תכן ואנליזה של טורבינה צירית למנוע סילוני זעיר

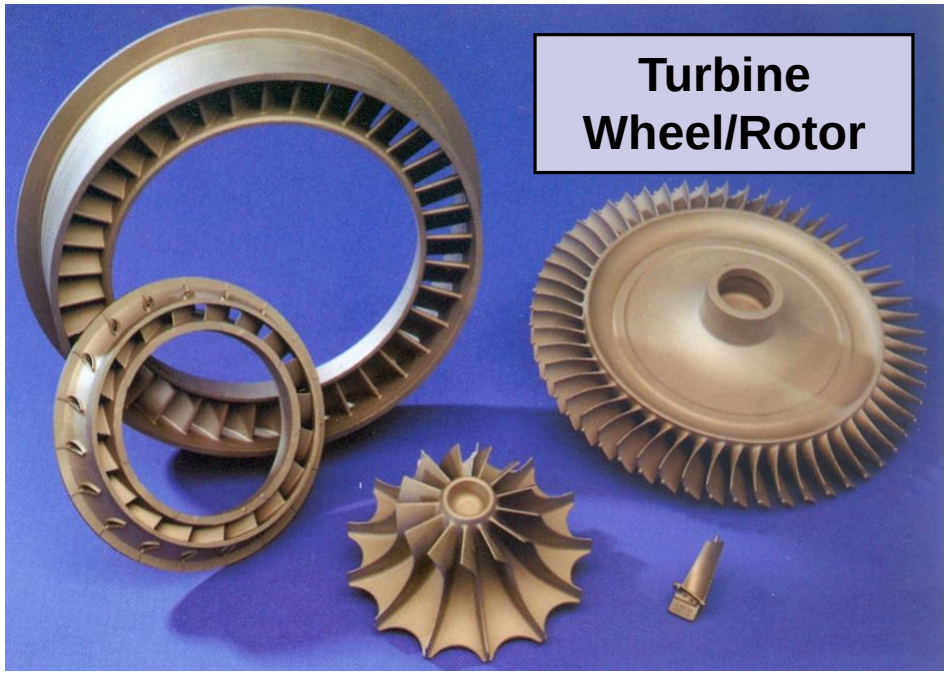
מרק גולדבאום
דר' עמירם לייטנר
פרופ' ישעיהו לוי

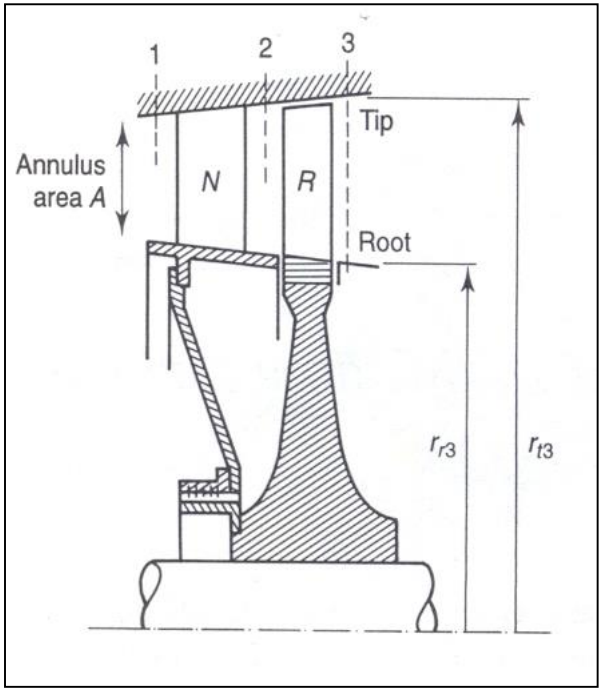
רקע לעבודה

- העבודה כוללת תכן ואנליזה של טורבינה צירית בעלת דרגה אחת למנוע סילוני זעיר.
- הטורבינה תוכננה במקור באמצעות תוכנת חישוב חד מימדי (Mean Line) ותיקה ומוגבלת.
- בעבודה נוכחית בוצעו חישובים של הטורבינה באמצעות כלי תוכנה מסחריים מתקדמים הכוללים חישובים חד מימדיים (Mean Line), בניית גיאומטריה תלת מימדית, וחישובי CFD דו ותלת מימדיים.

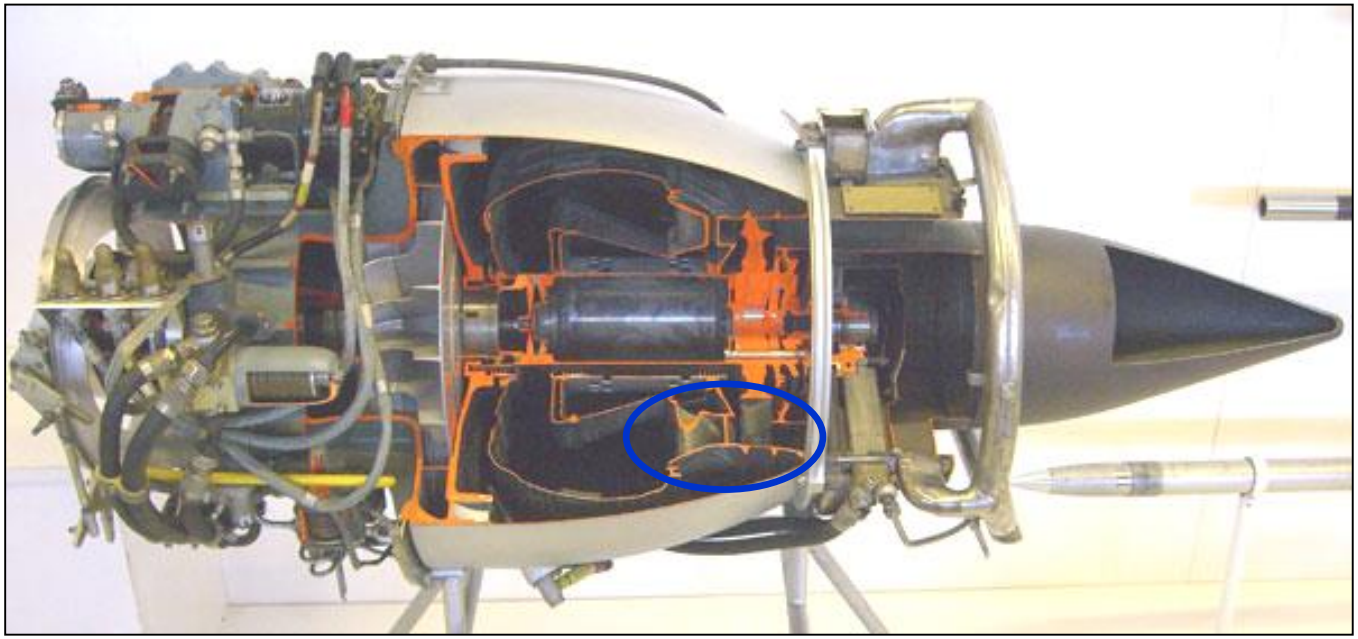
טורבינה צירית

Turbine Nozzle

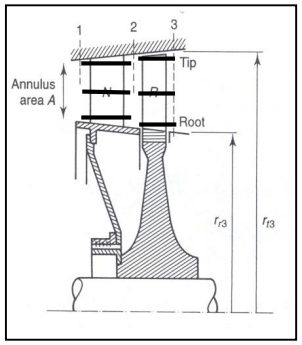


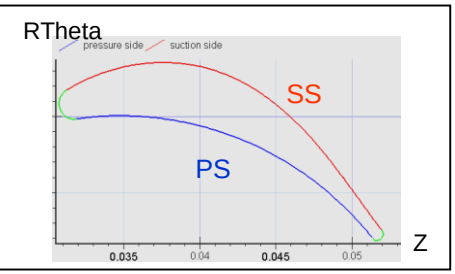


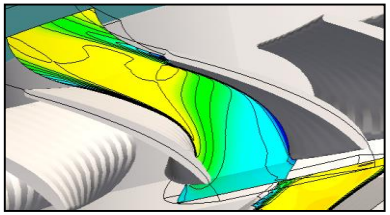
טורבינה צירית במנוע Marbure

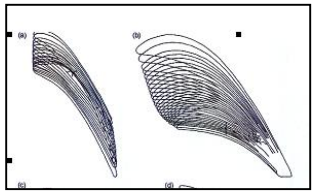


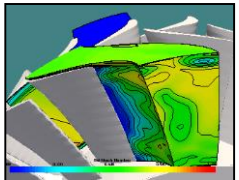
תהליך תכן אווירודינאמי של טורבינה צירית











Mean Line Design
- Velocity Triangles,Number of Stages,Flow Path Geometry
- Parameters at Inlet and Otlet of Blades
- Uses One Dimensional Flow Equations and Loss Models.
- Performed at Several Radii

Off Design Calculation
- Map Generation
- Uses Mean Line Algorithms
- Performance at Specific Points

