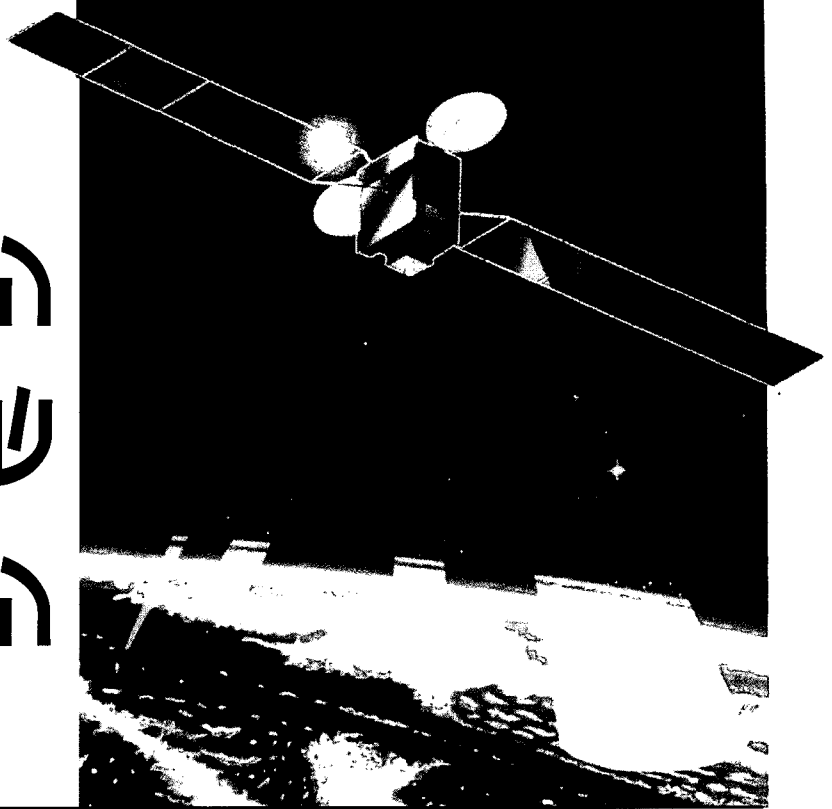


הטכנולוגיה של 25 השנים הבאות



תקציר מתוך עבודת מחקר מקיפה שהזמין משרד ההגנה האמריקני, ואשר מנסה לחזות את הפיתוחים הטכנולוגיים המרכזים עד לשנת 2025 ואת יישומיהם הצבאיים*

עיבד וערך: אל"ם (מיל') יעקב צור

תשקיף טכנולוגי עד שנת 2025

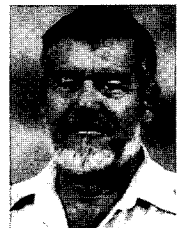
על ה-NSSG - National Security Study Group (קבוצת המחקר של הביטחון הלאומי) הוטלה המשימה להגיש דו"ח המציג את מתארי הביטחון הלאומי של ארה"ב, שיתקיימו – על-פי הערכותיהם של מחברי הדו"ח – ברבע הראשון של המאה ה-21.

הקבוצה נדרשה להעריך את האיומים ואת ההזדמנויות שארה"ב יכולה לצפות להם בתחומי הפוליטיקה, הכלכלה, הצבא, החברה והטכנולוגיה. הדו"ח מתמקד בהשפעות הפוטנציאליות (ברמת מאקרו) של הטכנולוגיה ומבוסס על המגמות הקיימות ועל חוות-דעת של מומחים.

מיקרו-אלקטרוניקה, רשתות מחשבים ותקשורת

■ מיקרו-אלקטרוניקה זולה ובעלת צפיפות רכיבים גבוהה תימצא בסביבתנו הפיזית, בכלים ובמכשירים שלנו. עד שנת 2005 או 2010 מספר הטרנזיסטורים בשבב יוכפל בכל 18 חודשים. תהליך זה יימשך עד שנגיע לקצה הגבול הפיזיקלי של תהליך זה. אולם לא מדובר בסיומה התפתחות זו, שכן השבבים בנויים היום באופן בסיסי על ארכיטקטורה

יועץ למדי"ב בטחוני ותעשייתי



■ דר-ממדית, ובעתיד הם יתבססו על ארכיטקטורה תלת-ממדית. עם הגדלת כוח העיבוד המחירים יורדים. המחיר של מיליארד חישובים לשנייה הוא כיום כ-1,000 דולר. בשנת 2025 אותם 1,000 דולר יאפשרו לבצע כ-10 מיליארד x מיליארד חישובים בשנייה. גם קיבולת הזיכרון תוכפל כל שנתיים, ובמקביל תהיה ירידת מחירים משמעותית. ב-1970 עלה מגבייט אחד של זיכרון כחצי מיליון דולר. ב-1996 ירד המחיר ל-38 דולר. היום המחיר עומד על פחות מ-3 דולרים.

בעתיד תגדל עוד יותר יכולתנו לארוז את האינפורמציה בנפחים הולכים וקטנים תוך ירידה מקבילה במחירים. ריצרד פינמן, בעל פרס נובל, הצליח לתאר באופן דרמטי את תופעת המזעור, כאשר ציין כי ניתן – תיאורטית – לרכז את כל האנציקלופדיה בריטניקה על ראש סיכה. קיבולת כזאת תהיה בסיס לשינויים מרחיקי לכת בשיטות שבהן מטופלת האינפורמציה במגזרים השונים, כגון עסקים, חינוך וממשל.

■ מעתה ועד ל-2025 תגיע הקיבולת של הסיבים האופטיים אל מעבר לקצב של טרה באוד, דהיינו אל מעבר לאלף מיליארד ביטים בשנייה. כמו באלקטרוניקה – הגדלת העוצמה מביאה לירידת העלויות ליחידה. סיבים אופטיים יהיו בסיס לרשת תקשורת גלובלית אינטגרטיבית. תקשורת

* המחקר פורסם ב-15 באפריל 1999 בביטאון הפנטגון "Inside The Pentagon". תרגום מלא של המאמר – על-ידי אלי אלגור – פורסם בלקט העיתונות של מפא"ית – מו"פ ביטחוני בעולם" בגיליון אוקטובר '99

באמצעות סיבים אופטיים לאורך אלפי קילומטרים תתאפשר באמצעות מגברים חדשים. כמו כן יוגדל משמעותית מספר האותות המועברים בסיב אופטי באמצעות שימוש באורכי גל רבים (צבעים). צופים כי עד שנת 2010 תגיע התקשורת באמצעות סיבים גם לרמה של שימוש ביתי.

