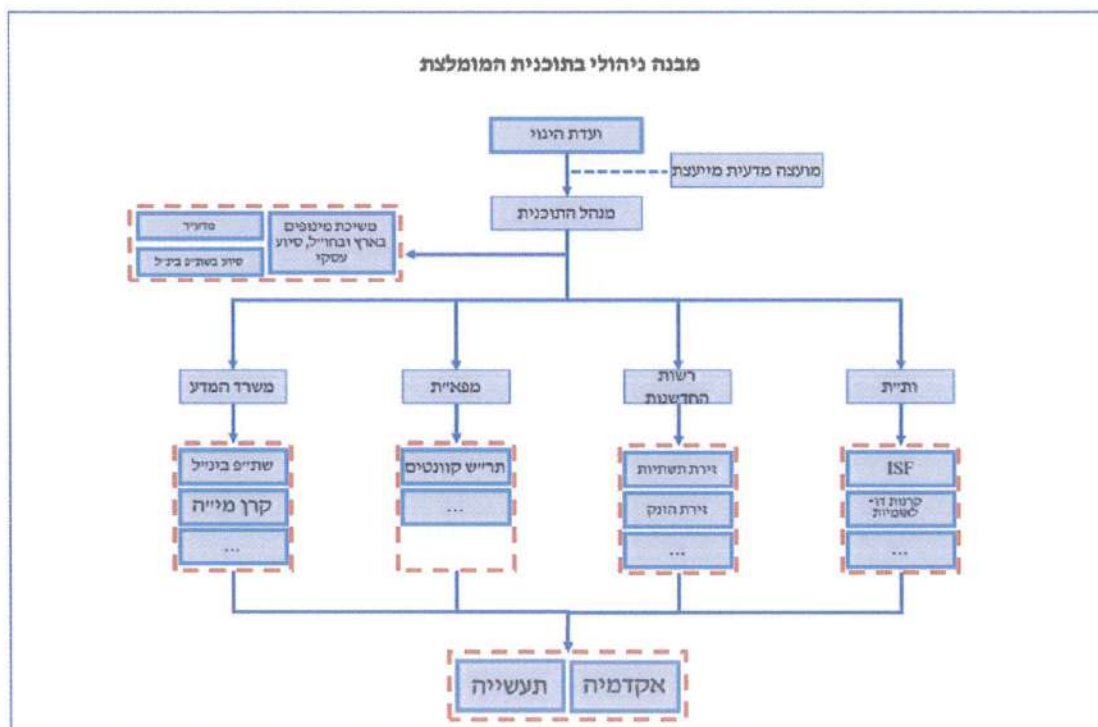
7.2.2.2.2. קידום עיסוק אקדמי ותעשייתי בתחומי הרובד העליון של מחשוב קוונטי.

7.2.3. ניהול התוכנית כתוכנית לאומית ע"י ועדת היגוי - בדומה לקיים בתוכניות לאומיות דומות במדינות אחרות.

## 7.3. מבנה ניהולי מוצע לתוכנית הלאומית

כאמור, על מנגנון הניהול להיות גמיש, זריז, בעל סמכות אופרטיבית, מקצועי, ועצמאי ככל שניתן, תוך שמירת האינטרסים של כלל הגופים השותפים ובראייה כוללת ומאוזנת. על כן מומלץ לקיים מנגנון ניהולי משולב של ועדת היגוי שלצידה מועצה מדעית מייעצת (scientific advisory board), ותחתיה גוף ניהולי אופרטיבי קטן בראשו עומד מנהל התוכנית, לבקרה ותיאום שוטף של התוכנית מול חלקיה השונים וגורמי הביצוע השונים.

להלן תרשים המתאר את המבנה הניהולי המוצע:



איור 5: תרשים המבנה הניהולי בתוכנית המומלצת

### 7.3.1. ועדת-היגוי

גרעין ועדת ההיגוי מורכב ממובילי הגופים השותפים בתל"מ. בהמשך ייתכן שוועדת ההיגוי תורחב בהתאם להצטרפות גופים המשתתפים במימון התוכנית או כאלו שמבוצעת בהם פעילות עיקרית.

תפקידי ועדת ההיגוי כוללים: אחריות לראייה מערכתית של הנושא הלאומי על כלל היקפו ומשמעויותיו – התווית מדיניות, סיוע מקצועי לגיבוש פתרונות, סיוע לפתיחת צווארי-בקבוק וכשלים חוצי-מערכות, אחריות לתעדוף מערכתי של כיוונים ומגמות לטיפול, אחריות לחלוקת התקציב, סיוע ליצירת קשרי-גומלין ושיתופיות בין מגזרים, החלטה על פרויקטים מאושרים ותקצובם, קבלת דוחות ביצוע ואישורם. ועדת ההיגוי תפקח על עבודת מנהל התוכנית. בקרה תקציבית ומשפטית תבוצע על-פי נהלי תל"מ. ועדת ההיגוי תתכנס מספר פעמים שנה (באופן טבעי בתדירות גבוהה יותר בשלבי ההקמה ולקראת סיום החומש הראשון).

### 7.3.2. מועצה מדעית מיעצת

המועצה המדעית המיעצת מורכבת ממומחים בעלי שם בתחום המדעי והטכנולוגי באקדמיה ובתעשייה (כולל מומחים מחו"ל), המכהנים בה באופן טיפוסי בהתנדבות (ייתכנו כיווי הוצאות מסוימים). המועצה מתרכזת, רובה ככולה, בנושאי מדע ומחקר (מוטה 'מדעי'), ולא בנושא סוגיות ומשמעויות למשק, לציבור, לכלכלה, נושאים חוצי-מערכות וגופים. עיקר ייעודה בהמלצה לתעדוף נושאי המחקר, כיווני המחקר, השתי"פ הבינלאומי המחקרי ותקציבי המחקר, ובקרה על איכות הפעילות

והעמידה בתכניות העבודה והיעדים. ממצאי המועצה המדעית המייעצת יהוו בסיס לדיון ועדת ההיגוי על אישור התקדמות המיזם ושינויים, אם נדרשים, בפעילות או בתקצוב.

### 7.3.3. מנהל התוכנית

מנהל התוכנית הינו ראש הגוף האופרטיבי הקטן, וכפופים לו צוות מצומצם של אנשי כספים, תפעול ומו"פ. הוא ממונה ע"י ועדת ההיגוי. גודל הגוף האופרטיבי הינו אנשים בודדים (כ-5 אנשים בלבד), ואין כוונה שהוא יכלול בתוכו מנגנון מורכב, שכן הוצאת הפעילויות לפועל צפויה להיות באמצעות גופי התקצוב (ות"ת, רשות החדשנות, מפא"ת, משרד המדע, ואחרים ככל שיצטרפו), ולפי כללי ההתקשרות שלהם. מנהל התוכנית אינו יו"ר ועדת-ההיגוי ואו יו"ר המועצה המדעית המייעצת. הוא מנהל את הגוף האופרטיבי, בכפיפות ליו"ר ועדת-ההיגוי תוך העזרות במועצה המדעית המייעצת, וגופי התקצוב. מטרת הגוף האופרטיבי היא ניהול, תיאום, בקרה וסיוע לגופי התקצוב ולגופי הביצוע באקדמיה ובתעשייה, ותפקידו לוודא שבכל גוף רלוונטי מבוצעת הפעילות שתוכננה, אושרה ותוקצבה במסגרת התוכנית. הגוף האופרטיבי יגדיר ביחד עם גופי התקצוב הרלוונטיים לכל פעילות בתוכנית, את מאפייני הקולות הקוראים או מנגנוני ההתקשרות, ויאשר תחת סמכות ועדת ההיגוי העברות כספים בהתאם לתוכנית תוך שמירה על ראייה לאומית רחבה ומאוזנת. מנהל התוכנית יעקוב ויבקר באופן שוטף אחר פעילויות התוכנית בגופים השונים וידווח באופן עיתי לוועדת ההיגוי. הוא יוכל להיעזר במועצה המדעית המייעצת, ובמדע"ר התוכנית כפי שיוסבר להלן. תחת מנהל התוכנית יתקיימו הפונקציות הבאות (לאו דווקא אנשים במשרות מלאות), מעבר לסיוע אדמיניסטרטיבי אליו לא נתייחס כאן:

7.3.3.1. מדע"ר התוכנית – מדע"ר התוכנית אחראי לפן המדעי בתוכנית בראייה לאומית רחבה. יעמוד לרשותו תקציב קטן לביצוע עבודות מטה וייעוץ. הוא יעמוד בקשר עם המועצה המדעית המייעצת מטעם הגוף הניהולי האופרטיבי השוטף.

7.3.3.2. פונקציית סיוע וקידום שת"פ בינ"ל – פונקציה זו תפעל לסיוע ממוקד לקידום שת"פ בינ"ל בתחום הקוונטים, וזאת תוך תיאום עם הגופים הרלוונטיים כגון ISERD ברשות החדשנות, הקרנות הדו-לאומיות בות"ת ובמשרד המדע, או היחידה לשת"פ בינ"ל במפא"ת, **ולא במקומם.**

7.3.3.3. פונקציית משיכת השקעות וסיוע עסקי – פונקציה זו תפעל הן למינוף תקציבי התוכנית הלאומית (מול גורמים בארץ או בחו"ל), בתיאום עם גופי הביצוע, וכן תסייע לחוקרים ולתעשיות בחיבורים עסקיים לגופים ו/או תהליכים שיכולים לסייע לפיתוח העסקי שהם מבצעים (בעצמם). פונקציה זו לא תבצע פיתוח עסקי בעצמה, אלא תסייע בהכוונת הגופים במקרה הצורך.

7.3.4. משקל ועדת-ההיגוי ביחס למנהל התוכנית –

ועדת-ההיגוי נדרשת לקבל סמכות ואחריות - אחריות לאישור מכלול אבני-הבניין העיקריות בתוכנית העבודה (לרבות שינויים משמעותיים, באם נדרש), וכמובן אחריות באישור התוכנית האסטרטגית לפעילות. קטגורית, יש לשמר למנהל

התוכנית חופש פעולה ניהולי כמעט מלא. יחד עם זאת, אבני-הבניין המרכזיות של התוכנית האופרטיבית, חייבות באישור מלא של ועדת-ההיגוי. למעשה, אנו מקבילים את ועדת-ההיגוי לדירקטוריון, על כלל תחומי אחריותו וסמכויותיו. מנהל התוכנית מייצר תוכנית אופרטיבית לאישור ועדת-ההיגוי, אך משזו אושרה, כלל חופש הפעולה הינו שלו. בכל בקשה לחריגה תקציבית או תפעולית משמעותית (יוגדרו מראש גם דרגות חופש קלות), תתקיים פנייה לאישור ועדת-ההיגוי.

7.3.5. החלטות ועדת ההיגוי מתקבלות ע"י רוב, בהצבעה (נדרש מעל 75% השתתפות של חברים ומעל 50% הצבעה לאישור נושא מסוים). ליו"ר ועדת-ההיגוי זכות קול כפול לשבירת תיקו על כל נושא/החלטה. יש לו גם זכות החלטה על מתן מענים ופתרונות ישירים בשוטף למנהל התוכנית. כל חברי הוועדה שווים בזכות ההצבעה (ללא קשר למעמד האישי ו/או המקצועי מחוץ לוועדה).

#### **7.4. תכולות מומלצות לתוכנית הלאומית**

התכולות שיפורטו להלן הינן פועל יוצא של המסקנות העיקריות, מטרות העל והאסטרטגיה שהוצגו לעיל, ולפיהן:

- בתחום החישה הקוונטית בתעשיות הקיימות יש להציב יעד של ישראל כמדינה מובילה ומתחרה.
- תחום החישוב הקוונטי גם הוא יקבל מיקוד מיוחד לאור היכולות הקיימות וחשיבות התחום.
- בתחומים אחרים יש לפתח יתרון יחסי בנישות מסוימות, ובפרט להמשיך ולפתח את החוזקות הקיימות באקדמיה.
- נושא ההון האנושי כמפתח לכל השאר.
- המחקר המדעי-טכנולוגי כבסיס יסודי ורחב לכל העיסוק בתחום.



תכולות התוכנית מוצגות באיור הבא :

תכנית לאומית במדע וטכנולוגיות קוונטום - תכולות מומלצות	
זמן ענן לחישוב קוונטי (סעיף 7.4.1)	ניהולי מחקר ופיתוח באקדמיה ובתעשיות
צוות משולב לביצוע עמ"ט בחישוב וסימולציות קוונטיות בעידן ה- NISQ (סעיף 7.4.2)	
תשתיות לאומיות בחישוב וסימולציות קוונטיות (חומרה) – מרכיב הגוף האקדמי (סעיף 7.4.3.1)	
תשתיות לאומיות בחישוב וסימולציות קוונטיות (חומרה) – מרכיב מרכז המו"פ היישומי (סעיף 7.4.3.2)	
תקשורת קוונטית - הרחבת תשתית מערכתית ותוכניות אחרות (סעיף 7.4.4)	
פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית בתחומים הקיימים (סעיף 7.4.5)	
תמיכה ועידוד כניסת תעשיות חדשות לתחומי החישה, התקשורת, החומרים, ואחרים (סעיף 7.4.6)	
תשתית רכיבים קוונטיים לתעשייה (סעיף 7.4.7)	
הון אנושי: קליטת אנשי סגל אקדמי, תכניות לימוד (גם בשילוב תעשייה), מלגות, משיכת מומחים מחו"ל ועוד. (סעיף 7.4.8)	
מחקר אקדמי ישיר (סעיף 7.4.9)	
תשתית חומרה משותפת באקדמיה (סעיף 7.4.10)	
שתייפ ביני"ל (סעיף 7.4.11)	

IQI-COMPASS: Israel Quantum Initiative - Communication, Materials, Processing, Sensing, and Simulation  
 מדינת סף בחישוב קוונטי, יצירת יתרון יחסי בנישוח, מובילות בחישה בתחומים הקיימים

איור 6: תכולות התוכנית

**7.4.1. רכש "זמן ענן" לחישוב קוונטי:**

רכש גישה, עמוקה ככל האפשר, לחומרת המעבדים הקוונטיים המובילים לאורך התוכנית, מחברות כגון IBM, Google או אחרות. גישה זו, רצוי שתכלול גם ליווי מעמיק של התעשייה ממנה רוכשים את השירות. מטרת תכולה זו היא לעודד מחקר ישראלי הן באקדמיה והן בתעשייה ככל שזו תתהווה עם הזמן, בחומרת state-of-the-art. מחקר כזה יתרום לפיתוח ההון האנושי והידע המדעי-טכנולוגי, ויכול לאפשר יתרונות יחסיים ברבדים העיליים של החישוב והסימולציות הקוונטיים, כגון תוכנה, אלגוריתמים, תיקון שגיאות, שליטה ובקרה ומשוב עם מעבדים קוונטיים, תיאוריה וכיו"ב. הקצאת השימוש ברכיב זה תיעשה על בסיס תחרותי.

**7.4.2. צוות משולב לביצוע עבודת מטה בנושא היישומים המשמעותיים והקרובים**

**למימוש בחישוב וסימולציות קוונטיות בעידן ה-NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum):**

מטרת צוות זה הינה כפולה:

- ליצור שפה משותפת בין המדענים הקוונטיים (בעיקר מתחומי הפיסיקה ומדעי המחשב) לבין מהנדסים, מדעני מחשב וצרכנים של משימות חישוב כבדות באקדמיה, בתעשייה ובמערכת הביטחון, על מנת שיוכלו להבין טוב יותר זה את זה, את הפוטנציאל באלגוריתמים הקוונטיים, ואת צרכי קהילת החישובים הכבדים.

- לבצע עבודת מטה ממוקדת לזיהוי היישומים המרכזיים ו/או הראשוניים שעשויים להתממש באופן פרקטי ומועיל - כבר בעידן ה-NISQ, דהיינו בשנים הקרובות בהן המעבדים הקוונטיים יהיו עדיין קטנים ורועשים יחסית. עבודה זו תסייע בזיהוי הפוטנציאל עבור הגופים השונים ובהכוונת המחקר והפיתוח. לצוות זה ייתכן ותהיה השקה עם מרכיב "זמן ענן" שתואר לעיל. עבודת צוות זה לא תימשך בהכרח למשך כל התוכנית, ומשימתו תיבחן באופן שוטף ע"י הנהלת התוכנית וגופי הביצוע.

#### 7.4.3. תשתיות חומרה לאומיות למחשוב קוונטי :

בליבת המחשוב הקוונטי נמצאת תשתית חומרה פסיקלית המממשת את הסיביות הקוונטיות (qubits) וכן פעולות לוגיות ביניהן המכוננות שערים לוגיים קוונטיים. אנו מעריכים שבמסגרת המשאבים המתוכננים החומרה שתמומש בישראל בשנים הקרובות תיפול מהחומרה הנמצאת בחזית העולמית של מחשוב קוונטי, אך עצם קיומו של מאמץ פעיל לפיתוח חומרה, יבטיח הכשרת כוח אדם, יצירת ידע, ופיתוח טכנולוגיות שיאפשרו לנו להתקדם במהירות במידה ותהיה פריצת דרך בשימוש במחשוב קוונטי לצרכי התעשייה האזרחית או הביטחון הלאומי. כמו כן, קיומו של מאמץ פעיל לפיתוח חומרה בישראל הכרחי ליצירת האקו-סיסטם הנדרש לפעילות ברבדים העליונים של המחשוב הקוונטי, בהם ייתכן שישראל תוכל לקיים פעילות תעשייתית משמעותית. בתוכניות הלאומיות בעולם, ואף במאמצים של חברות תעשייתיות שונות, מפותחות מספר פלטפורמות טכנולוגיות שונות לחישוב קוונטי (אטומים, יונים, super-conducting qubits, topological qubits ועוד). לאור אי-הוודאות הקיימת אנו ממליצים על הקמת תשתית חומרה בשתי טכנולוגיות שונות<sup>11</sup>. כמו כן אנחנו ממליצים שהחומרה בכל אחת מהטכנולוגיות תפותח במשולב ע"י גוף אקדמי<sup>12</sup> שיהווה את גרעין הידע הראשוני, יפתח את העקרונות הבסיסיים של החומרה וכשיר כוח אדם מתאים, וגוף יישומי/תעשייתי שיקלוט את הידע מהגוף האקדמי, יפתח את הטכנולוגיה הנדרשת ויפעל להקמת תשתית חומרה למחשב קוונטי שתהיה הנדסית ושימושית. בכדי להבטיח את שיתוף הפעולה בין הגוף האקדמי והגוף היישומי יש לשאוף שהתוכנית להקמת תשתית החומרה תוגש במשותף ע"י שני הגופים<sup>13</sup> ותכלול גם את ההיבטים הקשורים להעברת הידע ביניהם (כולל היבטי קניין רוחני), אופן שיתוף הפעולה ואבני דרך המייצגות את שיתוף הפעולה בין הגופים. בשני תתי-הסעיפים הבאים מפורטים היבטים שונים הנוגעים לחבילות העבודה בגוף האקדמי ובגוף היישומי.

