

- בלמ"ס -

מנועי בית שמש בע"מ אגף הפיתוח 

**מיפוי טמפרטורת להב טורבינה  
במנוע סילון בזמן פעולה**

***jet engine turbine blade  
thermal mapping results***

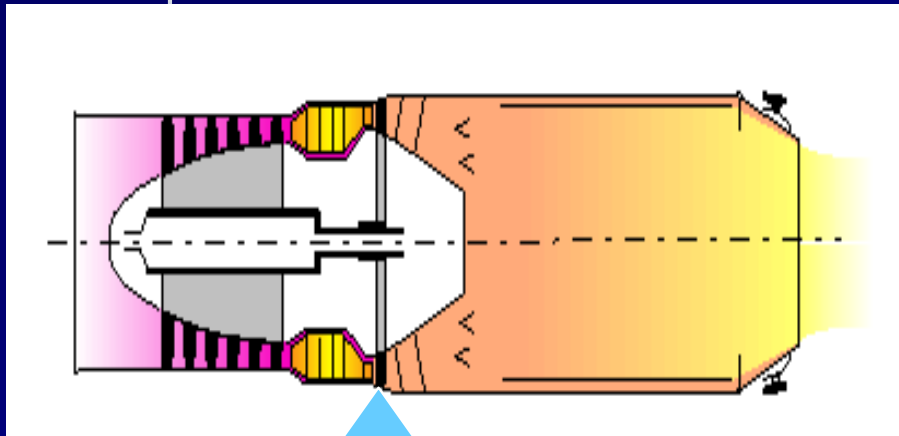
מנועי בית שמש

מפא"ת

יארד טכנולוגית חישה מתקדמת



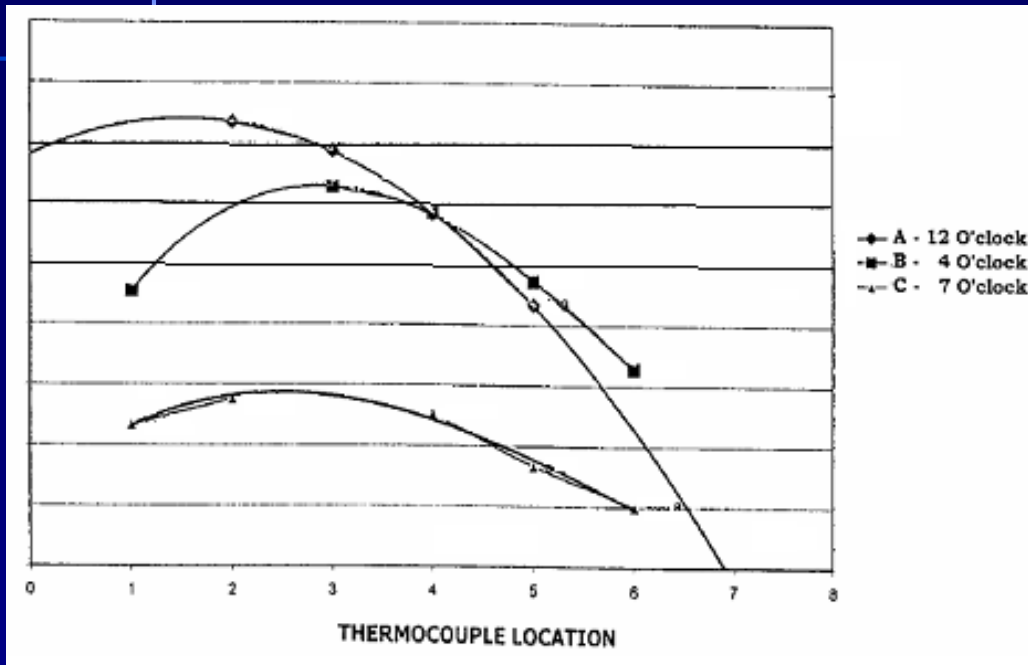
## מדידת טמפרטורת הלהב - הצורך



- אורך חיי הלהב הטורבינה תלוי בתנאי העבודה -  
- טמפרטורה - ערך ופילוג  
- מאמצים - תרמיים ,  
אווירודינאמיים וצנטריפוגליים
- ביציאה מתא השריפה שוררים תנאים הגורמים לשילוב קיצוני מאמץ-טמפרטורה בלהב
- בחינת תנאי העבודה מאפשרת הערכת אורך חיי הלהב לזחילה



