



התלכדות (Convergence): מגמה הוליסטית מעצבת עתיד

המכון לחקר עתידים בחינוך, מינהל חדשנות וטכנולוגיה, משרד החינוך
תשפ"ה, מאי 2025

תוכן העניינים

1. מבוא

1.1 הגדרה ואטימולוגיה

1.2 הקשר היסטורי והתפתחות

2. התלכדות כמגמה הוליסטית מעצבת עתיד

2.1 הגדרות ומסגרת מושגית

3. התלכדויות מעצבות מציאות

3.1 ביוקונברגנס (Bioconvergence) - הצומת בין ביולוגיה לטכנולוגיה

3.2 התלכדות במתודולוגיית מחקר

3.3 התלכדות עסקית וכלכלית

3.4 התלכדות חברתית ותרבותית

3.5 התלכדות סביבתית וקיימות

4. השלכות עתידיות ואתגרים

5. סיכום

6. מקורות

1. מבוא

1.1 הגדרה ואטימולוגיה

התלכדות כפרדיגמה המשנה את האופי של תהליך החדשנות וההמצאות

אנו ניצבים בפני תקופה חסרת תקדים המאופיינת בקצב מואץ של חדשנות והמצאות המניבים פיתוחים טכנולוגיים המעצבים מחדש את המבנים החברתיים, הכלכליים והמדעיים. אך, מעבר להיקף ולמהירות, ניכר גם שינוי מהותי באופי החדשנות עצמה. אנו עדים למעבר מפרדיגמות מסורתיות של חדשנות ליניארית ומבוזרת, שהתבצעה בעבר בעיקר במגדלי שן אקדמיים או על ידי יחידים בעלי סגולה, למודלים הנסמכים על עקרונות של התלכדות (Convergence) של דיסציפלינות, טכנולוגיות ורעיונות, שיתופי פעולה רחבים ודמוקרטיזציה של ידע,

מסמך זה יחקור את תופעת ה"התלכדות" וכיצד מגמות עתיד גלובליות, מניעות את הפרדיגמה החדשה של המצאות. ננתח את ההשלכות המערכתיות של מגמות אלו ונדון באתגרים ובהזדמנויות הייחודיות שההתלכדות מציבה במגוון היבטים, חברתיים, תרבותיים, כלכליים ואקולוגיים.

"התלכדות" מוגדרת כתהליך שבו ישויות שהיו בעבר בלתי קשורות הופכות משולבות יותר¹. המונח הנגזר מהמילה הלטינית "convergere" שמשמעותה "להתקרב יחד" או "להתכנס לנקודה אחת". במובן המודרני, התלכדות מתייחסת לתהליך שבו מערכות, תחומים, טכנולוגיות או תחומי ידע נפרדים מתחילים להתקרב זה לזה, להשתלב ולעיתים אף להתמזג לכדי מהות חדשה שמשלבת את המאפיינים של כל אחד מהמרכיבים המקוריים. במובן הרחב יותר, התלכדות מייצגת מגמה של שבירת הגבולות המסורתיים בין תחומים שונים, תוך יצירת סינרגיה וחדשנות באמצעות אינטגרציה רב-תחומית. זוהי למעשה גישה המאפשרת לנו להתמודד עם בעיות מורכבות שדורשות פרספקטיבות מרובות ושילוב של ידע ממקורות שונים.

1.2 הקשר היסטורי והתפתחות

בעוד שתהליכי התלכדות התרחשו לאורך ההיסטוריה האנושית, המונח זכה לתשומת לב משמעותית בשנות ה-60, כאשר פרופסור קלארק קר (Clark Kerr) הציג את "תיאוריית ההתלכדות" בתחום הכלכלה, המתייחסת לתהליך שבו מדינות מתפתחות "מדביקות את הפער" אל מול מדינות מפותחות מבחינת צמיחה ופיתוח². לפי התיאוריה, ככל שמדינות עוברות משלבי תיעוש מוקדמים לתיעוש מלא, הן מתחילות להידמות לחברות מתועשות אחרות מבחינת נורמות חברתיות וטכנולוגי. התיאוריה

נשענת על נקודת מבט פונקציונליסטית של הכלכלה, המניחה שלחברות יש דרישות מסוימות שיש לעמוד בהן כדי לשרוד ולפעול ביעילות. ביקורות סוציולוגיות טוענות שתיאוריית ההתלכדות היא תיאוריה כלכלית המניחה מראש שמושג הפיתוח הוא דבר טוב, המוגדר על ידי צמיחה כלכלית הממסגרת מדינות כביכול "מפותחות" כמטרה של מדינות כביכול "לא מפותחות" או "מתפתחות". בכך, אינה מתחשבת בתוצאות השליליות הרבות שלעתים קרובות עוקבות אחר מודל פיתוח זה הממוקד כלכלה. סוציולוגים רבים, חוקרים פוסט-קולוניאליים ומדעני סביבה הבחינו כי פיתוח מסוג זה לעיתים קרובות רק מעשיר עוד יותר את העשירים שכבר קיימים, ויוצר או מרחיב את מעמד הביניים תוך החרפת העוני ואיכות החיים הירודה שחווים רוב תושבי האומה. בנוסף, זוהי צורת פיתוח שלרוב מסתמכת על שימוש יתר במשאבי טבע, דוחקת קיום וחקלאות בקנה מידה קטן -- כמו חקלאות משפחתית או חקלאות שמבוססת על שיטות אורגניות ומקומיות המספקות מגוון מקורות תזונה וביטחון כלכלי בעיקר לאוכלוסיות מוחלשות -- וגורמת לזיהום נרחב ולנזק לבית הגידול הטבעי.

המושג קיבל תאוצה משמעותית בתחילת המאה ה-21, עם עליית הטכנולוגיה הדיגיטלית והאינטרנט, כאשר החלו להתמזג טכנולוגיות תקשורת, מחשב ומדיה שהיו בעבר נפרדות. ב-2002, המונח "התלכדות" (Nano-Bio-Info-Cogno) NBIC הוצג על ידי הקרן הלאומית למדע האמריקאית (U.S. National Science Foundation - NSF) והוא מסמן את ההתלכדות של ננוטכנולוגיה, ביוטכנולוגיה, טכנולוגיית מידע ומדעי הקוגניציה כגורם מכריע בהתפתחויות עתידיות^{5iv}.

2. התלכדות כמגמה הוליסטית מעצבת עתיד

התלכדות (Convergence) אינה סדרה של תופעות מבודדות, אלא שינוי יסודי לעבר קישוריות ואינטגרציה בכל היבטי החיים על פני כדור הארץ. הבנת טבעה ההוליסטי של ההתלכדות חיוני לתכנון אסטרטגי ולטיפול באתגרי העתיד. הפוטנציאל הטכנולוגי של התלכדות נובע מהיכולת שלה לשבור את "הסילואים" המסורתיים של ידע ופעילות, ליצור חדשנות פורצת דרך, ולהתמודד עם אתגרים גלובליים מורכבים כמו שינויי אקלים, אבטחת מזון, בריאות הציבור ופיתוח בר-קיימא.

ואכן, תופעת ההתלכדות שבה **טכנולוגיות, שירותים או תחומים שונים מתמזגים ליחידות משולבות, מתעצמת כיום באופן דרמטי, וניתן לראות בה שלב אבולוציוני מהותי**. העוצמה החישובית הגוברת והדחיפות של אתגרים גלובליים הם המניעים המרכזיים המאיצים את קצב ההתלכדות הטכנולוגית^{5iv}. לצידם, קצב החדשנות הטכנולוגית המואץ, המאפשר שילובים מורכבים יותר (לדוגמה, בינה מלאכותית כ"דבק" בין טכנולוגיות), עונה **לציפיות הולכות וגוברות של הצרכנים**

לחוויה חלקה ומשולבת במכשירים ובשירותים השונים שלהם. **ומודלים עסקיים חדשים ותחרות גלובלית** עזה דוחפים חברות ליצור פתרונות אינטגרטיביים וליצור יתרונות תחרותיים. לצד זאת **זמינות עצומה של נתוני עתק ויכולות עיבוד מתקדמות** מאפשרות לנתח כמויות מידע עצומות וליצור קשרים חדשים בין תחומי ידע. כל אלה יחד מאיצים את יצירתם של מערכות אקולוגיות טכנולוגיות וחברתיות מורכבות, בהן מערכות פיזיות, דיגיטליות וביולוגיות פועלות יחד בסינרגיה, ומדגישות את החשיבות של שיתוף פעולה בין-תחומי, שיקולים אתיים וממשל אדפטיבי בניווט ההזדמנויות והאתגרים של ההתלכדות.

כיום, התלכדות נחשבת לאחת המגמות המרכזיות המעצבות את העתיד בכל היבט אפשרי. כפי שציין הפורום הכלכלי העולמי, "טכנולוגיות משולבות מתכנסות למערכות מאוחדות, אפילו מעבר לסילואים בין תעשיות ודיסציפלינות, וכאשר מערכות מתכנסות אלה מתקשרות ובונות זו על גבי זו, הן יוצרות אפקט מצטבר ומזרזות חדשנות נוספת במעגל מואץ של התקדמות".

זיהוי מגמות עתיד וגורמים מניעי שינוי בעלי פוטנציאל השפעה על תהליך ההתלכדות ועיצוב תרחישי עתיד אפשריים, מאפשרים היערכות ומוכנות של מערכות חינוך למציאות עתידית, בכל הקשור למגמות עתיד בכלל ולאלה הקשורות בהתלכדות בפרט, על מנת להבטיח שהבוגרים של היום יהיו מוכנים לעולם המשתנה בקצב מואץ.

Convergence – התלכדות או התכנסות?

התלכדות מציינת את ההתאגדות וההשתלבות של מרכיבים שונים לכדי יחידה אחת מגובשת.^v

התכנסות מתארת את תהליך הקרבה או ההתקרבות לכיוון משותף, אך לא בהכרח איחוד מוחלט.^{vi}

במקרים רבים, במיוחד בהקשרים של חינוך, טכנולוגיה ומדעי החברה, תרגום **convergence** כ"התלכדות" עשוי להיות המתאים ביותר, כיוון שהוא מדגיש את הרעיון של שילוב או מיזוג של תחומים שונים למערכת אחת מאוחדת ומותאמת. עם זאת, בהקשרים שבהם מדובר על **תהליך של התקרבות או חפיפה** בין גישות או תחומים שונים, ניתן להשתמש גם במילה "התכנסות".