#### 7.4.3.1. תשתית חומרה בחישוב וסימולציות קוונטיות – מרכיב הגוף האקדמי :

<sup>11</sup> אחד השיקולים האפשריים של הנהלת התוכנית בעת בחירת שתי הטכנולוגיות בהן יתבצע פיתוח חומרה היא בחירת טכנולוגיה אחת הכוללת מערכות טבעיות (Natural) וטכנולוגיה שנייה הכוללת מערכות מהונדסות (Engineered), זאת מכיוון שהסיכונים בשתי הטכנולוגיות שונים באופן יסודי.

<sup>12</sup> תשתיות חומרה בשתי טכנולוגיות – יתכן שיוקמו במוסדות אקדמיים נפרדים.

<sup>13</sup> עמדת הוועדה היא כי התועלת המרבית תושג מקול קורא להצעות משותפות של הגוף האקדמי והיישומי. עם זאת, במידה ומנהל התוכנית מתרשם כי לא ניתן לקדם תוכנית זאת באופן זה הוא יוכל לקבל הצעות נפרדות ובלבד ששיתוף הפעולה והעברת הידע (כולל סוגיות קניין רוחני) מוסדרות באופן אחר. נציין כי קיימת אפשרות כי מנהל התוכנית לא ימצא הצעות ראויות למימון בשתי טכנולוגיות. במקרה שזה המצב יוכל מנהל התוכנית להתניע את אחת הטכנולוגיות כהצעה משותפת ואת השנייה ברמה האקדמית בלבד, ולהשהות את תחילת הפעילות של הגוף היישומי בטכנולוגיה השנייה.

כחלק מההבנה שבתחום החישוב הקוונטי באופן מיוחד ישנו חוסר גדול בהון אנושי, מרכיב זה יכשיר כוח אדם נסיוני לתחום החישוב והסימולציות הקוונטיים. הכוונה למימוש מעבדים קוונטיים (חומרה) כתשתית אקדמית להכשרת כוח אדם וכביסוס הידע המדעי בתחום הניסויי. בנוסף מרכיב זה יכלול תוכנית לתמיכה במרכז המו"פ היישומי שיקים את התשתית המלאה (ראו בסעיף הבא).

בחירת הקבוצות האקדמיות המתאימות תתבצע במנגנון תחרותי תוך שמירה על מצוינות מדעית, ובהסתכלות כוללת של המוסדות האקדמיים גם בהיבטים אחרים של מקומם בתוכנית הלאומית.

#### 7.4.3.2. תשתית חומרה לחישוב וסימולציות קוונטיות – מרכיב מרכז המו"פ

##### היישומי:

בהתבסס על התפיסה של ישראל כימדינת סף בחישוב קוונטי כפי שהוסבר לעיל, מטרת מרכיב זה היא הקמת מרכז מו"פ יישומי שיבנה חומרה למעבד קוונטי ברמה שתאפשר שמירה על פער סביר מה-state-of-the-art העולמי. רמה כזו איננה ניתנת להשגה במחקר אקדמי רגיל בשל הצורך בפיתוח טכנולוגי מורכב, שאינו בהכרח חדשני מדעית. מרכז מו"פ יישומי זה, יחל לפעול בהיקף קטן במקביל לתשתית האקדמית שתוארה לעיל ויגביר את פעילותו בהדרגה תוך שהוא מתבסס על הידע המדעי שנצבר באקדמיה. בסוף תקופת התוכנית המוצעת מוערך כי הגוף היישומי יעסיק כ-15 אנשי סגל מחקריים קבועים (חלקם יכולים להיות בעלי משרות משותפות עם האקדמיה או עם התעשייה, בדומה למתרחש במרכזים כגון JILA או JQI), שחלקם יהיו פיסיקאים או מדעני מחשב, וחלקם מהנדסים 'קלאסיים' ברמה גבוהה לתחומים כגון פוטוניקה, RF, FPGA וכיו"ב. המרכז יעבוד באופן צמוד עם הקהילה האקדמית, אך יוכווון למחקר יישומי ולפיתוח.

#### 7.4.4. תקשורת קוונטית - הרחבת תשתית מערכתית ותוכנית אחרות:

בעוד שתחום התקשורת הקוונטית איננו תחום בו ישראל הינה בעלת יתרון יחסי, התחום מאופיין בחשיבות עתידית כלכלית וכמובן ביטחונית (לאו דווקא שימושים צבאיים, ולא דווקא למרחקים ארוכים), הנוגעים להגנה על מידע חסין מפני ציתות. הפעילות הנוכחית העיקרית בתחום זה בארץ הינה פרויקט ה-test-bed שמפא"ת מממנת באוני' העברית בתקציב מוגבל. פרט לכך פזורים כמה מחקרים קטנים, בעיקר באקדמיה.

לכן, מומלץ לחזק את ההבנה המחקרית-מדעית בתחום זה ע"י המשך פיתוח התשתית המערכתית לתקשורת קוונטית (לבחינה ע"י הנהלת התוכנית - מידת ההתבססות על התשתית הקיימת בפרויקט המפא"תי באוני' העברית), להגעה לתשתית רחבה ופתוחה למשתמשים בכלל הקהילה (באקדמיה ומחוצה לה), לרבות הרחבת פעילות 'צוות אדום' שמטרתו לבחון את התשתית המערכתית המפותחת ולנתח את חולשותיה. תשתית פתוחה שכזו, גם אם מחקרית בעיקרה, תוכל לשמש חוקרים אקדמיים וגם תעשיות המפתחות אבני בניין או פרוטוקולים של תקשורת קוונטית, וזאת מבלי שיצטרכו לממש תשתית כבדה אצלם. הרחבת התשתית יכולה להתבצע באופן מדורג, תחילה באופן מקומי ולאחר מכן בקשרים בין-מוסדיים.

כמו כן, תיבחן על-ידי הנהלת התוכנית היקף יציאה לתכניות מחקריות אחרות (לא מערכתיות), ואופן שילובם עם הפעילות המערכתית.

#### 7.4.5. פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית בתחומים הקיימים:

כאמור, בתחום החישה הקוונטית יש מספר לא גדול של תעשיות העוסקות לפחות עשור במחקר ופיתוח. גם חלק ניכר מקבוצות המחקר באקדמיה, עוסקות בתחום. כיום ישנו מאגד מגני"ט בתחום החישה הקוונטית בהובלת הרשות לחדשנות ובשותפות עם מפא"ת ומערך הסייבר הלאומי, שנמצא בשלבי התהוות מתקדמים יחסית.

כמו כן, במפא"ת קיימת גם תוכנית מסווגת לפיתוח חישה קוונטית במספר פרויקטים.

כמות המשאבים הזמינים כיום לתחום זה, הינה מוגבלת. ויש לעובדה זו השלכות על זמני פיתוח ארוכים, ותהליכי מו"פ חלקיים שמקשים על ביסוס הובלה ותחרותיות בעולם. מאידך, הרמה המודגמת בפעילויות הקיימות כבר כיום, היא בשורה אחת עם המובילים העולמיים (בביצועים, גם אם לא בבשלות טכנולוגית). לכן, מומלץ לקדם את התעשיות הקיימות בתחום החישה הקוונטית, בליווי האקדמיה, על מנת למצב את ישראל כמובילה בתחומים אלו.

בניגוד לתחומי החישוב והסימולציות הקוונטיות, בהם אין כמעט תעשייה בארץ, ובניגוד לתחום החומרה, שם המלצנו על הקמת מרכז מו"פ יישומי אחד עבור התחום. בתחום החישה הקוונטית ממליצה הוועדה להאיץ את הפרויקטים הקיימים בתעשייה ובביטחון ולהגדרם כפרויקטים מרכזיים בתעשיות השונות, בליווי אקדמי (בדומה למאגדי מגני"ט/מגנטון במידה מסוימת) לפי הצורך. פרויקטים אלו מכוונים היטב ע"י השוק והתמיכה תאפשר את הגדלת מספר האנשים וחיוק התשתיות להשגת בשלות טכנולוגית גבוהה, פיתוח ידע ייחודי, והגדלת כושר התחרות בעולם.

#### 7.4.6. תמיכה ועידוד כניסת תעשיות חדשות לתחומי החישה, התקשורת, החומרים,

ואחרים:

בנוסף לכלים שצוינו, יש גם צורך לעודד ולטפח כניסת תעשיות חדשות לתחומי החישה, החישוב, התקשורת, החומרים, ואולי יישומים נוספים (כגון דימות קוונטי, מכ"מ קוונטי ואחרים), וזאת מעבר להשקעה הכללית במחקר האקדמי.

מטרת מרכיב זה בתוכנית, ובמידה רבה גם מרכיב הרכיבים הקוונטיים לתעשייה שיתואר להלן, הינה להזרים תקציבי מו"פ ותשתית לתעשיות חדשות, לרבות חברות הזנק. על הנהלת התוכנית וגופי הביצוע להגדיר את האופן התחרותי בו יושקעו משאבים אלו, בפלטפורמות קיימות או ברעיונות חדשים (כדוגמת רעיון ה-wework המעבדתי שהוצע ברשות לחדשנות).

#### 7.4.7. תשתית רכיבים קוונטיים לתעשייה:

מלבד עידוד תעשיות חדשות להיכנס לליבת המחקר והפיתוח של התקנים קוונטיים שתוארה בסעיפים הקודמים, ישנו גם צורך בהכוונת התעשייה הפריפריאלית לפעילות רלוונטית להתקנים קוונטיים ברמת הרכיבים הסובבים, כגון דיודות לייזר, קירור, אלקטרוניקת שליטה ובקרה ועוד. תקציב זה יינתן במנגנון תחרותי לתעשיות

שיפתחו רכיבים מעין אלה, עפ"י מאפיינים שייקבעו בקול קורא בתיאום עם צרכי התעשייה, ובראייה לאומית רחבה.

#### 7.4.8. הון אנושי :

נושא ההון האנושי זוהה ע"י הוועדה כפער מרכזי לפיתוח התחום בישראל. בסעיף זה כלולים מספר נושאים הקשורים להון אנושי, והם עוקבים אחר ההמלצות שניתנו בדו"ח הוועדה המייעצת לות"ת. היבט נוסף של הון אנושי שאיננו כלול בסעיף זה אלא בסעיף 7.4.10 (תשתית חומרה משותפת לאקדמיה), הינו כוח האדם הטכני (בעל מומחיות מספקת) הדרוש להפעלת תשתיות החומרה הנ"ל.

7.4.8.1 קליטת אנשי סגל אקדמיים חדשים, ומימון הקמת מעבדות מחקר אישיות עבורם - גיוס אנשי הסגל יתבצע ע"י מוסדות המחקר האקדמיים הקולטים לפי שיפוטם, המימון יסופק על-ידי ות"ת על בסיס תחרותי, תוך תיאום ובקרה של ניהול התוכנית בראייה לאומית.

7.4.8.2 ריענון התוכניות הקיימות ללימוד לתואר ראשון - הוספת מקצועות מתאימים לתוכנית הלימודים של הפקולטות המדעיות/הנדסיות כולל מדעי המחשב, על-מנת להתאימן בצורה טובה יותר לדרישות המחקר האקדמי וצרכי התעשייה בתחום. במקביל, פיתוח פרויקטי סטודנטים לתואר ראשון במדע וטכנולוגיה קוונטיים בכלל הפקולטות.

7.4.8.3 תוכניות לימוד לתארים מתקדמים - באופן דומה, תוכניות הלימוד לתארים מתקדמים ירוענו גם הן.

7.4.8.4 מלגות למשתלמי בתר-דוקטורט ישראלים בחו"ל (פעילות שכבר החלה).

7.4.8.5 תוכנית משיכת מדענים מחו"ל לארץ (סטודנטים לתארים מתקדמים, בתר-דוקטורט, או חוקרים).

7.4.8.6 תוכנית מלגות "תור הזהב" לשילוב פורשי תעשייה באקדמיה - קרן מלגות לשילוב פורשי תעשייה בעלי הכשרה מדעית בקבוצות מחקר אקדמיות בתחום הקוונטים, על-מנת לעשות שימוש בניסיונם כדי לחזק את המחקר האקדמי ולהכווין כך שתוצריו יהיו רלוונטיים יותר לאימוץ על-ידי התעשיות.

7.4.8.7 תקצוב לעידוד תעשיות להוצאת מהנדסים/מדענים להתמחות ו/או לתארים מתקדמים באקדמיה.

7.4.8.8 תקצוב מיני-פרויקטים של סטודנטים בתעשייה ו/או במרכז מו"פ יישומי במסגרת התוכנית הלאומית.

7.4.8.9 תקצוב למאגרי מידע ובסיס ידע - תקצוב בניית בסיס נתונים מתעדכן לגבי ערכי המדדים השונים להתקדמות התוכנית, ובסיס נתונים נוסף הממפה את החוקרים הישראלים הנמצאים בחו"ל ועוסקים במדע וטכנולוגיה קוונטיים לשם החזרתם ארצה.

7.4.8.10 תקצוב לכנסים מקצועיים בתחום - ארגון כנסים וימי השתלמות המיועדים לתעשייה ולמערכת הביטחון, במטרה לחשוף את מדעני התעשייה ומהנדסייה לפוטנציאל הטמון בתחום.

#### 7.4.9. מחקר אקדמי ישיר ושדרוג מעבדות אישיות:

תכולה זו כוללת השקעת תקציב ישיר במחקר ופיתוח אקדמי, כולל שדרוג מעבדות אישיות קיימות בכלל תתי-התחומים בתחום המדע וטכנולוגיות הקוונטים. כמו כן, תקצוב זה נועד למחקר גם בנושאים היברידיים טכנולוגיים ובתפיסת ה'קצה לקצה'. למעשה, זוהי הרחבה מסוימת למנגנון קרן ותי"ת-מפא"ת שכבר הוקמה, ותומכת בקבוצות של 1-5 חוקרים ראשיים. בנוסף, יישקל שינוי במנגנון המימון, שיאפשר גידול של קבוצות מחקר מעבר לגודלן הממוצע כיום. הרחבת התקציב מעבר לקיים בקרן ותי"ת-מפא"ת בהיקפה הנוכחי, נדרשת על מנת לעבות את המחקר המדעי באקדמיה, גם בהתחשב בגידול ההון האנושי בתחום במהלך התוכנית, יחד עם שמירה בלתי מתפשרת על המצוינות המדעית.

הערה: כיום חלק מהקרנות המנוהלות על-ידי הקרן הלאומית למדע (בפרט, המרכיב הרלוונטי בקרן ותי"ת-מפא"ת למדע וטכנולוגיות קוונטים) פונות רק למוסדות האקדמיים. אנו ממליצים לאפשר בחינת ההכללה של גורמי מחקר אקדמי נוספים (מחוץ לאוניברסיטאות) במסלולים מעין זה, תוך שמירה על עקרונות המצוינות המדעית והתהליך התחרותי.

#### 7.4.10. תשתית חומרה משותפת (תוך מחלקתית, בין מחלקתית, מוסדית, ...):

רכיב זה בתוכנית העבודה יכלול תקצוב לתשתיות פיזיות באקדמיה ולציוד תשתיתי שישירת את כלל האקדמיה והתעשייה. תשתיות אלו כוללות למשל את המפורט להלן.

#### פירוט זה מובא כאן להתייחסות ולא כרשימה מחייבת:

#### 7.4.10.1. תשתיות ייצור חומרים קוונטים – כל ההתקנים הקוונטיים

האלקטרוניים, ובפרט אלו המשמשים למחשוב וחישה, דורשים חומרים שתכונותיהם הקוונטיות ניתנות לתכנון ושליטה קפדניים. בשלב זה, היכולות של חישנים וביטים קוונטיים קיימים (qubits) מוגבלות על ידי תכונות כגון זמן קוהרנטיות, שנקבעות על ידי החומרים שבשימוש. הצורך במחקר והנדסה של חומרים קוונטיים חדשים הוא לכן בעל חשיבות עליונה. הביטוי "חומרים קוונטיים" כולל חומרים מוליכי-על חדשים, חומרים מגנטיים חדשים, חוטים אטומיים ושכבות אטומיות קשורות וון דר וואלס. דוגמאות אלו מציגות את חיוניות תחום החומרים לפיתוח טכנולוגיה קוונטית, שכן הם בעלי רלוונטיות מידית לייצור ביטים קוונטיים מבוססי מוליכות-על (superconducting qubits), ביטים קוונטיים טופולוגיים (שדורשים שילוב של מוליכות-על ומגנטיות), חישנים קוונטיים (שדורשים חומרים מגנטיים) ושילובי תכונות אלקטרוניות שלא קיימות בחומרים שנמצאים בטבע וניתנים למימוש על ידי בניה שכבתית של חומרי וון דר וואלס. לצורך כך, היכולת לחקור ולהנדס מבני חומר חדשניים שלא נמצאים בטבע היא קריטית, ודורשת foundry לייצור, אפיון ומחקר של חומרים והתקנים. רבות מיכולות אלו אינן קיימות במרכזי הננו הנוכחיים.

#### 7.4.10.2. תשתיות ייצור התקנים קוונטים – תשתיות אלו ניתן לחלק לשלושה

סוגים של התקנים:

- Fab משותף לייצור ביטים קוונטים מבוססי מוליכות-על (superconducting qubits).

- Fab משותף לייצור NV centers in diamond ומרכזי צבע אחרים (גידול שכבות מאולחות של יהלומים, השתלת יונים ביהלומים, וליתוגרפיה נקיה לייצור התקנים). הציוד הנדרש יכלול בין היתר: Chemical vapor deposition (CVD) machine, ion implantation chamber, and a designated reactive ion- etching with inductively-coupled plasma etcher (ICP-RIE).

- Fab משותף לחומרים והתקנים קוונטיים אלקטרוניים – הציוד הנדרש יכלול לדוגמה:

- Synthesis lab with various bulk crystal growth techniques, including floating zone, CVD, vapor phase, epitaxy, glove boxes for volatile materials

- Ultra-high-vacuum hub connecting all fabrication machines including evaporators, ICP and RIE plasma etchers, Sputtering machine, plasma deposition, ALD and glove boxes with dedicated characterization equipment.

- Device characterization: AFM, micro-Raman, SEM, direct laser writer in glove box

- Crystal growth characterization: Quantum transport and squid magnetometry, x ray, ellipsometry

7.4.10.3 תשתיות אפיון חומרים והתקנים קוונטים – ציוד נדרש לדוגמה:

Microscopes, AFM, micro-Raman, SEM, direct laser writer in glove box.

7.4.10.4 תשתיות ייצור רכיבים אופטיים מתקדמים – יכללו מערכות אופטיות

קריטיות לבניית התקנים קוונטים הדורשים לייזורים יציבי תדר, כגון: שעונים אופטיים, מחשבים וסימולטורים קוונטים עם יונים קרים ואטומים קרים, וחיישנים עם אטומים חמים וקרים. דוגמאות: מהודים בעלי finesse גבוהה, ציפויים אופטיים באיכות גבוהה, זכוכיות יציבות תרמית, micro frequency combs ועוד למעט רכיבים הניתנים לייצור במרכז הפוטוניקה שליד ממ"ג שורק.