# מדידת טמפרטורת הגז

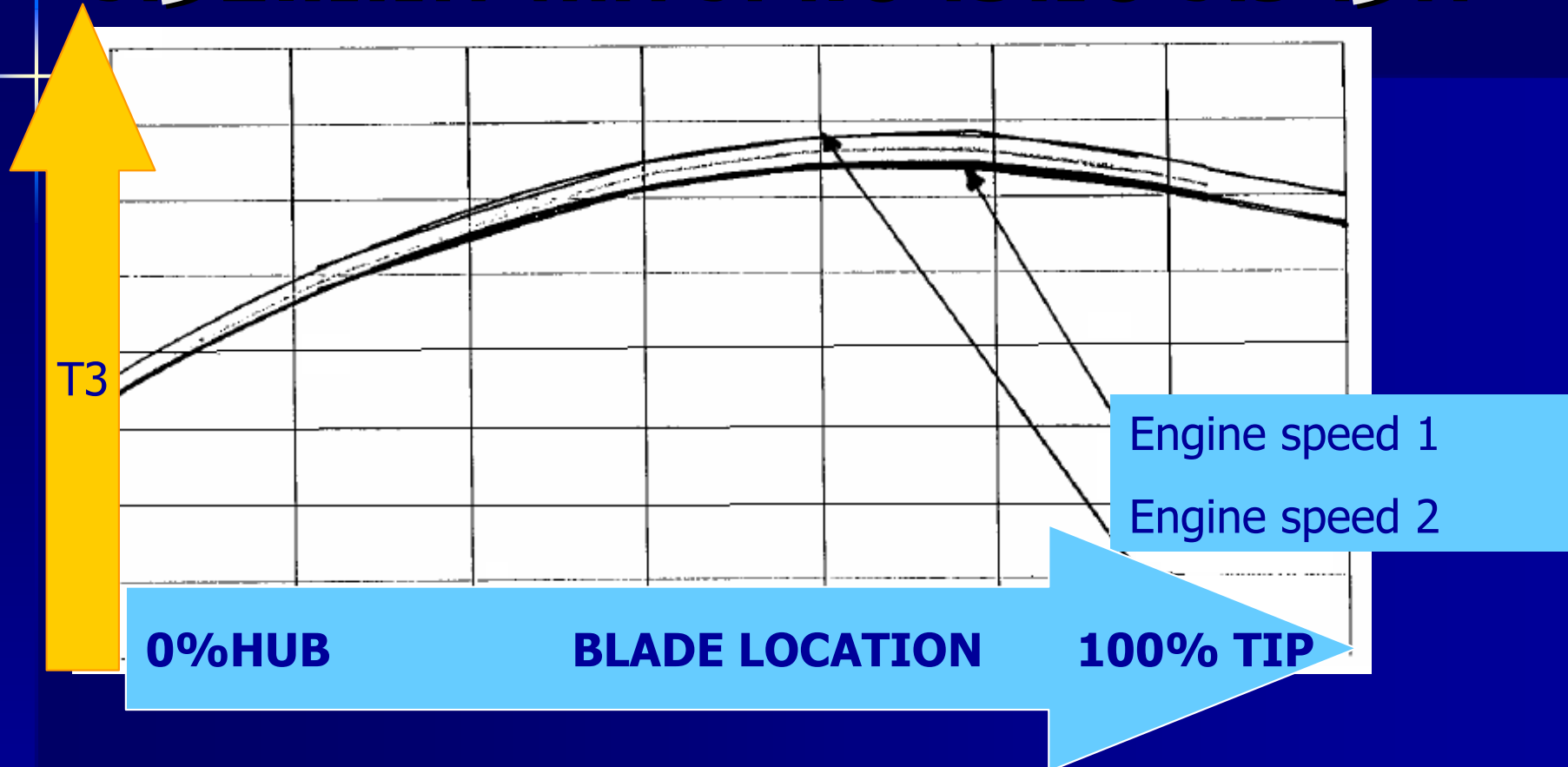


- מדידות טמפרטורת הגז התקבלו בשלב מוקדם ע"י מסרקי טרמוקפלים סטנדרטיים.
- הטרמוקפלים הותקנו במוצא מפלג הטורבינה, (לפני הכניסה לרוטור הטורבינה).
- התקנה בתחנות בהיקף המנוע





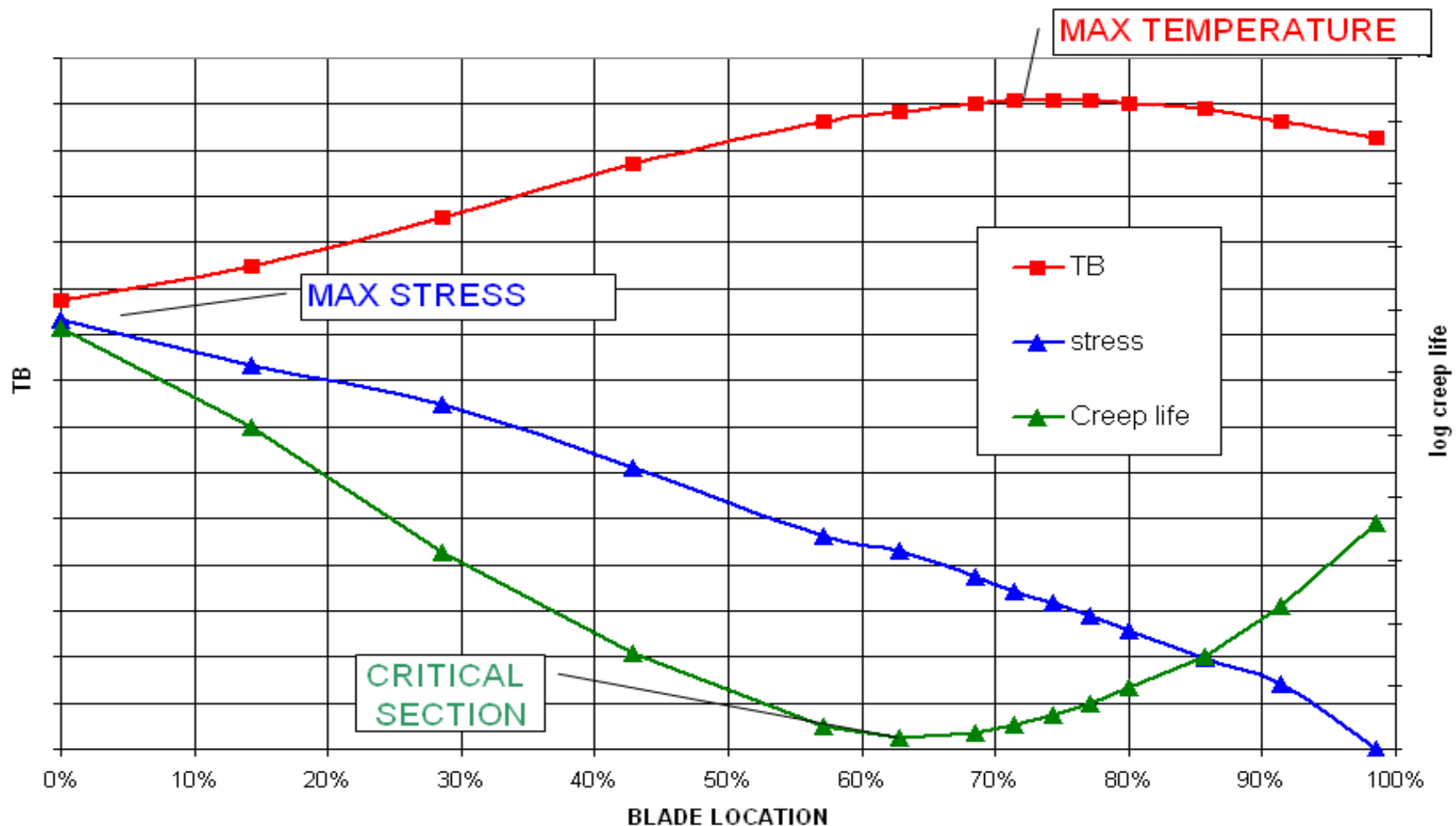
## הערכת טמפרטורת הגז הממוצעת



- עבור הטורבינה הסובבת תנאי הכניסה הם הממוצע ההיקפי של טמפרטורת הגז
- מתקבל מקסימום בנקודה מוגדרת, באיזור בו שילוב מאמץ-טמפרטורה מקסימאלי הוא המסוכן ביותר



# שילוב מאמץ טמפרטורה ואורך חיים





# טמפרטורת הלהב

## חישוב FEA עבור נקודת קיצון



Pressure side



Suction side

- בחישוב אלמנטים סופיים (דוגמת ANSYS), תוכנת throuflow ומעבר חום מתקבלת טמפרטורת הלהב בנקודת העבודה
- הפילוג המתקבל עבור תצורת תא השריפה הנבחרת