"סינרגיה טרנספורמטיבית"^{vii} (Transformative Synergy) מסתמנת כשלב הבא של ההתלכדות. אם **התלכדות** מתארת את התהליך שבו תחומים שונים משתלבים או מתמזגים באופן אינטראקטיבי, כשהם יוצרים משהו חדש ומקושר בטכנולוגיות,

בתעשיות או בדיסציפלינות שמביאות ליצירת מערכות או פתרונות חדשים. הרי **סניגריה טרנספורמטיבית** מתארת את התהליך שבו חיבור בין שני מרכיבים או יותר מוביל לשינוי עמוק, חידוש או השפעה רחבה יותר, ולא רק תוצאה מצרפית, כאשר השפעת כל חלק ניכרת באופן רחב יותר והשפעת השילוב יוצרת שינוי מהותי. לאור זאת, סניגריה טרנספורמטיבית עשויה להיות הרחבה והעמקה של ההתלכדות, מעצם יכולתה להוביל שינוי משמעותי של כל המערכת לשלב חדש הכולל תוצאות מהותיות כאשר הוא מביא לידי ביטוי את החדשנות של השילוב.

2.1 הגדרות ומסגרת מושגית

ההתלכדות כמתודולוגיה מתארת את התהליך שבו מרכיבים שונים, לעיתים בלתי קשורים, מתאגדים יחד ויוצרים ישות אחת מאוחדת. תהליך זה אינו מוגבל רק לעולם הטכנולוגיה, אלא נמצא גם בתחומים חברתיים, תרבותיים, תעשייתיים ומדעים. ההתלכדות מאפשרת חיבור של רעיונות, תחומים, ואנשים, ובכך פותחת אפשרויות חדשות לפתרון בעיות, יצירת מוצרים חדשניים ושיפור תהליכים. בפרק זה נכיר סוגי התלכדויות שונים, וההשפעה הרחבה של תהליך זה על תחומים מגוונים – החל מהתעשייה ועד לחינוך ולחיים החברתיים.

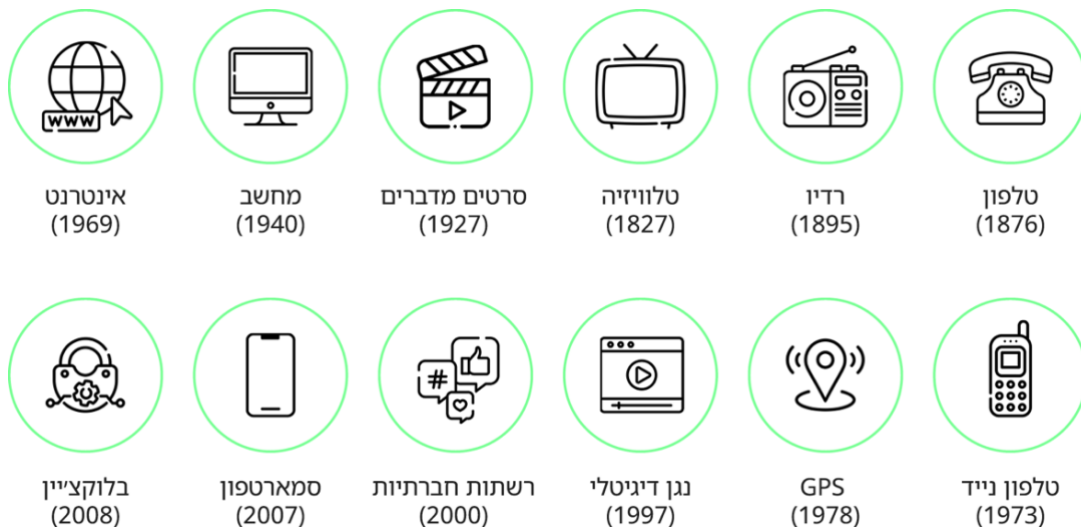
התלכדות טכנולוגית

התלכדות טכנולוגית מוגדרת כ"נטייה של טכנולוגיות שהיו במקור בלתי קשורות להפוך לקשורות יותר זו לזו ואף מאוחדות ככל שהן מתפתחות ומתקדמות"^{viii}, היא מתייחסת לתהליך שבו טכנולוגיות נפרדות מתחברות ומשתלבות יחד, לעיתים קרובות במכשיר יחיד או במערכת אחת ויוצרות יכולות חדשות שלא היו אפשריות קודם לכן. התלכדות טכנולוגית מאופיינת בשני היבטים עיקריים:

- **שילוב פונקציונלי** - איחוד של פונקציות שהיו בעבר נפרדות למערכת או מכשיר יחיד.
- **אינטגרציה מערכתית** - יצירת מערכות מורכבות שמשלבות טכנולוגיות ושירותים שהיו מנותקים.

כאמור, התלכדות טכנולוגית מתייחסת למיזוג טכנולוגיות למכשירים יחידים או למערכותⁱ ומעבר ממכשירים בעלי מטרה אחת לפלטפורמות רב-תכליתיות. באופייה התלכדות היא "מונחת בעיות" ואינה רק תהליך טכני, אלא תהליך תרבותי המשמש כלי לפתרון בעיות ויצירת מוצרים חדשים. לדוגמה, הטלפון החכם (סמארטפון) מהווה את אחת הדוגמאות המובהקות ביותר להתלכדות טכנולוגית, מאחר והוא משלב טכנולוגיות שהיו נפרדות בעבר, כמו טלפון, מחשב, מצלמה, נגן מוזיקה, מכשירי ניווט,

משחקים וכו' כולם במכשיר אחד ידידותי למשתמש. ניתן לראות כי כל חידוש משמעותי ב-150 השנים האחרונות נובע מהתלכדות טכנולוגית:



ומאז 2010, ניתן להוסיף את השעון החכם, מדפסת התלת-ממד, רחפנים, טאבלטים עם מגע, ננו-טכנולוגיות, מציאות משולבת, סוללות מצב מוצק וכו'. ברור שזה שקצב ההתלכדות וכנגזרת החדשנות מאיץ, במיוחד ככל שכל חידוש הופך בעצמו לאובייקט של התלכדות טכנולוגית.

טכנולוגיות מתלכדות מעצבות עתיד

טכנולוגיות נוספות המתלכדות לכלל מערכות חדשניות שצפויות להשפיע על העתיד בכלל והחינוך בפרט, כוללות (אך לא רק):

- **מציאות מורחבת (XR)** – המאחדת מציאות מדומה (VR) מציאות רבודה (AR) ומציאות מעורבת (MR) יוצרת פלטפורמה חדשה למשחקים, חינוך, רפואה ותחומים רבים אחרים^{ix}.
- **טכנולוגיות קוונטיות** - התלכדות של מחשוב קוונטי, תקשורת קוונטית וחישה קוונטית^x תתבטא ביישומים מעשיים כמו אופטימיזציה של לוגיסטיקה, גילוי חומרים ופריצות דרך בהצפנה. לצד שדרוג תעשיות בריאות ופריצות דרך כמו יצירת תרופות במהירות רבה יותר וייעול שרשראות אספקה בקנה מידה עולמי.
- **התלכדות של IT/OT** - שילוב של טכנולוגיות מידע (IT) וטכנולוגיות תפעוליות (OT) יוצרת מערכות תעשייתיות חכמות ומחוברות^{xi}. מאפשרת מעקב ושיפור תהליכים בזמן אמת, אופטימיזציה של ביצועים וזמן, ויכולת זיהוי בעיות בשלב מוקדם, מחברת בין שכבות ארגוניות לשם קבלת החלטות מהירה ומבוססת

נתונים ומקדמת אוטומציה חכמה, שמבצעת תחזיות, אופטימיזציה ושיפור תהליכים המפחיתים צורך בהתערבות אנושית. ומבטיחים ניהול תחזוקה מבוססת נתונים, עם תחזיות לתקלות ותכנון תחזוקה מונעת.

התלכדות תעשיות

התלכדות תעשיות היא מיזוג תעשיות שהיו בעבר בלתי קשורות. ההתלכדות של בינה מלאכותית (AI), מחשוב קצה (Edge Computing) ונתונים בתנועה (Data-in-Motion) מהווה מגמה משמעותית המשנה תעשיות רבות ומחזקת את יכולות מערכות המחשוב.^{xii}

- הבינה המלאכותית מאפשרת למערכות ללמוד ולבצע משימות הדורשות אינטליגנציה אנושית, כמו זיהוי דפוסים, תחזיות ואופטימיזציה של תהליכים.
- מחשוב קצה (Edge Computing) עוסק בעיבוד נתונים קרוב למקום יצירתם, ובכך מקטין את השיהוי ומשפר את היעילות, במיוחד עבור יישומים הדורשים עיבוד בזמן אמת, כמו רכבים אוטונומיים ואוטומציה תעשייתית.
- ונתונים בתנועה המתארים העברת נתונים בזמן אמת ממקום למקום, מה שמאפשר למערכות הבינה המלאכותית להגיב במהירות לשינויים ולהציע פתרונות דינמיים.



איור מתוך דו"ח [Technological convergence 2040: apocalypse or utopia](#)

היתרונות הבולטים כוללים: הפחתת שיהוי ושיפור זמני תגובה, הגברת פרטיות ואבטחת מידע על ידי עיבוד מקומי, אופטימיזציה של שימוש ברוחב פס, יכולת להתאים את המערכת בזמן אמת בסביבות דינמיות ושיפור האמינות והגיבוי במקרה

של חיבור רשת לא יציב. בין היישומים הבולטים של ההתלכדות הזו ניתן למצוא ערים חכמות, IOT תעשייתי (IIoT) ורכבים אוטונומיים.

טשטוש הגבולות בין העולמות הדיגיטלי, הפיזי והביולוגי

אחת התופעות המשמעותיות ביותר בהתלכדות הטכנולוגית היא טשטוש הגבולות בין העולמות הדיגיטלי, הפיזי והביולוגי. **התלכדות פיזיטלית** (פיזית-דיגיטלית ובאנגלית (Phygital convergence) היא מיזוג של חוויות פיזיות ודיגיטליות^{xiii}. לדוגמא,

- **מציאות רבודה (AR)** המשלבת תוכן דיגיטלי בעולם הפיזי
- **האינטרנט של הדברים (IoT)** (המחבר מכשירים פיזיים לרשת דיגיטלית)
- **תאומים דיגיטליים (Digital Twins)** - המהווים עותקים דיגיטליים של מערכות ואובייקטים פיזיים
- **טכנולוגיות לבישות** המנטרות נתונים פיזיולוגיים ומעבדות אותם כדי ליצור מערכת אקולוגית שבה משתמשים יכולים לנוע בצורה חלקה בין עולמות מקוונים ולא מקוונים^{xiv}.

