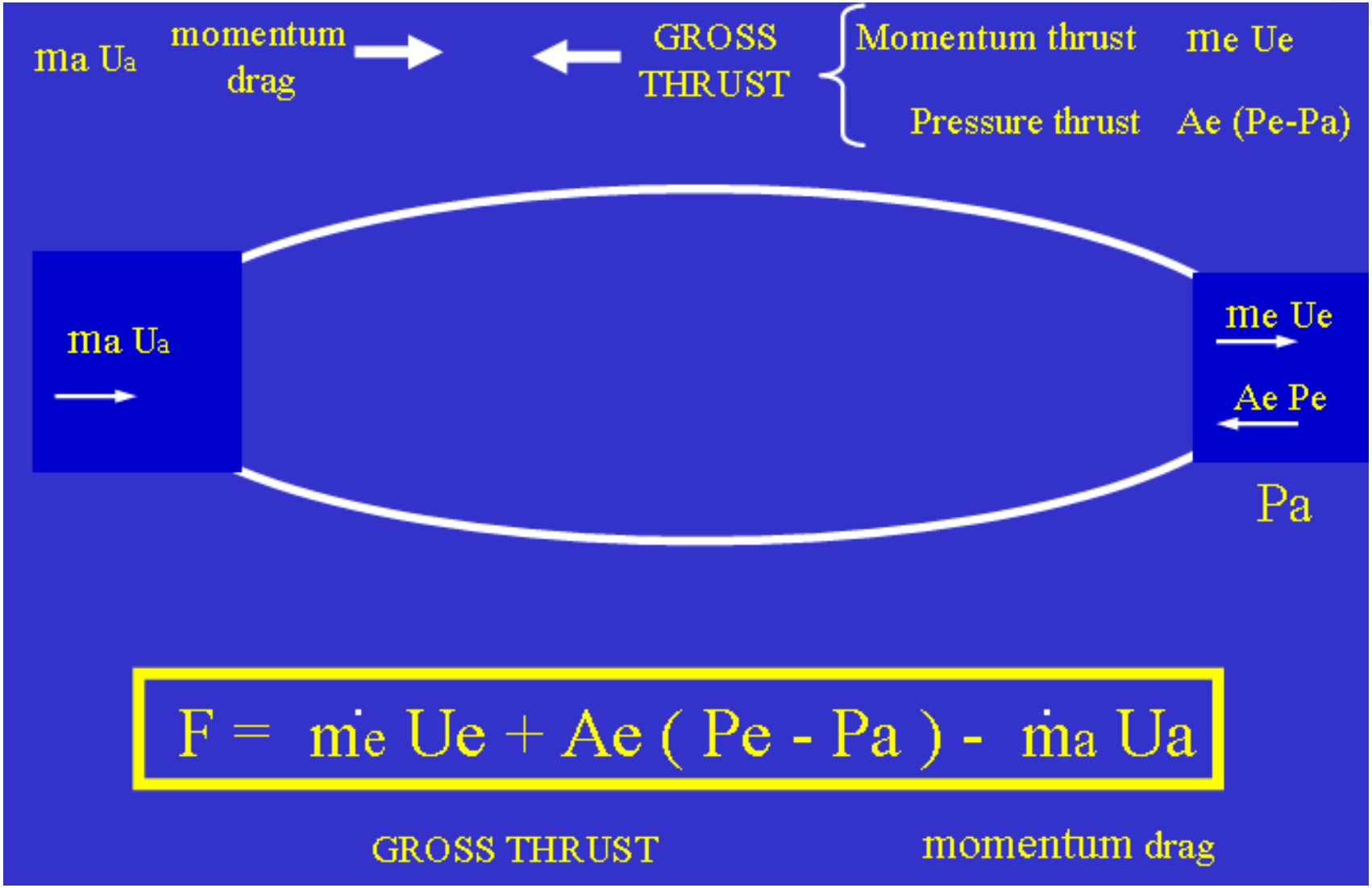
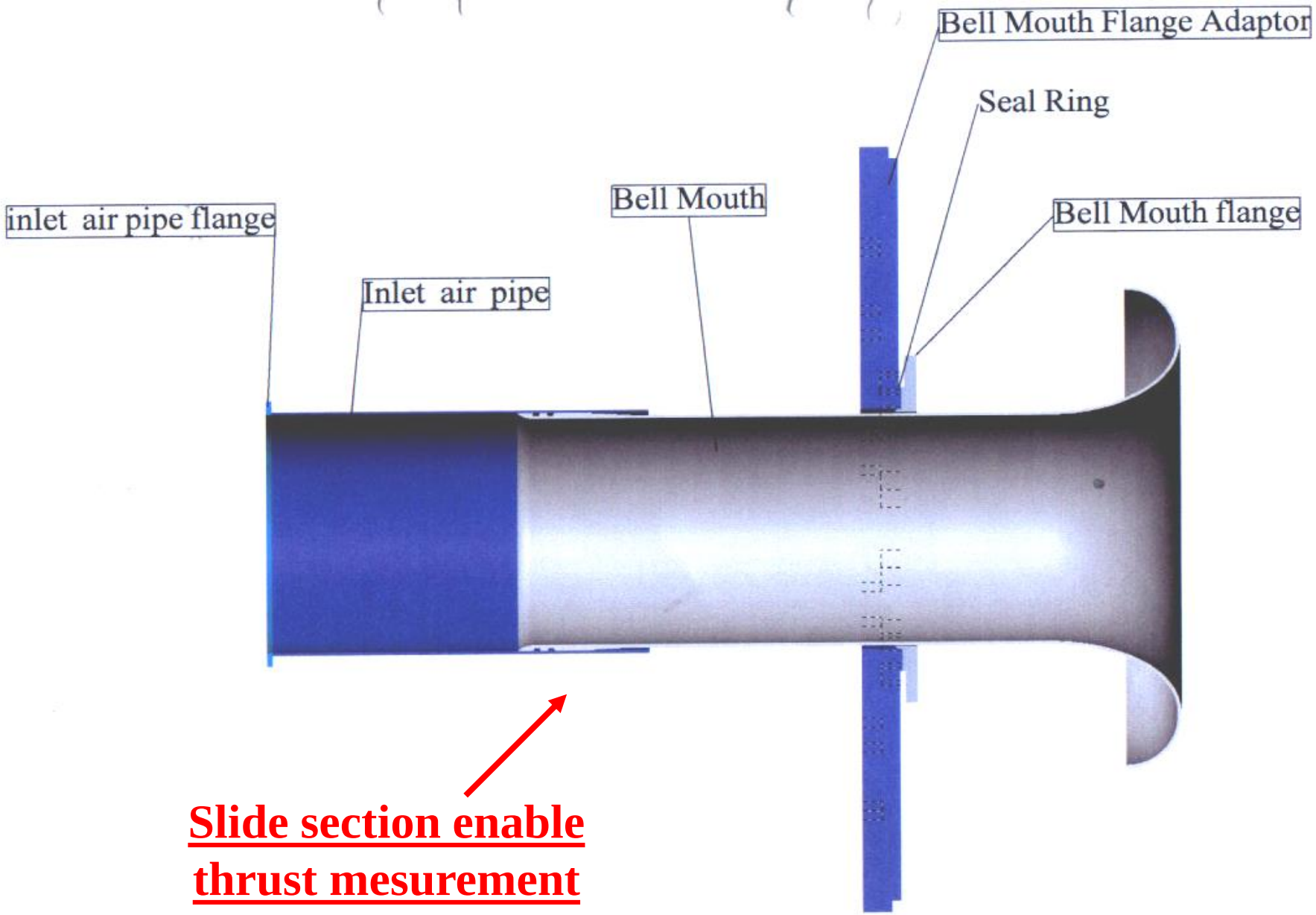
מדידת דחף בתא גובה
ופענוח ניסויי מנוע
טורבו סילון קטן

