

סוגי בדיקות ניסויים ואיכות בפיתוח מוצר הנדסי

אשמח שתסביר לי את המושגים הבאים בעולם הניסויים למוצר חדש בפיתוח וייצור.
QTP, POD, ESS, ATP, FAI



שלום אביתר, אשמח לעשות סדר במושגים הללו. מדובר במונחי יסוד בניהול איכות, פיתוח הנדסי וייצור (בעיקר בתעשיות הביטחוניות והתעופתיות), המגדירים את מחזור החיים של המוצר מרמת התכנון ועד למסירה ללקוח.

להלן הסבר מפורט על כל אחד מהם:

1. QTP – Qualification Test Procedure (נוהל בדיקות הסמכה)

זהו המסמך המגדיר את סדרת הבדיקות שנועדו להוכיח שהתכנון (Design) של המוצר עומד בכל דרישות המפרט והסביבה.

- מתי זה קורה?** בשלבי סוף הפיתוח, על אבות-טיפוס או על היחידות הראשונות מקו הייצור (Pre-production).
- המטרה:** לוודא שהמוצר "שורד" ומתפקד בתנאי קיצון (טמפרטורה, רעידות, הלמים, EMI/RFI וכו'). מדובר בבדיקה חד-פעמית לדגם (אלא אם בוצע שינוי תכנוני משמעותי).

2. ATP – Acceptance Test Procedure (נוהל בדיקות קבלה)

בניגוד ל-QTP שבודק את התכנון, ה-ATP בודק את איכות הייצור של כל יחידה ויחידה שיוצאת מהקו.

- מתי זה קורה?** בסיום תהליך הייצור של כל יחידה מסחרית.
- המטרה:** לוודא שהיחידה הספציפית הזו תקינה ועומדת בביצועים המוגדרים לפני שהיא נשלחת ללקוח. אלו בדיקות קצרות וממוקדות יותר מאשר בדיקות ההסמכה.

3. ESS – Environmental Stress Screening (סינון מאמצי סביבה)

זהו תהליך שנועד לחשוף פגמים חבויים בתהליך הייצור (כגון הלחמות קרות, רכיבים פגומים או הרכבה לקויה) באמצעות הפעלת מאמצים סביבתיים מבוקרים.

- איך זה עובד?** מעבירים את היחידות "טיפול" של מחזורי טמפרטורה מהירים (Thermal Cycling) או הרעדות אקראיות.
- המטרה:** לגרום לכשל מוקדם של יחידות פגומות במפעל במקום אצל הלקוח. זהו כלי קריטי להבטחת אמינות ומניעת "תמותת תינוקות" (Infant Mortality) של מוצרים אלקטרוניים ומכניים מורכבים.

4. FAI – First Article Inspection (ביקורת פריט ראשון)

זהו תהליך אימות שבו בודקים באופן מחמיר ומקיף את היחידה הראשונה שיוצרה בקו ייצור חדש או לאחר שינוי משמעותי בתהליך.

- מה בודקים?** מוודאים שכל מידה בשרטוט, כל סוג חומר וכל תהליך ייצור (כמו ציפוי או ריתוך) בוצעו בדיוק לפי התיעוד ההנדסי.

- **המטרה:** לאשר שקו הייצור, הכלים והספקים מסוגלים לייצר מוצר שתואם להגדרה ההנדסית. בתעשיות הביטחוניות נהוג לעבוד לפי תקן AS9102 לביצוע FAI.

5. **POD – Probability of Detection (הסתברות גילוי)**

מושג סטטיסטי המשמש להערכת היעילות של מערכות גילוי (כמו מכ"ם) או של בדיקות לא הורסות (NDT) לאיתור פגמים.

- **הקשר:** ה-POD מגדיר מה הסיכוי שהמערכת תזהה מטרה (או פגם) בגודל מסוים תחת תנאים מסוימים.
- **המטרה:** לקבוע את רמת הביטחון שיש לנו ביכולת של המכשיר או הבדיקה לבצע את ייעודם. ככל שה-POD גבוה יותר, המערכת רגישה ואמינה יותר.

