

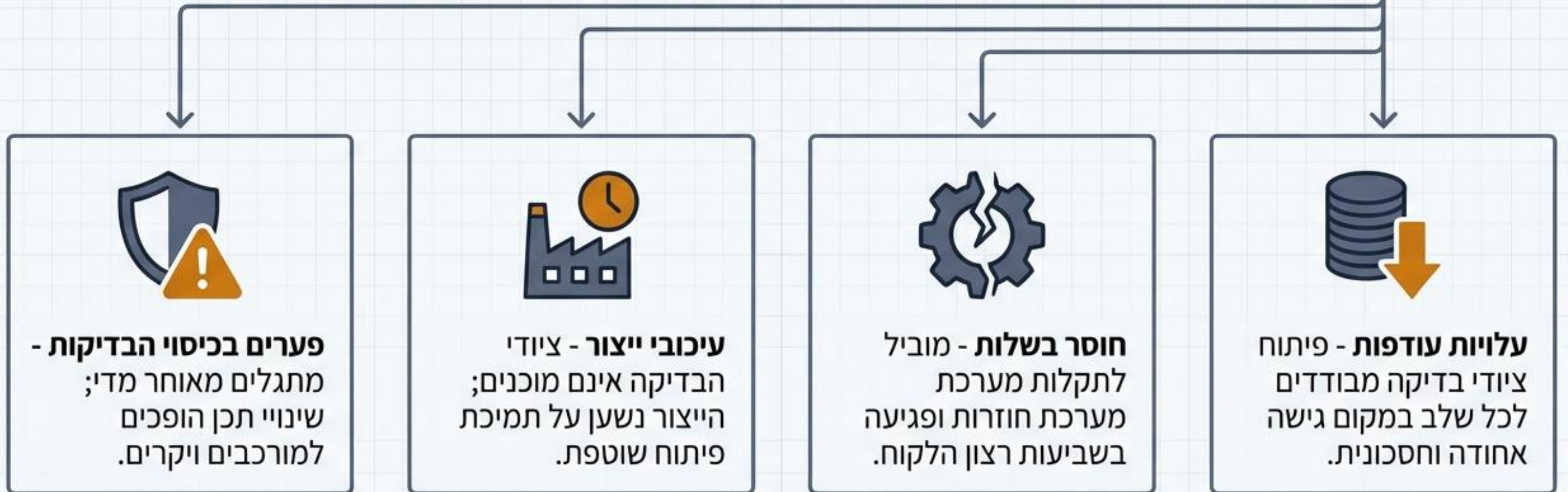
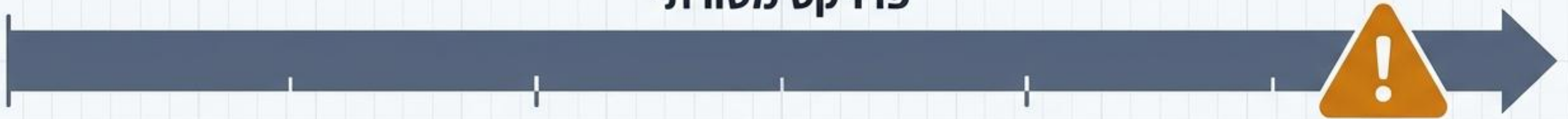
שילוב מתודולוגיית הנדסת בדיקות בהנדסת המערכת של הפרויקט

