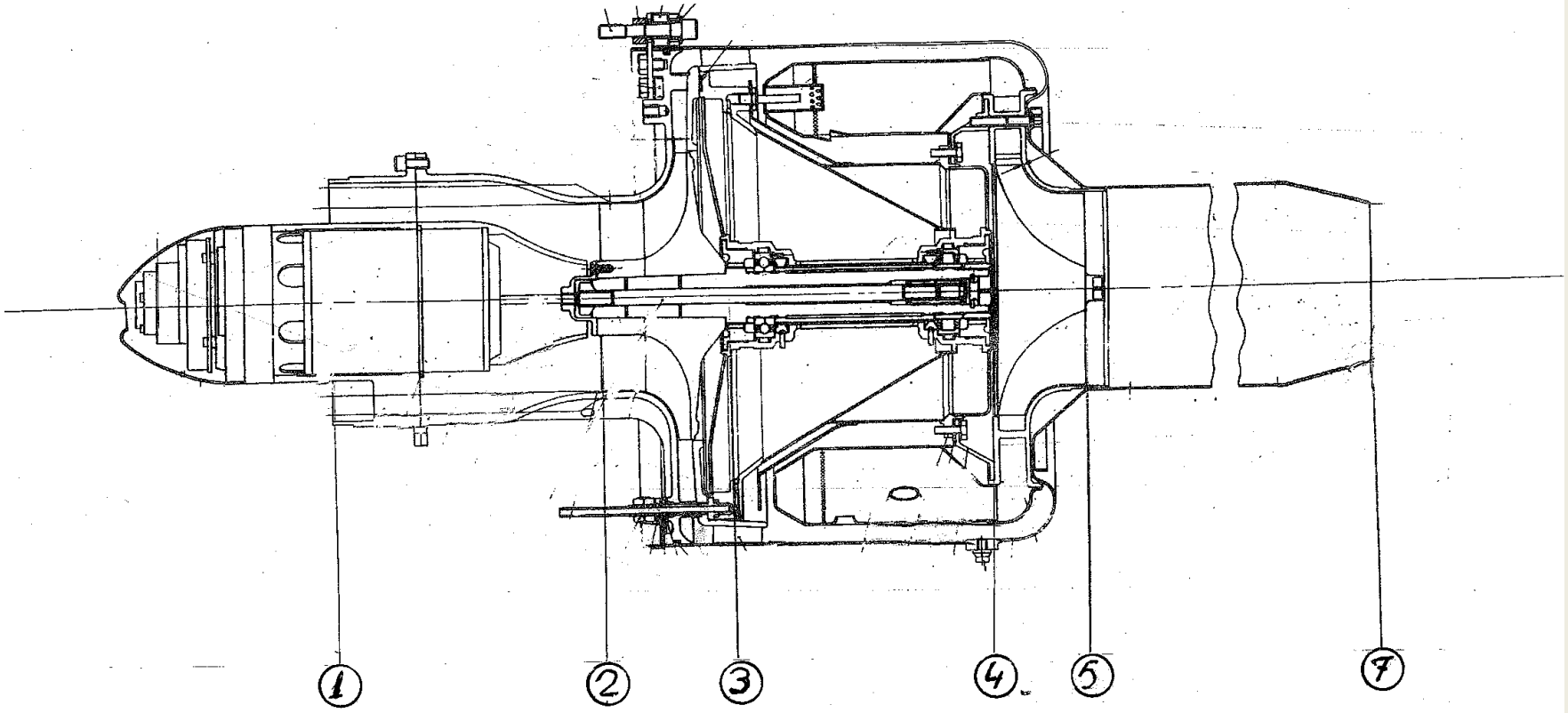
השפעת זווית סחרור זרימה ביציאה מטורבינה ומספר רינולדס על ביצועי מנוע קטן

מיכאל ליכטצינדר

מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

תחנות המנוע



1 רקע

בדרך כלל דק מנוע סילון נבנה בשתי הנחות הבאות:

א) זרימה טורבולנטית בכל רכיבי המנוע,

ב) זווית סחרור זרימה ביציאה מטורביה (Swirl Angle) מאופסת.

ההנחה א' נכונה בגובה טיסה נמוך. בגובה רב ומהירות נמוכה, הזרימה הטורבולנטית לעתים קרובות מתקרבת ללמינרית בגלל הגדלת כוח צמיגות (viscosity). החיכוך (ובהתאם הפסד לחץ) גדל והאפקט פוגע בביצועי המנוע. התופעה זו מתאפיינת במספר רינולדס אשר מיצג את יחס הכוח האינרציאלי לכוח הצמיגות (חיכוך) :

$$\mathrm{Re} = \frac{Inertial\ \ forces}{Viscous\ \ forces} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad [\dim],$$

μ is the dynamic viscosity of the fluid,

$\nu = \dfrac{\mu}{\rho}$ is the kinetic viscosity:

תיקון מודל רכיבי מנוע מבוצע אם $\mathrm{Re} < \mathrm{Re}_{crit}$.

ההנחה ב' מביאה להקטנת הפסדי לחץ בצנ"פ, וכתוצאה, לשגיאת חישוב ביצועי המנוע.

נשאלת השאלה: מהי השפעה של שתי ההנחות אלו על ביצועי מנוע קטן?

מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

2 מטרת העבודה

א) פיתוח דק סטטי למנוע קטן הכולל:

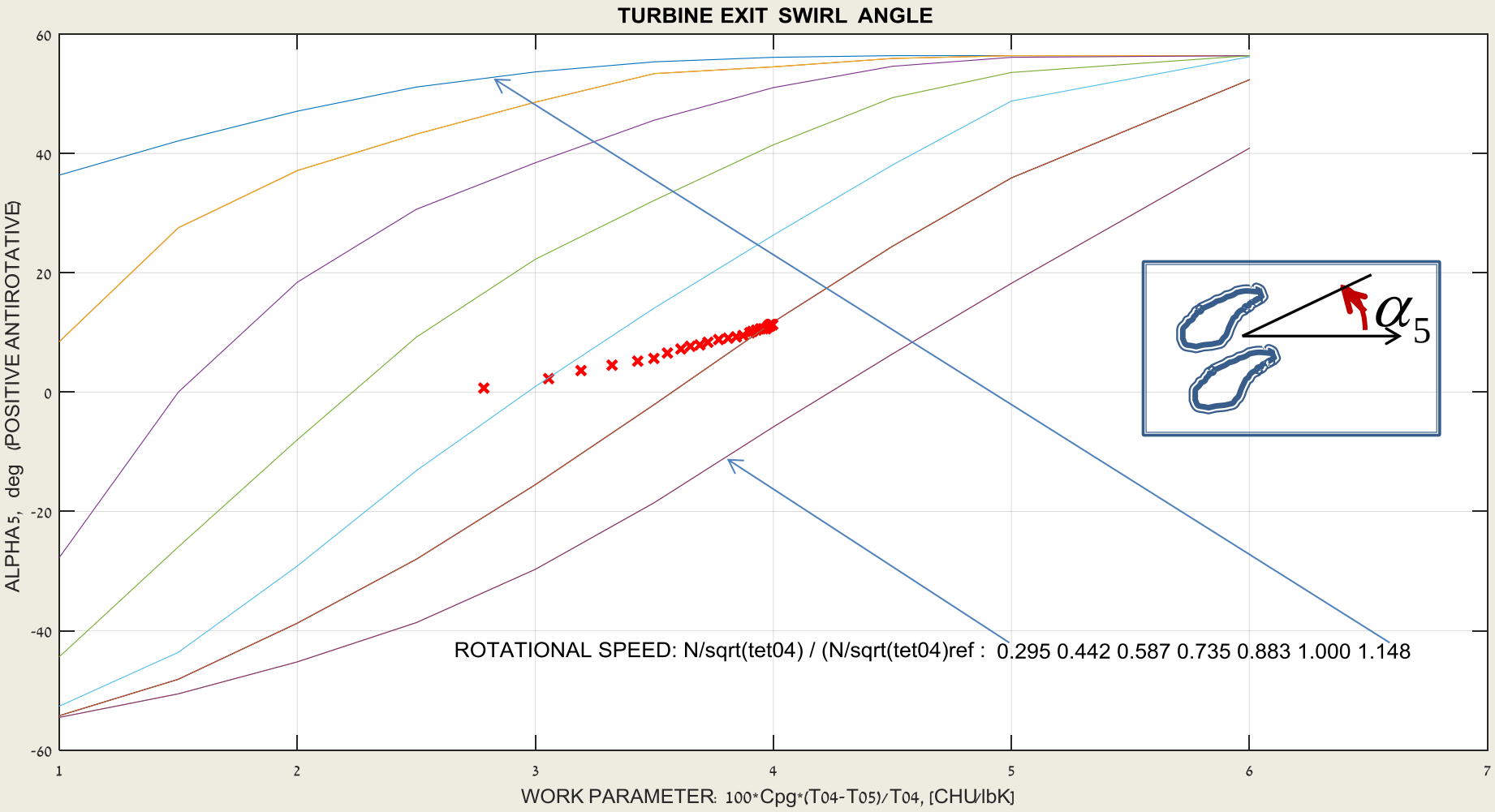
- תיקון בגובה רב בהתאם למספר רינולדס
- מפת זווית סחרור זרימה ביציאה מטורבינה.

ב) בדיקת הפעולה בגובה רב וזווית סחרור זרימה ביציאה מטורבינה על ביצועי המנוע.

מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

3 מודל מתמטי של המנוע

3.1 מפת זווית סחרור זרימה ביציאה מהטורבינה



מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

חישוב הפסדי לחץ בצנ"פ כפונקצית של זווית סחרור זרימה ביציאה מהטורבינה:

$$\frac{P_{07}}{P_{05}} = 1 - \lambda_{57} \cdot 0.5 \cdot \rho_5 \cdot V_5^2 / P_{05}$$

Dynamic head

זווית סחרור זרימה ביציאה מטורבינה

$$\lambda_{57} = \lambda_{57,ref} / \cos^{4.5}\left(\alpha_5 - \alpha_{5,ref}\right)$$

$$0.5 \cdot \rho_5 \cdot V_5^2 = \frac{0.5 \cdot \gamma_g \cdot M_{5a}^2 \cdot P_{05}}{\left(1 + 0.5 \cdot \left(\gamma_g - 1\right) \cdot M_{5a}^2\right)^{\frac{\gamma_g}{\gamma_g - 1}}}$$

$$M_{5a}^2 = \left(\frac{\dot{m} \cdot (1+f)}{A_{5a}}\right)^2 \cdot \frac{R}{\gamma_g} \cdot \frac{T_{05}}{P_{05}^2} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_g - 1}{2} \cdot M_{5a}^2\right)^{\frac{\gamma_a + 1}{\gamma_a - 1}}$$

$$\lambda_{57,\mathrm{ref}} = 0.25 \qquad \alpha_{5,\mathrm{ref}} = 0$$

מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

3.2 תיקון מודל מדחס בזרימה למינרית

$$If\ \mathrm{Re}_2 < \mathrm{Re}_{2,crN}:$$

$$\eta_{c,corr} = 1-(1-\eta_c)\cdot\left(\frac{\mathrm{Re}_2}{\mathrm{Re}_{2,crN}}\right)^b, \quad b=-0.15$$

$$\left(\frac{P_3}{P_2}\right)_{corr} = \left[\frac{\eta_{c,corr}}{\eta_c}\cdot\left(\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{\gamma_a-1}{\gamma_a}}-1\right)+1\right]^{\frac{\gamma_a}{\gamma_a-1}}$$

$$\mathrm{Re}_2 = \frac{V_{tip}\cdot D_{tip}\cdot \rho_2}{\mu_2}$$

$$\mathrm{Re}_{2,crN} = \mathrm{Re}_{2,cr}\cdot\frac{N}{N_{ref}}, \quad \mathrm{Re2crit}=5.21\cdot 10^6.$$

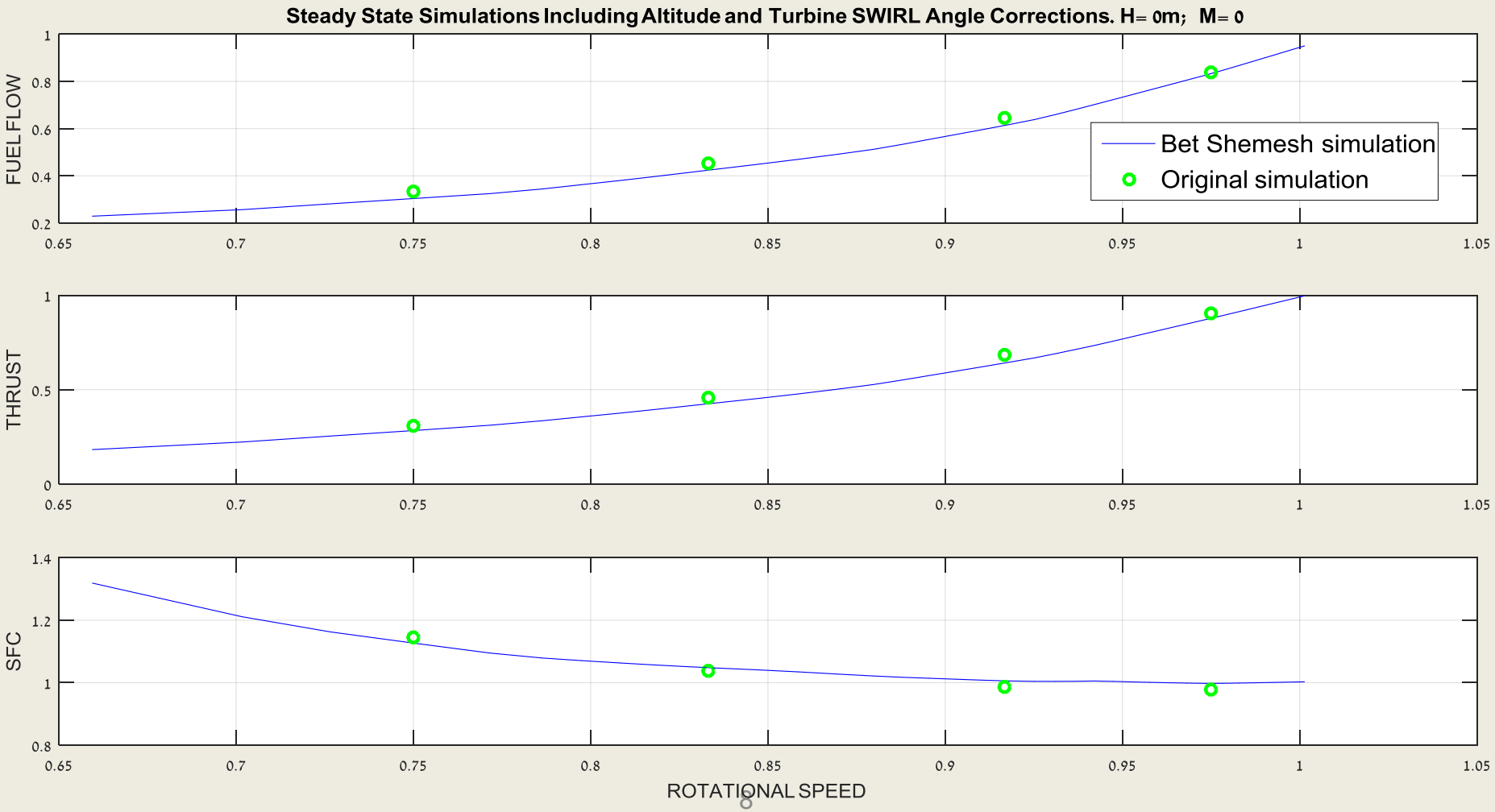
$$\mu_2 = \frac{1.5105\cdot 10^{-6}\cdot T_2^{1.5}}{T_2+120} \quad [T_2]=K, \quad [\mu]=\frac{Kg}{m\cdot s}$$

