



חוברת עזר בתכן מכני 2

נוסחאות

$$J_{EQ_2} = J_1 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 + J_2 = m_G^2 \cdot J_1 + J_2 \quad \text{מומנט אנרציה שקול על ציר המנוע:}$$

הערה: לא לכלכל עם מקדם הצורה J .

$$v = \frac{\pi \cdot d_p \cdot n_p}{60,000} \quad \text{מהירות משיקית:}$$

מקדם גיאומטרי:

$$I = \frac{\cos \phi \cdot \sin \phi}{2} \cdot \frac{m_G}{m_G \pm 1} \quad \text{עבור גג"ש ישרות (עבור שיניים חיצוניות, - עבור שיניים פנימיות)}$$

$$I = \frac{\sin \phi_t \cdot \cos \phi_t}{2m_N} \cdot \frac{m_G}{1 + m_G} \quad \text{עבור גג"ש משופעות ; כאשר:}$$

$$m_N = \frac{p_{bn}}{0.95Z} = \frac{p_n \cos \phi_n}{0.95Z}$$

$$Z = \begin{cases} Z_2 & ; Z_1 > Z_3 \\ Z_1 & ; Z_2 > Z_3 \\ Z_3 & ; Z_1, Z_2 > Z_3 \\ Z_1 + Z_2 + Z_3 & ; \text{Otherwise} \end{cases} \quad \begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{(r_p + m_n)^2 - r_{bp}^2} \\ Z_2 &= \sqrt{(r_G + m_n)^2 - r_{bG}^2} \\ Z_3 &= (r_p + r_G) \cdot \sin \phi_t \end{aligned}$$

$$\alpha = \frac{V_c}{V_t} = \frac{F_c \cdot \pi d_p^2 / 4}{F_t \cdot \pi d_p^2 / 4} = C_p^2 \cdot \frac{S_t}{S_c^2} \cdot \frac{J}{I \cdot N_p} \quad \text{חישוב היחס בין הנפחים: } \alpha$$

$\alpha > 1 \leftarrow$ רוחב השן לפי קריטריון לחץ שטח F_c

$\alpha < 1 \leftarrow$ רוחב השן לפי קריטריון כפיפה F_t

חישוב הלחצים והמאמצים המותרים:

$$S_c = S_{ac} \cdot \frac{C_L \cdot C_H}{C_t \cdot C_R} \quad \text{למגע:}$$

$$S_t = S_{at} \cdot \frac{K_L}{K_t \cdot K_R} \quad \text{לכפיפה:}$$

נוסחאות חישוב רוחב השן:

- רוחב השן הדרוש על מנת שהגלגל יעמוד בקריטריון כפיפה (Bending):

$$F_t = 19.1 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{H \cdot N_p}{n_p \cdot d_p^2} \right] \cdot \left[\frac{K_o \cdot K_s \cdot K_m}{K_v \cdot J} \right] \cdot \frac{1}{S_t}$$

- רוחב השן הדרוש על מנת שהגלגל יעמוד בקריטריון לחץ שטח (Hertz):

$$F_c = 19.1 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{H}{n_p \cdot d_p^2} \right] \cdot \left[\frac{C_o \cdot C_s \cdot C_m \cdot C_f}{C_v \cdot I} \right] \cdot \frac{C_p^2}{S_c^2}$$