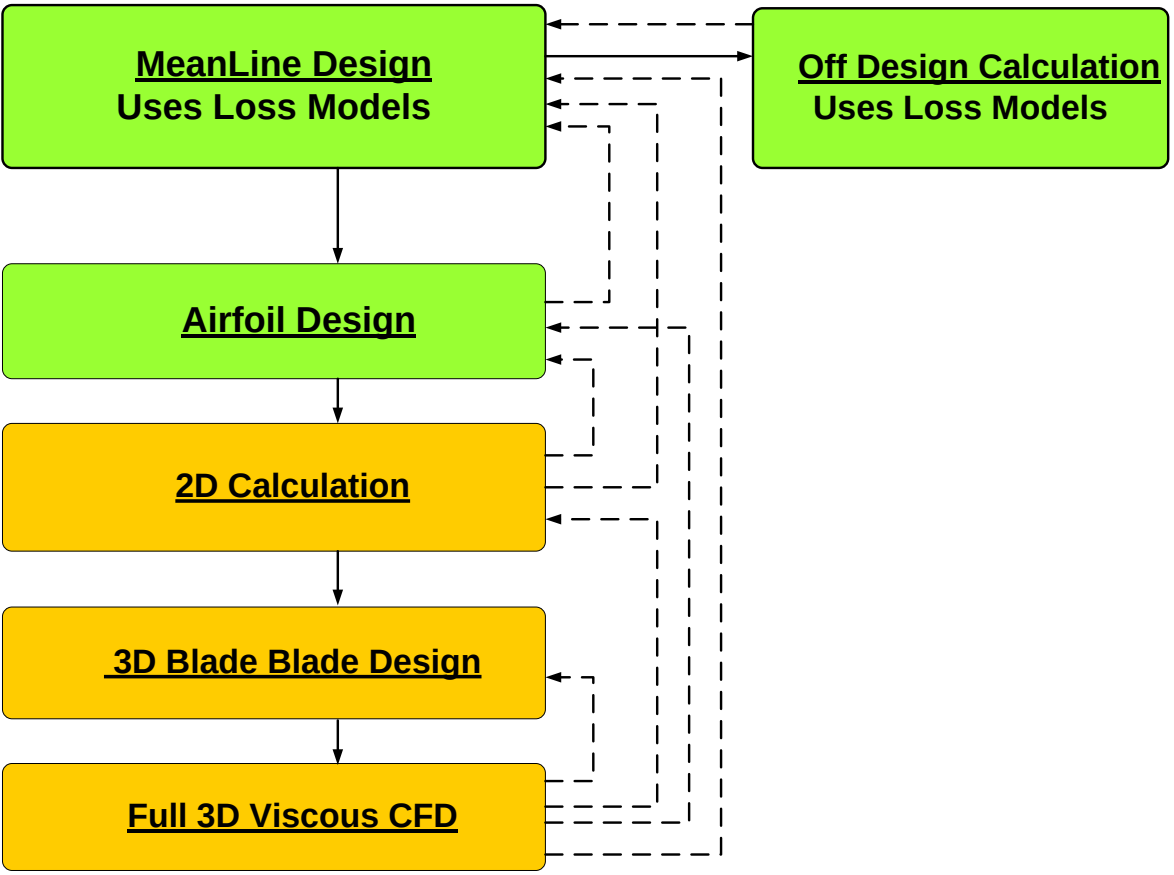
Airfoil Design
- Design Airfolis to match the velocity triangles
- Perfromed at several sections

2D CFD Calculation
- Solves Flow between the blades at each section
- Pressure/Veloctiy distribution on PS and SS

3D Blade Blade Design
- Bowed/Leaning Blades by Airfoil Stacking
- Main Purpose: Reduce Seconadry Flow,Stress

Full 3D Viscous CFD
- Check for Separations,Vortexes,Shocks
- Perfromance

מידול הפסדים-צורך ושימוש בתהליך התכן



- תכן חד מימדי (Meanline) ריאליסטי דורש מידול של הפסדים הנוצרים בלהבי הרוטור והסטטור.
- חישובי CFD מבוצעים בשלב מאוחר יותר בתהליך התכן עבור גיאמוטריה שנקבעה בעיקרה בשלב ה- Mean Line .
- כימות הפסדים

$$\phi_N = \frac{C_2}{C_{2s}}; \qquad \xi_N = \frac{h_2 - h_{2s}}{\frac{1}{2}C_2^2}; \qquad K_N = \frac{P_{01} - P_{02}}{P_{02} - P_2};$$

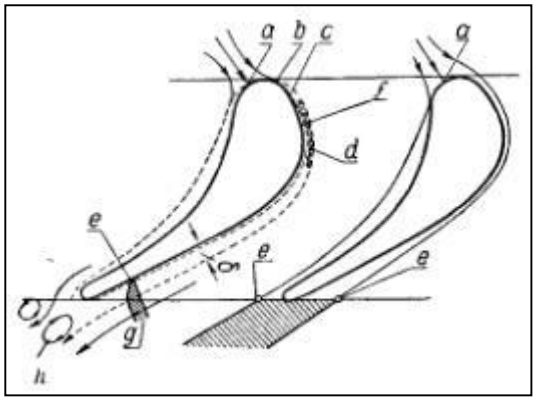
שיטת מידול הפסדים AMDC+KO+MK+B

- Ainley & Mathienson(1951) +Dunham & Came(1970) +Kacker & Ocapu(1982) + Mustapha & Kacker (1990)+Benner et al(1995)= AMDC+KO+MK+B

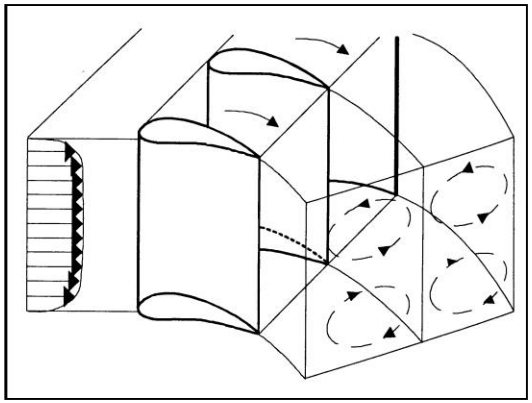
- השיטה המקורית של AM נבדקה ועודכנה לאורך השנים. AMDC+KO+MK+B היא השיטה המעודכנת שהתקבלה.

$$K_{total} = \overset{15\%}{K_{Profile}} + \overset{45\%}{K_{Secondary}} + \overset{10\%}{K_{Trailing\,Edge}} + \overset{30\%}{K_{Tip\,Clerance}}$$

מרכיבי הפסדים



- **Profile Loss**-הפסדים כתוצאה מחיכוך בין הזורם לפני שטח הלהבים וגדילת שכבות גבול על הלהבים.תופעה דו ממדית



- **Secondary Loss** - הפסדים כתוצאה מחיכוך בין הזורם ל- End Walls (hub&shroud) וכתוצאה מזרימות משניות בטורבינה. תופעה תלת-מימדית

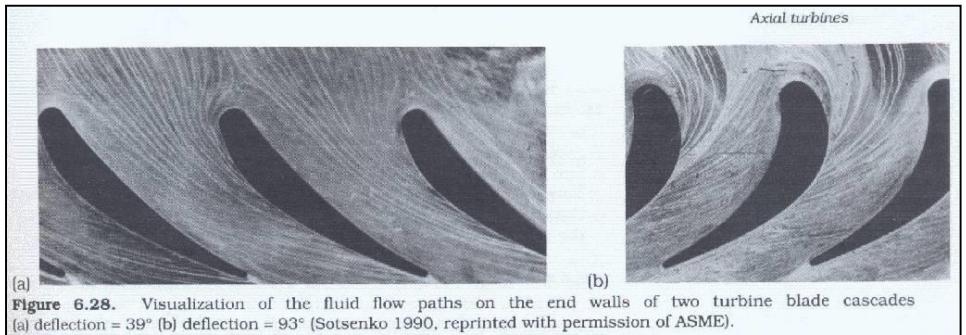
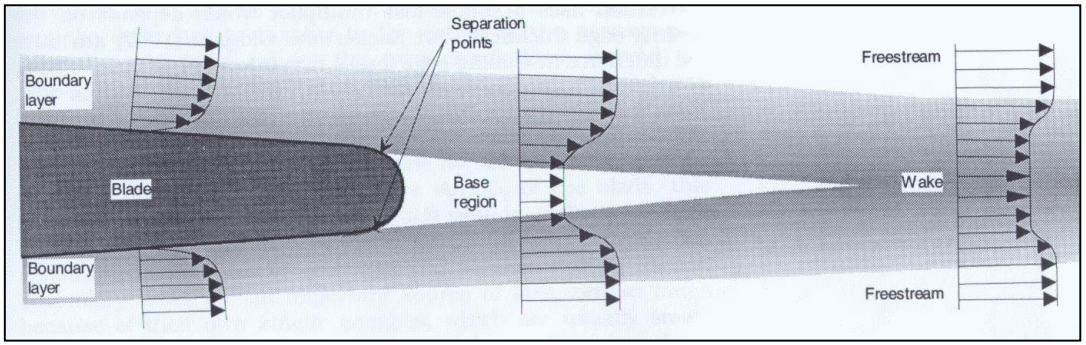
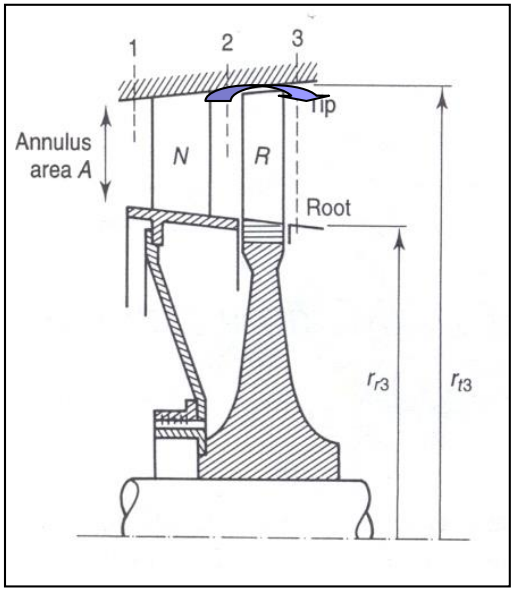


Figure 6.28. Visualization of the fluid flow paths on the end walls of two turbine blade cascades (a) deflection = 39° (b) deflection = 93° (Sotsenko 1990, reprinted with permission of ASME).