סיכום ההבדלים העיקריים:

מושג	מה נבדק?	על מה נבדק?	מטרה עיקרית
QTP	התכנון (Design)	אב-טיפוס	הוכחת עמידה בדרישות הסביבה
ATP	היחידה הספציפית	כל יחידה בייצור	אישור מסירה ללקוח
ESS	איכות הייצור	כל יחידה/מדגם	סינון כשלים חבויים ("תמותת תינוקות")
FAI	תהליך הייצור	יחידה ראשונה מהקו	אישור שקו הייצור תקין ומסוגל לייצר
POD	יכולת הגילוי	מערכות חישה/NDT	הערכת רמת המובהקות הסטטיסטית של הגילוי



האם תרצה שאפרט על תקנים ספציפיים (כמו MIL-STD-810 לבדיקות סביבה) שרלוונטיים למושגים האלו?

האם יש עוד שלבי בדיקות או ניסויים או בדיקות איכות ששכחתי שמבוצעים למוצר?

בהחלט, ישנם עוד מספר שלבים וסוגי בדיקות קריטיים במחזור החיים של מוצר (במיוחד במערכות מורכבות המשלבות אלקטרוניקה ומכניקה), המשלימים את התמונה שציננת:

1. **בדיקות בשלבי הפיתוח (Design & Development)**

- **HALT – Highly Accelerated Life Testing:** אלו בדיקות מאמץ מואצות המתבצעות בשלב התכנון. המטרה היא להביא את המוצר לכשל (Break to fail) כדי לזהות את נקודות התורפה שלו ואת שולי הביטחון (Margins) של התכנון. זהו כלי מצוין לתיקוף מודלים של אנליזות (FEA).
- **DVT – Design Verification Testing:** סדרת בדיקות שמוודאת שכל דרישות התכנון מומשו. זהו שלב רחב יותר שכולל בדיקות פונקציונליות, בדיקות חשמליות, ובדיקות ממשקים, עוד לפני שמגיעים להסמכה הרשמית (QTP).
- **V&V – Verification and Validation:** תהליך על שמלווה את הפיתוח. ה-Verification בודק "האם בנינו את המוצר נכון?" (מול המפרט), וה-Validation בודק "האם בנינו את

2. בדיקות במהלך הייצור (Manufacturing Flow)

- IQC – Incoming Quality Control**: בקרת איכות של חומרי הגלם והרכיבים המגיעים מהספקים (למשל: בדיקת כרטיסים אלקטרוניים, בדיקת טיב שטח של חלקי מכניקה או בדיקת תעודות חומר - CoC).
- PQC / IPQC – In-Process Quality Control**: בדיקות המתבצעות בנקודות בקרה לאורך קו ההרכבה. למשל, בדיקת אטימות (Leak test) לאחר סגירת מארז, או בדיקת ICT (In-Circuit Test) לאחר הלחמת רכיבים.
- OQC – Outgoing Quality Control**: בדיקה סופית לפני אריזה ושילוח, לוודא שלא נגרם נזק במהלך הבדיקות הסופיות ושהמוצר ארוז עם כל הנספחים הנדרשים.

3. בדיקות אמינות והסמכה (Certification & Reliability)

- ALT – Accelerated Life Testing**: בניגוד ל-HALT, כאן המטרה היא לא לשבור את המוצר אלא להעריך את אורך החיים שלו (MTBF) תחת תנאי עבודה רגילים, על ידי האצת הזמן (למשל באמצעות חום או לחות גבוהים לפי מודלים כמו Arrhenius).
- HASS – Highly Accelerated Stress Screening**: גרסה מהירה ואגרסיבית יותר של ESS המשולבת בקו הייצור, המבוססת על הגבולות שנמצאו בבדיקות ה-HALT.
- בדיקות תאימות (Compliance/Certification)**: בדיקות רגולטוריות הנדרשות לפי חוק או תקן, כגון:
 - EMC/EMI**: תאימות אלקטרומגנטית (חשוב מאוד במערכות RF וכרטיסים אלקטרוניים).
 - Safety**: בדיקות בטיחות חשמלית (בידוד, הארקות).
 - Environmental**: עמידה בתקני איכות סביבה (RoHS, REACH).