7.4.10.5 תשתיות זמן ותדר - מרכז זמן ותדר באוניברסיטאות נבחרות, הכולל:

מקור זמן ותדר בדיוק גבוהה והסבתו לאורך גל אופטי בתדר טלקום באמצעות frequency comb. בחינת שימוש ו/או שדרוג תשתיות רשת של סיבים אופטיים שיחברו אוניברסיטאות ומכוני מחקר בישראל ויאפשרו פיזור והשוואה של מקורות זמן ותדר מדויקים (תוך הסתמכות במידת האפשר על תשתית סיבים קיימת).

**כפי שצוין, רשימת הציוד המפורטת מעלה מובאת להתייחסות ולא כרשימת ציוד מחייבת.**

התמיכה במרכזים האוניברסיטאיים תינתן על בסיס תחרותי, במענה להצעות שיוגשו וישפטו על ידי ועדת ההיגוי בסיוע הוועדה המדעית הבינ"ל המייעצת. ועדת ההיגוי בסיוע הוועדה המדעית הבינ"ל המייעצת, תעקוב על בסיס שנתי אחר התקדמות התוכניות הממומנות ותאשר או תשנה את התקציב המיועד בהתאם להתקדמות ביצוען.

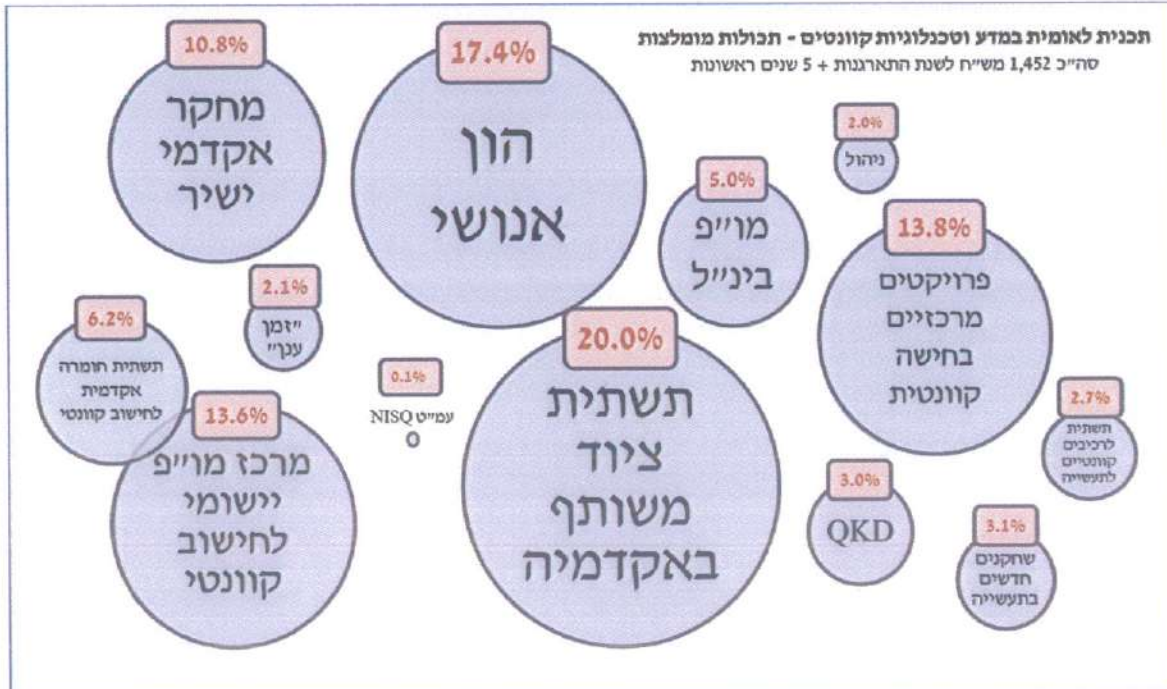
**7.4.11. שת"פ בינ"ל:**

מרכיב זה יסייע בהגדלת תקציבי השת"פ הבינ"ל הקיימים בגופי התקצוב, למימוש תוכניות שת"פ בינ"ל ייעודי לתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים.



## 8. הפן התקציבי בתוכנית המומלצת

8.1. תקציב - סיכום התפלגות התקציב בתוכנית המומלצת מופיע באיור הבא. איור זה מתאר את החלק היחסי של כל אחד מהמרכיבים שתוארו בפרק 7, כאשר גודל העיגולים מתאים לחלק היחסי מהתוכנית כולה. סה"כ התקציב הנדרש הינו כ-1,452 משי"ח, על פני שנת התארגנות ועוד 5 שנות החומש הראשון לתוכנית. פירוט הנתונים מובא בנספח 13א<sup>14</sup>.



איור 7: תכולות התוכנית המומלצת בחלוקה לנתח יחסי מהתקציב הכולל

טבלה 3: תקציב תכולות התוכנית המומלצת (משי"ח)

מספר סעיף	שם הסעיף	תקציב ל- 1+5 שנים [משי"ח]
7.3	ניהול	28.4
7.4.1	רכש "זמן ענן" למחשוב קוונטי	30.6
7.4.2	עמ"ט חישוב וסימולציות קוונטיות	1.7
7.4.3	תשתיות לאומיות למחשוב קוונטי	תקציב כולל לתכולה (7.4.3): 289.4
7.4.3.1	תשתית חומרה בחישוב וסימולציות קוונטיות - מרכיב הגוף האקדמי	91.4 (מתוך התקציב הכולל)
7.4.3.2	תשתית חומרה בחישוב וסימולציות קוונטיות - מרכיב מרכז המו"פ היישומי	198 (מתוך התקציב הכולל)
7.4.4	תקשורת קוונטית - הרחבת תשתית מערכתית ותוכנית אחרות	43.1

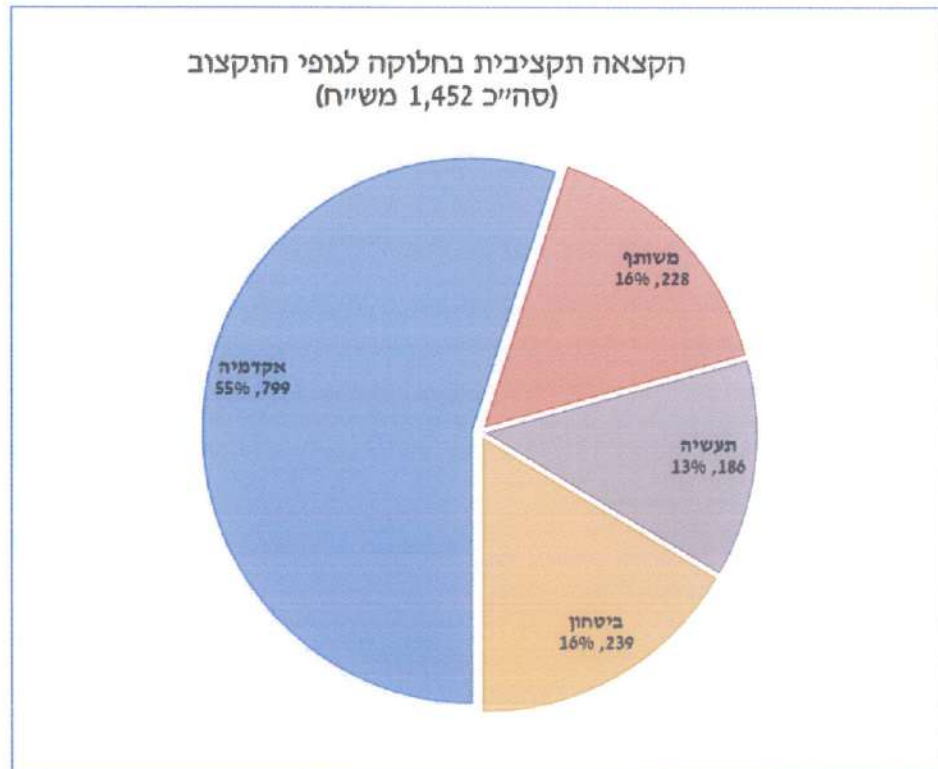
<sup>14</sup> כאמור התכנון התקציבי המופיע בדוח זה בוצע ברמת הפעילויות העיקריות. תכנון מפורט יבוצע על-ידי הנהלת התוכנית בתיאום עם גופי התקצוב במהלך שלב ההתארגנות.

201.2	פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית	7.4.5
45	תמיכה ועידוד כניסת תעשיות חדשות לתחומי החישה, התקשורת, החומרים	7.4.6
40	תשתית רכיבים קוונטיים לתעשייה	7.4.7
252.5	הון אנושי	7.4.8
156.8	מחקר אקדמי ישיר	7.4.9
תקציב כולל לתכולה 7.4.10 : 290	תשתית חומרה משותפת באקדמיה	7.4.10
50 (מתוך התקציב הכולל)	תשתיות ייצור חומרים קוונטיים	7.4.10.1
80 (מתוך התקציב הכולל)	תשתיות ייצור התקנים קוונטיים	7.4.10.2
30 (מתוך התקציב הכולל)	תשתיות אפיון חומרים והתקנים קוונטיים	7.4.10.3
20 (מתוך התקציב הכולל)	תשתיות ייצור רכיבים אופיים מתקדמים	7.4.10.4
20 (מתוך התקציב הכולל)	תשתיות זמן ותדר	7.4.10.5
70 (מתוך התקציב הכולל)	שכר מהנדס/טכנאי הפעלה	7.4.10.6
20 (מתוך התקציב הכולל)	תחזוקה	7.4.10.7
73	שתי"פ ביני"ל	7.4.11
<b>1452</b>	<b>סה"כ</b>	

ניתן לראות כי המרכיבים המשמעותיים יותר בתוכנית, מהבחינה התקציבית, הינן תשתית החומרה המשותפת באקדמיה (סעיף 7.4.10) המהווה כ-20% מהתקציב הכולל, ההון האנושי (סעיף 7.4.8) על כל היבטיו, המהווה כ-17.4% מהתקציב, וכן שני תחומי המיקוד שהוגדרו (פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית, ומרכיבי החישוב הקוונטי השונים).

## 8.2. ניתוח תקציבי

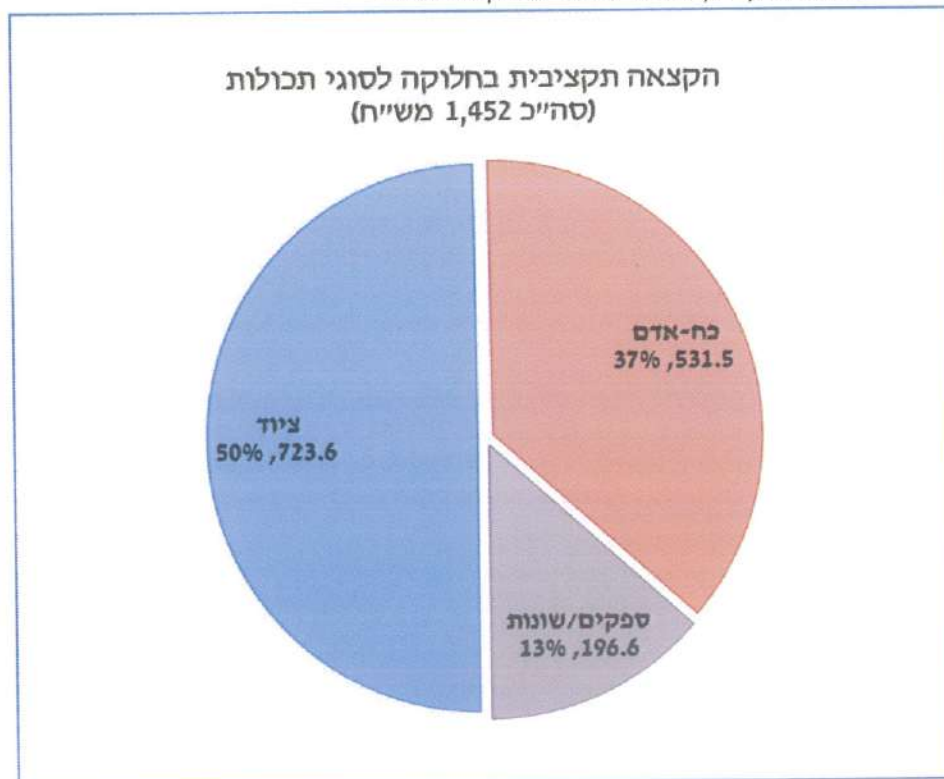
8.2.1. חתך אקדמיה/תעשייה/ביטחון/משותף - האיור הבא מציג את התקציב בחתך גופי התקצוב, כאשר חלק מהפעילויות יבוצעו במנגנונים משותפים וחלקם בגופי התקצוב עצמם.



איור 8: הקצאה תקציבית בחלוקה לבעלי העניין

ניתן לראות כי עיקר ההשקעה הינה באקדמיה. התקצוב לתעשייה הינו בחלקו לפעילויות דואליות תעשייתיות-ביטחוניות. חלוקה זו צפויה להשתנות לאחר החומש הראשון, כאשר התעשייה תתבסס.

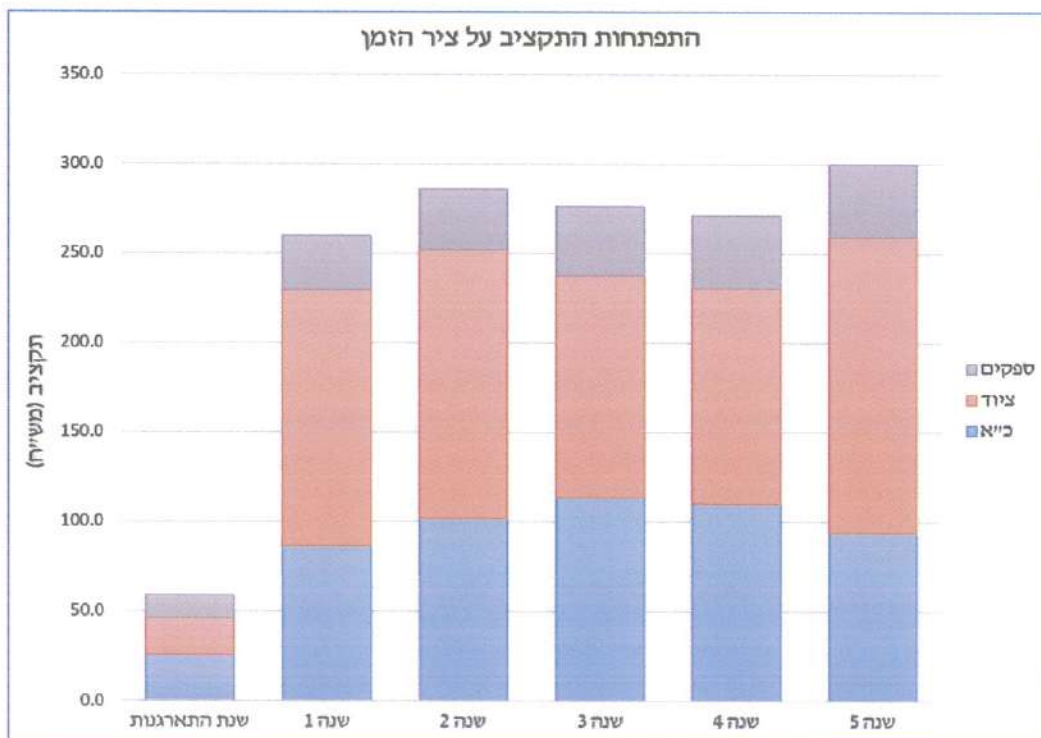
8.2.2. חתך הון אנושי / ציוד / ספקים/שונות



איור 9: הקצאה תקציבית בחלוקה לסוגי תכולות

באיור לעיל, ניתן לראות כי עיקר ההשקעה, על-אף זיהוי הפער העיקרי בהון האנושי, הינה בתשתיות ציוד. זאת משום שתשתיות הציוד באקדמיה נדרשות גם לפיתוח ההון האנושי וגם למחקר ולפיתוח עצמו.

8.2.3. חתך התפתחות התקציב על ציר זמן – האיור הבא מציג את נתוני התקציב על ציר הזמן לאורך שנת ההתארגנות והחומש הראשון:



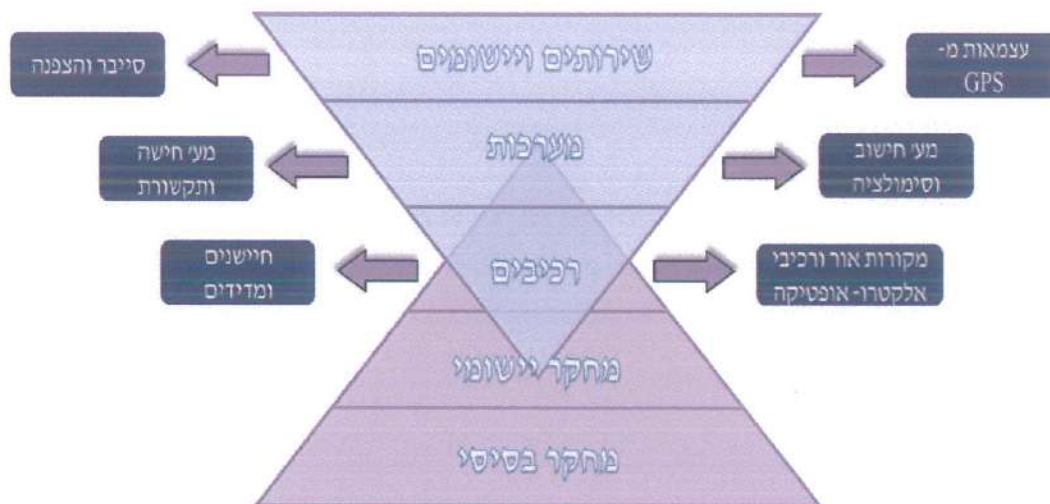
איור 10: התפתחות התקציב על ציר הזמן

ניתן לראות כי לאחר שנת ההתארגנות תהיה השקעה משמעותית במימוש התשתיות הפיסיות בכלל מרכיבי התוכנית.

