

## דף נוסחאות - חוזק חומרים 1

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\Delta l = \frac{Fl}{AE}$$

### התארכות - חוק הוק (Hooke's Law)

התארכות  $\Delta l_{[mm]}$

כח  $F_{[N]}$

שטח חתך  $A_{[mm^2]}$

מודול יאנג של החומר  $E_{[MPa]}$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

### עיבור - התארכות יחסית - מעוות (Strain)

$\Delta l_{[mm]}$  שינוי באורך החלק

$l_{[mm]}$  אורך המקורי של החלק

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

### מודול יאנג / מודול אלסטיות (Young modulus)

(השיפוע של התחום האלסטי)

$$\sigma_y$$

### מאמץ כניעה (Yield Stress)

המאמץ המקסימלי של התחום האלסטי

$$\sigma_{UTS}$$

### מאמץ שבר / מאמץ קריעה (Ultimate Tensile Strength)

המאמץ המקסימלי של התחום הפלסטי

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

### מאמץ מתיחה/לחיצה (Tensile Stress)

מאמץ מתיחה/לחיצה  $\sigma_{[MPa]}$

כח בכיוון ניצב לחתך  $F_{[N]}$

שטח החתך  $A_{[mm^2]}$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

### מאמץ גזירה (Shear Stress)

מאמץ גזירה  $\tau_{[MPa]}$

כח בכיוון מקביל לחתך  $F_{[N]}$

שטח החתך  $A_{[mm^2]}$

$$\sigma_b = \frac{F}{d \cdot t}$$

### מאמץ מעיכה (Bearing Stress)

מאמץ מעיכה (מאמץ מקומי)  $\sigma_b_{[MPa]}$

כח  $F_{[N]}$

קוטר הקדח  $d_{[mm]}$

עובי דופן  $t_{[mm]}$

$$K_t$$

### מקדם ריכוז מאמצים (Stress Concentration factor)

שולפים מטבלה עבור כל מקרה ספציפי של ריכוז מאמצים

$$\sigma_{max} = \frac{F}{A} \cdot K_t$$

### מאמץ מתיחה/לחיצה מקסימלי כאשר יש ריכוז מאמצים

מאמץ לחיצה/מתיחה מקסימלי בנק' ריכוז מאמצים  $\sigma_{max}[MPa]$

כח  $F_{[N]}$

שטח חתך  $A_{[mm^2]}$

11/10/2014

$$[\sigma_{allow}] = \frac{\sigma_y}{[n]}$$

**מאמץ כניעה מותר**  
 $\sigma_{allow}$  [MPa] מאמץ כניעה הכולל מקדם בטיחות  
 $\sigma_y$  [MPa] מאמץ כניעה  
[n] (Factor Of Safety) מקדם בטיחות

$$\tau = \gamma \cdot G$$

**מעוות בגזירה (Shear Strain)**  
 $\tau$  [MPa] מאמץ גזירה  
 $\gamma$  [rad] זווית סטיית האנך בעקבות הפעלת כח גזירה  
 $G$  [MPa] מודול גזירה

$$G = \frac{Fl}{A\Delta x}$$

**מודול גזירה / מודול זיחה (Shear Modulus / Modulus of rigidity)**

$$G_{steel} = 8 \cdot 10^4 \text{ [MPa]}$$

$F$  [N] כח  
 $l$  [mm] אורך  
 $A$  [mm<sup>2</sup>] שטח חתך

$$\Delta l = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

**התפשטות תרמית**  
 $\Delta l$  [mm] שינוי באורך החלק  
 $L$  [mm] אורך החלק  
 $\alpha$  [ $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ ] מקדם התפשטות הקווית (נתון בטבלה עבור כל סוג חומר)  
 $\Delta T$  [°C] שינוי בטמפרטורה

11/10/2014

$$\tau_{max} = \frac{M_T \cdot R}{I_p}$$

$$M_T = \frac{\tau_{max} \cdot I_p}{R}$$

$$\theta = \frac{M_T \cdot l}{G \cdot I_p}$$

$$Z_p = \frac{I_p}{R} = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi}{16} d^3$$

$$I_p = \frac{\pi}{32} D^4$$

$$I_p = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4)$$

$$\theta_{[deg]} = \theta_{[rad]} \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\theta_{[rad]} = \theta_{[deg]} \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$d = 1.72 \sqrt[3]{\frac{M_T}{\tau_{max}}}$$