אופטימיזציה טכנית ומסחרית
משלב ההתנעה ועד לתפעול השוטף

קניין של חיים נוטי – הנדסת מערכת וניהול פרויקטים

אתגר הבדיקות המסורתי

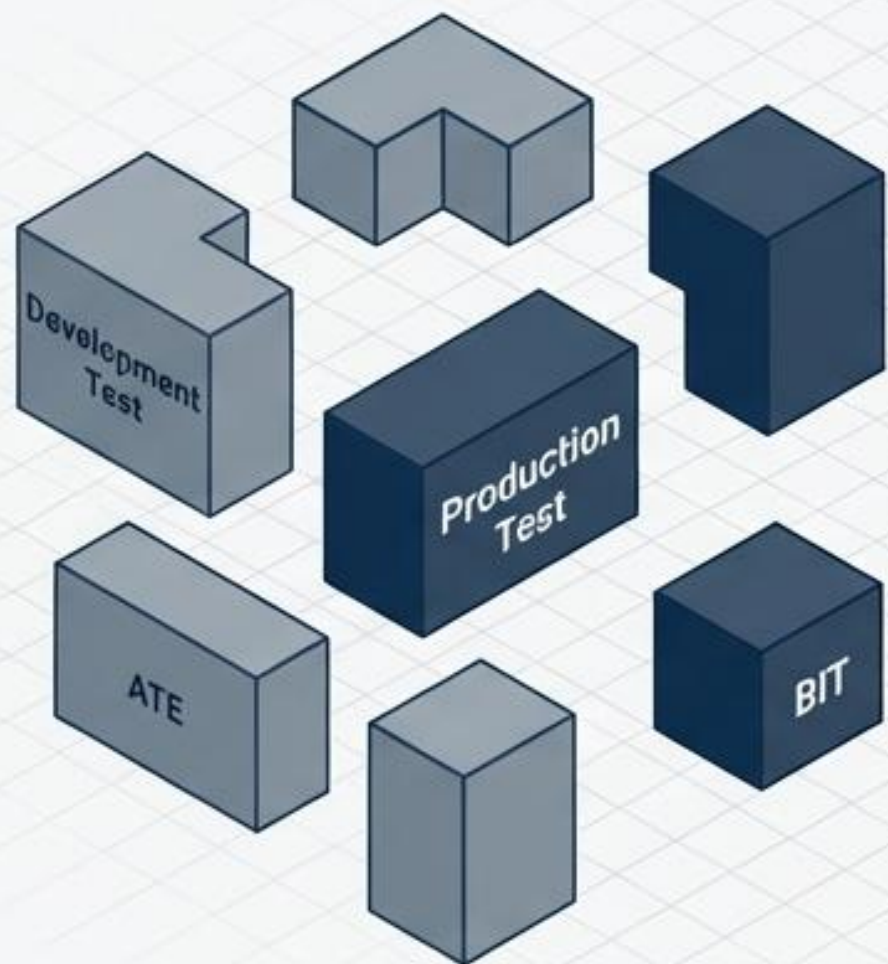
פרויקט מסורתי



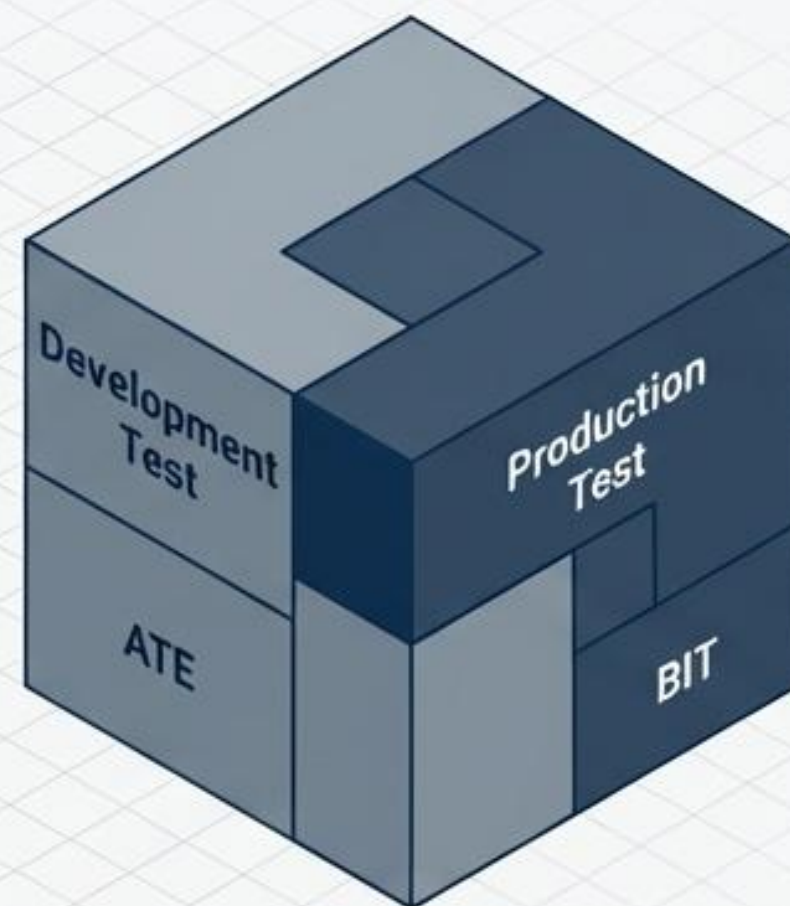
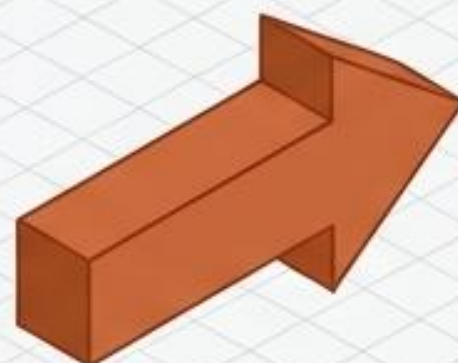
שינוי תפיסה: הנדסת בדיקות כדיסציפלינה אסטרטגית

הנדסת בדיקות אינה רק 'בניית צב"דים'. היא אסטרטגיה הוליסטית מיום אפס.

מצב קיים



האסטרטגיה החדשה



ראייה כוללת (Lifecycle Test Strategy): תכנון רציף ואופטימלי משלב ההתנעה, דרך פיתוח וייצור, ועד לתחזוקה ולשימוש המבצעי.

אופטימיזציה מוקדמת: קביעת נקודת העבודה הטכנית והכלכלית של הפרויקט בשלב מוקדם ככל האפשר.