עד שנת 2025 יהיו מערכות של קשר אלחוטי (בבסיסים קרקעיים או בחלל) משולבות עם מערכות סיבים אופטיים ויספקו שירותים ייעודיים גם ל"נישות" מיוחדות. קבוצות לווייני קשר יאפשרו שירותי דואר אלקטרוני כמעט מכל מקום לכל מקום וכן שירותי איתור, אינטרנט ודיבור. כבר היום מופר ה"שקט" שאיפיי את העולם המתפתח. שידורים ישירים של רדיו ושל טלוויזיה מאפשרים העברת מידע; הקשר הטלפוני והסלולרי מגדילים את קיבולת הטלפוניה מסביב לעולם, והתוצאה: הקטנת האפשרויות של הרשויות ושל הממשלות הרודניות להגביל או להשתיק העברת מידע וחדשות לאוכלוסייה. ההשפעה של התקשורת המהירה והכלכל-עולמית על שלטונות רודניים תהיה אפילו דרמטית יותר מאשר השפעת הרדיו-טרנזיסטור על אפריקה ועל אסיה בשנות ה-50 והשפעת הקלטות על איראן בשנות ה-70.

התקנים מיקרו-אלקטרו-מכניים, ייצור מיקרו וייצור ננו-מולקולרי

MEMS Micro Electro Mechanical Devices – מכשירים מיקרו-אלקטרו-מכניים – יתפתחו עד שנת 2025 לתעשייה חשובה. MEMS הם מכשירים מיקרוסקופיים, שבהם החיישנים, המקלטים, המשדרים או המחוללים, המפעילים התקנים מכניים, מוזערו לממדים של טרנזיסטור. ייצור MEMS מתבצע באמצעות אותם הכלים המייצרים שבבי מחשב. היום, למשל, משתמשים ב-MEMS לגילוי תנועה על מנת להפעיל כריות אוויר ברכב, אך ניתן להשתמש בהם גם לגילוי מגוון של תופעות תרמיות, חזותיות, אקוסטיות וביוכימיות. תארו לעצמכם את הקושי הכרוך במציאת מכשיר ציטות שניתן לראותו רק בעזרת מיקרוסקופ! באמצעות MEMS ניתן לבצע שידורים בעוצמות של מיקרו-וטים. כמו-כן פותחו מנועים זעירים, המייצרים עוצמות אנרגיה הגדולות פי 10 מהסוללות הטובות ביותר. בחומרים חכמים חדשים יותקנו MEMS – למשל בכנפי מטוסים, ותפקידם יהיה לשנות אוטומטית את צורת הכנף כדי לאפשר בקרה טובה יותר ולשפר את נצילות הטיסה. טכניקות אחרות של ייצור מיקרו יאפשרו לבנות חומרים מרוכבים מטריציים בעלי חוזק גבוה, קלי משקל, עם סבולת חום גבוהה ובמחיר נמוך. מנועי כלי-רכב ומנועי סילון יכללו קרמיקה מרוכבת. מבני מיקרו אחרים נמצאים כעת בשלבי פיתוח ויהיו "מתכות שקופות" – חומרים קשים, לא פריכים ושקופים.

ננו-טכנולוגיה, דהיינו ייצור ברמה האטומית, נמצאת עדיין

בשלבים הראשוניים. היישומים יהיו כרוכים בייצור מבנים בקנה-מידה ננו, אשר ישתלו בהתקנים אלקטרוניים אחרים או על גבי חומרים. חברת טקסס אינסטרומנטס כבר יצרה מערך של חצי מיליון מראות ננו עבור מקרן זעיר בעל רזולוציה גבוהה. ב-1997 הוערכה תעשיית הננו-טכנולוגיה בכ-5 מיליארד דולר, והתחזית קובעת הכפלה בכל שנה. יחד עם זאת צופים כי עד 2025 אומנם יהיה ייצור הננו מסחרי, אך עדיין בהיקף מוגבל.

ציו-טכנולוגיה

אחרי שנת 2010 יאפילו ביו-טכנולוגיות על טכנולוגיות המידע (מבחינת השקעות והשפעה כלכלית). כספים רבים מוזרמים למחקר ולפיתוח בתחום זה הן על-ידי העולם המסחרי והן על-ידי ממשלות.

השקעות אלה וההישגים המדהימים בהנדסה גנטית, במחקר בגידול רקמות ובפרויקט הגנים של המין האנושי ידרבנוגידול מהיר והתחדשות. המיפוי של מערך הגנים האנושי מאפשר למצוא קשרים בין גנים למחלות. המדענים לומדים איך החיים פועלים ואיך הם נכשלים וגם את הקשרים הפתוגניים והגנטיים למחלות. יש אפשרות לתרפיה של גנים ואפילו לרפוי עוברים בעודם ברחם. תאים, שבדרך-כלל מסוגלים לשכפל את עצמם כ-50 פעם, יוכלו לבצע 200 שכפולים ואפילו מעבר לזה. כבר החל ויכוח על האפשרות לגלות את "מעין הנעורים" וגם על ההשלכות החברתיות של גילוי כזה. מיפוי גנים של בעלי-חיים ושל צמחים מאפשר לגדל בעלי-חיים המותאמים לצורכי האדם. החקלאות תשתנה: הפריון יגדל, יפותחו זני צמחים בעלי עמידות גדולה יותר למזיקים, והמזון יכיל תרכיבי חיסון ויהיה בעלי ערך תזונתי גבוה. שינויים בגנים של פרות, של חזירים ושל כבשים יספקו הן בבשרם והן בחלבם פרוטאינים בעלי ערך רפואי. כבר היום משתמשים בבקטריות "לרפוי הסביבה" – למשל לניקוי זיהומים שנגרמו מדלקים ומשמנים.