# אימות 1

## מדידת טמפרטורת המתכת במצב מנוע נתון

# Thermal sensitive pigments

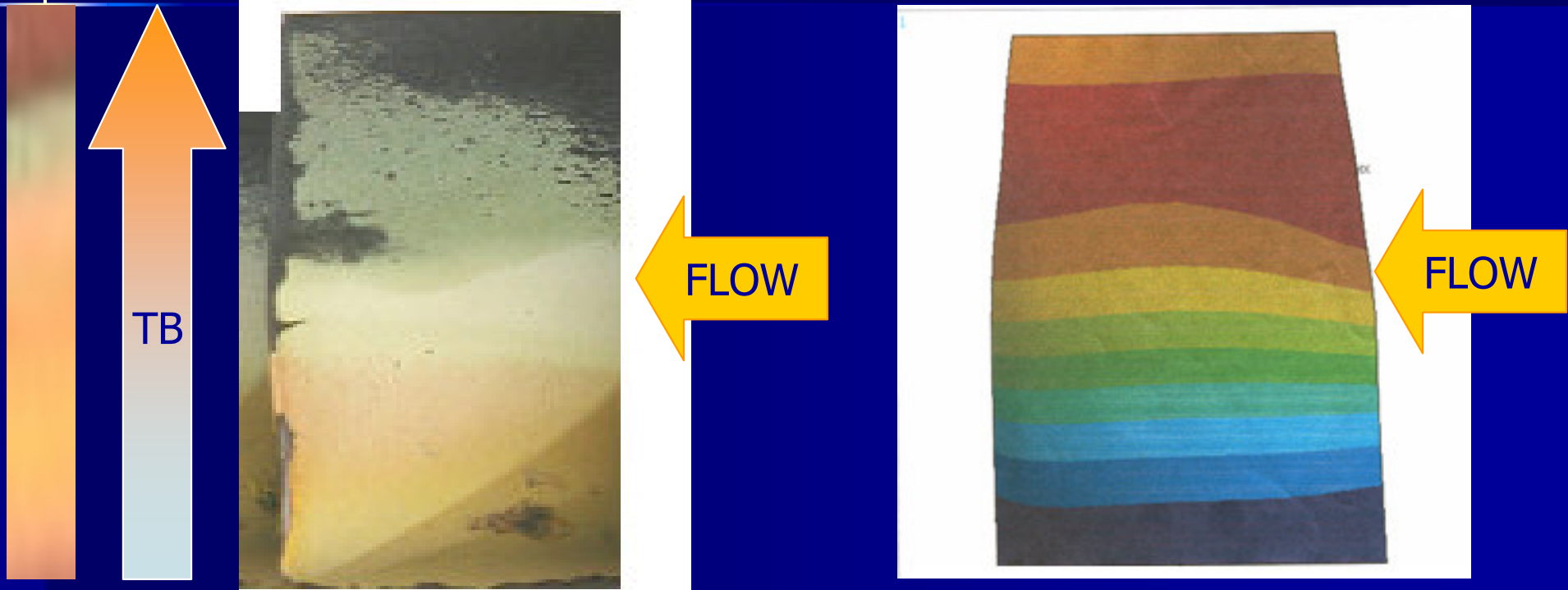
- משפחת פגמנטים המשנים גוון במעבר מוגדר של טמפרטורת 50°C.
- דורשים התייצבות לפרק זמן מינימאלי
- האפליקציה מחייבת כיוול הגוון הנראה לערכי טמפרטורה ומיומנות בפענוח





# אימות ראשוני של התכן – צבעי טמפרטורה

## Suction side



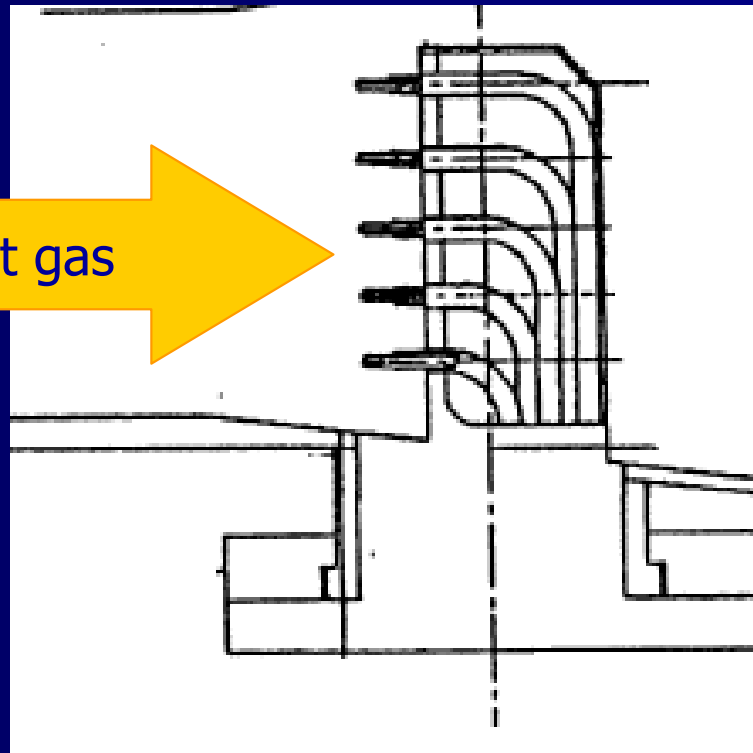
- מתקבל פילוג הטמפרטורה במצב מנוע נתון, OFFLINE, לאחר ההדממה
- פענוח צבעי הטמפרטורה בוצע לאחר תהליך כיוול במצב יציב
- רזולוציית המדידה כ- 50 מ"צ (מעבר בין מקטעים מוגדר)

## אימות 2

מדידת טמפרטורת הגז ביציאה  
מהטורבינה הלהב בזמן אמת



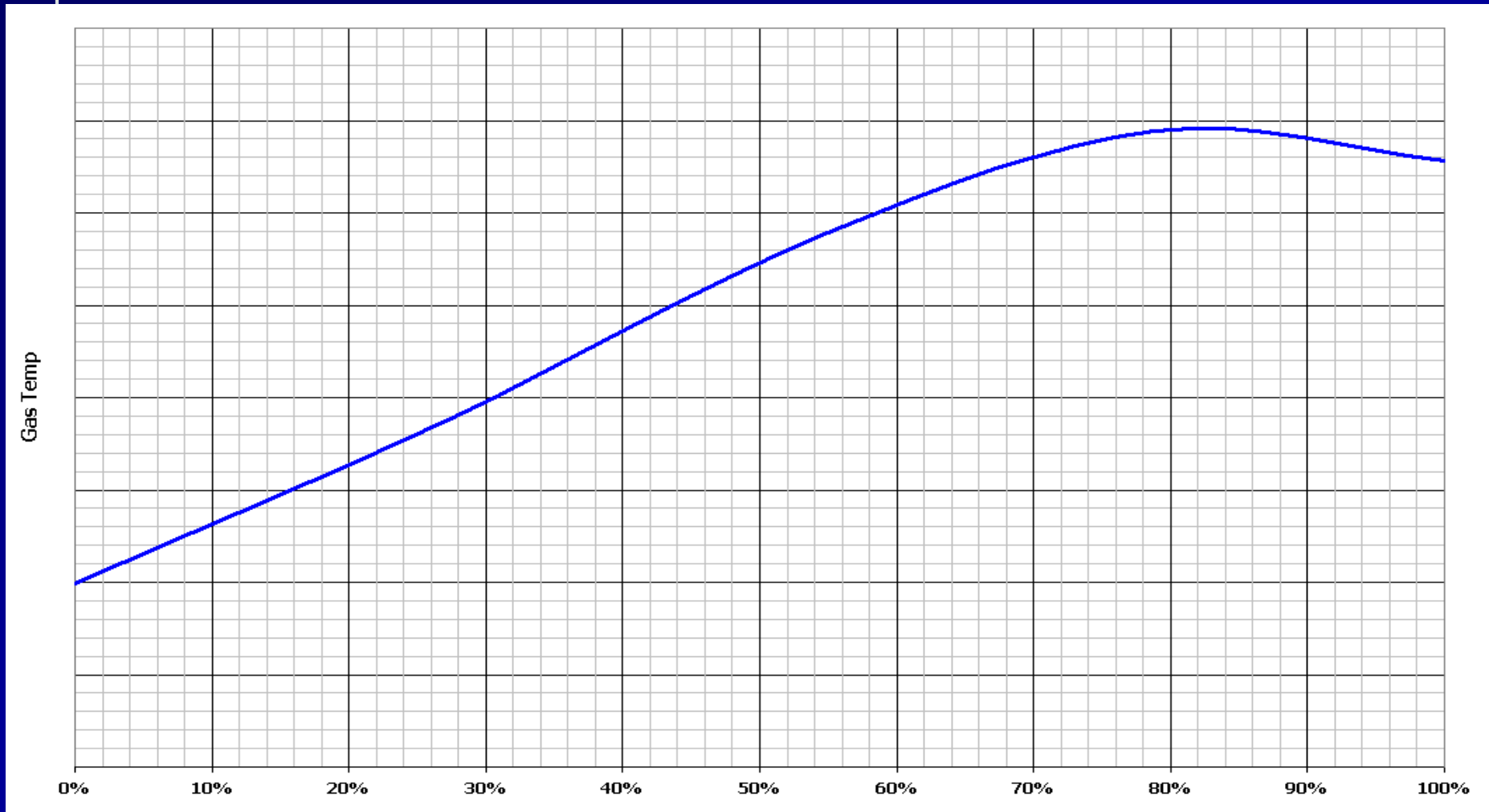
# אימות התכן – מדידת טמפרטורת הגז אחרי רוטור הטורבינה