המלצת התכנון: בגג"ש ישרות: $3\pi m < F < 5\pi m$

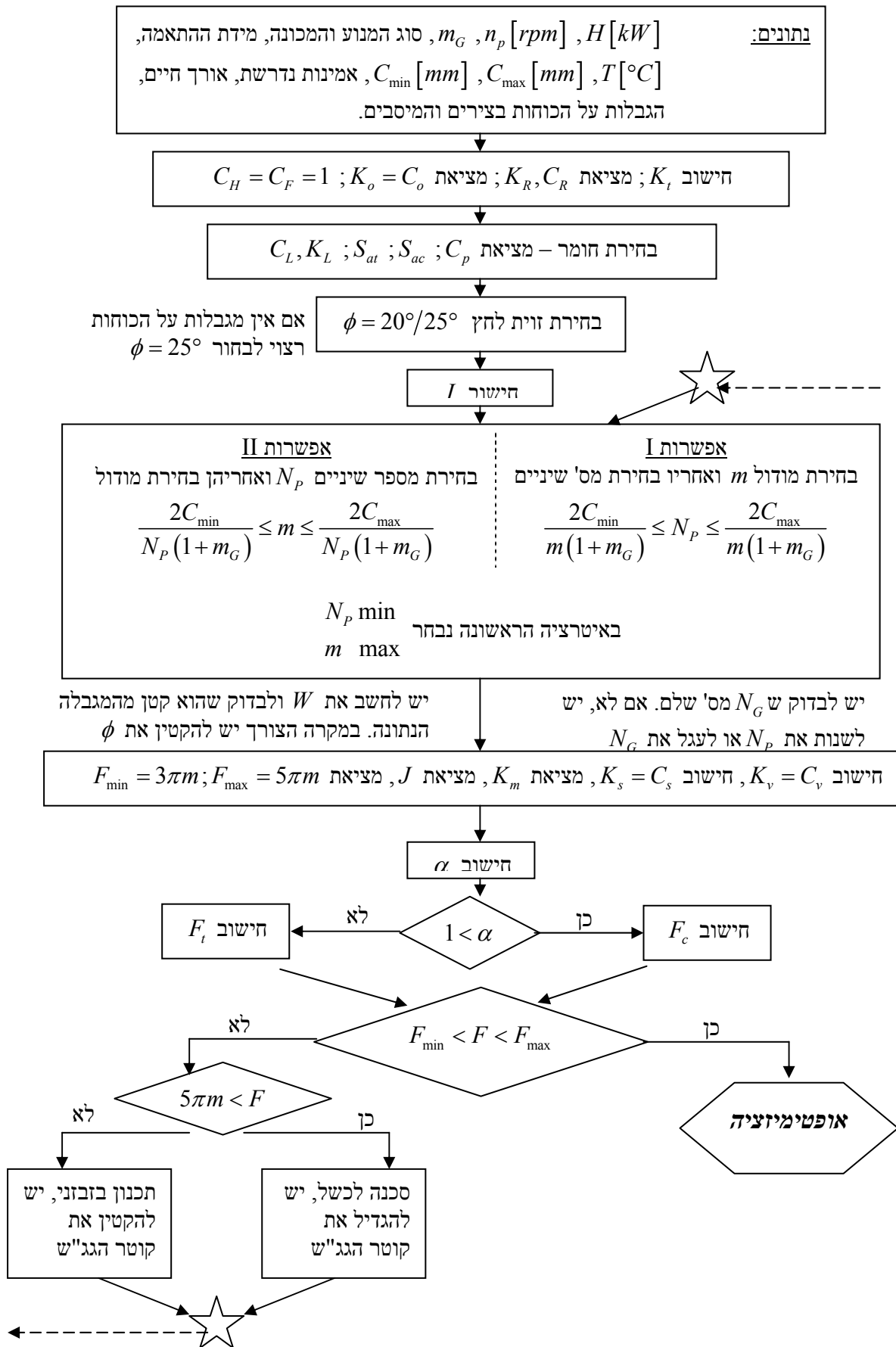
בגג"ש משופעות: $2 \cdot p_x < F < d_p$

מגבלת כוחות

הכוח בכיוון הרדיאלי: $W_{r_max} \geq W_r [kN] = W_t \cdot \tan \phi = \frac{60,000}{\pi} \cdot \frac{H \cdot \tan \phi}{d_p \cdot n_p}$



תרשים הזרימה השלם לתכנון גג"ש ישרות



טבלאות לחישוב המקדמיםלחצים ומאמצים מותרים S_{ac} - לחצים מותרים

לחץ מותר MPa	קושי BHN	חומר
655	190	פלדה
792	240	
930	300	
1102	360	
1309	440	
1378	55 ÷ 63RC	
207	...	ברזל יציקה AGMA GRADE 20
345	175	AGMA GRADE 30
448	200	AGMA GRADE 40
לחץ מותר	מאמץ שבירה מינימלי	ברונזה
207	276	AGMA 2C (10 ÷ 12% בדיל)
448	620	ברונזה אלומיניום