עד 2025 תהיה אפשרות לשבט איברים אנושיים. במעבדות מגדלים תאי-אב (Stem Cells) אנושיים ושל חיות. עם מתן האות המתאים אפשר להפוך תאי-אב לכל תא ספציפי שנדרש. ניתן, למשל, לעקור רקמה ולהעביר את ה-DNA שלה לתאי-אב כדי לייצר רקמה שניתנת להשתלה – ללא סכנת דחייה מהגוף. מתאי-אב כבר ייצרו תאי לב של עכברים. פיתוחים אלה יאפשרו להאריך חיי אנשים בעולם המפותח של 2025 עד לגיל 85 לפחות. באופן תיאורטי, אלה שייולדו אחרי שנת 2020 יכולים לצפות לחיים ארוכים עוד יותר.

אינטגרציה טכנולוגית ב-25 השנים הבאות

חלה מהפכה באופן השימוש שלנו בטכנולוגיה ובתפיסתנו כיצד יש להשתמש בה ולהפיצה בחברה. הדיון הבא מבליט את ציפיותינו מאינטגרציית מדע וטכנולוגיה ב-25 השנים הבאות.

בעתיד תגדל עוד יותר יכולתנו לארוך את האינפורמציה בנפחים הולכים וקטנים תוך ירידה מקבילה במחירים

תקשורת, חיישנים ושקיפות

- האינטרנט, יכולות חדשות של חיישנים וכן תקשורת גלובלית מקילים מאוד על איסוף מודיעין צבאי ומסחרי. מערכות בשלות של תקשורת ושל חיישנים מאפשרות איסוף, העברה והפצה של תמונות, של מידע ושל תקשורת קולית מסביב לעולם. אמצעי תקשורת אישיים קטנים יאפשרו לקיים קשר מנקודה לנקודה למרחקים של 80-160 ק"מ. שעון היד האגדי מסיפורי הקומיקס "דיק טרייסי" יהפוך למציאות, וניתן יהיה לכלול בו מקלט GPS לניווט מדויק. אותם אמצעי תקשורת ניידים יספקו בכל העולם שירותי אינטרנט ויאפשרו החלפת מידע מסחרי וטכני, בקשות ותלונות, רעיונות פוליטיים ומנשרים – הכול בצורה עצמאית וכמעט מיידי.
- מיקרופונים זולים וקטנים, דיסקים אלקטרו-אופטיים, חיישנים ביוכימיים ומכ"מי כיס ימצאו בשלל יישומים בצבא, במשמיות אבטחה ובקרה וברפואה. יופעלו מספר מערכות מסחריות של לווייני פיקוח, אבל לפחות אחת מהן תספק – בכל מזג אוויר ובגלים אופטיים – תמונות ברזולוציה של פחות ממטר. אמצעי חוזה לכל מזג אוויר, המבוססים על מכ"ם SAR (למטרות מסחריות), אמורים להיכנס לשירות ולספק תמונות ברזולוציה של 2 מטרים.
- כמה מבעלי הלוויינים המסחריים ישתחררו מבקרת הצילום של ממשלת ארה"ב – דהיינו האיסוף וההפצה של התמונות יהיו מחוץ ליכולת הניהול של ממשלת ארה"ב.
- מחירי הלוויינים הולכים ויורדים. מחירו של לוויין הוא היום 50 מיליון דולר, ובעוד מספר עשורים הוא יעלה, כנראה, כ-20 מיליון דולר.
- רשת מסחרית אחת, גלובלית, להעברת מידע תספק את הצרכים בכל מקום.
- כבר עתה עורכים ניסויים במל"טים זעירים (בגודל של כ-20 ס"מ), המצוידים בחיישנים. מל"טים השוהים בגובה של 30 ק"מ יהיו תוספת ליכולות מהחלל. בסביבה נוחה יש אפשרות שכדורים פורחים, הקשורים לקרקע, יצוידו בצויד אלקטרוני בעל משקל נמוך למטרות תקשורת ופיקוח.
- במקביל לאיסוף המידע יש אפשרות להעביר נתונים לכל מקום דרך התשתית הגלובלית. על כל אחד מאיתנו נאסף מסביב לעולם שפע של מידע. הדבר נעשה ממגוון של מקורות גלויים – מסחריים וממשלתיים. מדינות בעלות מיומנות

טכנית (או כל גורם בעל הון) יוכלו לזהות כל אדם המגיע לשטח ציבורי ולעקוב אחריו באופן סלקטיבי. נוסף על כך גם קיים מכשור המשווה צילומים טריים של פני אנשים לצילומים הקיימים במאגרי המידע.

נשירה של תאי עור, המתרחשת דרך קבע, מספקת כמות מספיקה של חומר גנטי, המאפשר זיהוי מדויק. אפילו קריאה ספקטוגרפית של זיעה או של שתן יכולה לספק רמזים. התוצאה: המלחמה כבר לא תהיה אנונימית – תהיה אפשרות לשייך לוחם מסוים לפעילות צבאית ספציפית.

שילוב ומיזוג טכנולוגיות קיימות עם טכנולוגיות "חוד החנית"

- אנו חווים מהפכה במיזוג של טכנולוגיות קיימות עם טכנולוגיות חוד החנית – במיוחד במיקרו-טכנולוגיות,



חייל נושא על חגורו
מכשיר לניווט לווייני

בטכנולוגיות מידע וניווט, בטכנולוגיות ייצור ובביו-טכנולוגיה. לעיתים שילוב או מיוזג טכנולוגיות מגיבים יכולות "חדשות" – וזאת כתוצאה מבחינה מחודשת של מערכות טכנולוגיות שונות. המומחים צופים יכולות חדשות בתחומים המרכזיים הבאים:

■ **מיוזג טכנולוגיות בקנה מידה מאקרו עם טכנולוגיה בקנה מידה מיקרו.** תחום זה, המכונה מכטרוניקה (Mechatronics), צפוי להיות בעל חשיבות כלכלית גדולה. התקנים מיקרוסקופיים (MEMS) יושלחו במחשבים ובמערכות תקשורת, כך שמייד עם הספקתם יהיו מוכנים להתחברות לרשת, ואולי אפילו יבצעו בעצמם חיפוש והתחברות לרשת. חומרים "חכמים" או בעלי מיקרו-סטרוקטורות ייעודיות יעמדו לרשות המתכננים והתעשיות. מנועים העשויים מחלקים המצופים במיקרו-מיגון מפני חום יפעלו בטמפרטורות גבוהות יותר וינייעו עצמים מהר יותר.

