

מי מפחד מהנדסת מערכות?

ד"ר דרורה גושן - מסקין
יולי 2010

האם את/ה מהנדס/ת מערכות?

אם היו עוצרים ומאשימים אותך
על שהינך מהנדס/ת מערכות,
האם היו יכולים לאסוף מספיק
עובדות שיוכיחו את אשמתך?

האם אתה עושה את הפעילויות הבאות?

- **מגדיר את המשימה/הבעיה** (מזהה את הלקוח, מבין את הצורך, מנסח ומגדיר דרישות ופונקציות מערכתיות)
- **חוקר חלופות** (מוצא ומגדיר פתרונות חלופיים, מבצע הערכה ובחירה של חלופה בהתבסס על ביצועים, עלויות, לוגיקה וסיכונים)
- **בונה מודל מערכתי** (מבהיר דרישות, מגלה סיכונים, מוצא צווארי בקבוק ומונע מאמצי פיתוח מיותרים)
- **מפתח, מתכנן ומשלב מערכת**
- **בודק ביצועי המערכת** (במעבדה, בשדה, בנסיעה, בטיסה...)
- **מעריך את הביצועים הנוכחיים** (בצורה כמותית מבוססת על TPMs)
- **מבצע הערכה מתמדת של הביצועים** (לצורך שיפור ושדרוג המערכת)

(*) Bahill and Gissing IEEE trans on systems, Man and Cybernetics, Part C, 28(4) 516-527, 1998

האם נמצאת אשם...?

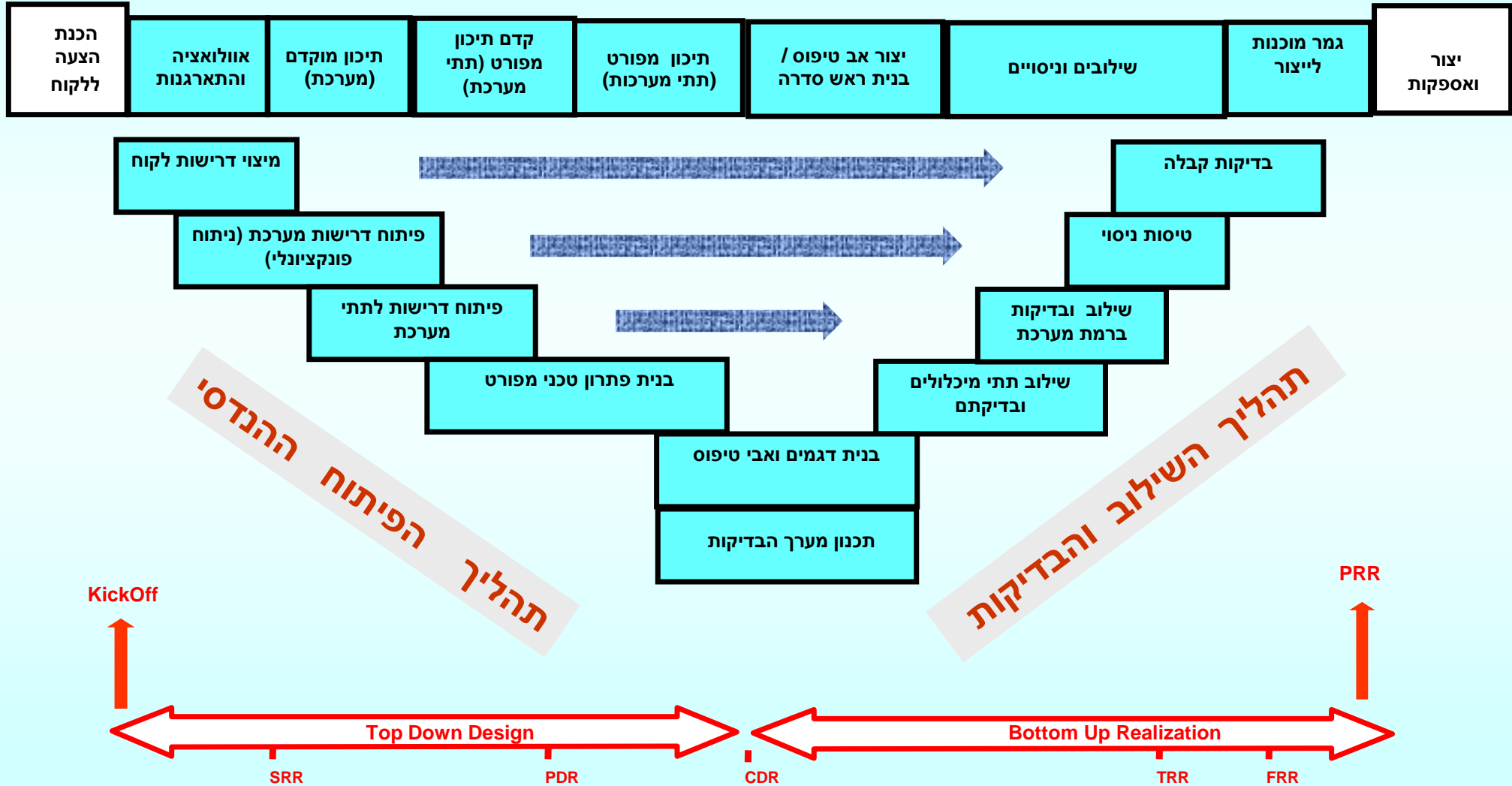
תוכן

- פרק 1 – סקירת תהליך הפיתוח ההנדסי
- פרק 2 – תהליך הפיתוח ההנדסי בדגש על:
 - פיתוח דרישות מערכת
 - פתוח התכנ המערכתי
- פרק 3 - שילובים, בדיקות, אימות ותיקוף
- פרק 4 – דוגמא לתהליך פיתוח