מהות הנדסת הבדיקות בפרויקט

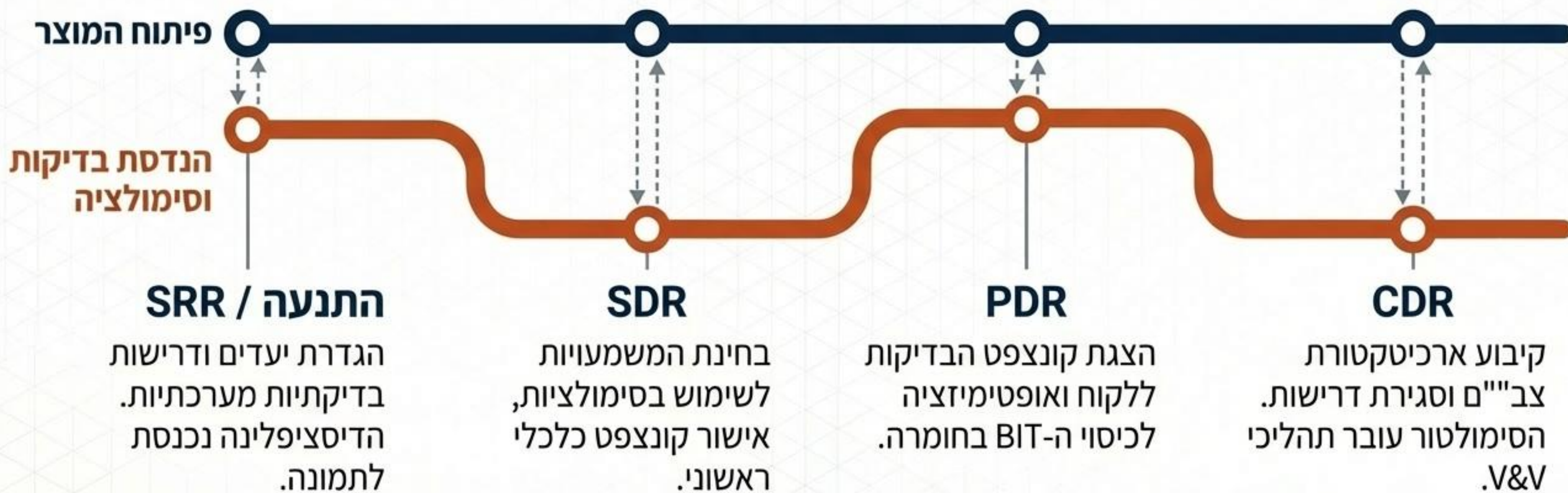


הנדסת בדיקות היא חלק מהנדסת המערכת של הפרויקט, החל משלב ההתנעה, לאיפיון ותאום אופטימאלי של תהליכי הבדיקות, בראיה כוללת של בדיקות המערכת לכל חיי הפרויקט.

מסמך ה-LTC מגדיר את קונצפט בדיקות המערכת בהתאם לדרישות בעלי העניין בהסתכלות לאורך כל חיי המוצר.

שילוב במחזור חיי הפרויקט: מתחילים ביום אפס

הנדסת בדיקות אינה שלב טורי שמגיע לאחר סיום התכנן. זהו תהליך איטרטיבי רציף.




הסימולטור והצב"ד הם מוצרים לכל דבר העוברים תהליכי פיתוח מקבילים למוצר המרכזי.

גיבוש קונספט בדיקות מחזור חיים (LTC)