■ **מיוזג טכנולוגיות מידע וטכנולוגיות קביעת המיקום (ניווט)** עם הפעלת ה-GPS (Global Positioning System) חלה התרחבות עצומה ביישומי המסחריים. כבר היום ניתן לעקוב אחרי מטענים והובלתם ולשפר את הבקרה הלוגיסטית. שליטה על התנועה בנמלים ובנמלי-תעופה מבוצעת בעזרת GPS. חקלאים חורשים וזורעים בעזרת GPS. עד 2025 תהיה מרבית הפעילות האנושית בסביבה נתונה לפיקוח ולניתוח ותביא ליתר שקיפות.

■ **מיוזג טכנולוגיות משולבות-אנוש עם כלים אחרים ועם הסביבה.** זיהוי קולות ללא תלות בדובר יהיה טכנולוגיה זמינה. תהיה אפשרות לדבר אל מגוון רחב של מכשירים ולהורות בקול על הפעלתם של מחשבים ושל בקרים המנהלים את עבודת האדם ואת סביבתו הביתית. מכונות עם התקני חישה מיוחדים ישנו את התנהגותן בהתאם לקריאות ביו-פונקציונליות אנושיות של מפעיליהן. למשל, אם תהיה שיכור, מכונתך לא תאפשר לך לנהוג בה.

שילוב טכנולוגיות של מקורות אנרגיה זעירים עם התקנים מיקרו-אלקטרו-מכניים

להתקני MEMS יושלחו מקורות אנרגיה פנימיים, שיאפשרו ביצועים מתמשכים עצמאיים (Stand Alone). למשל, משדר/מקלט MEMS עם ביו-חישה, הפועל באזורים נידחים במשך כשבוע ויותר. ההתקנים הקיימים היום גדולים הרבה יותר וגם צורכים הרבה יותר אנרגיה.

■ **שילוב של ביו-טכנולוגיה עם מיקרו-אלקטרוניקה.** חיישני MEMS כבר שולבו בחרקים. בקרוב יתאפשר שילוב בין מיקרו-אלקטרוניקה לרקמות של חיות ואפילו של בני-אדם. התקני חישה וגילוי סביבתיים (לביו-טוקסינים, לזיהום וכו') יבצעו שידור אוטומטי של הנתונים. חיים בצוותא של בני-אדם ושל מכונות יהיו מציאות יום-יומית ולא רעיון מופשט פילוסופי או מדע בדיוני.

שליטה על התנועה בנמלים ובנמלי-תעופה מבוצעת כבר היום בעזרת GPS. חקלאים חורשים וזורעים בעזרת GPS. עד 2025 תהיה מרבית הפעילות האנושית בסביבה נתונה לפיקוח ולניתוח ותביא ליתר שקיפות

תיאוריית המערכות המורכבות ומערכות טכנולוגיות אינטראקטיביות

תיאוריית המערכות המורכבות – Complex Systems Theory – משנה משמעותית את צורת הגישה והאינטראקציה שלנו עם הסובב אותנו. המחשבים ומדעי המידע יותאמו כך שינצלו את תיאוריית המערכות המורכבות כדי לארגן את העולם בפרספקטיבה כלל עולמית, אקולוגית ודינמית. אנו לומדים היום מהטבע וממערכות מורכבות טבעיות ומפתחים רעיונות כדי לפתור מגוון בעיות החל מתחום האקולוגיה וכלה בתחום של הבטחת רשתות. אנו משתמשים היום במושג ביו-חיקוי (Bio-mimicry) לתהליך שבו מתקבלים רעיונות באמצעות חיקוי הטבע. תיאוריית המורכבות היא עדיין חדשה מכדי שניתן יהיה לעמוד על כל השלכותיה, אבל כבר יש לה השפעה על המחקרים האינטרדיסציפלינריים. להלן אחדים מכיווני המבטיחים:

פיתוח גורמים מסתגלים (Adaptive Agents)

גורמים מסתגלים הם יישויות הקיימות במחשב ומדמות – בהגבלות מסוימות – גורמי אנוש. יהיה שימוש רחב באלגוריתמים גנטיים ממוחשבים, שבעזרתם יחקרו וימצאו פתרונות למגוון בעיות – החל מבקרת מערכות, חלוקת גזא וחשמל ועד לבחינת השפעתם של אסונות טבע על הכלכלה. פותחו תוכנות מחשב, המבוססות על אלגוריתמים גנטיים, הפותרות בעיות מהר יותר וטוב יותר מהתוכנות המסורתיות. צופים כי תוכנות המבוססות על אלגוריתמים גנטיים יטיסו כלי טיס. בעתיד יפתחו ארכיטקטורות מחשב חדשות, המבוססות על פונקציות המוח האנושי. כבר פותחו ארכיטקטורות מחשב המנצלות סוג של המקבילות האופייני לפונקציות הנוירולוגיות של המוח האנושי, ויש סיכוי שהמחקר יאפשר לבנות מחשבים בעלי יכולות הדומות ליכולות אנושיות.

איסוף של מידע בלתי מוגן יתבצע בעזרת גורמים אדפטיביים (Adaptive Agents או Knowbots) מכל מקור אפשרי. הגישה האוניברסלית למידע – ובמיוחד המידע המכוון (Tailored Information) – יוצרת צורך בפיקוח משמעותי על ההתרחשויות בעולם. התיאוריה של המערכות המורכבות האדפטיביות (Complex Adaptive Systems - CAS) תנוצל לבניית מודל של מערכות חברתיות אינטראקטיביות. כבר עתה מפתחים מודלים של לוחמה יבשתית, המבצעים סימולציה של האינטראקציה של אויבים עם מאפיינים ספציפיים. יש אפשרות שעד 2015 יפותח אב-טיפוס של מערכת נשק רב-חיישנית מרושתת, המבוססת על גורמים אדפטיביים, שניתנת

דרישתנו לדלק אומנם תוקטן במידת־מה בזכות התקנים קטנים יותר, אך בעלי ביצועים גבוהים, אבל תלותנו הנוכחית בדלק פוסילי רק תצטמצם ולא תבוטל.

