

השפעת תהליך ההתנעה על התכן לחוזק של דיסקת  
טורבינה

מ. הראל

א. לוי

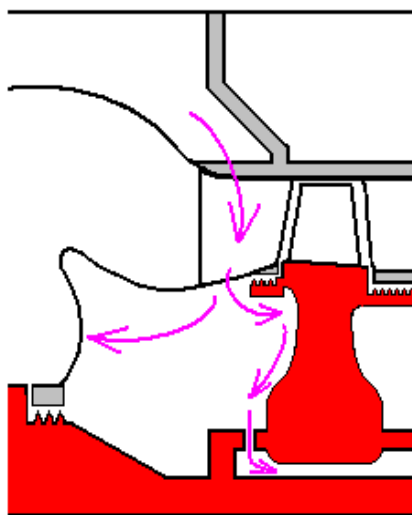
מנועי בית שמש

## השפעת תהליך ההתנעה על התכן לחוזק של דיסקת טורבינה

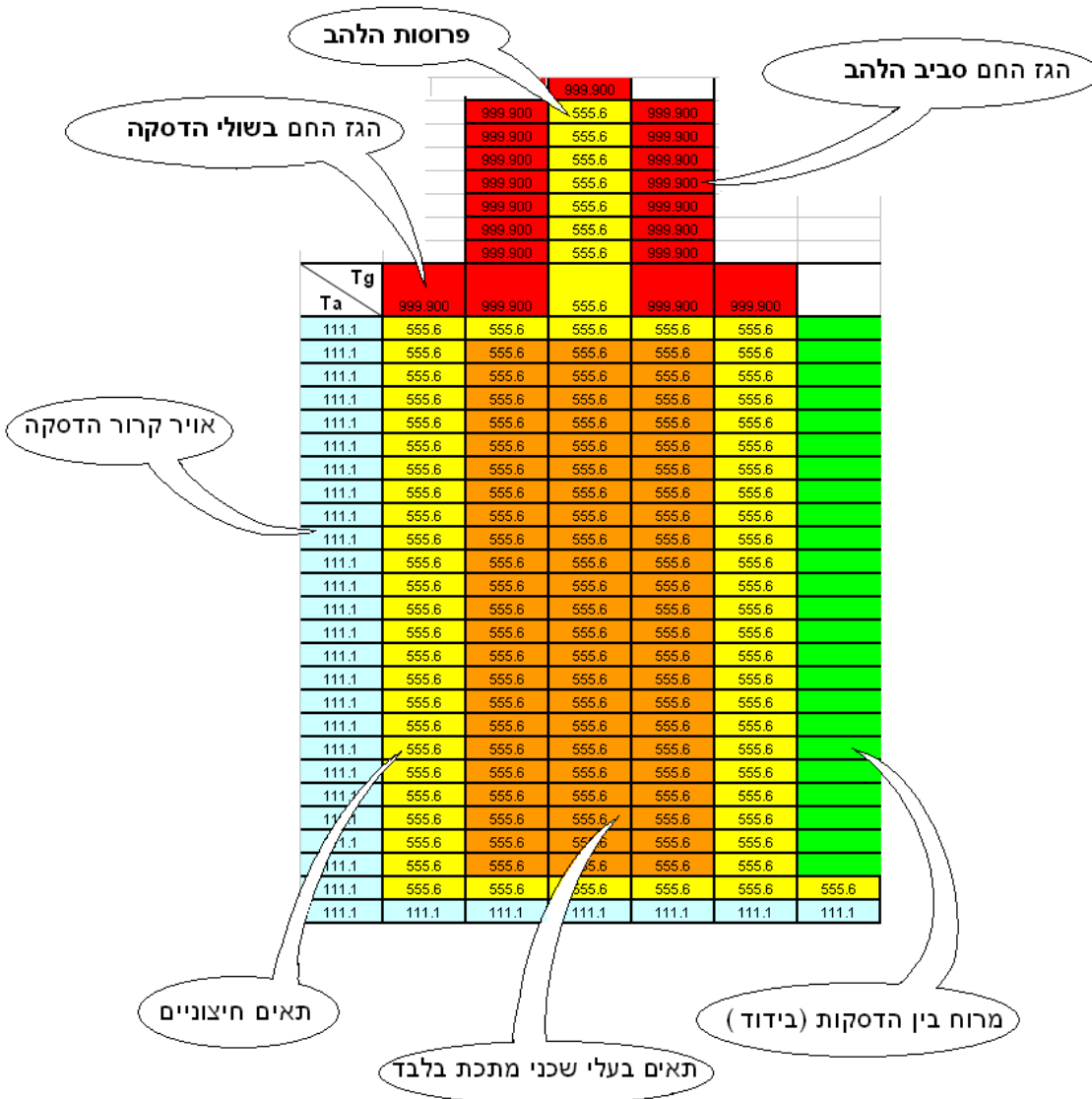
- דיסקת הטורבינה במנוע סילון פועלת בטמפרטורה גבוהה תחת מאמצים צנטריפוגליים ותרמיים .
- מבחינה תרמית היא שואבת חום מהלהבים הנתונים בטמפרטורה גבוהה יותר ומפנה אותו לאויר קרור המוזרם כנגדה.
- המצב הקשה ביותר בתפקוד דיסקת הטורבינה הוא התנעה המלווה בהחשה מידית למכסימום סל"ד .
- במצב זה גרדיאנט הטמפרטורה בדיסקה בין החלק החיצוני החם לחלק הפנימי הקר מכסימלי והמאמצים התרמיים מצטרפים למאמצים הצנטריפוגליים לערכים מסוכנים .
- להלן נציג שיטת חישוב פשוטה להערכת הסיכונים לדיסקת הטורבינה במצב התנעה .

## תרשים זרימת הקרור סביב דיסקת טורבינה

במקרה הנבדק אנו בוחנים דיסקת דרגה ראשונה בטורבינה  
דו דרגתית ומניחים שהצד הקרוב לדיסקה השכנה מבודד .



