

מערכות תעופה א'

יחידת לימוד אחת

הוראות לנבחן

א. משך הבחינה: שעתיים וחצי.

ב. מבנה השאלון ומפתח ההערכה: בשאלון זה שלושה פרקים:

פרק ראשון: אווירודינמיקה

פרק שני: תרמודינמיקה

פרק שלישי: מנועים

עליך לענות על שאלה אחת לפחות מכל פרק, ועל חמש שאלות בסך-הכול.

לכל שאלה – 20 נקודות, ובסך-הכול – 100 נקודות.

ג. חומר עזר מותר לשימוש: נוסחאון בית-ספרי, כלי סרטוט, מחשבון.

ד. הוראות מיוחדות:

1. עיין בשאלון, הכר את חלקיו, ורק אז ענה על השאלות בסדר הנראה לך.

2. בכל שאלה ניתנו הנתונים לפתרונה. אם לדעתך חסר נתון, הוסף אותו על-פי שיקול דעתך ופתור בעזרתו את השאלה. רשום בתשובתך את הנתון שבחרת להוסיף.

3. אם מספר השאלות שהספקת לפתור עולה על הנדרש, אינך צריך לבחור את התשובות שייבדקו. המעריך יבדוק את כל המבחן ויבחר את התשובות הטובות ביותר, לפי מספר שאלות החובה.

4. בתשובה על שאלה חישובית, עליך להציג את שלבי הפתרון באופן מפורט ולהסבירם בקצרה. קבלת מֶרֶב הנקודות מותנית במילוי דרישה זו.

בשאלון זה 7 עמודים ו-6 עמודי נספחים.

ההנחיות בשאלון זה מנוסחות בלשון זכר, אך מכוונות הן לנבחנות והן לנבחנים.

בהצלחה!

השאלות

בשאלון זה שלושה פרקים. עליך לענות על שאלה אחת לפחות מכל פרק, ועל חמש שאלות בסך-הכול. לכל שאלה – 20 נקודות.

פרק ראשון: אווירודינמיקה

שאלה 1

ההיגדים שלהלן מתייחסים לאטמוספירה סטנדרטית. קבע לגבי כל אחד מהם אם הוא **נכון** או **לא נכון**. נמק בקצרה את קביעתך.

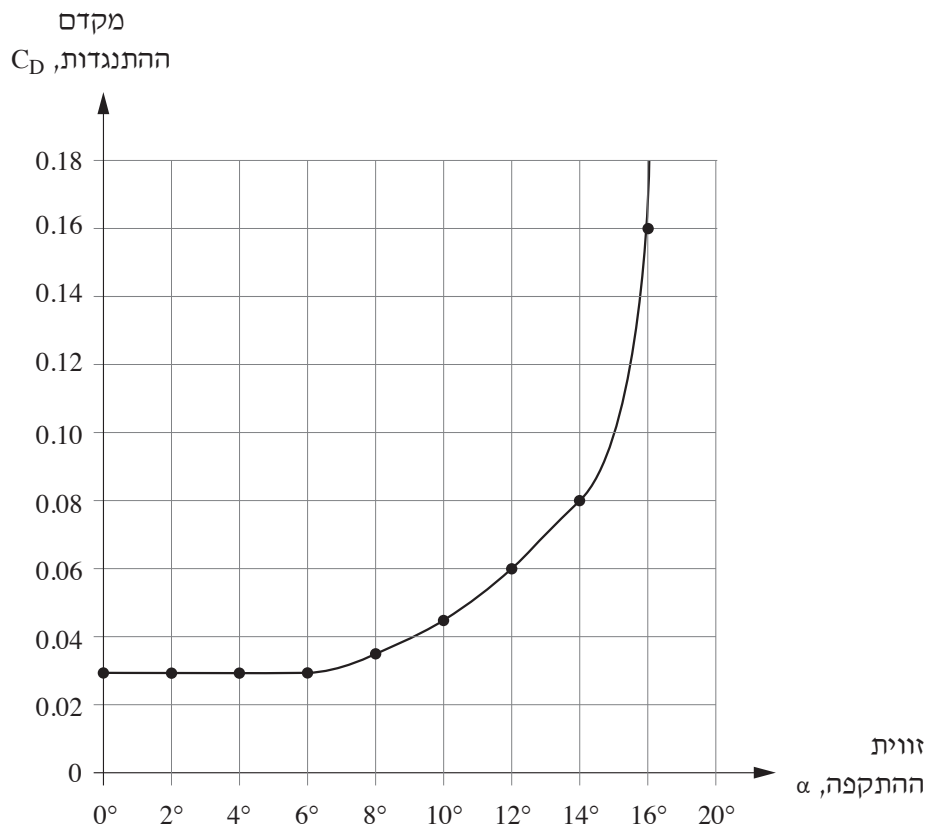
- א. מגובה פני-הים ועד לגובה של 11 km הטמפרטורה **עולה** ב- 6.5°C לכל קילומטר.
- ב. מגובה 11 km ועד לגובה 20 km הטמפרטורה **קבועה**.
- ג. בגובה 3 km הטמפרטורה היא $+30^{\circ}\text{C}$.
- ד. מהירות הקול משתנה עם שינוי הטמפרטורה.
- ה. מטוס טס במהירות של $300 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$ ביחס לאוויר מול רוח-אף בעוצמה של $50 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$. לפיכך, המהירות הקרקעית של המטוס היא $250 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$.