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{M_t \cdot n}{9550}$$

$$P_{shaft} = M \cdot \omega = M \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

$$1[kW] = 1.341[HP]$$

**מאמץ פיתול (Torsion Stress)**  
 מומנט פיתול  $M_t$  [N·mm]  
 $\tau_{max}$  [MPa] מאמץ גזירה מקסימלי (המאמץ שמתפתח בהיקף המוט/צינור)  
 $R$  [mm] רדיוס החתך (עבור מאמץ מקסימלי נציב את הרדיוס החיצוני של המוט/צינור)  
 (בגלל הנחת St Venant אנחנו מתעסקים רק בחתכים עגולים)  
 $I_p$  [mm<sup>4</sup>] מומנט אינרציה פולרי של החתך

**מומנט פיתול (Torque)**

**זווית פיתול**  
 $\theta$  [rad] זווית פיתול  
 $M_t$  [N·mm] מומנט פיתול  
 $l$  [mm] אורך הגל/ציר  
 $G$  [MPa] מודול גזירה של החומר / מודול זיחה  
 $I_p$  [mm<sup>4</sup>] מומנט אינרציה פולרי של הפרופיל

**התנגדות החתך לפיתול**

**מומנט אנרציה פולרי – מידת התנגדות הגוף לפיתול**

**מומנט אנרציה פולרי של פרופיל עגול (מלא)**  
 $D$  [mm] קוטר חיצוני

**מומנט אנרציה פולרי של צינור**  
 $D$  [mm] קוטר חיצוני  
 $d$  [mm] קוטר פנימי

**מעבר זווית מ-רדיאן למעלות**

**מעבר זווית מ-מעלות לרדיאן**

**קוטר גל נדרש להעברת הספק**  
 $d$  [mm] קוטר הגל הדרוש בקטע שבו פועל המומנט  
 $M_T$  [N·mm] מומנט פיתול  
 $\tau_{max}$  [MPa] מאמץ גזירה מקסימלי של הגל

**הספק מנוע (Power) - עבודה ליחידת זמן**  
 $P$  [Watt] הספק  
 $W$  [Joule] עבודה  
 $t$  [sec] זמן  
 $M_t$  [N·mm] מומנט פיתול  
 $n$  [RPM] מספר סיבובים לדקה / מהירות סיבוב

**הספק של ציר מסתובב**  
 $P$  [Watt] הספק  
 $M$  [N·m] מומנט  
 $\omega$  [rad/sec] מהירות זוויתית  
 $n$  [RPM] מספר סיבובים לדקה

11/10/2014

$$\sigma = \frac{M \cdot y_{max}}{I_x}$$

$$M = \frac{\sigma \cdot I_x}{y_{max}}$$

$$M = \frac{\sigma \cdot I_y}{x_{max}}$$

$$\sigma = \frac{M_{max} \cdot y_{max}}{I_x} = \frac{M}{\frac{I_x}{y_{max}}} = \frac{M}{z}$$

$$\sigma = \frac{M_{max} \cdot x_{max}}{I_y} = \frac{M}{\frac{I_y}{x_{max}}} = \frac{M}{z}$$

$$\varepsilon = \frac{-y}{\rho}$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

$$\sigma_{(x,y)} = \frac{M \cdot \cos\beta \cdot y}{I_x} + \frac{M \cdot \sin\beta \cdot x}{I_y}$$

$$tg(\alpha) = -\frac{I_x}{I_y} \cdot tg(\beta)$$

**מאמץ כפיפה (Bending Stress) (מתיחה/לחיצה)**

$\sigma_{[MPa]}$  מאמץ כפיפה במיקום  $y$  בקורה  
 $M_{[N \cdot mm]}$  מומנט כפיפה  
 $y_{max}[mm]$  מרחק בין נקודת מרכז הכובד לסיב הרחוק ביותר בקורה  
 $I_x[mm^4]$  מומנט אנרציה של שטח הפרופיל כולו, סביב ציר  $x$  מרכז כובד