## גליון EXCEL לחישוב מעבר החום והטמפרטורות

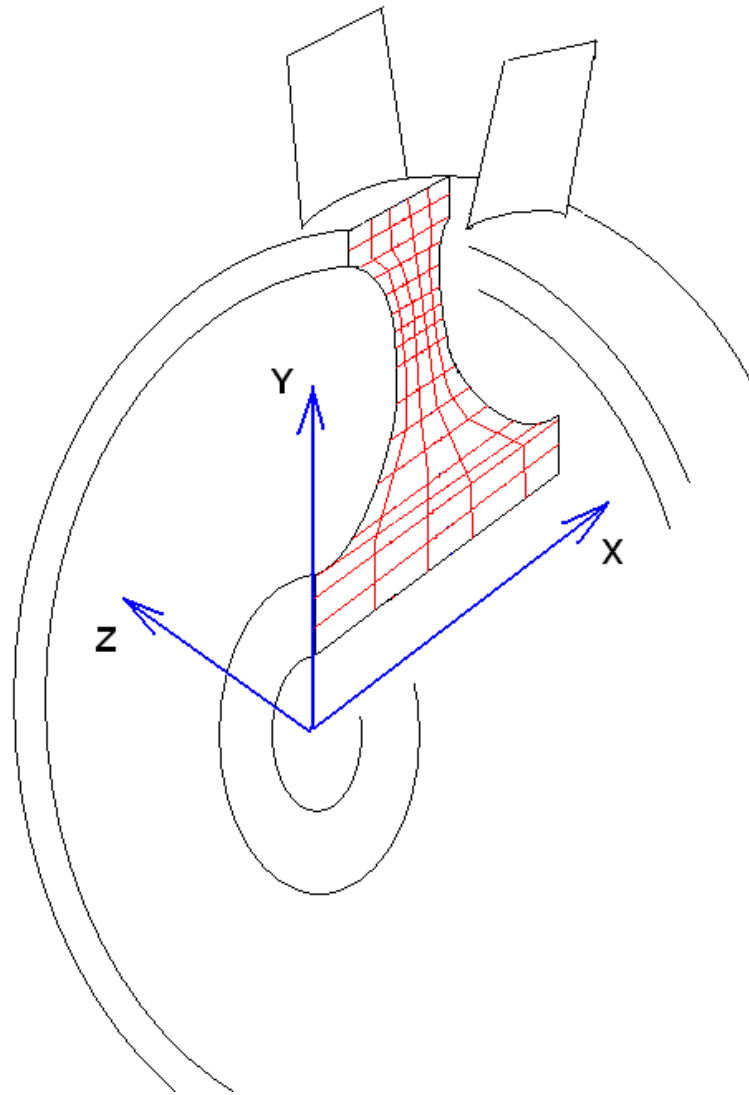


ה-להב מיוצג כאלמנט חד מימדי .

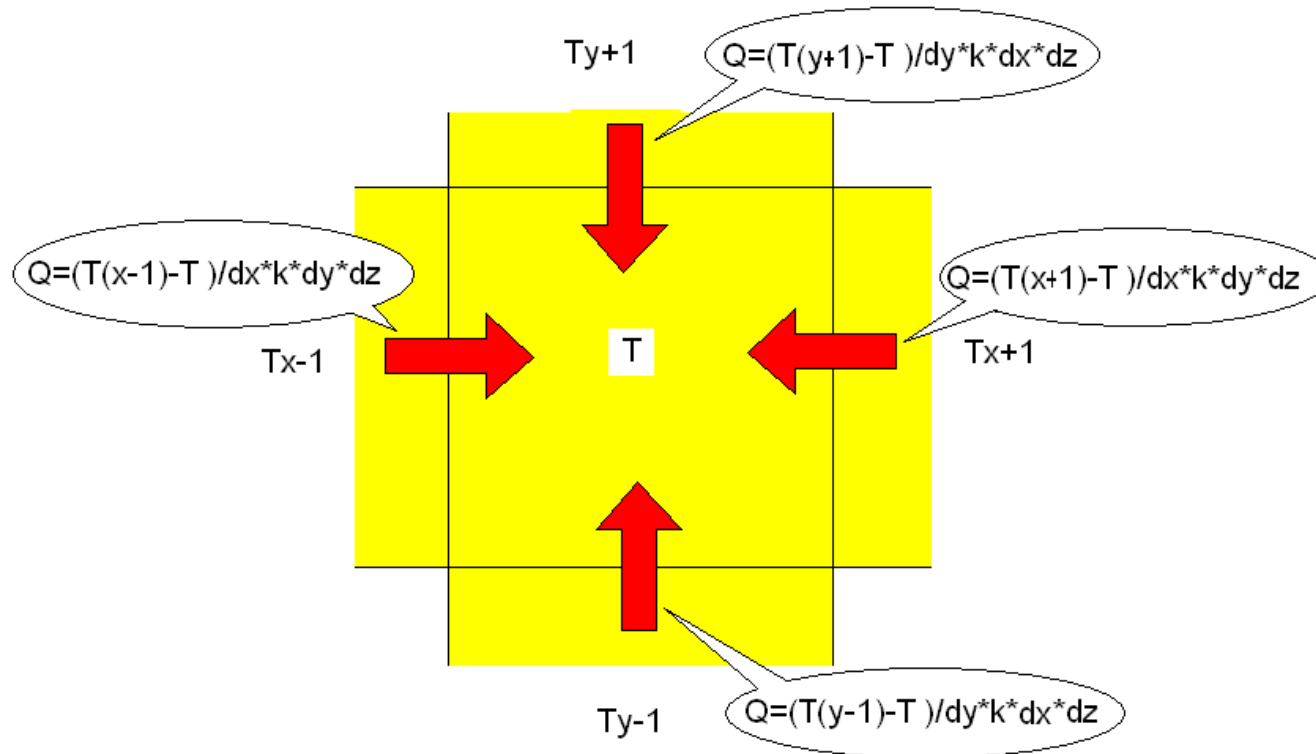
ה-דיסקה מיוצגת כ 4 שכבות לחישוב בהפרשים סופיים .

אפשר גם להניח דיסקה חד מימדית שרוחב פרוסותיה תלוי ברדיוס .

הגדרת כיווני הצירים ושכבות הדיסקה

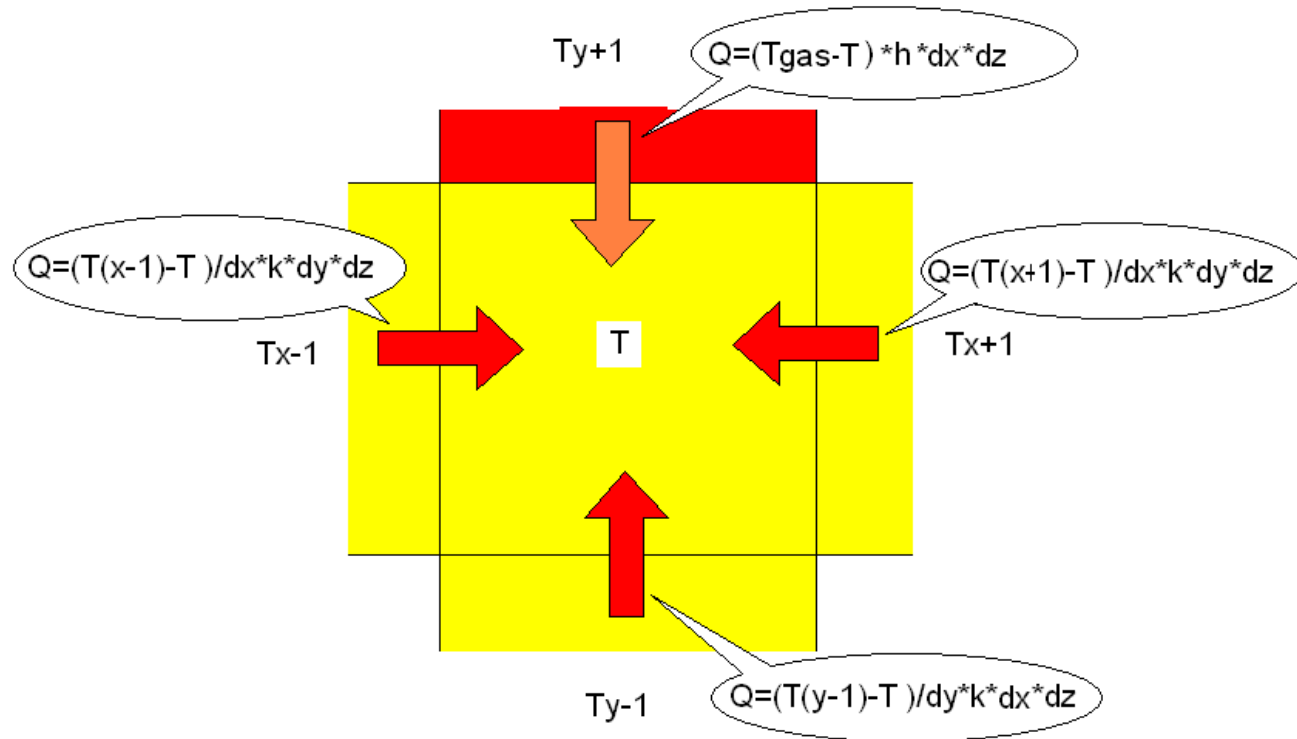


מאזן החום ועלית הטמפרטורה בתא באמצע המתכת בדיסקה (בחישוב טרנזיאנטי)