שאלה 2

- א. 1. סרטט באופן איכותי גרף של מקדם העילוי, C_L , של כנף בעלת פרופיל סימטרי כתלות בזווית ההתקפה, α .
2. הסבר מדוע הגרף שסרטטת אכן מייצג כנף בעלת פרופיל סימטרי.
- ב. הסבר את תופעת ההזדקרות של פרופיל כנף.
- ג. ההיגדים הרשומים להלן מתייחסים לזווית מאך; בחר את ההיגד הנכון והעתק אותו למחברתך.
1. זווית מאך מבטאת את היחס בין מהירות גל הקול ובין מהירות המטוס.
2. זווית מאך היא זווית ההתקפה של הכנף כאשר המטוס טס במהירות של מאך אחד.
3. גודלה של זווית מאך כפול מגודלה של זווית קונוס מאך.
4. זווית מאך משמשת כזווית ההכוונה בטיסה על-קולית.

שאלה 3

באיור לשאלה זו נתון גרף המתאר את התלות של מקדם ההתנגדות של הכנף, C_D , כתלות בזווית ההתקפה, α .



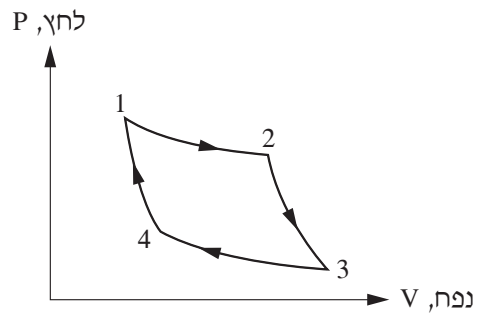
איור לשאלה 3

- קבע על-פי הגרף את נקודת ההזדקרות של הכנף.
- הסבר מהי תופעת ההזדקרות של כנף.
- ציין אמצעי אחד במטוס להשהיית ההזדקרות של הכנף.

פרק שני: תרמודינמיקה

שאלה 4

באיור לשאלה זו מתוארת דיאגרמת לחץ-נפח (דיאגרמת P-V) סכמתית של מנוע הפועל על-פי מחזור קרנו.



איור לשאלה 4

נתונים

- המנוע פועל בין הטמפרטורה 300 K לטמפרטורה 1500 K.
- החום המסופק במחזור: $Q_{in} = 100 \text{ kJ}$
- א. ציין את שמות התהליכים המתרחשים במחזור אחד בין הנקודות 1-2, 2-3, 3-4 ו-4-1. ציין - עבור כל תהליך - אם במהלכו נקלט חום או נפלט חום.
- ב. חשב את נצילות המחזור.
- ג. חשב את העבודה המתבצעת במחזור.

שאלה 5

אוויר כלוא בתוך גליל עם בוכנה. הבוכנה חסרת חיכוך ובעלת משקל זניח.

- נפח הגליל: 0.5 m^3
- קוטר הגליל: 0.5 m
- הלחץ המוחלט ההתחלתי של האוויר בגליל: 2.5 bar
- הטמפרטורה ההתחלתית של האוויר בגליל: 35°C
- א. חשב את המסה של האוויר הכלוא בגליל.
- ב. לאיזו טמפרטורה יש לחמם את האוויר בגליל כדי שהבוכנה תעלה ב- 0.5 m ?
- קבוע הגז של האוויר הוא: $R = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ותהליך החימום מתבצע בלחץ קבוע.