- התקנת מסרק מדידי טמפרטורה ולחץ מאפשרת אינדיקציה לאופי הזרימה
- תוצאות נוספות - נצילות הטורבינה וכו'.



# תוצאות - מדידת טמפרטורת הגז אחרי רוטור הטורבינה

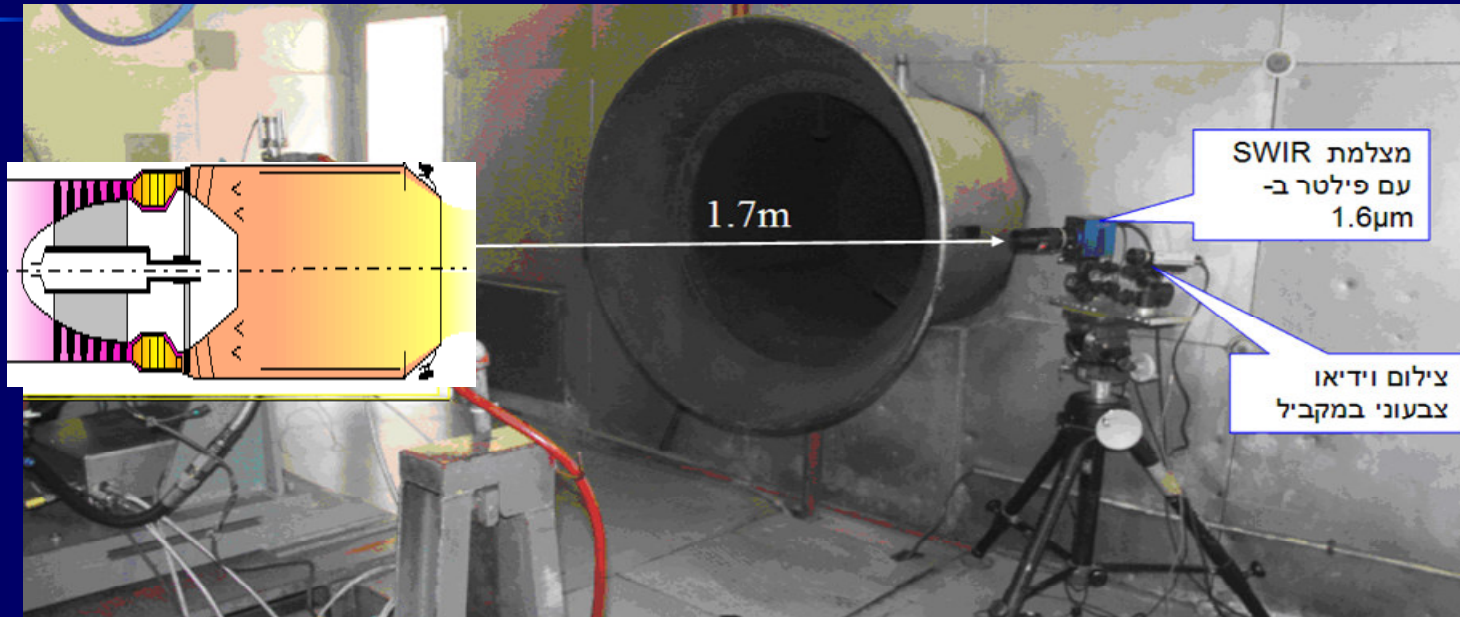


## אימות 3

מדידת טמפרטורת המתכת של  
הלהב בזמן אמת במצבי מנוע  
משתנים



# מדידה במצלמת SWIR



- ניתוח ספקטראלי של קרינה הנפלטת מהמתכת במצב חם
- הניתוח מבוצע בתחום תדר אינפרא אדום צר  $1.6\text{micron}$
- הציוד – מצלמה תרמית (מצלמת וידאו מקבילה)
- המנוע מצולם מאחור במבט לגזרת טורבינה

# בדיקת היתכנות בשיתוף IARD

- הניסוי בוצע ב- 2009.
- נקודות מיוצבות:
  - 90% עד 96% סל"ד
  - צילום רציף בחשיפה 3microsec
  - תנועת הלהב בעת החשיפה זניחה, כ- 0.2 מ"מ