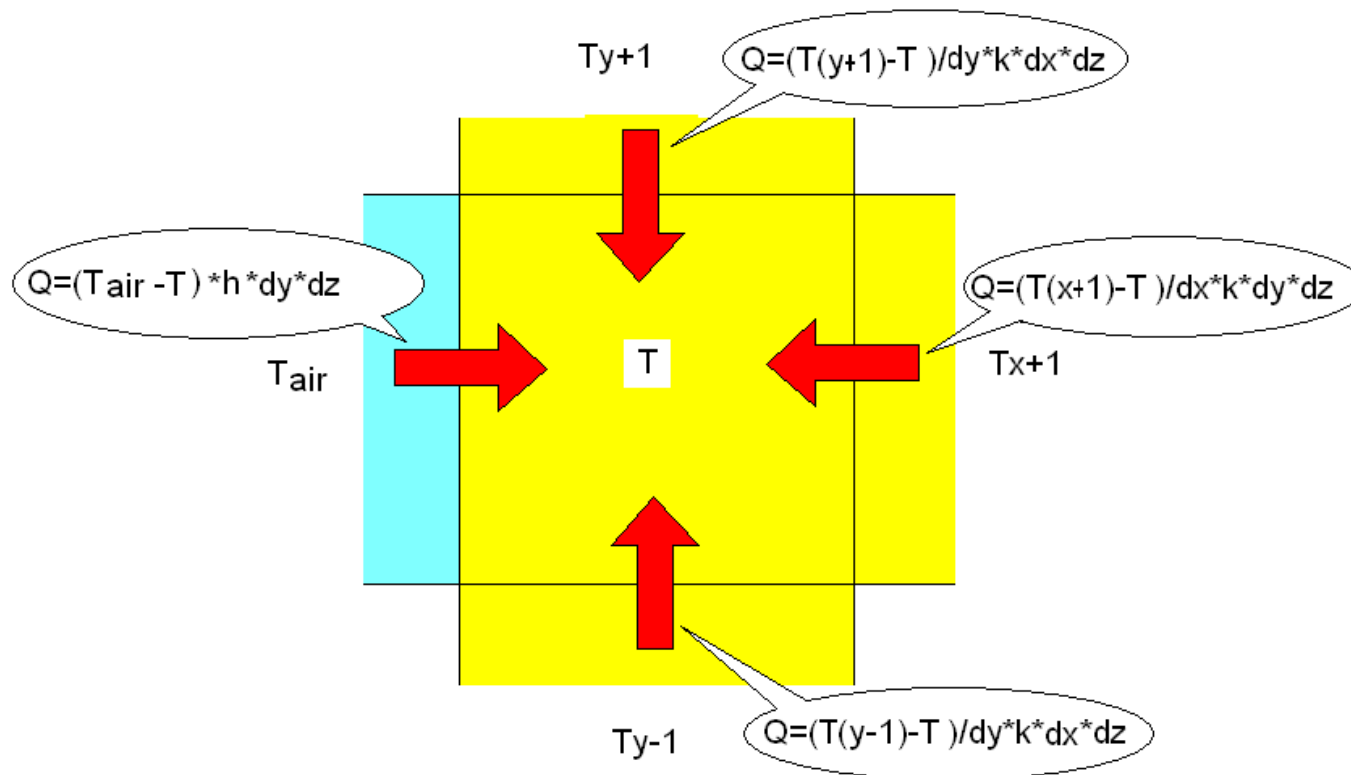
$$dT = \frac{\sum Q * dt}{c * \rho * dx * dy * dz} = \frac{k * dt}{c * \rho} \left[ \frac{T(x-1) + T(x+1) - 2T}{dx^2} + \frac{T(y-1) + T(y+1) - 2T}{dy^2} \right]$$

מאזן החום ועלית הטמפרטורה בתא צמוד לזרימת הגז החם (חישוב טרנזיאנטי)



$$dT = \frac{\sum Q \cdot dt}{C^* \rho^* dx \cdot dy \cdot dz} = \frac{(T_{gas}-T) \cdot h \cdot dt}{C^* \rho^* dy} + \frac{k \cdot dt}{C^* \rho} \left[ \frac{T(x-1)+T(x+1)-2T}{dx^2} + \frac{T(y+1)-T}{dy^2} \right]$$

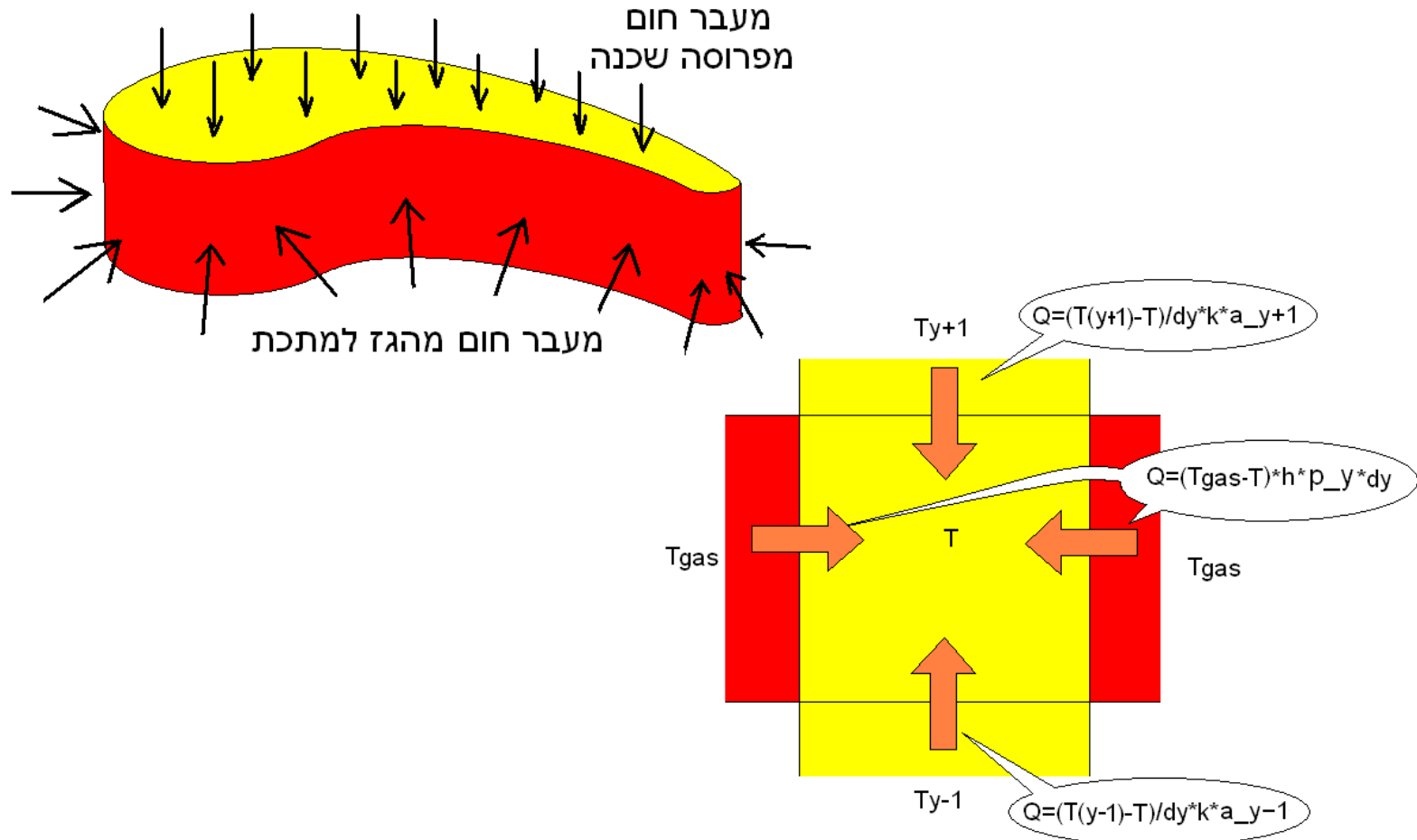
מאזן החום ועלית הטמפרטורה בתא צמוד לזרימת אויר הקרור (חישוב טרנזיאנטי)