שאלה 6

גז הליום נדחס בתהליך פוליטרופי:

- לחץ הגז בתחילת התהליך הוא 200 kPa
- טמפרטורת הגז בתחילת התהליך היא 20°C
- נפח הגז בתחילת התהליך הוא 0.5 m^3
- לחץ הגז בסוף התהליך הוא 400 kPa
- מעריך הפוליטרופה הוא $n = 1.67$
- נתונים נוספים:
- קבוע הגז של הליום הוא: $R = 2076.9 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- היחס בין החום הסגולי בלחץ קבוע לבין החום הסגולי בנפח קבוע הוא $g = 1.67$

א. חשב את מסת גז ההליום.

ב. חשב את טמפרטורת גז ההליום בסוף התהליך הפוליטרופי.

ג. חשב את מקדם החום הסגולי בנפח קבוע, C_v , של גז ההליום.

ד. בחן את הערך הנתון של מעריך הפוליטרופה n , וקבע מהו סוג התהליך שעבר גז ההליום? האם בתהליך זה נקלט או נפלט חום?

ה. חשב את העבודה שבוצעה בזמן התהליך. האם העבודה בוצעה על המערכת או על-ידי המערכת? נמק את תשובתך.

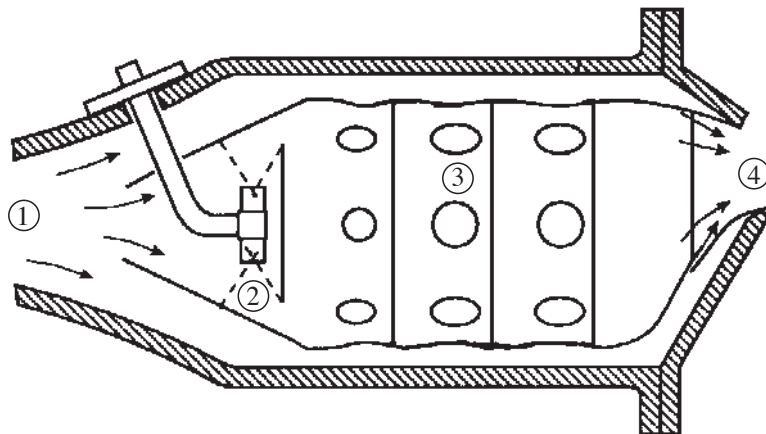
פרק שלישי: מנועים

שאלה 7

- א. הסבר את תפקיד המדחס במנוע טורבו־סילון.
- ב. הסבר כיצד משפיע יחס הלחצים במדחס על תצרוכת הדלק הסגולית של מנוע טורבו־סילון.
- ג. הסבר מהי הזדקרות מדחס.
- ד. ציין שני אמצעים למניעת הזדקרות המדחס במנוע טורבו־סילון.

שאלה 8

- א. 1. מהו תפקידו של תא השריפה במחזור הפעולה של מנוע סילון?
2. ציין שלושה שלבים שהאוויר עובר בתא השריפה.
- ב. באיור לשאלה זו מתואר חתך של תא שריפה במנוע סילון.



איור לשאלה 8

1. באיזו ספרה מסומן אזור הכניסה של האוויר לתא השריפה?
2. באיזו ספרה מסומן אזור היציאה של האוויר מתא השריפה?
3. מה שמו ומה תפקידו של רכיב מספר (2) ?
4. מה תפקידם של החורים המסומנים ב־ (3) ?

ג. נצילות הבעירה במנוע סילון תלויה בלחץ, בטמפרטורה ובמהירות הזרימה הצירית של תערובת הגזים בתא השריפה.

1. כיצד תשתנה נצילות הבעירה כאשר תקטן המהירות של הגזים? נמק את תשובתך.

2. כיצד משפיעות עליית הלחץ ועליית הטמפרטורה של הגזים על נצילות הבעירה?

שאלה 9

א. נתון מנוע בוכנה של ארבע פעימות.

– נפח הצילינדר בנמ"ת הוא 320 cm^3 .

– נפח הצילינדר בנמ"ע הוא 40 cm^3 .

חשב את יחס הדחיסה של המנוע.

ב. הסבר מהו תפקידו של בולם זעזועים המותקן בין מנוע הבוכנה ובין גוף המטוס.

ג. במנוע בוכנה שסתום הפליטה סגור ושסתום היניקה בתהליך סגירה. באיזו פעימה נמצא המנוע?

ד. רשום **שלושה** מתפקידיו של השמן במנוע בוכנה.

בהצלחה!

זכות היוצרים שמורה למדינת ישראל.

אין להעתיק או לפרסם אלא ברשות משרד החינוך.