## 9. חזון לתקופה שלאחר תום החומש הראשון

- 9.1. תוכנית הפעולה המפורטת במסמך זה תחומה לתקופה של 5 שנים ומטרתה לבסס פלטפורמה איתנה בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים. התחום נמצא בראשיתו, ומדינת ישראל יכולה לבחור את שטחי המיקוד ולבסס הובלה בתחומים אלו.
- 9.2. כפי שתואר בפרקים הקודמים, התחום ימשיך להתפתח ולהתרחב בעשורים הקרובים ונדרשת הסתכלות ארוכת טווח והמשך הקצאת משאבים משמעותיים מעבר לחומש הקרוב. עם זאת, כפי שיתואר בפרק זה, מרכז הכובד לאחר החומש הראשון צפוי להתקרב לתעשייה. גם החלוקה בין תתי-התחומים השונים צפויה להשתנות לפי הבשלתם והיתרונות היחסיים שיתפתחו בעקבות החומש הראשון.
- 9.3. על-פי חזון הוועדה, עם התבגרות התחום, ובתום חמש השנים הראשונות, מדינת ישראל תימצא בנקודת פתיחה שונה משמעותית מזו בה אנו נמצאים כעת. ההבדלים יתבטאו במספר היבטים:

9.3.1. העברת מרכז הכובד מהאקדמיה לתעשייה – כפי שצוין, הוועדה צופה כי בתום החומש הראשון יתאפשר למדינת ישראל להכווין את מאמציה בתחום זה בכיוון יישומי יותר. ההשקעה במחקר האקדמי תימשך גם לאחר החומש הראשון, הן מפאת חשיבות המחקר הבסיסי עצמו, והן כבסיס לפיתוח יישומים חדשים ונוספים מעבר לקיים. כמו כן, זמני הכשרת ההון האנושי הדרוש הן למחקר והן לתעשייה הינם ארוכים (כ-8 שנות הכשרה). לאחר החומש הראשון בו עיקר ההשקעה תתבצע באקדמיה, ניתן יהיה להעביר חלק גדול מההשקעה לכיוונים הנדסיים ויישומיים יותר, באופן מדורג. להלן תרשים המציג באופן רעיוני את האמור:



איור 11: העברת מרכז הכובד מהאקדמיה לתעשייה

באיור המוצג לעיל, המשולש התחתון מייצג את ההשקעה ברובד האקדמי, ואילו המשולש העליון מייצג את ההשקעה ברובד ההנדסי-יישומי. ניתן לראות כי בתחילת הדרך הרובד האקדמי מקבל את התקצוב הנרחב ביותר. בשלב זה, האפשרות למימוש יכולות יישומיות הינה מוגבלת. בשלבים מתקדמים בתהליך, האלמנט ההנדסי הולך ומקבל בהדרגה תקציבים משמעותיים יותר. לצד זאת, ההשקעה

ברובד האקדמי מחקרי קיימת לאורך התהליך כולו. ניתן לראות כיצד ההשקעה במחקר האקדמי מובילה לפיתוח יישומי ולקבלת רכיבים, מערכות ובסופו של דבר אספקת שירותים ויישומים (באיור מובאות מספר דוגמאות שאינן מחייבות, לשם המחשה בלבד). מטרת האיור הינה להציג באופן איכותי את מעבר 'מרכז הכובד' מהרובד האקדמי לרובד ההנדסי-יישומי. מדובר בתהליך טבעי ונכון בו השקעה במחקר והבנת היסודות תוביל בסופו של דבר הן ליישום משמעותי, והן להמשך מחקר לפתיחת אפיקים חדשים, בסיסיים ויישומיים כאחד.

9.3.2. **בשלות לשיתופי פעולה בין הגופים השונים** - בתום החומש הראשון, הצפי הוא שכלל הגופים המושפעים מתכולות התוכנית יעברו כברת דרך ויביאו להישגים משמעותיים בתחומם. תוצאה זו, תאפשר שיתופי פעולה עמוקים יותר ביניהם.

9.3.3. **בשלות לשיתופי פעולה בינלאומיים** – בתוכנית המוצעת לחומש הראשון, העיסוק בשיתופי-פעולה בינלאומיים מצומצם למנגנונים הקיימים. הוועדה מאמינה כי לאחר חלקה הראשון של התוכנית, מדינת ישראל תהיה בשלה יותר למימוש שיתופי פעולה בינלאומיים. שיתופי פעולה אלו יתבטאו בשילוב מדינת ישראל בתוכניות בינ"ל כגון תוכנית הדגל האירופית, ביצירת קרנות דו-לאומיות ממשלתיות בהיקף רחב ממה שקיים כיום וצפוי במהלך החומש הראשון, ביכולת למשוך השקעות מחו"ל, וכן בהקמת מרכזי מו"פ של חברות גלובליות בישראל בתחומים השונים.

9.3.4. **מובילות עולמית בחישה קוונטית** - בתחומים בהם כבר היום ישנה נוכחות תעשייתית, כדוגמת תחום החישה הקוונטית, הוועדה צופה כי למדינת ישראל תהיה יכולת התמודדות בשורה הראשונה העולמית. חיזוק התעשייה יאפשר פיתוח מוגבר של הטכנולוגיות השונות, באופן שיוביל לכך שבתום חמש השנים הראשונות, מדינת ישראל תהיה בחזית ותוכל להתחרות מול הטכנולוגיות החדשניות ביותר.

9.3.5. **זיהוי מבוסס יותר של כיווני התפתחות** – כפי שקורה בכל אזור התמחות, גם העיסוק הגובר בעולם הקוונטים יאפשר ניתוח נכון יותר של התחום. לאחר החומש הראשון, ניתן יהיה למפות בצורה מדויקת יותר את כיווני ההתפתחות המשמעותיים, ואלו שיהיו רלוונטיים יותר לקידום חוסנה ומובילותה של מדינת ישראל בשנים הבאות.

9.3.6. **ביסוס יתרון יחסי לישראל** – בתום החומש הראשון לתוכנית, הוועדה חוזה כי היתרון היחסי בתחומי המיקוד יבוסס יותר, וכן שיזוהו כיוונים ונישות נוספים לפיתוח כיתרון יחסי להמשך, כתוצאה ממחקר בסיסי והנבטות שיבוצעו כבר בחומש הראשון, בכלל תתי-התחומים.

9.3.7. **גידול הקהילה הקוונטית** – הוועדה צופה כי בתום החומש הראשון קהילת הקוונטים תחל בגידול משמעותי. גידול זה צפוי להימשך גם לאחר החומש הראשון, בו קליטת אנשי סגל אקדמיים וצוותים בתעשייה תהיה מוגבלת, בעיקר בשל זמן הכשרה ארוך ויכולת קליטה במוסדות השונים. גידול ההון האנושי משמש מסד שעליו נבנית כלל הפעילויות, והגידול במהלך החומש הראשון יאפשר הגברת המיקוד היישומי, הרחבת המחקר המדעי בתחום, יצירת סינרגיה בין הגופים והרחבת תחומי העיסוק, וזאת מבלי להתפשר על המצוינות המדעית והמקצועית.

## 10. משמעויות אי-מימוש התוכנית הלאומית המומלצת

- 10.1. תחום מדע וטכנולוגיות קוונטים, רחב ומאתגר במיוחד, הן עבור מעצמות, והן עבור מדינות מתקדמות הרואות עצמן כ'פורצות-דרך' מדעית וטכנולוגית. הצפי הוא שתחום זה, ישחק תפקיד מרכזי במכלול הטכנולוגיות המתקדמות שיניעו את עולמינו בעשורים הקרובים.
- 10.2. ההבנה שמדע וטכנולוגיות קוונטים ישמשו 'קטר טכנולוגי' עולמי ויביאו לשינוי מהפכני לטובת הציבור, התעשייה והמשק העולמי, חלחלה בעשור האחרון גם לחברות הטכנולוגיה הגלובליות. אלו משקיעות כיום מאמצים כלכליים ואנושיים משמעותיים **מתוך ההבנה שאנחנו על סיפה של 'מהפיכה' שתספק פתרונות לאתגרים טכנולוגיים מרכזיים.**
- 10.3. מדינת-ישראל, בהיותה start-up nation **לא תוכל להמשיך ולהתקדם טכנולוגית** למימוש צרכיה ויעדיה, הן למחויבותה לאיכות חיי אזרחיה והן לפיתוח משק ותעשייה מתקדמת-**ללא מאמץ לאומי מידי** שיביא המדינה לימעצמה בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים ויישומי בינה מלאכותית, שבלעדיהם, תהיה 'עצירה' טכנולוגית.
- 10.4. היבט משמעותי ביותר שיש לזכור באמור לעיל, כי הימהפיכה המדוברת דורשת מאמץ עמוק, אשר **לא** נדרש היה בעשורים האחרונים לקידום הטכנולוגיה הקלאסית. תחום מדע וטכנולוגיות הקוונטים דורש 'הון אנושי' מקצועי שאינו נמצא בישראל, הוא אף אינו קיים כמעט בקנה מידה גלובלי- ויש להמציאו מהשלב הראשון. מחזור-החיים ליצירת 'הון האנושי', כדוגמה, הינו בסדר-גודל של 8-10 שנות למידה ומחקר לאדם-מדען, בכדי שיוכל להיות בעל הבנה רחבה בתחום.
- 10.5. לאור העובדה כי רק מובילות לאומית, עתירה במשאבים ותוכנית מחקר רחבה, מושכלת, ארוכת-טווח וכזו הפועלת בצורה של 'קטרים' מגוונים ושונים במקביל- **רק היא זו שתוביל ל'פריצת-דרך' המיוחלת.**
- 10.6. מדינת-ישראל, במידה ולא תפעל מידית, לפתוח במירוץ ובמאמץ עליון (כפי שמציגה תוכנית זו שאנו מביאים), **תעצור, טכנולוגית**, כבר בשנים הקרובות ותהיה למעשה כפופה לעליונות של מדינות ושחקנים 'זרים' אחרים, שיאפילו על מדינת-ישראל בטכנולוגיות עוצמתיות וידחקו אותה למצבים קשים בהיבטי ביטחון, כלכלה, בריאות, חינוך, משק ותעשייה. יתרה מזאת, חוסר משימתיות בתחומי המחקר והטכנולוגיה הקוונטיים יעבירו רבים מבין טובי החוקרים והמפתחים למקומות בהם קצב ההתפתחות בתחום מביא למבחר התעסוקתי שופע. **מדינת-ישראל, איננה, יכולה להרשות לעצמה להיות במצב שכזה.**



10.7. בסעיפים הבאים נביא מספר דוגמאות למשמעויות של הישארות ישראל כ"זנב לשועלים", מצב בו ישראל תישאר מאחור ותהיה מדינה תלויה באחרים.

- 50 משי"ח – כבר הוקצו לטובת קרן המחקר המשותפת של ות"ת ומפא"ת (ביטוי מצומצם של התכולה המופיעה בסעיף 7.4.9. (מחקר אקדמי ישיר))
- 100 משי"ח - חלקה של ות"ת בפנייתה לפרוים תל"מ עבור תשתית פיסיית משותפת באקדמיה בלבד (ביטוי מצומצם של התכולה המופיעה בסעיף 7.4.10).
- היתרה של עד 50 משי"ח - תקצוב שות"ת כבר החלה להפעיל בנושאים שונים כגון תוכניות לימוד ונושאים אחרים הכלולים בתכולות שונות בסעיף 7.4.8. -הון אנושי - ואחרים).

**ות"ת -**  
עד 200 משי"ח

- תקציב לצורך "מאגד מגנ"ט בתחום החישה" (ביטוי מצומצם של התכולה המופיעה בסעיף 7.4.5. (פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית)).
- מאגד זה בתהליכי אישור מתקדמים וצפוי להתחיל במחצית 2019.

**רשות החדשנות**  
עד כ- 30 משי"ח

- 50 משי"ח - לטובת קרן המחקר המשותפת של ות"ת ומפא"ת
- עד 50 משי"ח – ביצוע התוכנית הפנימית במפא"ת וכן השתתפות מפא"ת במאגד החישה ביחד עם הרשות לחדשנות.

**מפא"ת -**  
כ- 100 משי"ח

### **סה"כ: כ- 330 משי"ח**

תקציב שימומש על-פני חמש השנים הבאות

איור 12: פריסת התקציב הנוכחי, מודל "זנב לשועלים"

בהינתן סדר גודל משאבים כמתואר בתרשים זה, התכולות הניתנות למימוש, מתוך התוכנית המומלצת, יהיו מצומצמות ביותר וישרתו באופן מוגבל רק חלק מתתי-התחומים, כפי שיפורט בסעיפים הבאים. בנוסף, פעילות מצומצמת שכזו לא תוכל לתמוך כמעט ביכולת העברת מרכז הכובד מהאקדמיה לתעשייה, בבשלות מדינת ישראל לשיתופי-פעולה בינלאומיים הן בהיבט האקדמי והן בהיבט התעשייתי וכן במיצובה של ישראל כמדינה מובילה בתתי-תחומים מסוימים.

10.7.1. רכש "זמן ענן" למחשוב קוונטי - גם פעילות זו תוכל במתאר זה להתבצע באופן מינימלי בלבד, שלא יתמוך בצרכי הקהילה כיום, ובוודאי שלא בצרכי הקהילה לכשתגדל עם קליטת אנשי סגל. אובדן המעמד של תחום החישוב הקוונטי כתחום

מיקוד בתוכנית, משמעותו חוסר יכולת לכניסה משמעותית של ישראל אליו, ליצירת יתרון יחסי, ולשמירה על פער סביר מהעולם, ולו רק ברמה התיאורטית/אלגוריתמית בלבד, שזוהתה ע"י הוועדה כתחום של ישראל יהיה טבעי לייצר בו יתרון יחסי.

10.7.2. צוות משולב לביצוע עבודת מטה בנושא היישומים המשמעותיים והקרובים למימוש בחישוב וסימולציות קוונטיות בעידן ה-NISQ – פעילות חשובה זו אינה דורשת תקציב משמעותי (עד 300 אש"ח בשנה), וסביר שניתן יהיה לקיימה. יחד עם זאת, ללא השקעה בתשתית חישוב קוונטי באקדמיה, ב"זמן ענן" ובתעשייה, החשיבות של פעילות העמ"ט הנ"ל תהיה מוגבלת מאד.

10.7.3. תשתית חומרה לאומית למחשוב קוונטי – פעילות זו למעשה תוכל להתבצע רק במסגרת המשאבים המוגבלים של האקדמיה ועל חשבון ההשקעות ברכש תשתית פיזית משותפת לכלל הנושאים. כלומר, במקרה כזה נושא החישוב הקוונטי יאבד את מעמדו כתחום מיקוד, וישראל לא תוכל לפתח בו הון אנושי, יכולות, יתרון יחסי, ובוודאי שלא לשמור על פער סביר מהעולם.

10.7.4. תקשורת קוונטית – הפעילות הקיימת בתחום זה כוללת את פרויקט ה-test-bed המערכתי של מפא"ת שמתנהל באוניברסיטה העברית. פרויקט זה מבוצע ברמה המחקרית בלבד, על פני זמן ארוך מאד, וע"י צוות מצומצם בלבד. ללא הרחבת פעילות זו, היכולת של מחקר בתחום זה להתפתח, להגדיל את הקהילה, ולהיות בשל להעברה למו"פ יישומי בתעשייה, לא תהיה קיימת. בנוסף, עם ההתפתחות העולמית בחישוב קוונטי, ישנה סבירות שמידע ישראלי משמעותי לא יהיה עוד מוגן דיו בהצפנות רגילות (ולא רק מידע עתידי אלא גם מידע קיים שיש להגן עליו לשנים ארוכות). זה רלוונטי הן לסקטור הביטחוני אך גם לסקטורים רגישים אחרים כגון תשתיות קריטיות, מידע פיננסי ובנקאי, ועוד).

10.7.5. פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית בתחומים הקיימים – מימוש מאגד מגנ"ט בתחום החישה כבר נמצא בשלבי אישור, וצפוי להמשיך גם ללא אישור התוכנית המומלצת. מאגד זה משותף לרשות החדשנות, מפא"ת ומערך הסייבר הלאומי. כמו כן, פעילות בהיקף מצומצם של תוכניות מסווגות לפיתוח חישה קוונטית במספר פרויקטים במפא"ת צפויה להימשך. יחד עם זאת, לא יהיה ניתן למצב את ישראל כמובילה עולמית בתחום זה, על אף ההישגים עד כה בתעשיות הקיימות, וצפוי להיפתח פער משמעותי גם בתחום זה, לאור ההשקעות הגדולות של מדינות אחרות בתחום החישה הקוונטית.

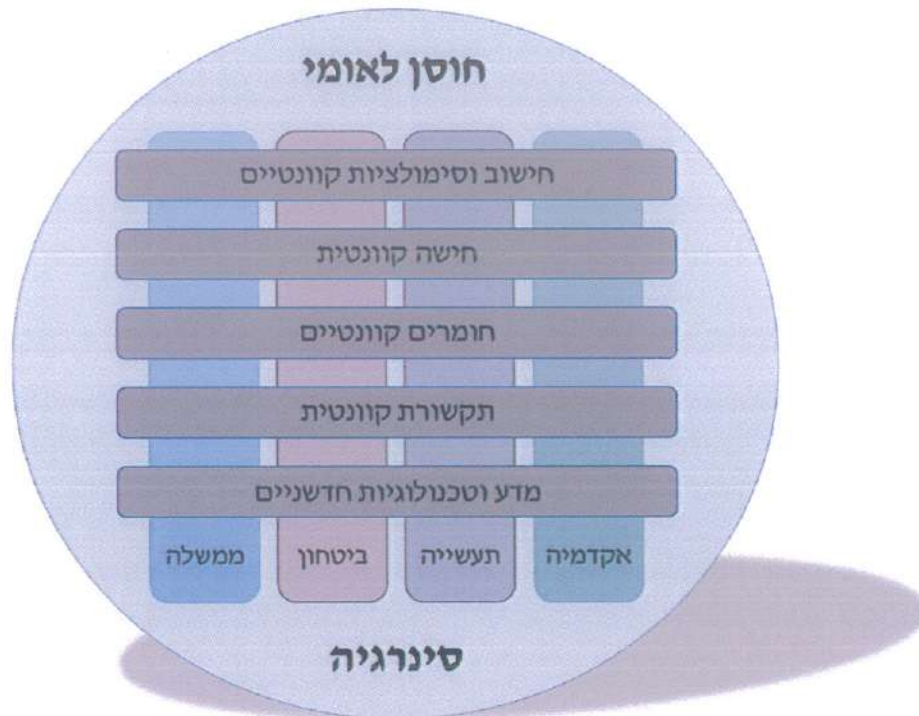
10.7.6. הון אנושי – בהלימה לתקצוב המתואר מעלה, ניתן יהיה לממש רק חלק פעוט מהתוכנית הכוללת לטיפול וגידול הון אנושי איכותי בתחומי המחקר הקוונטי. למעשה, תקציב קליטת אנשי סגל באקדמיה, שהינו חלק מהותי בתכולת ההון האנושי, לא יהיה קיים יותר או שיקטין מהותית את התקציב לרכש תשתית פיזית באקדמיה. לא יהיה תקציב ייעודי לקליטת אנשי סגל לתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים, וקליטת אנשי סגל תיעשה במשורה ולמול דרישות קליטת אנשי סגל בכלל התחומים באקדמיה הרחבה. בנוסף, שינויים בתוכניות הלימוד יהיו מוגבלים, וגם הצורך בהם ירד, שכן הצפי לכמות בוגרים בתחום תרד. מעבר לכך, לא יתאפשר לחזק

את הממשק בין האקדמיה לתעשייה (בשני הכיוונים), ולחזק את צבירת הידע מחו"ל (ע"י מלגות בתר-דוקטורט או משיכת מדענים זרים לארץ).