פרק 1

סקירת תהליך הפיתוח ההנדסי

תהליך פיתוח מערכת

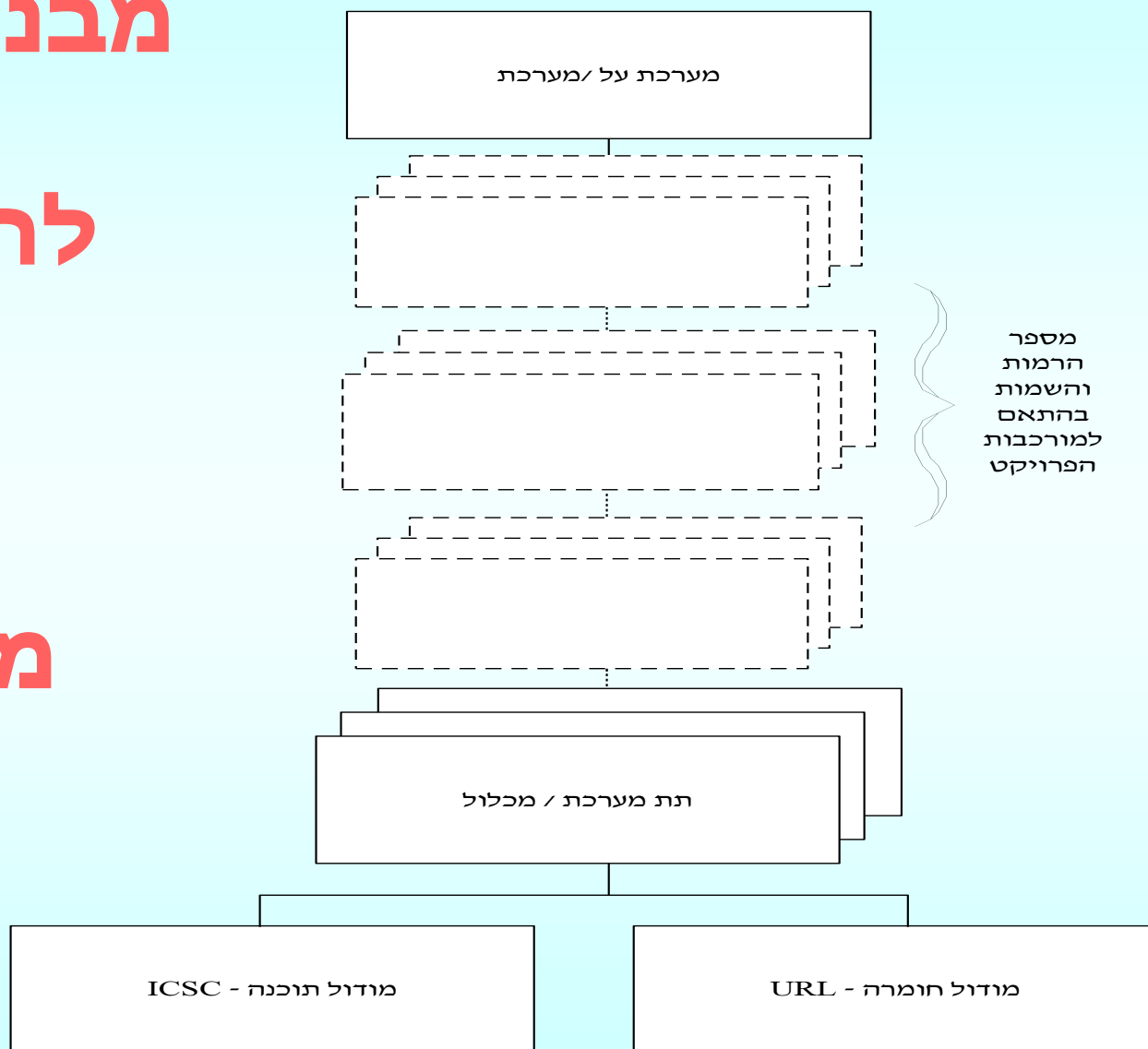


מבנה עקרוני

להיררכיה

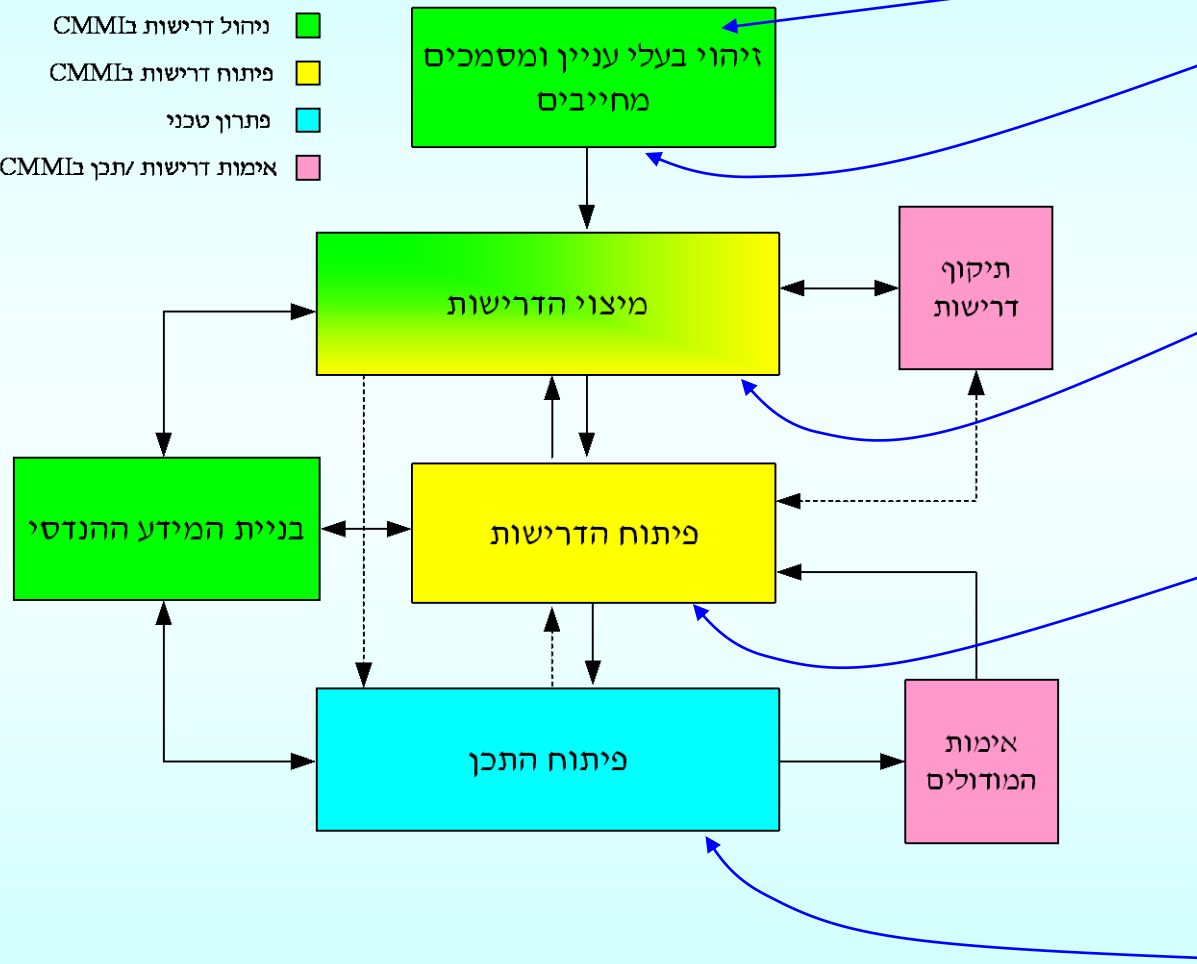
של

מערכת



תהליך הפיתוח ההנדסי ותוצריו

- ניהול דרישות ב-CMMI ■
- פיתוח דרישות ב-CMMI ■
- פתרון טכני ■
- אימות דרישות /תכן ב-CMMI ■



טבלאות בעלי עניין ומסמכים מחייבים

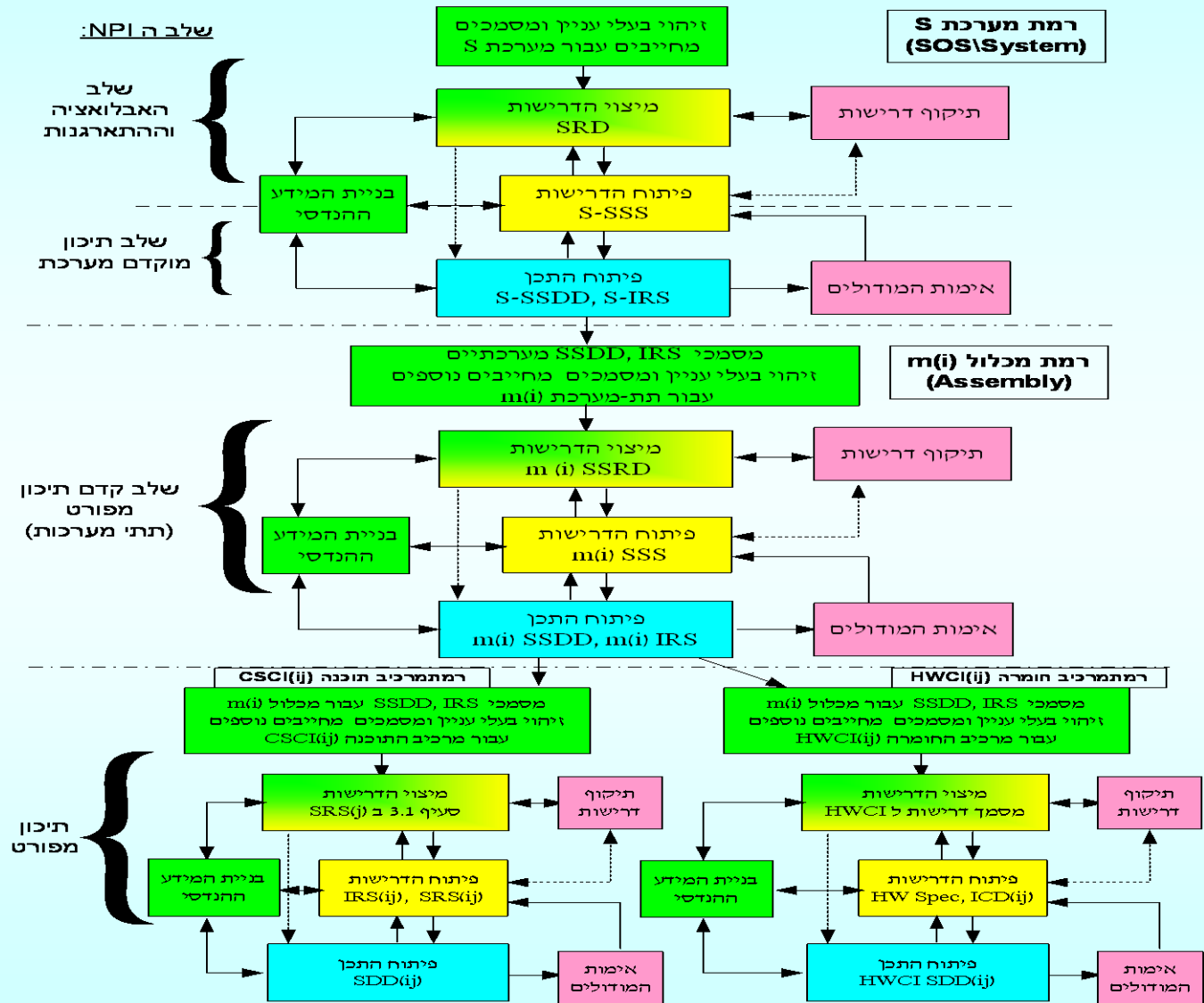
דרישות "מקור" (ORs) (לקוח /בעלי עניין)

דרישות "לקוח" (CRs) - מסמך דרישות בסיס (SRD) - מסמך דרישות תפעול (ORD)

דרישות "מערכת (מומרות)": - מפרט תפעול (OCD) - מפרט דרישות (SSS) - מפרט ממשקים חיצוניים (IRS)

"דרישות" תכן (דרישות "מקור" לרמה הבאה): מסמך דרישות תכן (SSDD) מסמך ממשקים פנימיים (IRS)

תהליך הפתוח ההנדסי ותוצריו הראשיים



פרק 2

תהליך הפיתוח ההנדסי בדגש על:

פיתוח צרישות אפכת

פיתוח התכן האפכתי

המערכות המורכבות של ימינו....