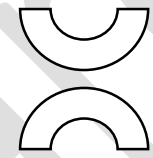
**מומנט כפיפה מקסימלי**

$M_{[N \cdot mm]}$  מומנט כפיפה  
 $\sigma_{[MPa]}$  מאמץ מתיחה/לחיצה במיקום  $y$  בקורה  
 $I_x[mm^4]$  מומנט אנרציה של שטח הפרופיל כולו סביב ציר  $x$  מרכז כובד  
 $y_{max}[mm]$  מרחק בין נקודת מרכז הכובד לסיב הרחוק ביותר בקורה

**מאמץ כפיפה מקסימלי סביב ציר  $x$  או  $y$  בחתך**

$\sigma_{[MPa]}$  מאמץ כפיפה במיקום  $y$  בקורה  
 $M_{[N \cdot mm]}$  מומנט כפיפה  
 $y_{max}[mm]$  מרחק בין נקודת מרכז הכובד לסיב הרחוק ביותר בקורה  
 $I_x[mm^4]$  מומנט אנרציה של שטח הפרופיל כולו, סביב ציר מרכז כובד  
 $Z[mm^3]$  מודול החתך / התנגדות לכפיפה

**כאשר מחשבים מהלך כוחות כפיפה חשוב לזכור שסימן המומנטים נקבע ע"פ הכללים:**



**מומנט כפיפה חיובי**  
 סיב עליון נלחץ, סיב תחתון נמתח

**מומנט כפיפה שלילי**  
 סיב עליון נמתח, סיב תחתון נלחץ

**עיבור**  
 $\varepsilon_{[mm]}$  עיבור  
 $y_{max}[mm]$  מרחק בין ציר מרכז הכובד של הקורה לסיב  
 $\rho_{[mm]}$  רדיוס עקמוניות

**חוק הוק**  
 $\sigma_{[MPa]}$  מאמץ  
 $\varepsilon_{[mm]}$  עיבור  
 $E_{[MPa]}$  מודול יאנג

**כפיפה משופעת / כפיפה דו-צירית / כפיפה לא סימטרית בחתך סימטרי**

**מאמץ מתיחה/לחיצה בקוארדינטה  $(x, y)$  בחתך**

$\sigma_{[MPa]}$  מאמץ מתיחה/לחיצה (עבור מאמץ לחיצה הסימן שלילי)  
 $M_{[N \cdot mm]}$  מומנט כפיפה  
 $\beta_{[deg]}$  זווית פעולת הכח ביחס למערכת צירים העוברת בנקודת מרכז הכובד של החתך  
 $y_{[mm]}$  מרחק בציר  $y$  מהנקודה שדוגמים בה את המאמץ לבין נקודת מרכז שטח של הפרופיל  
 $x_{[mm]}$  מרחק בציר  $x$  מהנקודה שדוגמים בה את המאמץ לבין נקודת מרכז שטח של הפרופיל  
 $I_x[mm^4]$  מומנט אנרציה של שטח, סביב ציר  $x$  מרכז כובד  
 $I_y[mm^4]$  מומנט אנרציה של שטח, סביב ציר  $y$  מרכז כובד

**זווית הישר שעובר בנקודות שבהם המאמץ הכפיפה הוא אפס**

$\alpha_{[deg]}$  הזווית בין הישר שעובר דרך מרכז שטח של הפרופיל ובכל הנקודות שבהם מאמץ הכפיפה הוא אפס, לבין ציר  $x$  של החתך  
 $\beta_{[deg]}$  זווית פעולת הכח ביחס למערכת צירים העוברת בנקודת מרכז הכובד של החתך  
 $I_x[mm^4]$  מומנט אנרציה של שטח של הפרופיל, סביב ציר  $x$   
 $I_y[mm^4]$  מומנט אנרציה של שטח של הפרופיל, סביב ציר  $y$

