



מערכות קירור ומיזוג אוויר

דוד תורן

חלק א'

משרד העבודה

האגף להכשרה מקצועית



מערכות קירור ומיזוג אוויר

דוד תורן

חלק א'

תשפ"ה - 2025



**ספר זה מוקדש לזכרו של ארז הרשקוביץ ז"ל,
שנהרג בפיגוע בצומת אריאל בי"ד באב תשס"ג - 12.8.2003.
יהי זכרו ברוך.**

כתיבה: **דוד תורן**, מרצה בכיר למערכות קירור ומיזוג אוויר.

ייזום הספר, עריכת תמונות בפרקים 4 ו-5: **יצחק הרשקוביץ**, מרצה בכיר למערכות קירור ומיזוג אוויר, המכללה הטכנולוגית אורט ע"ש סינגלובסקי, תל אביב.

ניהול הפקה ועריכת פורמט גרפי: **ד"ר ענת בר-כהן, מאה** © המחלקה לפיתוח פדגוגי טכנולוגי, האגף להכשרה מקצועית ולפיתוח כוח אדם, משרד העבודה.

עריכה, בדיקה והנחייה מקצועית: **גד קורץ**, מפקח ארצי מקצועות הקירור ומיזוג אוויר לשעבר, האגף להכשרה מקצועית ולפיתוח כוח אדם, משרד העבודה.

בדיקה מקצועית: **מחמוד יאסין**, מפקח ארצי מקצועות הקירור ומיזוג אוויר, האגף להכשרה מקצועית ולפיתוח כוח אדם, משרד העבודה.

עריכה לשונית: **חבר המתרגמים בע"מ ומירב אברהמי**.

הגהה, עימוד וטיפול בזכויות יוצרים: **מתודיקה למידה אפקטיבית בע"מ**.

עיצוב גרפי: **סטודיו גם וגם**.

עיצוב פורמט גרפי וכריכה: **ירון מלנבוים**.

**ברצוננו להודות לחברות אשר אפשרו לנו להשתמש בתמונותיהן בספר זה:
Alpha level, Bitzer, Bundy, Danfos, Parker, Rafco, Swep, Radion.**

מהדורה ראשונה תשפ"ה - 2025

כל הזכויות שמורות לאגף להכשרה מקצועית ולפיתוח כוח אדם.

מ"ק 813320; 2057623

אין להעתיק, לתרגם, לשכפל, לאחסן במאגרי מידע, לשדר או לקלוט בכל אמצעי אלקטרוני, אופטי, מכני או אחר - שום חלק מהחומר שבספר זה.

לא ייעשה שימוש מסחרי מסוג כלשהו, ללא רשות בכתב מאת הנהלת האגף להכשרה מקצועית ולפיתוח כוח אדם.

הוצאה לאור: האגף להכשרה מקצועית ולפיתוח כוח אדם.

משרד העבודה, בניין ג'נרי, רחוב בנק ישראל 5, קריית הממשלה, ת"ד 3166, ירושלים 9103101

<https://www.gov.il/he/Departments/DynamicCollectors/mea-catalog-books?skip=0>

תוכן העניינים

4	רשימת התמונות
10	רשימת הטבלאות
12	הקדמה
15	פרק 1: תרמודינמיקה
15	1.1 הגדרות מונחים
16	1.2 תורת החום
25	1.3 תיאור ההשפעה של אנרגיית החום על מצבי הצבירה של המים (H ₂ O)
32	1.4 חוקי הגזים האידיאליים/הקשר בין הלחץ, הנפח והטמפרטורה
33	1.5 זרימה וספיקה
37	פרק 2: תורת הקירור
37	2.1 מבוא
38	2.2 עיקרון פעולת המערכת כמשאבת חום
42	2.3 דיאגרמת לחץ-אנטלפיה (גרף מולייר)
57	פרק 3: קררים (Refrigerants) לשימוש במערכות קירור ומיזוג אוויר
57	3.1 מבוא
68	3.2 סוגי קררים ושימושיהם
102	3.3 קביעת נתוני לחץ/טמפרטורה לקררים
103	3.4 מחזור קררים
105	3.5 נוהל ריקון וטעינת קררים למערכות/מתקנים של ציוד קירור, מיזוג אוויר וחימום
110	פרק 4: מדחסים
110	4.1 מבוא
110	4.2 מונחי יסוד למדחסים
112	4.3 סוגי מדחסים
175	4.4 מערכות שימון למדחסי קירור
191	4.5 תקלות במדחסי קירור - סיבות ומניעה
194	4.6 זיהוי מדחסים
195	4.7 מנועים חשמליים למדחסי קירור ומיזוג אוויר
205	4.8 מנועים תלת-פאזיים (3-Phase Motors)
214	פרק 5: שוברי לחץ - אביזרי התפשטות
214	5.1 מבוא
215	5.2 אביזרי התפשטות ללא מנגנון ויסות, בעלי ספיקה קבועה
245	מקורות התמונות