- התקדמות טכנולוגית בתחומי: המחשוב, התקשורת והמזעור.
- מערכות משובצות מחשב הן מערכות מורכבות המחוברות ע"י תקשורת מורכבות המבוססות על מחשבים.
- לאורך מחזור חיי המערכת יתקיימו שדרוגי יכולת רצופים
- לרוב כל מערכת מורכבת מתתי מערכות שכל אחת מהן היא מערכת מורכבת בפני עצמה.
- תתי המערכות יכולות להיות בתפזורת גיאוגרפית כאשר התקשורת ביניהם יכולה להיות ברמות שונות.



מערכות מורכבות ורב-תחומיות



מעבר מ"תכנן-בנה-נסה-בנה" ל"תכנן-דמה-בנה".

בניית מודלים לדימוי מערכת

על כל מערכת מורכבת ניתן "להתבונן" מכיוונים שונים ולקבל "מבט" (*VIEW) אחר מכל כיוון. מתוך ה"מבט" ניתן לבנות מודל של המערכת:

- מודל פיסיקלי-קונספטואלי (תכנוני) המורכב:
 - מארכיטקטורה פיסיקלית (Design Architecture) (שבשלב זה היא עדיין קונספטואלית)
 - ערוצי הקשר (הממשקים) בין הרכיבים (גם הממשקים וגם המרכיבים הינם עדיין קונספטואליים).



- מודל פונקציונאלי, לוגי, המורכב:
 - מארכיטקטורה פונקציונאלית, לוגית,
 - מאופני פעולה (modes)
 - מתהליכים דינמיים

- דוגמאות למודלים נוספים:
 - מודל הרכבה חיצונית של המערכת
 - מודל תרמי/מכני/חוזק....

(* – תצוגה מזווית מסוימת של דמות רב-ממדית

מניתוח פונקציונאלי – למודל פונקציונאלי

פונקציונאלי

מה זה עושה?



רשימה של פונקציות



תצוגה גרפית - עץ של פונקציות
(FAST)

קונבנציונלי

מה זה?



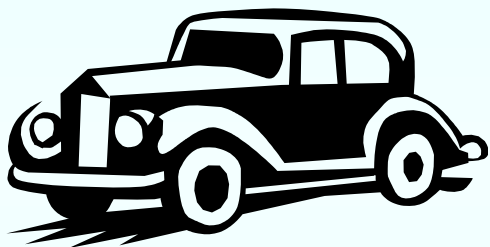
רשימה של חלקים ורכיבים



תצוגה גרפית - עץ מוצר
(Product Tree)

דוגמא לניתוח פונקציונאלי

הצורך/המשימה: שמירת מרחק בין מכוניות נוסעות

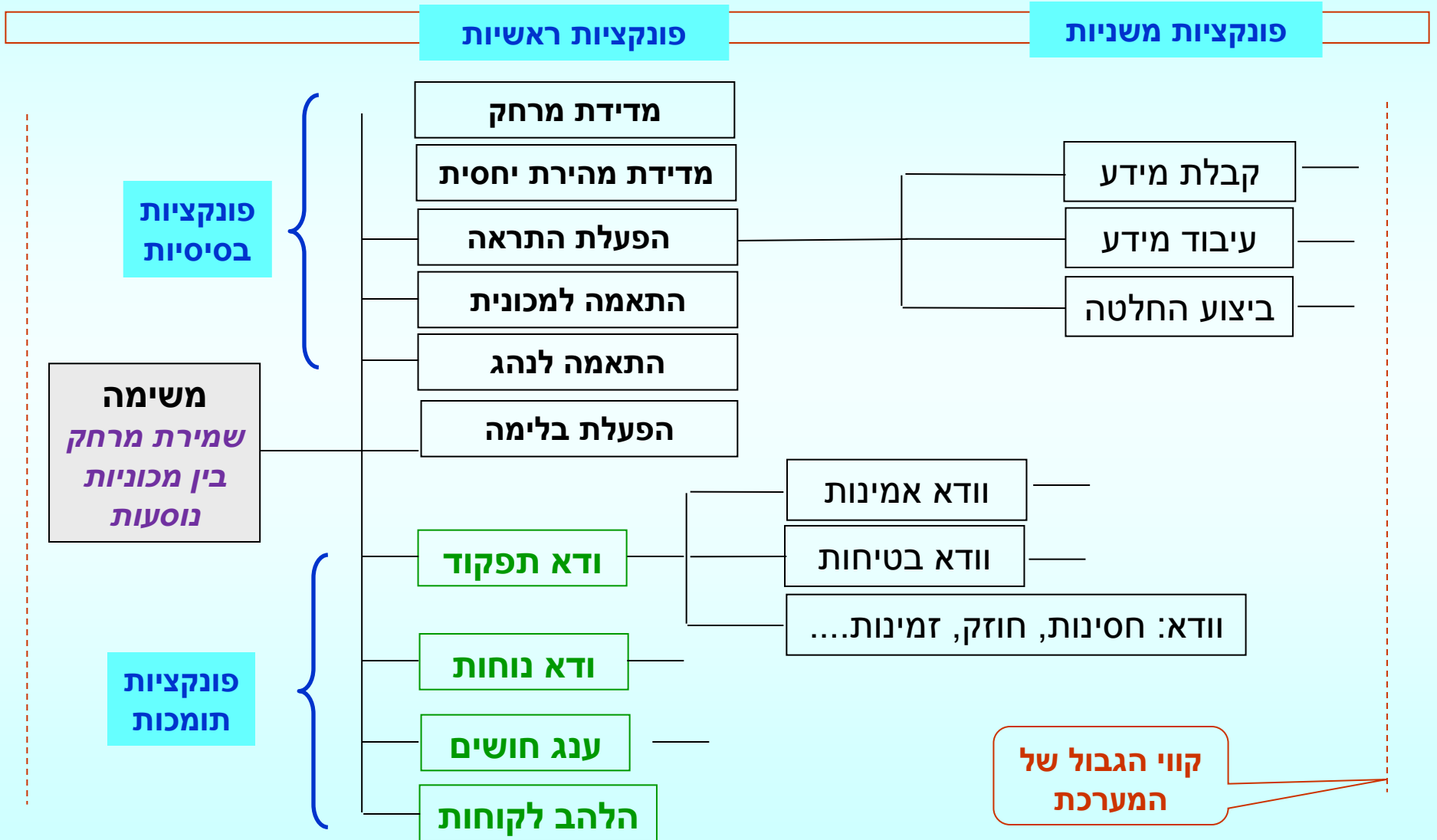


הפונקציות הבסיסיות:

מדידת מהירות יחסית
הפעלת בלימה
התאמה לנהג

מדידת מרחק
הפעלת התראה
התאמה למכונית

דיאגרמת - FAST



מערכת "שמירת מרחק"

הבעיות הבסיסיות ע"פ המודל הפונקציונאלי

כיצד
מפעילים בלימה
?

כיצד
מודדים מהירות
?

כיצד
מודדים מרחק
?

כיצד
מתאימים למכונית
?



כיצד
מתאימים לנהג
?

כיצד מתריעים
?

דוגמא: טבלא מורפולוגית – מערכת לשמירת מרחק

| עקרונות טכנולוגיים לפתרון | | | פונקציה בסיסית |
|---------------------------|---|--|-----------------------------|
| מדיד מכ"מי | מד מהירות אלקטרוני המודד מהירות באמצעות אפקט דופלר. | מד מהירות לייזר המודד מהירות באמצעות פולסי לייזר באור אינפרא-אדום. | מדידת מהירות |
| | | מדיד מכ"מי | מד מרחק לייזר |
| זמזם | אתראה קולית מילולית | | נוריות |
| על לוח המכוונים | על בית מראת הצד | בתוך הרכב בצמוד לשמשה הקדמית | התאמה למכונית |
| | | פקודות קוליות | ידני ע"י לחצנים ופוטנציומטר |
| בלם אלקטרו מגנטי | הפעלת תוף מכני וסנדלי בילום | הפעלת רפידות בלימה בעזרת בוכנות הידראוליות | הפעלת בלימה |

מודל פונקציונאלי מול המימוש (המודל) הפיזיקאלי

| פונקציה | Airplane Physical Component  | Bird Physical Component  |
|--------------------|---|---|
| המראה ונחיתה | Wheels or skis | Legs |
| מדידת מקום ומהירות | Vision or Radar | Eyes |
| ניווט | Brain or Computer | Brain |
| ייצור דחף אופקי | Propeller or jet | Wings |
| ייצור עילוי | Wings | Wings |

הערה: ציפורים משתמשות ברכיב פיזיקאלי אחד (כנף) לשתי פונקציות: הנעה ועילוי.