 S_{at} - מאמצים מותרים

מאמץ מותר - MPa			קושי BHN	חומר
קוביות	משופעות	ישרות		
76	138:152	138:152	140	פלדה
96	172:193	172:193	180	
131	241:310	241:276	300	
172	310:413	310:345	450	
207	379:448	379:448	55 ÷ 63RC	
19	34	34	
32	59	59	175	AGMA GRADE 30
48	90	90	200	AGMA GRADE 40

מקדם צורה – J Shape Factor

עבור גג"ש ישרות
מציאה לפי טבלאות:

$$\phi = 20^\circ$$

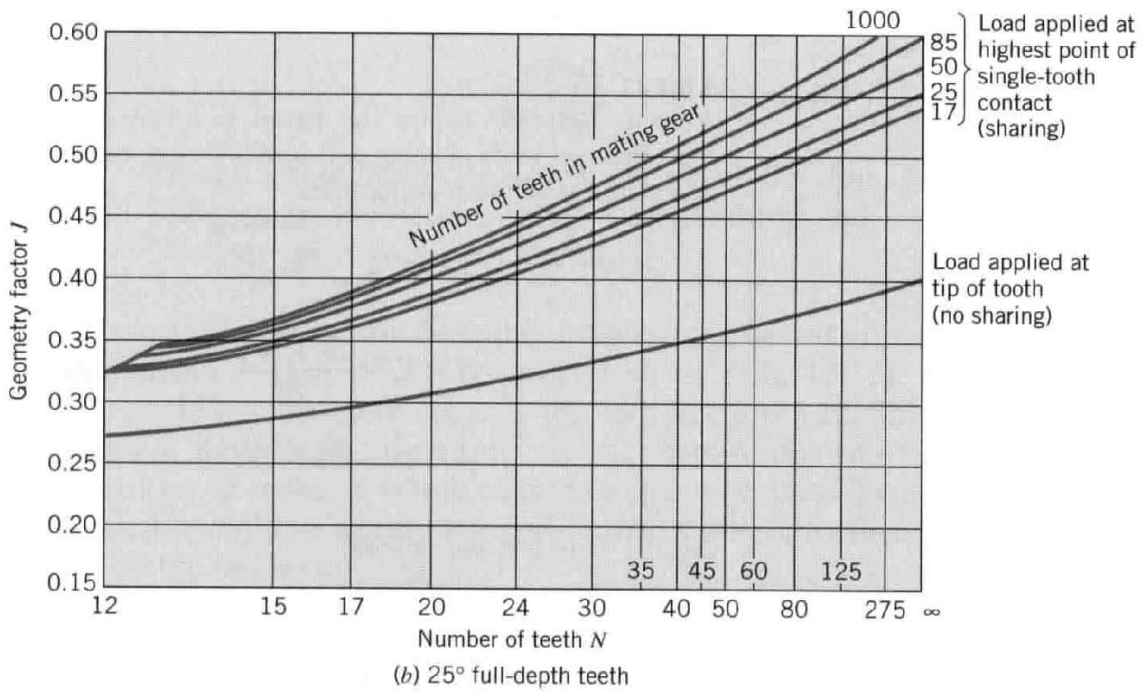
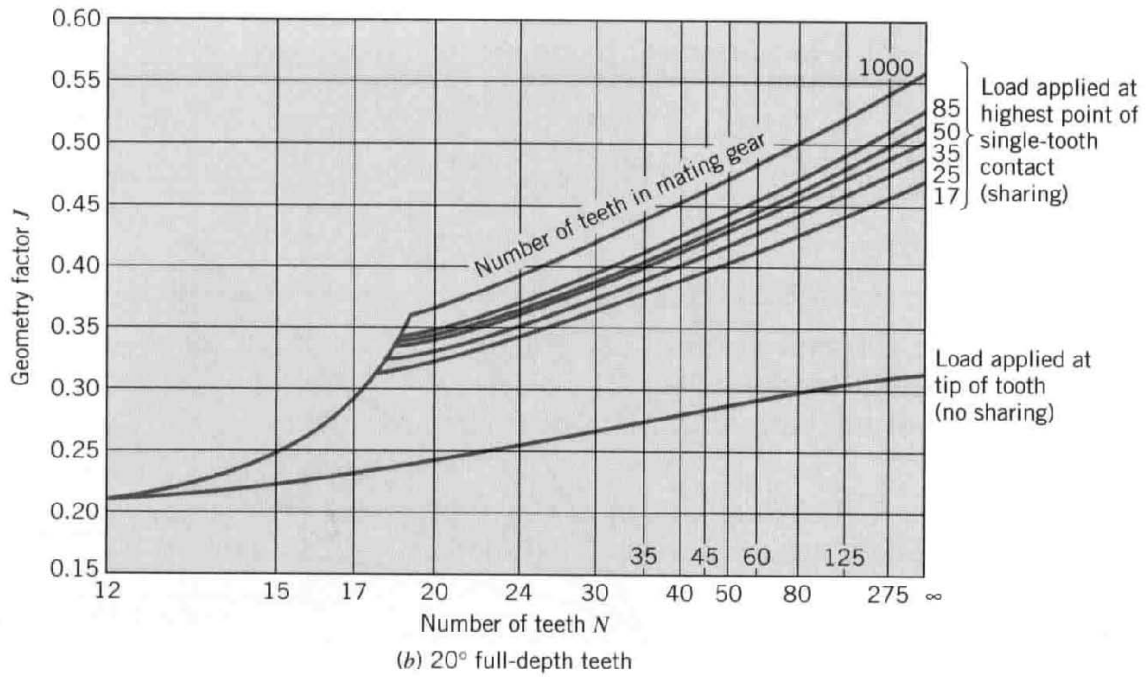
Number of teeth	Number of teeth in mating gear							
	1	17	25	35	50	85	300	1000
18	0.24486	0.32404	0.33214	0.33840	0.34404	0.35050	0.35594	0.36112
19	0.24794	0.33029	0.33878	0.34537	0.35134	0.35822	0.36405	0.36963
20	0.25072	0.33600	0.34485	0.35176	0.35804	0.36532	0.37151	0.37749
21	0.25323	0.34124	0.35044	0.35764	0.36422	0.37186	0.37841	0.38475
22	0.25552	0.34607	0.35559	0.36306	0.36992	0.37792	0.38479	0.49148
24	0.25951	0.35468	0.36477	0.37275	0.38012	0.38877	0.39626	0.40360