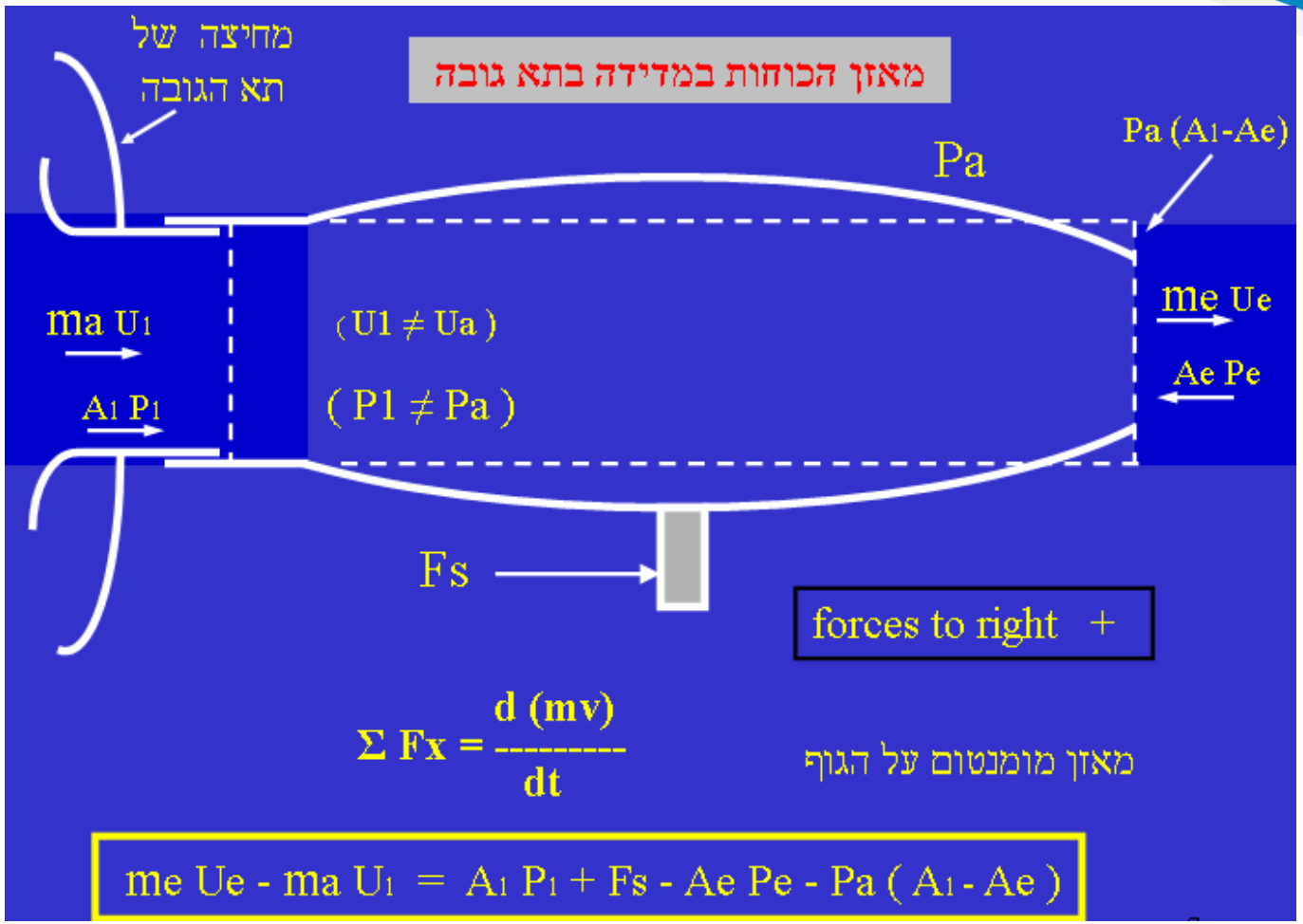
הכינו : יצחק גרינברג
סבלי חוסיד


ma Ua
momentum drag
GROSS THRUST
Momentum thrust
me Ue
Pressure thrust
Ae (Pe-Pa)
ma Ua
me Ue
Ae Pe
Pa
F = ṁe Ue + Ae (Pe - Pa) - ṁa Ua
GROSS THRUST
momentum drag