הגדרת אופני פעולה ומצבי מערכת

- התנהגות מערכות משובצות מחשב "ריאקטיביות" מאופיינות ע"י:
 - מספר גדול של אופני פעולה (operating modes)/מצבי מערכת
 - מאורעות חיצוניים יזומים/אקראיים
- במערכת מוגדרים מאורעות (events) או תנאים (conditions) למעבר ממצב למצב. עבור כל מאורע או תנאי יש להגדיר:
 - מקור (פנימי או חיצוני).
 - ערוץ נושא (ממשק מתאים)
 - פעילות גורמת ופעילות נגרמת
- קיימות שיטות שונות להצגת מצבי מערכת, מאורעות ותנאי מעבר:
 - מכונות מצבים
 - תרשימי state charts
 - תרשימי מעבר (transition charts)

תהליכים דינמיים

- תהליך הינו אוסף מאורגן של פעילויות המבצע מטרה ספציפית.
- הליך ביצוע (thread) של תהליך מתאר את שלבי התזמון של הפעילויות המופעלות בתלות בקיום או אי קיום של מאורעות או תנאים מסוימים.
- תרחיש הינו תהליך מערכתי שניתן לראותו מחוץ למערכת.
- ניתוח התהליכים הדינמיים:
 - הגדרת ההתנהגות החיצונית
 - אפיון וניתוח האינטראקציה הדינמית בין הפונקציות השונות של המערכת
 - בדיקת נכונות ועקביות של התנהגות המערכת
 - יצירת בסיס משותף לאנליזות, סימולציות, תכן, תפעול, בדיקות וכו'

תהליך פיתוח הדרישות – סיכום

המטרה

האמת "צרישות לקוח" לצרישות מערכת"

4. אפיון לא-פונקציונאלי:

- קביעת מחזור חיי המערכת
- קביעת גבולות המערכת ותרשים המערכת בסביבתה
- דרישות תיעוד והדרכה
- מדיניות שימוש במרכיבים קיימים
- מדיניות התחזוקה וה- ILS
- מדיניות ייצור והרכבה
- דרישות אבטחה, אחסון והובלה
- דרישות מחזור/גריסה
- דרישות תנאי סביבה
- דרישות איכות



מפרט דרישות המערכת

1. בניית מודל פונקציונאלי

2. בחירת ארכיטקטורה פיסיקלית/קונספטואלית

3. אפיון פונקציונאלי:

- הגדרת הסביבה התפעולית ותפיסת התפעול;
- תרחישים מערכתיים
- הגדרת מצבים, אופני פעולה ומאורעות
- זיהוי וניתוח תהליכים דינאמיים

תהליך פיתוח התכנן הארכטקטוני

המטרה

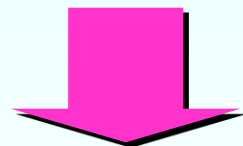
הקצאת "צרישות מקור" לכל מכלול (פיסיקאלי/קונסטרוקטיבי)

מודלים מערכתיים

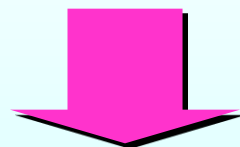
- עזר בתהליך הפתוח ההנדסי (המרת/הקצאת דרישות)
- בסיס הבנה משותף לצוותים הרלבנטיים
- המודל הפיסיקלי-קונספטואלי משמש:
 - בסיס לתכנון החומרה והממשקים הפיסיקליים
 - בסיס לתכנון המיקום (Allocation) של רכיבי התוכנה
- המודל הפונקציונאלי משמש:
 - לניתוח פעילויות ותהליכים המתבצעים במערכת
 - מודל גנרי לביצוע המשימה

פיתוח התכן = הקצאת דרישות

- איחוד בין הארכיטקטורה הפונקציונלית והארכיטקטורה הקונספטואלית-פיסיקלית



- חלוקת התכן לנתחים (chunks) התואמים בדרך כלל את הארכיטקטורה הקונספטואלית-פיסיקלית



- חלוקת נטל הפיתוח תוך נטילת סיכונים מינימאליים

דוגמאות: החלטות תכן מערכתיות

- מימוש בתוכנה או בחומרה
 - מהירות תגובה נדרשת לעומת מהירות חישוב זמינה
 - גמישות לשינויים עתידיים בתוכנה מול שדרוגי חומרה
- חלוקת מטלות בין מפעיל למערכת
 - מפעיל מתכנן, המערכת מבצעת תוך בקרה תמידית
 - מערכת אוטונומית לחלוטין

החלטות תכן מערכתיות (System Wide Design Decisions)

- החלטות מוקדמות מדי ← שינויים מהותיים
- החלטות מאוחרות מדי ← פרויקט לא מנוהל

- החלטות התכן המערכתיות צריכות להיות מבוססות על
 - סימולציות
 - Trade studies
- עקרון מנחה – תלות מינימאלית וברת שליטה בין ה"נתחים"
השונים
- סקרי עמיתים לקבלת מידע מפרויקטים קודמים

תהליך הקצאת הדרישות

- קבלת החלטות תכן מערכתיות (System Wide Design Decisions)
- הקצאת המשימות והמאפיינים הטכניים לכל מכלול
- הקצאת הפונקציות למכלולים תוך הגדרת הסביבה התפעולית והממשקים החיצוניים
- הגדרת תרחישים לכל מכלול תוך שימוש בפונקציות המוקצות עבורו
- הקצאת דרישות למכלולים (= תתי-מערכות = קומפוננטות):
 - דרישות פונקציונאליות/לא פונקציונאליות
 - דרישות נגזרות

אימות תהליך התכן המערכתי:

אימות (הצדקת) הקצאת הדרישות לכל אחד מהמכלולים (דוחות טכניים, אנליזות, סימולציות...)
מיפוי הפונקציות המוקצות למכלולים, לפונקציות המערכתיות
בדיקת עקביות תהליכים מערכתיים.