רשימת התמונות

14	עיקרון פעולת מערכת הקירור	תמונה 1.1
18	מעבר חום בהולכה, הסעה וקרינה	תמונה 1.2
19	הסעת חום טבעית באוויר	תמונה 1.3 א
19	הסעת חום בצורה טבעית במים	תמונה 1.3 ב
19	סוללת מעבה (מצב קירור)	תמונה 1.4 א
19	מעבר חום משולב במאייד	תמונה 1.4 ב
20	מעבר חום בהולכה ובקרינה דרך חלונות	תמונה 1.5
22	סולמות טמפרטורה	תמונה 1.6
23	תהליכי שינוי מצב צבירה	תמונה 1.7
23	דיאגרמת פאזות	תמונה 1.8
25	דיאגרמת פאזות CO ₂ (R-447)	תמונה 1.9
25	דיאגרמת טמפרטורה/אנרגיה לתיאור הפיכת קרח לאדי מים	תמונה 1.10
29	לחץ	תמונה 1.11
29	ברומטר	תמונה 1.12
29	מד לחץ בעל 2 סקלות מדידה	תמונה 1.13
30	לחצים הידרוסטטיים במיכלים	תמונה 1.14
31	לחץ הידראולי	תמונה 1.15
31	לחצים במיכל סגור	תמונה 1.16
32	אפקט ונטורי	תמונה 1.17
32	קורה קורנת דגם "קסטה"	תמונה 1.18
33	מכשיר למדידת מהירות זרימת אוויר	תמונה 1.19
33	מד מהירות זרימה/ספיקה לנוזלים	תמונה 1.20
38	רכיבי מעגל הקירור הבסיסי	תמונה 2.1
42	מחזור הקירור	תמונה 2.2
43	דיאגרמת לחץ-אנטלפיה	תמונה 2.3
47	אפלייקציית Refrigerant Slider של חברת דנפוס	תמונה 2.4
48	שרטוט קווי לחץ טמפרטורה של המאייד והמעבה	תמונה 2.5
50	דיאגרמת לחץ אנטלפיה עם מחזור קירור תיאורטי	תמונה 2.6
53	דיאגרמת לחץ אנטלפיה עם מחזור קירור תיאורטי ומעשי	תמונה 2.7
54	דיאגרמת לחץ-אנטלפיה לקור R-744	תמונה 2.8
62	אחסון קררים במיכלים בצבעים שונים	תמונה 3.1
63	שינוי בסימון מכלי קרר	תמונה 3.2
64	דוגמה לסימון מכלי קרר לפי תקן אמריקאי	תמונה 3.3
66	מחליפי חום בזרימה נגדית ובזרימה מקבילית	תמונה 3.4
67	מחליף חום פלטות בזרימה נגדית	תמונה 3.5
68	קררים תחליפיים	תמונה 3.6
69	קרר R-11	תמונה 3.7

70	קור R-12	תמונה 3.8
71	קור R-502	תמונה 3.9
72	קור R-22	תמונה 3.10
73	קור R-123	תמונה 3.11
74	קור R-401A-B	תמונה 3.12
75	קור R-402 A-B	תמונה 3.13
76	קורים נוספים מהסדרה שגם בהם נעשה שימוש:	תמונה 3.14
78	קור R-134a	תמונה 3.15
79	קור R-410A	תמונה 3.16
80	קור R-404A	תמונה 3.17
81	קור R-407C	תמונה 3.18
82	קור R-407A	תמונה 3.19
83	קור R-507	תמונה 3.20
84	קור R-32	תמונה 3.21
86	קור R-1234yf	תמונה 3.22
87	קור R-1234ze	תמונה 3.23
89	מסר התנעה אטום למדחס	תמונה 3.24
89	מסר התנעה לא אטום	תמונה 3.25
94	קור R-600	תמונה 3.26
95	קור R-600a	תמונה 3.27
96	קור R-290	תמונה 3.28
97	קור R-744	תמונה 3.29
99	דיאגרמת לחץ: אנתלפיה של קור CO ₂ (R-744)	תמונה 3.30
100	קור R-717	תמונה 3.31
102	מסכים מתוך אפליקציית Refrigerant Slider	תמונה 3.32
104	מכל למחזור קורים	תמונה 3.33
104	מכונת מחזור קורים	תמונה 3.34
104	ברז כפול במכל מחזור	תמונה 3.35
112	סוגי מדחסים	תמונה 4.1
113	התאמת מדחסים	תמונה 4.2
115	חיבור באמצעות מצמד	תמונה 4.3
115	המצמד וחלקיו	תמונה 4.4
116	העברת תנועה באמצעות רצועות גומי טרפזיות	תמונה 4.5
116	חתך רצועה V	תמונה 4.6
116	גלגלי רצועה בחיבור שגם	תמונה 4.7
116	גלגלי רצועה מותאמים לחיבור מהיר Taper-lock	תמונה 4.8
117	תותבי הידוק קוניים (Taper-lock) לחיבור גלגלי רצועות	תמונה 4.9
117	מדחס חד-דרגתי פתוח למחצה	תמונה 4.10
117	מדחס רב-בוכנות פתוח למחצה	תמונה 4.11