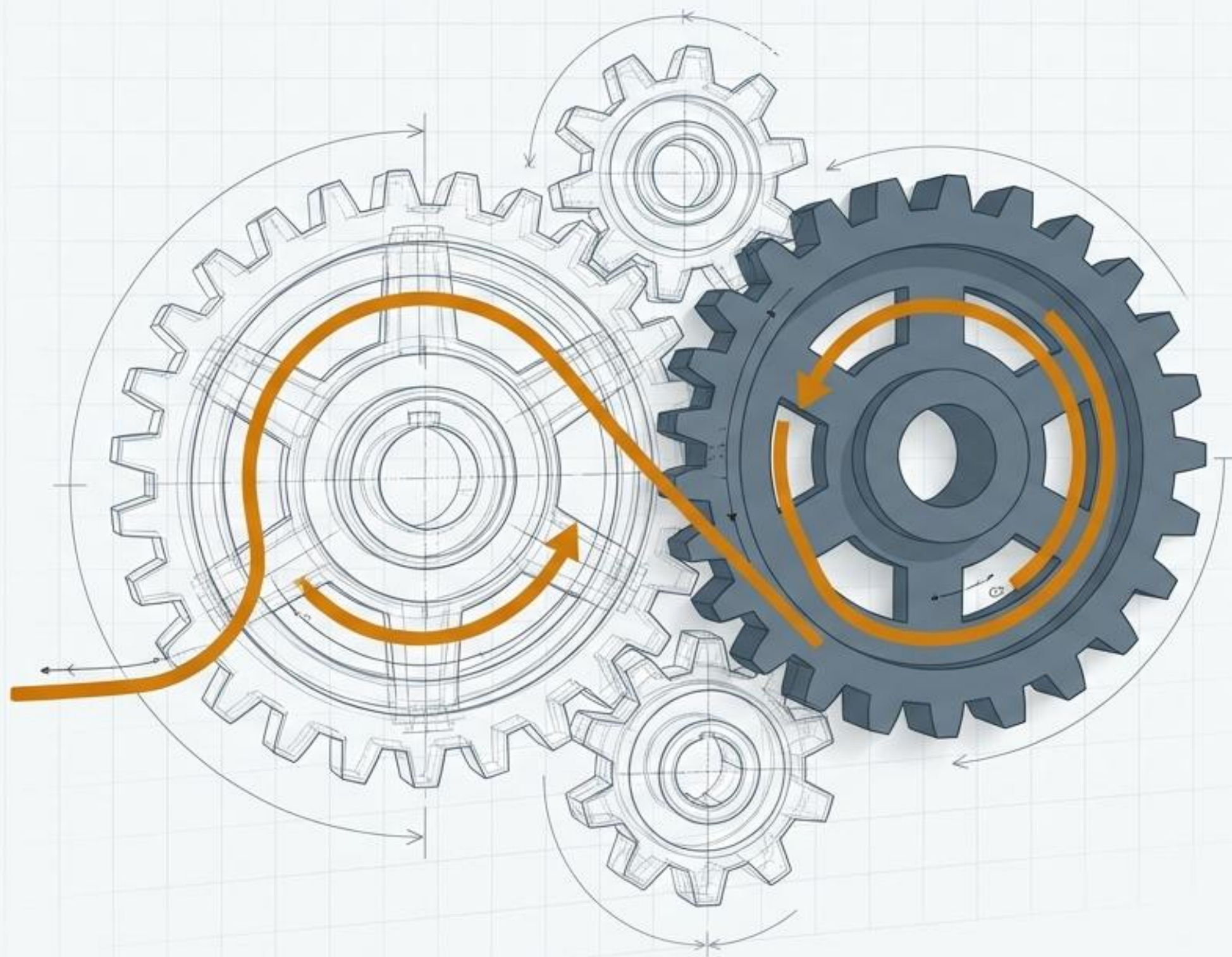


תיאור מפורט של האלגוריתם
מתואר במאמר TE ITC Updated 4

 [TE ITC Updated 4.pdf](#)

סינרגיה של מחזיקי עניין





שילוב מתודולוגיית הנדסת בדיקות בהנדסת המערכת של הפרויקט

אופטימיזציה טכנית ומסחרית
משלב ההתנעה ועד לתפעול השוטף

אופטימיזציה טכנית: מציאת שיווי המשקל

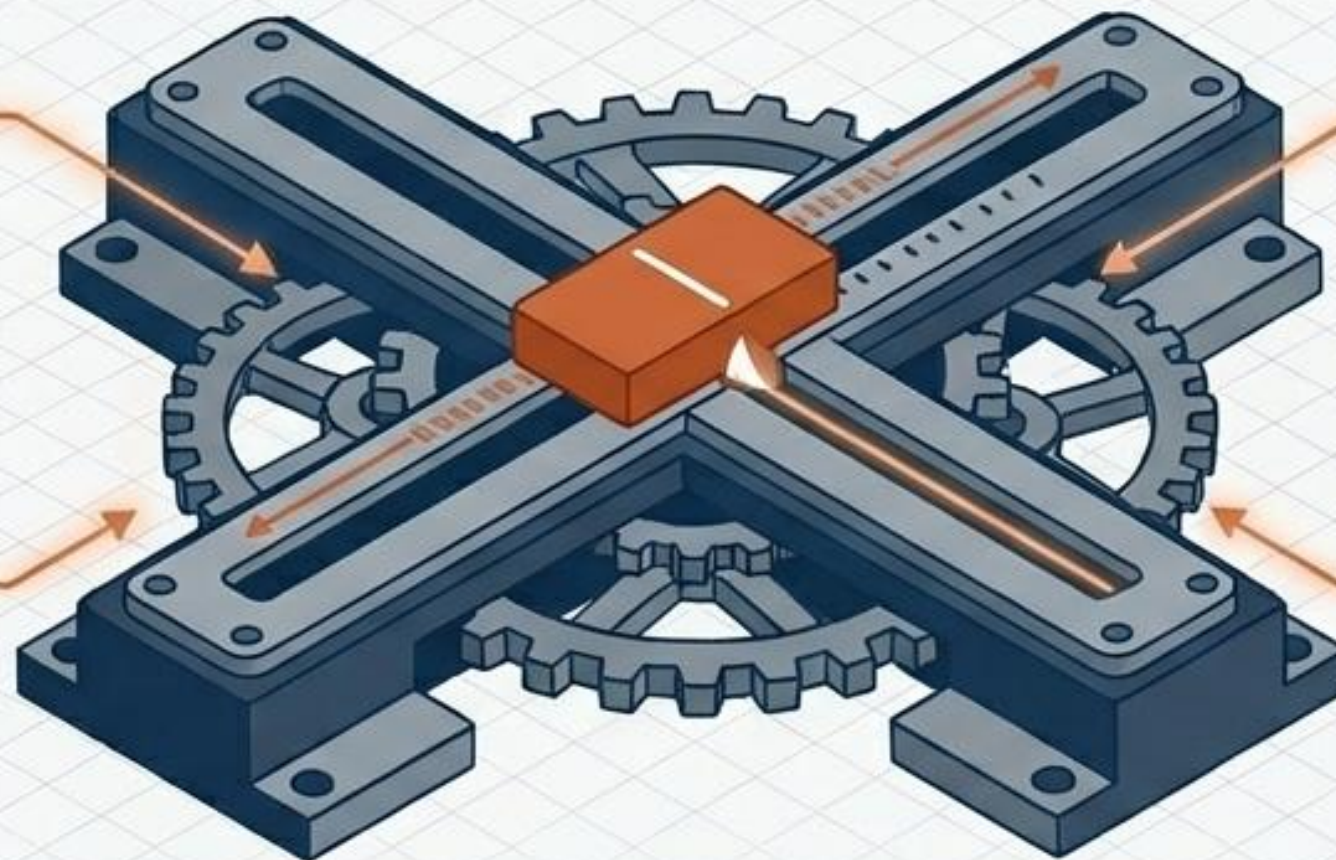
בדיקה עצמית (BIT)

יתרון:

אוטונומיה גבוהה וזיהוי תקלות בזמן אמת.

סיכון (Trade-off):

תוספת חומרה ומשקל, פגיעה באמינות המוצר הבסיסי, והגדלת התראות שווא (False Alarms).