תופעות טכנולוגיות וסביבתיות שלא ניתן לצפות מראש
לא ניתן לדמיין את התוצאות הצפויות מההתפתחויות המגוונות המתרחשות בעולם הטכנולוגיה. אבל בגלל ההשלכות מרחיקות הלכת שלהן – החברתיות והפוליטיות – עלינו לחשוב על מספר אפשרויות, למשל מחשבי קוונטים, מציאת מקור עיקרי חדש של אנרגיה ופיתוח מלא של ננו־טכנולוגיה בעלת יכולת הרכבה עצמית (Self-Assembled Nano Technology).

תיאורתית יש אפשרות לפתח מחשבים קוונטיים, אבל לא ב־25 השנים הבאות. אם הדבר אכן יהיה אפשרי, ניאלץ לשנות בצורה רדיקלית את שיטות ההצפנה להגנת מידע, כי אחרי המחשוב הקוונטי תופיע גם ההצפנה הקוונטית. למחשבים הקוונטיים יכולת לפצח את הקודים הטיפוסיים הנמצאים היום בשימוש וכן לפצח כל קוד שצופים כי יתפתח בשני העשורים הבאים. הכנסה לשימוש של מקור עיקרי חדש לאנרגיה תהיה בעלת ערך עצום – כלכלי, פוליטי וצבאי־ביטחוני. מדענים אחדים חושבים כי המקור החדש יהיה באמצעות היתוך קר או על־ידי שימוש ב־Zero Point Energy, הנמצאת בכל מקום ביקום. Z.P.E. מתייחסת לתנודות קוונטיות רנדומליות של שדות כוח אלקטרו־מגנטיים הקיימים בכל מקום בתוך ואקום. מרבית המדענים מפקפקים באפשרות להשתמש באופן מסחרי בסוג זה של אנרגיה. כל המאמצים שהושקעו עד כה בהיתוך קר לא הניבו יכולות רצויות.

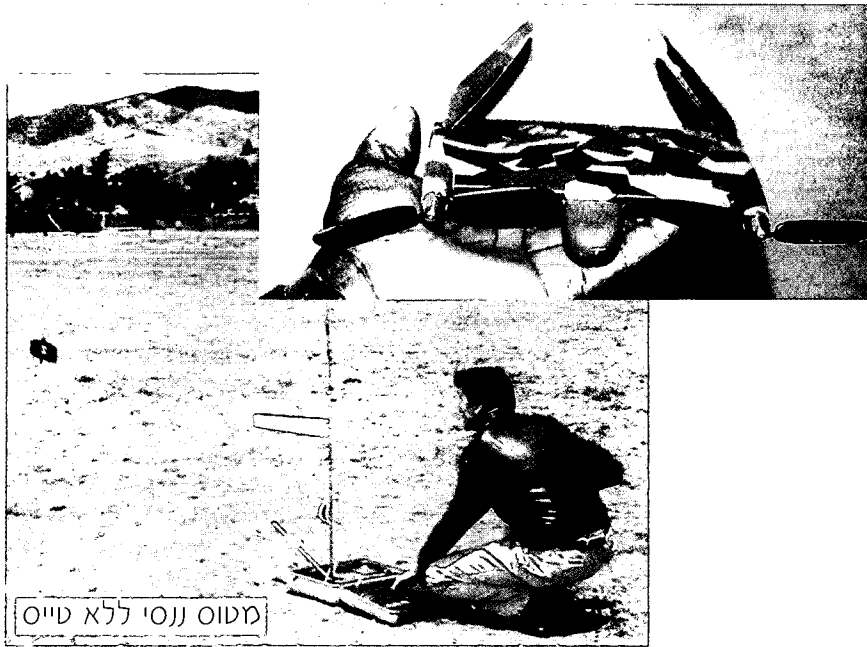
אם אכן יתגלה מקור אנרגיה חדש, יימצאו פתרונות לבעיות הנובעות ממחסור באנרגיה, ומספר רב של קשרים פוליטיים בין־לאומיים ישתנו בצורה דרמטית. במקביל ייווצר אי־שקט ביחסי הכלכלה הגלובלית.

הפוטנציאל הגדול של ננו־טכנולוגיה הוא בפיתוח התקנים זעירים שמסוגלים "להרכיב את עצמם".

כאמור לעיל, לא צפוי שיכולת זו תתגשם ב־25 השנים הבאות, ולכן אין סיכוי שעד 2025 יגיעו לבגרות ייצור ננו או ייצור מולקולרי. לרי. יחד עם זאת ננו־טכנולוגיה תהיה זירה למאמץ אינטנסיבי של מחקר ופיתוח עם יישומים צבאיים – אומנם מוגבלים, אבל משמעותיים. ננו־טכנולוגיה היא הצעד הבא לעבר מיקרו־טכנולוגיה. מדובר בבניית התקן "אטום על גבי אטום", כלומר התקנים בגודל מולקולרי, אשר בדומה לייצור המתבצע על־ידי הגוף החי יכולים לייצר את עצמם בכמויות גדולות. למשל, ניתן לדמיין מנוע מיקרוסקופי, המיוצר בטכניקות של הרכבה מולקולרית. אם ניתן יהיה להחיש פיתוח ננו־טכנולוגיה, הרווחים יהיו עצומים.