118	מראה/חתך מדחס רב-בוכנות פתוח למחצה	4.12
119	מדחס בוכנה הרמטי למקרר ביתי	4.13
119	מדחס בוכנה הרמטי ליחידת קירור	4.14
120	רכיבים נעים במדחס בוכנה	4.15
121	גל ארכובה קלאסי	4.16
122	מסבי החלקה	4.17
122	מסב כדורי	4.18
123	בוכנה וטלטל	4.19
123	צילינדר, בוכנה, פין בוכנה ואטמים	4.20
124	שסתומי דחיסה	4.21
124	שסתומי יניקה	4.22
125	הכוחות הפועלים על שסתומי המדחס	4.23
126	עיקרון פעולת מדחס בוכנה	4.24
127	ברז שירות למדחסים	4.25
128	ברז שירות סגור	4.26
128	ברז שירות, מצב אמצע	4.27
128	ברז שירות פתוח	4.28
129	מערכת שימון במדחס בוכנה	4.29
129	משאבת שמן מסוג גלגלי שיניים	4.30
130	בקרי מהירות מנועים	4.31
131	פורק דרגות מכני חשמלי במצב עבודה רגיל	4.32
131	פורק דרגות מכני חשמלי במצב פירוק	4.33
132	דגמים של מדחסים עם פורק דרגות מכני חשמלי	4.34
134	מדחס חד דרגתי בעל צלעות קירור על המעטפת החיצונית של הצילינדר	4.35
134	קירור מדחס על ידי מאוורר חשמלי המותקן על ראש המדחס	4.36
135	מערכת הזרקת נוזל ליניקה	4.37
136	תנאי עבודה של מדחס במערכת הקפאה	4.38
137	גרף מולייר למערכת חד דרגתית, לטמפרטורות נמוכות מאוד	4.39
139	מדחס בוכנה דו-דרגתי עם קירור ביניים	4.40
139	מדחס סיבובי דו דרגתי עם הזרקת נוזל לקו יניקה	4.41
140	תיאור מעגל קירור דו-דרגתי בדיאגרמת לחץ/אנטלפיה	4.42
141	מראה חתך של רכיבי מדחס הרמטי למיזוג אוויר	4.43
142	גרף השפעת יחס דחיסה על נצילות המדחס	4.44
145	מדחס סיבובי להב קבוע (Stationary Blade) - שלבי פעולה	4.45
145	מדחס סיבובי להב - מבנה קבוע	4.46
146	מדחסים רוטאריים	4.47
146	השוואת שינוי תפוקה במדחס סיבובי	4.48
147	מדחס רוטארי מסוג להבים סובבים	4.49
147	עיקרון הפעולה של מדחס רוטארי עם 'להבים סובבים'	4.50