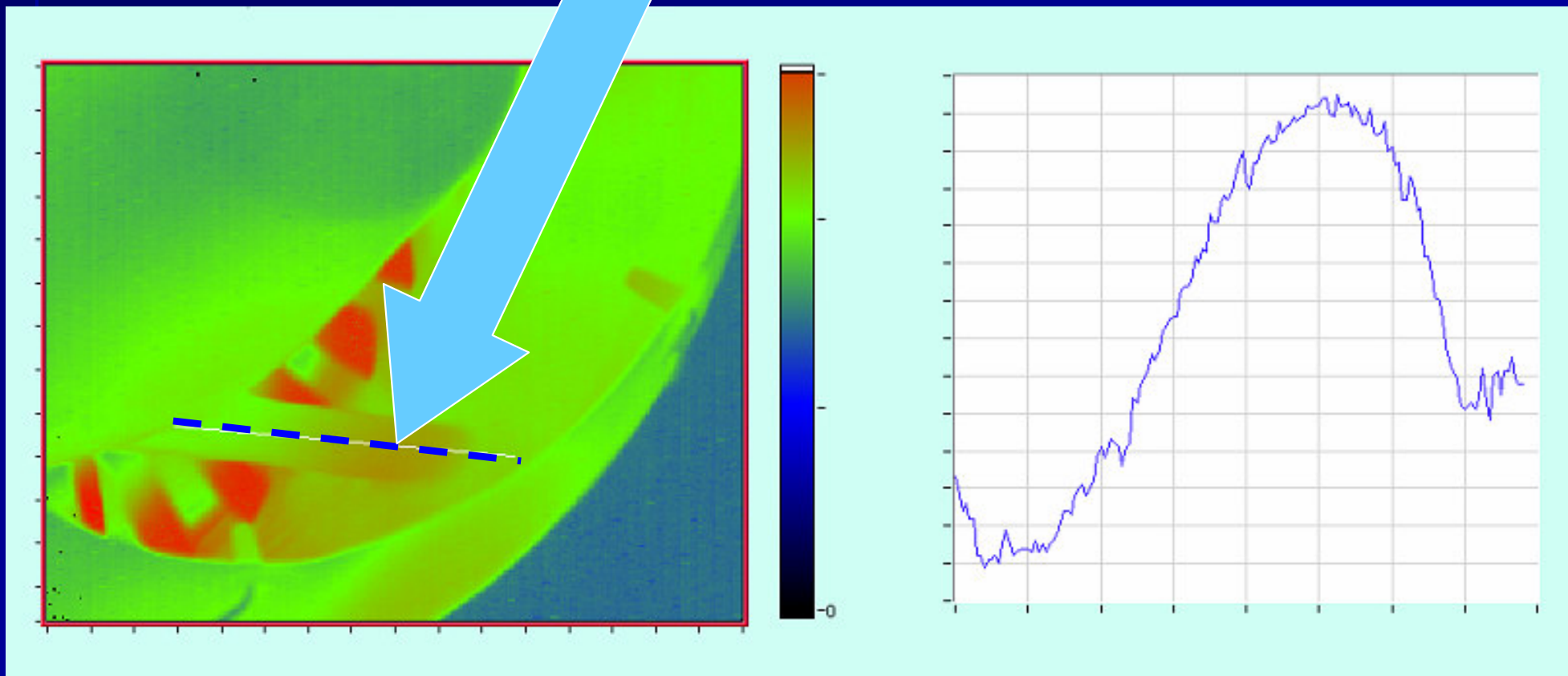


- בלמ"ס -

מנועי בית שמש בע"מ אגף הפיתוח

# תוצאות משניות - טמפרטורת רכיבים סטאטיים

■ פילוג טמפ' על סמוכת הצנ"פ

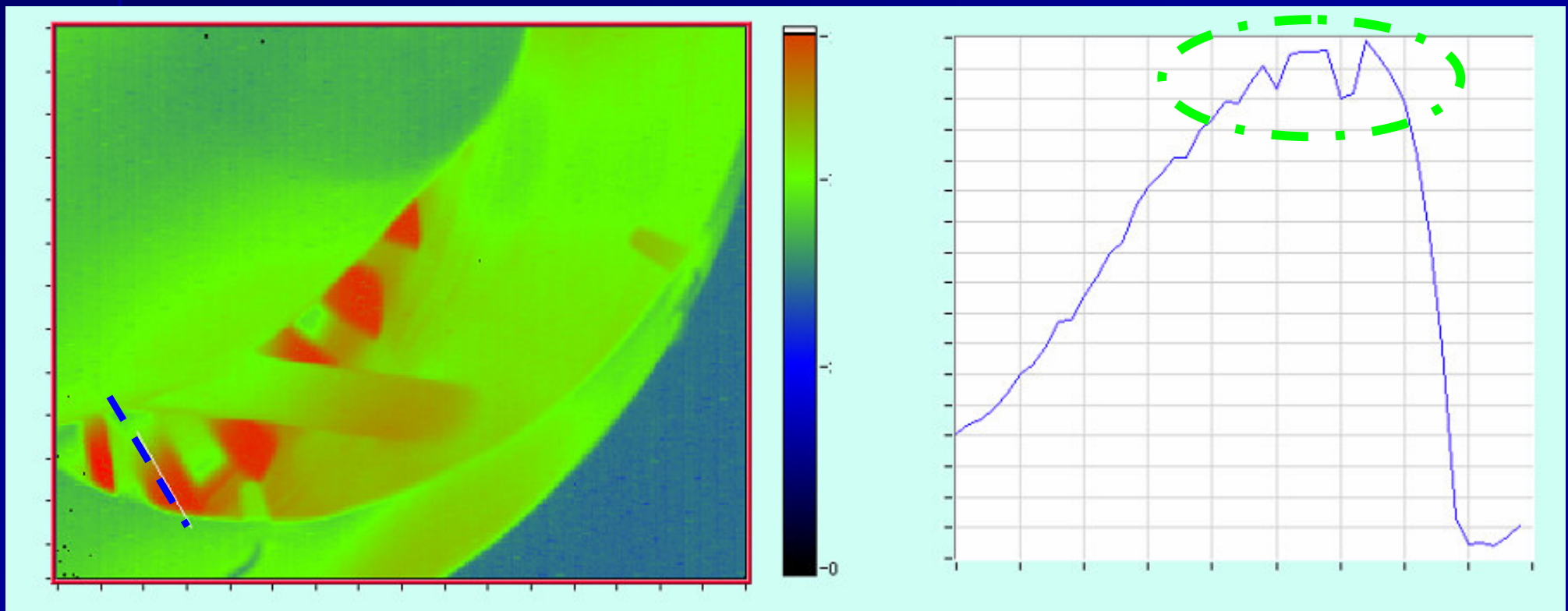






# תוצאות גולמיות – פילוג לאורך הלהב

- פילוג טמפ' רדיאלי של הלהב – ניתן לראות מקסימום בקרבת ה TIP - כמתוכנן



## פענוח וכיול אמיסיביות

- התוצאות הגולמיות התקבלו עבור מקדם  $Emissivity=1$  כמקובל.
  - הערך הצפוי עבור נתך הלהב בתחום הטמפרטורה הנבדק  $Emissivity=0.8$
  - בוצע עיבוד תמונה לקישור בין ערכי gray level לפיקסל לבין הטמפרטורה.
  - המשמעות – יש להוסיף כ- 40 מ"צ לערך הנמדד.
  - קיימים גורמי השפעה נוספים משניים בהשפעה (רקע, תווך למצלמה וכו')
- חומר רקע – מאמר 1997 Allison-Rolls-Royce

# תוצאות-טמפרטורת מקסימום בחתך השוואה בין טמפרטורת הלהב למדודה למחושבת

הפרש	TBLABE מדוד	TBLABE מחושב	EGT	ENGINE SPEED	#
°C	°C	°C	°C	[%]	
12- 1-	A+190 A+201	A+202	A	89%	1
+12	B+216	B+204	B	91%	
17- 5	C+191 C+203	C+208	C	93%	2
מצלמה ברוויה, אין נתון מדוד ישים		D+210	D	96%	3



## גורמי שגיאה עיקריים

### ■ BIAS עיקריים

– הערכת אמיסיביות (ספרות: 0.8, מקסימאלי: 1):  $40^{\circ}\text{C}$  – עבור 0.8.

– קרינת הרקע: עד  $35^{\circ}\text{C}$  + עבור אמיסיביות 0.8.