חטיבת מנוע



Slide section enable thrust mesurement



GROSS THRUST

$$me\ Ue + Ae\ (Pe - Pa) = ma\ U1 + Fs + A1(P1 - Pa)$$

המסקנה: מדידת הדחף בתא גובה אינה דחף המנוע

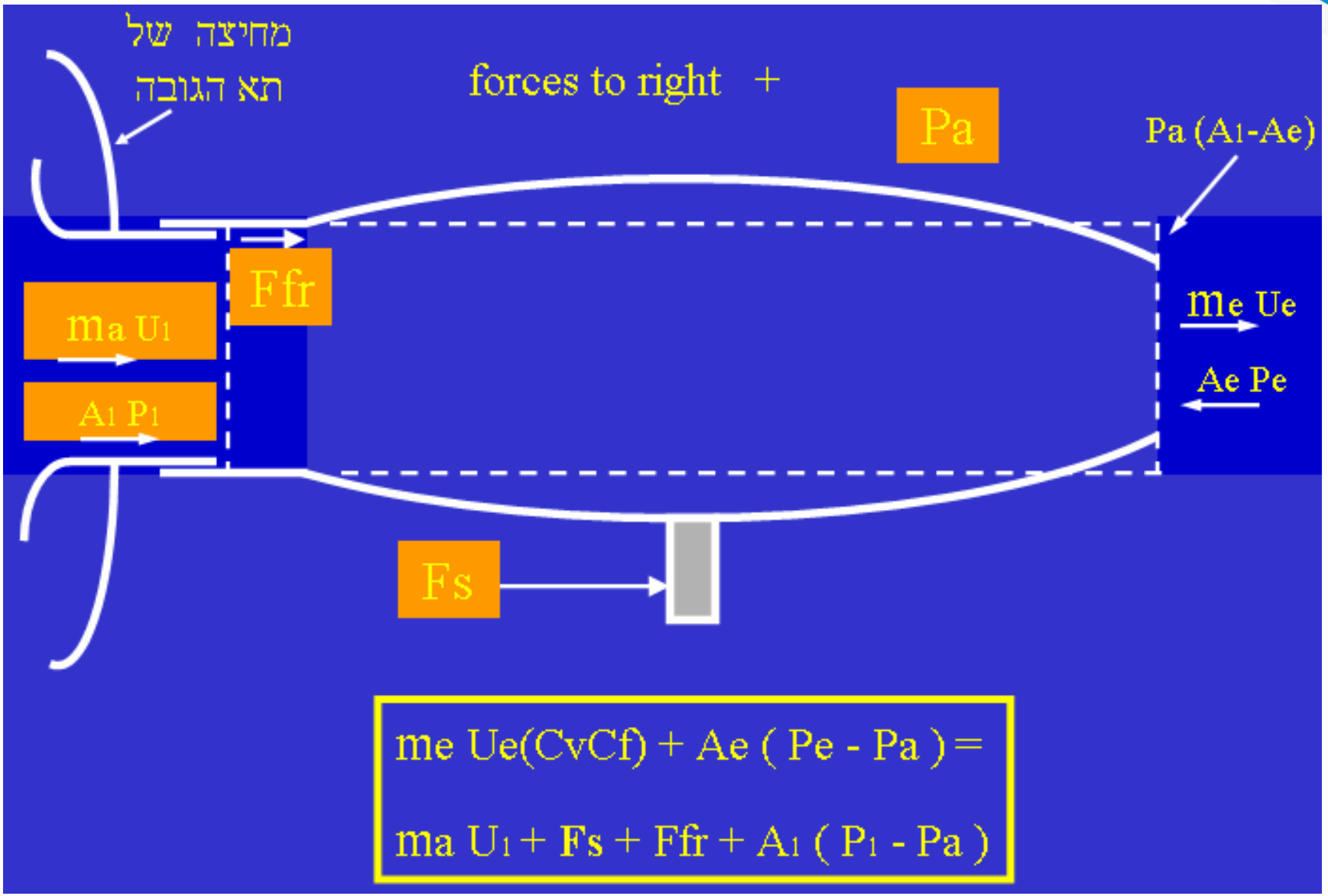
המדידות שנדרש לבצע בניסוי בתא גובה

1. ספיקת אוויר אל המנוע ..... ma
2. מדידת לחץ טוטלי בכונס ..... Pt
3. מדידת לחץ סטטי בכונס ..... Ps
4. מדידות לחץ תא ניסוי מסביב למנוע ..... Pa
5. מדידת טמפרטורה טוטלית בכונס ..... Tt
6. דחף של המערכת בניסוי ..... Fs

מתוצאות המדידה מחושב דחף gross thrust

Gross thrust - ma Ua = דחף נטו

מאזן הכוחות במדידה בתא גובה



חישוב דחף מנוע בתא גובה

$$F_{net} = \dot{m}_a \left(\frac{2\gamma R T_2}{\gamma - 1} \right)^{1/2} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} - \sqrt{1 - \left(\frac{p_0}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right] + A_2 \left(p_2 - p_0 \right) + F_s$$

כאשר:

F_{net} – דחף נטו, ניוטון

m – ספיקה (a – אויר, f – דלק)

T – טמפרטורה טוטלית, K

γ – יחס חומים סגוליים לאוויר בטמפ' T_2

R – קבוע הגזים לאוויר בטמפרטורה T_2

p – לחץ סטטי, Pa

P – לחץ טוטלי, Pa

A – שטח, מ"ר

Fs – מדידת דחף, ניוטון

הנחת כונס אידיאלי:

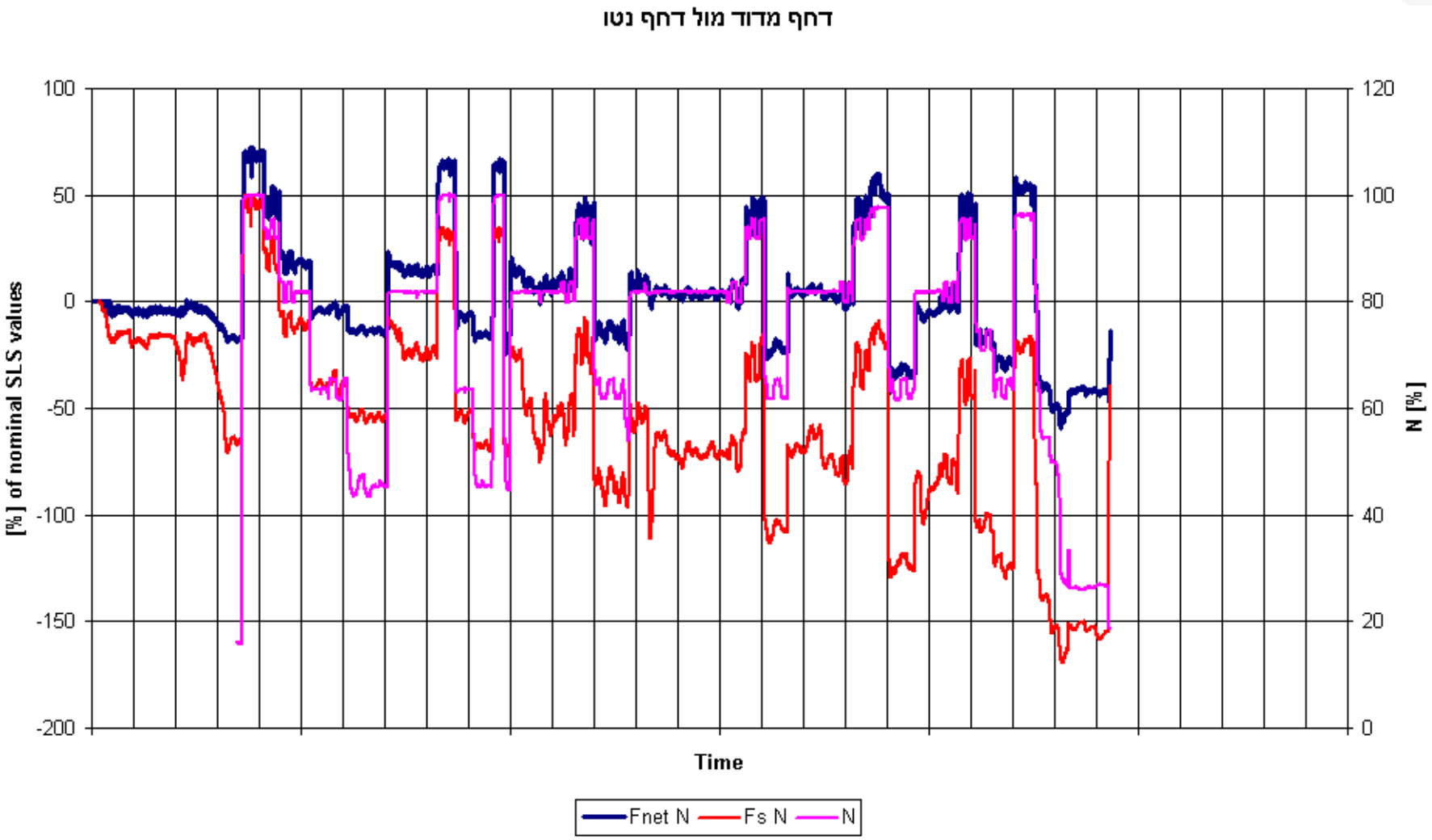
$P_2=P_0$, $T_2=T_0$

D_a זניח

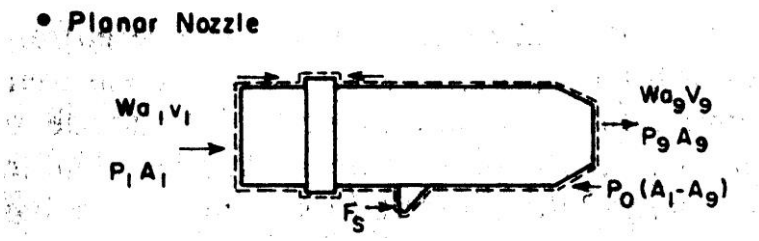
תחנות:
0 - זרימה בלתי מופרעת
2 - בתעלת הכונס

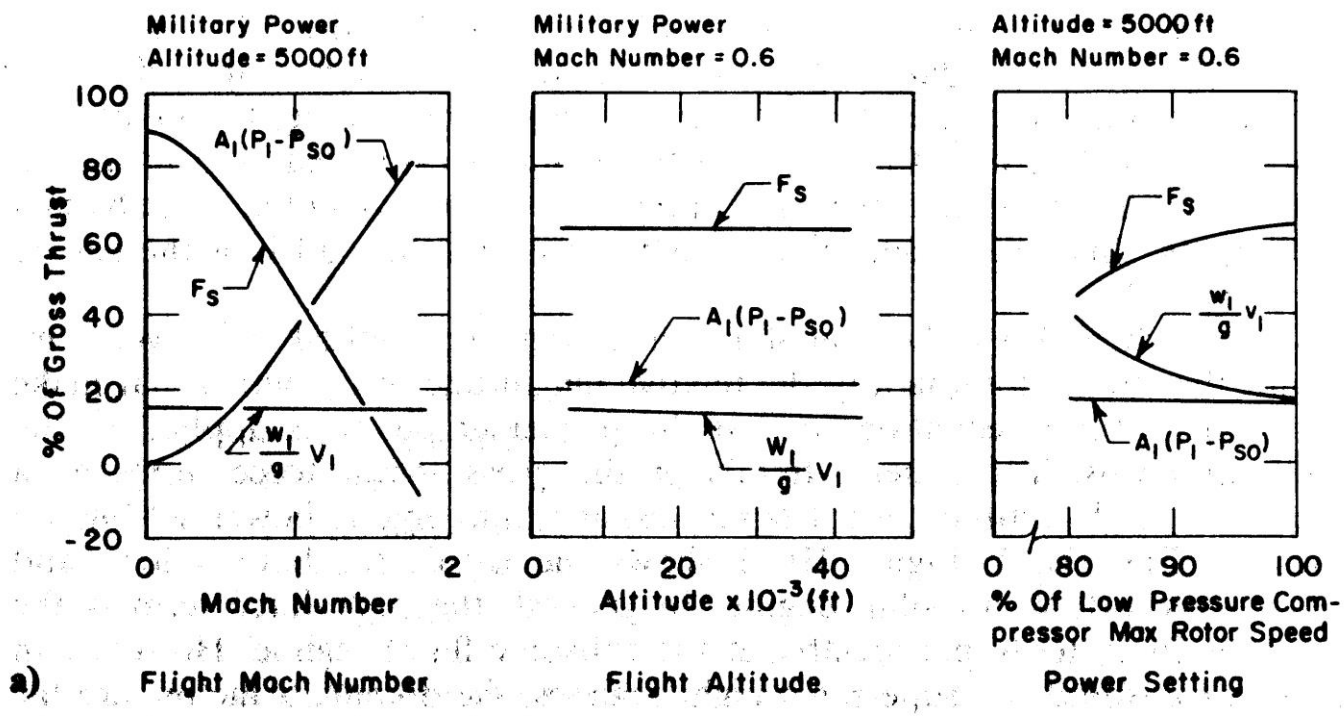
תיקוני דחף ושגיאות מדידה - השפעה על תוצאות ניסויים

חטיבת מנוע


דחף מדוד מול דחף נטו
100
50
0
-50
-100
-150
-200
[%] of nominal SLS values
120
100
80
60
40
20
0
N [%]
Time
Fnet N
Fs N
N

תרומה של רכיבים בחישוב דחף





רגישות של חישוב דחף לדיוק מדידות

$$F_{net} = \dot{m}_a \left(\frac{2\gamma R T_2}{\gamma - 1} \right)^{1/2} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} - \sqrt{1 - \left(\frac{p_0}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right] + A_2 \left(p_2 - p_0 \right) + F_s$$