מרכיבי הפסדים

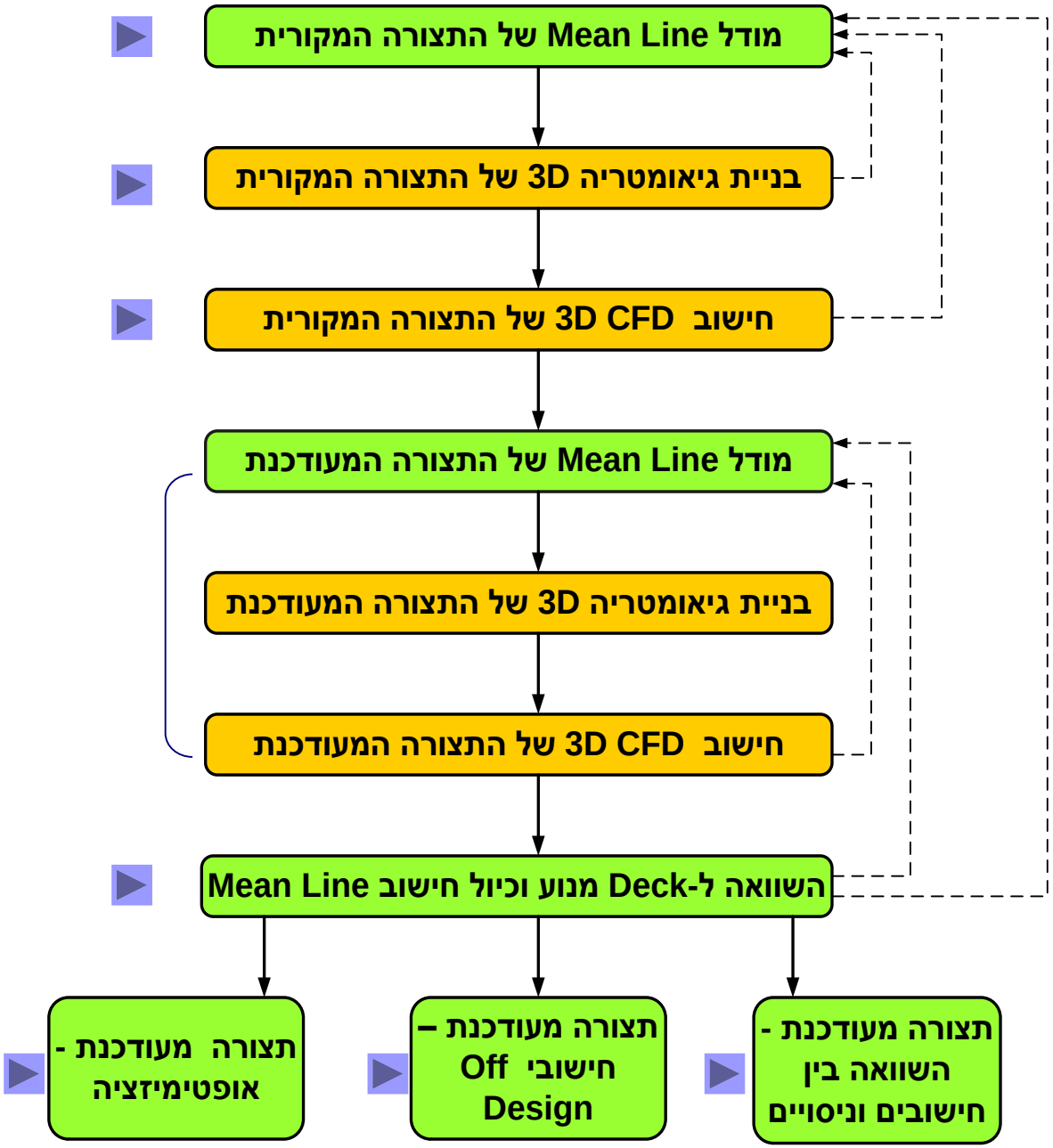


- **Trailing Edge Loss** - הפסדים כתוצאה מעקבה בשפת זרימה

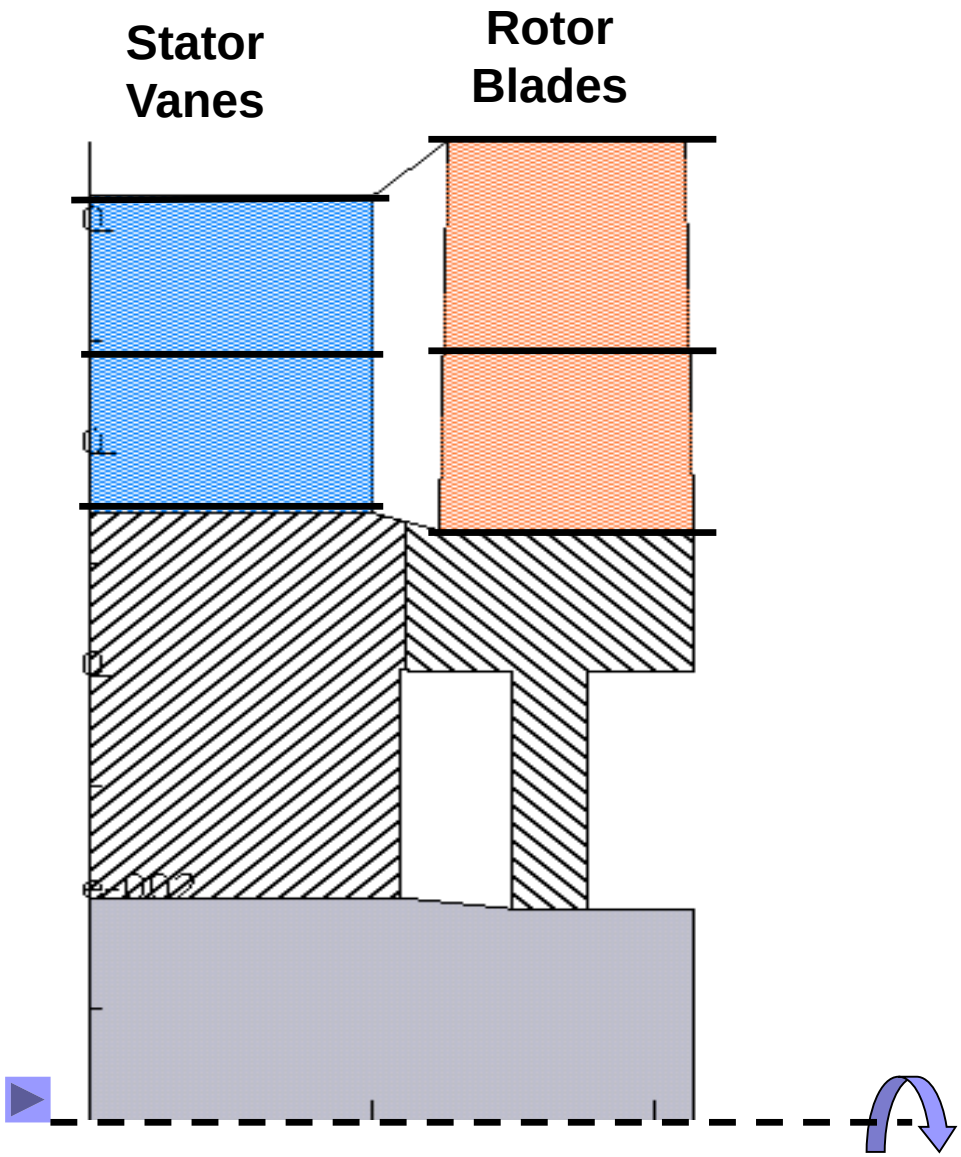


- **Tip Clearance Loss**-גז הדולף דרך מרווח רדאילי לא עושה עבודה וגם יוצר זרימות משניות