$$dT = \frac{\sum Q * dt}{c * \rho * dx * dy * dz} = \frac{(T_{air} - T) * h * dt}{c * \rho * dx} + \frac{k * dt}{c * \rho} \left[ \frac{T(x+1) - T}{dx^2} + \frac{T(y-1) + T(y+1) - 2T}{dy^2} \right]$$

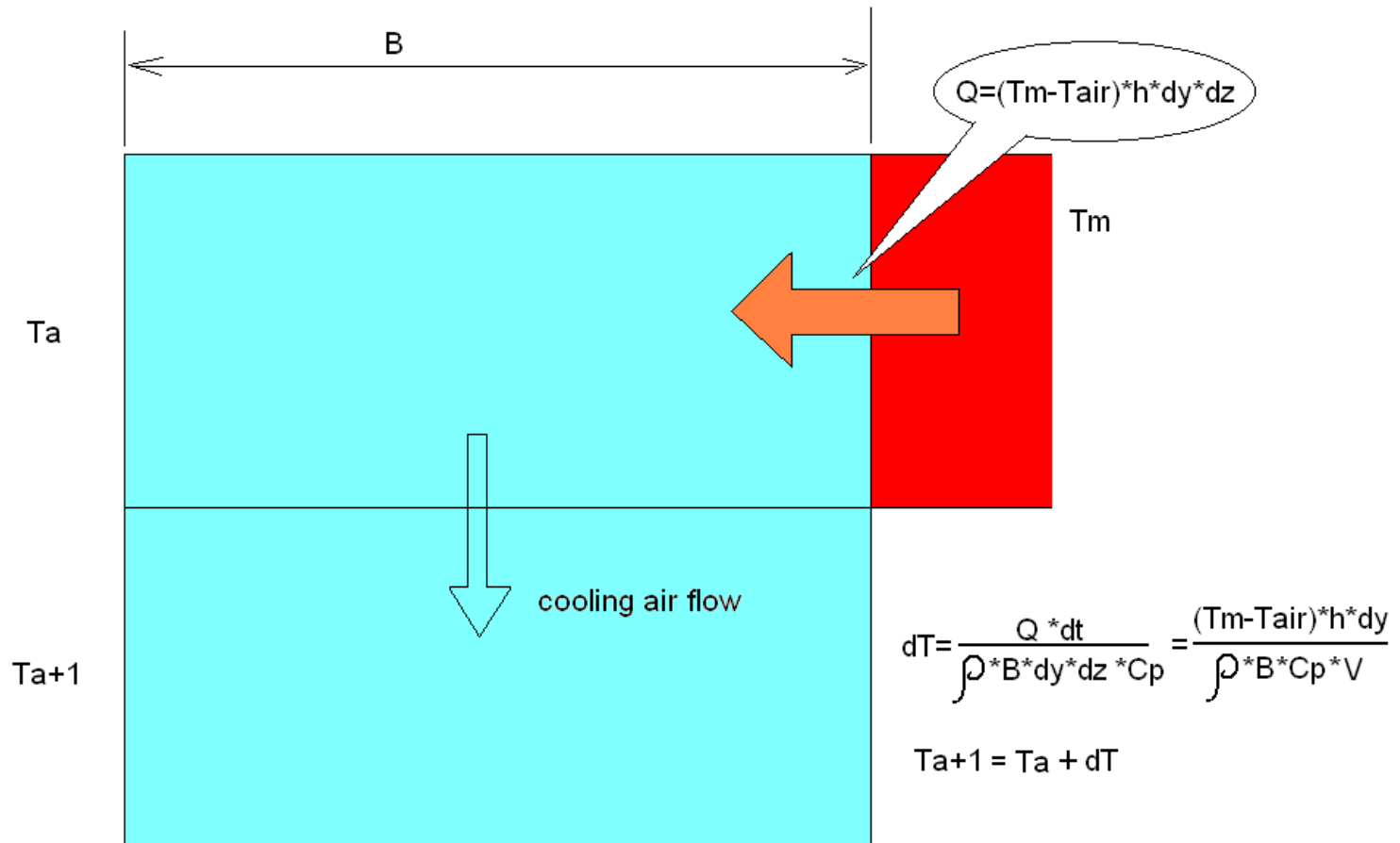


מאזן החום ועלית הטמפרטורה בפרוסת להב (חישוב טרנזיאנטי)



$$dT = \frac{\sum Q * dt}{c * \rho * a_y * dy} = \frac{(T_{gas} - T) * h * p_y * dt}{c * \rho * a_y} + \frac{k * dt}{c * \rho * dy^2 * a_y} * [(T(y+1) - T) * a_{y+1} + (T(y-1) - T) * a_{y-1}]$$

## התחממות אויר הקרור



נוסחה לחישוב מקדם מעבר חום בהסעה מהדסקה לאויר (מתוך מדריך מעבר חום של ג'נרל אלקטריק פרק 511.5 אוקטובר 1970)

$$h = C_1 \frac{k}{r} \left( \frac{\rho \omega r^2}{\mu} \right)^m \left( \frac{C_p \mu}{0.70k} \right)^a$$

$$C_1 = 0.35$$

$$m = 0.50$$

$$a = 0.44$$

|                     |                                 |
|---------------------|---------------------------------|
| $m$                 | - רדיוס מקומי                   |
| $\frac{kg}{m^3}$    | - $\rho$ צפיפות האויר           |
| $\frac{kg}{s * m}$  | - $\mu$ צמיגות האויר            |
| $\frac{J}{kg * K}$  | - $C_p$ קיבול חום האויר         |
| $\frac{W}{m * K}$   | - $k$ מוליכות חום האויר         |
|                     | - $Re$ מספר ריינולדס (אל מימדי) |
| $\frac{W}{m^2 * K}$ | - $h$ מקדם מעבר חום בהסעה       |