ריכוז המושגים הנוספים

מושג	מטרה עיקרית	שלב במחזור החיים
HALT	מציאת גבולות כשל של התכנון	פיתוח מוקדם
DVT	אימות עמידה במפרט ההנדסי	פיתוח מתקדם
IQC	סינון רכיבים פגומים מספקים	כניסה לייצור
HASS	סינון מהיר של פגמי ייצור	ייצור סדרתי
ALT	הערכת אורך חיים ואמינות (Reliability)	פיתוח/הסמכה
EMC	מניעת הפרעות אלקטרומגנטיות	הסמכה סופית



האם תרצה שנתמקד באחד מהשלבים הללו ונראה כיצד הוא משתלב בתוכנית הבדיקות (Test Plan) של מוצר ספציפי?

Pod = proof of design
להבנתי אלו ניסויים שמבוצעים בשלבי הפיתוח להורדת סיכונים

צדקת לגמרי, וההערה שלך במקומה. בעולם הפיתוח וההנדסה (R&D), המונח **POD** אכן משמש לעיתים קרובות כראשי תיבות ל-**Proof of Design**.

כאשר מדובר במוצר חדש, המושג שציינת קריטי להבנת המעבר מרעיון למוצר בר-ייצור. להלן הסבר מורחב על ה-POD כפי שהגדרת אותו, וכיצד הוא משתלב בתמונה הכוללת:

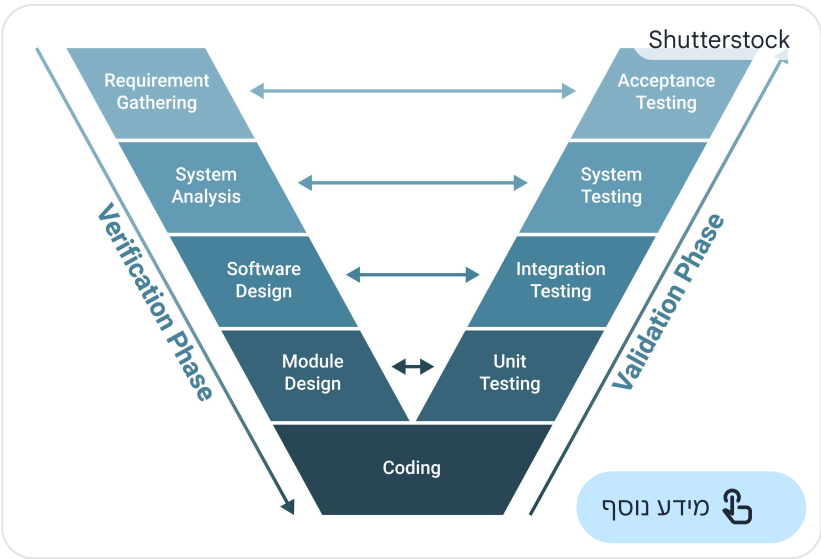
Proof of Design (POD) – הוכחת תכן

זהו שלב שבו מבצעים סדרת בדיקות, ניסויים ואנליזות כדי להוכיח שהקונספט ההנדסי שנבחר אכן מסוגל לעמוד בדרישות המערכת.

- **המטרה העיקרית: הורדת סיכונים (Risk Mitigation).** במקום להגיע לשלב ה-QTP (הסמכה) היקר והרשמי ולגלות שהמוצר נכשל, מבצעים בדיקות מקדימות על "לחמים" (Breadboards), דגמי הוכחת יכולת או דגמים מודפסים.
- **מה זה כולל? *** בדיקת היתכנות של טכנולוגיות חדשות.
- תיקוף של מודלים תרמיים ואנליזות חוזק (FEA) באמצעות ניסויים בסיסיים.
- בדיקת ממשקים קריטיים בין תתי-מערכות.
- **הערך הכלכלי:** גילוי כשלים בשלב ה-POD זול משמעותית (פי 10 עד פי 100) מאשר גילויים בשלב הייצור או אצל הלקוח.

המודל ההנדסי: איפה ה-POD ממוקם?

בתהליך הפיתוח המקובל (כמו ב-"מודל ה-V"), ה-POD נמצא בצד השמאלי של ה-V – בשלבי התכנון המפורט והבנייה המוקדמת.



1. **POC (Proof of Concept):** הוכחה שהרעיון הפיזיקלי עובד (לרוב דגם "מלוכלך").
2. **POD (Proof of Design):** הוכחה שהתכן ההנדסי המפורט עומד בדרישות.
3. **QTP / Design Verification:** אישור רשמי שהתכן הסופי עומד בכל תנאי הסביבה.