## טבלאות

### מודול אלסטיות

מודול אלסטיות $E$		חומר
[GPa]	[MPa]	
200	$2.0 \cdot 10^5$	פלדה כללי
207	$2.07 \cdot 10^5$	פלדה פחמנית A36
193	$1.93 \cdot 10^5$	פלב"מ 316
204	$2.04 \cdot 10^5$	פלב"מ 17-7PH
120	$1.2 \cdot 10^5$	יציקת ברזל
100	$1.0 \cdot 10^5$	נחושת וסגסוגת נחושת
103	$1.03 \cdot 10^5$	טיטניום
70	$0.7 \cdot 10^5$	אלומיניום (חמרן) ודוראלומיניום
98	$0.98 \cdot 10^5$	עץ אורן במקביל לסיבים
96	$0.96 \cdot 10^5$	בטון

### מודול גזירה / מודול זיחה

מודול גזירה $G$		חומר
$\left[\frac{kg \cdot f}{mm^2}\right]$	[MPa]	
$8.1 \cdot 10^3$	$8.0 \cdot 10^4$	פלדה דלת פחמן
$8.5 \cdot 10^3$	$8.3 \cdot 10^4$	פלדה בעלת אחוז פחמן גבוהה
$4.5 \cdot 10^3$	$4.4 \cdot 10^4$	יציקת ברזל
$4.1 \cdot 10^3$	$4.0 \cdot 10^4$	נחושת
$3.6 \cdot 10^3$	$3.5 \cdot 10^4$	פליז
$1.6 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^4$	נתכי מגנזיום
$7.5 \cdot 10^3$	$7.4 \cdot 10^4$	ניקל
$3.2 \cdot 10^3$	$3.1 \cdot 10^4$	אבץ
$0.7 \cdot 10^3$	$0.7 \cdot 10^4$	עופרת
55	$5.4 \cdot 10^4$	עץ במקביל לסיבים

### מקדם התפשטות הקווית (תרמית)

מקדם התפשטות הקווית $\alpha \left[\frac{1}{^{\circ}C}\right]$	חומר
$12.5 \cdot 10^{-6}$	פלדה כללי
$11.7 \cdot 10^{-6}$	פלדה A36
$12.3 \cdot 10^{-6}$	פלדה 4340
$16.0 \cdot 10^{-6}$	פלב"מ 316
$17.2 \cdot 10^{-6}$	פלב"מ 304
$10.8 \cdot 10^{-6}$	פלב"מ 405
$11.4 \cdot 10^{-6}$	יציקת ברזל
$23.4 \cdot 10^{-6}$	אלומיניום 7075
$23.6 \cdot 10^{-6}$	אלומיניום 6061
$16.5 \cdot 10^{-6}$	נחושת
$8.6 \cdot 10^{-6}$	טיטניום
$24.0 \cdot 10^{-6}$	בדיל-עופרת (60Sn – 40Pb)
$13.0 \cdot 10^{-6}$	ניקל

צפיפויות

צפיפות $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	חומר
7850	פלדה
8000	פלב"מ 316
7650	פלב"מ 17-7PH
7300	יציקת ברזל
2800	אלומיניום 7075
2700	אלומיניום 6061
2770	אלומיניום 2024
8500	נחושת
1810	נתך מגנזיום AZ91D
4510	טיטניום

Guyaros

## טבלת חוזק עבור פלדות נפוצות

חוזק למתיחה Tensile Strength $\sigma_{UTS}[MPa]$	חוזק לכניעה Yield Strength $\sigma_y[MPa]$	מצב	תקן	סוג פלדה
340-470	235	מעורגל בחום Hot Rolled	DIN 17100 St37	פלדות דלות פחמן Low Carbon Steel
400-500	220-250	מעורגל בחום Hot Rolled	ASTM A36	
380	210	מעורגל בחום Hot Rolled	1020	
420	350	משוך בקור Cold drawn		
395	295	ריפוי מלא Annealed @870		
440	345	Normalized @925		
565	310	מעורגל בחום Hot Rolled	AISI1045	פלדות Medium Carbon Steel
703	385	מעורגל בחום Hot Rolled	AISI1070	
520	355	ריפוי מלא Annealed @785	4140	פלדות שמן
1020	655	Normalized @900		
1720	1570	Oil-quenched and tempered @315		
745	472	ריפוי מלא Annealed @810	4340	
1280	862	Normalized @810		
1760	1620	Oil-quenched and tempered @315		
515	205	Hot finished and annealed	304	פלב"מ Stainless Steel
860	515	Cold Worked $\frac{1}{4}$ hard		
515	205	Hot finished and annealed	316	
620	310	משוך בקור+ריפוי מלא Cold drawn and annealed		
415	170	Annealed	405	