צב"ד חיצוני (ATE)

יתרון:

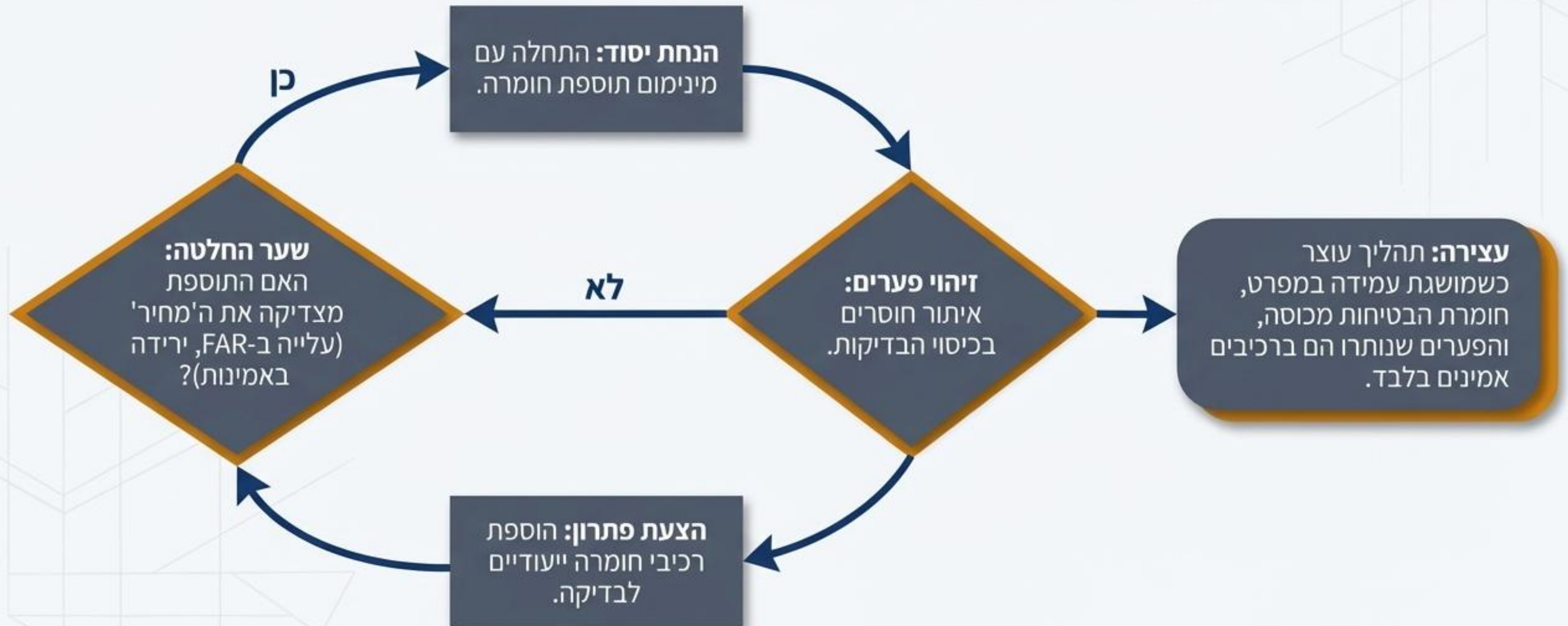
שמירה על חומרה מערכתית פשוטה וזולה יותר.

סיכון (Trade-off):

תלות בציד חיצוני כבד, עלויות פיתוח גבוהות, וסרבול לוגיסטי למשתמש למשתמש הקצה.

תהליך אופטימיזציית BIT

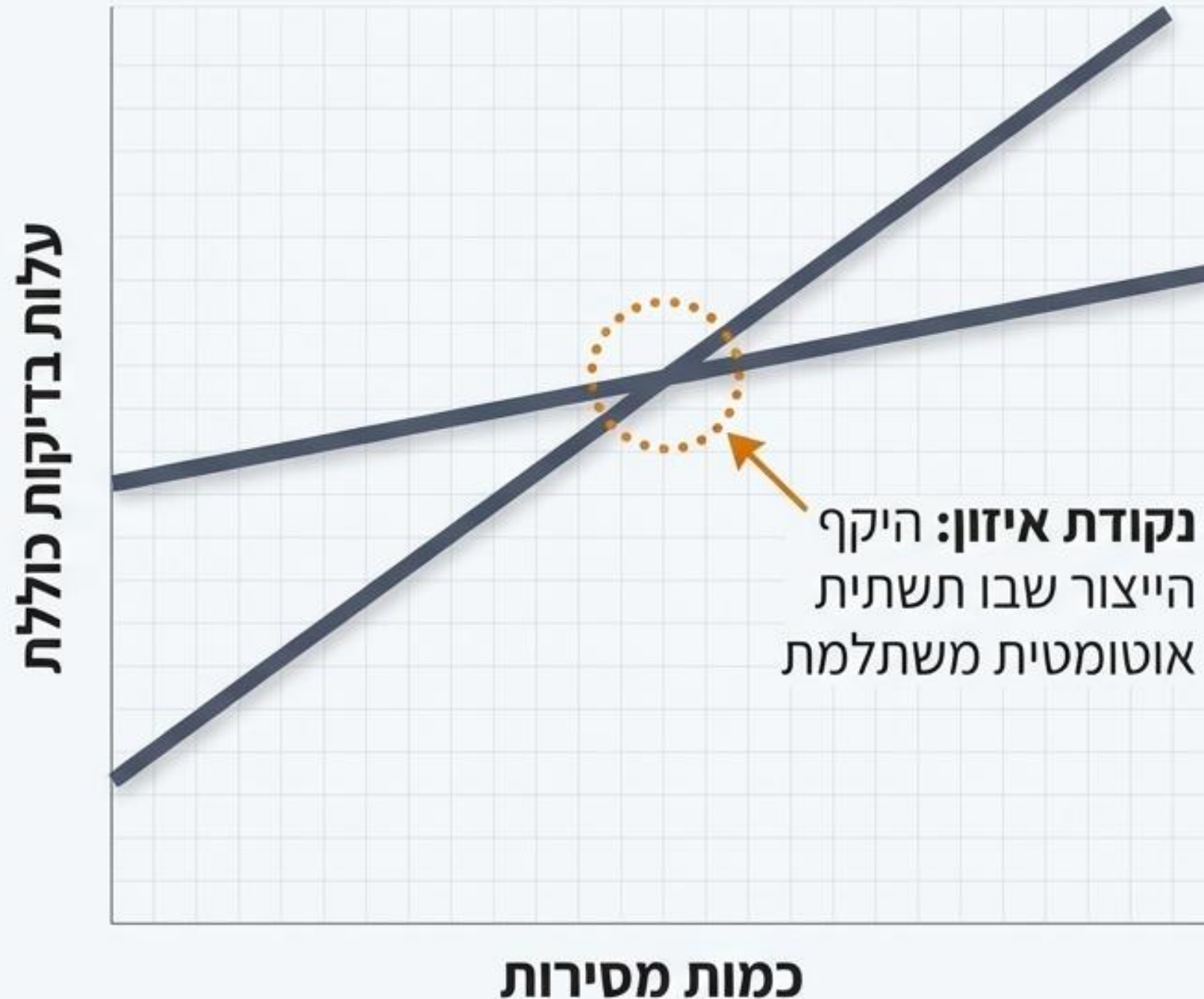
מטרה: מקסום כיסוי הבדיקות הפנימיות (BIT) תוך ניהול סיכונים הנדסיים.