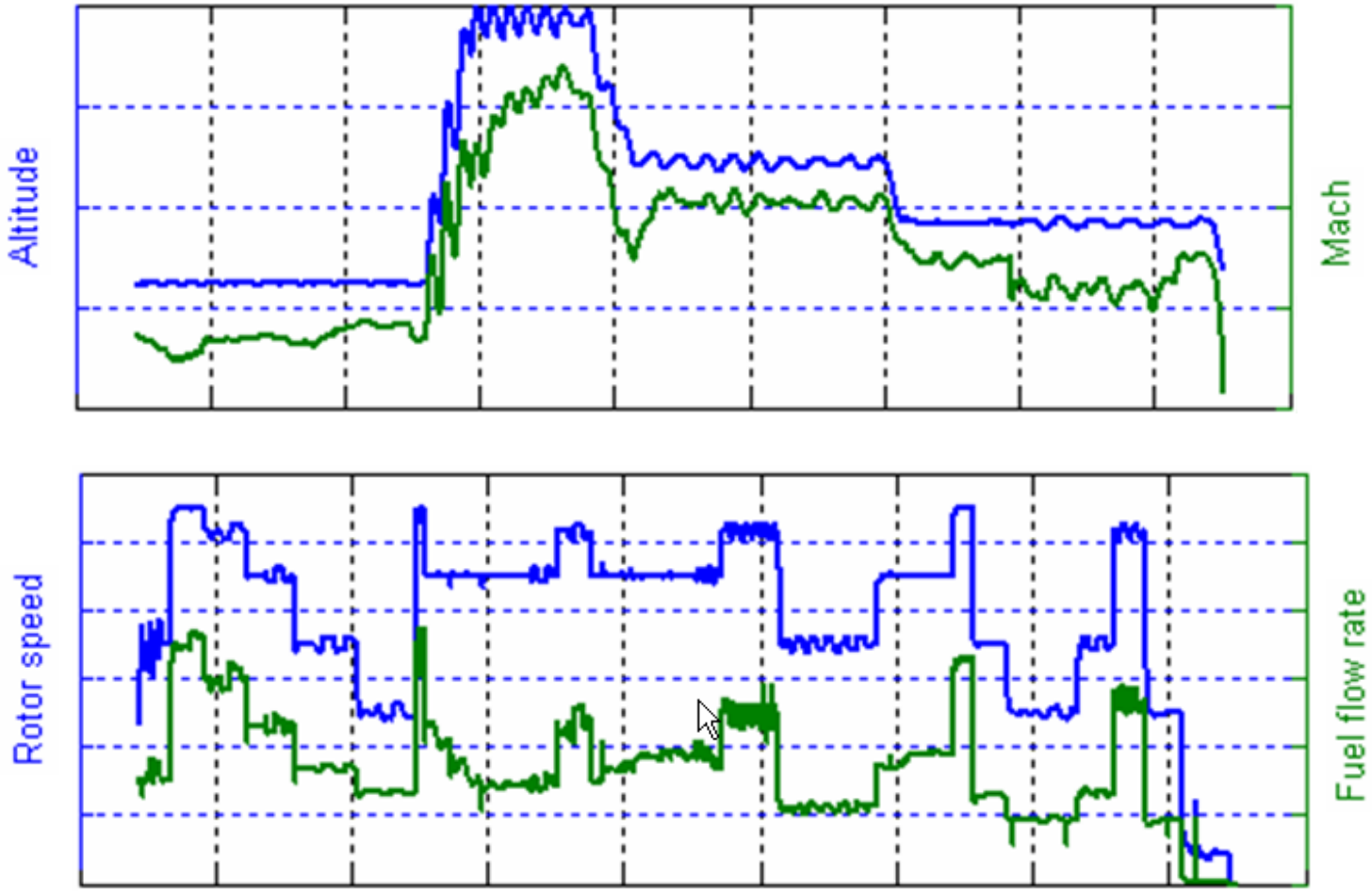
$$\frac{\Delta F_{net}}{F_{net}} = b_1 \cdot \frac{\Delta \dot{m}_a}{\dot{m}_a} + b_2 \cdot \frac{\Delta T_2}{T_2} + b_3 \cdot \frac{\Delta p_2}{p_2} + b_4 \cdot \frac{\Delta P_2}{P_2} + b_5 \cdot \frac{\Delta p_0}{p_0} + b_6 \cdot \frac{\Delta F_s}{F_s}$$

	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
Small engine	-0.38	-0.19	0.77	2.71	-2.75	0.66
Large engine	-0.66	-0.33	-0.05	2.52	-1.16	0.35

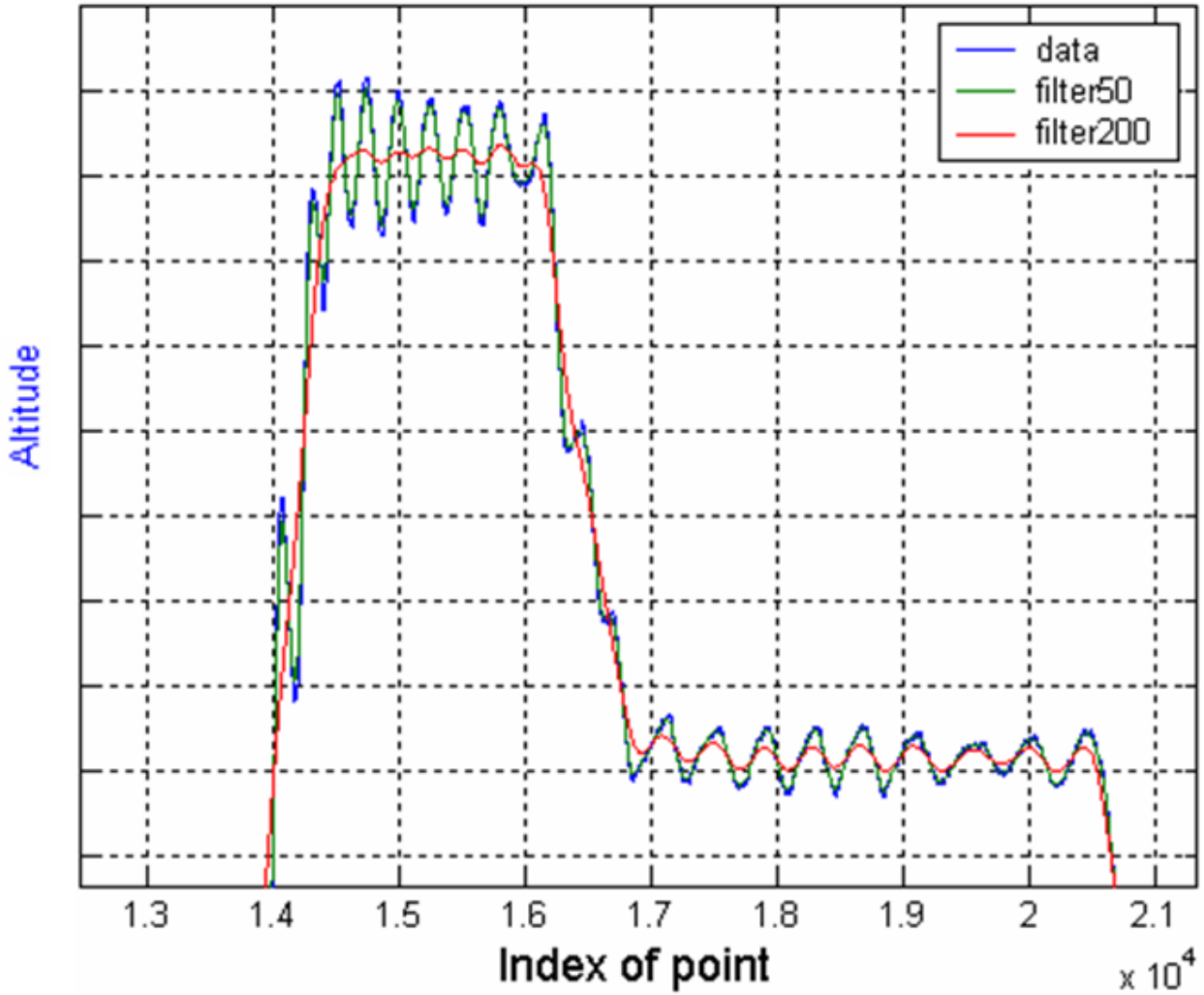
פענוח תוצאות ניסוי (תהליך)