## מקדם מעבר החום סביב הלהב ( שיטת AINLEY מקוצרת )

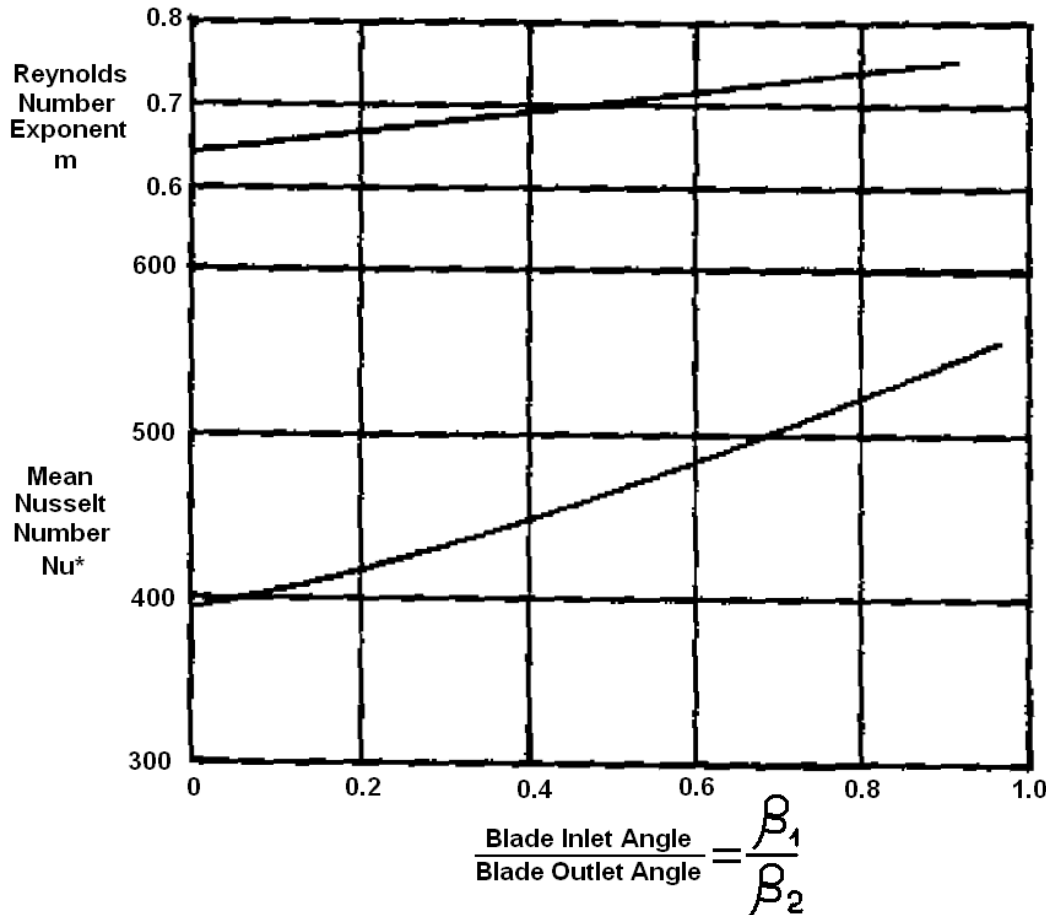
מקדם מעבר החום בין הלהב לגז סביבו , משתנה סביבו אבל קים קרוב ממוצע נכון לחתך נתון התלוי במספר רינולדס מחושב לפי טמפרטורת ההחזר האדיאבטית

$$T_{ADR} = T_{TREL} - 0.5(T_{TREL} - T_{ST})$$

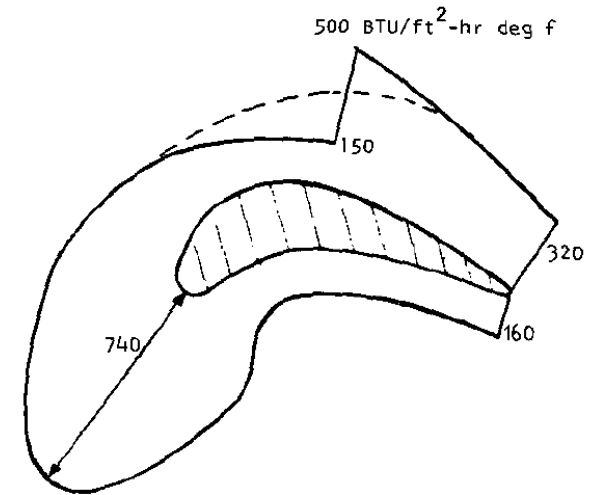
$$NU_{MEAN} = NU^* [Re/200000]^m$$

$$h_{mean} = (NU_{MEAN} \times k_{mean}) / C$$

שיטה מתאימה לחישוב חד מימדי



Ainley Correlation for Turbine Blade Average Heat Transfer



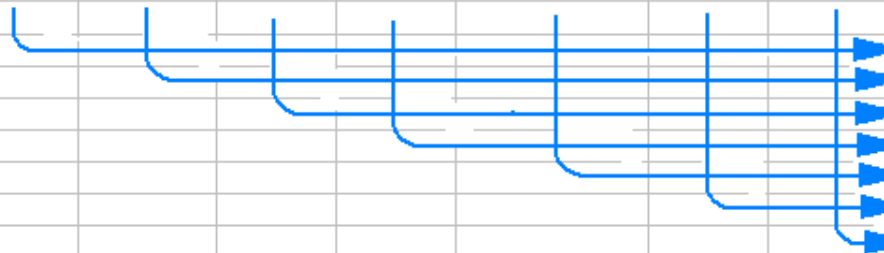
Heat Transfer Coefficients Around a Turbine Blade

## הגדרת הבעיה התרמית

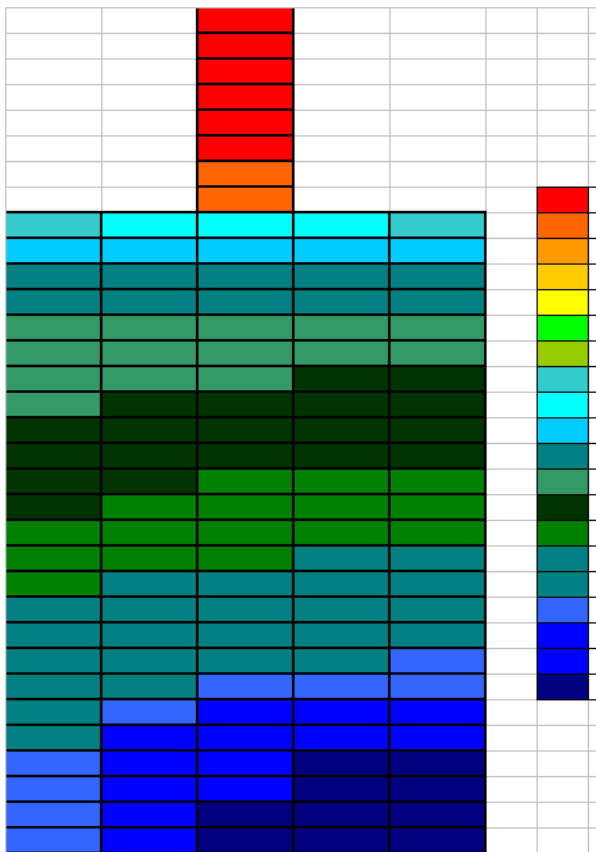
- תנאי ההתחלה של הבעיה ב  $t=0$  :
- האויר האופף את הטורבינה , דיסקה ולהבים בטמפרטורת החדר .
- טמפרטורת המתכת של הלהב\דיסקה בטמפרטורת החדר .
- מפעילים פונקצית מדרגה כך שטמפרטורת אויר הקרור סביב הדיסקה וטמפרטורת הגזים בין הלהבים הן אלה המתקבלות במכסימום מנוע .
- אם רוצים מודל קרוב יותר למציאות טמפרטורות אויר הקרור והגזים יעלו בקו ישר ( או יותר ריאלי ) לפי קצב ההחשה עד לערכן המיוצב .
- מפעילים את משוואות מעבר החום על תנאי ההתחלה למציאת פילוג הטמפרטורה לאורך זמן עד לקבלת מצב מתמיד .