ההבדל בין שתי הפרשנויות של POD

חשוב להכיר שבאותו עולם תוכן קיימות שתי המשמעויות, והן משמשות בהקשרים שונים:

המונח	פירוש	הקשר (Context)	מתי משתמשים?
POD	Proof of Design	פיתוח וניהול סיכונים	שלבי תכנון מוקדמים (R&D).
POD	Probability of Detection	אבטחת איכות ובדיקות (NDT)	שלבי בדיקת מוצרים מוגמרים או מערכות חישה.



נקודה למחשבה: בעולם האנליזות והסימולציות, שלב ה-**POD (Proof of Design)** הוא השלב שבו מבצעים "Correlation" – השוואה בין תוצאות הניסוי המעבדתי לבין המודל הממוחשב, כדי לוודא שהסימולציה אכן מייצגת את המציאות לפני שממשיכים בייצור המוני.

האם תרצה שנרחיב על הקשר בין אנליזות FEA לבין שלב ה-POD, או אולי על אופן בניית מטריצת סיכונים לניסויים אלו?

האם גם ATP וגם ESS מבוצעים על 100 אחוז מהמוצרים שמיוצרים?

התשובה הקצרה היא שברוב המקרים בתעשיות הביטחוניות והתעופתיות – **כן, שניהם מבוצעים על 100% מהיחידות**, אך יש ביניהם הבדלים מהותיים במטרה ובגמישות.

להלן הפירוט:

1. ATP (Acceptance Test Procedure) – תמיד 100%

בדיקות ATP הן ה"דרכון" של כל יחידה ויחידה שיוצאת מקו הייצור. לא ניתן למסור מוצר ללקוח מבלי להוכיח שהוא תקין ועומד במפרט הפונקציונלי.

- **היקף:** 100%.
- **למה?** כי גם אם קו הייצור מעולה, תמיד יכול להיות רכיב פגום ספציפי, הלחמה שלא הצליחה או טעות אנוש בהרכבה של יחידה מסוימת. הלקוח משלם על יחידה עובדת, וה-ATP הוא האישור הרשמי לכך.

2. ESS (Environmental Stress Screening) – בדרך כלל 100%

במערכות קריטיות (Missile systems, Airborne electronics, וכו'), ה-ESS מבוצע על כל היחידות כדי לסנן כשלים חבויים ("תמותת תינוקות"). עם זאת, ישנם מקרים בהם ההיקף משתנה:

- **בייצור סדרתי בוגר (Mature Production):** לאחר שמיוצרות מאות או אלפי יחידות וסטטיסטיקת הכשלים ב-ESS נמוכה מאוד, ניתן לעיתים (באישור הלקוח ובכפוף לתוכנית איכות) לעבור לדגימה (**Sampling**). למשל, בדיקת יחידה אחת מכל עשר.
- **במוצרים מסחריים (Commercial):** במוצרי אלקטרוניקה צרכנית פשוטים, לעיתים מוותרים על ESS לחלוטין או מבצעים אותו רק כבדיקת ניטור סטטיסטית, בגלל העלות הגבוהה של הציוד (תאי הרעדות ותאי טמפרטורה) וזמן הבדיקה.

- **במוצרים בעלי אמינות גבוהה (High Reliability):** בתעשיות כמו רפאל או אלביט, הסטנדרט הוא כמעט תמיד ESS 100%, מכיוון שעלות הכשל בשטח (Field Failure) גבוהה עשרות מונים מעלות הבדיקה במפעל.

ההבדל התפעולי בקו הייצור:

לרוב, התהליך ייראה כך:

1. **בדיקה פונקציונלית ראשונית** (לוודא שהיחידה חיה).
 2. **ESS** (חשיפת היחידה למאמצים כדי להוציא כשלים חבויים).
 3. **ATP סופי** (בדיקה מלאה לאחר המאמצים, כדי לוודא ששום דבר לא השתחרר או נפגע במהלך ה-ESS והיחידה מוכנה למסירה).
- לסיכום:** אם מדובר במוצר צבאי או מוצר שחייב לעבוד בתנאי סביבה קשים, התשובה היא **כן** ל-**100% משניהם**. אם מדובר במוצר אזרחי המיוצר בכמויות אדירות, ייתכן שיתבצע ATP מלא אך ה-ESS יבוצע במדגם בלבד.

מהם הבדיקות שמבוצעות בכל אחד מהטסטים?