ההשלכות על הביטחון הלאומי

יחסי הגומלין בין הטכנולוגיה למערכת האנושית הם כה סבוכים, עד כי אין באפשרותנו לדעת לאיזה כיוון מובילים אותנו החידושים הטכנולוגיים. יחד עם זאת אנו יכולים להצביע על



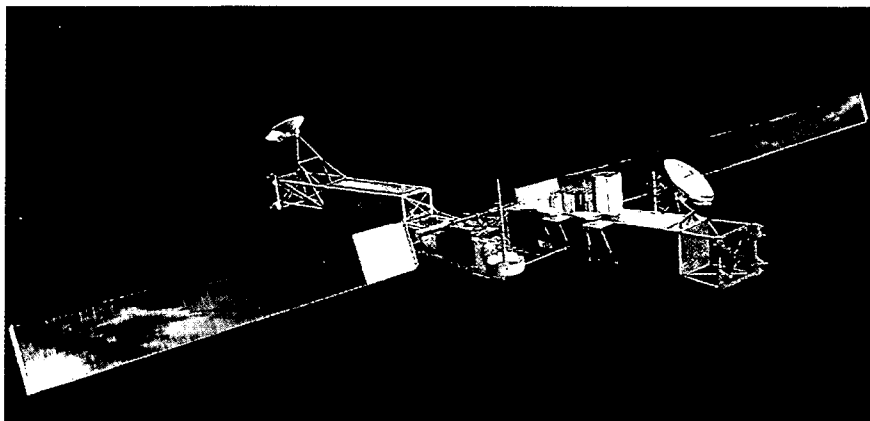
מסוד ננסי ללא טייס

לשינוי קונפניורציה והמתאימה את עצמה, אוטומטית, לטקטיקות האויב.

טכנולוגיה ואנרגיה

הטכנולוגיה לא תמציא עד 2025 תרופת פלא לצורכי האנרגיה של האנושות, ונמשך להיות תלויים בדלק פוסילי. הטכנולוגיה אומנם תשפר שיטות לניצול אנרגיית השמש, אנרגיית הרוח וניצול אנרגיות אחרות, אך לא תאפשר לספק את כל הצרכים החדשים לאנרגיה. יש לבדוק אפשרות להגדיל את נפחי האנרגיה בעזרת הינדוס גנטי של מקורות אנרגיה מתחדשים (למשל, גידולים שניתן להפיק מהם אתנול).

בסופו של דבר על מקורות אלה להתחרות במחירים העתידיים של הדלק הפוסילי ובדרישות האלטרנטיביות ליבולי מזון ולשימוש בקרקע. הטכנולוגיה תשפר את נצילות המנועים של כלי הרכב, ויופיעו מנועי דלק היברידיים, המונעים על־ידי גז וחשמל (תאי דלק).



הנושאים ולדון על הסביבה שיש לצפות שתהווה ב-25 השנים הבאות:

■ הטכנולוגיה תאפשר למשתמש באינטרנט להתקשר לרשת באמצעים קוליים. לכל שאלה בכל שפה ראשית תתקבל תשובה. באמצעות אינטליגנציה מלאכותית וגורמים אדפטיביים הקונטקסט של כל שאלה יובן אוטומטית. יכולת זו תאפשר לכל אדם, לכל קבוצה ולכל מדינה להגיע לידע ולנצלו – לטוב ולרע. הרישות הגלובלי מאפשר – בעזרת "Knowbots" ומתרגמים אוניברסליים בעלי דיוק גבוה – למספר גדול יותר של אנשים גישה למידע רב יותר מאשר אי פעם. מעבדים מהירים מאפשרים שיטות עבודה חדשות. גדל הפער בין אותם בודדים, שיכולים לרכוש טכנולוגיה חדישה ולהשתמש בה, לבין ההמונים, שלהם גישה מוגבלת לטכנולוגיה זו.

■ באמצעות העולם הווירטואלי נעשה העולם הממשי קרוב יותר. אנשים יהיו מקושרים ל-Cyberspace באמצעות התקנים על המשקפיים. באופן תיאורטי ניתן ליישם קישוריות כזאת ישירות לעיניים. למשל, באמצעות עדשות מגע ניתן לשלב מידע ישיר מחיישנים, כגון אינפרא-אדום ואולטרה-סגול, היישר לחיישני הראייה. התצוגה העילית של הטייסים היא ראשיתה של השיטה הזאת. במקביל ייעשו המכוונות יותר רגישות לתווי פניו של האדם, לצלילי קולו ולתנועותיו.

יכולות אלה אולי לא ימצאו חן בעיני מספר אנשים, אבל אחרים ימצאו בהן אמצעי להגבלת משך האינטראקציה עם בני אנוש אחרים, וכך ישונו מבני המעמדות החברתיים וההבדלים בחינוך ובשפה בין קבוצות חברתיות שונות. לאלה שאוהבים את המגע האנושי מאפשרים המחשבים קשר חי יותר בין אנשים המרוחקים אלה מאלה (בין היתר בעזרת מערכות וידיאו-פונים ופרומונים באיכות גבוהה). המחשבים יגדילו את ההשפעה של קהילות וירטואליות בעלות רקע דומה – חברתי או אנטי חברתי – (כגון אספני מטבעות או קבוצת לוחמים למען רעיון מסוים). ברור כי למספר קהילות וירטואליות יהיו תכנים יותר פוליטיים מאשר לקהילות אחרות.

■ רשת האינטרנט הגלובלית פותחת אפשרויות רבות



מנקד עם צג עילי על הקסדה המזרים לו נתונים בזמן אמת על שדה הקרב

הקישור הגלובלי, טכנולוגיית החיישנים וטכנולוגיית האינטרנט משופרת יגדילו את כמות האינטרומציה הזמינה לכל אחד מאיתנו אך יאפשרו גם שימוש לרעה

לשיפור דרכי הניהול של המודיעין, לניהול מידע וכן להכשרה ולחינוך של הצבא ושל הציבור הרחב. אבטחת מידע ומהימנותו יוסיפו להיות בעיות מרכזיות ב-Cyber Space:

■ הטכנולוגיה תקל על הפצתן של תמונות ושל אינפורמציה כוזבים, בעוד גופי תרבות ומינהל ינסו להגביל את הגישה לנתונים אישיים פרטיים. תימשך התחרות בין שקיפות לפרטיות, והטכנולוגיה תשרת את שני הצדדים. הקישור הגלובלי, טכנולוגיית החיישנים וטכנולוגיית האינטרומציה משופרת יגדילו את כמות האינטרומציה הזמינה לכל אחד מאיתנו ויאפשרו גם שימוש לרעה. רשתות אינטרומציה תמשכנה להיות יעד למתקפות. אומנם עד כה שום רשת מרכזית טרם שובשה ממש, אך ה"קרב" מתגבר, והיכולת לפרוץ לרשת הולכת ומשתפרת.