בהיבט העיסוקי התלכדות פיזית-דיגיטלית פותחת אפשרויות חדשות ליצירת ערך לארגונים ולאנשים^{xv}. היא מאפשרת לארגונים לשפר את האינטראקציות בין לקוחות לעובדים באמצעות חוויות אינטואיטיביות כמו סימולציות הדרכה נטולות סיכון. משפרת את הגישה לשירותים עבור אנשים עם מוגבלויות, באמצעות שירותים פיננסיים המשלבים אימות ביומטרי. יוצרת אומון למול הצרכנים באמצעות שקיפות נתונים, ומחזקת את החוסן והיעילות התפעולית על ידי קבלת החלטות מבוססת נתונים ומידע.

המושג משתרע מעבר לחוויות הצרכן, ומחלחל לשירותי הבריאות בהן טלרפואה (רפואה באמצעות הטלפון, תופעה פופולרית מאז הקורונה) משלבת התייעצויות אישיות עם מעקבים דיגיטליים. טכנולוגיות רפואיות מתקדמות של מערכות ניתוח רובוטיות עם בינה מלאכותית ודימות תלת-ממדי, מאפשרות ניתוחים מדויקים וממוקדים המצמצמים סיכונים, מקצרים זמני החלמה ומשפרים תוצאות רפואיות עבור המטופלים^{xvi}. והביואינפורמטיקה מצעידה קדימה את הרפואה המותאמת אישית על ידי ניתוח נתונים גדולים והתאמת הטיפולים למבנה הגנטי של המטופל, באמצעות בינה מלאכותית ולמידת מכונה המשפרות את יעילות ניתוח הנתונים ודיוק החיזוי. גם בתחום החינוך, כיתות פיזיות המועשרות במציאות מדומה מאפשרות שהות בארצות רחוקות ובתקופות היסטוריות קדומות ומציעות חוויות, מותאמות אישית וסוחפות שלא היו קיימות לפני עשור או שניים.

סוגי התלכדויות נוספות

וזו עוד לא הכל... קיימים עוד סוגים שונים של התלכדויות

- **התלכדות חקלאית** המוגדרת כהצטלבות בין טכנולוגיה חקלאית ומערכות אנרגיה, במטרה להשיג יעילות וקיימות^{xvii}.
- **התלכדות חברתית**, המסבירה את הנטייה של חברות לגדול דומות יותר במבנים, בתהליכים ובביצועים, מונעת על ידי גורמים כמו התקדמות טכנולוגית וגלובליזציה^{xviii}.
- **התלכדות מדיה** המהווה מיזוג של מדיה מסורתית (עיתון, רדיו, טלוויזיה) ומדיה חדשה (אינטרנט, טלפונים חכמים)^{xix}. ג'נקינס הגדיר התלכדות מדיה כזרימת תוכן על פני פלטפורמות מדיה מרובות ושיתוף פעולה בין תעשיות מדיה שונות. הגדרה זו מדגישה שההתלכדות אינה רק טכנולוגית אלא גם קשורה לתוכן ולהתנהגות הקהל.
- **התלכדות מחקרית** (Convergence Research) המציעה גישה בין-תחומית שמתמקדת בשילוב ידע ומומחיות מתחומים שונים לצורך פתרון בעיות חברתיות ואתגרים מורכבים. המושג מדגיש שהתלכדות אינה רק שילוב של תחומים, אלא גם מתודולוגיה להתמודדות עם אתגרים אלו, דרך קירוב של נקודות מבט ומומחיות מגוונות. לדוגמה, פרויקטים שמחייבים שילוב בין מדעי החברה, מדעי המחשב, בריאות, סוציולוגיה ותחומים נוספים כדי להבין ולהתמודד עם אתגרים רחבים כמו עוני, בריאות הציבור ושינוי אקלימי. במילים אחרות, התלכדות מחקרית מציעה פתרון בעיות על ידי שיתוף פעולה בין תחומים שונים, כשהשיטות והתחומים השונים יכולים להשלים אחד את השני במטרה להתמודד עם אתגרים מורכבים.

מגמות סינרגטיות בטכנולוגיה

ניתוח פורץ דרך של רישומי פטנטים אמריקאים^{xx} בין השנים 1790 ל-2010 חשף תובנה עמוקה: **חדשנות עוקבת אחר מסלול סינרגטי חוזר** - טכנולוגיות שונות משתלבות לפתרונות חדשים, מתלכדות למערכות מאוחדות ומתאחדות ליצירת יכולות מאיצות. התהליך המשולש זה של שילוב, התלכדות והרכבה אינו חדש אלא דפוס חוזר לאורך ההיסטוריה, אשר הואץ באופן משמעותי בזמן האחרון, לאור התפתחויות טכנולוגיות דיגיטליות. מה שמצביע על כך שהגל הנוכחי של **התלכדות הוא חלק ממגמה אבולוציונית רחבה יותר**.

עקב קוצר היריעה, במסמך זה אין התייחסות להתלכדות בחינוך, מאחר ונכתב לאחרונה מסמך רחב העוסק בהתלכדות וב - STEM בחינוך (הפניה). ניתן להרחיב

3. התלכדויות מעצבות מציאות

3.1 ביוקונברגנס - הצומת בין ביולוגיה לטכנולוגיה

ביוקונברגנס (התלכדות ביולוגית - Bioconvergence) היא גישה רב-תחומית המשלבת שיטות ממגוון תחומים כגון ביולוגיה, הנדסה, רפואה, חקלאות, מדעי המחשב ובינה מלאכותית במטרה לפתור אתגרים במגוון מגזרים^{xxi}. ניתן גם להגדירה כ"נקודת המפגש בין ביולוגיה וטכנולוגיה שמשנה באופן יסודי את עתיד הבריאות הגלובלית והאופן ההתמודדות עם אתגרים גלובליים ויוצרת פתרונות מהפכניים"^{xxii} הפורום הכלכלי העולמי מגדיר זאת כמגמה מדעית חדשה "המנצלת תמהיל מגוון של מומחים, תהליכים וטכנולוגיות בתחומי הביוטק, מדעי המוח, הכימיה, הפיזיקה, מדעי המחשב, בינה מלאכותית, למידת מכונה והנדסה"^{xxiii}

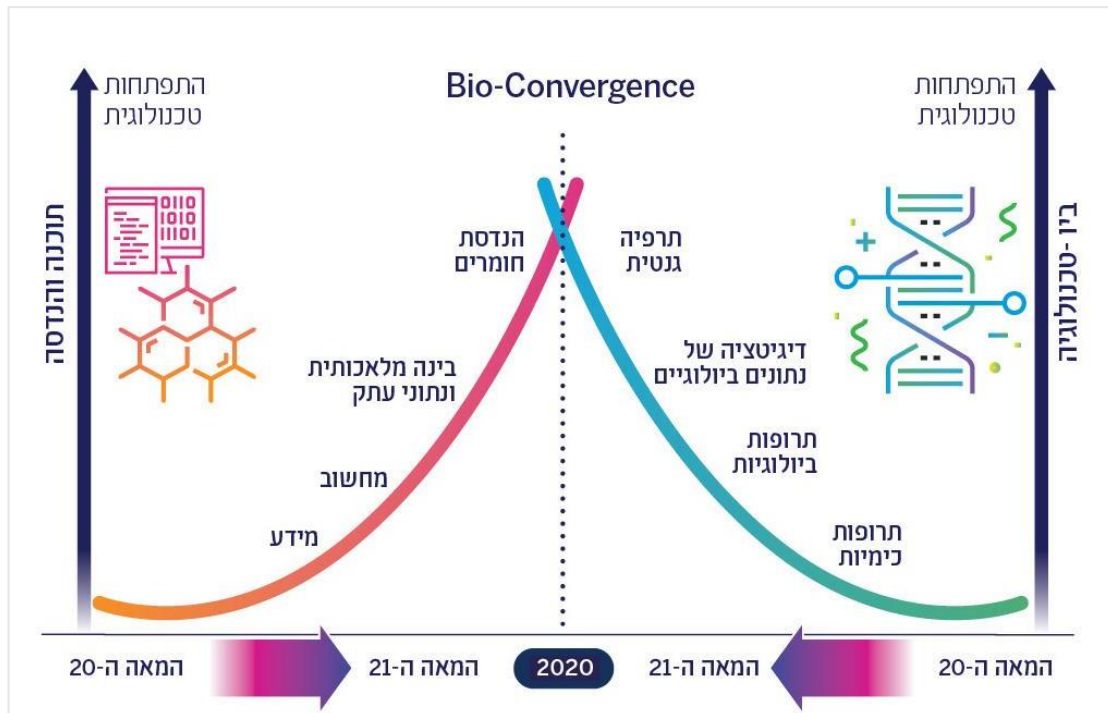
ביוקונברגנס מבוססת על העיקרון של **שבירת המחסומים המסורתיים בין תחומים ביולוגיים והנדסיים**. במקום לחשוב על ביולוגיה והנדסה כתחומים נפרדים, ביוקונברגנס רואה אותם כחלקים משלימים של ספקטרום רציף. דוגמאות לשילוב זה כוללות:

- **הנדסה ביולוגית** - יצירה ותכנות של מערכות ביולוגיות באמצעות עקרונות הנדסיים
- **ביו-אינפורמטיקה** - שימוש בכלים חישוביים לניתוח נתונים ביולוגיים מורכבים
- **רפואה רגנרטיבית** - שילוב של ביולוגיה והנדסת רקמות ליצירת איברים ורקמות
- **ננו-רפואה** - שימוש בטכנולוגיות ננו לניטור, אבחון וטיפול רפואי.

ביוקונברגנס מחוללת מהפכה בתחום הרפואה המדויקת (Precision Medicine) (מאפשרת גישות טיפוליות מותאמות אישית לפרופיל הגנטי והביולוגי של כל מטופל, כמו:

- **גנומיקה מותאמת אישית** - הריצוף המהיר והזול יותר של הגנום האנושי, בשילוב עם כלי ניתוח מתקדמים, מאפשר זיהוי של מוטציות ספציפיות והתאמת טיפולים בהתאם. לדוגמה, טיפולים ייעודיים לסרטן המכוונים למוטציות גנטיות ספציפיות^{xxiv}.
- **מערכות אספקת תרופות חכמות** - טכנולוגיות כמו NanoGhost^{xxv}, שפותחה בישראל, משתמשת בקטעי תא קטנים מאוד, שנקראים Nano-Ghosts שמקורם בתאי גזע מסוג מיוחד שיכולים להגיע לאזורים שבהם יש סרטן או דלקת. הדבר

מגביר את יעילות הטיפול ומפחית תופעות לוואי.