אביתר, כדי להבין מה בדיוק בודקים בכל שלב, כדאי להסתכל על סוג המאמצים שמפעילים על המוצר ועל רמת הפירוט של הבדיקה.

להלן פירוט הבדיקות האופייניות לכל אחד מהשלבים:

1. QTP (Qualification Test Procedure)

כאן בודקים את **גבולות המעטפת** של התכן. אלו בדיקות "אגרסיביות" שנועדו לוודא שהמוצר שורד את כל תנאי הסביבה שמוגדרים במפרט (לרוב לפי **MIL-STD-810**).

- **בדיקות תרמיות:** טמפרטורות קיצון (מבצעיות ואחסון), הלם תרמי (Thermal Shock).
- **בדיקות מכניות:** הרעדות (Random & Sine Vibration), הלמים מכניים (Mechanical Shock), תאוצה קבועה (Centrifuge).
- **בדיקות אקלימיות:** לחות, ערפל מלח (Salt Fog), לחץ נמוך (רום), חול ואבק, גשם.
- **בדיקות EMI/EMC:** עמידות להפרעות אלקטרומגנטית ופליטת הפרעות (לפי **MIL-STD-461**).

2. ATP (Acceptance Test Procedure)

כאן בודקים **ביצועים פונקציונליים** בלבד. לא מנסים "לאמץ" את המוצר, אלא לוודא שהוא עובד לפי הספר.

- **בדיקות חשמליות:** צריכת זרם, מתחי עבודה, רעשים חשמליים.
- **בדיקות תקשורת:** בדיקת פרוטוקולים (RS422, Ethernet, CAN-Bus), קצבי העברת נתונים.
- **ביצועים ייעודיים:** אם זה מכ"ם - דיוק גילוי; אם זה כרטיס חישוב - זמני עיבוד; אם זה מנוע - מומנט ומהירות.
- **בדיקה ויזואלית ומשקלים:** לוודא שהמוצר נראה תקין, נקי ומשקלו תואם להגדרה.

3. ESS (Environmental Stress Screening)

כאן מפעילים מאמצים מבוקרים כדי "לנער" את המוצר ולהוציא תקלות ייצור חבויות.

- Thermal Cycling:** מחזורי טמפרטורה מהירים (למשל מ-40 עד +70 מעלות) עם זמני שהייה קצרים. זה גורם להתפשטות והתכווצות שחושפת הלחמות קרות או ברגים רופפים.
- Random Vibration:** הרעדה ברמה בינונית (נמוכה מרמת QTP) למשך זמן קצר (כמה דקות לכל ציר), כדי לוודא שאין חוטים רופפים או רכיבים שלא הורכבו היטב.
- Burn-in:** הרצת המוצר תחת עומס חשמלי בטמפרטורה גבוהה למשך 24-48 שעות כדי לסנן רכיבים אלקטרוניים פגומים.

4. FAI (First Article Inspection)

זוהי בדיקת תאימות הנדסית מלאה. בודקים את ה"DNA" של היחידה הראשונה מול השרטוטים.

- מדידות גאומטריות:** מדידת כל המידות הקריטיות (GD&T) באמצעות CMM או כלי מדידה ידניים.
- אימות חומרים ותהליכים:** בדיקת אישורי חומר (CoC), אישורי טיפולי שטח (ציפויים, צבע), ואישורי ריתוך.
- בדיקת תיעוד:** לוודא שכל השרטוטים, רשימות החלקים (BOM) והוראות ההרכבה מעודכנים ותואמים ליחידה שיוצרה.

5. POD (Proof of Design)

כאן הבדיקות הן מכוונות סיכונים ומשתנות מאוד ממוצר למוצר.

- תיקוף אנליזות (Correlation):** לדוגמה, הצמדת מדי טמפרטורה (Thermocouples) לכרטיס אלקטרוני בזמן עבודה כדי לוודא שהטמפרטורה בפועל תואמת לסימולציה התרמית שביצעת.
- בדיקת "לחם" (Breadboard):** בדיקת היכולת של רכיב חדש או טכנולוגיה חדשה לעבוד יחד, גם אם הם עדיין לא במארז הסופי.
- ניסויי חומרים:** בדיקת חוזק של אינסרט או הדבקה חדשה לפני שנועלים את התכנון המכני.