שלבי העבודה הנוכחית

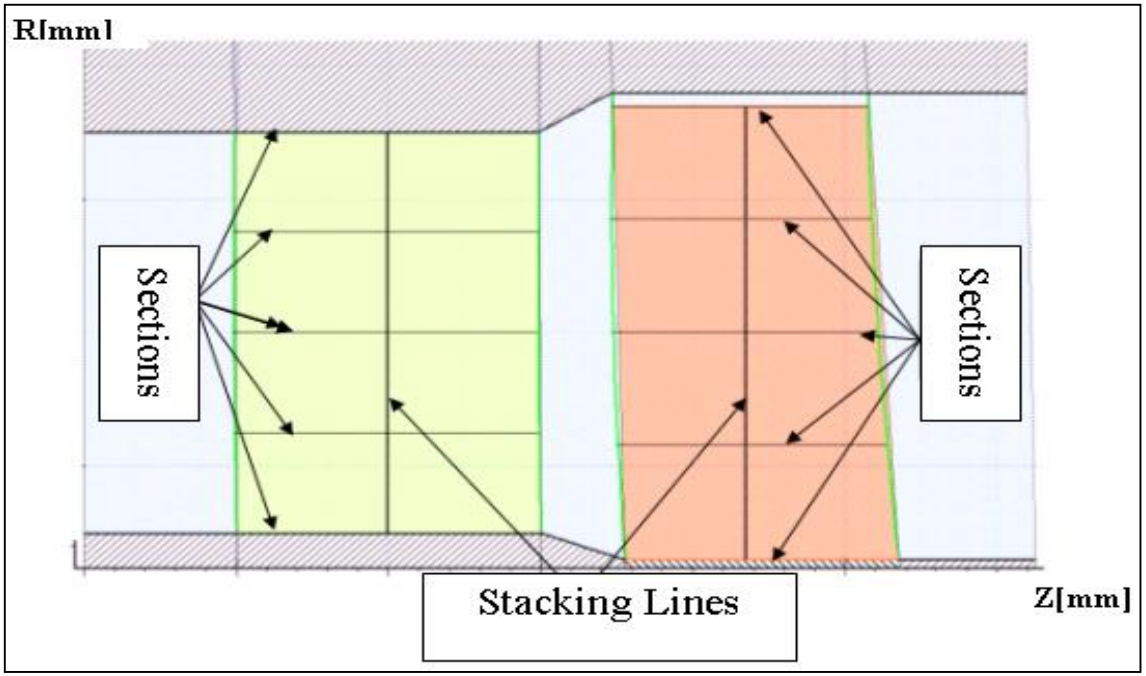


בניית מודל Mean Line של התצורה מקורית

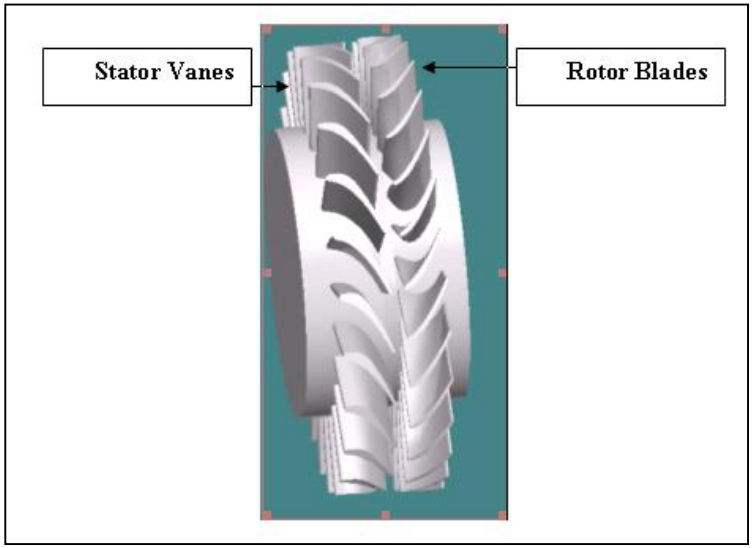


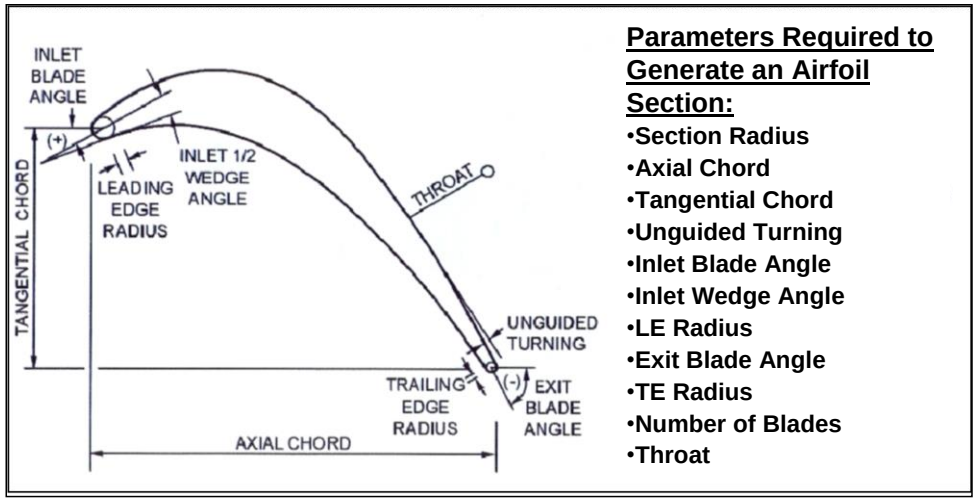
- הכנסת פרמטרים ב-3 רדיוסים Tip, Mean, Hub
- הבנה של פרמטרי קלט ופלט (כ-150 פרמטרים)
- ביצוע חישובי עזר, מדידות ב-Solid Works

בניית גיאומטריה 3D של התצורה המקורית

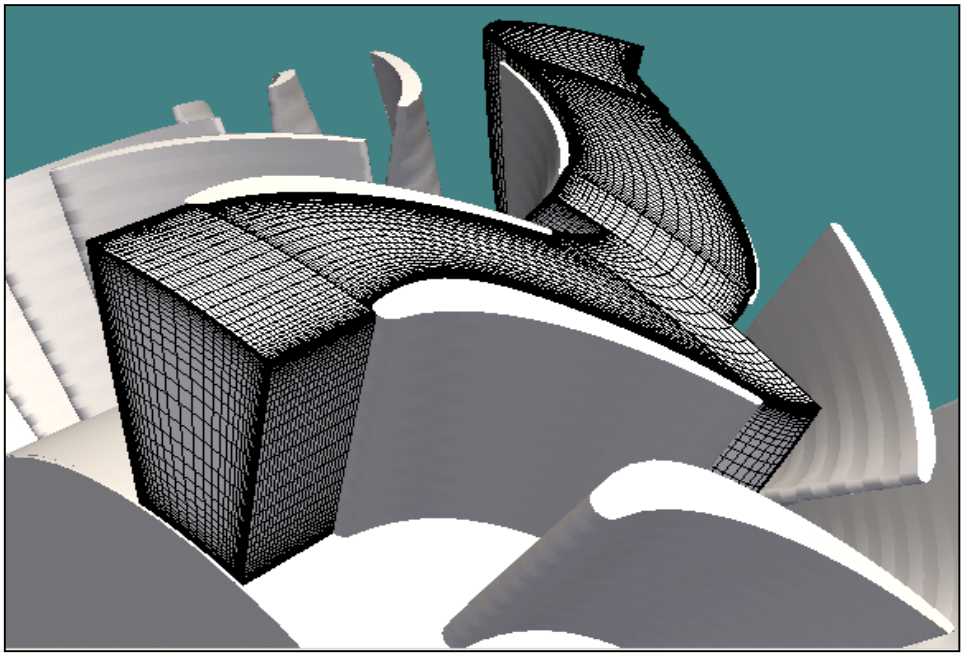


- הכנסה של פרמטרי Airfoils (מסוג Pritchard) ב-5 חתכים ברוטור ובסטטור.





חישוב CFD של התצורה המקורית



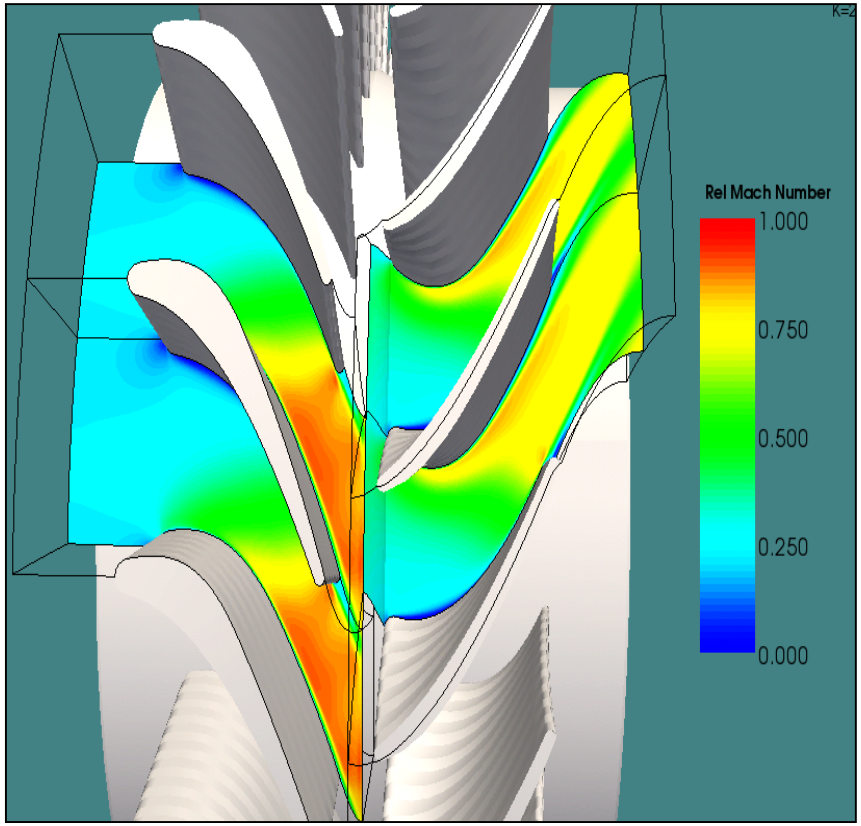
- חישוב משולב של רוטור וסטטור
- רשת מובנת
- הגדרת מספר תאים בכיווני Blade to blade בכוון Hub to Shroud ובכיוון Streamwise
- פותרן Multi Block Reynolds-Averaged Navier-Stocks
- Mixing Plane בין מקטעים
- מודל טורבולנציה

Shear Stress Transport 2 Eq. Model (Menter,1994)

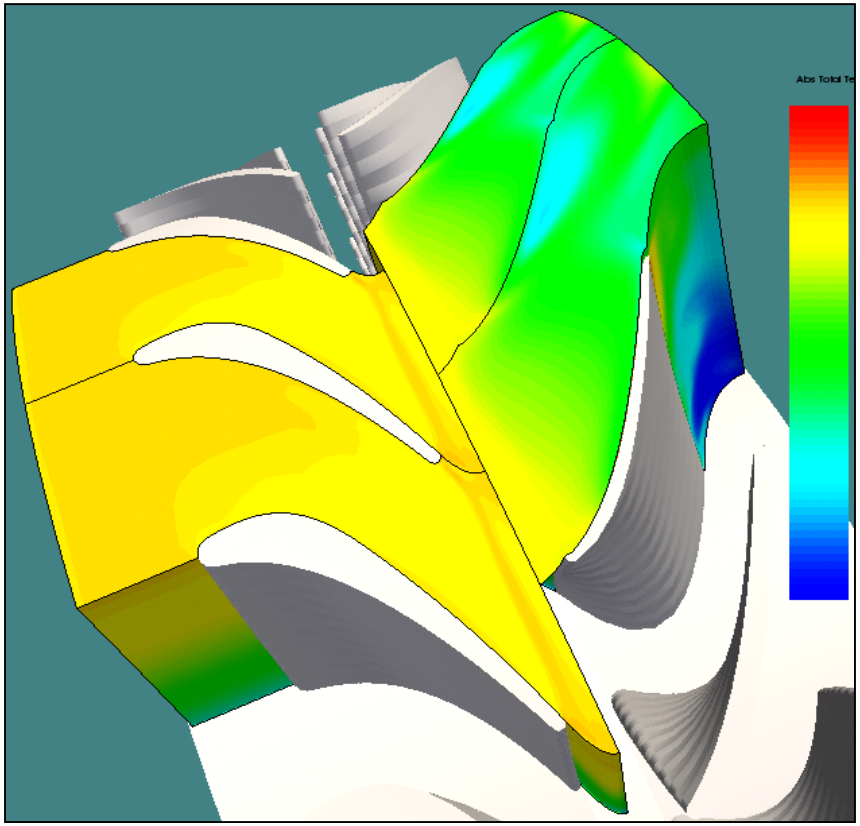
- תנאי שפה: פרופיל רדיאלי של לחץ טוטלי, וטמפרטורה טוטלית בכניסה, פרופיל לחץ סטטי ביציאה