יותר מ-10,000 אתרי Web מציעים מידע ל"האקר" הטירון. מספר תוכנות, הניתנות לשליפה, משמשות כלי לחיפוש נקודות התורפה ברשתות ובמערכות הפעלה כגון: Windows NT, Windows 95/98, Unix ואחרות. כדי לגרום נזקים כבר אין צורך בידע בכתיבת קוד מחשב. סיבוך המערכות אינו מאפשר לחזות את הצפוי בתחום זה.

החסמים היעילים ביותר הם עדיין הנהלים הקשורים לקודי הגישה של המשתמשים. בעתיד תשפר טכנולוגיית ה-Bio Mimicry את אבטחת קודי הגישה על-ידי שימוש במידע ביולוגי ספציפי של המשתמש.

■ אבטחה מושלמת של האינטרומציה אינה אפשרית, והשימוש



אנשים יהיו מקושרים ל-Cyberspace
באמצעות התקנים על המשקפיים.
באופן תיאורטי ניתן ליישם קישוריות
כזאת ישירות לעיניים



הגלובלי בהצפנה יהיה מוגבל על-ידי הוראות ממשלתיות. יש אפשרות שתקשורת מוצפנת תהפוך לנורמה, אבל זה אינו מתקבל על הדעת בגלל המחיר הגבוה והנצילות הנמוכה הכרוכים בהצפנה רצינית וביכולת של מחשבים חזקים לפצח הצפנה פשוטה. על כן מחיר ההצפנה לא ישתלם. באופן תיאורטי יש יתרון בהצפנה, אך מעשית אין בכך שום יתרון.

בעולם "שקוף" הניסיון להשתלט על שכנים בכוח הזרוע יהיה יותר קשה:

■ סוד הניצחון של צבא מודרני עבר מהיכולת לגייס כוחות ליכולת לגייס כוח אש ומידע. צבא ארה"ב פועל ליצירת יכולת לזהות ולהשמיד מטרות ולנצח בתוך ימים באמצעות אש מנגד. כלי-נשק ארוכי טווח נמצאים בפיתוח. גם טילים קצרי טווח ישופרו בטווח, בדיוק ובהנחיה, תוך הגדלת סיכויי הפגיעה.

■ ההסתמכות הגוברת על מערכות בחלל תביא ליתר פגיעות, אך גם להזדמנויות חדשות. החלל מציע זירה לשינוף פעולה בין-לאומי וגם יביא להתפשטות הטכנולוגיה. יגדלו האפשרויות להציב כלי נשק בחלל. אם ניתן יהיה להכניס למסלול גרם אחד במחיר של דולר אחד – במקום עשרה דולרים כיום – אז מחירה של התחמושת חלל-קרקע יהיה סביר.

יש אפשרות לפתח לייזרים המכוונים אל הקרקע, גלי מיקרו בעוצמות גבוהות ואלומות של חלקיקים נייטרליים. אלה מאפשרים לגלות – כמעט בזמן אמת – מטרה ניידת ולפגוע בה. אבל יש לדאוג למקמם במערכים כך שיוכלו לטפל במטרות החולפות ולהפעילם כך שלא ישובשו בגלל תנאים אטמוספיריים.

קשה יהיה לקבל התרעה מוקדמת על התקפה מהחלל, שכן המעבר מהחלטה להתקפה הוא מיידי.

■ הטכנולוגיות החדשות יאפשרו לארה"ב להתבסס על הרתעה קוונטציונלית.

עולמנו נעשה יותר ויותר רווי בטילים מונחים חכמים. מרבית טכנולוגיות המידע (תצפית, התמצאות, החלטה

וקואורדינציה) מסופקות על-ידי מערכות מסחריות, ולכן הן זמינות לכל אחד, ועם הזמן מחיריהן יורדים. המקנות (Stealth) מסייעת, אך יקרה למדי. לכן רק במספר קטן של פלטפורמות ישתמשו בטכנולוגיה זו. מאחר שכל דבר שזו יוצר הפרעות בסביבה, הרי שטכנולוגיית החמקנות תיכשל בסופו של דבר בגלל גידול מתמיד ואקספוננטיאלי של יכולת האיסוף והתאמת המידע.

טכנולוגיות עתידיות לא יוכלו למנוע אסונות טבע

■ עדיין לא ברור כיצד תשפיע ההחרפה של הבעיות הסביבתיות על היחסים בין האומות. המחסור ההולך וגדל במים – למשל באזורים נרחבים בהודו ובסין, שתי מדינות המצטיידות בטילים בין-יבשתיים גרעיניים – עלול לדרבן אותן לצאת למלחמות לכיבוש מקורות מים. אולם גם ישנה אפשרות לשינוף פעולה אזוירי לפתרון המצוקה.

■ בעוד אזורים נרחבים הולכים והופכים למדבר, הרי אזורים אחרים סובלים משיטפונות ומסופות עזות – וגם אלה עלולים להגדיל את התדירות ואת העוצמות של הסכסוכים בין המדינות. אסונות טבע כגון הוריקן "מיץ" עלולים לגרום לנדידה המונית של אוכלוסיות ממדינה למדינה ולהגביר את המתח ביחסיהן.

מאמצי ארה"ב במלחמתה ברור ובפשע המאורגן עלולים להשתבש בגלל כישלונות של מדינות לתפקד – בין היתר בגלל אסונות טבע.

■ מודעות לבעיות של איכות סביבה כבר משפיעה על אנשי הצבא בארה"ב. למשל, כיום נעשים מאמצים לפתח תחמושת ידידותית לסביבה, ובמסגרת זו יש כוונה להפסיק את השימוש בתחמושת אורניום מדולל. יחד עם זאת יש לקחת בחשבון גם את האפשרות שיריבים פוטנציאליים יראו ביצירת זיהום נשק יעיל – כפי שעשה סדאם חוסיין ב-1991, כאשר הצית את בארות הנפט בכוייט.