איור 1. (המקור: הרשות לחדשנות) מציג את פריצות הדרך הטכנולוגיות הרב-תחומיות שהתרחשו בעשורים האחרונים בתחומי ההנדסה והתוכנה לצד אלו בביוטכנולוגיה. שילוב תחומים אלה יוצר ביו-התלכדות^{xxvi}.

- **אבחון מדויק** - שילוב של טכנולוגיות דימות מתקדמות, ביו-סמנים מולקולריים, ואלגוריתמי בינה מלאכותית מאפשר אבחון מדויק ומוקדם יותר של מחלות^{xxvii}.
- **איבר על שבב** - טכנולוגיה המאפשרת לגדל רקמה אנושית בעלת פעילות מוגדרת של איבר מסוים (כליה - מסננת, לב - משאבה וכו') בסביבה נפרדת (שבב פלסטיק לדוגמה). ניתן לבחון על איבר זה את השפעותיה של תרופה חדשה, ועל ידי כך להאיץ את תהליכי הבדיקה של תרופות חדשות ולהוזיל את עלויות הבדיקה^{xxviii}.

במקביל, צומח תחום **הביולוגיה הסינתטית**, המתבססת על הנדסה גנטית של מערכות ביולוגיות לצרכים רפואיים. בתחומים אלה אפשר למצוא שילוב של טכנולוגיות חדשניות כמו ריצוף DNA, יצירה וכתיבת גנים חדשים. בצד ההנדסה, ניצפים שילובים רב-תחומיים המתבססים על **פריצות דרך טכנולוגיות הנדסיות** הכוללות, לדוגמה, מזעור של רכיבים אלקטרוניים עם חומרים "חיים" מהונדסים ורקמות, ביו-סנסורים חכמים, תקשורת והדפסות תלת מימד של רקמות. כמו כן, רפואה מותאמת אישית והפוטנציאל הגלום בה נשען על מהפכת הביוקונברגנס, מאחר והיא מאפשרת רפואה מותאמת אישית, לא רק ברמת החולה אלא גם ברמה המולקולרית, כך שהתרופה תותאם לסוג המחלה ברמת התא.



איור 2 (מקור: הרשות לחדשנות) דוגמאות לטכנולוגיות רב-תחומיות תחת תחום הביוקונברג'נס

כך, לדוגמה, **טיפול פרטני מותאם אישית** לא יתבסס רק על סמך בדיקות דיאגנוסטיות, אלא גם על שילוב של סנסורים ביולוגיים זעירים לניטור רציף של וירוסים, חיידקים ותאים סרטניים. תוצאות בדיקות אלה יאפשרו גילוי מוקדם של מחלות ומתן טיפול מונע. זאת ועוד, ננו-רובוטים חכמים יובילו תרופות בצורה מדויקת לתאים פגועים מבלי לפגוע בתאים בריאים.

מקרי בוחן וחידושים

- **מודלים של מחלות מותאמים אישית** - אורגנואידים - מבנים תלת-ממדיים זעירים אשר גידלו מתאי הגזע של המטופל, מאפשרים בדיקת תרופות ויעילות טיפולים על "מיני איברים" של המטופל עצמו^{xxix}.
- **הדפסה תלת-ממדית ביולוגית** - מאפשרת יצירת רקמות ומבנים ביולוגיים מורכבים, מהווה מהפכה בתחום השתלת איברים ורפואה רגנרטיבית^{xxx}.
- **מכשירים לבישים מתקדמים** - שילוב של חיישנים ביולוגיים, מיקרואלקטרוניקה ואלגוריתמי למידת מכונה מאפשר ניטור רציף של פרמטרים פיזיולוגיים חיוניים^{xxxi}.
- **טיפולים גנטיים מתקדמים** - שילוב של עריכת גנים (CRISPR), ננו-חלקיקים לאספקת גנים, ואלגוריתמים לניבוי השפעות, מאפשר טיפולים גנטיים מדויקים יותר^{xxxii}.

עתיד מתן שירותי בריאות

ביוקונברגנס צפויה גם לשנות באופן מהותי את האופן שבו יינתנו שירותי בריאות

בעתיד:

- **רפואה מונעת** - השילוב של נתונים ביולוגיים נרחבים וטכנולוגיות ניטור מתמשכות יאפשר מעבר מרפואה תגובתית לרפואה מונעת, עם התערבויות מותאמות אישית לפני התפתחות מחלות^{xxxiii}.
- **דמוקרטיזציה של שירותי בריאות** - טכנולוגיות מבוססות ביוקונברגנס צפויות להפוך לזולות ונגישות יותר, מה שיצמצם פערים בגישה לשירותי בריאות.
- **מודלים חדשים לניסויים קליניים** - מודלים מבוססי מחשב וניסויים "על שבב" יאפשרו תהליכי פיתוח תרופות מהירים ובטוחים יותר^{xxxiv}.
- **רפואה מרחוק ומותאמת בית** - התלכדות של טכנולוגיות דיגטליות וביולוגיות תאפשר יותר טיפולים ומעקב בבית המטופל, וצמצום האשפוזים^{xxxv}.

3.2 התלכדות במתודולוגיית מחקר

מחקר התלכדות (Convergence Research) מוגדר על ידי הקרן הלאומית למדע בארה"ב (NSF) כ"**אמצעי לפתרון בעיות מחקר מורכבות**, במיוחד אלה המתמקדות בצרכים חברתיים". למחקר התלכדות יש שני מאפיינים עיקריים:

1. הוא **מונע על ידי בעיה ספציפית ומשכנעת**, בין אם הבעיה נובעת משאלות מדעיות עמוקות או מצרכים חברתיים דחופים.
2. הוא **מערב אינטגרציה עמוקה מכוונת של ידע, שיטות ומומחיות** מתחומים שונים כדי ליצור תובנות ומציאות חדשות שיקדמו את הפתרון לבעיה.

נראה שמתרחבת ההבנה שמחקר התלכדות מתעלה מעבר לגבולות ולשיטות של דיסציפלינות מסורתיות כדי לפתח מסגרות מושגיות חדשות, שפות חדשות ואפילו תחומים חדשים. ולכן הקרן הלאומית למדע (NSF) בארה"ב מממנת פרויקטים במסגרת תוכניות ייעודיות על מנת ל"טפח ולפתח את היסודות המוקדמים ביותר של גישות התלכדות לטיפול בבעיה ספציפית ומשכנעת". ובנוסף מציעה את ה - Convergence Accelerator (אקסלרטור להתלכדות) תוכנית שמטרתה להאיץ את התרגום של מחקר התלכדות בסיסי לפתרונות יישומיים בעולם האמיתי. עקרונות המימון של הקרן מדגישים:

- אינטגרציה עמוקה של תחומים
- שיתוף פעולה בין מגזרים שונים (אקדמיה, תעשייה, ממשלה)
- פיתוח שיטות ומסגרות מחקר חדשות
- פתרון בעיות חברתיות מורכבות

חשיבותו הרבה של מחקר התלכדות נשענת גם על יכולתו לשלב ולהרחיב גישות

מחקר קיימות. אם עד כה הכרנו **מחקר רב-תחומי** (Multidisciplinary Research) בו חוקרים מתחומים שונים עובדים יחד, אך כל אחד נשאר במסגרת הדיסציפלינה שלו והידע מצטבר, אך לא בהכרח משתלב^{xxxvi}. או **מחקר בין-תחומי** (Interdisciplinary Research) המציע אינטגרציה של ידע, מושגים ושיטות מתחומים שונים לצורך הבנה או פתרון בעיות שמחוץ להישג ידה של דיסציפלינה בודדת. עתה אנו נחשפים ל**מחקר חוצה-תחומים** (Transdisciplinary Research^{xxxvii}) (המתעלה מעבר לגבולות הדיסציפלינריים המסורתיים, לעיתים תוך שינוי מהותי בהבנת הבעיה ויוצר גישות חדשות ומסגרות מושגיות חדשות לפתרון בעיות.

פתרון למשבר מים יכול לא רק מהנדסים וביולוגים, אלא גם אנשי כלכלה, מנהיגים קהילתיים ונציגי ממשל.

ויש גם **מחקר התלכדות** (Convergence Research) (המשלב ומתעלה מעבר לכל הגישות הללו, תוך יצירת סינתזה של מתודולוגיות וידע מתחומים שונים, במטרה לפתור בעיה מוגדרת, תוך שילוב תחומים מדעיים וטכנולוגיים באופן עמוק וסינרגטי, במיוחד בתחומי המדעים המדויקים, הנדסה, רפואה ומדעי החיים. מחקר התלכדות מונע על ידי בעיה מוגדרת היטב או אתגר חברתי/מדעי, דורש שיתוף פעולה ממושך ועמוק בין תחומי מומחיות, עד לרמת הטמעת שפה משותפת ויצירת תחום חדש ושם דגש על חדשנות והשפעה יישומית, לעיתים תוך קידום פיתוחים טכנולוגיים משמעותיים.

פיתוח איברים מודפסים ביולוגית מצריך שיתוף פעולה עמוק ומתמשך בין ביו- הנדסה, מדעי החומרים, רפואה וביולוגיה

למרות שמחקר חוצה תחומים ומחקר התלכדות חולקים קווי דמיון ומתייחסים לשיתופי פעולה בין תחומיים, **קיים ביניהם הבדל הנוצח בעיקר בעומק השילוב, במטרות ובשחקנים המעורבים**, כאשר האחרון מגשר במפורש על ה"פער" בין פרקטיקה למדע על ידי שילוב גורמים מהפרקטיקה וכן מהמדע והמדיניות^{xxxviii}. כך או כך, ניתן לראות את שלוש הגישות כרצף מתפתח – מהרב-תחומיות, דרך שילוב אינטגרטיבי בין תחומים, ועד לשילוב עמוק וממוסד שמכוון גם לתועלת ציבורית. ואכן, מחקרי התלכדות משפיעים על גילויים מדעיים וחדשנות בהיבטים של קצב וטיב הגילויים המדעיים והחדשנות, כדלקמן:

- **האצת גילויים מדעיים** - אינטגרציה של תחומים שונים מאפשרת לעבור על מחסומים מסורתיים ולהגיע לפריצות דרך מהר יותר^{xxxix}.

- **פיתוח פתרונות הוליסטיים** - גישה משולבת מאפשרת פתרונות מקיפים יותר לבעיות מורכבות, המתייחסים להיבטים שונים של הבעיה^{xl}
- **גישור על פערי ידע** - מאפשר התגברות על "נקודות עיוורות" של דיסציפלינות בודדות ומביא לתובנות חדשות^{xli}.
- **יצירת תחומים חדשים לגמרי** - כמו בינה מלאכותית, ביואינפורמטיקה, ואקולוגיה תעשייתית, שנולדו מהתלכדות של תחומים קיימים^{xlii}.