פתוח התכנן – עד להעברת מפרטי מרכיבים

מהנדסי מערכת

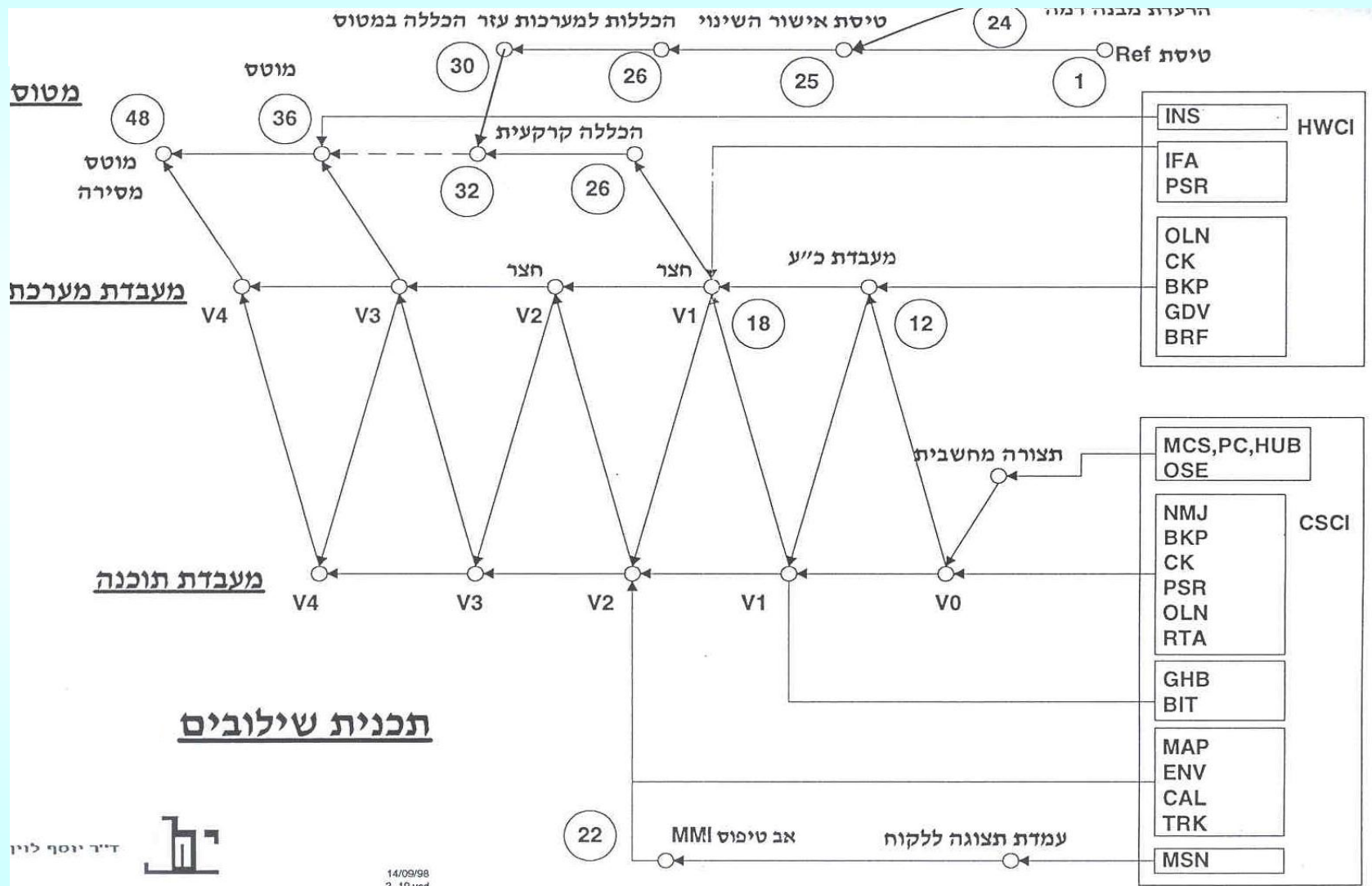
מהנדסי
חומרה/תוכנה



פרק 3

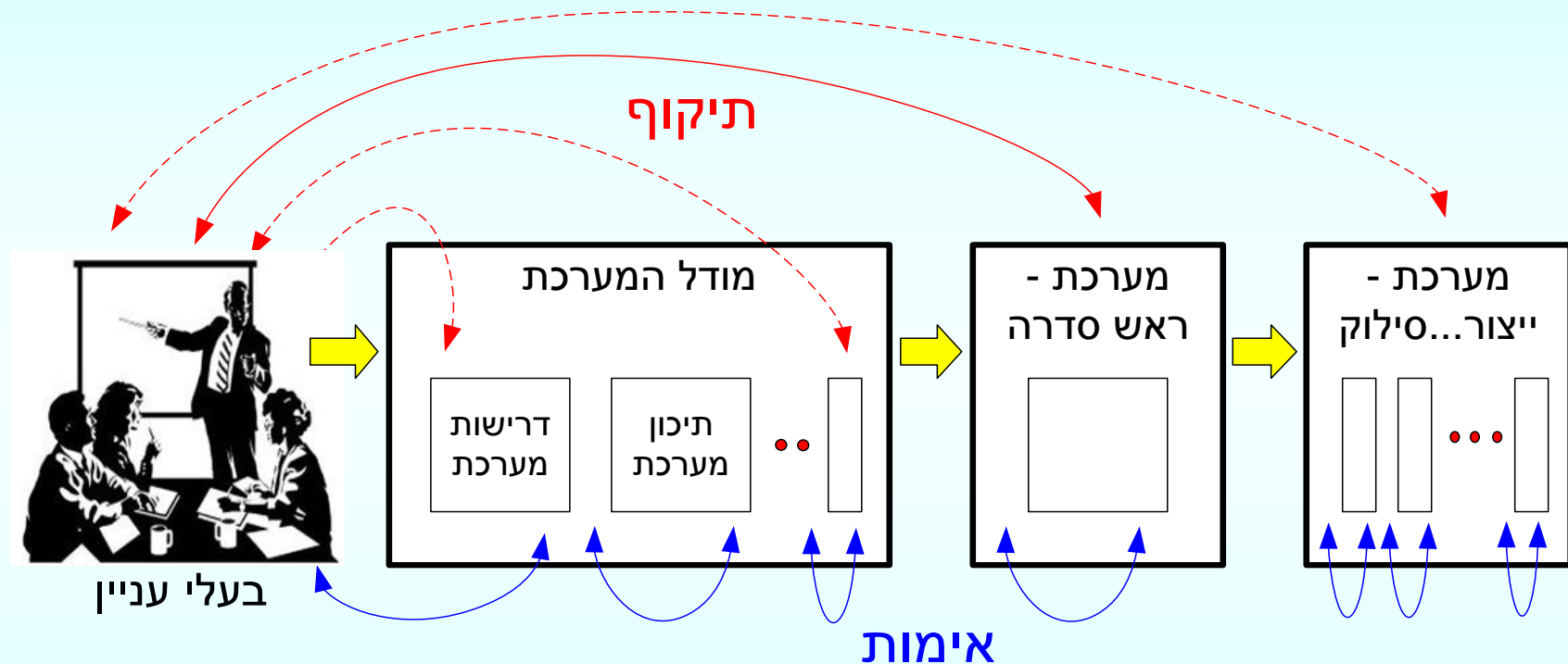
שילובים, בדיקות, אימות ותיקוף

תוכנית אינטגרציה (שילובים)



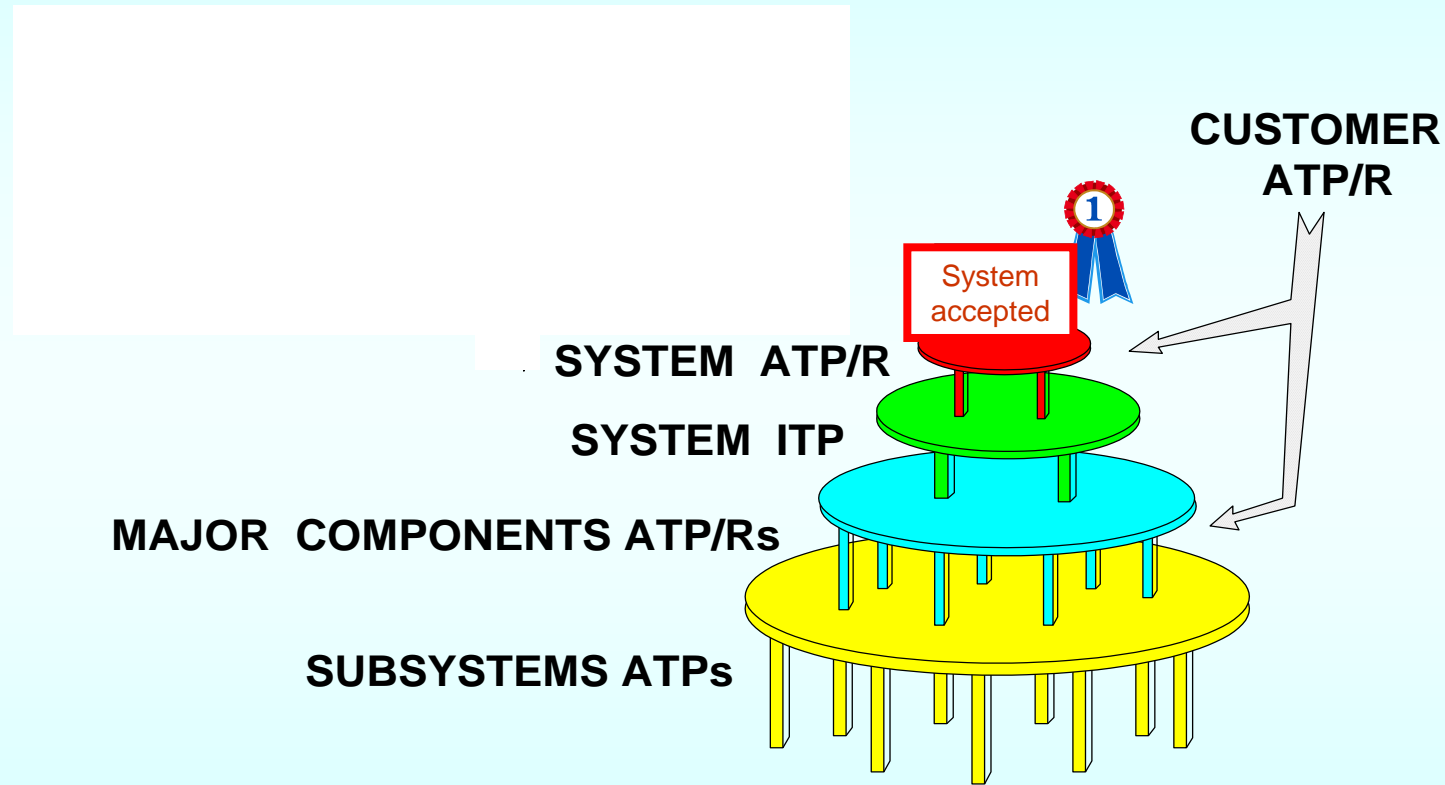
14/09/98
2 19.vsd

Validation, Verification and System Test



Testing is a sub-group for validation and verification

System, Subsystem, Component Tests



Testing concept (*)

(*) נלקח ממצגת של ד"ר אבנר אנגל

פרק 4

דוגמא

דוגמא: מערכת הגנה אווירית

- תקופה – לפני ובמהלך מלחמת העולם השנייה (1937-1945).
- בעלי העניין – בריטניה, גרמניה.
- המשימה – פיתוח מערכת להגנת המדינה מפני הפצה ממטוסים.
- הטכנולוגיות (ידועות לשני בעלי העניין באותה מידה) – נ"מ, מטוסי קרב, מכ"מ, מסכי תצוגה עגולים (אוסצילוסקופים).
- המאפיינים הטכניים הוגדרו ע"י בעלי העניין בצורה דומה.
- הפתרונות המבצעיים והתפעול – שונים.

התפתחות היכולת האווירית

לאחר מלחמת העולם הראשונה פותחו 2 סוגים של מטוסי לחימה:

❖ **מפציצים** - להובלת מטען גדול של פצצות לטווח ארוך (ולכן היו כבדים ואיטיים).

❖ **מטוסי קרב** – להשמדת מפציצי אויב, להגנה על מפציצים "ידידותיים" וללחימה כנגד מטוסי הקרב המגינים על מפציצי האויב. (מהירות וכושר תמרון הושגו ע"ח משך טיסה מרבי).

❖ גם לגרמנים וגם לבריטים:

□ הייתה יכולת אווירית דומה

□ עקרונות הקרב האווירי היו דומים.