# חישוב תכונות האויר לאורך מסלול הקרוז

| R        | ro       | mu       | Cp       | k        | Re       | h        | V        | Tg       |  | 3.00E+02 | 3.00E+02 | 2.00E+02 | 3.00E+02 | 3.00E+02 |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          |          |          |          |          |          |          |          | Ta       |  |          |          |          |          |          |          |
| 1.11E-01 | 1.10E+00 | 1.00E-02 | 1.00E+03 | 7.00E-02 | 7.78E+05 | 5.00E+03 | 2.00E-01 | 1.00E+02 |  | 2.00E+02 | 2.00E+02 | 2.00E+02 | 2.00E+02 | 2.00E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.10E+00 | 9.00E-03 | 9.00E+02 | 6.30E-02 | 7.00E+05 | 4.50E+03 | 1.80E-01 | 9.00E+01 |  | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.10E+00 | 8.10E-03 | 8.10E+02 | 5.67E-02 | 6.30E+05 | 4.05E+03 | 1.62E-01 | 8.10E+01 |  | 1.62E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.10E+00 | 7.29E-03 | 7.29E+02 | 5.10E-02 | 5.67E+05 | 3.65E+03 | 1.46E-01 | 7.29E+01 |  | 1.46E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.10E+00 | 6.56E-03 | 6.56E+02 | 4.59E-02 | 5.10E+05 | 3.28E+03 | 1.31E-01 | 6.56E+01 |  | 1.31E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 5.90E-03 | 5.90E+02 | 4.13E-02 | 4.59E+05 | 2.95E+03 | 1.18E-01 | 5.90E+01 |  | 1.18E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 5.31E-03 | 5.31E+02 | 3.72E-02 | 4.13E+05 | 2.66E+03 | 1.06E-01 | 5.31E+01 |  | 1.06E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 4.78E-03 | 4.78E+02 | 3.35E-02 | 3.72E+05 | 2.39E+03 | 9.57E-02 | 4.78E+01 |  | 9.57E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 4.30E-03 | 4.30E+02 | 3.01E-02 | 3.35E+05 | 2.15E+03 | 8.61E-02 | 4.30E+01 |  | 8.61E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 3.87E-03 | 3.87E+02 | 2.71E-02 | 3.01E+05 | 1.94E+03 | 7.75E-02 | 3.87E+01 |  | 7.75E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 3.49E-03 | 3.49E+02 | 2.44E-02 | 2.71E+05 | 1.74E+03 | 6.97E-02 | 3.49E+01 |  | 6.97E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 3.14E-03 | 3.14E+02 | 2.20E-02 | 2.44E+05 | 1.57E+03 | 6.28E-02 | 3.14E+01 |  | 6.28E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 2.82E-03 | 2.82E+02 | 1.98E-02 | 2.20E+05 | 1.41E+03 | 5.65E-02 | 2.82E+01 |  | 5.65E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 2.54E-03 | 2.54E+02 | 1.78E-02 | 1.98E+05 | 1.27E+03 | 5.08E-02 | 2.54E+01 |  | 5.08E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.11E+00 | 2.29E-03 | 2.29E+02 | 1.60E-02 | 1.78E+05 | 1.14E+03 | 4.58E-02 | 2.29E+01 |  | 4.58E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 2.06E-03 | 2.06E+02 | 1.44E-02 | 1.60E+05 | 1.03E+03 | 4.12E-02 | 2.06E+01 |  | 4.12E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 1.85E-03 | 1.85E+02 | 1.30E-02 | 1.44E+05 | 9.27E+02 | 3.71E-02 | 1.85E+01 |  | 3.71E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 1.67E-03 | 1.67E+02 | 1.17E-02 | 1.30E+05 | 8.34E+02 | 3.34E-02 | 1.67E+01 |  | 3.34E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 1.50E-03 | 1.50E+02 | 1.05E-02 | 1.17E+05 | 7.50E+02 | 3.00E-02 | 1.50E+01 |  | 3.00E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 1.35E-03 | 1.35E+02 | 9.46E-03 | 1.05E+05 | 6.75E+02 | 2.70E-02 | 1.35E+01 |  | 2.70E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 1.22E-03 | 1.22E+02 | 8.51E-03 | 9.46E+04 | 6.08E+02 | 2.43E-02 | 1.22E+01 |  | 2.43E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 1.09E-03 | 1.09E+02 | 7.66E-03 | 8.51E+04 | 5.47E+02 | 2.19E-02 | 1.09E+01 |  | 2.19E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 9.85E-04 | 9.85E+01 | 6.89E-03 | 7.66E+04 | 4.92E+02 | 1.97E-02 | 9.85E+00 |  | 1.97E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 8.86E-04 | 8.86E+01 | 6.20E-03 | 6.89E+04 | 4.43E+02 | 1.77E-02 | 8.86E+00 |  | 1.77E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |          |
| 1.11E-01 | 1.12E+00 | 7.98E-04 | 7.98E+01 | 5.58E-03 | 6.20E+04 | 3.99E+02 | 1.60E-02 | 7.98E+00 |  | 1.60E+01 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 | 1.80E+02 |
|          |          |          |          |          |          |          |          | 7.18E+00 |  | 8.68E+02 | 8.68E+02 | 8.68E+02 | 8.68E+02 | 8.68E+02 | 8.68E+02 |
|          |          |          |          |          |          |          |          | ro       |  | 1.12E+00 | 1.01E+00 | 9.10E-01 | 8.19E-01 | 7.37E-01 | 6.64E-01 |
|          |          |          |          |          |          |          |          | mu       |  | 7.98E-04 | 7.18E-04 | 6.46E-04 | 5.81E-04 | 5.23E-04 | 4.71E-04 |
|          |          |          |          |          |          |          |          | Cp       |  | 7.98E+01 | 7.18E+01 | 6.46E+01 | 5.81E+01 | 5.23E+01 | 4.71E+01 |
|          |          |          |          |          |          |          |          | k        |  | 6.14E-02 | 5.53E-02 | 4.97E-02 | 4.48E-02 | 4.03E-02 | 3.63E-02 |
|          |          |          |          |          |          |          |          | Re       |  | 6.20E+04 | 5.58E+04 | 5.03E+04 | 4.52E+04 | 4.07E+04 | 3.66E+04 |
|          |          |          |          |          |          |          |          | h        |  | 3.99E+02 | 3.59E+02 | 3.23E+02 | 2.91E+02 | 2.62E+02 | 2.36E+02 |
|          |          |          |          |          |          |          |          | V        |  | 1.60E-02 | 1.44E-02 | 1.29E-02 | 1.16E-02 | 1.05E-02 | 9.42E-03 |