10.7.7. מחקר אקדמי ישיב – קרן המחקר המשותפת של ות"ת ומפא"ת כבר פועלת, ונמצאת בשלב שיפוט ההצעות הראשונות. קרן זו תומכת בקבוצות של 1-5 חוקרים ראשיים, ונותנת מענה יפה לגודל הקהילה הקטן כיום בתחום בישראל. אי מימוש הרחבת המחקר האקדמי הישיר, לא תאפשר הגדלת קבוצות מחקר למסה קריטית הנדרשת להובלה מחקרית אמיתית למול העולם, ותאפשר גידול מצומצם בלבד של כוח המחקר האקדמי בישראל.

10.7.8. תשתית חומרה משותפת – כאמור, היכולת להשקיע משאבים לרכש תשתית מחקר פיסיית משותפת באקדמיה תהיה תלויה במידת ההשקעה המוגבלת במשאבים הקיימים למול נושאים אחרים, כגון פיתוח ההון האנושי וקליטת אנשי סגל. ללא תקציב ייעודי לכך, יכולות הפבריקציה, האפיון וכד' לא יהיו ברות מימוש.

10.8. ניתן להדגים את המשמעויות מאי-מימוש התוכנית המומלצת במספר חתכים, כמוצג באיור הבא:



איור 13: חתכי השפעה באי-מימוש התוכנית המומלצת

להלן מספר דוגמאות קונקרטיות למשמעויות אי-מימוש התוכנית בחתכים אלו:  
10.8.1. חתך טכנולוגי

10.8.1.1. דוגמה א' - חישוב וסימולציות קוונטיים - הפעילות כיום בתחום החישוב הקוונטי בישראל מצומצמת מאד, והצפי לבשלות של תחומים אלו הוא לטווח הזמן הבינוני ובעיקר הארוך. בהתאם, התוכנית המוצעת כאן מגדירה את התחום מחד כתחום מיקוד, תחת ההבנה שהיכולות הקיימות מוגבלות אך שהתחום חשוב, ומאידך אינה ממליצה לכוון להובלה עולמית, כי אם על: (1)

פיתוח יתרון יחסי ב'רובדים העיליים' (תאוריה, אלגוריתמיקה, יישומים, תוכנה, וריפיקציה, בקרה וכיו"ב), ו-2) שמירה על פער סביר מהמובילים העולמיים בתחום החומרה ('מדינת סף'). המשמעות של אי מימוש התוכנית המומלצת, היא שישראל תבחר שלא להיכנס כלל לתחום החישוב והסימולציות הקוונטיות, שכפי שהוצג במסמך זה בקצרה, ומפורט במקורות רבים נוספים, הינו תחום אסטרטגי שטומן בחובו שינוי פרדיגמה בקשר ליכולות עיבוד מידע בספקטרום רחב של יישומים. למשל, תחום יישום רלוונטי שבו חישוב קוונטי צפוי לתת אימפקט משמעותי (ולא בטווח זמן מאד רחוק) הינו פתרון של בעיות אופטימיזציה. זה רלוונטי לפיתוח של חומרים ותרופות, לתכנון ושליטה על רשתות תחבורה חכמה, ל-code debugging בתוכנות מורכבות במיוחד, ולמיצוי מידע במאגרים לא מסודרים - למשל בתחום המודיעין. בנוסף, בטווח הזמן הארוך, חישוב קוונטי רלוונטי לפיצוח צפנים, דבר שיש לו חשיבות ברורה בפן הביטחוני. באופן מסורתי, ישראל נבנתה על יכולות בתחום ה-ICT, הסייבר ואחרים. הזנחת תחום החישוב הקוונטי משמעה ויתור על תחום בו הצליחה ישראל במשך מספר עשורים לייצר יתרונות יחסיים ומובילים עולמיים. תחום האינפורמציה הקוונטית במובנו הרחב, הינו במידה רבה ההמשך הטבעי של תחומי ה-ICT והסייבר (ולא רק הם), ונכון לישראל להמשיך ולהוביל בו, בנישות שצוינו לעיל.

#### 10.8.1.2. דוגמה ב' - חישה קוונטית של זמן/תדר - כפי שהוסבר בקצרה בפרקים

הראשונים של מסמך זה, תחום השעונים האטומיים ומערכות זמן ותדר מדויקים באים לידי ביטוי במגוון עצום של שימושים. מדינות רבות הציבו את תחום החישה בכלל ואת תחום השעונים בפרט בתעודף גבוה בתוכניות הלאומיות שלהם. כיום, שוק זה נשלט באופן בלעדי כמעט ע"י חברת מיקרוסמי האמריקאית. למשל, שעון ה-CSAC שהינו שעון אטומי קטן, דל הספק, וזול התאפשר לאחר השקעת ממשל אמריקאית בשיעור של מעל 100 מיליון דולר רק לתוכנית זו, בשנים האחרונות. פיתוח שעון דל הספק שכזה פתח שווקים חדשים לשעונים אטומיים ויש בו מכירות נאות כבר כיום של אלפי יחידות ברבעון, רק של סגמנט זה בתחום השעונים. תוכניות פיתוח של שעונים דומים קיימות באירופה, ביפן, ובישראל. בתוכנית הבריטית, שהחלה כבר לפני יותר מ-5 שנים, הוצבה במפורש מטרה לפתח יכולת תעשייתית בתחום השעונים האטומיים, ובאופן דומה נושא זה מוזכר בתוכניות לאומיות רבות אחרות. בנוסף, התלות האדירה של מערכות טכנולוגיות רבות כיום ב-GPS, הן בתחום האזרחי (רשתות חשמל, פיננסים, תקשורת, תשתיות קריטיות ועוד), והן בתחום הביטחוני, ולמולה הקלות של ביצוע חסימות (מכוונות או שאינן מכוונות) או הונאות GPS ע"י כמעט כל אדם (כלומר, לא נדרשת יכולת מדינתית לצורך כך), מביאות לצורך משמעותי בכלל העולם לעצמאות מהתלות ב-GPS - כבר כיום, ובוודאי בעתיד. המשמעות של המשך פיתוח תחום זה כפי שהוא קיים כיום (כמעט אך ורק לתחום הביטחוני, ע"י חברה אחת בלבד, בתקציבים מוגבלים מאד ביחס להשקעה שבמקומות

אחרים), היא שישראל לא תוכל להתחרות עם העולם, ולא יהיה ניתן לשמר את היכולת. יתר על כן, השוק הישראלי הוא מצומצם ואיננו יכול להחזיק יכולת שכזו, ללא פעילות בחו"ל. כבר כיום אנו רואים סימנים להגבלות רכש ושימוש בשעונים ליישומים מסוימים, ולמול זה הגבלות על היכולת למכור שעונים ישראלים בשווקים מסוימים (בעיקר בשל שיקולי סייבר). מאידך, כפי שהוצג קודם, גודל השוק של השעונים ממשיך לעלות. התפתחות הדרישות הטכנולוגיות מביאה גם לתקנים חדשים - למשל בתחום החשמל, דרישות הסנכרון במערכות שליטה על רשתות החשמל הולכות ועולות (בעיקר בשל הצורך בסנכרון אנרגיה המיוצרת ע"י הרבה יותר מקורות מאשר היה בעבר), ובהתאם הדרישות מכמותיות וביצועי מערכות זמן ותדר גדלות. עצירת ההתפתחות הישראלית בתחום זה תיצור פערים ותלות במקורות חיצוניים, וחוסר יכולת לנצל את היתרון היחסי שיש לישראל כבר בתחום זה, בו ישנה תעשייה מבוססת שפעילה בעולם.

10.8.1.3. מעבר לכך, ישנן גם משמעויות ביטחוניות לאי התקדמות בתחומים אלו, כבר בטווח הזמן המידי בחישה, וכן בטווח הזמן הבינוני והארוך בחישוב, שהינן מסווגות.

10.8.2. חתך סקטוריאלי - חתך הסתכלות אחר הינו החתך הסקטוריאלי ולא הטכנולוגי. כאן ניתן שתי דוגמאות למשמעויות של אי מימוש התוכנית על האקדמיה ועל הביטחון. ניתן לתת דוגמאות גם להשפעה על התעשייה ואף על הממשלה עצמה.

10.8.2.1. דוגמה ג' - האקדמיה. דוח הוועדה האקדמית של ותי"ת לתחום הקוונטים, בראשותו של פרופ' אורי סיוון, ביצע ניתוח מעמיק של איכות החוקרים הישראליים בתחום הקוונטים, והראה כי הרמה האקדמית בארץ בתחום זה, על אף שהקהילה קטנה, הינה רמה גבוהה הן ביחס למחקר בתחום הקוונטים בעולם והן ביחס למחקר בתחומים מדעיים שכנים. שמירה על רמה שכזו מאפשרת פרסומים מדעיים בכתבי העת המובילים, זכייה במענקי מחקר יוקרתיים כגון ERC, וביצוע שת"פ בינ"ל מחקרי עם טובי החוקרים בעולם. אי מימוש התוכנית המומלצת בהקשר זה, תשאיר את הקהילה המחקרית מאחורי ההתפתחות המדעית המואצת בעולם, תקטין את האימפקט המדעי ואת היכולת להמשיך שילוב (מחקרי ותקציבי) עם העולם, תגרום לבריחת מוחות של חוקרים שעוסקים בתחום זה לחו"ל, ולמעשה עלולה לנוון את העיסוק בתחום חשוב זה באקדמיה. בנוסף, מכיוון שהידע האקדמי הינו הבסיס ההכרחי ליכולת למעבר לפיתוח טכנולוגיה ומוצרים, פגיעה בהתפתחות הידע האקדמי תשליך הלאה גם על הסקטורים היישומיים, ועל היכולת להפיק תועלת ביטחונית מתחום זה.

10.8.2.2. דוגמה ד' - הביטחון. טכנולוגיות קוונטים משולבות כבר כיום בשדה הקרב במערכות מבצעיות רבות, וחלקן נוגעות להתמודדות עם פערים מבצעיים מהותיים שמשפיעים על המדינה כולה. השימוש בטכנולוגיות קוונטים ליישומי ביטחון סובל קשות מהגבלות רכש ושימוש, ומצריך השקעה של מפא"ת בפיתוח טכנולוגיות כחול/לבן (בדומה לתחומים אסטרטגיים אחרים), על מנת

לשמור על עצמאות טכנולוגית ולעמוד בדרישות הצורך המבצעי. בנוסף, התעשיות הביטחוניות הישראליות נבנות תמיד על ייצוא טכנולוגיה, שכן השוק הביטחוני בארץ הינו קטן. ללא דחיפה ממשלתית, יכולת הפיתוח של התעשיות הללו בתחומים עתירי סיכון וארוכי זמני פיתוח הינה מוגבלת מאד. מחד, הרמה הטכנולוגית בתעשיות הקיימות הינה גבוהה, וישנה אפשרות אמיתית ליצור מובילות של ישראל ביחס לעולם בתחומים אלו. מאידך, הצרכים הביטחוניים כבדים, זמני הפיתוח של טכנולוגיות קוונטים ארוכים, ולכן התקציבים הקיימים מוגבלים, על אף שמפא"ת פעילה בתחום כבר כ-15 שנים והינה היחידה מגופי הממשלה שלהם תוכנית ייעודית בתחום. יתר על כן, התפתחות שדה הקרב ויכולות היריב מאתגרות את מערכת הביטחון באופן עקבי, ודורשות המשך פיתוח מערכות מדויקות יותר, חסינות יותר, ובעלות יכולות עיבוד והיתוך מידע ומיצוי מידע ברמות גבוהות יותר. טכנולוגיות הקוונטים הינן טכנולוגיות מאפשרות (enabling technologies) שיכולות לתרום באופן משמעותי לשמירה על היתרון האיכותי של צה"ל ולפיתוחו, כאשר במקרים מסוימים החלופות נופלות בביצועים בסדרי גודל, ולעתים אין חלופות כאלו. המשמעות של אי-אישור התוכנית היא התקדמות איטית וסיכון בחוסר עמידה בצרכים מבצעיים חשובים. למול האתגרים המידיים, פיתוח חלק ממרכיבי טכנולוגיות הקוונטים למעשה יישאר ללא מענה, שכן אתגרים אלו תמיד יתועדפו על פני השקעה בפיתוחים ארוכי טווח ועתירי סיכון.

### 10.8.3. סינרגיה ושת"פ

10.8.3.1. דוגמה הי - טכנולוגיות ויישומים דואליים. התגבשות מאגד החישה הקוונטית שנמצא כיום בתהליך התהוות מתקדם היא דוגמה טובה לסינרגיה בממשקים שבין תעשייה וביטחון, ובין אקדמיה ותעשייה. בין טכנולוגיות החישה הקוונטית השונות (שעונים אטומיים והפצת זמן, חישה מגנטית, וחישה גרביטציה), יש מכנה משותף טכנולוגי-גנרי רחב, כאשר הפלטפורמות הפיסיקליות, שיטות המדידה, והאתגרים הטכנולוגיים משותפים במידה רבה מאד. במאגד זה ישנו שיתוף פעולה של חברות ביטחוניות ודואליות, משתמשי קצה אזרחיים (כדוגמת חברת החשמל וסלקום) וביטחוניים, וקבוצות אקדמיות, המפתחים את הטכנולוגיה הגנרית בראי מגוון יישומים עתידיים שהכלים הבסיסיים יכולים להתפתח בכיוונם. דוגמה זו ממחישה את היתרון בסינרגיה בין הגופים השונים, במקרה שבו לכאורה חלק לא קל לבצע פעילות עבור מערכת הביטחון, במסגרת אזרחית בלתי-מסווגת. סינרגיה זו מתאפשרת בשל המכנה המשותף, הבסיס המדעי הרחב, והתשתית הטכנולוגית-גנרית שהינה דואלית. מאידך, מאגד זה, שהינו אחד מהצעדים הראשונים בתוכנית המומלצת, הוא פעילות סינרגטית מוגבלת, שכן התקציב האפשרי במסגרת זו מתחלק על פני כ-4 תעשיות ליבה עיקריות, כ-12 קבוצות מחקר אקדמיות, וכ-6 תעשיות המשמשות כמשתמשי קצה. המשמעות היא שהתקציב נפרס דק על פני מספר רב של פעילויות. ללא הרחבה של הפעילויות ומתן אפשרות לתעשיות להתקדם מהר אל עבר השוק, תתקשה התעשייה בישראל, במיוחד בתחום

שכזה בו אנו נמצאים בנקודת זינוק למובילות ביחס לעולם, להתמודד עם ההתקדמות המואצת בעולם. ככל שהפעילויות בתחום הקוונטים יהיו קטנות יותר, כל גוף מתקצב ידאג קודם כל לתיעדופים הפנימיים שלו, והסינרגיה תקטן.

10.9. יש לציין כי באי-מימוש התוכנית, מלבד הישארות מדינת ישראל במסגרת המצומצמת שפורטה מעלה, מדינת ישראל עתידה לייצר פער למול מדינות אחרות בעולם. פער שיתכן ולא ניתן יהיה לגשר עליו בעתיד.

10.10. לכן, ועדה זו רואה חשיבות עליונה במימוש התוכנית כפי שהוצעה, וזאת מתוך הבנה שבניית החוסן הלאומי תלויה באופן ישיר ביכולת שלנו לפעול בנושא זה בשלב מוקדם יחסית, וכן ביכולת שלנו לפעול באופן נכון ברמה האסטרטגית.

## 11. סיכום

דוח הוועדה שהוצג לעיל מפרט את הנדבכים המומלצים למימוש בתחומי העיסוק העיקריים, על מנת להבטיח את קידום וביסוס התחום הקוונטי ראשיתו בתשתית מדעית והמשכו גם ביכולת הנדסית תעשייתית.

התוכנית הלאומית המוצעת כוללת קידום ומיקוד בהון האנושי, השקעה בתשתיות חומרה, הקמת מרכזי מו"פ, הרחבה והאצה של תוכניות קיימות, עידוד תעשיות חדשות וכן השקעה בביסוס שיתופי פעולה בינלאומיים. כיוונים אלו יחדיו יאפשרו קידום במדע ובטכנולוגיות הקוונטים בישראל, על בסיס תשתית נרחבת שתשרת את מדינת ישראל לטווח ארוך.

על-מנת להוביל בתחומים אלה ולהתחרות בהצלחה בהתפתחויות בעולם, וכן על מנת לשמור על יכולתנו לתפעל יישומים ייחודיים בתחום, עלינו להאיץ את הקמת ופתיחת התוכנית הקוונטית הלאומית. כבר היום, יש צורך קריטי בתחומים שונים כגון הפצת זמן מדויקת כגיבוי למערכות התלויות ב-GPS (כגון: תשתיות קריטיות, תשתיות תקשורת וכד'), קידום שיטות הצפנה חדשות ומתקדמות כתוצאה מחשש ממשי לחשיפת מידע מסווג מהעבר ומההווה. כמו כן, כישלון בהקצאת משאבים מספקים לתחום הקוונטים עלול לחשוף את ישראל לסיכונים ביטחוניים, בשעה שמדינות אחרות בעולם כבר השקיעו משאבים אדירים בתחום.

כפי שצוין לעיל, למרות שהתוכנית מתייחסת לחומש הראשון בלבד, היא מתווה אסטרטגיה לתוכנית רחבה וכוללת שיש להמשיך במימושה מעבר לשלבים הראשונים המפורטים בתוכנית. אסטרטגיה זו מיועדת לממש את הפוטנציאל של התחום לחיזוק החוסן הלאומי, הביטחוני, האקדמי, והעסקי בהווה אולם מימוש מלוא הפוטנציאל שבה מחייב להמשיך את העיסוק מעבר לאופק הזמן של התוכנית הראשונה, ולהקצות משאבים נוספים בהמשך הדרך.

כאמור, באם יבחר שלא לממש את התוכנית המוצעת, יכולתה של ישראל להתקדם יחד עם ההתפתחות העולמית המואצת תהיה מוגבלת עד כדי אפסית, ויתכן שהפער שייווצר כתוצאה ישירה ובלתי נמנעת מבחירה זו, יהיה כזה שעליו מדינת ישראל לא תוכל לגשר.

בנקודת הזמן הנוכחית מדינת ישראל נמצאת בפרשת דרכים בכל הנוגע למדע וטכנולוגיות קוונטים. עליה לבחור בין הישארות במתכונת המצומצמת הקיימת כיום, לבין קידום והובלה של תחומים פורצי דרך החיוניים להתפתחותה. ועדה זו ממליצה על הקמת תוכנית לאומית למדע וטכנולוגיות קוונטים במסגרת שפורטה במסמך זה, שמשמעותה הצטרפות למאמץ עולמי הנמצא עדיין בראשיתו, שיבוא לידי ביטוי במגוון רחב של תחומים יישומיים חיוניים, ושלמדינת ישראל יש את הפוטנציאל להצליח בו ואין את הפריבילגיה שלא לעשות כן.