התפתחות היכולת המכ"מית

- ❖ גילוי עצמים מתכתיים באמצעות גלי רדיו הושג כבר בשנת 1904.
- ❖ ב-1935 התקינו הצרפתים מערכת מכ"ם על אוניית הפאר נורמנדי. המערכת כללה ארבע אנטנות קבועות וסייעה לאוניה לתמרן בנמלי תעלת למנש בתנאי חשכה וערפל.
- ❖ גם לגרמנים וגם לבריטים:
□ הייתה יכולת מכמ"ית.

מודעות ליכולת ההפצה האווירית

- במשך 870 שנה מנע הצי הבריטי פלישה עוינת לאי בדרך הים.
- ב-26.4.1937 תקפה טייסת גרמנית (23 מטוסים) את העיירה הבסקית גרניקה:
 - הטייסת תקפה חמש פעמים והרסה את העיר.
 - לפי פרסומים אז, נהרגו בהפצה 1654 (כשליש) מאזרחי העיר ועוד כ-900 נפצעו (היום ההערכות פחותות).
- המסקנה בבריטניה: חיל האוויר הגרמני מאמץ הפצות טרור על ערים כשיטת לוחמה מקובלת ויעילה.

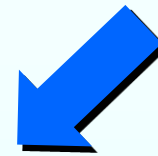
גילוי מוקדם

הגרמנים והבריטים ידעו:

- ❑ הסיכוי של מטוסי קרב לגלות ולתקוף להקות מפציצים בעוצמה מספקת היה קטן.
- ❑ גילוי וזיהוי מוקדם של מפציצים בתנועה לתקיפה ישפר את הסיכוי של מטוסי הקרב לפגוע בהם. השיפור יגדל ככל שההתראה תהיה מוקדמת יותר.

פתרון

צופים אנושיים המוצבים בעיקר ליד גבולות/חופי המדינה.



איש חיל צופי האוויר בלונדון

- התצפית (ראיה/שמיעה) נעשתה 24/7
- הגילוי היה מוגבל בטווח ותנאי ראיה (לילה, עננות וערפל).
- לצופים לא הייתה יכולת עקיבה מעשית אחרי המפציצים ואחר מטוסי הקרב.

זיהוי בעלי העניין

• זיהוי בעלי עניין בבריטניה:

- הצי והצבא הבריטי מודיעים שלא יוכלו למנוע הפצצות של ערי בריטניה ולהפריע להן ביעילות ע"י תותחי נ"מ.
- במאי 1937 מוקמת בבריטניה ועדת מומחים ונציגי זרועות כדי לאתר פתרונות להגנת ערים מהפצצות.
- בשנים 1936-40 עמד דאודינג בראש פיקוד מטוסי הקרב מיום הקמתו ועד לאחר הקרב על בריטניה. הוא משתתף בוועדה, מגדיר את צרכי החיל ומבין את תרומת המכ"ם.

• זיהוי בעלי עניין בגרמניה (בשלב א):

- יחידות צופי האוויר הגרמני, תחת פיקוד הנ"מ בחיל התותחנים בצבא היבשה מובילים את הנושא:
- החיל הפעיל כ-8000 עמדות תצפית קרקעיות לאורך גבולות וחופי גרמניה. בכל עמדה 2-3 צופים במשמרת. 24/7.
- הגנה בפני הפצצות מתבססת תחילה (עד 1943) בעיקר על מערך הנ"מ.

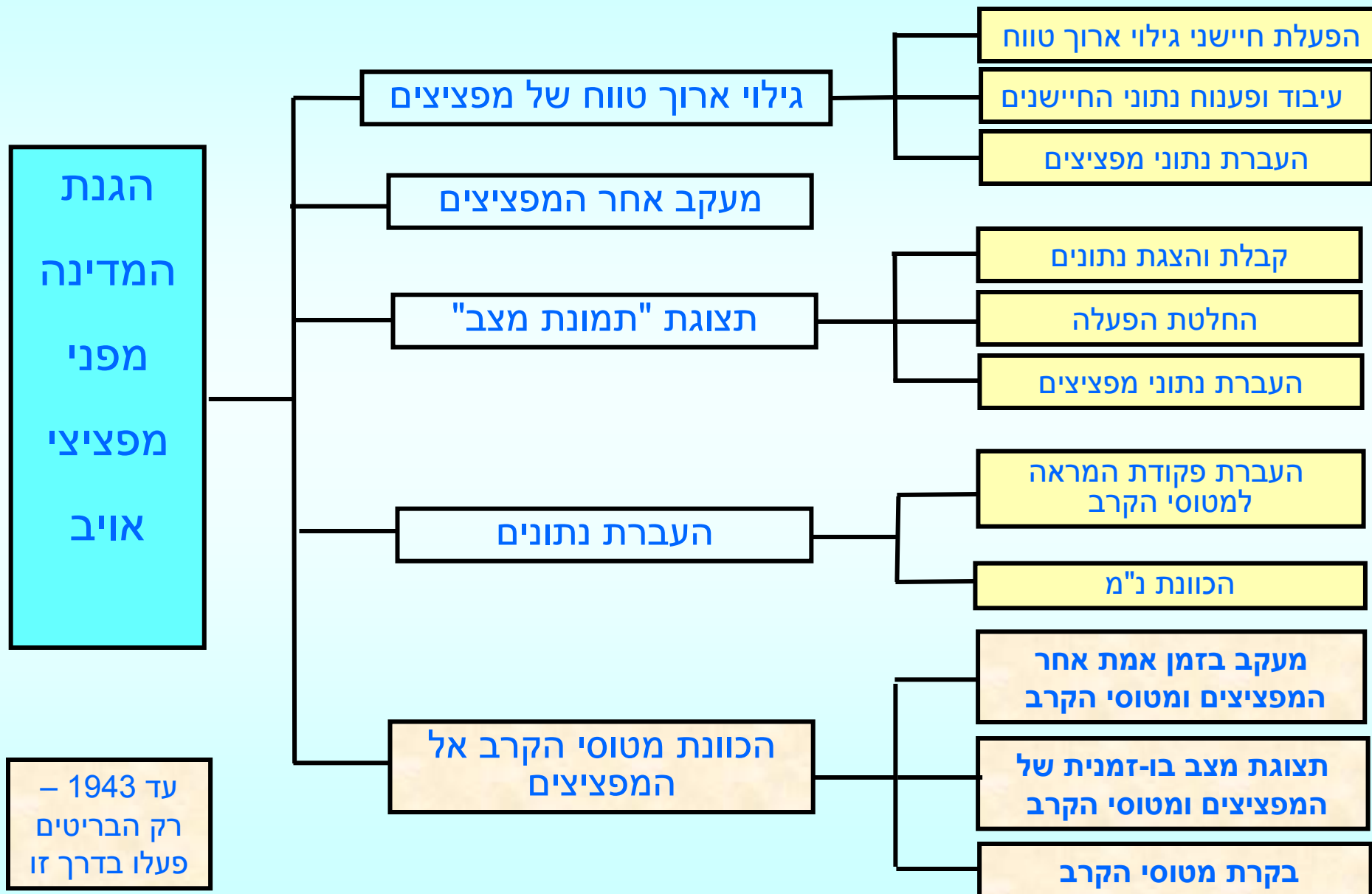
הגדרת הצורך

- ח"א הבריטי טען שמטוסי קרב יעילים נגד מפציצים אם:
 - יקבלו אתראה מספיק מוקדמת כך שיוכלו להמריא בזמן ולחסוך דלק.
 - שלאחר המראה יכוונו את מטוסי הקרב ביעילות אל להקת המפציצים התוקפים עד לטווח ראייה.
 - ההתראה המוקדמת תועבר במקביל גם ליחידות הנ"מ.

• חיל הצופים הגרמני טען:

- יש לייעל את מערך הגילוי המוקדם: למערך הצופים נדרש כ"א גדול מדי.
- יכולת הגילוי של צופים אנושיים מוגבלת בטווח ובתנאי ראות גרועים, בפרט בחשכה, עננות וערפל.
- ההתראה ממערך הגילוי המוקדם תועבר לנ"מ ולחיל האוויר הגרמני.