פרויקטים ויוזמות מחקר התלכדות בולטים מדגימים את הפוטנציאל של גישה זו: התלכדות של טכנולוגיות ננו, ביו, אינפורמטיקה וקוגניציה (- Nano-Bio-Info- Cogno (NBIC תורמת לפיתוח פתרונות חדשניים לבעיות בריאות. שילוב של טכנולוגיות הדמיה, בינה מלאכותית ומדעי המוח תורמים לפיתוח מכשור רפואי לחקר תפקוד המוח ומחלות נוירולוגיות. פרויקטים המשלבים אקולוגיה עירונית, תכנון עירוני, מדעי החברה וטכנולוגיות מידע תורמים לפיתוח ערים בנות-קיימא^{xliii} (Urban Sustainability). ויוזמות של צוותים מתוכנית האקסלרטורים של הקרן הלאומית למדע בארה"ב (NSF) מתמודדים עם אתגרים של ביטחון תזונתי^{xliiv}.

3.3 התלכדות עסקית וכלכלית

התלכדות תעשייתית (Industry Convergence) - מוגדרת כהליך שבו גבולות בין תעשיות שונות מיטשטשים, וחברות מתחומים שונים מתחילות להתחרות ולשתף פעולה בשווקים חדשים שנוצרים משילוב של טכנולוגיות ומוצרים שהיו נפרדים בעבר^{xlv} מובילה ליצירת מודלים עסקיים חדשים, כמו: **מודלים היברידיים** - המשלבים מוצרים ושירותים ממספר תעשיות. לדוגמה, חברות טכנולוגיה המציעות שירותים פיננסיים^{xlvi}. (Apple Pay, Google Wallet) **מודלים מבוססי פלטפורמה** - אקוסיסטם המאפשר אינטראקציה בין ספקים, לקוחות ושותפים במגוון תחומים תחת פלטפורמה אחת^{xlvii}. **כלכלת שיתוף ומודלים מבוססי גישה** - מעבר מבעלות למודלים של גישה לשירותים ומוצרים, כמו שירותי ניידות משותפים (Mobility-as-a-Service). **מודלים אינטגרטיביים** של מוצר-שירות - שילוב של מוצרים פיזיים עם שירותים דיגיטליים, כמו מכונות מחוברות או מכשירי IoT ביתיים.

- **התלכדות והתמרה דיגיטלית**. התמרה דיגיטלית (Digital Transformation) משמעה, יוזמה של אסטרטגיה עסקית המשלבת טכנולוגיה דיגיטלית בכל תחומי הארגון, מעריכה ומחדשת את התהליכים, המוצרים, התפעול והטכנולוגיה של הארגון כדי לאפשר חדשנות מתמשכת, מהירה, מונעת לקוחות. התמרה דיגיטלית והתלכדות הולכות יד ביד, כאשר הטכנולוגיות הדיגיטליות מאפשרות התלכדות והתלכדות מאיצה את תהליכי ההתמרה. לדוגמא: **IT/OT מחבר בין עולם המידע** (IT - מחשבים ונתונים) **לעולם התפעול** (OT - מכונות ותפעול),

ומאפשר שליטה חכמה ומבוססת נתונים בזמן אמת ומאפשר תובנות עסקיות בזמן אמת, תחזוקה מונעת ואופטימיזציה של תהליכים^{xlix}

סימנס יוצרת עולם שבו ייצור חכם מתחבר לענן, כדי לעבוד טוב יותר, מהר יותר ובצורה בטוחה יותר עם כלים חכמים בענן באמצעות Siemens Xcelerator פלטפורמה חדשנית שמחברת בין מכונות, תוכנות וענן, כדי לעזור לעסקים לעבור לייצור חכם ודיגיטלי. הפלטפורמה כוללת מגוון כלים מבוססי אינטרנט (IoT), אפליקציות בענן, ופתרונות שניתן לחבר ולהתאים בקלות לפי הצורך. המטרה: לאפשר תכנון, הפעלה וניהול של תהליכי ייצור בצורה מהירה, בטוחה וחכמה יותר. הפלטפורמה כוללת כ-60 שותפים. לדוגמה: חברת blue automation המציעה מערכת שמאפשרת לבדוק מראש (באופן וירטואלי) איך תעבוד מכונה או תהליך עוד לפני שמרימים משהו במציאות – וכך מונעים תקלות בשלב מוקדם. או חברת Belden הציגה את Horizon – מערכת שמאפשרת לשלוט מרחוק בתהליכי ייצור, לאסוף נתונים ולזהות תקלות או בעיות בזמן אמת.

- טכנולוגיות ענן, מחשוב קצה ועיבוד נתונים בתנועה – מקדם ניהול חכם של מידע בתנועה בזמן אמת, באמצעות ניתוח מידע בזמן אמת ותגובה מהירה לשינויים בשוק

ערים חכמות: בינה מלאכותית במחשוב הקצה יכולה לנתח נתונים בזמן אמת מחיישנים, מצלמות ומכשירי IoT כדי ליעל את זרימת התנועה, לנהל את צריכת האנרגיה ולשפר את בטיחות הציבור. **IoT תעשייתי (IIoT):** מאפשר ליישם בינה מלאכותית במפעלי ייצור כדי לנטר את בריאות הציוד, לחזות צורכי תחזוקה ולמטב תהליכי ייצור. **כלי רכב אוטונומיים:** מחשוב קצה מאפשר לאלגוריתמים של בינה מלאכותית לעבד נתוני חיישנים בזמן אמת, מה שמאפשר לכלי רכב לקבל החלטות בשבריר שנייה מבלי להסתמך על שרתי ענן מרוחקים.

- **תאומים דיגיטליים** - השתקפות חיה ומדויקת של מערכות בעולם הפיזי. יצירת עותקים דיגיטליים של מערכות ואובייקטים פיזיים מאפשרת סימולציה, ניתוח וייעול של תהליכים מורכבים, משפרת קבלת החלטות ומפחיתה סיכוניםⁱ

אנטומיה מדומה לדיוק כירורגי - בליבה של חדשנות רפואית זו טמונה סימולציה קפדנית של האנטומיה האישית. תאומים דיגיטליים משחזרים בקפידה את המורכבויות הדקויות של הפיזיולוגיה של המטופל, ומציעים למנתחים סביבה וירטואלית לחזרה על הליכים מורכבים בדיוק חסר תקדים. סימולציות אלו משמשות

כמקום מפלט לניסויים, ומעצימות אנשי מקצוע רפואיים לתכנן אסטרטגיות ולבצע ניתוחים מורכבים בדיוק ובביטחון גבוהים.

- **פלטפורמות עסקיות דיגיטליות** - מאפשרות שיתוף פעולה ואינטגרציה בין שותפים בשרשרת הערך, לקוחות וספקים, וכתוצאה מכך יוצרות מודלים עסקיים חדשים.^{li}

מבט אל מעבר לגבולות המוכרים - הסופר ויליאם גיבסון אמר ש"העתיד כבר כאן - הוא פשוט לא מחולק באופן שווה." לכן, כדי להישאר רלוונטיים, ארגונים צריכים לחפש השראה וחדשנות גם מחוץ לתעשייה שלהם, מאחר והפתרון הוא לא תמיד אצלם אלא יכול להיות בענף אחר. למשל, תעשיות שנראות לא קשורות, כמו חלל וביופרמצבטיקה, כבר משתפות פעולה: תנאי מיקרו-כבידה מאפשרים ייצור תרופות באיכות גבוהה יותר. חברות כמו **אלי לילי ומרק** (Merck) (כבר משקיעות בכך. **טויוטה ומיצובישי** משתפות פעולה עם סוכנויות חלל בבניית רכבי ירח. **lululemon** משתפת פעולה עם חברות ביוטכנולוגיה ליצירת בדים ירוקים. **אובר** מכניסה שליש מהכנסותיה ממשלוחי מזון ו**אמזון** נכנסת לתחום הבריאות עם Amazon Pharmacy.

התלכדות טכנולוגיה פיננסית (Fintech Convergence) - מתייחסת לתהליך שבו שירותים פיננסיים מסורתיים וטכנולוגיות חדשות מתמזגים, יוצרים מוצרים ושירותים פיננסיים חדשניים:

- **בנקאות פתוחה** (Open Banking) - ממשיקי תכנות יישומיים פתוחים מאפשרים לצדדים שלישיים לפתח שירותים ויישומים המתחברים לחשבונות בנק ויוצרים אקוסיסטם פיננסי משולב.^{lii}
- **פלטפורמות תשלום משולבות** - חברות כמו PayPal, Square או Stripe מציעות פתרונות תשלום משולבים המשרתים צרכים עסקיים ופיננסיים.^{liii}
- **שירותים פיננסיים משובצים** (Embedded Finance) - שילוב של שירותים פיננסיים בתוך פלטפורמות ואפליקציות לא פיננסיות, כמו חנויות מקוונות, אפליקציות נסיעות או פלטפורמות שירות.^{liv}
- **מטבעות דיגיטליים ובלוקצ'יין** - טכנולוגיות בלוקצ'יין משתלבות עם שירותים פיננסיים מסורתיים, יוצרות מערכות תשלום, השקעה והעברת כספים חדשניות.^{lv}

עתיד העבודה בכלכלה מתלכדת - התלכדות משנה באופן משמעותי את אופי העבודה, המיומנויות הנדרשות והמבנים הארגוניים:

- **עבודה היברידית ומבוזרת** - התלכדות של טכנולוגיות תקשורת, שיתוף פעולה

- ומחשוב ענן מאפשרת מודלים היברידיים של עבודה מרחוק ומהמשרד^{lvi}.
- **אוטומציה ואוטומציה** - שילוב של בינה מלאכותית, רובוטיקה ואוטומציה של תהליכים עם יכולות אנושיות יוצר מודלים עבודה חדשים, שבהם טכנולוגיה ובני אדם עובדים יחד באופן סינרגטי.
- **למידה מתמשכת והתפתחות מקצועית** - הצורך המתמיד ברכישת מיומנויות חדשות והסתגלות לטכנולוגיות משתנות מוביל להתלכדות של עבודה ולמידה, עם מודלים מיקרו-למידה ולמידה מותאמת אישית.
- **צוותים רב-תחומיים** - ארגונים עוברים למבנים המבוססים על צוותים רב-תחומיים, המשלבים מומחיות ממגוון תחומים לפתרון בעיות מורכבות ופיתוח חדשנות.