26	0.26289	0.36211	0.37272	0.38115	0.38897	0.39821	0.40625	0.41418
28	0.26580	0.36860	0.37967	0.38851	0.39673	0.40650	0.41504	0.42351
30	0.26831	0.37462	0.38580	0.39500	0.40359	0.41383	0.42283	0.43179
34	0.27247	0.38394	0.39671	0.40594	0.41517	0.42624	0.43604	0.44586
38	0.27575	0.39170	0.40446	0.41480	0.42456	0.43633	0.44680	0.45735
45	0.28013	0.40223	0.41579	0.42685	0.43735	0.45010	0.46152	0.47310
50	0.28252	0.40808	0.42208	0.43553	0.44448	0.45778	0.46975	0.48193
60	0.28613	0.41702	0.43173	0.44383	0.45542	0.46960	0.48243	0.49557
75	0.28979	0.42620	0.44163	0.45440	0.46668	0.48179	0.49554	0.50970
100	0.29353	0.43561	0.45180	0.46527	0.47827	0.49437	0.50909	0.52435
150	0.29738	0.44530	0.46226	0.47645	0.49023	0.50736	0.52312	0.53954
300	0.30141	0.45526	0.47304	0.48798	0.50256	0.52078	0.53765	0.55533
Rack	0.30571	0.46554	0.48415	0.49988	0.51529	0.53467	0.55272	0.57173