אופטימיזציה מסחרית

מציאת נקודת העבודה (TWP) הזולה ביותר לאורך מחזור החיי הפרויקט, מבלי להתפשר על איכות טכנית.

- בדיקות ברמת מערכת (System) מול שילוב בדיקות תת-מערכת (Subsystem) בייצור.
- ציודי בדיקה ייעודיים לכל שלב מול ציוד בדיקה אחוד ומשותף.
- ציוד בדיקה מורכב/אוטומטי מול ידני/פשוט.



אופטימיזציה כלכלית: המודל מאחורי ההחלטות

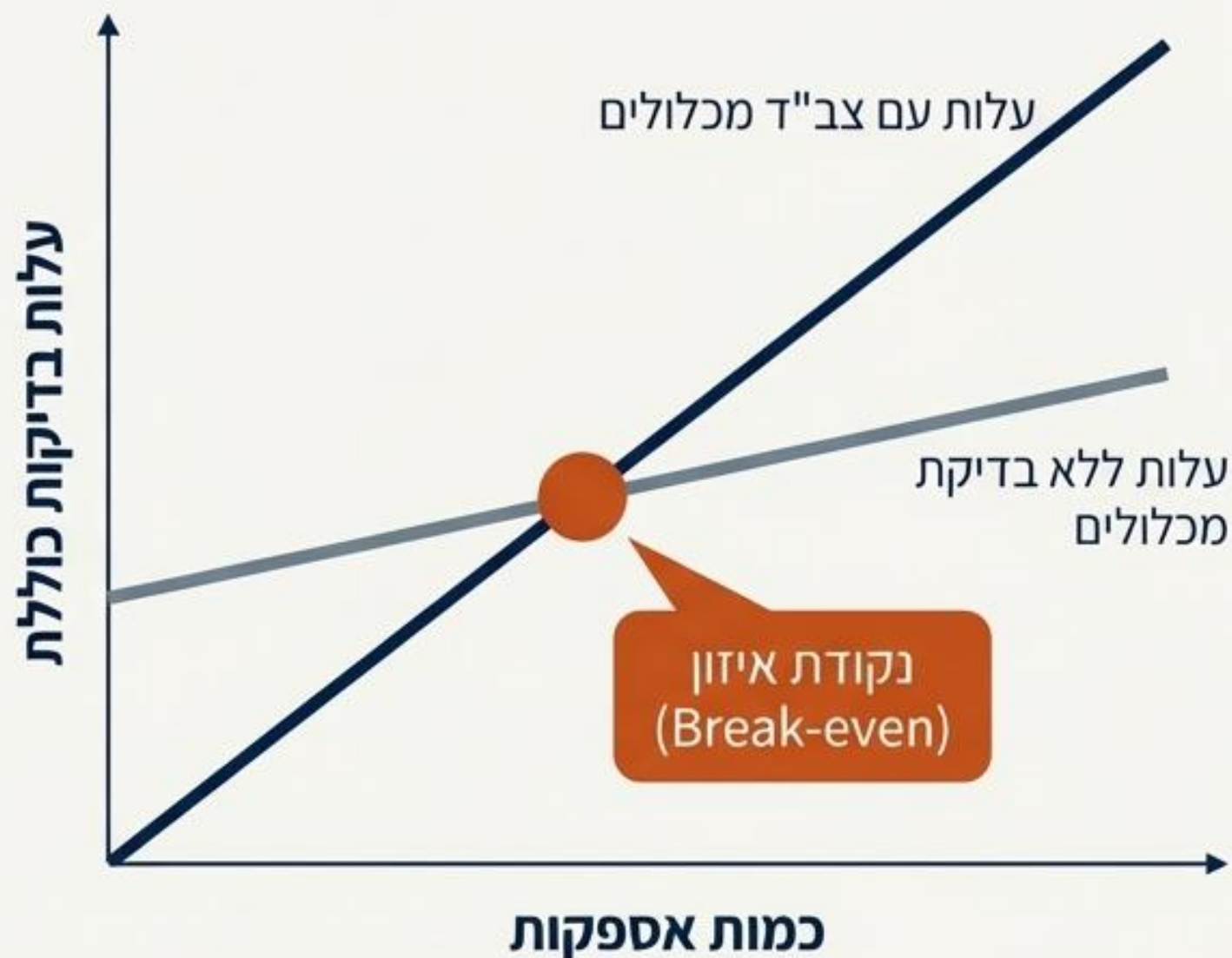
החלטות הנדסיות חייבות להישען על מודלים כלכליים הבוחנים רגישויות לאורך מחזור החיים.