מקרי בוחן של אסטרטגיות התלכדות מוצלחות

מספר חברות מובילות הצליחו ליישם אסטרטגיות התלכדות שיצרו יתרונות תחרותיים משמעותיים:

אמזון: החלה כחנות ספרים מקוונת והתפתחה לפלטפורמת מסחר אלקטרוני, שירותי ענן (AWS), שירותי תוכן (Prime Video), מכשירי חומרה (Echo) ואפילו שירותי בריאות, מדגימה התלכדות של קמעונאות, טכנולוגיה, בידור ושירותי בריאות.

טסלה: משלבת טכנולוגיות רכב, אנרגיה מתחדשת, תוכנה ובינה מלאכותית תחת חזון אחד, יוצרת אקוסיסטמה המשלבת רכבים חשמליים, אחסון אנרגיה ופתרונות אנרגיה סולארית.

Reliance Industries בהודו: עברה מחברת נפט וגז לקונגלומרט המשלב אנרגיה מתחדשת, קמעונאות, תקשורת ותוכן דיגיטלי, מדגימה אסטרטגיית התלכדות מוצלחת בשווקים מתעוררים.

BICO Group - חברה המתמחה בביוקונברגנס, המפתחת מגוון טכנולוגיות כמו הדפסה תלת-ממדית ביולוגית, מיקרופלואידיקה וגידול תאים אוטומטי, יוצרת סינרגיה בין ביולוגיה, הנדסה וטכנולוגיית מידע.

3.4 התלכדות חברתית ותרבותית

התלכדות חברתית ותרבותית מתייחסת לתהליך שבו חברות ותרבויות שונות הופכות דומות יותר זו לזו עם הזמן, כתוצאה מאינטראקציה מוגברת, חשיפה הדדית ושיתוף רעיונות וערכים. זוהי "תהליך חברתי שבאמצעותו חברות ותרבויות הופכות דומות

יותר ויותר, והבדלים תרבותיים מצטמצמים^{lvii}.

התלכדות חברתית-תרבותית מתבטאת במספר אופנים:

- **התלכדות ערכים וסגנון חיים:** אימוץ של נורמות, ערכים, תרבות צריכה ואופנות דומות במקומות שונים בעולם, למשל התפשטות של מזון מהיר, אופנה גלובלית או ערכים דמוקרטיים-ליברליים^{lviii}.
- **התלכדות שפתית ותקשורתית:** התפשטות של שפות דומיננטיות (במיוחד אנגלית) כשפות תקשורת גלובליות, ואימוץ מונחים ומבנים לשוניים בין שפות^{lix}.
- **התלכדות פוליטית וממשלית:** מדינות מאמצות מבנים פוליטיים, מוסדיים וכלכליים דומים, כמו דמוקרטיה, ארגוני סחר בינלאומיים, או מערכות רגולטוריות דומות.
- **התלכדות סביבתית וערכי קיימות:** אימוץ גלובלי של ערכים, תקנים ופרקטיקות סביבתיות דומים, כמו יעדי פיתוח בר-קיימא של האו"ם^{lx}.

השפעת הגלובליזציה על התלכדות תרבותית – גלובליזציה היא הזרז המרכזי להתלכדות תרבותית, בייחוד דרך:

- **תקשורת המונים גלובלית:** טלוויזיה, קולנוע ואינטרנט מפיצים תוכן תרבותי ברחבי העולם, מה שמאפשר אימוץ של ערכים, רעיונות וסגנונות חיים גלובליים^{lxi}.
- **מסחר וכלכלה בינלאומיים:** חברות רב-לאומיות, שרשראות אספקה גלובליות וסחר בינלאומי מקדמים תרבות צרכנית דומה ברחבי העולם^{lxii}.
- **מדיה חברתית ופלטפורמות דיגיטליות:** פייסבוק, אינסטגרם, טיקטוק וטוויטר מאפשרים שיתוף מידי של תוכן ורעיונות ברחבי העולם, מאיצים את התפשטות מגמות ותופעות תרבותיות^{lxiii}.
- **הגירה ותנועת אנשים:** הגירה, תיירות ותנועה גלובלית של אנשים יוצרים "היברידיות תרבותית" ושילוב של אלמנטים תרבותיים ממקורות שונים.

התלכדות מדיה והשפעותיה החברתיות – התלכדות מדיה היא "תופעה הכוללת את הקישוריות של טכנולוגיות מידע ותקשורת, רשתות מחשבים ותוכן מדי. לתופעה זו השפעות חברתיות משמעותיות:

- **שינויים בצריכת מידע ובידור:** מעבר מצריכה פסיבית למעורבות אקטיבית ואינטראקטיבית עם תוכן, טשטוש הגבולות בין יוצרים וצרכנים^{lxiv}.
- **התלכדות חברתית:** התהליך שבו אנשים מתרגלים לריבוי משימות, מאפשר להם לנוע בחופשיות בין פלטפורמות ולהשתמש בערוצי מדיה מרובים בו-זמנית^{lxv}.
- **שינויים בשיח הציבורי:** יצירת "מרחב ציבורי גלובלי" שבו רעיונות, דעות ותנועות חברתיות מתפשטים במהירות מעבר לגבולות לאומיים^{lxvi}.

- **התלכדות תרבותית ויצירת תוכן :** התפתחות של מערכות מורכבות שבהן מותגים וזכויות יוצרים מופיעים במגוון מדיות שונות, וגורמים לכך שהתרבות מתקרבת ומתאחדת ל"תרבות משותפת" או "התלכדות תרבותית". לדוגמה, מותג כמו "הארי פוטר" מופיע לא רק בספרים, אלא גם בסרטים, משחקי וידאו, מופעים ומוצרים נלווים, וכך יוצר חוויה תרבותית אחת שמחברת קהלים מגוונים.^{lxvii}

זהות דיגיטלית בעולם מתכנס - בעולם שבו הפיזי והדיגיטלי מתלכדים, גם הזהות האישית והחברתית עוברות שינויים משמעותיים:

- **זהויות היברידיות:** אנשים מפתחים זהויות המשלבות אלמנטים פיזיים ודיגיטליים, עם "עצמי דיגיטלי" המתקיים במקביל ל"עצמי פיזי".
- **זהויות גלובליות:** הופעת זהויות "קוסמופוליטיות" המשלבות אלמנטים תרבותיים ממקורות שונים, דוחות את הגדרת הזהות המסורתית המבוססת על לאום או מוצא אתני.
- **זהויות קהילתיות מבוססות עניין :** יצירת קהילות וירטואליות המבוססות על תחומי עניין, אמונות או ערכים משותפים, ללא קשר למיקום גיאוגרפי.
- **זהויות מבוזרות :** במקביל להתלכדות, מתפתחת גם מגמה של זהויות מבוזרות המאפשרות לאנשים לבטא היבטים שונים של זהותם במרחבים דיגיטליים שונים.

התלכדות חברתית ותרבותית מעלה שאלות וסוגיות אתיות:

- **שימור גיוון תרבותי:** איזון בין התלכדות לשימור מסורות, שפות וזהויות תרבותיות ייחודיות.
- **פערים דיגיטליים:** התלכדות יכולה להעמיק פערים בין מי שיש להם גישה לטכנולוגיה ולאינטרנט לבין מי שאין להם גישה כזו.^{lxviii}
- **ריכוז כוח:** התלכדות מדיה וטכנולוגיה יכולה להוביל לריכוז כוח בידי מספר קטן של חברות טכנולוגיה ותקשורת גלובליות.^{lxix}
- **פרטיות וריבונות נתונים :** התלכדות של מערכות דיגיטליות מעלה שאלות לגבי פרטיות, שימוש בנתונים אישיים וריבונות מידע.

3.5 התלכדות סביבתית וקיימות

התלכדות במדעי האקלים - מתייחסת לשילוב מדעי ומתודולוגי של דיסציפלינות שונות במטרה להבין ולהתמודד עם שינויי האקלים. מחקר עדכני מצביע על כך ש"על רקע ההתחממות הגלובלית, דפוס האקלים משתנה לקראת התלכדות", כלומר, תבניות אקלימיות שונות הופכות דומות יותר זו לזו.^{lxx}

התלכדות במדעי האקלים כוללת:

- **שילוב מודלים אקלימיים ומערכות אקולוגיות:** חיבור בין מודלים פיזיקליים של האקלים לבין מודלים ביולוגיים ואקולוגיים, יוצר הבנה מערכתית של השפעות שינויי האקלים.^{lxxi}
- **התלכדות נתונים אקלימיים:** שילוב של מקורות נתונים מרובים (חישה מרחוק, תחנות קרקע, מודלים) לאינטגרציה של נתוני אקלים מקיפים.
- **התלכדות מדיניות אקלים:** תהליך שבו מדיניות אקלימית במדינות שונות הופכת דומה יותר, תוך אימוץ סטנדרטים ועדים דומים כמו מחויבות לאיפוס פחמני.
- **התלכדות של טכנולוגיות חלל ומדעי הסביבה** יוצרת כלים חדשים לניטור, הבנה וטיפול באתגרים סביבתיים.
- **ניטור כדור הארץ מהחלל:** לוויינים משמשים לניטור שינויי אקלים, התחממות כדור הארץ, הפשרת קרחונים, בירוא יערות וזיהום, תוך אספקת נתונים קריטיים למדענים וקובעי מדיניות.^{lxxii}
- **מערכות התרעה מוקדמת:** התלכדות של טכנולוגיות חישה, תקשורת ואנליטיקה מאפשרת פיתוח מערכות להתרעה מוקדמת לאסונות טבע כמו הוריקנים, שיטפונות ושריפות יער.^{lxxiii}
- **ניהול משאבים:** טכנולוגיות חלל מסייעות בניהול משאבים כמו מים, יערות ומשאבים טבעיים אחרים, תוך שימוש בנתוני לוויין לתכנון וקבלת החלטות.^{lxxiv}
- **מערכות אקלימיות חזויות:** שילוב של נתוני לוויין עם מודלים אקלימיים מתקדמים מאפשר חיזוי מדויק יותר של שינויי אקלים והשפעותיהם.