**המרת יחידות**

Type	סוג	המרה
Length	אורך	$x_{[m]} = x \cdot 10^2_{[cm]} = x \cdot 10^3_{[mm]}$ $x_{[cm]} = x \cdot 10_{[mm]}$ <u>English system</u> $x_{[in]}$ מסמנים את המידה עם גרשיים למעלה $1_{[ft]} = 0.3048_{[m]}$ מסמנים את המידה עם גרש אחד למעלה
Area	שטח	$x_{[m^2]} = x \cdot 10^3_{[cm^2]} = x \cdot 10^6_{[mm^2]}$ $x_{[cm^2]} = x \cdot 10^2_{[mm^2]}$
Volume	נפח	$x_{[m^3]}$ $x_{[mm^3]} = x \cdot 10^{-3}_{[cm^3]} = x \cdot 10^{-9}_{[m^3]}$ $x_{[Litre]} = x \cdot 10^{-3}_{[m^3]}$ $x_{[cc]} = x_{[cm^3]} = x \cdot 10^{-6}_{[m^3]}$
Moment of inertia	מומנט אנרציה	$x_{[m^4]} = x \cdot 10^{12}_{[mm^4]}$ $x_{[mm^4]} = x \cdot 10^{-12}_{[m^4]}$
Force	כח	$x_{[N]}$ <u>English system</u> $x_{[lbf]}$ $x_{[kip]} = x \cdot 10^3_{[lbf]}$
Distributed Force	כח מפולג	$x_{\left[\frac{N}{mm}\right]} = x_{\left[\frac{kN}{m}\right]}$
Pressure/Stress	לחץ/מאמץ	$x_{[Pa]} = x_{\left[\frac{N}{m^2}\right]} = x \cdot 10^{-3}_{[kPa]} = x \cdot 10^{-6}_{[MPa]}$ $x_{[kPa]} = x_{\left[\frac{kN}{m^2}\right]} = x \cdot 10^3_{[Pa]}$ $x_{[MPa]} = x_{\left[\frac{N}{mm^2}\right]} = x \cdot 10^6_{[Pa]}$ $x_{[GPa]} = x_{\left[\frac{kN}{mm^2}\right]} = x \cdot 10^9_{[Pa]}$ $x_{[bar]} = x \cdot 10^5_{[Pa]} = x \cdot 0.987_{[Atm]} = x \cdot 14.5_{[psi]}$ $x_{[Atm]} = x \cdot 10^5_{[Pa]}$ <u>English system</u> $x_{[psi]} = x_{\left[\frac{lbf}{in^2}\right]}$ $x_{[ksi]} = x \cdot 10^3_{[psi]}$
Torque / Moment	מומנט	$x_{[N \cdot m]} = x \cdot 10^3_{[N \cdot mm]}$ $x_{[N \cdot mm]} = x \cdot 10^{-3}_{[N \cdot m]}$ $x_{[kN \cdot m]} = x \cdot 10^3_{[N \cdot m]}$ $x_{[N \cdot m]} = x \cdot 9.80665_{[kg \cdot m]}$ <u>English system</u> $x_{[lb \cdot ft]}$ $x_{[lb \cdot in]} = x_{[lb \cdot ft]} \cdot 12$
Work	עבודה	$x_{[J]} = x_{\left[\frac{kg \cdot m^2}{s^2}\right]} = x_{[N \cdot m]}$
Power	הספק	$1_{[kW]} = 1.341_{[HP]}$ $1_{[HP]} = 0.745699872_{[kW]}$
Angle	זווית	$\theta_{[deg]} = \theta_{[rad]} \cdot \frac{180}{\pi}$ $\theta_{[rad]} = \theta_{[deg]} \cdot \frac{\pi}{180}$