– כיווני הטית המדידה מנוגדים ומתקזזים

### ■ שגיאות אקראיות (טווחי מקס')

– כיוולים  $\pm 8^{\circ}\text{C}$

– רעש בגלל יציבות נקודת העבודה  $\pm 3^{\circ}\div 10^{\circ}\text{C}$

– חוסר אחידות  $\pm 8^{\circ}\text{C}$

– רגישות/חשיפת יתר  $\pm 8^{\circ}\text{C}$

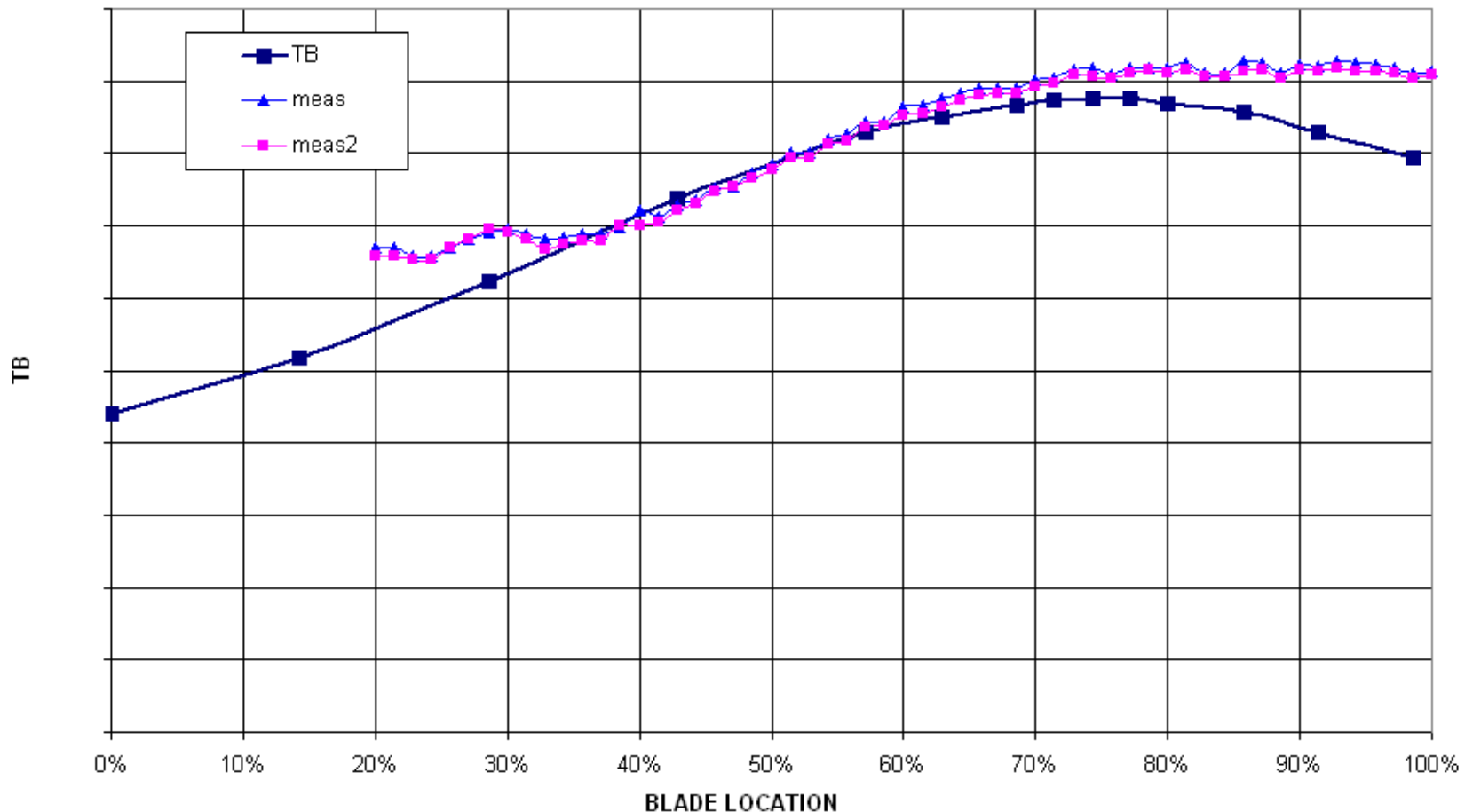
■ ס"ה, ההערכות המוצגות עשויות להיות גבוהות בכ- 15