1. פרמטרים במודל הכלכלי:

- כמויות מתוכננות ואורך חיי המוצר
- Yield צפוי ואמינות צב"דים
- זמן תיקון ברמת מערכת

2. תובנה לדוגמה:

בכמויות ייצור קטנות או כשזמן התיקון המערכתי קצר, לעיתים קרובות אופטימלי וזול יותר לוותר לחלוטין על בניית צב"דים לבדיקת תת-מכלולים.



המלצת STE (Recommendation)	שימוש מבצעי (Ops)	תחזוקה (Maint)	ייצור (Prod)	פיתוח (Dev)	
איחוד דרישות. שימוש באותו צ"ב לשלבי הפיתוח, הייצור והתחזוקה.	✓ Environment Sim, BIT activation	✓ Environment Sim, BIT activation	✓ Environment Sim, BIT activation	✓ Environment Sim, BIT activation	צ"ב א' (Tester A)
	✓ Environment Sim, BIT activation	✓ Environment Sim, BIT activation	✓ Environment Sim, BIT activation	✓ Environment Sim, BIT activation	צ"ב ב' (Tester B)

מבט על רחב מונע סילוואים (Silos). תכנון מוקדם מונע פיתוח של שלושה צ"ודי בדיקה כפולים לאותה מערכת, וחותר דרסטית את עלות מחזור החיים (LCC).

למה לסמלץ? (הצעת הערך)



הורדת סיכוני בטיחות

בחינת תרחישים קריטיים שמוקדם או מסוכן מדי לבצע פיזית (לדוגמה: רהיטות הטלת חימוש).



בדיקה מחוץ למעטפת

בחינת קצוות מעטפת ויציבות ללא סכנת 'קריסה' והרס המערכת הפיזית האמיתית.



חיסכון עצום במשאבים

צמצום הצורך בניסויי טיסה יקרים, שימוש יקר במנהרות רוח, או שריפת זמן מנוע.



דימוי מידע שאינו נגיש

הזנת נתונים שמערכת פיזית טרם פגשה (למשל: תמונות תחת לחות קיצונית, טיל מטרה).

הסיכונים הסמויים: מתי סימולציה נכשלת?

סימולציה אינה פתרון קסם. היא דורשת ניהול סיכונים קפדני.

אשליית הקירוב (False Conclusions)

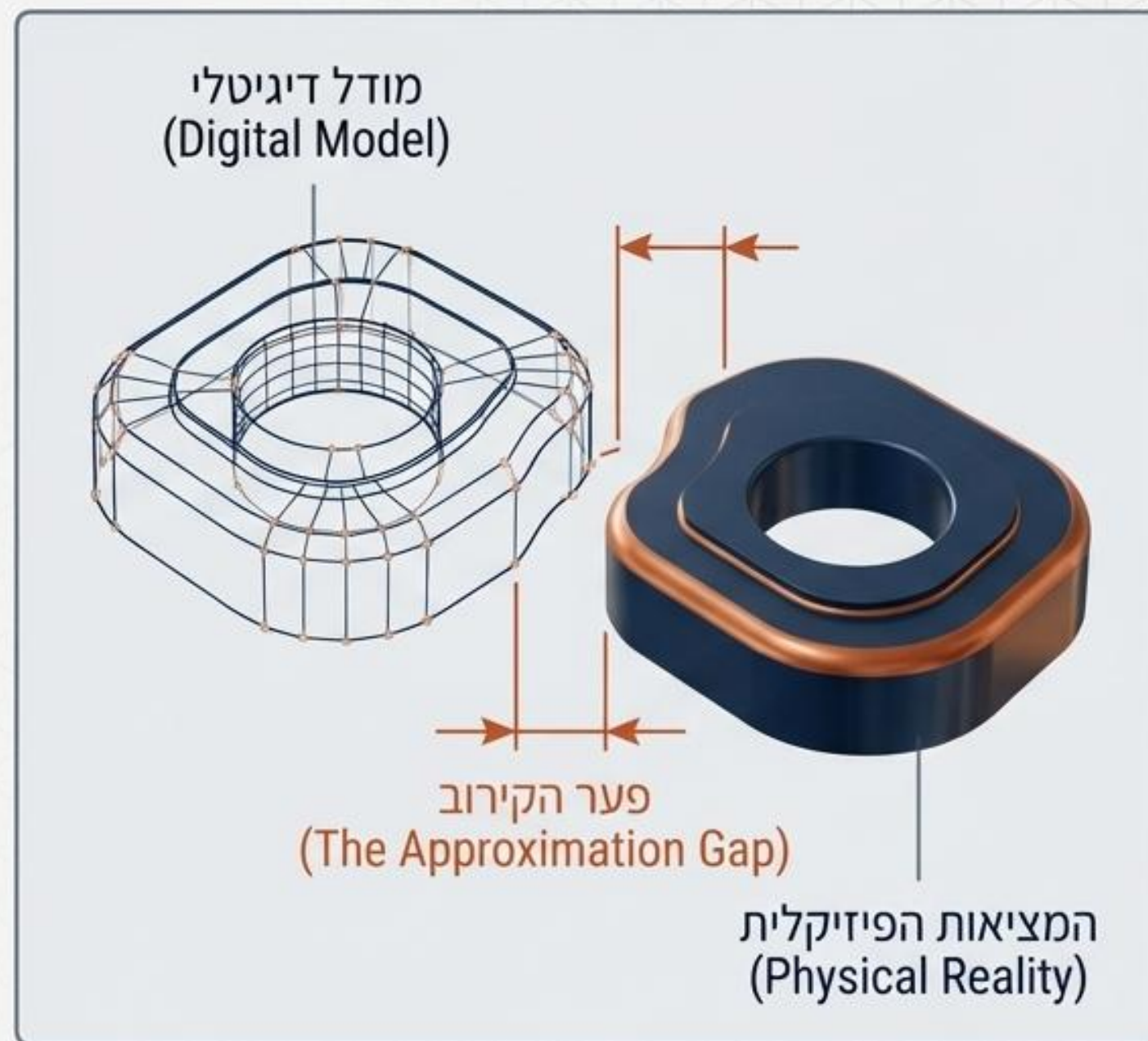
הסקת מסקנות מוטעות הרות אסון עקב מודלים שגויים או הנחות קירוב שאינן מתקיימות במציאות הפיזיקלית.