שדה זרימה מחושב ב-CFD

Rel. Mach number at Mid Radius

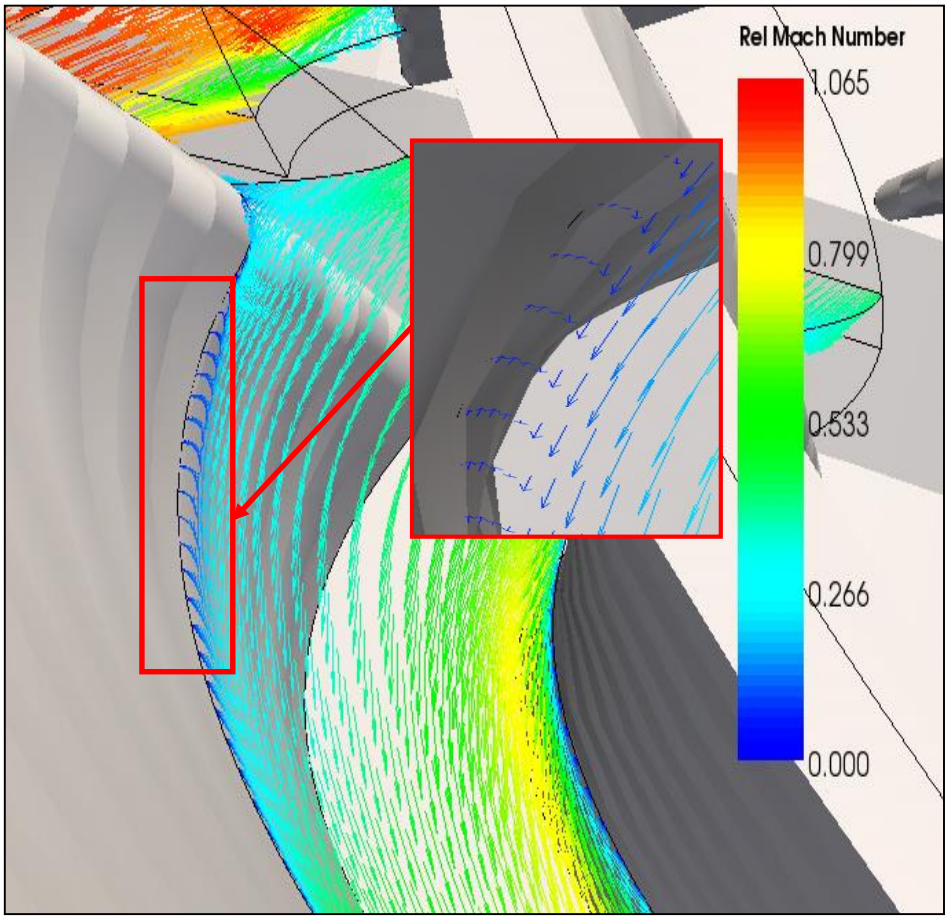


Abs. Total Temperature

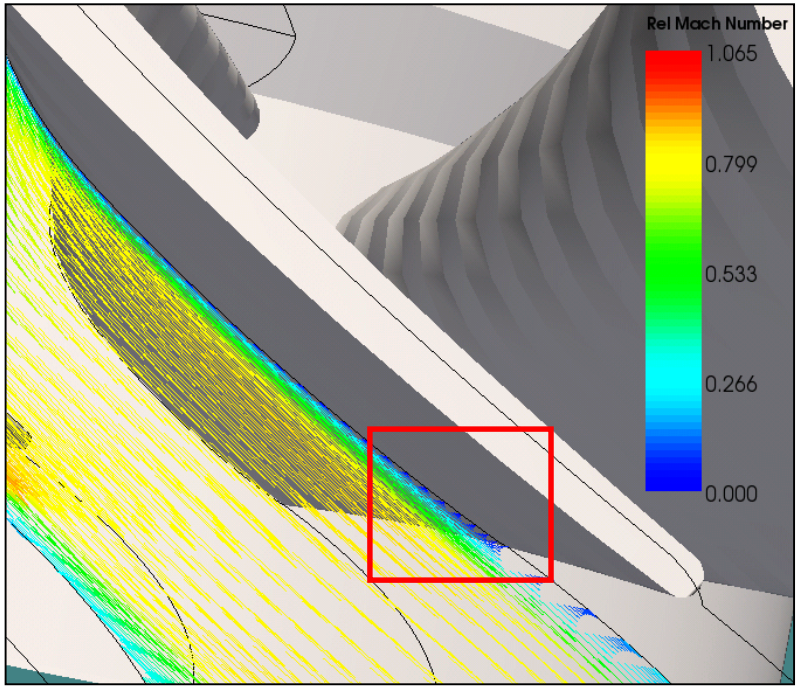


תופעות בשדה זרימה של התצורה המקורית לפי CFD

ניתוק זרימה ב-PS LE ברוטור

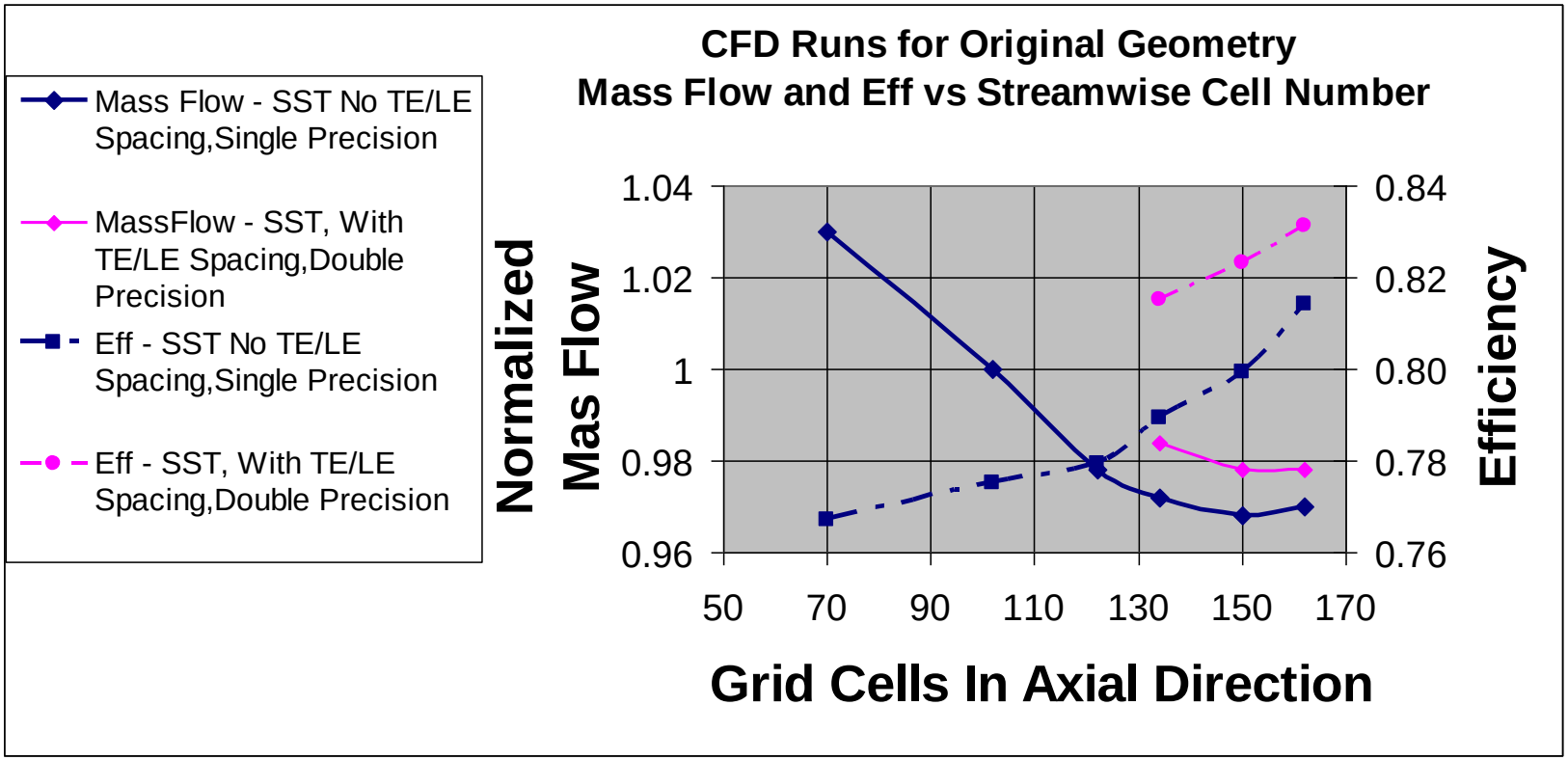


האטת זרימה ב-SS TE

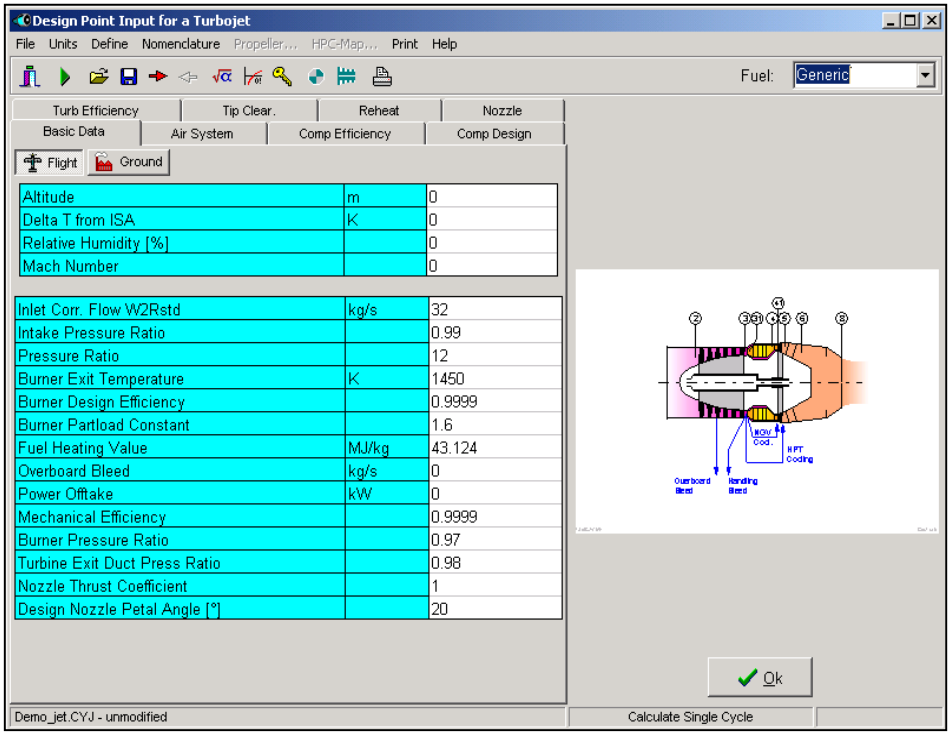


תוצאות ומסקנות מחישובי CFD

- זוהתה רגישות של הנצילות למספר תאי רשת בכיוון הצירי.
- בוצעו ריצות עם רשתות שונות, מקדמי עידון רשת ב-TE/LE שונים, מודלי טורבולנציה SST ו-B&L, Double/Single Precision
- לא התקבלה התייצבות נומרית של נצילות כפונקציה של רשת החישוב.התקבלה התייצבות של הספיקה המסית.

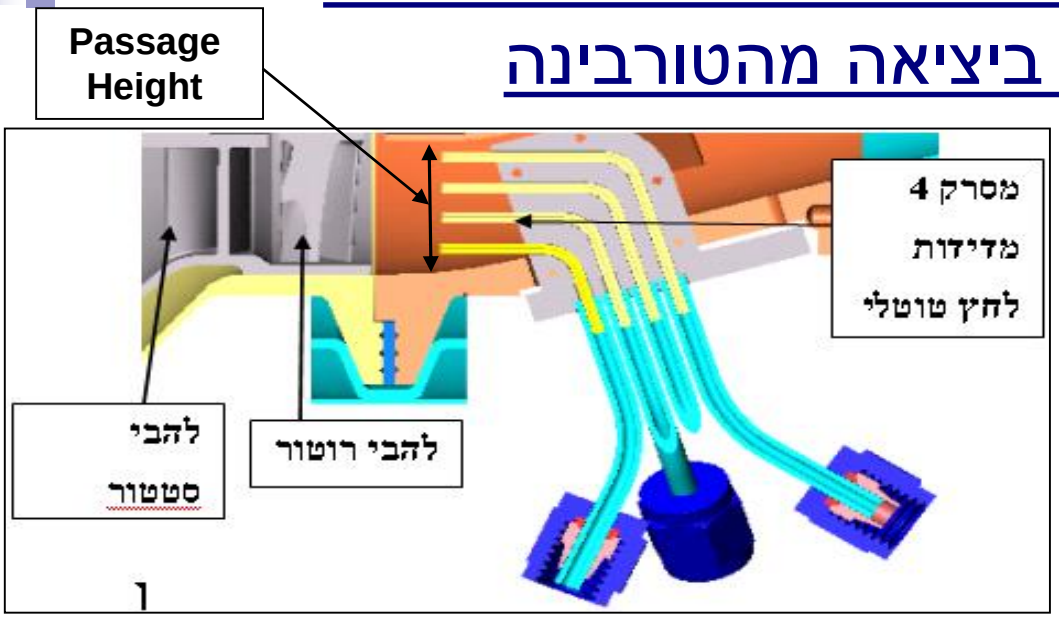