מ"צ עקב גורמים אקראיים ראשיים



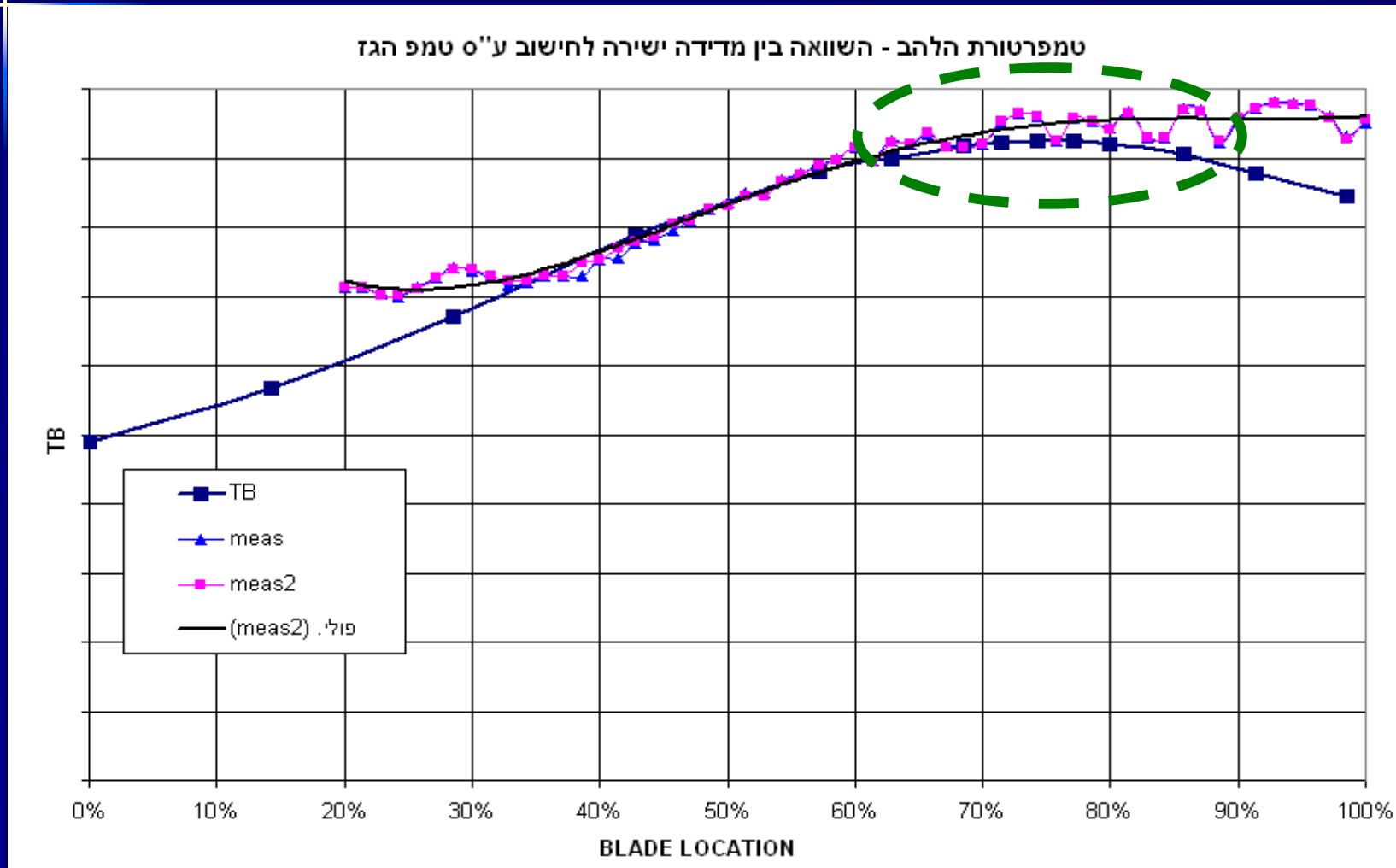
# תוצאות – פרופיל במצב מנוע 1

טמפרטורת הלהב - השוואה בין מדידה ישירה לחישוב ע"ס טמפ הגז



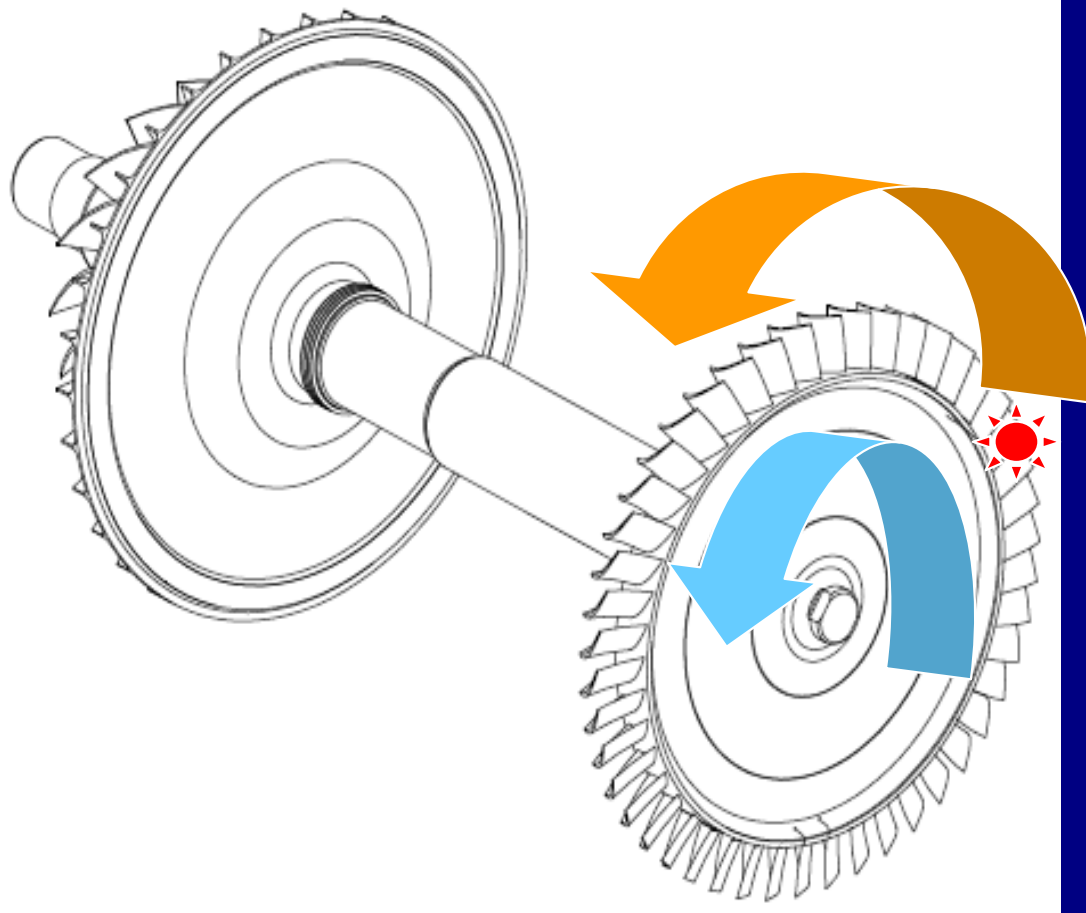


# תוצאות – פרופיל במצב מנוע 2





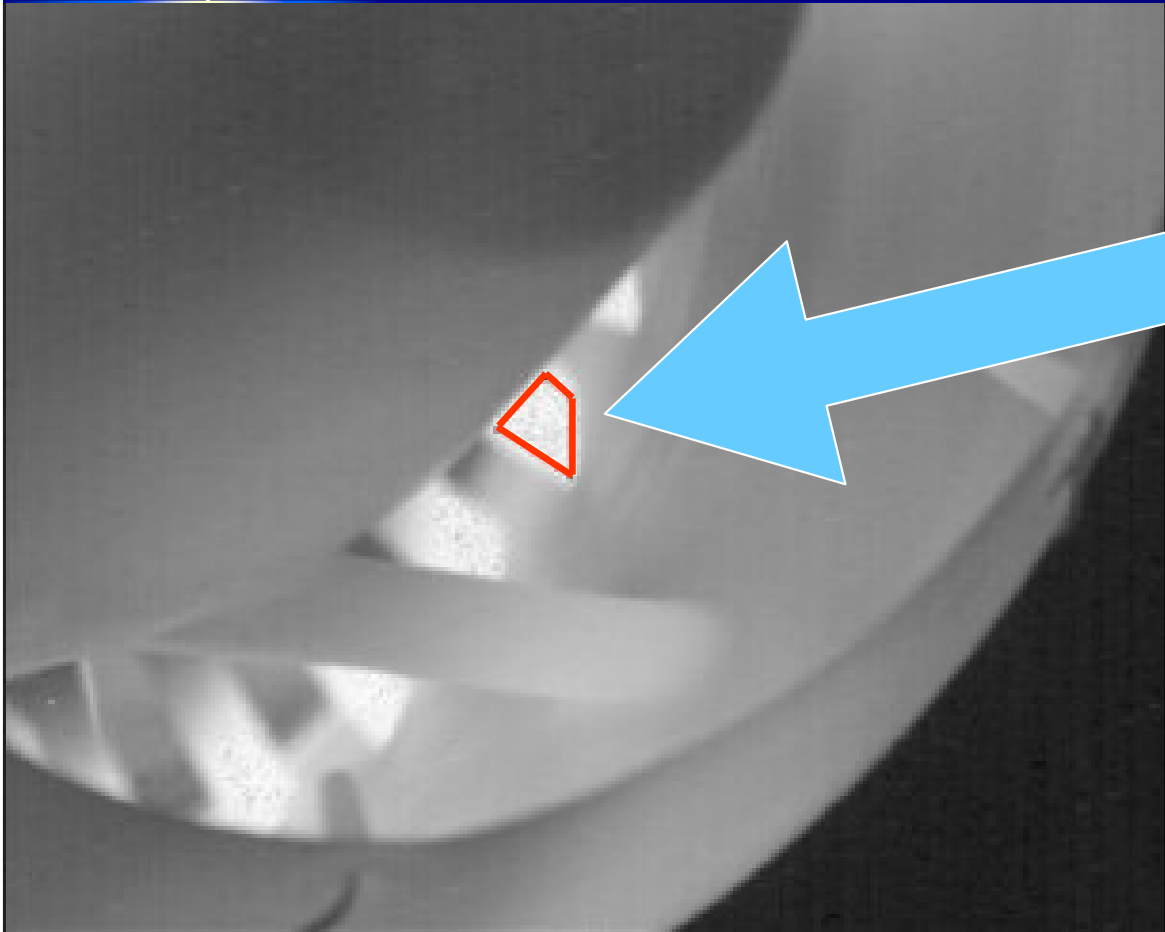
# ROTATING HOT SPOT התופעה



- כאשר קיימת אי אחידות היקפית של פילוג הטמפרטורה המשנה את מיקומה תוך כדי פעולת המנוע מכונה התופעה rotating hot spot
- התופעה עשויה לגרום להחמרה מקומית בתנאי הפעולה של הטורבינה (עומס תרמי גבוה על להבים בודדות)
- גורמים אפשריים - תכנון המנוע, מערכת ההזרקה והמכלול הסב.



# בחינת ההשערה ROTATING HOT SPOT

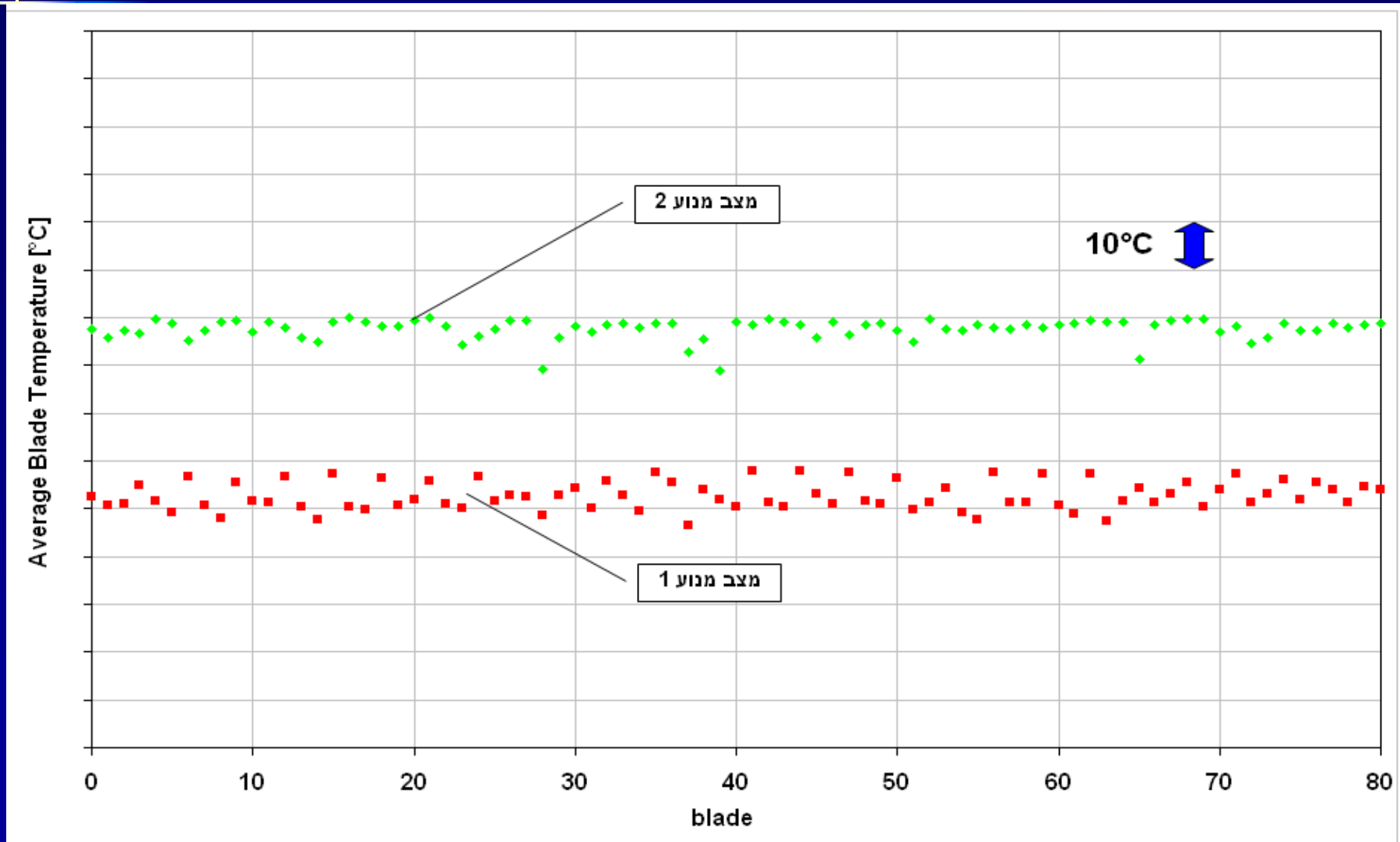


- קצה הלהב הקרוב ל-TIP הוגדר כשטח עניין
- נבדק ממוצע הטמפרטורה בשטח העניין.
- נרשמו דגימות בחשיפות עוקבות.
- שיפור אפשרי ע"י סנכרון המדידות למיקום הציר