$$\phi = 25^\circ$$

Number of teeth	Number of teeth in mating gear							
	1	17	25	35	50	85	300	1000
13	0.28665	0.34684	0.35292	0.35744	0.36138	0.36572	0.36925	0.37251
14	0.29364	0.35924	0.36587	0.37081	0.37514	0.37994	0.38386	0.38749
15	0.30009	0.37027	0.37740	0.38275	0.38744	0.39267	0.39694	0.40092
16	0.30558	0.38016	0.38775	0.39346	0.39849	0.40411	0.40873	0.41303
17	0.31043	0.38907	0.39709	0.40314	0.40849	0.41448	0.41941	0.42402
18	0.31475	0.39714	0.40556	0.41193	0.41756	0.42390	0.42913	0.43403
19	0.31862	0.40449	0.41328	0.41994	0.42585	0.43250	0.43801	0.44318
20	0.32211	0.41121	0.42034	0.42727	0.43344	0.44039	0.44616	0.45159
21	0.32528	0.41738	0.42682	0.43401	0.44042	0.44765	0.45367	0.45933
22	0.32816	0.42306	0.43280	0.44023	0.44686	0.45436	0.46060	0.46650
24	0.33322	0.43318	0.44346	0.45132	0.45836	0.46635	0.47301	0.47932
26	0.33752	0.44193	0.45268	0.46093	0.46833	0.47674	0.48378	0.49046
28	0.34122	0.44957	0.46075	0.46933	0.47705	0.48585	0.49323	0.50023
30	0.34443	0.45631	0.46785	0.47675	0.48475	0.49389	0.50157	0.50868
34	0.34976	0.46763	0.47981	0.48923	0.49772	0.50746	0.51566	0.52349
38	0.35400	0.47678	0.48948	0.49933	0.50824	0.51847	0.52710	0.53536
45	0.35967	0.48919	0.50261	0.51305	0.52252	0.53344	0.54268	0.55154
50	0.36278	0.49608	0.50991	0.52068	0.53047	0.54177	0.55136	0.56056
60	0.36750	0.50683	0.52109	0.53238	0.54267	0.55457	0.56469	0.57444
75	0.37232	0.51747	0.53257	0.54440	0.55520	0.56773	0.57842	0.58873
100	0.37726	0.52860	0.54436	0.55676	0.56810	0.58129	0.59257	0.60348
150	0.38237	0.54005	0.55651	0.56951	0.58138	0.59526	0.60716	0.61869
300	0.38772	0.55185	0.56902	0.58259	0.59507	0.60967	0.62222	0.63442
Rack	0.39342	0.56405	0.58194	0.59613	0.60921	0.62456	0.63778	0.65068



מציאה לפי גרף:

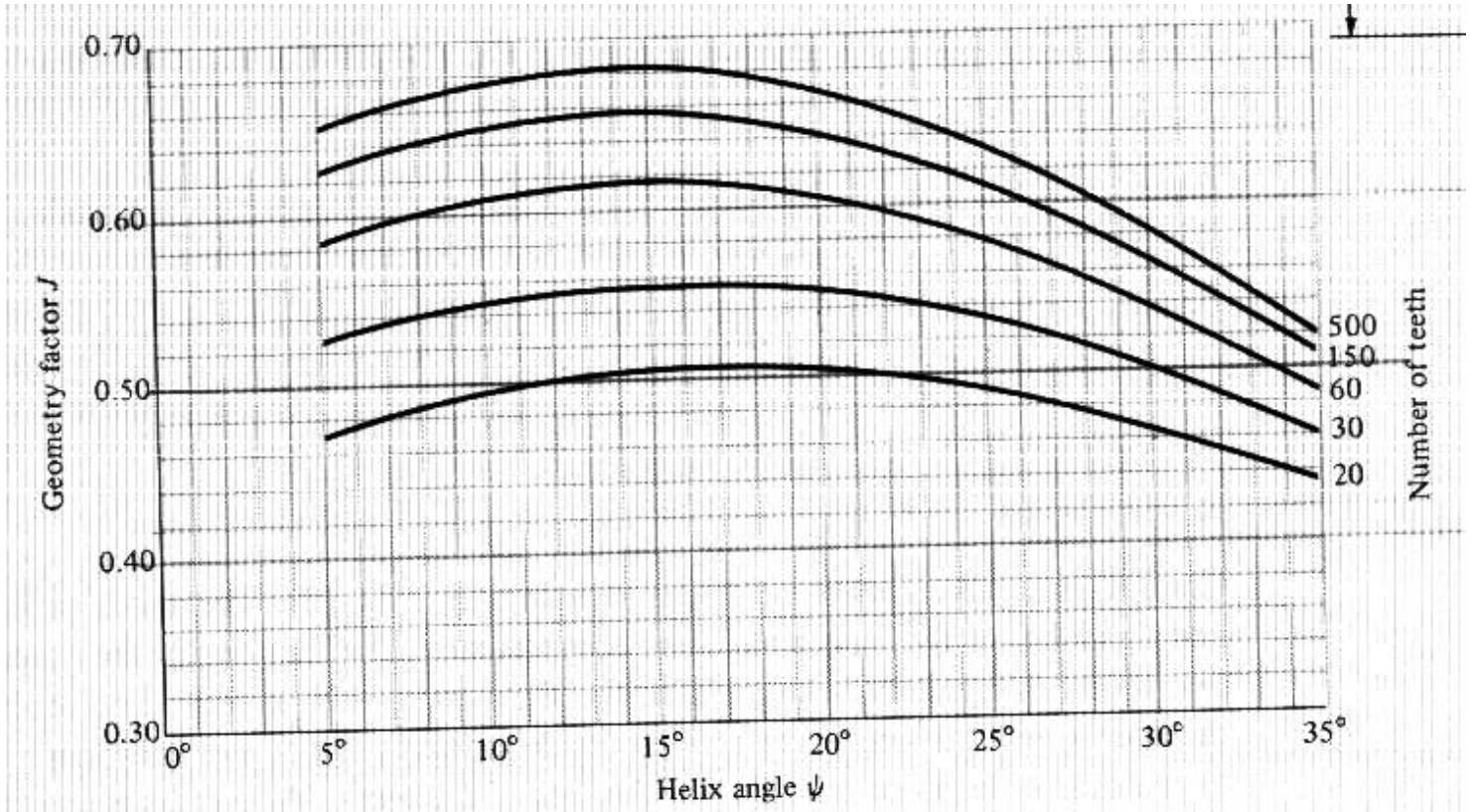




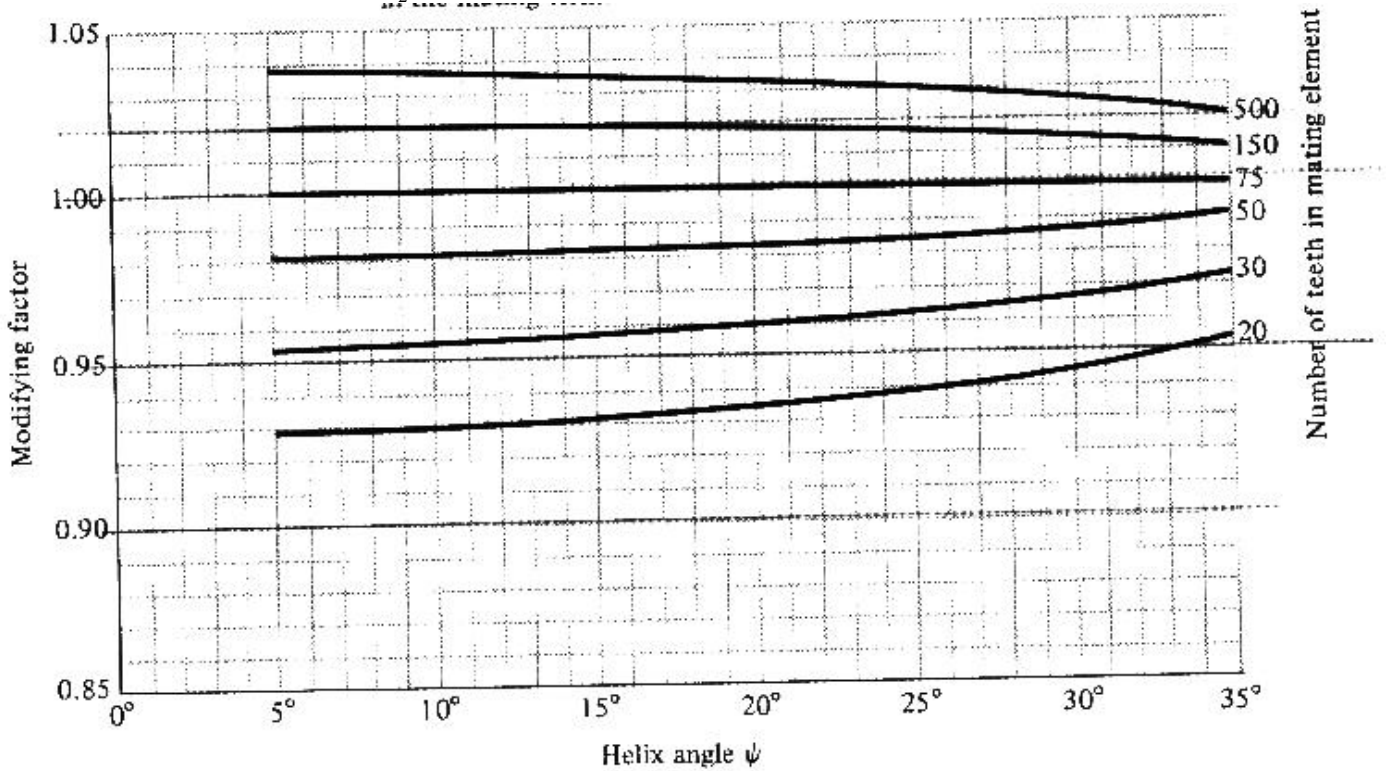
$$J = J_1 \cdot J_2$$

עבור גג"ש משופעות

עבור גלגל המשתלב ב-75 שיניים J_1



תיקון עבור גלגל המשתלב במספר שונה מ-75 שיניים J_2





מקדם אורך חיים – $K_L \neq C_L$ Life Factor

עבור גג"ש ישרות, משופעות וקוניות:

מקדם אורך חיים K_L לחוזק כפיפה					מקדם אורך חיים C_L ללחץ שטח, שיניים ישרות, משופעות וקוניות	מס' מחזוריים דרוש
קוניות	ישרות ומשופעות					
צמנוט 55RCmin	צמנוט 55RCmin	450 BHN	250 BHN	160 BHN		
4.6	2.7	3.4	2.4	1.6	...	10^3
3.1	2.0	2.4	1.9	1.4	1.5	10^4
2.1	1.4	1.7	1.4	1.2	1.3	10^5
1.4	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	10^6
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	$\geq 10^7$

מקדם האלסטיות – C_p - Elastic Coefficient

$$C_p = \left\{ \pi \cdot \left[\frac{1-\nu_p^2}{E_p} + \frac{1-\nu_G^2}{E_G} \right] \right\}^{-0.5}$$

Pinion	Modulus of elasticity E, GPa	Gear					
		Steel	Malleable Iron	Nodular Iron	Cast Iron	Aluminum Bronze	Tin Bronze
Steel	200	191	181	179	174	162	158
Mall. Iron	170	181	174	172	168	158	154
Nod. Iron	170	179	172	170	166	156	152