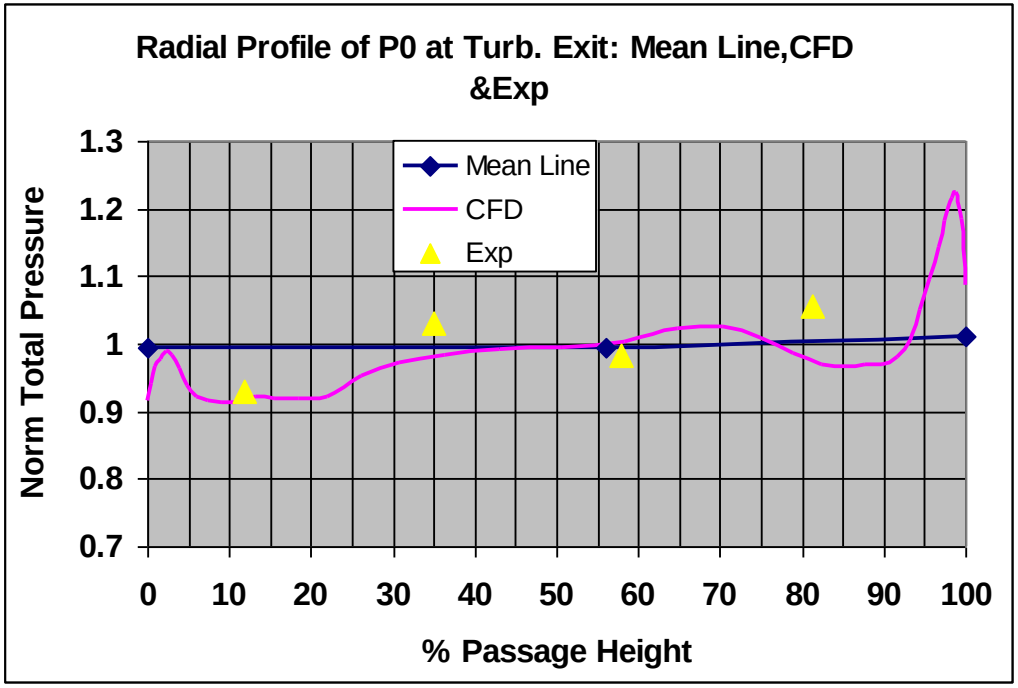
מודל (Deck) מנוע בתוכנת GasTurb



- והערכת ביצועים של התצורה המעודכנת מבוסס על מודל תרמודינמי של ביצועי מנוע המכויל לתוצאות ניסויי מנוע.
- מדידות כללו: דחף, צריכת דלק, ספירת אוויר, טמפרטורות ביציאה המדחס וביציאה מהטורבינה, לחץ ביציאה מהמדחס.
- המודל נבנה באמצעות תוכנה מסחרית GasTurb 9, J. Kurzke (2001).
- בהעדר מדידה ישירה של נצילות טורבינה זו היא הערכה ניסיונית , אם כי עקיפה, הטובה ביותר הזמינה לנצילות הטורבינה בפועל.
- בוצע כיול של מודל Mean Line על מנת להתאים את הנצילות ל-Deck

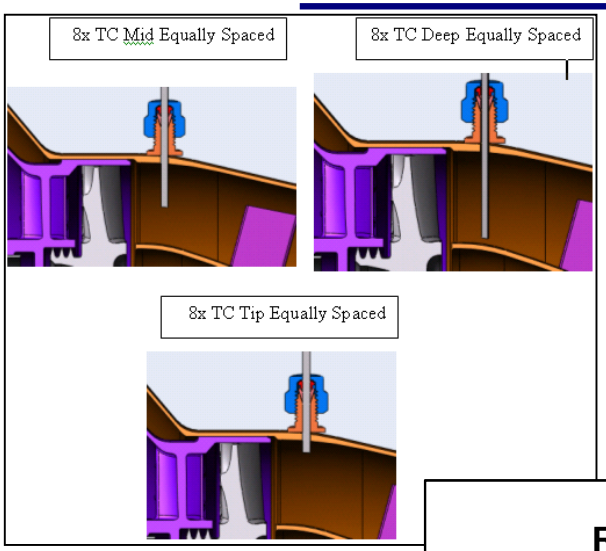
תצורה מעודכנת - השוואה לתוצאות ניסויים לחץ טוטלי ביציאה מהטורבינה