## 12. תודות

- פרופ' חיים קידר לוי – המחלקה לניהול, אוניברסיטת בן-גוריון, סייע רבות לעבודת הוועדה בהיבט התקצוב.
- מר חמי פקר - מוביל החדשנות בחברת Motorola Solutions ובעל ניסיון עתיר במערכת הביטחון. סייע בהיבטים רבים בעבודת הוועדה, תרם מזמנו ומניסיונו העשיר לגיבוש האסטרטגיות המוצעות.
- פרופ' דנה אנדרסון - JILA אוניברסיטת קולורדו ארה"ב, מנכ"ל ColdQuanta. סייע במתן משוב על התוכנית הכוללת, תרם מזמנו ומניסיוני העשיר לגיבוש האסטרטגיות המוצעות.
- ד"ר ניר ברילר וצוות מחברת רבתית הנדסה ויעוץ בע"מ – גב' דוריאן בנימין, מר תומר דור, מר רועי עובדיה, סייעו בהכנת המסמך המסכם עריכתו והאחדתו.

### 13. נספחים

#### א. נספח תקציבי

נספח זה יפרט מעט יותר לעומק את הרציונל התקצובי מאחורי התקציב המומלץ לכל מרכיב בתוכנית. המהות של כל מרכיב תוארה כבר בפרק 7 בדוח ולכן לא נחזור עליה כאן. התכנון בוצע בהתאם להערכות תקציביות ובעקבות פגישות רבות עם גורמים שונים בממשלה, באקדמיה, ובתעשיות, ובעקבות דיונים בוועדה עצמה. התכנון התקציבי בוצע על פי חתך צפוי של הפעילויות השונות על ציר הזמן (שנת התארגנות + חומש ראשון של פעילות), כאשר כפי שתואר בדוח חלק מהפעילויות למעשה כבר קיימות/החלו לאחרונה בגופי התקצוב השונים. בנוסף, בוצע חתך לפי הוצאות כוח אדם, רכש ציוד וחומרים, והוצאות ספקים (כאשר במקרים מסוימים גם סעיפים שאינם בדיוק קבלני משנה הוכללו תחת קטגוריה זו).

#### 1. ניהול

##### 1.1. ניהול / ועדת היגוי (סעיף 7.3.1)

החישוב התקציבי לנושא ועדת ההיגוי הניח מספר ישיבות של ועדת ההיגוי בכל שנה לפי המפורט בטבלה הבאה, עם שמונה משתתפים (גרעין ועדת ההיגוי הינו מובילי גופי תל"מ, אך ייתכנו גורמים נוספים לרבות חיצוניים). בוצעה הנחה של שכר עבור כל ישיבה לכל משתתף. יש לציין כי, אם לא כל המשתתפים רלוונטיים לתשלום עבור השתתפות בישיבות ועדת ההיגוי, התקציב הנדרש למרכיב זה יכול להיות נמוך יותר. כמות הישיבות באופן טבעי תהיה גבוהה יותר בשלבי ההתארגנות וההקמה, וכן לקראת סיום החומש הראשון.

ועדת ההיגוי						ניהול
7.3.1						סעיף בדוח:
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	כ"א
8	4	4	4	8	12	כמות ישיבות ועדת היגוי
8	8	8	8	8	8	מספר משתתפים
1500	1500	1500	1500	1500	1500	שכר למשתתף (ש"ח)
0.096	0.048	0.048	0.048	0.096	0.144	עלות ישיבות שנתית (מש"ח)
0	0	0	0	0	0	עלות ציוד
0	0	0	0	0	0	עלות ספקים
0.096	0.048	0.048	0.048	0.096	0.144	סה"כ (מש"ח)
0.48						סה"כ כולל (מש"ח)

1.2. ניהול / מועצה מדעית מייעצת (סעיף 7.3.2)

בתחשיב המועצה המדעית המייעצת ההנחה הייתה כי החברים במועצה ישתתפו בפעילותה כספקים חיצוניים (כלומר לא יועסקו על-ידי התוכנית), ויקבלו רק שכר ייעוץ והחזרי הוצאות נסיעה (לרבות נסיעות חו"ל שכן צפוי שמרבית החברים במועצה יהיו מומחים בעלי שם מחו"ל).

מועצה מדעית מייעצת						ניהול
7.3.2						סעיף בדוח:
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	כ"א
0	0	0	0	0	0	
0						עלות ציוד
6	4	2	2	4	6	ספקים – מספר נסיעות לחו"ל
10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	עלות נסיעה (ש"ח)
0.06	0.04	0.02	0.02	0.04	0.06	סה"כ עלות נסיעות (מש"ח)
0.4	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	שכר ייעוץ (מש"ח)
0.46	0.24	0.22	0.22	0.44	0.46	עלות ספקים (מש"ח)
0.46	0.24	0.22	0.22	0.44	0.46	סה"כ (מש"ח)
2.041						סה"כ כולל (מש"ח)

הוצאות חו"ל חושבו כסך של 2750 דולר לנסיעה (כולל שהות וכו').

1.3. ניהול / מנהל התוכנית (סעיף 7.3.3)

תחת סעיף "מנהל התוכנית" כלולות הוצאות השכר של הצוות המצומצם של הגוף הניהולי האופרטיבי של התוכנית (שלושה עובדים בכירים, עובד אחד זוט, ועוזר מנהל), מעט הוצאות ציוד (משרדי), מספר נסיעות חו"ל, ואחזקת משרד.  
יש לציין כי, אם חלק מהעובדים בגוף הניהולי יקבלו משכורת ממקורות אחרים (למשל אם יועסקו כעובדי מדינה), או באם יימצא שמספיקה חלקיות משרה, עלות מרכיב זה תוכל להצטמצם.

ניהול						מנהל התוכנית (גוף ניהול אופרטיבי)
סעיף בדוח:						7.3.3
כ"א						שנה 0
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	שכר מנהל התוכנית (ש"ח)
486000	486000	486000	486000	486000	486000	שכר מדע"ר התוכנית (ש"ח)
486000	486000	486000	486000	486000	486000	שכר מנהל תפעול (ש"ח)
486000	486000	486000	486000	486000	486000	שכר עוזר לתפעול (ש"ח)
243000	243000	243000	243000	243000	243000	שכר עוזר מינהלי (ש"ח)
129600	129600	129600	129600	129600	129600	סה"כ הוצ' שכר (מש"ח)
1.8306	1.8306	1.8306	1.8306	1.8306	1.8306	עלות ציוד (משרדי) (מש"ח)
0	0	0.1	0	0	0.1	ספקים – מספר נסיעות לחו"ל
5	3	2	2	5	5	עלות נסיעה (ש"ח)
10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	סה"כ עלות נסיעות (מש"ח)
0.05	0.03	0.02	0.02	0.05	0.05	שכר ייעוץ (מש"ח)
0.25	0.1	0.1	0.1	0.25	0.5	אחזקת משרד (מש"ח)
0.144	0.144	0.144	0.144	0.144	0.144	עלות ספקים (מש"ח)
0.444	0.274	0.264	0.264	0.444	0.694	סה"כ (מש"ח)
2.275	2.105	2.195	2.095	2.275	2.625	סה"כ כולל (מש"ח)
13.568						

1.4. ניהול / מדעייר התוכנית (סעיף 7.3.3.1)

תחת מרכיב זה נכללות הוצאות צוותי חשיבה קטנים תחת המדעייר לביצוע עבודות מטה שונות במהלך התוכנית. כמו כן נכללות הוצאות ליווי רו"ח/עו"ד.

ניהול						מדעייר התוכנית
סעיף בדוח:						7.3.3.1
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	כ"א
8	6	4	4	4	4	כמות ישיבות צוותי חשיבה
4	4	4	4	4	4	מספר משתתפים
1000	1000	1000	1000	1000	1000	שכר למשתתף (ש"ח)
0.032	0.024	0.016	0.016	0.016	0.016	עלות ישיבות (מש"ח)
0	0	0	0	0	0	עלות ציוד (משרדי) (מש"ח)
0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	ספקים - רו"ח (מש"ח)
1	1	1	1	1.5	1.5	ספקים - עו"ד (מש"ח)
1.15	1.15	1.15	1.15	1.65	1.65	סה"כ עלות ספקים (מש"ח)
1.182	1.174	1.166	1.166	1.666	1.666	סה"כ (מש"ח)
8.02						סה"כ כולל (מש"ח)

1.5. ניהול / שת"פ ביני"ל (סעיף 7.3.3.2)

מרכיב זה כולל חצי משרה לפונקציית הסיוע בשת"פ הביני"ל, מספר מצומצם של נסיעות חו"ל ואירוח של אורחים בישראל.

ניהול						סיוע בשת"פ ביני"ל
סעיף בדוח:						7.3.3.2
כ"א						שנה 0
שכר מנהל שת"פ ביני"ל (חצי משרה) (ש"ח)						64800
שנה 1						64800
שנה 2						64800
שנה 3						64800
שנה 4						64800
שנה 5						64800
עלות ציוד (משרדי) (מש"ח)						0
שנה 1						0
שנה 2						0
שנה 3						0
שנה 4						0
שנה 5						0
ספקים – מספר נסיעות לחו"ל						2
שנה 1						1
שנה 2						0
שנה 3						0
שנה 4						1
שנה 5						2
עלות נסיעות חו"ל (ש"ח)						10037.5
שנה 1						10037.5
שנה 2						10037.5
שנה 3						10037.5
שנה 4						10037.5
שנה 5						10037.5
סה"כ עלות נסיעות חו"ל (מש"ח)						0.02
שנה 1						0.01
שנה 2						0
שנה 3						0
שנה 4						0.01
שנה 5						0.02
אירוח גורמי חו"ל (מש"ח)						0.5
שנה 1						0.4
שנה 2						0.2
שנה 3						0.2
שנה 4						0.3
שנה 5						0.5
סה"כ ספקים (מש"ח)						0.52
שנה 1						0.41
שנה 2						0.2
שנה 3						0.2
שנה 4						0.31
שנה 5						0.52
סה"כ (מש"ח)						0.585
שנה 1						0.475
שנה 2						0.265
שנה 3						0.265
שנה 4						0.375
שנה 5						0.585
סה"כ כולל (מש"ח)						2.549

1.6. ניהול / משיכת השקעות וסיוע עסקי (סעיף 7.3.3.3)

באופן דומה, גם התחשיב לפונקציה זו הוא לפי חצי משרה, מספר מצומצם של נסיעות לחו"ל ואירוח גורמים מחו"ל בישראל.

משיכת השקעות וסיוע עסקי						ניהול
7.3.3.3						סעיף בדוח:
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	כ"א
64800	64800	64800	64800	64800	64800	שכר מנהל משיכת השקעות וסיוע עסקי (חצי משרה) (ש"ח)
0	0	0	0	0	0	עלות ציוד (משרדי) (מש"ח)
6	4	2	2	4	4	ספקים – מספר נסיעות לחו"ל
10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	10037.5	עלות נסיעת חו"ל (ש"ח)
0.06	0.04	0.02	0.02	0.04	0.04	סה"כ עלות נסיעות חו"ל (מש"ח)
0.25	0.25	0.1	0.1	0.25	0.25	אירוח גורמי חו"ל (מש"ח)
0.31	0.29	0.12	0.12	0.29	0.29	סה"כ ספקים (מש"ח)
0.375	0.355	0.185	0.185	0.355	0.355	סה"כ (מש"ח)
1.810						סה"כ כולל (מש"ח)

2. תחום מיקוד חישוב וסימולציות קוונטיים

2.1. זמן ענן (סעיף 7.4.1)

מרכיב זה כאמור כולל רכש גישה (יבנק שעות) לחומרת state-of-the-art עולמית לחישוב/סימולציות קוונטיים. לכן, המרכיב היחיד כאן הינו הרכש הנ"ל שנכלל אצלנו תחת קטגוריית הספקים (שכן לא מדובר בצידוד).  
 הערכת התקציב הנדרשת מתבססת על מגעים שהתקיימו בין נציגי ות"ת לבין חברת IBM (וטרום הושלמו לכדי מספר פורמלי מחייב). ההערכה היא על 100 א"ד בשנה למוסד אקדמי, הערכה לעלות כפולה עבור תעשיות, ומרכיב בצ"מ שכן המספרים כאן מבוססים על מו"מ ראשוני בלבד.

תחום מיקוד - חישוב קוונטי						זמן ענן
סעיף בדוח:						7.4.1
כ"א						שנה 0
עלות צידוד (מש"ח)						שנה 1
שנה 2						שנה 3
שנה 4						שנה 5
שנה 0						0
שנה 1						0
שנה 2						0
שנה 3						0
שנה 4						0
שנה 5						0
ספקים - כמות מוסדות מחקר						3
ספקים - כמות תעשיות						1
ספקים - עלות למוסד מחקר (מש"ח)						0.365
ספקים - עלות לתעשייה (מש"ח)						0.730
ספקים - בצ"מ (מש"ח)						0.365
סה"כ ספקים (מש"ח)						2.19
סה"כ (מש"ח)						2.19
סה"כ כולל (מש"ח)						30.66



2.2. צוות עמ"ט NISQ (סעיף 7.4.2)

צוות זה דומה לצוותי החשיבה שיפעלו תחת המדע"ר, אך כאן מדובר במשימה קצת יותר נרחבת. הנחת המוצא לתחשיב הייתה מספר ישיבות בשנה, שביניהן אנשי הצוות יבצעו עבודה ב-offline. כמו כן, צפוי שרק חלק מחברי הצוות יהיו חיצוניים, בעוד שחלקם עובדי מדינה.

תחום מיקוד - חישוב קוונטי						עמ"ט NISQ
סעיף בדוח:						7.4.2
כ"א						שנה 0
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	8
4	4	4	4	6	8	6
6	6	6	6	6	6	6
1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
0.024	0.024	0.024	0.024	0.036	0.048	0.048
עלות ציוד (משרדי) (מש"ח)						0
0	0	0	0	0	0	0
ספקים - עבודות מחקר של הצוות (מש"ח)						0.25
0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
סה"כ ספקים (מש"ח)						0.25
0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
סה"כ (מש"ח)						0.298
0.274	0.274	0.274	0.274	0.286	0.298	0.298
סה"כ כולל (מש"ח)						1.680
1.680						1.680

2.3. תשתית חומרה בחישוב וסימולציות קוונטיים - מרכיב הגוף האקדמי (סעיף 7.4.3.1)  
 כאמור, במרכיב זו יורחבו 2 קבוצות אקדמיות מובילות (שיזכו בהליך הבחירה התחרותי  
 שייקבע), בנושא הפן החומרתי/ניסויי של החישוב/סימולציות קוונטיים. בתחשיב ביצענו  
 הערכות לפי 2 סוגי טכנולוגיות הן לכמות הסטודנטים והחוקרים המעורבים, והן בהיבט  
 הערכת עלות ציוד נדרש להקמת/שדרוג תשתית מעבדתית.

תשתית חומרה לחישוב קוונטי - מרכיב הגוף האקדמי						תחום מיקוד - חישוב קוונטי
7.4.3.1						סעיף בדוח:
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	כ"א
10	10	10	10	10	0	כמות סטודנטים
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	עלות סטודנט (מש"ח)
6	6	6	6	6	0	כמות חוקרים קבועים / טכני
0.5475	0.5475	0.5475	0.5475	0.5475	0	עלות חוקרים קבועים / טכני (מש"ח)
1	1	1	1	1	0	כ"א סטודנטיאלי (ל-2 טכ' (מש"ח)
3.285	3.285	3.285	3.285	3.285	0	כ"א חוקרים / טכני (ל-2 טכ' (מש"ח)
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0	עלות תוספת שכר חוקרים ראשיים (מש"ח)
4.405	4.405	4.405	4.405	4.405	0	עלות כ"א (מש"ח)
0	0	0	8.2125	8.2125	0	ציוד - טכ' 1 (מש"ח)
0	0	0	26.4625	26.4625	0	ציוד - טכ' 2 (מש"ח)
0	0	0	34.675	34.675	0	סה"כ ציוד (מש"ח)
0	0	0	0	0	0	ספקים
4.405	4.405	4.405	39.08	39.08	0	סה"כ (מש"ח)
91.375						סה"כ כולל (מש"ח)

2.4. מרכז מו"פ יישומי לחישוב קוונטי (סעיף 7.4.3.2)

מרכז המו"פ היישומי יחזיק צוות של כ-16 חוקרים קבועים ועוזר מנהלי, כאשר הפעילות המרכזית תחל בשיהוי ביחס לשאר התוכנית (למעט גיוס צוות הקמה). הערכות העלויות של הציוד מתבססות על שיחות עם חוקרים ואנשי תעשייה. ההנחה היא שלא ייבנה מבנה ייעודי, אלא רק יהיו הוצאות שכירות שטח.

מרכז מו"פ יישומי לחישוב קוונטי								תחום מיקוד - חישוב קוונטי
7.4.3.2								סעיף בדוח:
עלות חודשית	כמות	שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	כ"א
39542 (ש"ח)	5	2.3725	2.3725	1.898	0	0	0	פיסיקאים (מש"ח)
39542 (ש"ח)	4	1.898	1.898	1.898	0	0	0	מהנדסי חשמל (מש"ח)
45625 (ש"ח)	3	1.6425	1.6425	1.6425	0	0	0	אלגוריתמיקאים (מש"ח)
39542 (ש"ח)	4	0.949	1.4235	1.898	0.949	0.4745	0	אחרים (מש"ח)
11000 (ש"ח)	1	0.132	0.132	0.132	0	0	0	אדמיניסטרציה (מש"ח)
		6.99	7.47	7.47	1	0	0	סה"כ כ"א (מש"ח)
		24.5	14.5	10	0	0	0	ציוד טכ' 1 (מש"ח)
		60	30	10	0	0	0	ציוד טכ' 2 (מש"ח)
		15	0	8	0	0	0	בצ"מ (מש"ח)
		99.5	44.5	28	0	0	0	סה"כ ציוד (מש"ח)
		0.432	0.432	0.432	0.432	0.432	0	ספקים - שכירות מבנה (מש"ח)
		106.926	52.401	35.901	1.381	0.907	0	סה"כ (מש"ח)
		197.515						סה"כ כולל (מש"ח)

3. תקשורת קוונטית (סעיף 7.4.4)

הפעילות המרכזית הקיימת כיום בתחום זה הינה הפרויקט המפא"תי המבוצע על-ידי קבוצת חוקרים באוניברסיטה העברית בליווי מצומצם של תעשיות וצוות אדום של חוקר יחיד. פרויקט זה מחולק לרובד בסיס מערכתי, ולמחקרים מתקדמים שיזינו אותו באבני בניין על מנת לשפר את הביצועים שלו כרובד מתקדם.