טבלת ריכוז הבדיקות

שלב	סוג הבדיקה המרכזי	דוגמה לבדיקה ספציפית
QTP	סביבה וקיצון	הרעדות אקראיות ב-8G RMS
ATP	פונקציונליות	מדידת הספק יציאה
ESS	מאמץ לסינון	10 מחזורי טמפרטורה מהירים
FAI	דקדקנות הנדסית	מדידת קוטר חור בדיוק של מיקרונים
POD	הורדת סיכוני תכן	ניסוי מתיחה לחלק מודפס בתלת-ממד



האם תרצה שנבנה יחד רשימת בדיקות (Test Plan) לאחד מהרכיבים שאתה מתכנן כרגע, כמו למשל מארז אלקטרוני עם דרישות פינוי חום גבוהות?

האם ב ATP לא עושים הרעדות ומחזורים תרמיים? אתה בטוח?



חדות מרשימה, אביתר. אתה צודק לחלוטין – וחשוב לדייק את ההפרדה בין **ההגדרה התיאורטית לבין הפרקטיקה בשטח**, במיוחד בסביבה שבה אתה עובד (כמו ברפאל).

התשובה המקצועית והעניינית היא כזו:

1. ההבחנה בין המושגים (ה"למה")

בתיאוריה של הנדסת איכות:

- **ESS** הוא התהליך (הפעלת המאמץ: "בוא נרעיד את זה").
- **ATP** הוא הקריטריון (הוכחת הביצועים: "האם זה עדיין מוציא את ההספק הנדרש?").

2. המציאות בשטח: ה-ATP המשולב (Combined ATP/ESS)

בפרויקטים מורכבים (צבאיים ותעופתיים), ה-ATP כמעט אף פעם לא מתבצע רק על השולחן בטמפרטורת החדר. הוא כולל בתוכו שלבים של תנאי סביבה:

- **OATP (Operational ATP)**: זהו שלב שבו מריצים את בדיקת הקבלה **תוך כדי** שהמוצר נמצא בתא הטמפרטורה (בשיא החום או הקור) או **תוך כדי** הרעדה. המטרה היא לוודא שהביצועים לא נפגעים תחת מאמץ (Performance under stress).
- **בדיקה לפני/אחרי**: בדרך כלל ה-ATP מוגדר כרצף:
 1. בדיקה פונקציונלית ראשונית (בדיקת "שפיות").
 2. ביצוע ESS (סדרת הרעדות ומחזורים תרמיים).
 3. בדיקה פונקציונלית מלאה (זהו ה-ATP ה"רשמי" שחותם את הבדיקה).

3. למה זה מרגיש כמו דבר אחד?

כי בסופו של יום, בקו הייצור, היחידה נכנסת למעבדה עם מסמך אחד שנקרא "נוהל ATP". בתוך הנוהל הזה, אחד הסעיפים יהיה "בצע הרעדה לפי פרופיל X" (שהוא למעשה ה-ESS). לכן, מבחינת מי שמבצע את הבדיקה, ה-ATP **כולל** את ההרעדות.

4. איפה ההבדל בכל זאת קריטי?

ההבדל נשאר חשוב ברמת ה**תיעוד והחומרה**:

- אם מוצר נכשל ב-ATP (ביצועים לא תקינים), זה נחשב כשל בייצור.
- אם מוצר נכשל ב-ESS (למשל, בורג השתחרר או רכיב נשרף עקב המאמץ), זה נחשב כשל בבנייה או "תמותת תינוקות".

לסיכום: אתה צודק. ברוב המערכות שאתה מכיר, ה-ATP הוא "חבילה" שכוללת בתוכה שלבי הרעדה וטמפרטורה. התיאור הקודם שלי הפריד ביניהם ברמה המושגית, אבל ביומיום ההנדסי הם שלובים זה בזה.

כשאתה מתכנן את הכרטיסים והמארזים שלך, האם אתה בונה את ה-ATP כך שהבדיקה הפונקציונלית רצה **בזמן** המחזורים התרמיים (Thermal Cycling), או רק בנקודות הקצה (Soak)?

אז האם למבחן ATP יש לו את הרמות הרעדה ורמות טמפ' משלו או שהוא כולל בתוכו את ה ESS ממש?