באופן דומה בוצע תיקון מודל כונס, טורבינה וצנ"פ בזרימה למינרית.

מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

4 השוואה בין דק מב"ש לדק היצרן במצב מתמיד בגובה פני הים

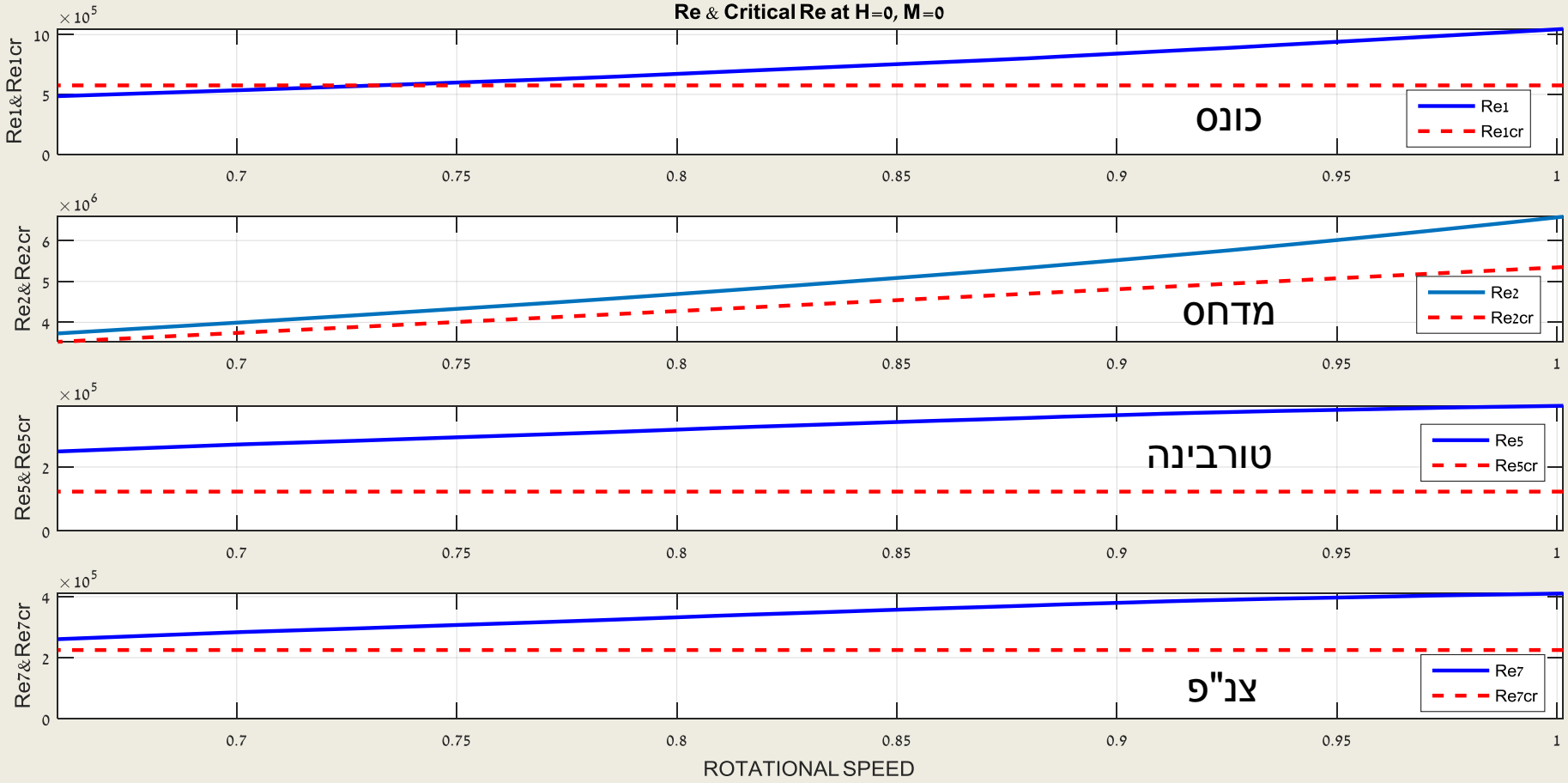
ספיקת דלק, דחף ו-SFC



מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

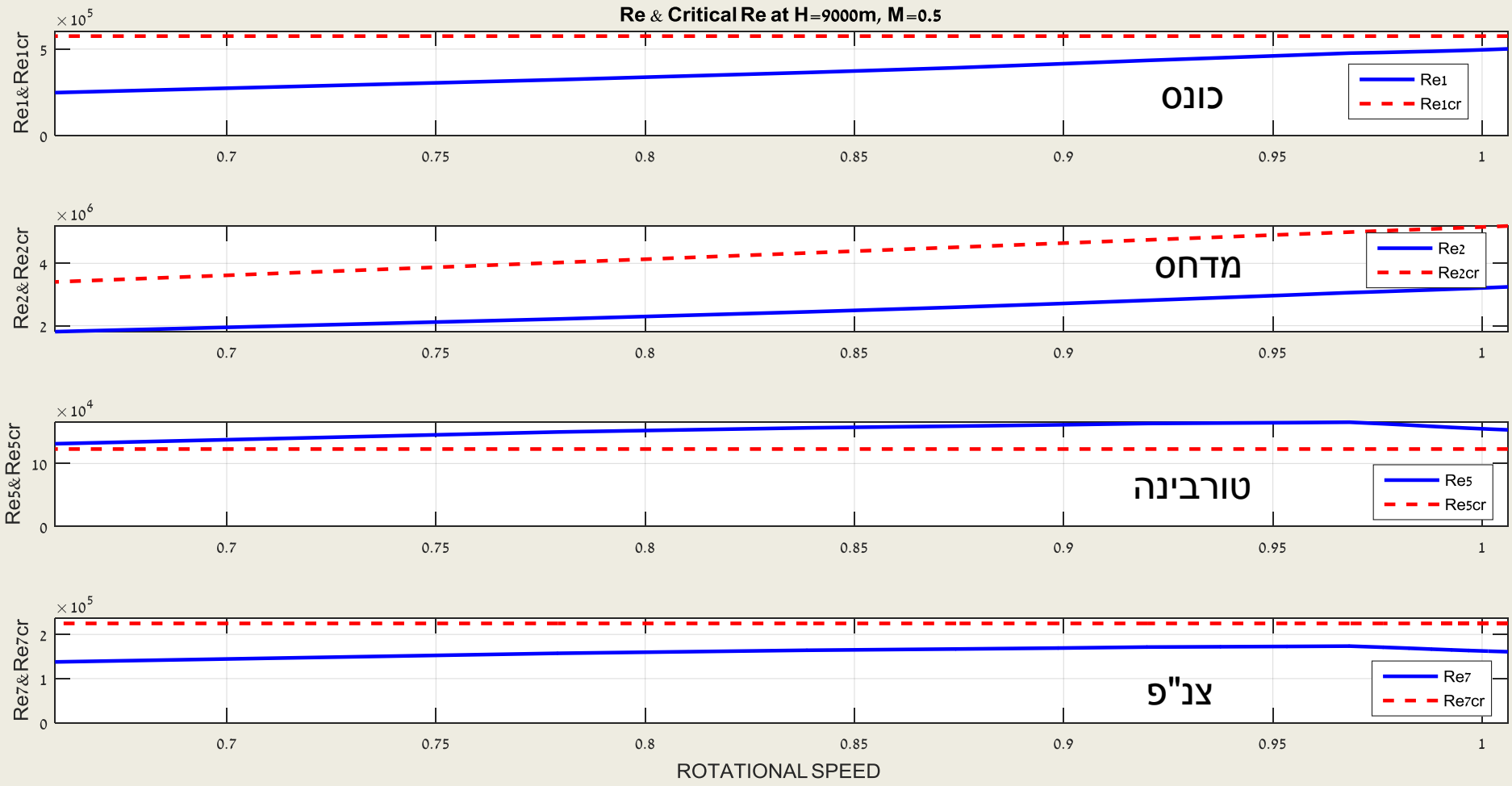
5 מספרי רינולדס

H=0, M=0 5.1



מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

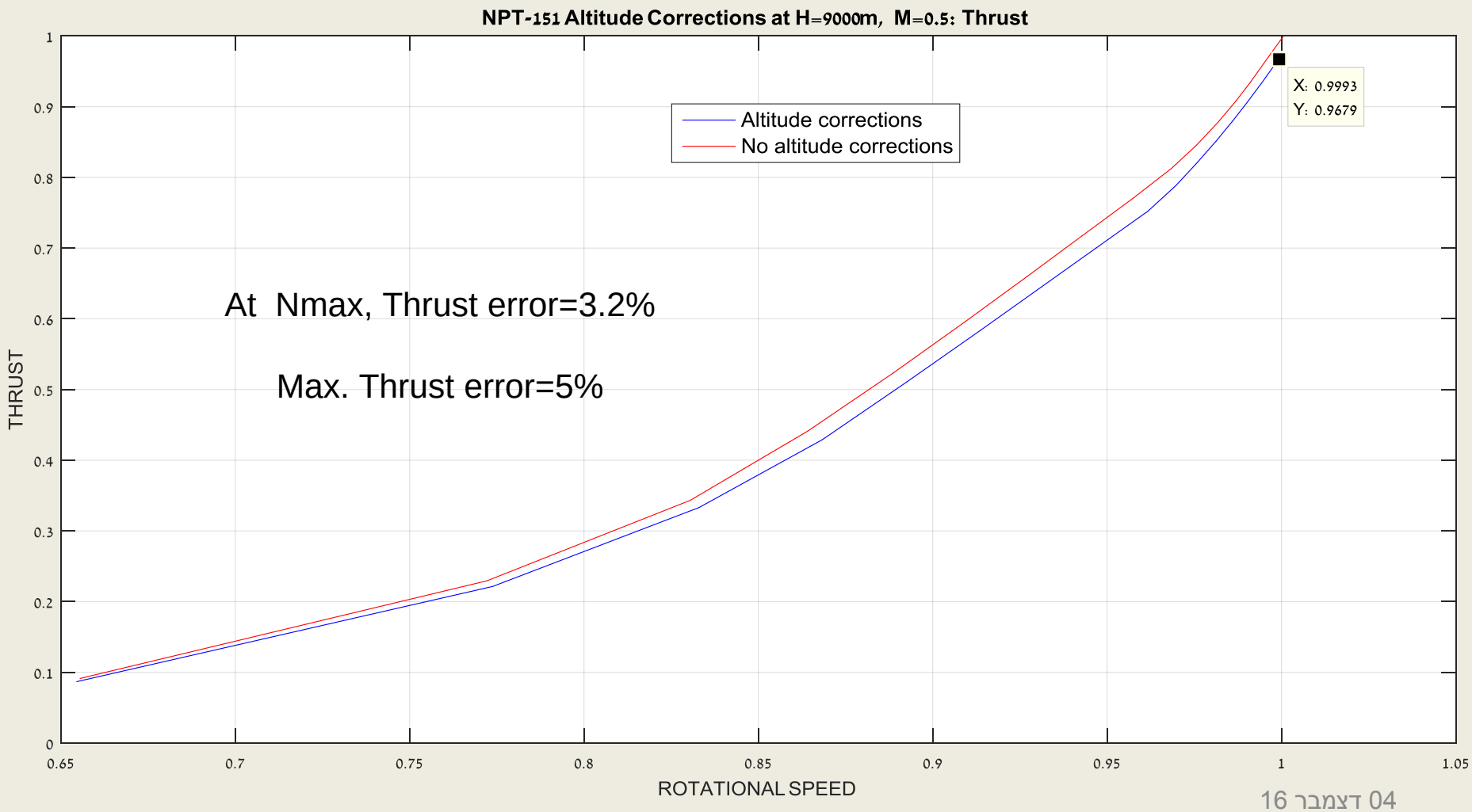
H=9000m, M=0.5 5.2



מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

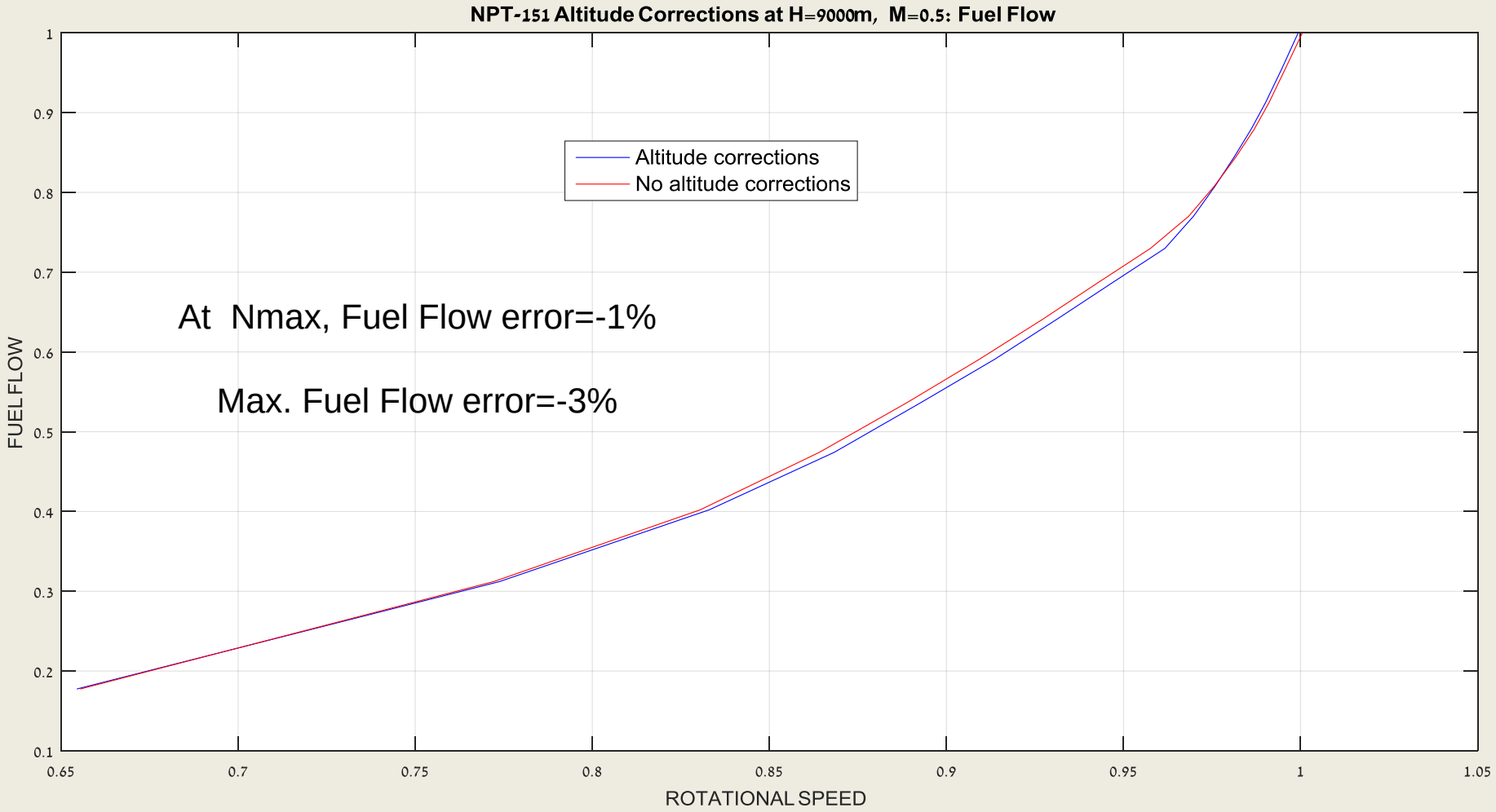
6 השפעת מס' רינולדס נמוך על ביצועי המנוע ב- $H = 9000m,\ M = 0.5$

6.1 דחף



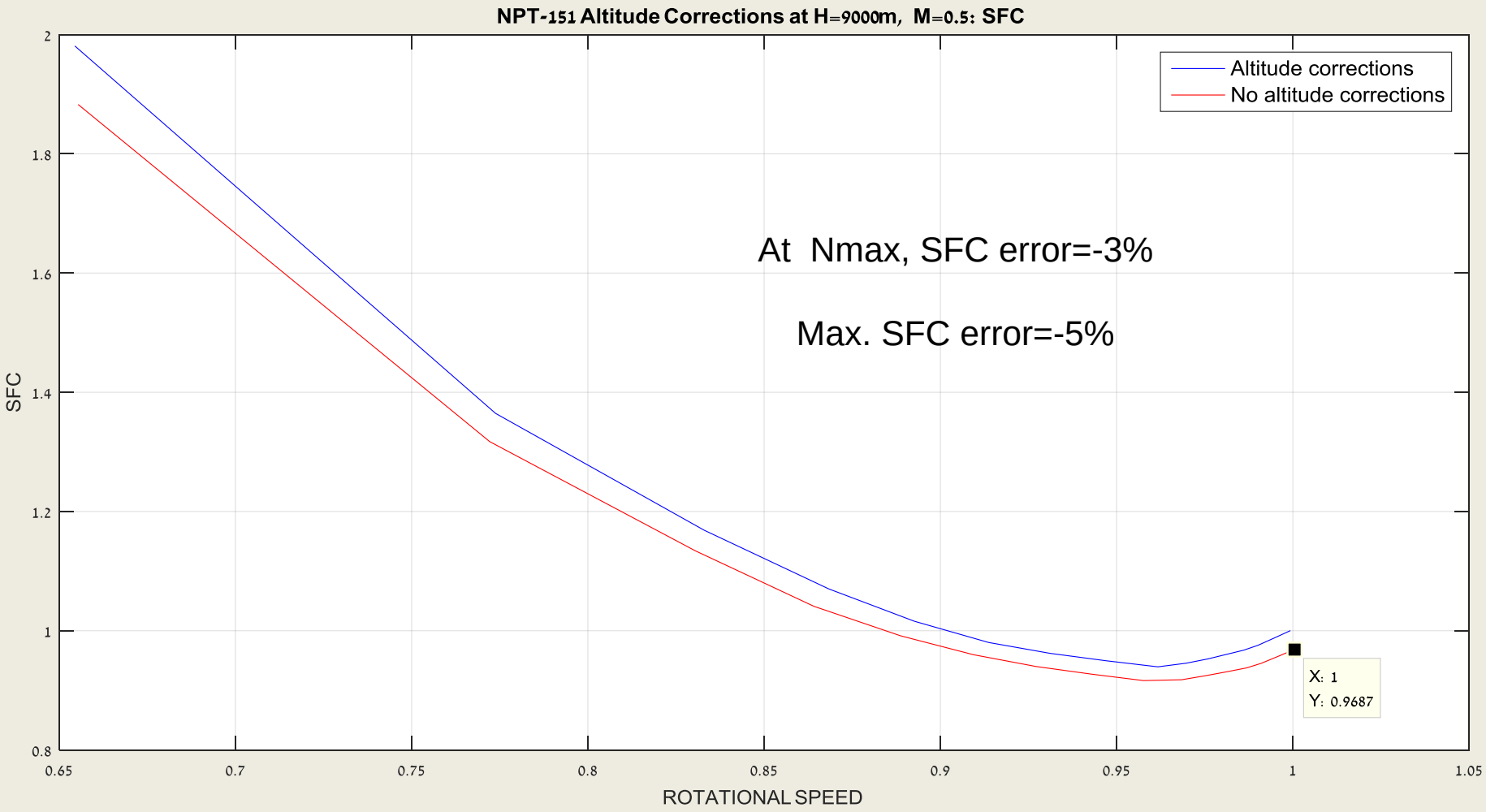
מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