בתוכנית הלאומית, מרכיב זה בא להשלים את הפעילות המפא"תית ולהרחיב הן את העיסוק ברובד המערכתי והן ברובד המחקרים הנלווים, כאשר התשתית המערכתית תורחב ותיפתח גם לגופים נוספים לרבות תעשיות. בהתאם, התקצוב המפורט להלן מניח השלמת הפרויקט הקיים (שבמועד התנעת התוכנית יגיע בערך למחצית הדרך), וכן הרחבה שלו לקבוצות/מקומות נוספים (נלקחו בחשבון שני אתרים נוספים). הפרטים של אופן מימוש תהליך ההרחבה יידון בהנהלת התוכנית וגופי התקצוב במהלך שלב ההתארגנות. כמו כן, הצוות האדום שמטרתו לבחון חולשות בתשתית המערכתית שתפותח, יורחב. גם המחקרים הנלווים את התשתית המערכתית יורחבו באופן דומה. ההנחה היא שהרחבות אלו ידרשו עלות לשכירת המקום למעבדות, דבר שלא קיים בפרויקט המצומצם כיום, ושעלות הספקים תהיה שונה בין המשך הפרויקט הקיים לבין ההרחבות למקומות נוספים.

תשתית מערכתית לתקשורת קוונטית ומחקרים נוספים							
7.4.4 סעיף בדוח:							
שנה 0	שנה 1	שנה 2	שנה 3	שנה 4	שנה 5	כמות	עלות חודשית (ש"ח)
0	0.375	0.375	0.1875	0	0	1	31250 (ש"ח)
השלמת פרויקט מפא"ת - כ"א רובד בסיס לא כולל צוות אדום (מש"ח)							
0	0.08	0.08	0.04	0	0	1	6667 (ש"ח)
השלמת פרויקט מפא"ת - כ"א רובד בסיס - צוות אדום מצומצם (מש"ח)							
0	0.3264	0.3264	0.1632	0	0	8	3400 (ש"ח)
השלמת פרויקט מפא"ת - כ"א רובד מתקדם (מש"ח)							
0	1.875	1.875	2.0625	2.25	2.25	6	31250 (ש"ח)
הרחבת תשתית מערכתית - כ"א (מש"ח)							
0	0.36	0.36	0.45	0.54	0.54	3	15000 (ש"ח)
הרחבת צוות אדום - כ"א (מש"ח)							

3400 (ש"ח)	16	0.6528	0.6528	0.4896	0.3264	0.3264	0	מחקרים נלווים – (מש"ח) כ"א
		2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	0	סה"כ כ"א רובד מערכת כולל צוות אדום (מש"ח)
		0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0	סה"כ כ"א מחקרים נלווים (מש"ח)
		3.44	3.44	3.39	3.34	3.34	0	סה"כ כ"א (מש"ח)
		0	0	0.075	0.15	0.15	0	השלמת פרויקט מפא"ת - ציוד רובד בסיסי (מש"ח)
		0	0	0.3	0.5	0.5	0	השלמת פרויקט מפא"ת - ציוד רובד מתקדם (מש"ח)
		2	2	2	3	4	0	הרחבת תשתית מערכתית – ציוד (מש"ח)
		1	1	1	1	1	0	מחקרים נלווים – ציוד (מש"ח)
		2	2	2.075	3.15	4.15	0	סה"כ ציוד רובד מערכת (מש"ח)
		1	1	1.3	1.5	1.5	0	סה"כ ציוד מחקרים נלווים (מש"ח)
		3	3	3.375	4.65	5.65	0	סה"כ ציוד (מש"ח)
		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0	ספקים - שכירות מבנה (מש"ח)
		0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0	ספקים - קב"מ רכיבים 1 (מש"ח)
		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0	ספקים - קב"מ רכיבים 2 (מש"ח)
		1.25	1.3	1.3	1.3	1.3	0	סה"כ ספקים (מש"ח)
		7.693	7.743	8.068	9.293	10.293	0	סה"כ (מש"ח)
				43.089				סה"כ כולל (מש"ח)

4. תחום מיקוד חישה קוונטית - פרויקטים מרכזיים (סעיף 7.4.5)

מרכיב זה מתבסס על פעילויות של מאגד החישה הקוונטית שנמצא כבר בשלבי התארגנות מתקדמים, ועל פעילויות מסווגות בתוך מפא"ת. ההרחבה ביחס לפעילויות המאגד מתבטאת בהרחבה קטנה של הפעילויות במסגרת המאגד עצמו, ובעיקר בכך שהן ימשיכו מעבר ל-3 שנות המאגד, עד תום החומש בתוכנית. פעילויות מפא"ת גם הן מקבלות הרחבה מסוימת. הפילוג בין הוצאות כ"א, ציוד וספקים הן בקווים כלליים על-פי הפעילויות הקיימות במאגד ובמפא"ת וייתכנו שינויים קלים על בסיס תוכניות העבודה המפורטות שיוגשו. פעילויות אלו, שהינן האצה של תכניות קיימות, לא זקוקות לזמן התארגנות. שינוי ועדכון תוכניות העבודה בעקבות ההאצה יוכל להתבצע על-ידי גופי הביצוע בתיאום עם הנהלת התוכנית וגופי התקצוב הרלוונטיים, תוך כדי הפעילות.

פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית (נושאים קיימים)					
סעיף בדוח: 7.4.5					
שנה 0	שנה 1	שנה 2	שנה 3	שנה 4	שנה 5
0	5	5	5	5	5
3	4	5	6	5	2
2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
8.4	23.2	26	28.8	26	17.6
1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
3.6	9.2	10	10.8	10	7.6
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
1.2	3.6	4	4.4	4	2.8
13.2	36	40	44	40	28
סה"כ כולל (מש"ח)					
201.2					

5. עידוד שחקנים חדשים בתעשייה (סעיף 7.4.6)

התקצוב למרכיב זה חולק לוגית לשני מרכיבים - האחד, תכניות לעידוד תעשיות להסבה/כניסה לתחום, והשני, סיוע לחברות הזנק. הפילוח ואופן המימוש המדויק ייקבעו במתואם על-ידי גוף התקצוב הרלוונטי והנהלת התוכנית בשלב ההתארגנות. החלוקה בין כ"א לבין ציוד הינה עקרונית וניתנת לשינויים על-פי מנגנוני התקצוב שייבחרו.

עידוד כניסת שחקנים חדשים לתעשייה					
7.4.6					
סעיף בדוח:					
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0
2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0
כ"א עידוד תעשיות לכניסה לתחום (מש"ח)					
2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	0
כ"א תמיכה בחברות הזנק (מש"ח)					
5	5	5	5	5	0
סה"כ כ"א (מש"ח)					
2	2	2	2	2	0
ציוד עידוד תעשיות לכניסה לתחום (מש"ח)					
2	2	2	2	2	0
ציוד תמיכה בחברות הזנק (מש"ח)					
4	4	4	4	4	0
סה"כ ציוד (מש"ח כולל)					
0	0	0	0	0	0
ספקים					
9	9	9	9	9	0
סה"כ (מש"ח)					
45					
סה"כ כולל (מש"ח)					

6. תשתית רכיבים קוונטיים לתעשייה (סעיף 7.4.7)

מרכיב זה נבנה על-בסיס שיחות עם התעשייה וגורמי ממשל, ומניח קיומם של מספר פרויקטים פריפריאליים לתמיכה בתעשיות, ופיתוח אפשרי של יתרון יחסי בתחומים המשרתים את ליבת העיסוק בטכנולוגיות קוונטים. למשל, פרויקט פיתוח לייזרי VCSEL להתקנים קוונטיים (עם דרישות אורך הגל, הקיטוב, המענה למודולציה, וכיו"ב - שהינם ייחודיים להתקנים קוונטיים), הוערך בכ-10 משי"ח על פני מספר שנים. ההנחה היא כי מרבית ההשקעה תהיה במימוש תשתית לפיתוח וייצור של הרכיבים, וזאת צריכה להתבצע בתחילת הדרך.

תשתית רכיבים קוונטים לתעשייה					
סעיף בדוח: 7.4.7					
שנה 0	שנה 1	שנה 2	שנה 3	שנה 4	שנה 5
0	4	4	4	4	4
כ"א תשתית רכיבים לתעשייה (משי"ח)					
0	8	8	4	0	0
ציוד תשתית רכיבים לתעשייה (משי"ח)					
0	0	0	0	0	0
ספקים					
0	12	12	8	4	4
סה"כ (משי"ח)					
40					סה"כ כולל (משי"ח)



7. הון אנושי (סעיף 7.4.8)

מרכיב זה מורכב ממספר תכולות משנה. העיקרית שבהן - קליטת/הסבת אנשי סגל חדשים לאוניברסיטאות, ומעבדות אישיות עבורם. התוכנית מניחה תמיכה חלקית בשכר אנשי הסגל החדשים (3 שנים), קליטה מדורגת של כ-50 אנשי סגל ורכש הציוד למעבדות החוקרים על-פני שנתיים ראשונות. ההערכה לעלות כל קליטה נלקחה כעלות שכר מרצה בכיר, ורכש ציוד בשיעור של כ-2 משי"ח לחוקר. מספר זה מביא בחשבון שיהיו קליטות יקרות יותר (נסיונאים בתחומים מסוימים), וקליטות זולות יותר (תיאורטיקנים או הסבת חוקרים), כמספר אצבע. בנוסף, מרכיבים נוספים שנלקחו בחשבון, על-פי הצעת ות"ת, דוח רשות החדשנות, ודיוני הוועדה השונים, כוללים השקעות בריענון תוכניות הלימוד ומעבדות הוראה, מלגות למשתלמי בתר-דוקטורט ישראליים בחו"ל, מאמץ למשיכת מדענים זרים מחו"ל לישראל, קרן מלגות "תור הזהב" לשילוב פורשי תעשייה בקבוצות אקדמיות, עידוד תעשיות להוצאת אנשיהן להתמחויות קצרות או תארים גבוהים באקדמיה, תקצוב פרויקטי סטודנטים שיבוצעו בתעשייה או במרכז המו"פ היישומי, מימון מאגרי מידע ובסיס ידע, ותקציב לכנס בינלאומי ומפגשים נוספים.

הון אנושי							
סעיף בדוח:							7.4.8
	שנה 0	שנה 1	שנה 2	שנה 3	שנה 4	שנה 5	שכר מרצה בכיר
קליטת/הסבת אנשי סגל חדשים - מנה 1 (מש"ח)	1.75	5.25	7	5.25	1.75	0	350000
קליטת/הסבת אנשי סגל חדשים - מנה 2 (מש"ח)	0	1.75	5.25	7	5.25	1.75	
קליטת/הסבת אנשי סגל חדשים - מנה 3 (מש"ח)	0	0	1.75	3.5	3.5	1.75	
סה"כ כ"א (מש"ח)	1.75	7	14	15.75	10.5	3.5	
ציוד - מנה 1 (מש"ח)	10	20	10	0	0	0	
ציוד - מנה 2 (מש"ח)	0	10	20	10	0	0	
ציוד - מנה 2 (מש"ח)	0	0	5	10	5	0	
סה"כ ציוד (מש"ח)	10	30	35	20	5	0	
ריענון תכניות לימוד ומעבדות הוראה (ת. ראשון, תארים גבוהים) (מש"ח)	3	4.5	4.5	6	6	6	

	2	2	2	1.5	1.5	1	מלגות לפוסט-דוק ישראלים בחו"ל (מש"ח)
	6	5	4	3	1.5	0.5	משיכת מדענים מחו"ל לישראל (מש"ח)
	3	3	2.5	2.5	1.5	0.5	קרן מלגות "תור הזהב" (מש"ח)
	2	2	2	2	2	0	עידוד תארים לאנשי תעשייה (מש"ח)
	2	2	2	2	2	0	פרוייקטי סטודנטים בתעשייה (מש"ח)
	0	0.5	0.5	0.5	0.25	0.25	מאגרי מידע ובסיס ידע (מש"ח)
	1	1	1	1	0.5	0.5	כנסים (מש"ח)
	22.0	21.5	20.0	17.0	13.8	5.8	סה"כ ספקים/שונות (מש"ח)
	25.5	37	55.75	66	50.75	17.5	סה"כ (מש"ח)
	252.5						סה"כ כולל (מש"ח)

8. מחקר אקדמי ישיר (סעיף 7.4.9)

מרכיב זה מתבסס על קרן ות"ת-מפא"ת למחקר ושדרוג מעבדות אישיות במדע וטכנולוגיות קוונטים, שכבר הותנעה ונמצאת בשלבי שיפוט הסבב הראשון של הצעות מחקר שהתקבלו. קרן זו מבוצעת בעיקרה באמצעות הקרן הלאומית למדע (75% מהקרן), וחלקה באמצעות מפא"ת (25%), וגודלה 100 מ"ש"ח על-פני 5 שנים. הוועדה ממליצה על הרחבה מסוימת של הקרן, הן על-מנת לתת מענה לגודל הקהילה שצפוי לגדול במהלך החומש הקרוב, והן מכיוון שהתוכנית הלאומית מתחילה בשיהוי ביחס לתחילת פעולתה של הקרן. על-פי כללי הקרן, מרכיב הציוד יכול להיות עד 50% מסכום המחקר המאושר. פרטים נוספים ניתן למצוא בקול הקורא של הקרן.

מחקר אקדמי ישיר					
סעיף בדוח: 7.4.9					
שנה 0	שנה 1	שנה 2	שנה 3	שנה 4	שנה 5
13.33	13.33	13.33	13.33	13.33	0
0	0	5	5	10	23.33
13.33	13.33	18.33	18.33	23.33	23.33
6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	0
0	0	2.5	2.5	2.5	6
6.67	6.67	9.17	9.17	9.17	6
0	0	0	0	0	0
20	20	27.5	27.5	32.5	29.33
156.83					

9. תשתית חומרה משותפת לאקדמיה (סעיף 7.4.10)

מרכיב מרכזי זה הינו לרכש תשתית חומרה משותפת (בין מחלקתית, בין מוסדית) לאקדמיה. תיאור תכולות אפשריות של מרכיב זה מופיע בסעיף הרלוונטי בדוח הוועדה. מרכיב זה כולל את רכש הציוד עצמו, את כוח האדם הטכני-מקצועי המומחה הנדרש לתפעול הציוד במרכזי התשתית האקדמיים (לא סגל אקדמי/סטודנטיאלי ולכן נלקח בחשבון כאן), וסכום מסוים לתחזוקת הציוד בשנים הראשונות, כאשר ההנחה היא כי בשנים הבאות עלות התחזוקה תהיה על חשבון מוסדות המחקר. הסכומים המופיעים מטה מתבססים על דוח הוועדה המייעצת לות"ת, שתוקפו ואומצו על-ידי הוועדה.

תשתית חומרה משותפת לאקדמיה					
סעיף בדוח: 7.4.10					
שנה 0	שנה 1	שנה 2	שנה 3	שנה 4	שנה 5
0	14	14	14	14	14
כ"א טכני-מקצועי מומחה (מש"ח)					
0	40	40	40	40	40
ציוד (מש"ח)					
0	4	4	4	4	4
ספקים - תחזוקת ציוד (מש"ח)					
0	58	58	58	58	58
סה"כ (מש"ח)					
290					סה"כ כולל (מש"ח)

10. שתי"פ ביני"ל (סעיף 7.4.11)

מרכיב זה מהווה סיוע למנגנוני השתי"פ הביני"ל השונים בגופי התקצוב. הוא מניח קרנות דו-לאומיות או שילוב בתכניות ביני"ל אחרות, הכוללות הן כספי מחקר והן כספים לציוד. ההנחה היא שסיוע זה יחל מעט לאחר שאר פעילויות התוכנית. מנגנון תקצוב ספציפי ייתכנו שינויים בחלוקה בין הסעיפים.

שתי"פ ביני"ל						
סעיף בדוח:						7.4.11
שנה 5	שנה 4	שנה 3	שנה 2	שנה 1	שנה 0	
9.73	9.73	9.73	9.73	9.73	0	כ"א למחקר (מש"ח)
4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	0	ציוד (מש"ח)
0	0	0	0	0	0	ספקים - תחזוקת ציוד (מש"ח)
14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	0	סה"כ (מש"ח)
73						סה"כ כולל (מש"ח)

## ב. יעדים עקרוניים – אבני דרך לתכולת התוכנית המומלצת

מטרת עבודת הוועדה איננה לנסח תוכניות עבודה מפורטות למרכיבי התוכנית. עם זאת, הוועדה מצאה לנכון להמליץ על יעדים עקרוניים, מדידים ככל הניתן, למימוש מרכיבי התוכנית. היעדים העקרוניים המוצגים בנספח זה שימשו את הוועדה בגיבוש התוכנית והערכת התוצרים האפשריים והנגזרות התקציביות הנדרשות. הם מהווים מצע להגדרת יעדים באופן מפורט על-ידי גופי הניהול של התוכנית (ועדת ההיגוי, המועצה המדעית המייעצת, וגוף הניהול האופרטיבי הקטן) במהלך שלב ההתארגנות של התוכנית. הגדרה מפורטת זו תבוצע בתיאום ושיתוף גופי התקצוב (המהווים למעשה את ועדת ההיגוי). נספח זה יפרט את היעדים העקרוניים המומלצים, לשנת ההתארגנות, מחצית החומש, וסיום החומש הראשון.

### 1. ניהול

- יעד שנת התארגנות – הקמת ועדת ההיגוי, המועצה המדעית המייעצת, וגוף הניהול האופרטיבי, וגורמי ייעוץ אחרים. ניסוח נהלים וכללי עבודה וממשקים עם גופי התקצוב והביצוע, ובניית מנגנוני בקרה. **המשך מימוש מרכיבים בתוכנית שכבר החלו**, ועדכוןם בהתאם למבנה התוכנית המאושר. גיבוש קולות קוראים/מכרזים בשתי גופי התקצוב, והוצאתם לפועל. בניית מפת דרכים למשיכת השקעות נוספות ולסיוע עסקי לגופי הביצוע. מיפוי פלטפורמות שתי"פ בינ"ל קיימות וכאלו שבהתהוות, וסיוע לקידום.
- יעד מחצית החומש – עבודה שוטפת במנגנוני הניהול עפ"י הגדרתם. מימוש לפחות 2 קרנות דו-לאומיות ייעודיות חדשות. חיזוק מיצוב ושילוב ישראל למול תכניות לאומיות ובמיוחד למול תוכנית הדגל האירופית (ברמה הניהולית ובכמות הפרויקטים המאושרים). יצירת שתי"פ תעשייתי ראשון עם גורם חו"ל. ביצוע עבודת מטה לנושאים חדשים בחומרים קוונטיים, חישה קוונטית, ותקשורת קוונטית. קביעת יעדים להתמקדות אפשרית בנושא החישוב והסימולציות הקוונטיים.
- יעד לסיום החומש – עבודה שוטפת במנגנוני הניהול עפ"י הגדרתם, והכנה להמשך. המשך הרחבת השתי"פ הבינ"ל באקדמיה, בתעשייה ובביטחון. עדכון עבודת מטה בכלל הנושאים.