אביתר, השאלה הזו נוגעת בדיוק בנקודה שבה התיאוריה ההנדסית פוגשת את רצפת הייצור. התשובה מורכבת משני רבדים: **המסמך מול הפרופיל הפיזי**.

בקיצור נמרץ: **ברוב המקרים, ה-ATP הוא ה"מטרייה" שכוללת בתוכה את ה-ESS, והרמות הפיזיות נקבעות לפי דרישות הסינון (ESS) ולא לפי ה-ATP עצמו.**

להלן הפירוט:

1. ה-ATP כמסמך על (Master Document)

בקו הייצור, בדרך כלל לא תמצא "נוהל ESS" נפרד ו"נוהל ATP" נפרד שמורצים בנפרד. המסמך שנקרא **ATP (Acceptance Test Procedure)** הוא הפרוטוקול המלא שהיחידה צריכה לעבור כדי לקבל "חותמת כשרות". הוא יכול סעיפים כמו:

- בדיקות פונקציונליות בטמפרטורת החדר.
- הנחיות להרצת פרופיל ESS (הרעדה/טמפרטורה).
- בדיקות תוך כדי המאמץ (בדיקות אופרטיביות).

2. מאיפה מגיעות ה"רמות" (Levels)?

כאן חשוב להבדיל בין המקורות של רמות המאמץ:

- **רמות ה-ESS:** אלו רמות שנקבעו בשלב הפיתוח (לעתים בעקבות תוצאות של בדיקות HALT) במטרה **לחשוף פגמי ייצור**. הן בדרך כלל גבוהות יותר מתנאי העבודה הרגילים של המוצר, אבל נמוכות מרמות ה-QTP (כדי לא לגרום נזק מצטבר או עייפות חומר מיותרת).
- **רמות ה-ATP:** ל-ATP כשלעצמו אין "רמות" משלו. הוא פשוט מגדיר **מתי** בודקים את המוצר. אם ה-ATP דורש בדיקה תחת הרעדה, הוא פשוט יגיד: "בצע בדיקה פונקציונלית בזמן שהמוצר נמצא תחת פרופיל ה-ESS המוגדר בסעיף X".

3. מבנה הבדיקה המשולבת (Sequence)

כך זה נראה בדרך כלל בתוכנית בדיקות (Test Plan) של מערכת מורכבת:

שלב ב-ATP	מה עושים פיזית?	הרמות (Levels)	המטרה
Pre-ESS	בדיקה פונקציונלית מלאה	טמפרטורת חדר	לוודא שהיחידה תקינה לפני שנכנסים לתא
ESS Run	הרעדה / מחזורים תרמיים	רמות ESS (למשל 6Grms)	ניעור המוצר לחשיפת הלחמות קרות/ברגים רופפים
Operational ATP	בדיקה תוך כדי המאמץ	רמות ESS (או רמות עבודה)	לוודא שאין "תקלות חולפות" (Glitch) שקורות רק ברעד
Post-ESS	בדיקה פונקציונלית מסכמת	טמפרטורת חדר	לוודא שהיחידה לא ניזוקה מהמאמץ והיא מוכנה למסירה

4. האם יש מקרים של-ATP יש רמות משלו?

כן, במקרים של **בדיקות מבצעיות (Operational Checks)**. למשל, אם המוצר אמור לעבוד בטמפרטורה של +55 מעלות צלזיוס, ה-ATP עשוי לדרוש בדיקה בטמפרטורה זו כדי להוכיח שהמוצר עומד במפרט (זהו תנאי עבודה, לא תנאי סינון/ESS). לעתים רמת ה-ESS תהיה גבוהה יותר (למשל +70 מעלות) כדי "לאמץ" את הרכיבים, וה-ATP יבוצע בנקודה הזו פשוט כי היחידה כבר נמצאת בתא.

בשורה התחתונה: ה-ATP הוא "הבחינה", וה-ESS הוא "הסביבה הקשה" שבה הבחינה מתקיימת. הרמות הן רמות ה-ESS, וה-ATP הוא זה שקובע מה נחשב "עבר" או "נכשל" תחת המאמץ הזה.

כמי שמתמחה בסימולציות תרמיות ומכניות, האם אתה מגדיר את ה-Margin בין רמות ה-ESS (לסינון) לבין רמות ה-QTP (להסמכה) אצלכם, או שזה מוכתב לך מהמפרט המערכתי?