תוצאות ניסוי טיפוסי

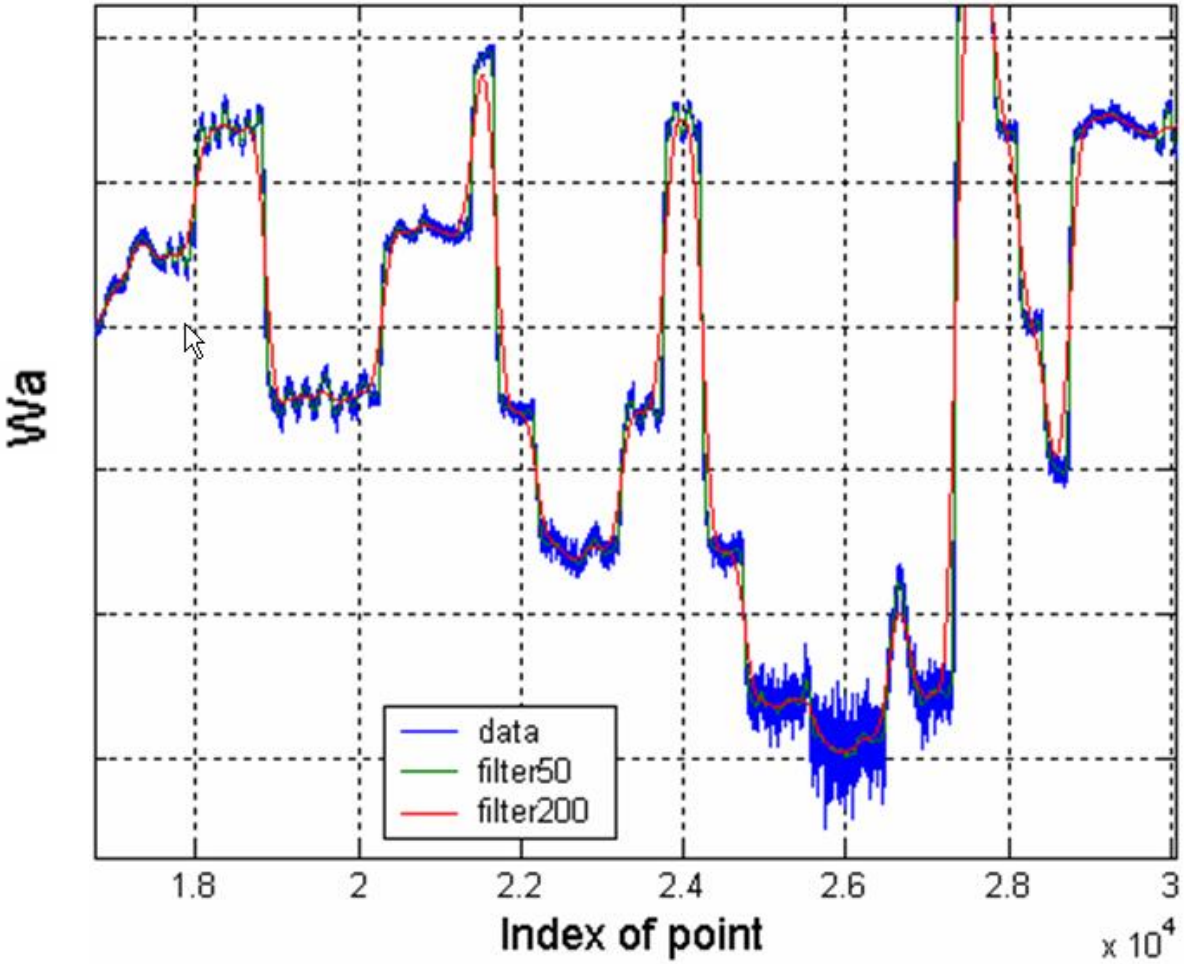
למעלה - תנאי תא גובה, למטה – תנאי מנוע.



סינון תוצאות הניסוי



סינון תוצאות הניסוי (המשך)