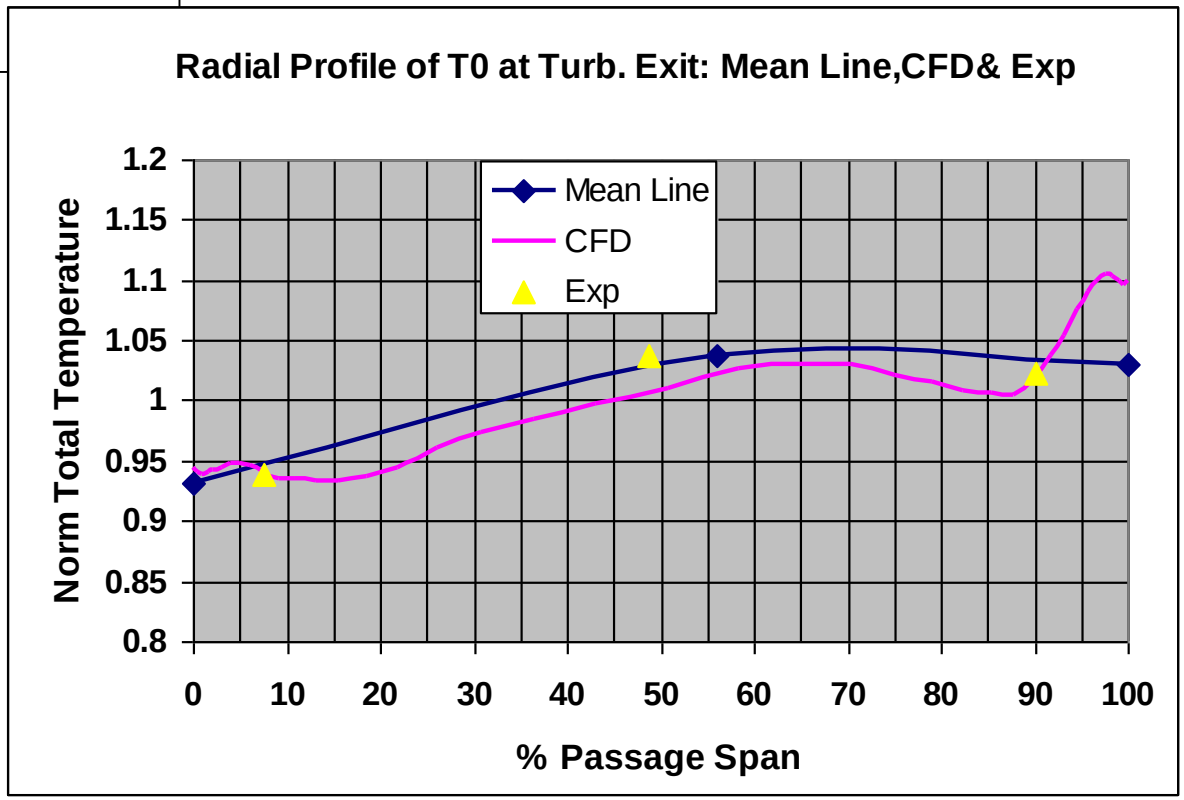


- מסרק מדידות במיקום היקפי אחד בצנ"פ מנוע.
- ביצוע מדידה במיקום היקפי אחד בלבד אינה מספיקה.
- CFD מצביע על אזור לחץ גבוה בקרוב ל-Tip-תוצאה של גז ש"דלף" במרווח הרדיאלי
- CFD מאפשר לחזות תופעות מקומיות אשר לא "מורגשות" בחישובי Mean Line

תצורה מעודכנת - השוואה לתוצאות ניסויים
טמפרטורה טוטלית ביציאה מהטורבינה

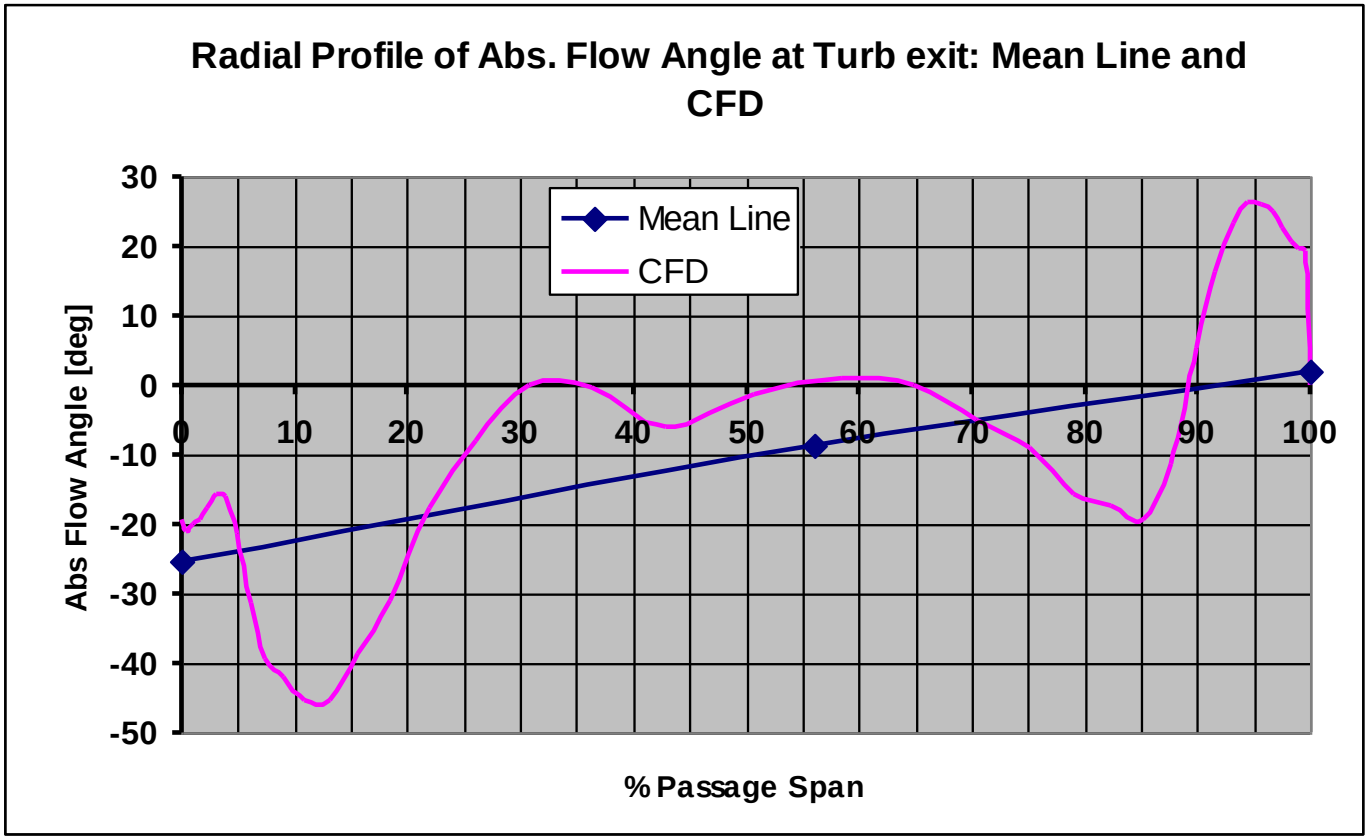


- 3 ניסויים עם 8 מדידות T05 ב-3 רדיוסים שונים.
- התאמה טובה בין החישובים לניסוי.
- CFD מצביע על אזור טמפרטורה גבוהה בקרוב -Tip-תוצאה של גז ש"דלף" במרווח הרדיאלי.

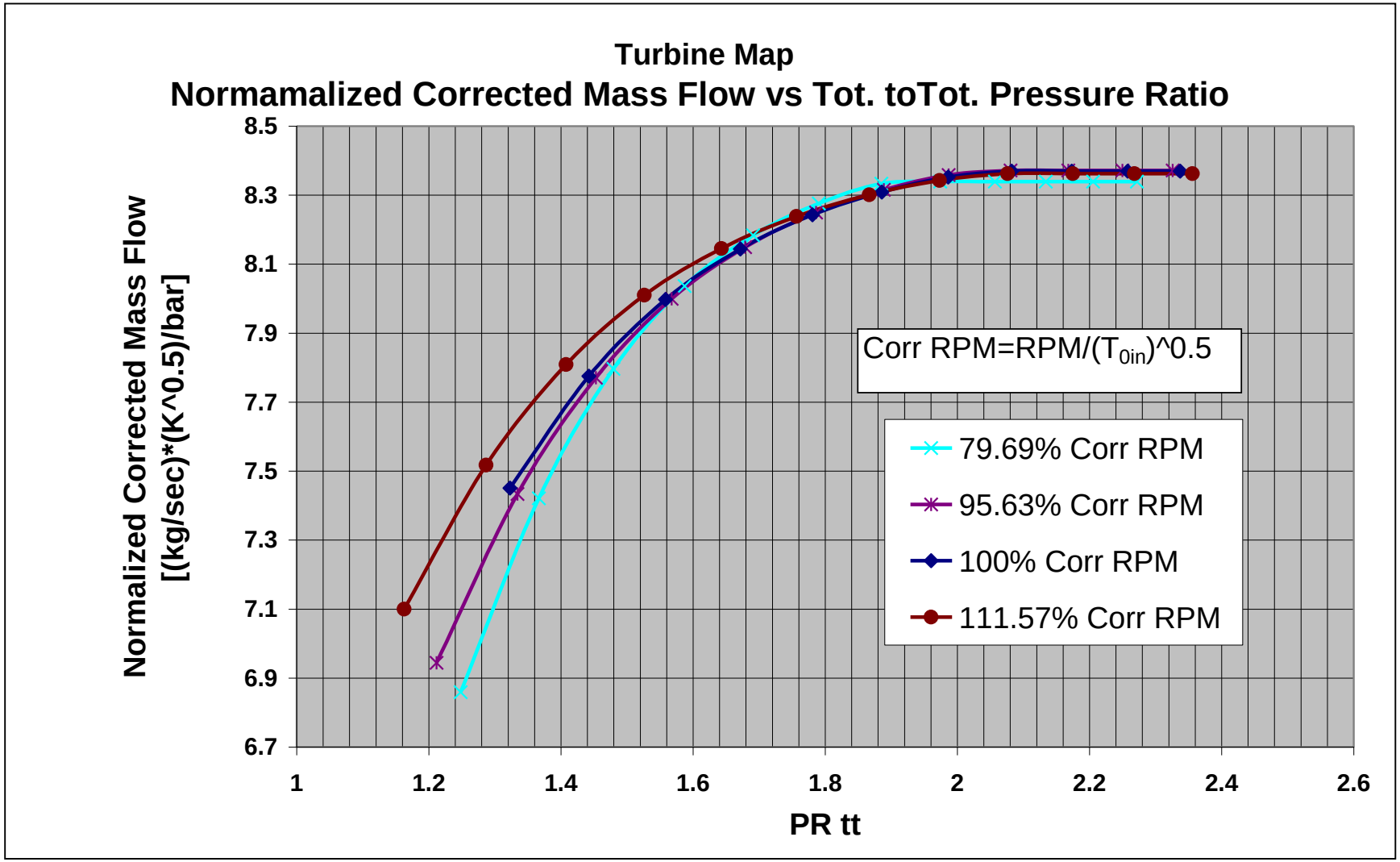


תצורה סופית - השוואה בין Mean Line ו-CFD
זווית זרימה אבסולוטית ביציאה מהטורבינה

- התאמה איכותית בין שני החישובים.
- זווית ממוצעת לא גדולה.
- מקומית-זוויות סחרור משמעותיות.
- זווית סחרור חיובית באזור קצה הלהב עקב דליפת גז דרך מרווח רדיאלי