התלכדות מהווה מפתח לפיתוח בר-קיימא, המשלב שיקולים סביבתיים, חברתיים וכלכליים:

- **כלכלה מעגלית:** שילוב של טכנולוגיות דיגיטליות, הנדסת חומרים ומודלים עסקיים חדשים מאפשר יצירת מערכות כלכליות מעגליות המפחיתות פסולת ומשמרות משאבים.^{lxxv}
- **ערים חכמות וקיימות:** התלכדות של תכנון עירוני, טכנולוגיות IoT, אנרגיה מתחדשת ותחבורה חכמה יוצרת מודלים של ערים בנות-קיימא.^{lxxvi}
- **חקלאות מדייקת:** התלכדות של חקלאות, IoT, בינה מלאכותית וביוטכנולוגיה יוצרת מערכות חקלאיות יעילות יותר, עם השפעה סביבתית מופחתת.^{lxxvii}
- **כיווץ והתלכדות (Contraction & Convergence) -** : מודל לצמצום פליטות פחמן דו-חמצני המציע מסגרת שבה כל המדינות מתכנסות לרמות פליטה שוות לנפש בטווח הארוך.^{lxxviii}

מגזר האנרגיה עובר התלכדות משמעותית, עם שילוב של מקורות אנרגיה, טכנולוגיות

- **התלכדות אנרגיות מתחדשות:** שילוב של טכנולוגיות סולאריות, רוח, ביומסה ואחסון אנרגיה, יוצר מערכות אנרגיה היברידיות יעילות ואמינות יותר.^{lxxix}
- **רשתות חכמות:** התלכדות של תשתיות אנרגיה מסורתיות עם טכנולוגיות IoT, בינה מלאכותית ותקשורת, יוצרת רשתות אנרגיה חכמות המווסתות ביקוש והיצע באופן דינמי.^{lxxx}
- **התלכדות IT/OT בתחום האנרגיה:** שילוב של טכנולוגיות מידע (IT) וטכנולוגיות תפעוליות (OT) יוצר מערכות אנרגיה יעילות ותגובתיות יותר, עם תחזוקה חזויה ואופטימיזציה בזמן אמת.^{lxxxi}
- **טכנולוגיות מימן:** חברות המשקיעות בטכנולוגיות מימן מגשרות על הפער בין מגזרי אנרגיה שונים, יוצרות שיתופי פעולה והזדמנויות חדשות לחדשנות.^{lxxxii}

ההתלכדות צפויה לספק פתרונות לאתגרים סביבתיים עתידיים:

- **התמודדות עם שינויי אקלים:** התלכדות של טכנולוגיות לכידת פחמן, אנרגיה מתחדשת, ביוטכנולוגיה ובינה מלאכותית תספק פתרונות הוליסטיים להפחתת פליטות והסתגלות לשינויי אקלים.^{lxxxiii}
- **משבר המגוון הביולוגי:** שילוב של חישה מרחוק, גנומיקה, מדעי הנתונים ושיתוף פעולה בינלאומי יאפשר ניטור וטיפול באובדן המגוון הביולוגי.^{lxxxiv}
- **אבטחת מזון וחקלאות בת-קיימא:** התלכדות של ביוטכנולוגיה, חקלאות מדייקת, בינה מלאכותית וטכנולוגיות IoT תסייע בהתמודדות עם אתגרי ביטחון תזונתי.
- **חלל בר-קיימא:** התלכדות של טכנולוגיות חלל, מדעי הסביבה ומדיניות בינלאומית תתמודד עם סוגיות של "פסולת חלל" וקיימות של פעילויות חלל.^{lxxxv}

4. השלכות עתידיות ואתגרים

לצד היתרונות הרבים, התלכדות מציבה גם מספר סיכונים וחששות:

- **פערים טכנולוגיים וחברתיים:** התלכדות עלולה להגדיל את הפער בין קבוצות בעלות גישה לטכנולוגיות מתקדמות וידע, לבין אלה שאין להן, הן ברמה האישית והן ברמה הגלובלית בין מדינות מפותחות ומתפתחות.
- **אבטחת סייבר ופרטיות:** התלכדות של מערכות דיגיטליות ופיזיות יוצרת נקודות תורפה חדשות ואתגרי אבטחה, כפי שניתן לראות בהתקפות על תשתיות קריטיות ומערכות פיזיות דרך ממשקים דיגיטליים.^{lxxxvi}

- **תלות יתר בטכנולוגיה:** התלכדות יכולה להוביל לתלות מוגזמת במערכות טכנולוגיות, עם השלכות פוטנציאליות שליליות על בריאותנו ורווחתנו, במיוחד כאשר מערכות אלה נכשלות.
- **אובדן מגוון תרבותי:** התלכדות תרבותית עלולה להוביל לאובדן מסורות, שפות וידע מקומי ייחודי, ולהפחית את המגוון התרבותי העולמי.

התלכדות גם מעלה שיקולים אתיים מורכבים:

- **שאלות של זהות ואוטונומיה אנושית :** כאשר טכנולוגיות מתלכדות עם גופנו ומוחנו (למשל באמצעות ממשקי מוח-מחשב), עולות שאלות לגבי זהות אנושית, אוטונומיה ומה מבדיל אותנו ממכונות.
- **הטיות והפליה באלגוריתמים:** מערכות בינה מלאכותית יכולות להנציח ואף להגביר הטיות חברתיות קיימות, במיוחד כאשר הן משולבות במערכות קבלת החלטות .
- **אתיקה של עריכה גנטית:** התלכדות של ביוטכנולוגיה ומדעי המחשב מאפשרת עריכת גנים מדויקת (CRISPR), המעלה שאלות אתיות לגבי הנדסה גנטית של בני אדם ושינוי המורשת הגנטית שלנו .
- **הגנה על פרטיות בעולם מתכנס:** כאשר מידע אישי נאסף ממקורות שונים ומתלכד, עולות שאלות אתיות לגבי הסכמה מדעת, שימוש בנתונים וריבונות מידע.^{lxxxvii}

להתמודדות עם אתגרי ההתלכדות נדרשות **מסגרות מדיניות ורגולציה חדשות:**

- **רגולציה חוצת-תחומים:** הצורך במסגרות רגולטוריות המתמודדות עם טכנולוגיות מתכנסות, במקום גישה מבוססת סילואים. לדוגמה, רגולציה של בינה מלאכותית בבריאות דורשת שילוב של מומחיות רפואית, טכנולוגית ואתית.
- **מדיניות חדשנות תומכת התלכדות:** תוכניות לאומיות התומכות במחקר התלכדות, כמו תוכנית הביקונוברגנס הלאומית של ישראל או תוכניות ה-Convergence Research של ה-NSF בארה"ב^{lxxxviii}.
- **סטנדרטים והתאמה גלובליים:** הצורך בסטנדרטים בינלאומיים מתואמים לטכנולוגיות מתכנסות, במיוחד בתחומים כמו אבטחת סייבר, פרטיות מידע, אבטחת שרשרת אספקה ואתיקה של בינה מלאכותית^{lxxxix}.
- **גישות רגולטוריות חדשניות:** מסגרות רגולטוריות גמישות, כמו "ארגזי חול רגולטוריים" (Regulatory Sandboxes), המאפשרות ניסוי וחדשנות תוך צמצום סיכונים.^{xc}

התלכדות דורשת פיתוח מיומנויות חדשות ושינויים במערכות החינוך:

- **כישורים רב-תחומיים:** הצורך בהכשרה ברמה גבוהה במספר תחומים, כגון מדענים המבינים גם ביולוגיה וגם מדעי המחשב, או מהנדסים המבינים גם היבטים סביבתיים וחברתיים.^{xci}
- **למידה לאורך החיים:** מערכות הכשרה ולמידה גמישות, המאפשרות לעובדים להתעדכן ולרכוש כישורים חדשים לאורך הקריירה שלהם, במיוחד לנוכח ההתלכדות המתמשכת של טכנולוגיות ותחומים.
- **אוריינות טכנולוגית ודיגיטלית:** הצורך בהבנה בסיסית של טכנולוגיות מתכנסות בקרב כלל האוכלוסייה, לצורך השתתפות מלאה בכלכלה ובחברה העתידית
- **מיומנויות "רכות" וחשיבה מערכתית:** התלכדות מדגישה את החשיבות של מיומנויות כמו חשיבה ביקורתית, יצירתיות, עבודת צוות וחשיבה מערכתית, לצד ידע טכני ספציפי.^{xcii}

אתגרי ההתלכדות דורשים שיתוף פעולה בין-לאומי נרחב:

- **שיתוף פעולה מחקרי** - תוכניות מחקר משותפות חוצות-גבולות בתחומי ההתלכדות, כמו שינויי אקלים, בריאות גלובלית או בטחון סייבר.^{xciii}
- **מסגרות מדיניות בינלאומיות** - יצירת מסגרות מדיניות בינלאומיות לניהול ההשפעות של טכנולוגיות מתכנסות, כולל אתיקה, בטיחות ופיקוח.^{xciv}
- **שיתוף ידע וטכנולוגיה** - פלטפורמות לשיתוף ידע, נתונים וטכנולוגיות כדי לוודא שהיתרונות של התלכדות זמינים באופן גלובלי, תוך צמצום פערים טכנולוגיים בין מדינות מפותחות ומתפתחות.^{xcv}
- **דיפלומטיה מדעית וטכנולוגית** - יוזמות דיפלומטיות המתמקדות בהתלכדות ובטכנולוגיות הנובעות ממנה, כדי ליצור שיתוף פעולה בינלאומי במקום תחרות הרסנית.

5. סיכום

התלכדות (Convergence) מתגלה כמגמה רב-ממדית ומהפכנית המעצבת את העתיד בתחומים רבים. היא אינה רק תופעה טכנולוגית, אלא מהפכה מערכתית המשנה את האופן שבו טכנולוגיות, מערכות חברתיות, מדעים ותעשיות פועלים ומתפתחים, מטשטשת את הגבולות המסורתיים ויוצרת תחומים וגישות חדשים. ליבה של

התלכדות טמונה בהתמזגות NBIC – ננוטכנולוגיה, ביוטכנולוגיה, טכנולוגיית מידע ומדעי הקוגניציה – המהווים מנוע מרכזי לשינוי יסודי בחיי האדם ובחברה. הפוטנציאל הטרנספורמטיבי של ההתלכדות מתבטא ביכולת שלה להציע פתרונות הוליסטיים לאתגרים עולמיים מורכבים, כולל בריאות, אנרגיה, משבר האקלים וביטחון תזונתי, באמצעות שילוב גישות וטכנולוגיות מדיסציפלינות שונות.

ההתלכדות יוצרת תחומים ותעשיות חדשים, כגון ביוקונברגנס, ננו-רפואה, חקלאות מדויקת ורכבים אוטונומיים, המשלבים אלמנטים שהיו בעבר נפרדים. תהליך זה מאיץ את קצב החדשנות, כאשר התקדמות בתחום אחד משפיעה ומזרזת תחומים אחרים, וכך נוצרת דינמיקה של "אפקט מכפיל". בנוסף, ההתלכדות מאפשרת רמות חדשות של פרסונליזציה והתאמה אישית, כמו רפואה מותאמת אישית ומוצרים חינוכיים וצרכניים המותאמים לצרכים ולמאפיינים הייחודיים של כל אדם. תהליך זה מדגיש את הצורך בשיטות מחקר, חינוך ופיתוח מדיניות שמדגישות שיתוף פעולה רב-תחומי ואינטגרציה של ידע כדי להתמודד עם המציאות המשתנה שמביאה ההתלכדות.