6.2 ספיקת דלק



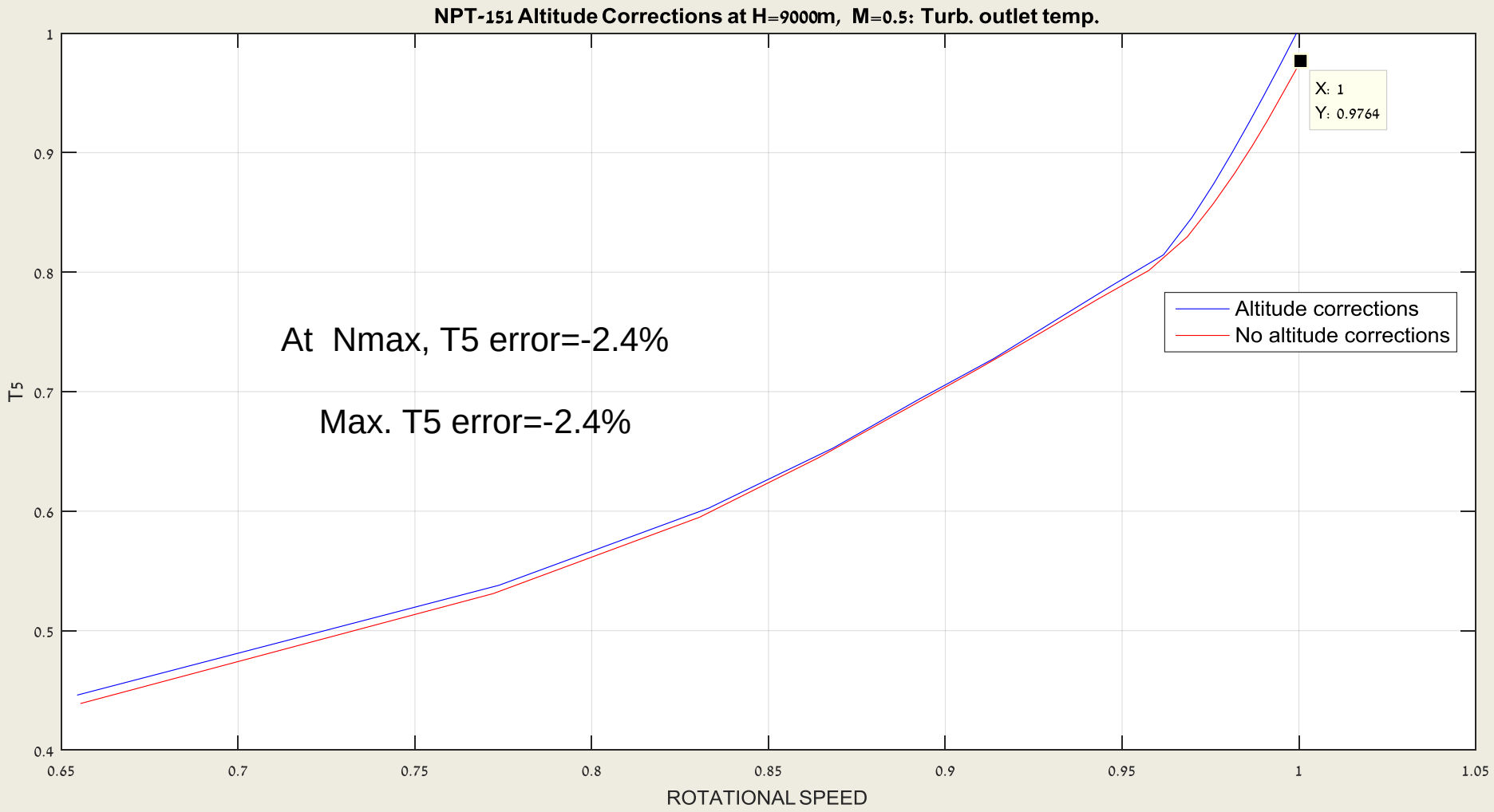
מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

SFC 6.3



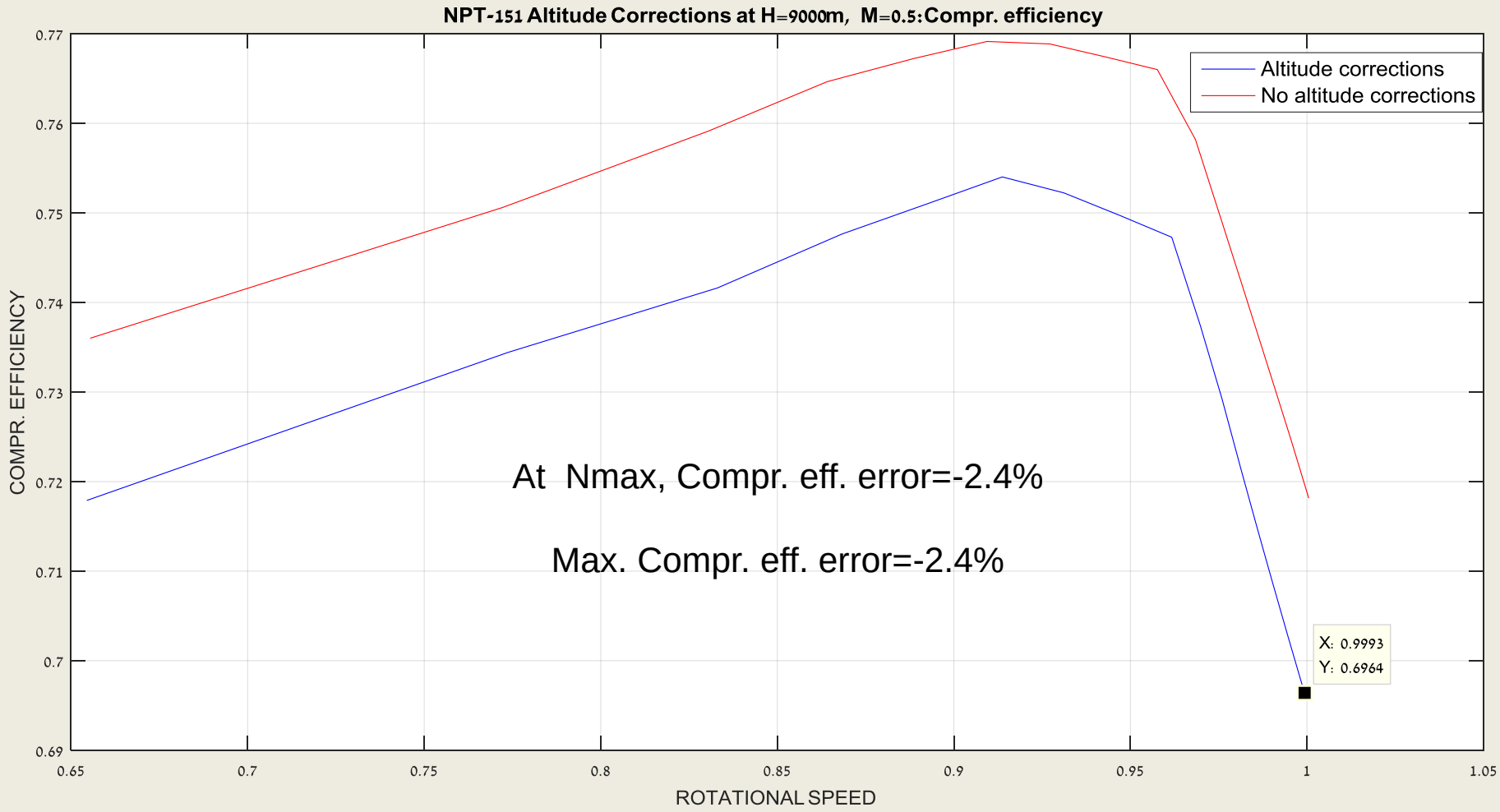
מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