נספח א': נוסחאון למערכות תעופה (5 עמודים)

לשאלונים 853101, 853201, קיץ תשע"ח תרמודינמיקה

הגדרת משתנים

P [Pa]	-	לחץ הגז
V [m ³]	-	נפח הגז
m [kg]	-	מסת הגז
$M \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$	-	המסה המולקולרית של הגז
r	-	יחס דחיסה במחזור תרמודינמי
r _c	-	יחס הפסקה במחזור דיזל
T [K]	-	טמפרטורה
T _H [K]	-	הטמפרטורה הגבוהה במחזור קרנו
T _L [K]	-	הטמפרטורה הנמוכה במחזור קרנו
$C_V \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	-	קיבול חום סגולי בנפח קבוע
$C_P \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	-	קיבול חום סגולי בלחץ קבוע
Q [J]	-	החום המסופק למערכת או נפלט ממנה
$R \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$	-	קבוע הגז
W [J]	-	העבודה המופקת מן המערכת או מושקעת בה
W > 0	-	כאשר המערכת מפיקה עבודה
$q_{in} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$	-	החום המסופק ליחידת מסה
$q_{out} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$	-	החום הנפלט ליחידת מסה
$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	-	צפיפות או מסה סגולית
γ	-	יחס קיבולי חום סגוליים

קבועים ויחסי המרה בין יחידות

$$1 \text{ bar} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ BTU} = 252 \text{ cal}$$

$$1 \text{ cal} = 4.185 \text{ J (Joule)}$$

$$T [\text{K}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273.15$$

קבוע הגזים האוניברסלי

$$R_u = 8314.5 \left[\frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right]$$

קבועי האוויר

$$C_p = 1004.5 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$C_v = 717.5 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$M = 28.97 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

$$R = 287.05 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

צפיפות או מסה סגולית

$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$

קבוע הגז

$$P = \rho RT \text{ או } PV = mRT$$

משוואת המצב של גזים אידאליים

$$C_P - C_V = R$$

$$C_P = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$$

מקדם קיבול החום הסגולי בלחץ קבוע

$$C_V = \frac{R}{\gamma - 1}$$

מקדם קיבול החום הסגולי בנפח קבוע

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

יחס קיבולי החום

$$PV^n = \text{const.}$$

בתהליך כללי (פוליטרופי)

$$n = 0$$

בתהליך איזוברי

$$n = 1$$

בתהליך איזותרמי

$$n = \gamma$$

בתהליך אדיאבטי

$$n = \infty$$

בתהליך איזוכורי

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

בתהליך פוליטרופי שהמעריך שלו הוא n

עבודה המופקת ממערכת העוברת ממצב 1 למצב 2

$$W = \begin{cases} \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{n-1} = \frac{P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]}{n-1} & n \neq 1 \\ P_1 V_1 \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) & n = 1 \end{cases}$$

$$Q = m \cdot C_P \cdot (T_2 - T_1) \quad \text{מעבר חום בלחץ קבוע}$$

$$Q = m \cdot C_V \cdot (T_2 - T_1) \quad \text{מעבר חום בנפח קבוע}$$

$$\Delta U = m \cdot C_V \cdot (T_2 - T_1) \quad \text{שינוי האנרגיה הפנימית בגז אידאלי}$$

$$\Delta U = Q - W \quad \text{החוק הראשון של התרמודינמיקה}$$

$$W = q_{in} - q_{out} \quad \text{עבודה המופקת במחזור ליחידת מסה}$$

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_{in}} \quad \text{הנצילות של מחזור תרמודינמי}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad \text{הנצילות של מחזור ברייטון}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad \text{הנצילות של מחזור אוטו}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[\frac{r_c^{\gamma-1}}{\gamma(r_c - 1)} \right] \quad \text{הנצילות של מחזור דיזל}$$

$$\eta_{th} = \frac{T_H - T_L}{T_H} \quad \text{הנצילות של מחזור קרנו}$$

מדחפים

$$PW_P = \frac{T \cdot V_o}{\eta_p} \quad \text{ההספק הדרוש להנעת מדחף}$$

$$T \quad - \quad \text{כוח הדחף}$$

$$V_o \quad - \quad \text{מהירות הטיסה}$$

$$\eta_p \quad - \quad \text{נצילות המדחף}$$

מנועים

דחף נטו של מנוע טורבו-סילון		$F = \dot{m}_a [(1 + f)V_e - V_0] + (P_e - P_{amb})A_e$
ספיקת האוויר	-	$\dot{m}_a \left[\frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right]$
יחס דלק-אוויר	-	$f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{\text{ספיקת הדלק}}{\text{ספיקת האוויר}}$
מהירות הפליטה של הגזים מהנחיר	-	$V_e \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$
מהירות הטיסה	-	$V_o \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$
לחץ סטטי במישור היציאה מנחיר הפליטה	-	$P_e \text{ [Pa]}$
לחץ הסביבה	-	$P_{amb} \text{ [Pa]}$
שטח היציאה של נחיר הפליטה	-	$A_e \text{ [m}^2\text{]}$
תצרוכת דלק סגולית	-	$\text{TSFC} \left[\frac{\text{kg}}{\text{N} \cdot \text{sec}} \right]$