חינוך ממלא תפקיד מרכזי ומשמעותי בתהליך ההתלכדות. הוא משמש כבסיס לפיתוח מיומנויות רב-תחומיות, חשיבה יצירתית וגמישות מחשבתית הנדרשות לעולם מתהווה ומשתנה במהירות. חינוך מותאם שמדגיש שיתופי פעולה בין-תחומיים, למידה מתמשכת והבנה טכנולוגית יסודית, מאפשר להכין דור חדש של בני אדם שיכולים לנווט בהצלחה בעולמות משולבים, להוביל חדשנות ולתרום לפתרון אתגרים גלובליים. הוא גם כלי חיוני לפיתוח מודעות אתית ואחריות חברתית סביב השימוש בטכנולוגיות מתקדמות.

לסיכום, ההתלכדות אינה מגמה טכנולוגית או מדעית בלבד, אלא מהפכה רחבה המשפיעה על כל רובדי החיים – מהאופן שבו אנו עובדים, לומדים ומתקשרים, ועד לאופן שבו אנו מפתחים מדיניות וחדשנות. זוהי הזדמנות יוצאת דופן להוביל לשינוי משמעותי ולקדם התקדמות חברתית וכלכלית. ההתלכדות מבטיחה יתרונות רבים: בתחום הבריאות היא תאפשר טיפולים מדויקים ומותאמים אישית, שיכולים להציל חיים ולשפר את איכותם; בתחום האנרגיה – פיתוח מקורות מתחדשים ויעילים יותר שיתרמו לקיימות סביבתית; בחינוך – יצירת שיטות הוראה מותאמות המגבירות מוטיבציה והצלחה אישית; בתעשייה – חדשנות מתמדת שתעודד צמיחה כלכלית ויצירת משרות איכותיות; ובתחום החברה – חיזוק שיתופי פעולה בינלאומיים וצמצום פערים חברתיים באמצעות פתרונות טכנולוגיים נגישים. מתוך הבנה מעמיקה ושיתופי פעולה רב-תחומיים, ניתן לצפות לעתיד שבו ההתלכדות תוביל לפיתוחים פורצי דרך, תשפר את איכות חיינו ותאפשר מענה מיטבי לאתגרים הגדולים של זמננו, תוך יצירת עולם מתקדם, שוויוני ובר-קיימא.

6. מקורות

- [What is technological convergence? | Definition from TechTarget.](#) ⁱ
- [Convergence Theory | Definition, Discussion and Examples](#) ⁱⁱ
- [Learn About Convergence Research - Research Approaches | NSF - National Science Foundation](#) ⁱⁱⁱ
- [How technology convergence is redefining the future | World Economic Forum](#) ^{iv}
- [התלכדות פירוש: מילים נרדפות, ביטויים ועוד | מילון אבניאון](#) ^v
- [התכנסות פירוש: מילים נרדפות, ביטויים ועוד | מילון אבניאון](#) ^{vi}
- [The Convergence Will Be a Powerful Trend in Technology - CDInsights](#) ^{vii}
- [Technological convergence - Wikipedia](#) ^{viii}
- [Technological convergence 2040: apocalypse or utopia? | by Jeremy Lamri | Future of Work & Society — Towards the quaternary economy | Medium](#) ^{ix}
- [2025: The Year We Embrace Tech's Great Convergence | Edelman](#) ^x
- [Think | IBM](#) ^{xi}
- [The Convergence Will Be a Powerful Trend in Technology - CDInsights](#) ^{xii}
- [Phygital Convergence - Where the Digital and Physical Worlds Converge](#) ^{xiii}
- [Phygital Convergence - Where the Digital and Physical Worlds Converge](#) ^{xiv}
- [Unlocking greater value from physical-digital convergence | Thoughtworks United States](#) ^{xv}
- [Bioinformatics in personalized medicine: Providing tailored healthcare](#) ^{xvi}
- [AgriTech Energy Convergence → Term](#) ^{xvii}
- <https://ijrpr.com/uploads/V6ISSUE1/IJRPR37508.pdf> ^{xviii}

התלכדות מדיה – ויקיפדיה	xix
How technology convergence is redefining the future World Economic Forum	xx
Bioconvergence - Wikipedia	xxi
What is bioconvergence	xxii
What is 'bioconvergence' and is it the future of science? World Economic Forum	xxiii
Personalized Medicine: Motivation, Challenges and Progress - PMC	xxiv
NanoGhost	xxv
Bio-Convergence - English Innovation Site	xxvi
Achieving personalized healthcare with precision diagnostics and therapeutics	xxvii
מהפיכת ה - Bio-Convergence-רשות החדשנות	xxviii
Bioconvergence: Breaking Down Silos in Disruptive Innovation	xxix
BioConvergence: Assembling the Forces of Nature and Technology for a Remarkable Future - ELE Times	xxx
Bioconvergence & The Lab of the Future HDR	xxxi
Healthcare Bioconvergence Market Size & Forecast, 2025-2034	xxxii
Convergence of Precision Medicine and Public Health Into Precision Public Health: Toward a Big Data Perspective	xxxiii
Digital health meets precision medicine: a convergence by Rakesh Margam Medium	xxxiv
Breaking boundaries: The convergence evolution - A health technology perspective - Vynamic LLC	xxxv
The Difference Between Multidisciplinary, Interdisciplinary, and Convergence Research	xxxvi
What is transdisciplinary research? - Transdisciplinary Field Guide - Utrecht University	xxxvii
Convergence research as transdisciplinary knowledge	xxxviii
coproduction within cases of effective collaborative governance of social-	27

ecological systems

[What is Convergence Science? | American Scientist](#) ^{xxxix}

Whither convergence? Co-designing convergent research and wrestling ^{xl}
with its emergent tensions - Ecology & Society

[Convergence Research: The Nature of the Beast | by Gemma Jiang, PhD | Medium](#) ^{xli}

Front Matter | Convergence: Facilitating Transdisciplinary Integration ^{xlii}
of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond | The
National Academies Press

A convergence research perspective on graduate education for ^{xliii}
sustainable urban systems science

[NSF leads a \\$35M federal investment in future agricultural technologies and solutions](#) ^{xliv}

[What is Industry Convergence? | DealHub](#) ^{xlv}

[The Great Convergence of Fintech and Business SaaS](#) ^{xlvi}

[Answering 3 key questions on industry convergence | Crowe LLP](#) ^{xlvii}

<https://enotrans.org/article/convergence-where-do-we-go-from-here/> ^{xlviii}

[The top 10 IT/OT convergence trends—as showcased at SPS fair 2022](#) ^{xlix}

[13 Inspiring Digital Twin Examples - Neuroject](#) ^l

[Breadth is the new depth: The power of intentional intersections](#) ^{li}

[Top 10 fintech innovations transforming the financial sector | bobsguide](#) ^{lii}

[The convergence of fintech | Narmi](#) ^{liii}

[A guide to fintech innovation | Stripe](#) ^{liv}

<https://www.linkedin.com/pulse/iterative-innovation-technology-convergence-definition-5-examples/> ^{lv}

[Top Four Takeaways to Advance the Convergence of Learning and Work](#) ²⁸

[Cultural Convergence as a Global Phenomenon | Free Essay Example for Students](#) lvii

[Cultural Convergence: 10 Examples and Definition \(2025\)](#) lviii

<https://www.linkedin.com/pulse/cultural-convergence-da-perspective-pete-lauren-consulting/> lix

[Convergence \(sustainability science\) - Wikipedia](#) lx

[Cultural Convergence Overview & Examples | What is Cultural Convergence? - Lesson | Study.com](#) lxi

<https://www.cambridge.org/core/books/abs/social-policy-review-15/convergence-in-social-welfare-systems-what-does-it-mean/195786BF2FF19E35F6C975461E42B3CC> lxii

<https://www.researchpublish.com/upload/book/Cultural%20Diversity%20and%20Convergence-08042023-1.pdf> lxiii

[Media Convergence | Definition & Examples - Lesson | Study.com](#) lxiv

[What is media convergence?](#) lxv

<https://www.ebsco.com/research-starters/social-sciences-and-humanities/media-convergence> lxvi

<https://www.linkedin.com/pulse/convergence-media-entertainment-accelerate-diana-colella/> lxvii

[Convergence of Technologies: Considerations for Cyberpeace](#) lxviii

[1.4 Convergence – Media & Society: Critical Approaches](#) lxix

Climate Change Is Leading to a Convergence of Global Climate Distribution - Li - 2024 - Geophysical Research Letters - Wiley Online Library

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107442> lxxi

[Green Skills Series: Exploring the Convergence of Environmental Sustainability and Space Technology | Fragomen, Del Rey, Bernsen & Loewy LLP](#) lxxii

[5 ways space tech can help protect the planet](#) lxxiii

[Advancing Environmental Monitoring With Space Technology | EVONA](#) lxxiv

<https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00128> lxxv

A convergence research perspective on graduate education for sustainable urban systems science lxxvi

[The Convergence Initiative](#) lxxvii

[Contraction & Convergence | Climate Change Connection](#) lxxviii

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119607> lxxix

[Perfect Storm for the Grid: Convergence of Energy Growth and Policy](#) lxxx

[The ROI of IT/OT Convergence in Energy: Unlocking Operational and Financial Value](#) lxxxi

[Energy and utilities leaders must adapt to convergence or risk obsolescence - HFS Research](#) lxxxii

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108133> lxxxiii

[Convergence Initiative](#) lxxxiv

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179145> lxxxv

[Cybersecurity and Physical Security Convergence](#) lxxxvi

[What Is Cyber-Physical Security Convergence? - Dataminr](#) lxxxvii

[Bio-convergence – Israel's Next Growth Engine - English Innovation Site](#) lxxxviii

[The Global Convergence of Climate Change Disclosures - Persefoni](#) lxxxix

[Convergence and Divergence: Multilateral Trade and Climate Agendas](#) xc

[Empowering Tomorrow's Workforce: The Convergence of Education and Industry | YouScience](#) xci

[Transforming higher education for the skills economy](#) xcii

Convergence of CO2 emissions in countries at different stages of development. Do globalisation and environmental policies matter? - xciii
30

[World Climate Policy: Convergence and Transition](#)^{xciv}

[Understanding Global Concessional Climate Finance 2024 - CPI](#)^{xcv}