Cast Iron	150	174	168	166	163	154	149
Al. Iron	120	162	158	156	154	145	141
Tin Bronze	110	158	154	152	149	141	137

מקדם הגודל – $K_s = C_s$ Size Factor

$$K_s = C_s = \begin{cases} \frac{1}{1.189} \cdot (\pi m)^{0.097} & \text{כאשר } \pi m > 8mm \\ 1 & \text{כאשר } \pi m \leq 8mm \end{cases}$$

בגג"ש משופעות m מתחלף עם m_n .

Temperature Factor – $K_t \neq C_t$ - מקדם טמפרטורה

$$K_t = \begin{cases} \frac{273+T[^\circ\text{C}]}{344} & ; T > 71^\circ\text{C} \\ 1 & ; T \leq 71^\circ\text{C} \end{cases} \quad C_t = 1$$

Reliability Factor – $K_R \neq C_R$ - מקדם אמינות

$\frac{K_R}{C_R}$	$\frac{C_R}{C_R}$	<u>דרישות האמינות</u>
≥ 1.50	≥ 1.25	אמינות גבוהה ביותר
1.00	1.00	פחות מכשל אחד לכל 100 (בינונית)
0.75	0.80	פחות מכשל אחד לכל 3 (נמוכה)

$$K_R = \begin{cases} 0.7 - 0.15 \log(1-R) & 0.9 \leq R \leq 0.99 \\ 0.5 - 0.25 \log(1-R) & 0.99 \leq R \leq 0.9999 \end{cases} \quad \text{או דרך אחרת:}$$

for $R = 0.99$, $K_R = 1.0$

Load Distribution Factor – $K_m = C_m$ - מקדם התפלגות העומס

$$F = \frac{F_{\min} + F_{\max}}{2} = 4\pi m \quad \text{כניסה לתוך הטבלה על פי רוחב שן:}$$