מורכבות ועלות הפיתוח

בניית סימולציה מדויקת דורשת לעיתים עלויות עתק, זמן פיתוח ארוך (שלא תמיד מסתדר עם גאנט הפרויקט), וצוותים ייעודיים.

לולאת העדכונים האינסופית

סימולציה היא מוצר לכל דבר. כשהמערכת האמיתית מתעדכנת, הסימולציה דורשת עדכונים רצופים ועקיבות דרישות בלתי פוסקת.



מטריצת ההחלטה: מתי נכון לסמלץ?



תוצאות ומדדים עיקריים

בהירות חוזית מול קבלני משנה

דרישות חקר ביצועים ובדיקות ננעלו בחוזים בשלב מוקדם, מה שמונע סכסוכים ותביעות המשך.



גילוי מוקדם ללא עלות

שינויי תכן (כגון בחירת ספקי כוח עם יכולות BIT מובנות) בוצעו לפני ה-PDR, בעלות זניחה וללא עיכובים.



הפחתת עלויות שוטפת

ביטול הצורך במעורבות מהנדסים בתהליכי מסירה של תת-מערכות ספציפיות.



מוכנות קו הייצור

תשתית הבדיקות הייתה זמינה ובשלה כבר למנות הייצור הראשונות, ללא צורך בליווי צמוד של מהנדסי הפיתוח.



סיכום התועלות וערך אסטרטגי

התאמה מושלמת ללקוח

צרכי התפעול וה-ILS מובנים לתוך תכן המערכת מהיום הראשון, ומבטיחים עמידה מלאה בכלל ציפיות הלקוח.

מוכנות מוקדמת

ציודי הבדיקה וה-BIT מבשילים *לפני* מסירת המערכות, ומאפשרים ייצור חלק ועצמאי כבר מהאצווה הראשונה.

הפחתת עלויות וסיכונים

פתרונות אופטימליים טכנית ומסחרית המפחיתים את ה-LCC (עלות מחזור חיים). שינויים מתבצעים בשלבים שבהם עלותם אפסית.

הצלחת פרויקט מקיפה

שביעות רצון לקוח מוחלטת

מוצר הניתן לתחזוקה אמיתית, התואם את תפיסת ההפעלה (Operation Concept) ודרישות ה-ILS.

מוכנות מיום אפס (Day-1 Readiness)

ה-BIT וציודי הבדיקה (Testers) בשלים, נבדקו בשלב הפיתוח, ומוכנים לקו הייצור למסירות חלקות.

מינימום LCC (עלות מחזור חיים)

הגדרת נקודת העבודה (TWP) האופטימלית טכנית ומסחרית מונעת פיתוחים כפולים ובזבוז כספי.

הנדסת בדיקות אינה מיועדת רק למציאת תקלות; זהו כלי ניהול אסטרטגי המבטיח שהמוצר הוא בר-בדיקה, כדאי מסחרית ומוכן לעולם האמיתי מיומו הראשון.

שרטוט של ודאות: סיכום מנהלים

1 מניעת הפתעות ועלויות חריגות

הנדסת בדיקות אסטרטגית מונעת כפילויות בפיתוח צב"דים ומורידה דרמטית את עלויות מחזור החיים (LCC). היא משנה את גרף ההוצאות.

1

2 סימולציה כמכפיל כוח

כלי קריטי להורדת סיכונים בשלבים מוקדמים, אך דורש הצדקה הנדסית-כלכלית מובהקת מובהקת ומודעות חריפה לסיכוני 'פער הקירוב'.

2

3 חובה מיום אפס (Day Zero)

ההצלחה מחייבת קבלת החלטות ואופטימיזציה בין BIT ל-ATE החל מדייון ההתנעה של הפרויקט. מודעת מאוחרת לבדיקות שווה כישלון פיננסי.

3