### 2. רכש "זמן ענן" למחשוב קוונטי

- יעד שנת התארגנות –
  - קביעת שיטת התקשרות מול ספקי "זמן ענן" מחשוב קוונטי (בחינת התקשרות מרכזית), החלטה על שיטת הקצאת זמן המחשוב, הוצאת קול קורא ויציאה לדרך.
  - יעד מחצית החומש –
    - פרסום בספרות המדעית של מחקרים ישראלים ראשוניים העושים שימוש ב"זמן הענן". ממשק עם עמ"ט יישומים בעידן ה-NISQ והמלצה על כיווני מחקר להמשך.
  - יעד לסיום החומש -

- המשך פרסומים מדעיים.
  - ביצוע מחקרים ראשוניים של גופים תעשייתיים על "זמן הענן".
- 3. צוות משולב לביצוע עמ"ט בנושא היישומים המשמעותיים והקרובים למימוש בחישוב וסימולציות קוונטיות בעידן ה-NISQ**

- יעד לאחר חצי שנה –
  - איתור ראש הצוות, קביעת חברים. קביעת מטרות הצוות (בפרט, קשר לרכיב "זמן ענן" מחשוב קוונטי). מינוי הצוות ויציאה לדרך.
- יעד לאחר שנה וחצי –
  - דוח סיכום עמ"ט הכולל המלצות למדיניות השקעה והכוונה של תחום המחשוב הקוונטי בראייה לאומית (מדעית ויישומית).
  - המלצה על עבודות המשך במידה ויידרשו.
- יעד לאחר שנתיים (באחריות ועדת ההיגוי) –
  - התנעת עבודת המשך לפי הצורך.

**4. תשתית חומרה לאומית למחשוב קוונטי**

**i. תשתית חומרה בחישוב וסימולציות קוונטים – מרכיב הגוף האקדמי**

- יעד שנת התארגנות –
  - קביעת תהליך הבחירה, פרסום קולות קוראים, קביעת הקבוצות הזוכות ויציאה לדרך.
- יעד מחצית החומש –
  - קיום קבוצת חוקרים הכוללת לפחות חמישה חוקרים פעילים.
  - הדגמות ראשוניות כגון: אתחול סיביות קוונטיות ומדידת זמן הקוהרנטיות, הדגמות single qubit operations, וכיו"ב.
  - התקדמות בהעברת הידע למרכז המו"פ היישומי לפי תוכנית שהוגשה.
- יעד לסיום החומש –
  - מימוש מעבד רחב יותר בעל יכולות משופרות, הדגמות מתקדמות כגון: פעולות שערים לוגיים two-qubit gates, הדגמת תיקון שגיאות ברמה ראשונית, וכיו"ב.

**ii. תשתית חומרה בחישוב וסימולציות קוונטים – מרכיב מרכז המו"פ היישומי**

- יעד שנת התארגנות –
  - קביעת תהליך הבחירה, אפיון בעלי התפקידים במרכז ומשימותיהם. פרסום קולות קוראים, קביעת הקבוצות הזוכות, והתחלת גיוס הצוות.
- יעד מחצית החומש –
  - קיום צוות של לפחות 5 עובדים פעילים, הכולל תמיכה הנדסית חלקית.

- מימוש מערכת ניסויית ראשונה והדגמות ראשוניות כגון: סיביות קוונטיות, אתחול, מדידת זמן קוהרנטיות וכיו"ב.
- קיום תוכנית עבודה מתואמת עם המרכיב האקדמי למדגים חומרת המחשב הקוונטי, ביצוע PDR (Preliminary Design Review) ואישורו ע"י הנהלת התוכנית.
- יעד לסיום החומש –
- סיום הקמת מדגים החומרה למחשב קוונטי, והדגמות מתקדמות כגון: הדגמת שערים לוגיים קוונטיים במדגים היישומי, אפיון זמן קוהרנטיות, fidelity של שערים מסוג Two Qubits gates, וכיו"ב.
- בחינת האפשרות למתן "זמן ענן" ישראלי במהלך החומש הראשון או בעתיד.

#### 5. תקשורת קוונטית - הרחבת תשתית מערכתית ותוכנית אחרות

- יעד שנת התארגנות - בחינת שינויים בפרויקט מפא"ת הקיים, אפיון אופן הרחבת התשתית המערכתית ובחינת היקף יציאה לתכניות אחרות, יציאה להתקשרויות, הקמת צוות אדום מורחב לתשתיות המערכתיות.
- יעד מחצית החומש - פיתוח תשתית מערכתית מורחבת, ניתוח תיאורטי של התקפות ע"י צוות אדום, התחלת בדיקות ברמה מערכתית, ביצוע תכניות מחקר אחרות לפי ההגדרה משלב ההתארגנות.
- יעד לסיום החומש - מימוש תשתית מערכתית מורחבת וסיום ניתוח חולשות ע"י הצוות האדום. המשך ביצוע תכניות המחקר הנוספות. בחינה להמשך.

#### 6. פרויקטים מרכזיים בחישה קוונטית בתחומים הקיימים

- יעד שנת התארגנות –
- ניסוח מפת דרכים לחישה קוונטית לתחום הביטחוני (מפא"ת), הגדרת הפרויקטים הנבחרים ותהליך בחירת מבצעים (על בסיס הפעילויות שכבר קיימות, כולל בחינת צורך בשינויים / עדכונים בהן). הגדרת יעדים ראשוניים לתשתיות רכיבים קוונטיים, ניסוח קולות קוראים ויציאה לדרך.
- יעד מחצית החומש –
- התקדמות פרויקטלית, לדוגמה: השלמת מדגים הנדסי בחלק מהפרויקטים, סקרי תכן לאב-טיפוס, וכיו"ב.
- ממשק לתשתית לרכיבים קוונטים לתעשייה.
- יעד לסיום החומש –
- התקדמות פרויקטלית, לדוגמה: הדגמת אבי-טיפוס, הקמת תשתית לקראת סיום פיתוח והעברה לייצור, בחינת מדגימים תחת תנאי סביבה ותרחישי שימוש רלבנטיים, דוחות של סיכום בדיקות פיתוח ואישור, וכיו"ב.



- הטמעת אבני בניין רלבנטיות מתשתית רכיבים קוונטיים שתפותח במקביל ובמתואם.

#### 7. תמיכה ועידוד כניסת תעשיות חדשות לתחומי החישה, התקשורת, החומרים, ואחרים

- יעד שנת התארגנות –
  - הגדרת תהליכי התמיכה בתעשיות, הוצאת קולות קוראים לתעשייה, ביצוע שיפוט ויציאה לדרך.
- יעד מחצית החומש –
  - התנעת ומימוש לפחות שני פרויקטים לתמיכה בתעשיות חדשות בתחומי החישה, התקשורת, החומרים ואחרים. מימוש אבני בניין והדגמות ראשונות בתעשיות אלו.
  - ניסוח מפות דרכים לפיתוח בתעשיות החדשות.
- יעד לסיום החומש –
  - הדגמות מתקדמות ותכנון המשך/סיום פיתוח מוצרים.
  - מימוש פרויקטים נוספים בתעשיות נוספות.

#### 8. תשתית רכיבים קוונטיים לתעשייה

- יעד שנת התארגנות –
  - אפיון 3-5 תחומי עדיפות לפיתוח תשתית רכיבים קוונטיים לתעשייה. ניסוח קולות קוראים/מכרזים בתיאום עם גופי הביצוע ותעשיות רלוונטיות, בחירת הפרויקטים הזוכים, ויציאה לדרך.
- יעד מחצית החומש –
  - מימוש אבני בניין לרכיבים בתחומי העדיפות שנבחרו, והדגמות טכנולוגיות.
- יעד לסיום החומש –
  - מימוש הדגמות הנדסיות וחיבור לתעשיות קיימות.

#### 9. הון אנושי

- יעד שנת התארגנות –
  - המשך תהליך קליטת הסגל הקיים כבר בות"ת.
  - חיבור מנהלת התוכנית לתהליך קליטת / הסבת חברי סגל בות"ת, ובחינת הצורך בעדכוננו בראיית התוכנית הלאומית, מימוש הקליטה הראשונה בתקציבי התוכנית.
  - הגדרת התהליכים למשיכת מדענים זרים, עידוד משתלמי בתר-דוקטורט ישראלים בחו"ל, ומסלולים נוספים – בהתאם לתוכנית ות"ת ובתיאום עם הנהלת התוכנית בראייה לאומית.
- יעד מחצית החומש –
  - קליטת/הסבת לפחות 15 חברי סגל בסיוע מענקי הקליטה.

○ המשך תכניות משיכת מדענים זרים, עידוד משתלמי בתר-דוקטורט  
ישראלים בחו"ל, ומסלולים נוספים.

● יעד לסיום החומש –

○ קליטת הסבת לפחות 30 חברי סגל בסיוע מענקי הקליטה.  
○ המשך תכניות משיכת מדענים זרים, עידוד משתלמי בתר-דוקטורט  
ישראלים בחו"ל, ומסלולים נוספים.

#### 10. מחקר אקדמי ישיר

● יעד שנת התארגנות –

○ המשך מידי של קרן ות"ת-מפא"ת במתאר המקורי.  
○ הרחבת קרן ות"ת-מפא"ת בהתאם למתווה התקציבי המדורג  
בהתאם לקצב גידול הקהילה בפועל ולבחינה המתמשכת של הקרן  
באופן שוטף.  
○ בחינת אפשרות לתמיכה בקבוצות מחקר גדולות (בנוסף לתמיכה  
בהצעות משותפות למספר קבוצות מחקר שונות כפי שקיים כיום).  
○ בחינת אפשרות להכללת גורמי מחקר אקדמי נוספים (לא רק  
אוניברסיטאות).

● יעד מחצית החומש –

○ קיום מאגדי חוקרים, פרסומים מדעיים, הרחבת קהילת החוקרים.  
● יעד לסיום החומש –  
○ קיום מאגדי חוקרים, פרסומים מדעיים, הרחבת קהילת החוקרים.

#### 11. תשתית חומרה משותפת באקדמיה

● יעד שנת התארגנות –

○ אפיון הצרכים יציאה לקולות קוראים ובחירת הזוכים.  
○ אפיון מודל הפעלה של התשתיות השונות עבור צרכנים באקדמיה  
ועבור צרכנים תעשייתיים.

● יעד מחצית החומש –

○ ביצוע רכש התשתיות וקליטתן באוניברסיטאות בהתאם לקבועי  
הזמן הרלוונטיים לכל תשתית.  
○ התחלת שימוש בתשתיות לצרכי המחקר באוניברסיטאות  
ובתעשייה

● יעד לסיום החומש –

○ המשך קליטת התשתיות באוניברסיטאות בהתאם לקבועי הזמן  
הרלוונטיים לכל תשתית.  
○ המשך שימוש בתשתיות לצרכי המחקר באוניברסיטאות  
ובתעשייה.

#### 12. שת"פ בינ"ל

● יעד שנת התארגנות –

- חיבור למנגנוני השת"פ הבינ"ל הקיימים בגופי התקצוב. יציאה באמצעותם לקולות קוראים בהתאם לפלטפורמות שייבחרו עם גופי התקצוב.
- יעד מחצית החומש –
- מימוש התקשרות למחקרים ראשוניים לפחות עם 2 מדינות, שילוב בלפחות 2 פרויקטים מעבר לקיים בתוכנית הדגל האירופית.
- יעד לסיום החומש –
- הרחבת הפעילות לפרויקטים נוספים עם מדינות נוספות.



**תל"מ - פורום לתשתיות לאומיות למחקר ולפיתוח**  
**מיסודה של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים**

27 אוגוסט 2018

לכבוד:

ד"ר ארנה ברי - י"ר הועדה  
מוטי בסר - חבר  
פרופ' ניר דודון - חבר  
משה לוינגר, חבר  
ד"ר אילן פלד - חבר  
פרופ' רוני קוסלוב - חבר  
ד"ר משה שוקר - חבר

ד"ר טל דוד - מרכז הוועדה  
מר גדי לויץ - מרכז הוועדה

שלום רב,

הדו"ח מינוי ועדת בדיקה מקצועית לבחינת הצורך והאפשרות להקמת תשתית למ"פ בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים

1. על יסוד החלטת פורום תל"מ מיום 12.4.2018, אני מתכבד למנותכם כחברי הוועדה לעיל. ד"ר ארנה ברי תהיה י"ר הוועדה וד"ר טל דוד ומר גדי לויץ ישמשו מרכזיה.

2. להלן תפקידי הוועדה:

א. לבדוק את הצורך ועצמתו, ואת האפשרות והתועלת הצפויה למדינת ישראל מהקמת תשתית למ"פ בתחום מדע וטכנולוגיות קוונטים, לרבות מפיתוח המחקר האקדמי הבסיסי והטכנולוגי-יישומי. הנכם מתבקשים לבחון את הנושא בהתחשב בצרכי המ"פ של האקדמיה, מערכת הביטחון, והתעשייה בישראל, תוך השואה לתשתיות הקיימות ולמצב ההשקעות בצידוד בהן.

ב. לבחון את הצעת ות"ת המצ"ב (לרבות סדרי העדיפויות הפנימיים שבה), מחדש מרץ 2018, לרבות המצגת שהצגה ע"י ות"ת בישיבת פורום תל"מ מיום 12.4.2018 (מצ"ב), ואת הדוח המסכם של צוות ההתייעצות לנשא הפן התעשייתי בתכנית הקוונטים הלאומית, של רשות החדשנות, מחדש יוני 2018 (מצ"ב). לזהות ולהעריך את הפוטנציאל הגלום בתכניות המתוארות במסמכים לעיל, לפיתוח תשתית מדעית וטכנולוגית מתקדמת, לשימוש אזרחי וביטחוני על בסיס התשתית המוצעת, ולהמליץ על סדרי עדיפויות בין התחומים בשטח. לאפיין ולפלח את אוכלוסיית המשתמשים הפוטנציאליים (כולל חברות ומספרן) במגזרים השונים, ולהעריך את השימוש הצפוי בתשתיות המוצעות.

ג. לבחון תכניות ומדלים מקבילים במדינות אחרות ולבדוק את האפשרויות לשיתופי פעולה איתן.



## תל"מ - פורום לתשתיות לאומיות למחקר ולפיתוח מיסודה של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים

- ד. להמליץ על אבני דרך לפיתוח תשתיות המחקר האקדמי והפיתוח היישומי, והדרכים למימוש התוצרים והתועלות הכלכליות והמדדיות להשגתם, והיבטים נוספים בהתאם לשיקול דעתה.  
לבחון את אפשרויות המסחר והייצוא של תוצרי המר"פ לרבות המגבלות שיחולו עליהן.
- ה. לאפיין מדל פעילות לתשתית הנדונה תוך התייחסות לתחומים הבאים:
- 1) היבטים מדעים / טכנולוגיים -
    - א) תיחום שטח המדע והטכנולוגיות הקונטנים הרלבנטיים.
    - 2) היבטים ארגוניים -
      - א) ריכוז או ביזור התשתית (מרכז או מרכזים, לרבות תשתיות משותפות) ומקומה (באוניברסיטאות המחקר, במעבדות לאומיות לאו בתעשייה).
      - ב) זמינות ונגישות לחוקרים מהתעשייה, מהמוסדות להשכלה גבוהה וממערכת הביטחון.
      - ג) שיטת הפעולה והגדרת מדל השירות המוצע לאוניברסיטאות, לתעשייה ולמערכת הביטחון, לרבות שיטת הניהול והבקרה (ברמת מרכז/מרכזים וברמת התכנית הכללית).
      - ד) אפשרויות היישום על ידי המשרדים והגופים החברים בפורום תל"מ בכל אחת מאופציות המיקום ובהתחשב בנהלים המחייבים בהם.
      - ה) אפיון "קול קורא" בדגש על תנאי הסף הנדרשים מהמתמודדים והתבחינים להערכת ההצעות.
    - 3) היבטי תשתיות -
      - א) תשתית פיזית (למעט בינוי) - פירוט הציוד הנדרש לקידום המר"פ לפי קדימויות.
      - ב) תשתית אנושית לתפעול, תחזוקה והטמעה.
      - ג) מניעת כפילות (בהתייחס לתשתית וציוד קיימים).
    - 4) היבטים כלכליים ותקציביים -
      - א) מדל תקצוב - לרבות טבלת מקורות השימושים, עלות הקמה ועלות תפעול (כולל כ"א טכני).
      - ב) מדל מימון - לרבות שיעורי המימון העצמי של הארגון / ארגונים בהם תמוקם התשתית, דמי שימוש למשתמשים חיצוניים ושיטת המימון בתום תקופת התמיכה הממשלתית / ציבורית, לשם פעולה ברת קיימא.
      - ג) הגדרת מדיניות מסחר הידע / הקניין הרוחני (מודל public domain או מודל אחר).
3. מתודולוגיה:
- א. הוועדה מתבקשת להזמין לשיבוחה את נציגת החשכ"ל בתל"מ, להיפגש עם חברי פורום תל"מ / נציגיהם. הוועדה חופשית להיפגש עם אישים ומומחים נוספים עפ"י שיקול דעתה.
  - ב. הוועדה תקבע את דרכי ושיטות עבודתה, במסגרת תקציבה המאושר ותוכל להיעזר בעבודתה בשני מרכזיה לצורך איסוף ועיבוד החומרים והנתונים.
4. אני מודה לכם על הסכמתכם ליטול חלק בעבודת הוועדה ומערך מאד את התנדבותכם למען פיתוח תשתיות המר"פ בישראל.  
אהיה אסיר תודה אם הדות, לרבות הממצאים, המסקנות והמלצות הוועדה יוגש לנו עד יום 28.2.2019 ויוצג על דכם למליאת פורום תל"מ.



**תל"מ - פורום לתשתיות לאומיות למחקר ולפיתוח**  
**מיסודה של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים**

לוט:

- דוח ועדת ההיגוי המייעצת לות"ת לנושא מדע וטכנולוגיות קוונטים.
- מצגת הצעת ות"ת.
- דוח מסכם צוות התייעצות לנושא הפן החעשייתי בתכנית הקוונטים הלאומית (רשות החדשנות).
- דוח פעילות פורום תל"מ מחדש יוני 2018.

בברכה,

*שמעון אולמן*

שמעון אולמן

י"ר תל"מ

העתיקים:

חברי פורום תל"מ.

- מר שאול מרידור, ראש אגף תקציבים, מ. האוצר.
- מר רוני חוקיהו, החשב הכללי, מ. האוצר.
- מר אהרון אהרון, מנכ"ל רשות החדשנות.
- מר מתניהו אנגלמן, מנכ"ל ות"ת/מ"ג.
- ד"ר גליה פינצי, מנכ"ל האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים.
- פרופ' אלכס בליי, מדע"ר, מ. המדע והטכנולוגיה.
- ד"ר אביב זאבי-באלאסיאנו, סמנכ"ל ור' זירת תשתיות טכנולוגיות, הרשות לחדשנות.
- ד"ר משה גולדברג, ר' מת"ט, מפא"ת, מ. הבטחון.
- מר מאיר נצר, מנכ"ל תל"מ.