6.4 טמפרטורה ביציאה מהטורבינה



מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

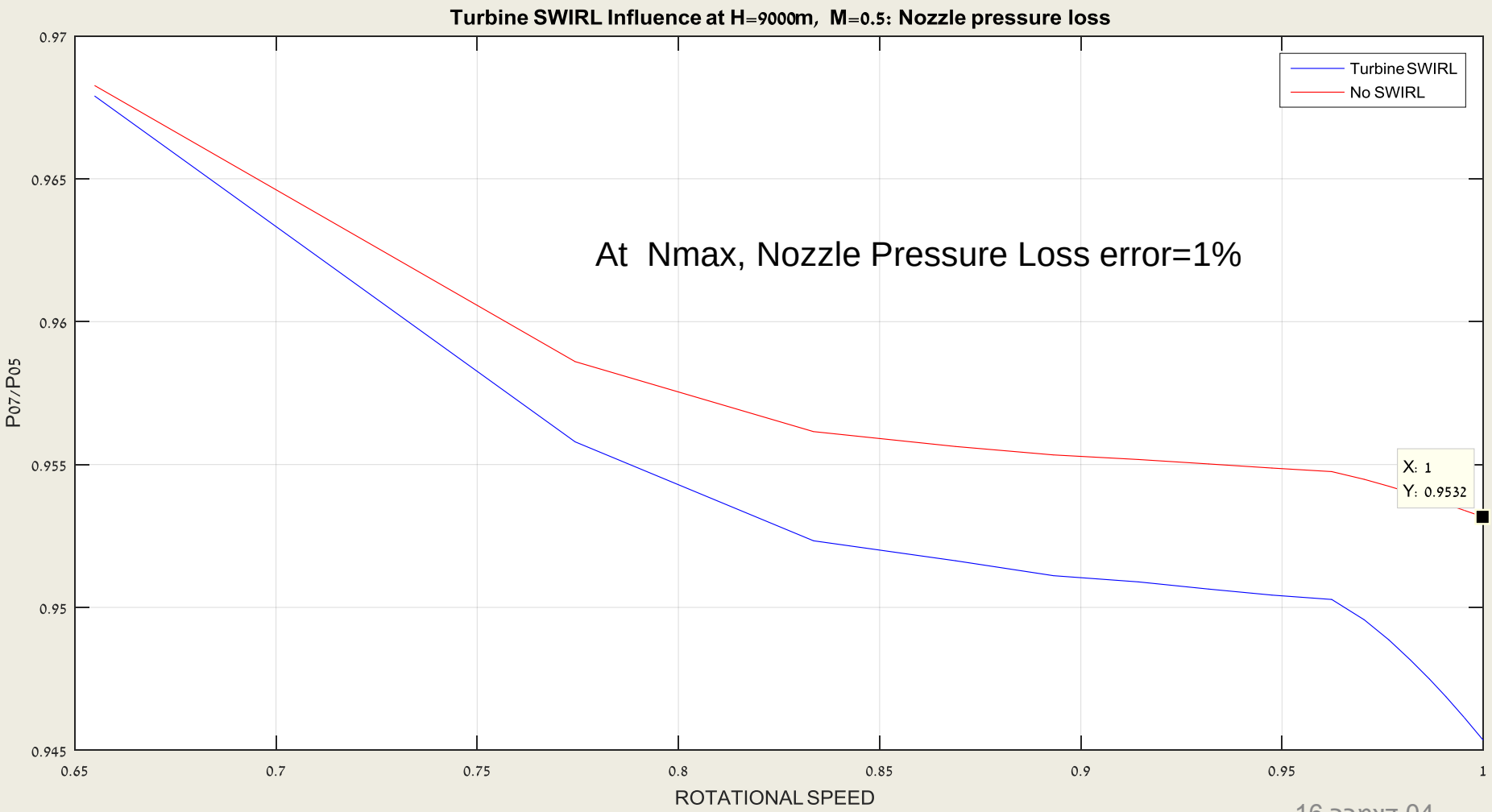
6.5 נצילות מדחס



מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

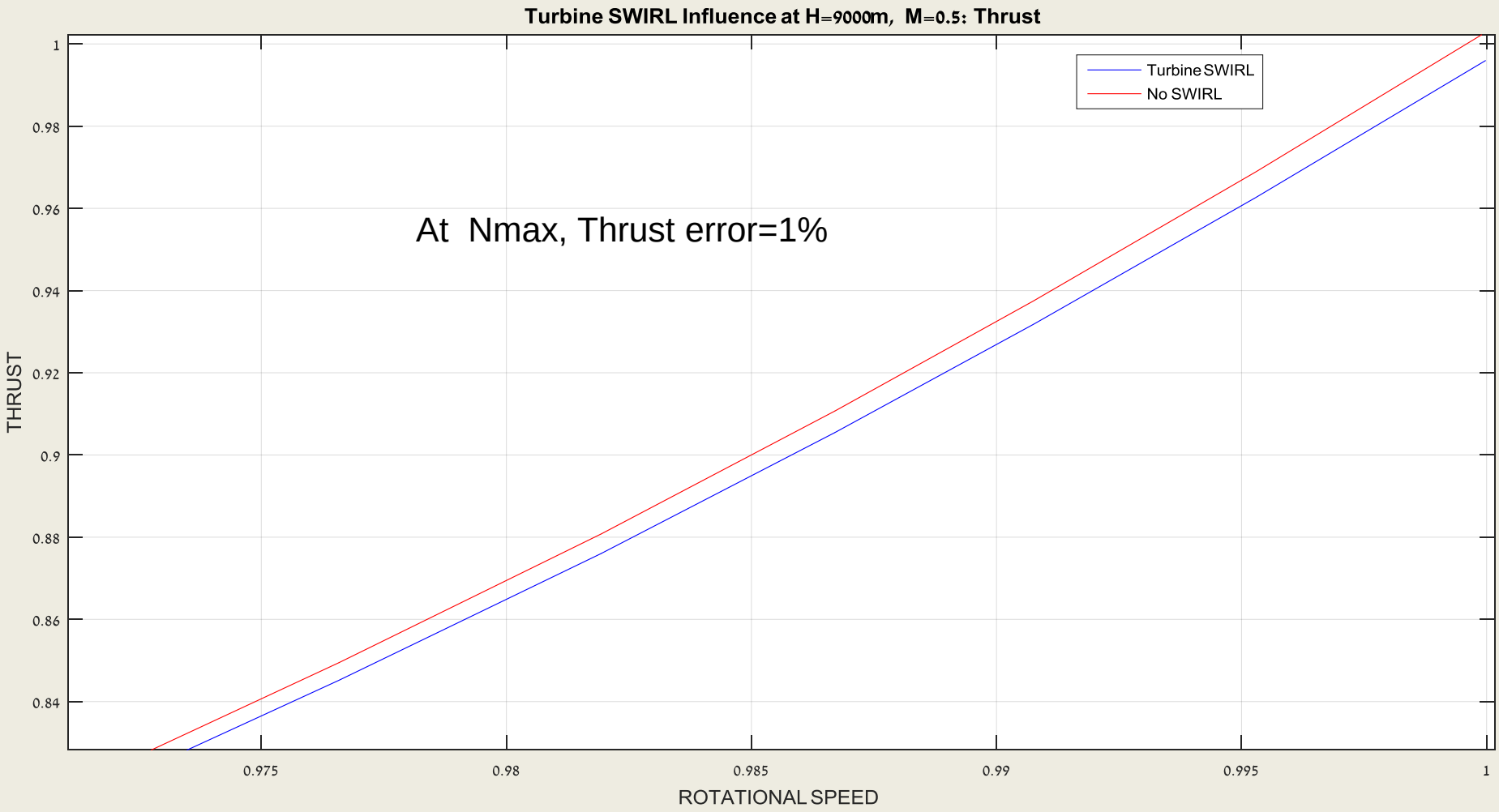
7 השפעת זווית סחרור זרימת טורבינה על ביצועי המנוע ב- $H = 9000m, M = 0.5$