• עבור גג"ש משופעות

<u>Characteristics of support</u>	<u>Face width, mm</u>			
	0-50	150	225	400 up
Accurate mountings, small bearing clearances, minimum deflection, precision gears	1.2	1.3	1.4	1.7
Less rigid mountings, less accurate gears, contact across full face	1.5	1.6	1.7	2.0
Accuracy and mounting such that less than full-face contact exists	Over 2.0			

• עבור גג"ש ישרות

<u>Characteristics of support</u>	<u>Face width, mm</u>			
	0-50	150	225	400 up
Accurate mountings, small bearing clearances, minimum deflection, precision gears	1.3	1.4	1.5	1.8
Less rigid mountings, less accurate gears, contact across full face	1.6	1.7	1.8	2.2
Accuracy and mounting such that less than full-face contact exists	Over 2.2			

מקדם תיקון עומס יתר $K_o = C_o$ (לפעמים נקרא גם אפליקציה - K_a)

מקור הכח <u>Pinion</u>	אופי הגלגל המונע - Gear		
	Uniform	Moderate shock	Heavy shock
Uniform	1.00	1.25	1.75
Light Shock	1.25	1.50	2.00
Medium Shock	1.50	1.75	2.25

דוגמאות לאופי הלמים במכונות שונות

Character of Operation	Prime Mover
Uniform	Electric motor
Light Shock	Steam turbine, gas turbine
Moderate Shock	Multi-cylinder combustion engine
Heavy Shock	Single-cylinder combustion engine

מקדם דינמי $K_v = C_v$ Dynamic Factor

$$K_v = C_v = \begin{cases} \frac{50}{50 + \sqrt{200v}} & \bullet \text{ עבור גלגלים לא מדוייקים} \\ \frac{78}{78 + \sqrt{200v}} & \bullet \text{ שיניים מדוייקות ועומסים דינמיים ניכרים} \\ \sqrt{\frac{78}{78 + \sqrt{200v}}} & \bullet \text{ שיניים מדוייקות, עומסים דינמיים שניתן לחוש בהם} \\ 1 & \bullet \text{ שיניים מדוייקות, ללא עומסים דינמיים ניכרים} \end{cases}$$

כאשר v הינה המהירות המשיקית.

או בהינתן Q_v (מקדם איכות):

$$K_v = C_v = \begin{cases} \left(\frac{A}{A + \sqrt{200 \cdot v}} \right)^B & \text{עבור: } 6 \leq Q_v \leq 11 \\ \text{כאשר: } A = 50 + 56 \cdot (1.0 - B) \\ B = \frac{(12 - Q_v)^{0.667}}{4} \\ \frac{50}{50 + \sqrt{200 \cdot v}} & \text{עבור: } Q_v = 5 \end{cases}$$

$$K_v = C_v = \sqrt{\frac{78}{78 + \sqrt{200v}}} \text{ בגג"ש משופעות}$$

מקדם עיבוד פני השטח C_f

אנו נעשה שימוש ב: $C_f = 1$

מקדם יחס קושי C_H

$$C_H = 1.0 + A(m_G - 1.0)$$

$$H = \text{הספק} \begin{cases} \frac{H_{BP}}{H_{BG}} < 1.2; & A = 0.0 \\ 1.2 \leq \frac{H_{BP}}{H_{BG}} \leq 1.7; & A = 0.00898 \left(\frac{H_{BP}}{H_{BG}} \right) - 0.00829 \text{ כאשר:} \\ \frac{H_{BP}}{H_{BG}} > 1.7; & A = 0.00698 \end{cases}$$

בהנחת אי הפסדי הספק ($H_{BP} = H_{BG}$) נקבל $C_H = 1$

תקן לגיאומטריית השיניים

Quantity	Formula
Addendum	$a = m$
Dedendum	$b = 1.25m$
Working depth	$h_k = 2m$
Whole depth (min.)	$h_t = 2.25m$
Tooth thickness	$t = m/2$
Fillet radius of basic rack	$r_f = 0.300m$
Clearance (min.)	$c = 0.25m$
Clearance, shaved or ground teeth	$c = 0.35m$
Minimum number of pinion teeth	
$\phi = 20^\circ$	$N_p = 18$
$\phi = 25^\circ$	$N_p = 12$
Minimum number of teeth per pair	
$\phi = 20^\circ$	$N_p + N_G = 36$
$\phi = 25^\circ$	$N_p + N_G = 24$
Width of top land (min.)	$t_o = 0.25m$