פיתוח דרישות – ניתוח פונקציונאלי



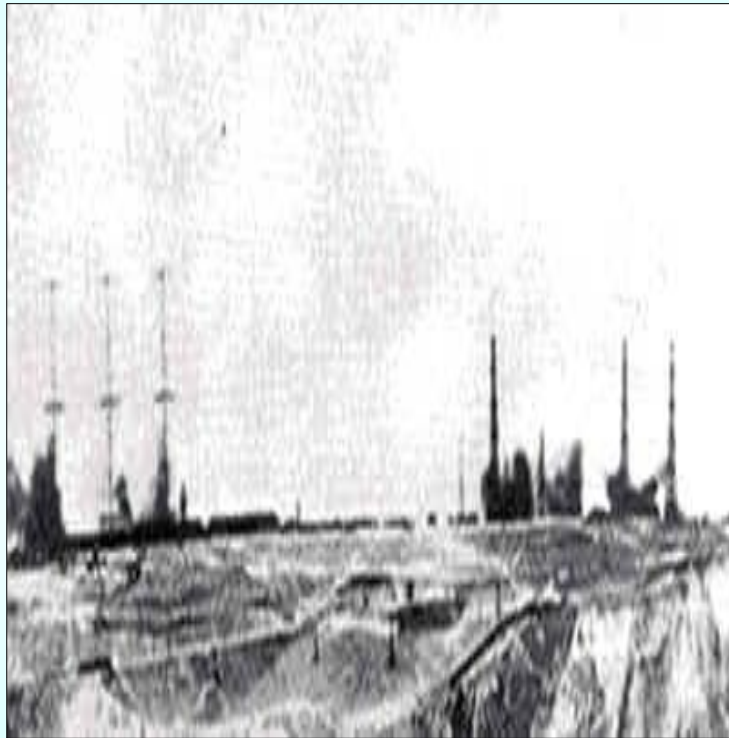
טבלא מורפולוגית

| עקרונות טכנולוגיים לפתרון | | | פונקציה בסיסית |
|---|---|--|--------------------------|
| מכ"מי גילוי מדויק גדולים מוגבלי טווח (אנטנות באורך 100 מ') | מכ"מי גילוי קבועים גבוהים לטווח ארוך בדיוק זוויתי נמוך (על מגדלים בגובה 110 מ') | צופים | גילוי מפציצים |
| מכ"ם מסתובב | מכ"ם גילוי קבוע | צופים | מעקב אחר מפציצים |
| | קשר רדיו | קשר טלפוני | העברת נתונים |
| תמונת מצב הכוללת גובה וטווח של המפציצים על מסך זרחני (אוסצילוסקופ). | תמונת מכ"ם על מסך זרחני עגול המציגה מצב <u>יחסי</u> מדויק ועדכני של המפציצים ומטוסי הקרב. | שולחן זכוכית עם דגמים מוזזים ידנית: הצגת מצב יחסי מדויק <u>ולא עדכני</u> | תצוגת "תמונת מצב" |
| | קבלת נתוני מיקום יחסי רציף של המפציצים (פקודות יחסיות רצופות) | קבלת נתוני מיקום מפציצים בקואורדינאטות אבסולוטיות ואח"כ ניהול עצמי | הכוונת מטוסי הקרב |

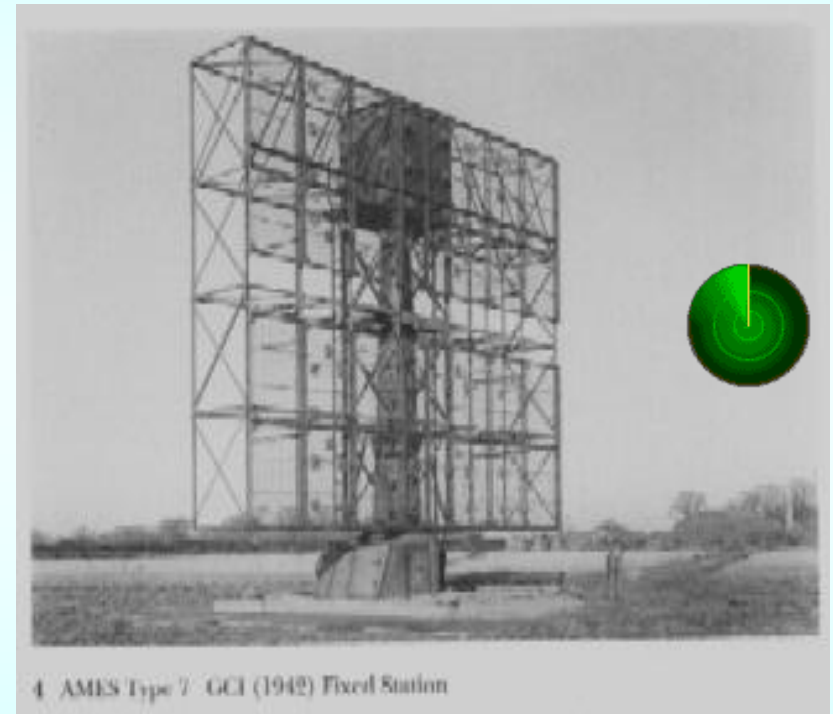
פתרון טכנולוגי - בבריטניה

- הועדה ממליצה להקים מערכת שליטה ובקרה אווירית הכוללת שתי מערכות מכ"ם:
 - מערכת גילוי מוקדם (Early Warning) עם אנטנות קבועות ונפרדות לשידור וקליטה שהוצבו על מגדלים גבוהים לאורך החופים (לטווח של 200 ק"מ = 25 ~ דקות אתראה).
 - מערכת עקיבה עם אנטנות סורקות (מסתובבות) ותצוגה על מסכי זרחה. המערכת עוקבת בו-בזמן בכל כוון אחר מטוסים עמיתים ומטוסי אויב ומציגה את מצב שניהם ביחד. (לטווח של כ-50 ק"מ)
- מוגדרת "מערכת דאודינג": מערכת השליטה והבקרה האווירית שבה ניתנות הוראות בקרה רציפות ויחסיות למטוסי הקרב בזמן אמת.

Operational Solutions - Britain



A chain of radar stations covered south-east England (12m wave length)



Type 7 GCI radar - British tracking radar system Search area: 360° (1.5m wave length)

Technical Parameters (British)

Long Range Detection

- **Tower altitude:** 110m
- **Frequency:** 20-30 MHz
- **Search area:** 360°
- **Detection range:** ≥ 200 km
- **Altitude accuracy:** within ± 150 m between angles of elevation of 2.5° and 20°.
- **Distance accuracy:** 1000m
- **Bearing accuracy:** within $\pm 1.5^\circ$



מערכת דאודינג:

מערכת שליטה בקרב האווירי

- מערכת דאודינג ריכזה נתוני גילוי מוקדם במרכז שליטה ארצי שהפעיל (הזניק) קבוצת (צי) אווירייה לפי הצורך.
- בקרת טיסה והכוונת מטוסי הקרב נעשו ממרכזי שליטה זירתיים עפ"י נתוני מערכת המכ"ם ה"נמוכה" בה שודרו ונקלטו אותות מכ"ם באנטנות מסתובבות.
- חסרונות המערכת:
 - נדרשו אנשי תחזוקה רבים ברמה גבוהה.
 - מחסור בתדרים גרם שלכל גזרה היה תדר אחד בלבד.
 - טווח הכיסוי של המערכת הנמוכה היה קצר יחסית.

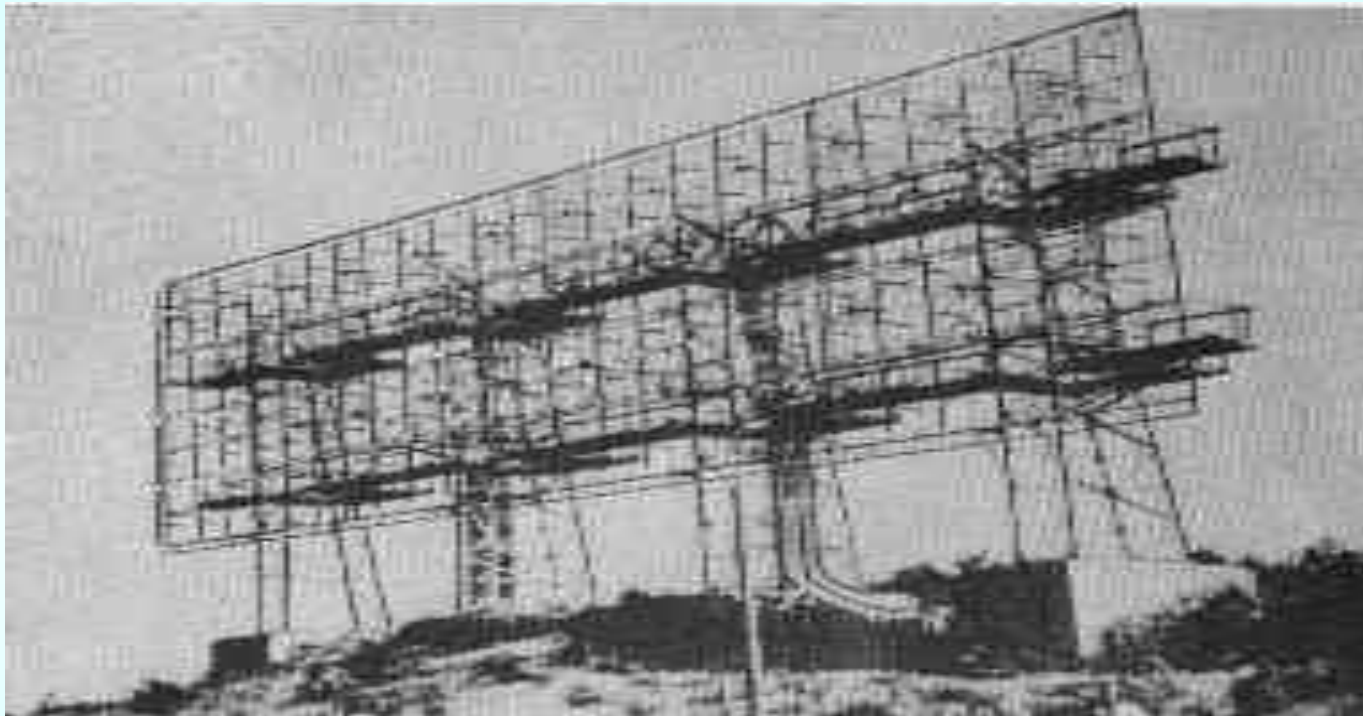
פתרון טכנולוגי – בגרמניה

שלב התחלתי (עד 1943)

• חיל צופי האוויר הגרמני ממליץ:

- להחליף עמדות תצפית באנטנות מכ"ם קבועות שיצפו אל מחוץ לגבולות גרמניה ויגלו מפציצים עוינים מתקרבים בכל מז"א ובטווח רחוק יותר מהצופים (כ- 100 ק"מ). כל אנטנה תחליף כ- 60 עמדות תצפית מאוישות.
- מיקום, כמות וכיוון המפציצים נמסר בקואורדינאטות אבסולוטיות מדויקות (אנטנות גדולות) למטוסי הקרב ולמערכ הנ"מ.
- הערה: בפתרון זה אין יכולת עקיבה אחר להקות המפציצים מרגע שחלפו על פני מערך המכ"מ.