7.1 הפסד לחץ בצנ"פ



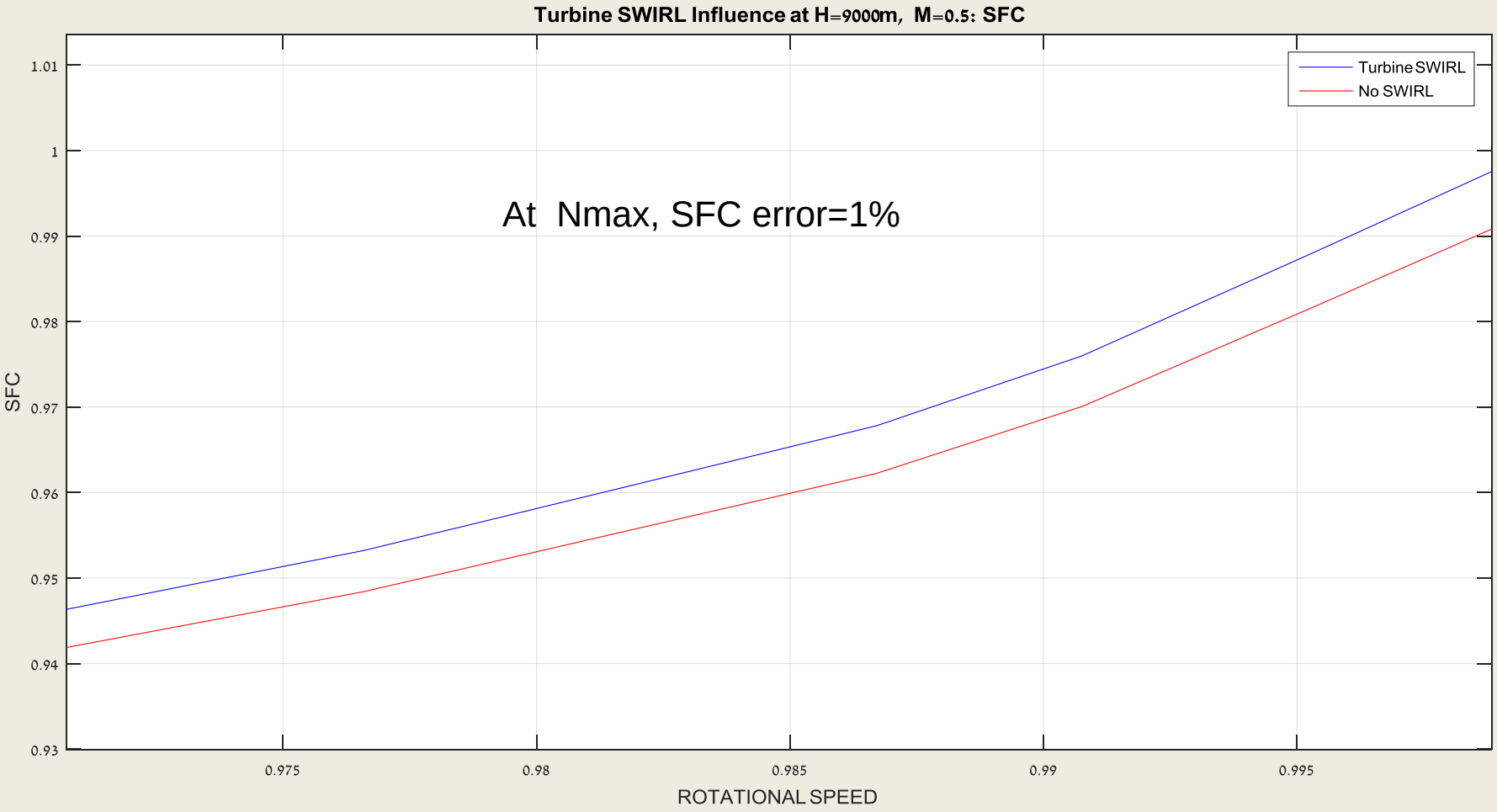
מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

7.2 דחף



מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

SFC 7.3



מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש

8 לסיכום

א) פותח דק סטטי למנוע קטן בסביבת Matlab על סמך מפות המדחס והטורבינה המקוריות. מודל המנוע כולל תיקון בגובה רב בהתאם למספר רינולדס, ותיקון הפסד לחץ בצנ"פ בהתאם לזווית סחרור הזרימה ביציאה מהטורבינה.

ב) תוצאות השוואת הדק שפותח במב"ש לדק סטטי היצרן (executable file) די סבירות.

ג) בתנאי טיסה $H = 9000m, M = 0.5$, השפעה שלילית של *הקטנת מספר רינולדס* בכונס, מדחס, וצנ"פ על ביצועי המנוע במהירות סיבוב מרבית היא 2-3% (במהירות נמוכה - 2-5%). בטורבינה לא נוצר *מס' רינולדס נמוך* בכל תנאי טיסה במהירות סיבוב מסרק למקסימום. לכן אין צורך לתיקון.

ד) בתנאי טיסה סעיף ג' , השפעה שלילית של *זווית סחרור זרימה* ביציאה מהטורבינה על ביצועי המנוע במצב מתמיד היא 1%.

מסמך זה מכיל מידע השייך למב"ש. העתקה או הפצה של המידע מותרת רק באישור בכתב של גורם מוסמך במב"ש