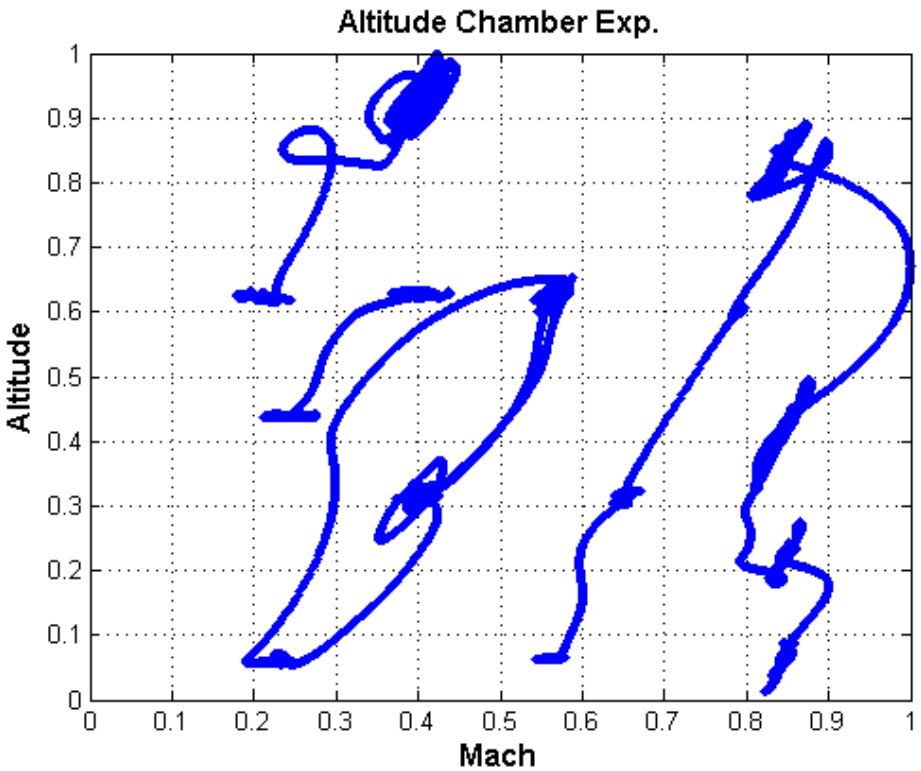


נקודות קבועות במעטפת העבודה

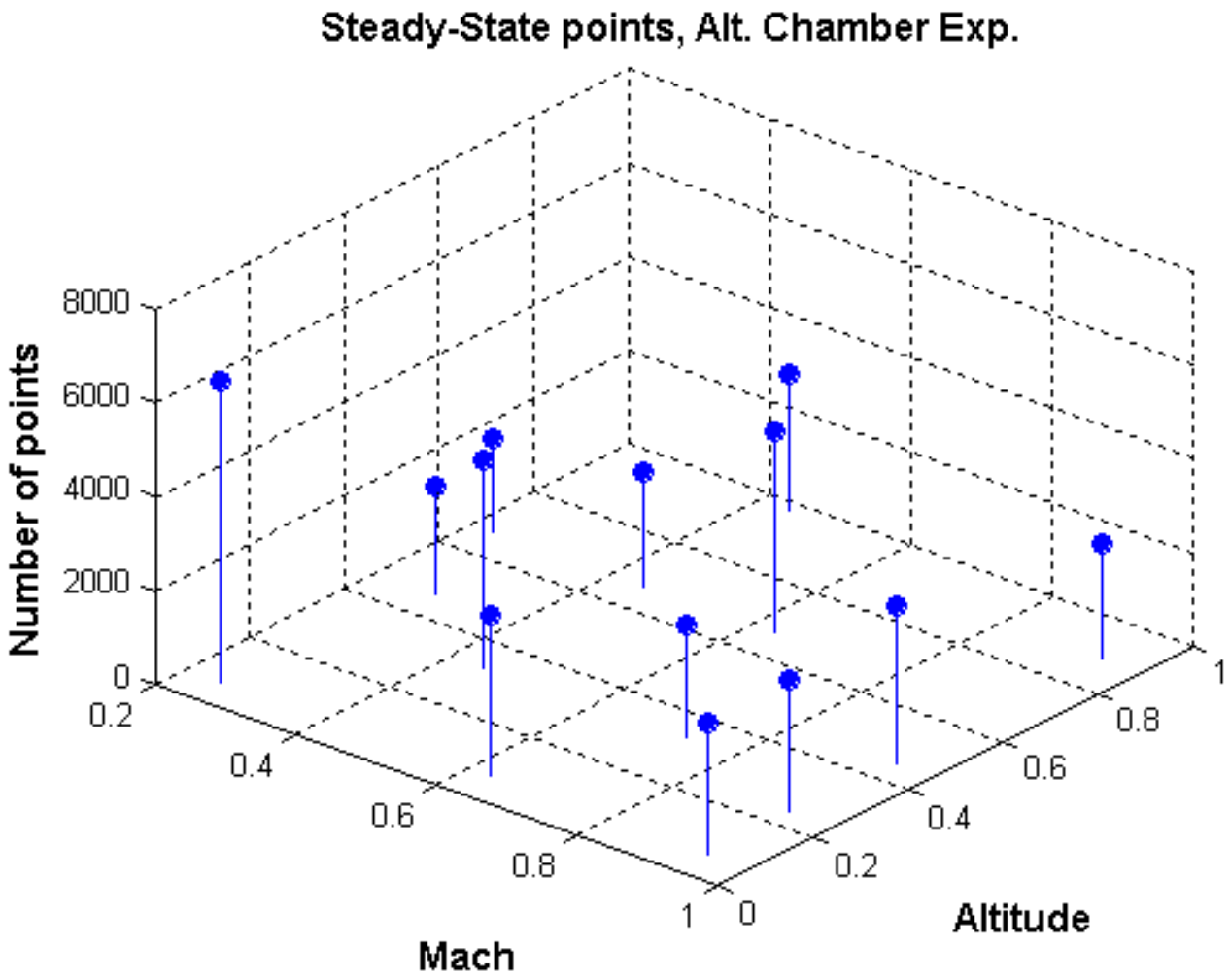
$$\delta N = \frac{N(i+1) - N(i)}{N_{\max}}$$

$$\delta W_f = \frac{W_f(i+1) - W_f(i)}{W_{f,\max}}$$

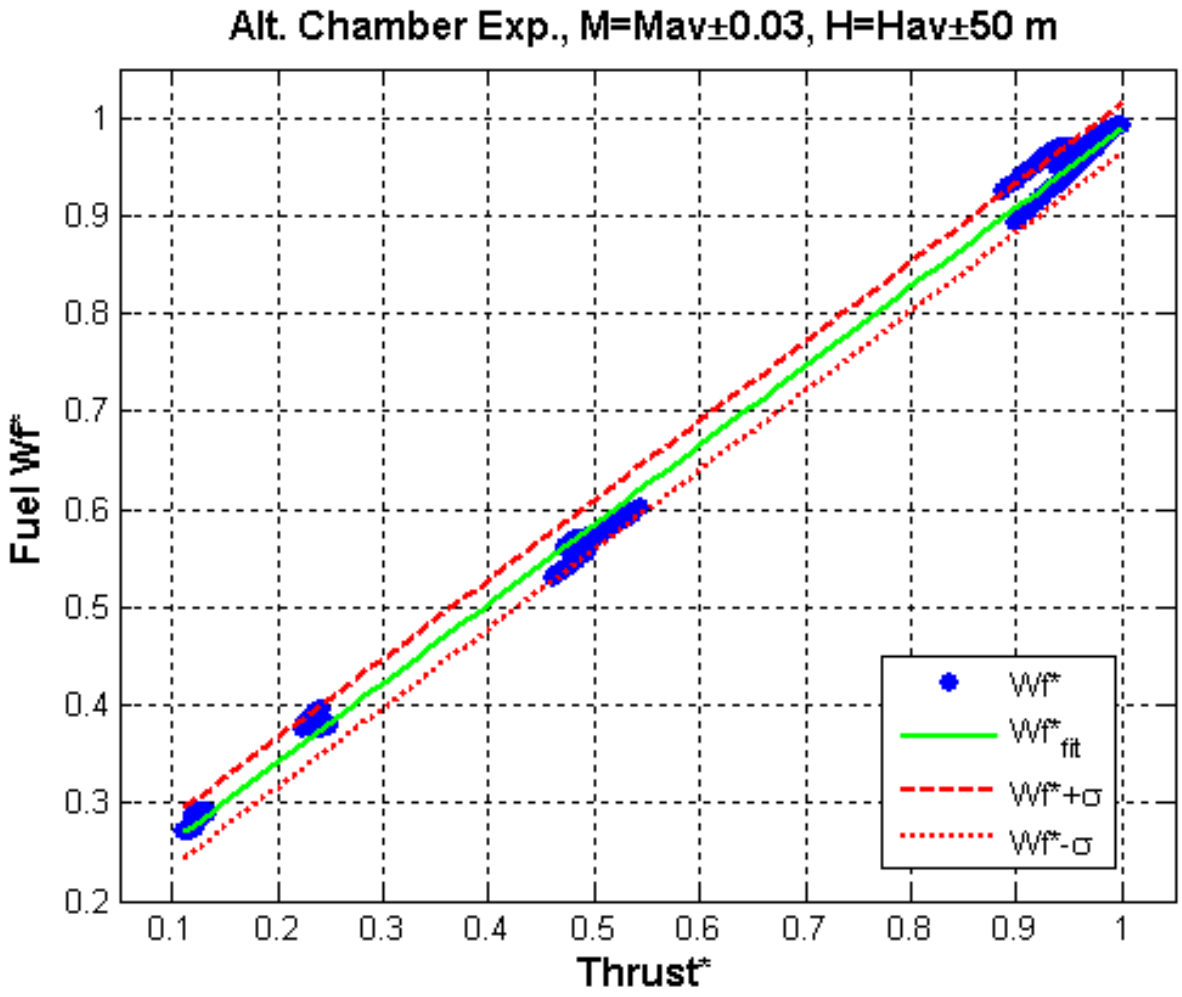
$$\max\left(|\delta N|, |\delta W_f|\right) < index_{\substack{steady \\ state}}$$