■ כדי לחזות את האפוקליפסה הבאה יש לחשוב על חרקים ולא על פצצות. הביורטכנולוגיה טומנת בחובה הבטחות גדולות לצד סיכונים גדולים. על אף שנשק ביולוגי אינו קוסם במיוחד לצבאות סדירים, הרי יש אפשרות שמחבלים יעשו בו שימוש. ישנה גם סכנה שפתוגן ביולוגי ישתחרר בשגה. הביורטכנולוגיה והאפשרות ליצירת נשק להשמדה המונית במחירים זולים מחייבות חיפוש אחרי שיטות מניעה חדשות, ואם הדבר אינו אפשרי – למציאת דרכי הגנה מתאימות. לקראת האפשרות של כישלון המאמץ למנוע שימוש בנשק זה יש צורך להקים מערכת רצינית לניהול ולטיפול בתוצאות (Consequence Management).

■ יהיה קל יותר להשיג נשק להשמדה המונית. הנשק הביולוגי הקיים מהווה איום מיוחד, כי ניתן לייצר בזול, ובלי שנדרשת רמת המומחיות החיונית לייצור נשק גרעיני. גם קשה יותר למנוע מעבר של חומרי לחימה ביולוגיים ממדינה למדינה. החדשות הטובות הן שניתן לנצל את הביורטכנולוגיה לייצור



אולם הרכבה של טילי שיוט. צבא ארה"ב פועל ליצירת יכולת לזהות ולהשמיד מטרת ולנצח בתוך ימים באמצעות אש מגד

יכולת זו תאפשר גם לבצע פעילויות, שכרגע מבוצעות באמצעות מאקרו-טכנולוגיות. רבים ישתמשו בטכנולוגיית MEMS – גם אויבים פוטנציאליים של ארה"ב – שכן הרבה מדינות משקיעות בתחומים אלה. בגלל זעירותם של המתקנים לא תהיה למעשה כל אפשרות למנוע את הברחתם ממדינה למדינה.

■ שלישיית, יש לנו עכשיו אפשרות לשנות את "התוכנה של הטבע", ולעובדה זו יש השלכות מרחיקות לכת. הרבה טכנולוגיות, שכנראה ניתנות ליישום – במיוחד בתחום של ממשק אדם-מכונה ושל ביו-טכנולוגיה – מעוררות שאלות יסודיות, כגון: מי נהיה, כאשר נוכל לשלוט על המרכיב הגנטי שלנו וגם לשתול מכוונות בתוך גופנו? איך תסתגל החברה האנושית לרעיון השיבוט?

אנחנו מתקרבים לרגע שבו נצטרך לתת תשובות לשאלות אלה. אנו אולי בדרך להפיכת ההומורספיאנס להומורגנטיקוס. ביו-אתיקה תהפוך לחלק מהוויכוח בנושא הביטחון הלאומי. הדמוקרטיזציה של הגישה למידע, מזעורם ושילובם של התקנים קריטיים ומיוזג של ביו-טכנולוגיה בתחומים רבים של המאמץ האנושי מבטיחים לנו שב-25 השנים הבאות יתהוו שינויים בכל "הרשת האנושית". שינויים אלה יהיו לא פחות דרמטיים מהשינויים שחלו במאה האחרונה כתוצאה מההמצאות ששינו את חיי היום-יום שלנו, כגון החשמל, הטלפון, מנוע השריפה הפנימית, המטוס, הגלולה למניעת הריון והמחשבים האישיים. טכנולוגיות אלה שינו את פני החברה האנושית בדרכים שאיש לא צפה מראש. רב הסיכוי שהדבר יחזור על עצמו בעקבות החידושים הטכנולוגיים הצפויים ב-25 השנים הבאות.



חיסונים ותרופות לנטרולם של חומרי הלחימה הביולוגיים. טכנולוגיית MEMS עשויה לשמש לנקיטת אמצעי הגנה. יש לקחת בחשבון שאם יצליחו טרוריסטים להשתמש בנשק להשמדה המונית נגד מרכזי אוכלוסייה, צפויות בוודאי תופעות של פאניקה מעל ומעבר למספר הנפגעים. אירוע כזה יכול להתניע שינויים, שאין לנו שום אפשרות לשלוט עליהם. יש לשקול את האפשרות להתמודד עם אסון כזה באמצעות מערכת לטיפול בתוצאות.

אסון גרוע במיוחד עלול להיגרם מזנים חדשים וקטלניים במיוחד של חיידקים ושל נגיפים שפותחו באמצעות טכניקות של הנדסה גנטית. אפשר גם לפתח נשק גנטי מתוחכם (למשל נגיפים) המתביית באופן סלקטיבי על צמחים מסוימים או על בעלי-חיים או על בני-אדם. נשק גנטי מתוכנן לתקוף יעדים בעלי פרופיל גנטי ייחודי (למשל שדות אורז).

השלכות של מאקרו-מדיניות

השינויים בטכנולוגיה הביאו אותנו לפרשת דרכים משולשת: ■ ראשית, המיקרו-טכנולוגיות, רשתות המחשב ועוצמות המחשוב מקנות יכולות חדשות כבירות – צבאיות ומסחריות – ויוצרות קטיגוריות חדשות של איומים, למשל בתחומים של אבטחת מידע ושל הגנה על פונקציות קריטיות של תשתית, הנסמכות על עבודת מחשבים. חלק ניכר מהפתרון לבעיה הוא החדרת מוטיבציה לאנשים ולמוסדות להקפיד על נקיטת צעדי הגנה מתאימים.

■ שנית, התקנים עתידיים של MEMS יבצעו מספר רב של פונקציות, המבוצעות היום במאקרו-טכנולוגיות. שילוב של חיישנים, של התקנים אלקטרו-מכניים, של תקשורת ושל מקורות אנרגיה זעירים, אך יעילים, יצר יכולת אדירה בתחום של איסוף מידע ועיבודו.