# פיזור קטן בטמפרטורת הלהבים לא תומך בהשערה של קיום HOT-SPOT



## מסקנות

- נמצאה התאמה טובה בין הערך המקסימאלי החזוי בלהב לעומת המדידה הישירה.
- ההערכה הראשונית לערך המקסימאלי הייתה אופטימית.
- מיקום הערך המקסימאלי מעבר ל- 70% של הלהב, תואם לחישובי אורך חיים
- המדידה הצדיקה את מקדם הביטחון לזחילה ועייפות שנבחר בתכן עבור אורך חיים
- התקבלה אינדיקציה שלילית לקיום תופעת rotating hot spot במנוע

## סיכום

- הוצג תהליך אימות נתוני התכן עבור טורבינה
- צבעים רגישים לטמפרטורה מאפשרים אינדיקציה ברזולוציה מוגבלת במצב מנוע נתון
- במדידה פירומטרית-רדיומטרית מתקבל מיפוי טמפרטורת הלהב של המנוע בזמן פעולה במצבי מנוע משתנים
- כיוול ערך האמיסיביות בתחום הערכים הנמדד חיוני, בנוסף לפרמטרי רעש וקרינת רקע
- ניתן לשפר את הדיוק והיישומים ע"י פיתוח נוסף.

- בלמ"ס -

מנועי בית שמש בע"מ אגף הפיתוח



**תודה.**