דחף נטו של המנוע כאשר ההתפשטות בנחיר הפליטה היא מלאה (נחיר מתואם $(P_e = P_{amb})$):

$$F_N = \dot{m}_a [(1 + f)V_e - V_o]$$

דחף נטו של המנוע כאשר ספיקת הדלק זניחה ביחס לספיקת האוויר, $f \ll 1$, ונחיר הפליטה

$$F_N = \dot{m}_a (V_e - V_o) \quad \text{מתואם:}$$

$$\text{TSFC} = \frac{\dot{m}_f}{F_N} \quad \text{תצרוכת דלק סגולית:}$$

אווירודינמיקה

A	-	שטח החתך
ρ	-	צפיפות או מסה סגולית
v	-	מהירות
P	-	לחץ
P_0	-	לחץ עצירה
b	-	מוטת הכנף

$\bar{c}$	-	מיתר ממוצע של הכנף
α	-	זווית התקפה
α_{0L}	-	זווית התקפה ללא עילוי
S	-	שטח
C_D	-	מקדם הגרר
μ	-	צמיגות דינמית
γ	-	זווית קונוס מאך

חוק הרציפות $r \cdot v \cdot A = \text{const.}$

חוק ברנולי לזרימה אופקית $P + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_0 = \text{const.}$

מהירות הקול באוויר $a = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \cong 20 \sqrt{T}$

מספר מאך $M = \frac{v}{a}$

מספר ריינולדס $R_c = \frac{\rho \cdot v \cdot \bar{c}}{\mu}$

שטח הכנף $S = b \bar{c}$

מנת הממדים $AR = \frac{b^2}{S}$

מקדם העילוי $C_L = C_{La} (\alpha - \alpha_{0L})$

כוח העילוי $L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$

כוח הגרר $D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D$

סינוס זווית קונוס מאך $\sin \gamma = \frac{1}{M}$

נספח ב': טבלת אטמוספירה סטנדרטית

לשאלונים 853201, 853101, קיץ תשע"ח

גובה מעל פני-הים	טמפרטורת האוויר	מהירות הקול	לחץ האוויר	צפיפות האוויר	צמיגות האוויר
h	T	a	P	ρ	μ
(km)	(°C)	(m / sec)	(Pa) (N / m ²)	(kg / m ³)	(kg / m · sec)
0	15.0	340	1.0132×10^5	1.226	1.780×10^{-5}
1	8.5	336	0.8987×10^5	1.112	1.749×10^{-5}
2	2.0	332	0.7948×10^5	1.007	1.717×10^{-5}
3	-4.5	329	0.7010×10^5	0.909	1.684×10^{-5}
4	-11.0	325	0.6163×10^5	0.820	1.652×10^{-5}
5	-17.5	320	0.5400×10^5	0.737	1.619×10^{-5}
6	-24.0	316	0.4717×10^5	0.660	1.586×10^{-5}
7	-30.5	312	0.4104×10^5	0.589	1.552×10^{-5}
8	-37.0	308	0.3558×10^5	0.526	1.517×10^{-5}
9	-43.5	304	0.3073×10^5	0.467	1.482×10^{-5}
10	-50.0	299	0.2642×10^5	0.413	1.447×10^{-5}
11	-56.5	295	0.2261×10^5	0.364	1.418×10^{-5}
12	-56.5	295	0.1932×10^5	0.311	1.418×10^{-5}
13	-56.5	295	0.1650×10^5	0.265	1.418×10^{-5}
14	-56.5	295	0.1409×10^5	0.227	1.418×10^{-5}
15	-56.5	295	0.1203×10^5	0.194	1.418×10^{-5}
16	-56.5	295	0.1027×10^5	0.163	1.418×10^{-5}
17	-56.5	295	0.0875×10^5	0.141	1.418×10^{-5}
18	-56.5	295	0.0749×10^5	0.121	1.418×10^{-5}
19	-56.5	295	0.0640×10^5	0.103	1.418×10^{-5}
20	-56.5	295	0.0546×10^5	0.088	1.418×10^{-5}
30	-46.5	302	0.0117×10^5	0.018	1.488×10^{-5}