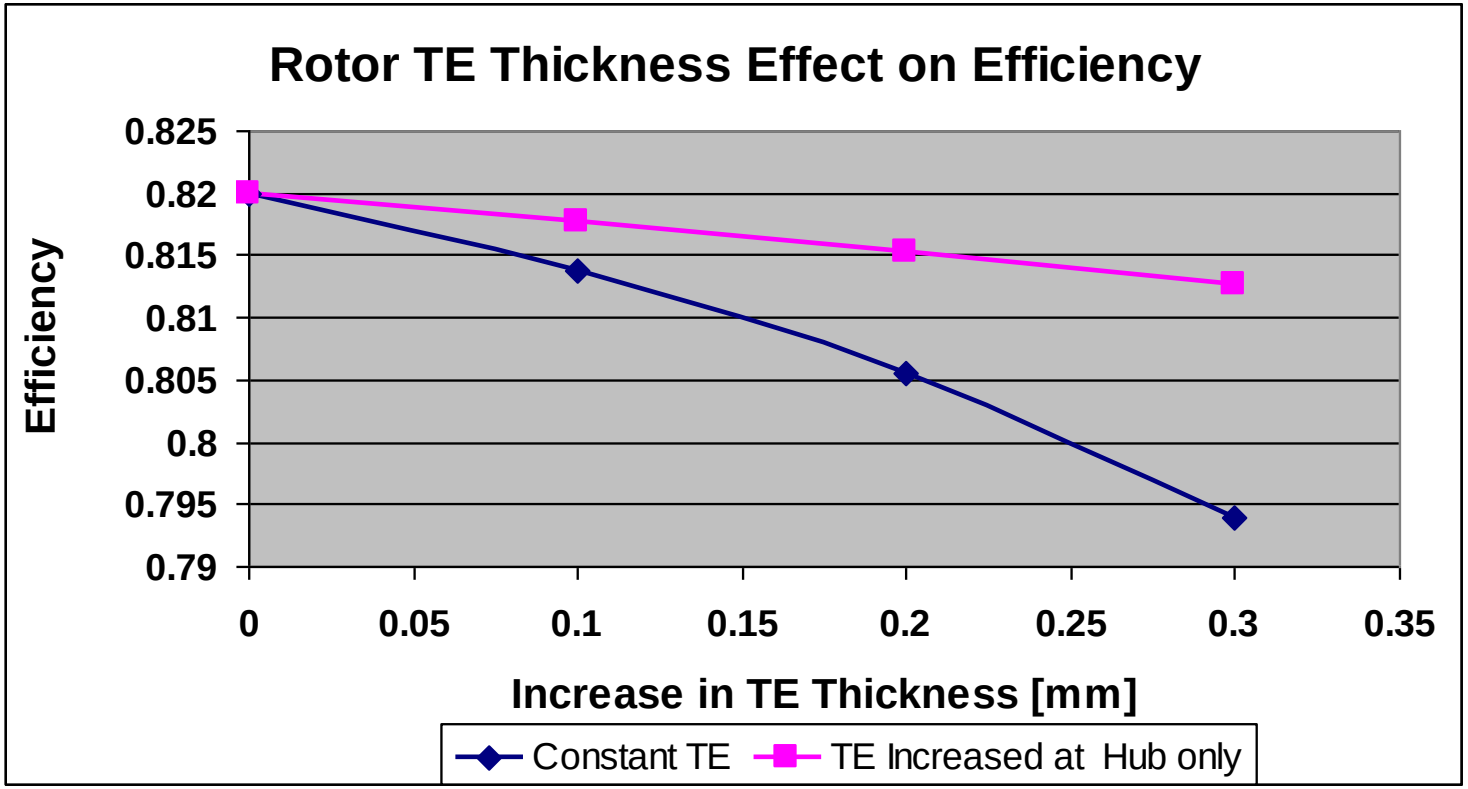


תצורה סופית-מפת טורבינה בעזרת מודל Mean Line



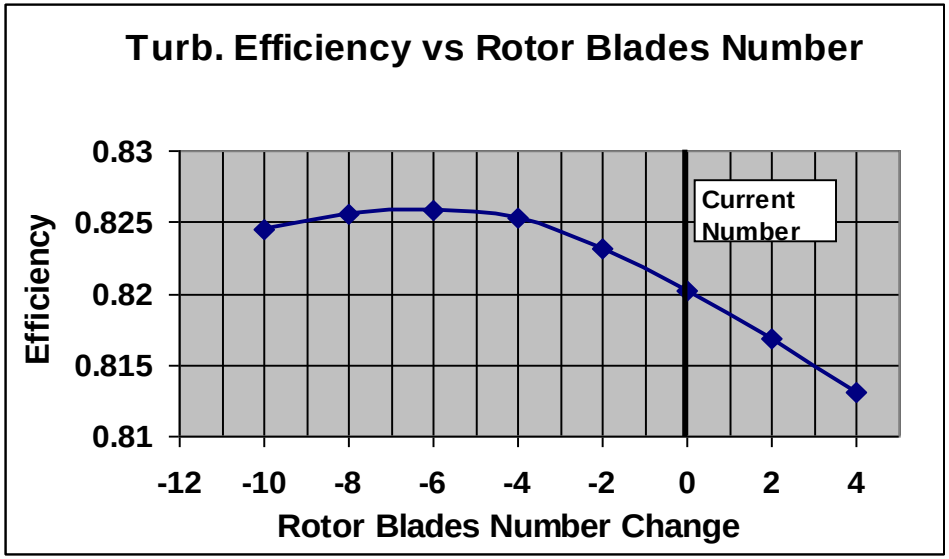
אופטימיזציה של הטורבינה - עובי שפת זרימה של רוטור

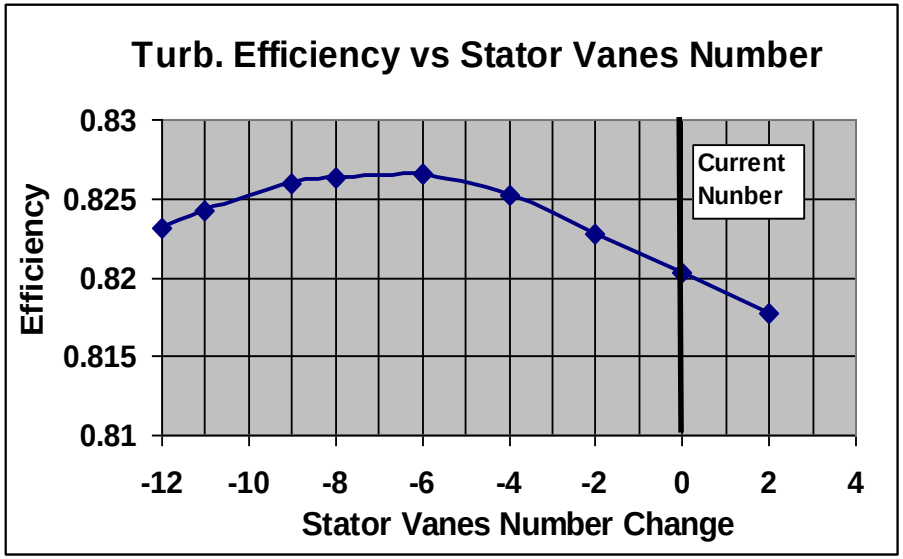
- ניתן להגדיל את עובי שפת זרימה של הרוטור ב-Hub (נושא מאמצים) ללא פגיעה משמעותית בביצועי הטורבינה.
- מבחינת חוזק וייצוריות מומלץ לתכנן רוטורים עם עובי שפת זרימה הקטן מהשורש לקצה הלהב



אופטימיזציה של הטורבינה - מספר להבים

- פוטנציאל לשיפור כולל של 1.3% בנצילות הטורבינה.
- פוטנציאל להוזלת החלקים.





סיכום ומסקנות

- התאמה טובה, בספיקה מסית בין כל החישובים עבור 2 התצורות.
- דיוק הערכת ספיקה מסית מוערך ב-1.5%-/+
- דיוק הערכת נצילות בכלי תכן המדוברים מוערך ב-2% -/+ אבסולוטי .
- תוכנת ה-CFD ששימשה לעבודה הנוכחית השיגה התכנסות, כתלות ברשת החישוב, של ספיקה מסית אך לא של נצילות.
- כלי ה-CFD ניראה כמספק להערכת ספיקה מסית ולבחינת איכותית של שדה הזרימה ותופעות מקומית.
- נבנתה מפת ביצועי טורבינה מחוץ לנקודת התכן (Off Design).
- זוהה פוטנציאל לשיפור בנצילות הטורבינה.

תודה !!

שאילות ?