Operational Solutions - Germany



Mammut- German radar systems of the Atlantic Wall
Search area: 100°

Technical Parameters (German)

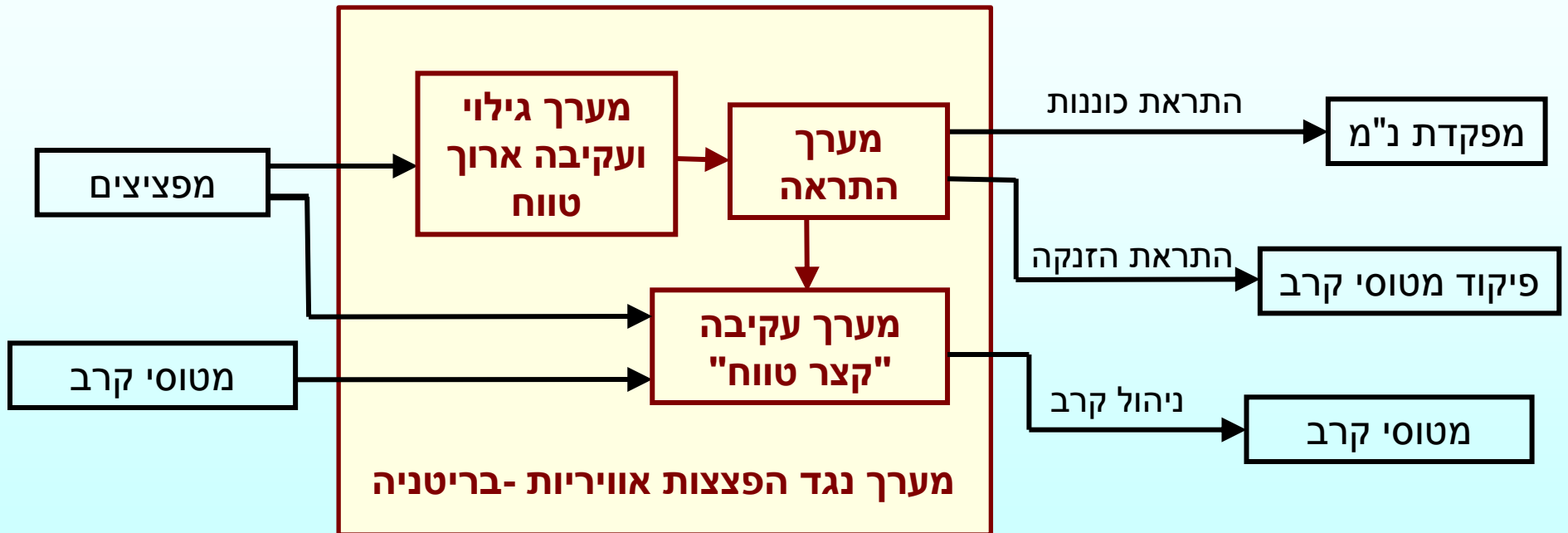
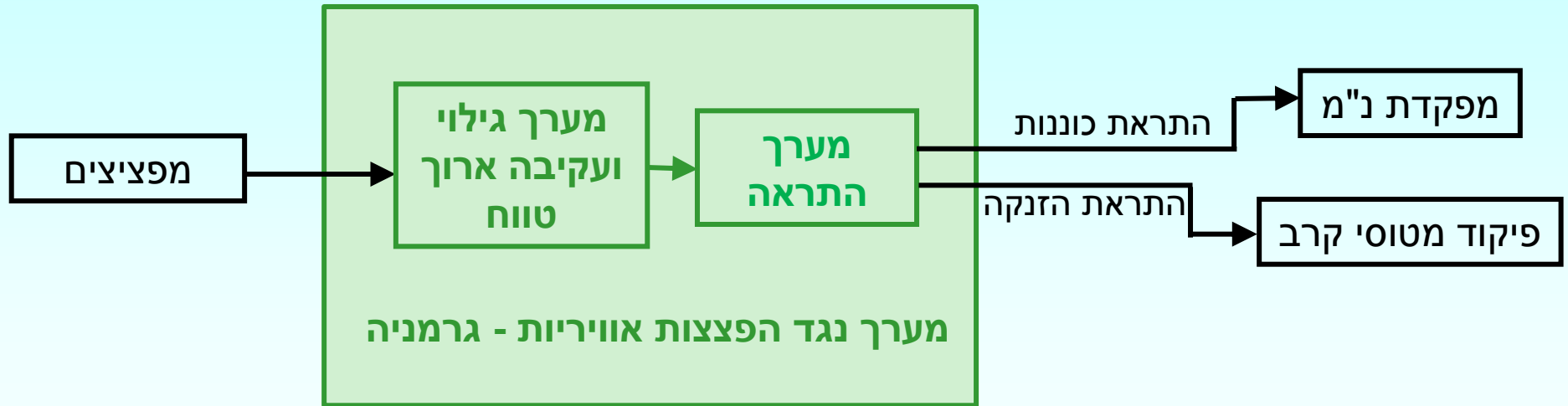
Long Range detection

- **Radar altitude:** ~20m
- **Antenna:** 100mX20m
- **Search area:** 100°
- **Detection range:** ≤ 150 km
- **altitude measurement:** Low accuracy
- **Distance measuring accuracy:** ± 300 m
- **Bearing accuracy:** $\pm 0,5^\circ$

מערך ההגנה נגד הפצצות – WWII (במהלך הקרב על בריטניה)



השוואה בין מודלים קונספטואליים



הצדדים הלוחמים ב"קרב על בריטניה" (7-10.1940)

ח"א הבריטי

לופטוואפה

כוח התחלתי:

700
לא השתתפו

1089
1576

מטוסי קרב
מפציצים

אבודות:

1547
966

1887
2698

מטוסים
צוות אוויר (הרוגים ופצועים)

**מערכת דאודינג הביאה ביותר מ- 80% מהמקרים את מטוסי הקרב
למפגש עם המפציצים התוקפים ומטוסי הקרב שליוו אותם**

הערה: שני הצדדים ייצרו מטוסי קרב ומפציצים בקצב דומה

ההבדלים בין המערכות

| החלופה הבריטית | החלופה הגרמנית (שלב א') | |
|--|---|---------------|
| ח"א (מטוסי קרב) | נ"מ | סביבת הפעלה |
| מפקדות מטוסי קרב | מפקדות נ"מ | גורמי תפעול |
| הפעלת מטוסי קרב נגד מטוסי ההפצה | הפעלת נ"מ נגד מטוסי ההפצה | קונספט התפעול |
| <ul style="list-style-type: none"> • גילוי מטוס מתקרב והתרעה • הזנקת מטוסי קרב והעברת מיקום מטוסי האויב • עקיבה אחר המפציצים ומטוסי הקרב כדי להפגישם. | <ul style="list-style-type: none"> • גילוי מטוס מתקרב והתרעה • העברת מיקום וכיוון תנועה לנ"מ • הפעלת ירי נ"מ | תרחיש עיקרי |
| <ul style="list-style-type: none"> • אי גילוי מטוס הפצה מתקרב • אי פגיעה במטוס ההפצה | <ul style="list-style-type: none"> • אי גילוי מטוס הפצה מתקרב • אי פגיעה במטוס ההפצה | אופני כשל |
| נפרסו כ - 50 מערכות מסוג זה לאורך הגבולות | נפרסו כ - 100 מערכות מסוג זה לאורך הגבולות | עלויות |

פתרון טכנולוגי – בגרמניה

שלב שני (אחרי 1943)

- לאור הפצצות בעלות הברית, ביקש ח"א הגרמני ב- 1943 סיוע בהכוונת מטוסי הקרב אל המפציצים התוקפים.
- הפתרון שנבחר (התבסס על המערכת הקיימת):
 - לצורך עקיבה, מוסיפים בגב של כל אנטנת גילוי עוד אנטנה קבועה נוספת הצופה אל תוך גרמניה. היא עוקבת (בזוית ראייה קבועה ומוגבלת) אחרי מפציצים שחלפו אל מטרתם ואחרי מטוסי קרב שהוזנקו לקראתם.
 - התצוגה היא על שולחנות זכוכית עם עדכון ידני (איטית מאד ולא עדכנית).

ועכשיו -

מי עדיין מפחד מהנדסת

מערכות?