פילוג טמפרטורה בדיסקה זמן קצר מההתנעה



|           |         |         |         |         |         |       |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
|           |         |         | 999.900 |         |         |       |
|           |         | 999.900 | 555.6   | 999.900 |         |       |
|           |         | 999.900 | 555.6   | 999.900 |         |       |
|           |         | 999.900 | 555.6   | 999.900 |         |       |
|           |         | 999.900 | 555.6   | 999.900 |         |       |
|           |         | 999.900 | 555.6   | 999.900 |         |       |
|           |         | 999.900 | 555.6   | 999.900 |         |       |
|           |         | 999.900 | 555.6   | 999.900 |         |       |
| <b>Tg</b> |         |         |         |         |         |       |
| <b>Ta</b> | 999.900 | 999.900 | 555.6   | 999.900 | 999.900 |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   |       |
| 111.1     | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6   | 555.6 |
| 111.1     | 111.1   | 111.1   | 111.1   | 111.1   | 111.1   | 111.1 |

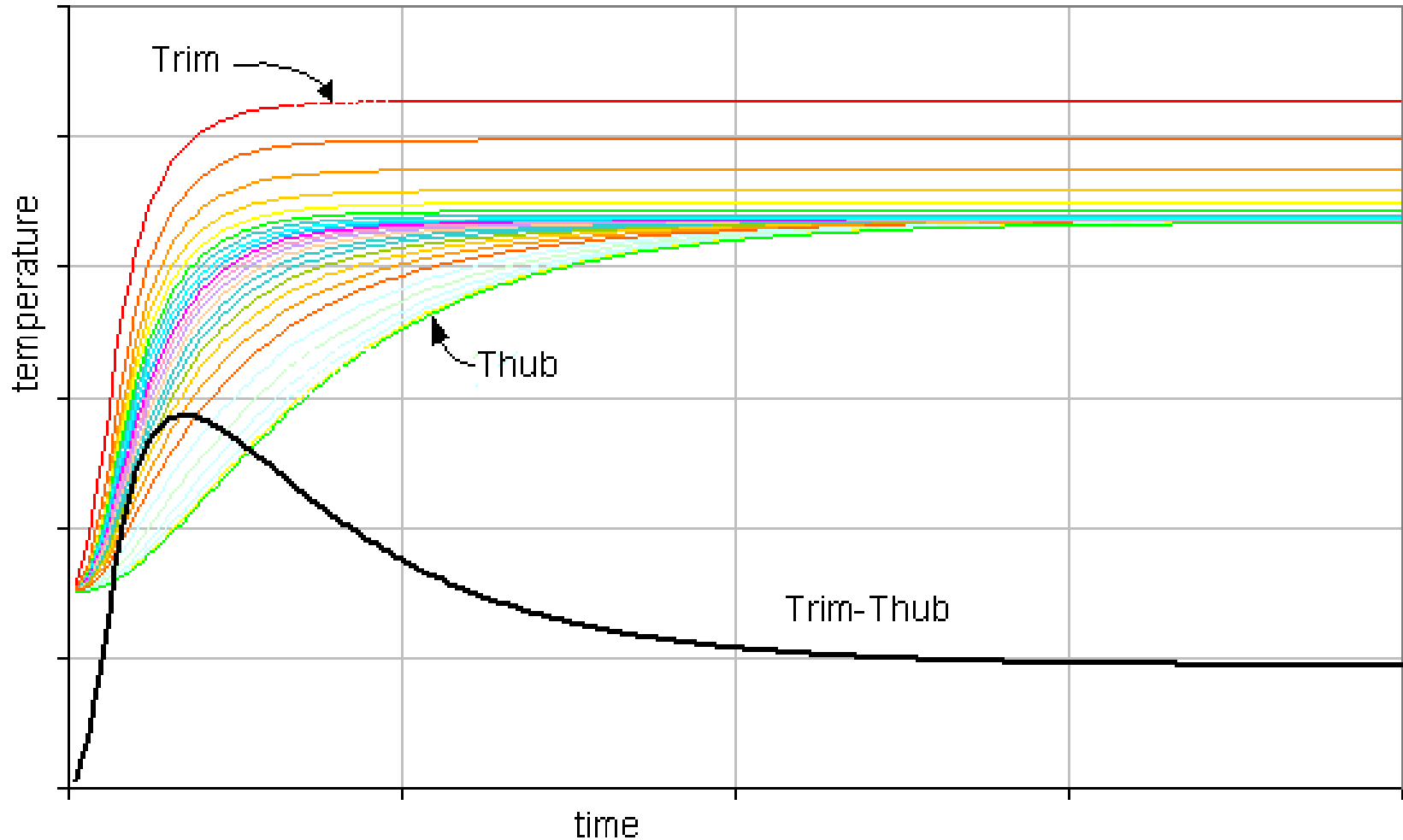




## תוצאות החישוב

- התפתחות פילוג הטמפרטורה לאורך הדסקה בזמן (הקו השחור הוא ההפרש בין הקצוות).