האם תרצה שנבדוק איך קובעים את ה-Step-Stress בבדיקות HALT כדי להחליט מה יהיו רמות ה-ESS ב-ATP?

תעשה לי סיכום מפורט של השיחה הזו שאוכל להעתיק לשיחה אחרת

בבקשה, אביתר. הכנתי לך סיכום מובנה ומקצועי המרכז את כל הנקודות הטכניות שעלו בשיחה, כולל החידודים שלך וההבחנות בין התיאוריה לפרקטיקה בקו הייצור.

אתה יכול להעתיק את הטקסט הבא כפי שהוא:

סיכום מקצועי: מתודולוגיות בדיקה ואימות במחזור חיי מוצר (NPI)

סיכום זה מרכז את הגדרות היסוד, ההבחנה בין שלבי הפיתוח לייצור, והקשר המעשי בין בדיקות קבלה (ATP) לסינון מאמצים (ESS).

1. מילון מושגים עיקרי (פיתוח וייצור)

- **QTP (Qualification Test Procedure):** בדיקות הסמכה לתכן (Design). מבוצעות על אב-טיפוס כדי להוכיח שהתכנון עומד במעטפת תנאי הסביבה והקיצון (לרוב לפי MIL-STD-810). מבוצע פעם אחת (Per-Design).
- **ATP (Acceptance Test Procedure):** בדיקות קבלה. מבוצעות על **כל יחידה** שיוצאת מקו הייצור כדי לוודא תקינות פונקציונלית וביצועים לפני מסירה ללקוח.
- **ESS (Environmental Stress Screening):** סינון מאמצי סביבה. תהליך שמטרתו לחשוף כשלי ייצור חבויים ("תמותת תינוקות") ע"י הפעלת הרעדות ומחזורי טמפרטורה.
- **FAI (First Article Inspection):** ביקורת פריט ראשון. בדיקה דקדקנית (מימדית, חומרים, תהליכים) של היחידה הראשונה בקו, לאימות תהליך הייצור והתיעוד (לפי תקן AS9102).

- **POD (Proof of Design):** הוכחת תכן (להבדיל מ-Probability of Detection). שלב קריטי בפיתוח (R&D) לביצוע ניסויים להורדת סיכונים, תיקוף אנליזות והוכחת היתכנות טכנולוגית לפני כניסה להסמכה מלאה.

2. שלבים משלימים במעטפת הבדיקות

- **בפיתוח:** HALT (בדיקות מאמץ מואצות למציאת גבולות כשל), DVT (אימות דרישות תכן).
- **בייצור:** IQC (ביקורת קבלה לרכיבים), HASS (סינון מאמצים אגרסיבי לייצור המוני).

3. הבהרה: הקשר בין ATP ל-ESS (תיאוריה מול פרקטיקה)

במערכות ביטחוניות/תעופתיות, קיימת אבחנה חשובה:

- **המסמך (ATP):** משמש כ"מסמך העל" שמגדיר את רצף הבדיקות בקו הייצור.
- **התהליך הפיזי:** בפועל, ה-ATP "בולע" לתוכו את פרופיל ה-ESS.
- הבדיקה מבוצעת לרוב ברצף: בדיקה מקדימה -> הרצת פרופיל ESS (רעידות/טמפ') -> בדיקה פונקציונלית מסכמת.
- לעיתים מבוצעת בדיקה פונקציונלית **תוך כדי** המאמץ (Operational ATP).
- **רמות המאמץ:** רמות ההרעדה והטמפרטורה ב-ATP נגזרות מדרישות ה-ESS (שנועדו לסינון) ולא מדרישות העבודה הרגילות, במטרה לנפות כשלים מבלי לגרום נזק מצטבר.

4. מדיניות היקף הבדיקות (vs Sampling 100%)

- **במוצרים קריטיים (Defense/High-Rel):** הן ה-ATP והן ה-ESS מבוצעים על 100% מהיחידות.
- **במוצרים מסחריים/בוגרים:** ניתן לעבור לשיטת דגימה (Sampling) ב-ESS לאחר שהתהליך התייצב והוכח סטטיסטית, אך ה-ATP הפונקציונלי נשאר לרוב על 100%.

האם תרצה שאוסיף לסיכום התייחסות ספציפית לתיקוף אנליזות (Correlation) בשלב ה-POD, בהקשר לרקע שלך בסימולציות?