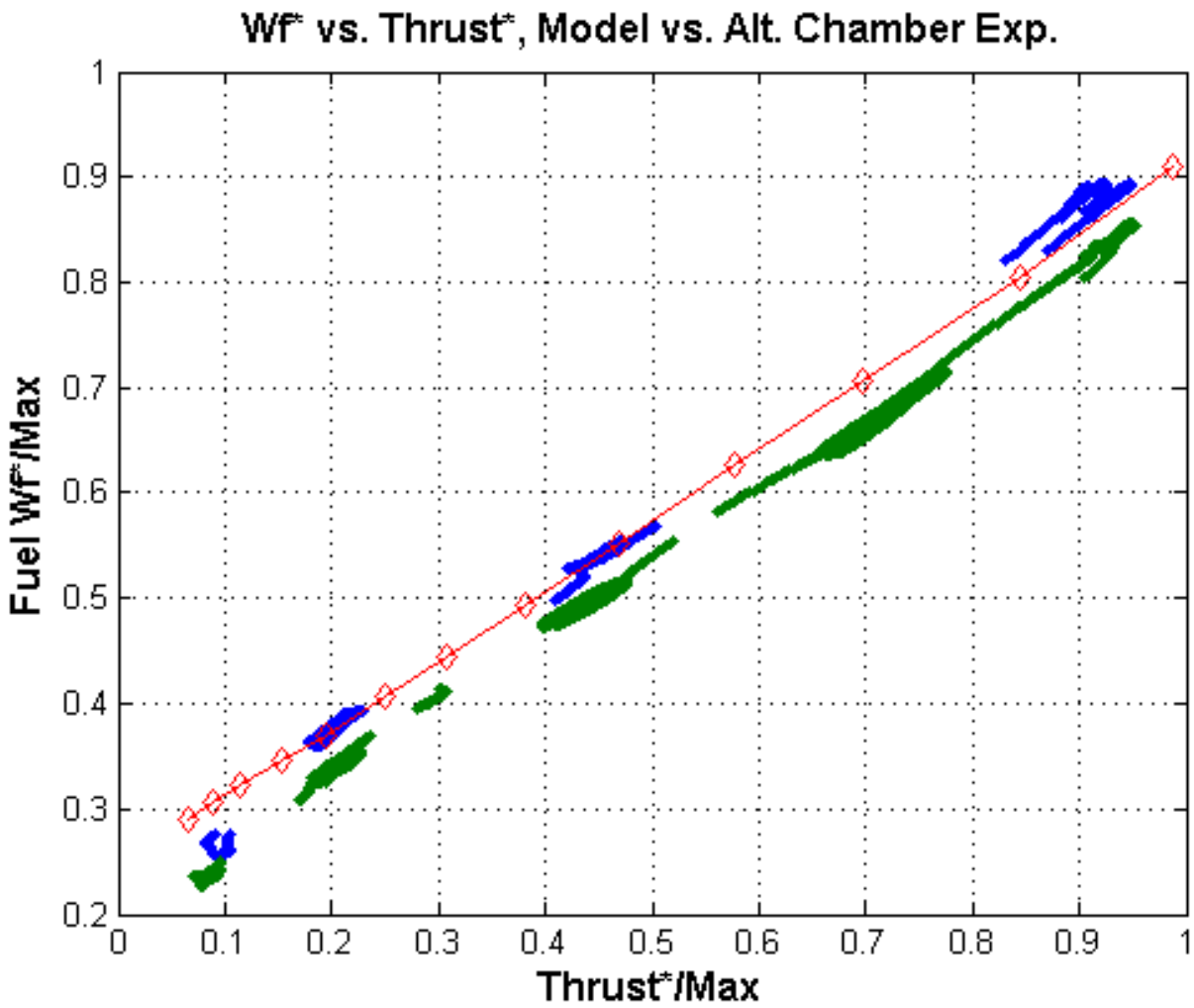
ריכוז נקודות לפי גובה ומספר מאך



ספיקת דלק כנגד דחף (מתוקן)



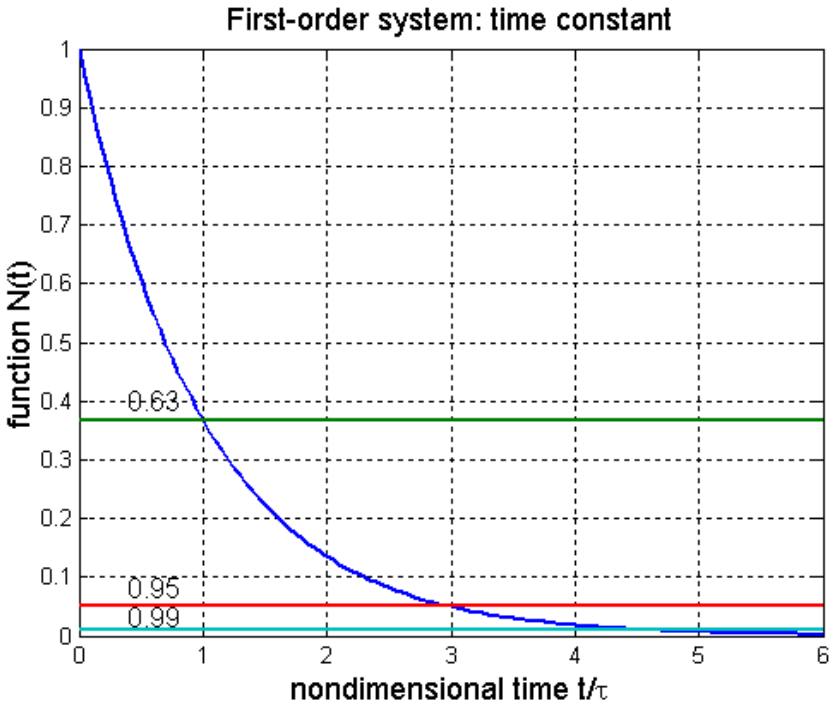
השוואה בין מודל לניסוי תא גובה



לקחים מפענוח תוצאות ניסויים בתא גובה

- הקפדה על דיוק מדידות קריטיות
- מיקום נכון של נקודות מדידה (!)
- סינון נתונים מבוקר
- דרוש כיול דק מנוע עבור כל מנוע (למנועים קטנים)
- תרגום תוצאות מניסוי לתנאי טיסה אינו ישיר
- תהליך מורכב, לכן נדרשת "עין נוספת" בכל צעד

קריטריון מצב מתמיד



מערכת מסדר ראשון:

$$\begin{cases} \tau \dfrac{dN}{dt} + N = 0 \\ N(0) = N_0 \end{cases}$$

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau_{63\%} = 1$$

$$\tau_{95\%} = 3$$

$$\tau_{99\%} = 4.6$$

$$t_{\substack{steady-\\state}} = \left| \frac{N}{dN/dt} \right| = \left| \frac{N_i \cdot \Delta t}{N_{i+1} - N_i} \right| \geq (3 \div 4.6)\tau$$