TIME VARIATION OF TEMPERATURE GRADIENT



## ניתוח התוצאות

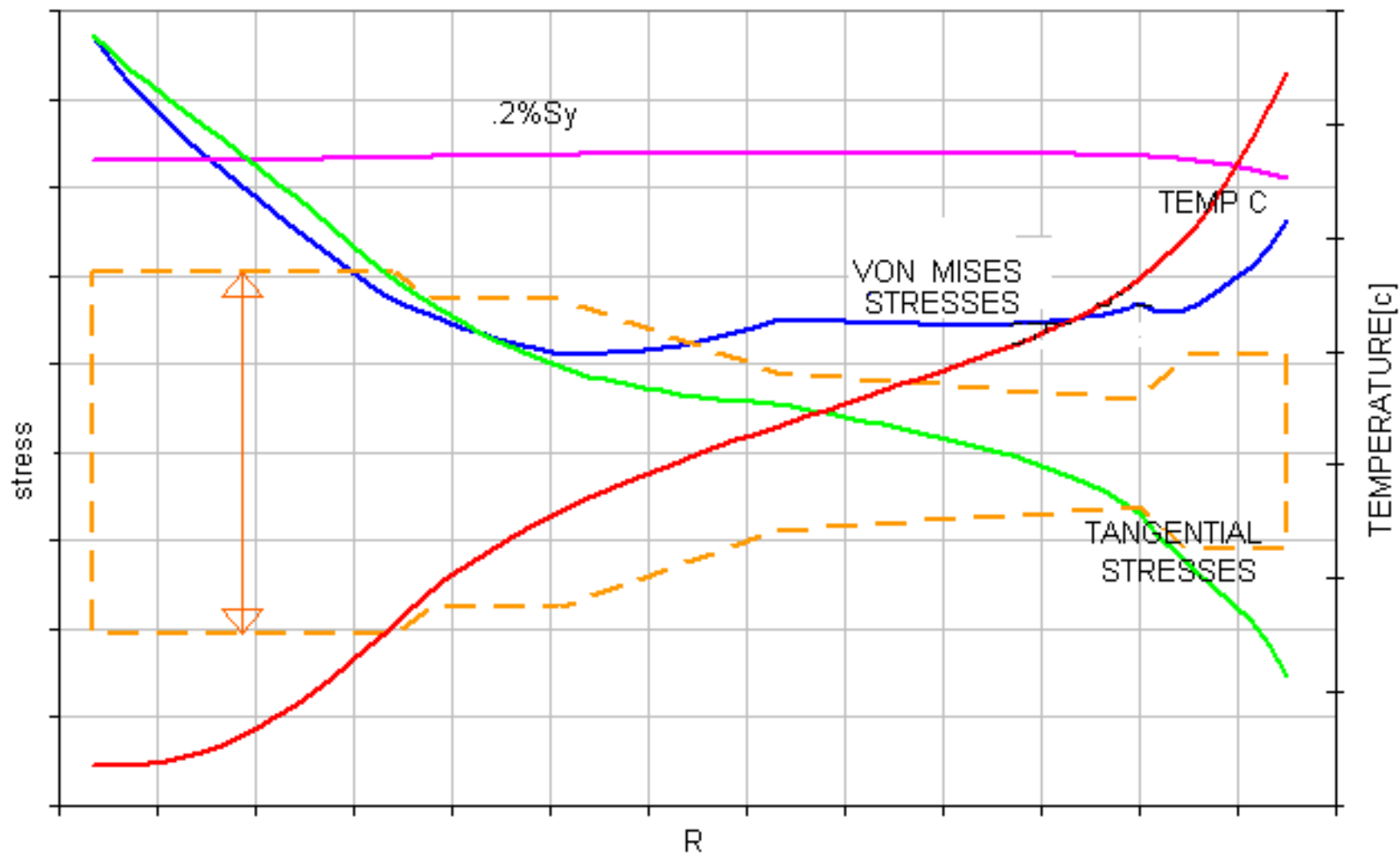
- מעיון בגרף התוצאות אנו למדים שבזמן  $t_{cr}$  ( בזמן זה המנוע כבר הגיע למכסימום סל"ד מזמן ) הגרדיאנט מכסימלי . כאן אנו בסביבת המצב המסוכן .
- משתמשים בתכנית חד-ממדית\* לחישוב מאמצים כאשר נתונים שני אילוצים :
  - סל"ד מכסימלי .
  - פילוג טמפרטורה בכמה נקודות בזמן סביב זמן  $t_{cr}$  .
- משרטטים גרף של מאמץ פון-מיזס לאורך הרדיוס כנגד מאמץ הכניעה של החמר ( או מאמץ מותר אחר ) .
- במקרה של חריגה מהמאמץ המותר מנסים גאומטריה אחרת .

\*למשל לפי :

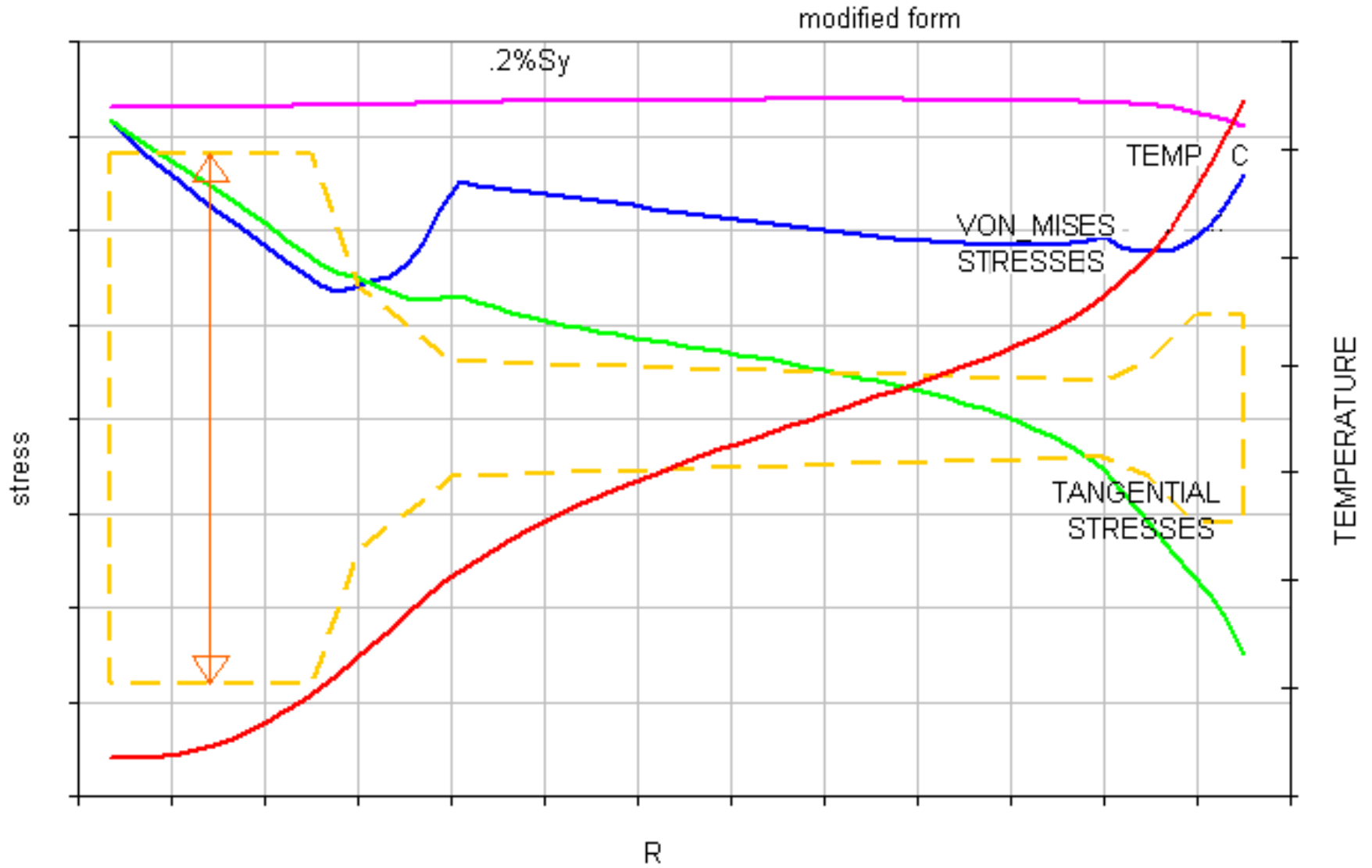
NACA TN 1279 S.S.MANSON – DETERMINATION OF ELASTIC STRESSES IN GAS TURBINE DISKS , 1947.

מאמצים בדסקה: גרסה ראשונה של גיאומטרית הדסקה, המאמץ השקול עובר את גבול הכניעה

original form



מאמצים לאחר שיפור גיאומטרית הדסקה. בשולי הדסקה המאמץ השקול קרוב לגבול הכניעה



## סיכום

- הוצגה שיטה למציאת פילוג הטמפרטורה המסוכן ביותר בדיסקת טורבינה המבוססת על שימוש בחישובי EXCEL .
- פילוג זה מאפשר חישוב מאמצים חד-ממדי של דיסקת הטורבינה בשיטה חד ממדית ( ראה NACA TN 871 למשל ) להגדרה ראשונית של פרופיל הדיסקה ולבחירת החמר .
- כמובן שידרש אחר כך חישוב CFD לטמפרטורות ומאמצים באלמנטים סופיים לפני אישור סופי של הגאומטריה והחמר של הדיסקה .