149	חתך ורכיבים של מדחס סקרול	4.51
150	ארבעת השלבים של דחיסת הקרר	4.52
151	מדחס סקרול החלק הנע והקבוע	4.53
154	מדחס דו-בורגי פתוח למחצה	4.54
155	עיקרון פעולה של מדחס דו-בורגי	4.55
156	מדחס דו-בורגי עם הפרדה ואחסון שמן פנימיים	4.56
157	מערכת הפרדת והחזרת שמן למדחס בורגי	4.57
157	מדחס חד-בורגי	4.58
158	עיקרון פעולת מדחס חד-בורגי	4.59
159	מדחס תלת-בורגי	4.60
160	מראה רכיבים של מדחס חד-בורגי עם שתי בוכנות החלקה	4.61
	מערכת ויסות תפוקה במדחס בורגי באמצעות בוכנה מחליקה וברזים חשמליים.	4.62
160	פריקת מדחס בורגי באמצעות בוכנת החלקה	
161	מיקום סלילי הפעלה (סולונואידים) של ברזי מערכת ויסות תפוקה במדחס בורגי	4.63
161	מדחס תלת-בורגי	4.64
163	חתך ומראה חלקים, מדחס צנטריפוגלי חד דרגתי	4.65
164	מערכת צ'ילר עם מדחס צנטריפוגלי	4.66
166	מאיצים, כיוון הטיית הכפות (Blades)	4.67
166	סוגי מאיצים (אימפלרים)	4.68
167	היווצרות מערבולות על המאיץ	4.69
167	מאיץ שניזוק כתוצאה מתופעת המערבולות	4.70
168	תופעת הנחשול "surge" ומניעתה	4.71
169	מדחס צנטריפוגלי דו-דרגתי	4.72
170	כפות ויסות תפוקה ביניקת מדחס צנטריפוגלי	4.73
170	מנגנון ויסות תפוקה מכני במצב 100% ובמצב 30%	4.74
172	מערכת שימון למדחס צנטריפוגלי עם מחליף חום לקירור השמן	4.75
173	מדחס צנטריפוגלי בעל מסבים מגנטיים, טורבו קור	4.76
173	השוואת נצילות מדחס מגנטי לעומת מדחסים צנטריפוגליים "סטנדרטיים"	4.77
174	ציר המדחס והמסבים המגנטיים, מדחס טורבו קור	4.78
177	מיקום ומבנה משאבת השמן במדחס סגור למחצה (סמי הרמטי)	4.79
178	חיבורי מפסק לחץ הפרשי	4.80
178	מבנה מפסק לחץ הפרשי אלקטרו-מכני	4.81
179	מיקום פרסוסטט הגנת לחץ שמן	4.82
179	מגן לחץ שמן הפרשי אלקטרוני	4.83
179	מיקום הרגש הכפול במכסה אחורי	4.84
180	מגן גובה שמן אופטי	4.85
180	מיקום מגן גובה שמן אופטי	4.86
184	מערכת הפרדה והחזרה של שמן לארבעה מדחסים	4.87
185	מפריד שמן רשתות	4.88

185	מפריד שמן ציקלוני	4.89
186	תא מצוף לשמירת מפלס שמן במדחס	4.90
186	תא שומר מפלס שמן עם ברז חשמלי	4.91
187	השוואת מפלס שמן במדחסים מחוברים במקביל	4.92
187	עיקרון פעולת מלכודת שמן	4.93
188	כללים להתקנת מלכודת שמן	4.94
189	מלכודת שמן במערכת צינורות כפולה (Double Raiser)	4.95
190	שלבים בהקצפת השמן במדחס	4.96
190	מדחס הרמטי עם גוף חימום "פנימי"	4.97
190	גוף חימום פנימי	4.98
192	הקרחת מדחס וקו יניקה בשל חזרת קרר נוזלי למדחס	4.99
194	תווית זיהוי למדחס	4.100
195	מבנה ופעולה של מנוע חד-פאזי חד-קוטבי	4.101
196	מנוע עם פאזה מפוצלת	4.102
196	סלילי המדחס	4.103
197	התנעת מדחס בשיטת R.S.I.R עם ממסר התנעה	4.104
198	מגן עומס יתר תרמי במדחס	4.105
198	מגן עומס יתר תרמי דו-מתכת להתקנה פנימית על סלילי המנוע	4.106
199	מפסק זרם יתר, מצבי עבודה	4.107
200	ממסר סליל זרם יתר	4.108
200	ממסר התנעה משולב בהגנת זרם יתר	4.109
200	עיקרון פעולת ממסר זרם יתר להתנעת מדחסים	4.110
201	ממסר התנעה מסוג PTC משולב עם הגנת זרם יתר	4.111
201	התקן SPP - קבל התנעה משולב בממסר התנעה	4.112
202	התנעת CSIR	4.113
202	התנעת CSCR	4.114
203	חיבור מדחס בשיטת PSC	4.115
204	שלבים בזיהוי וסימון הדקי חיבורי סלילי מנוע מדחס חד-פאזי מסוג Split Phase Motor	4.116
204	חיבורי הזנה ואמצעי הגנה למנוע המדחס	4.117
205	מבנה מנוע תלת-פאזי	4.118
205	הפרשי מופעים במנוע תלת-פאזי	4.119
207	חיבורים בשיטות כוכב ומשולש	4.120
207	אופן מיקום לוחיות הגישור על מגעי המנוע	4.121
207	התנעת כוכב-משולש באמצעות ממסרים	4.122
209	שלבים בפעולה של יחידת שינוי מהירות על ידי שינוי התדר	4.123
209	עיקרון המרת מתח למדחס אינוורטר	4.124
214	עיקרון שבירת לחץ ויצירת תהליך אדיאבטי	5.1
216	ברז קוני	5.2
216	ברז ידני	5.3

217	צינור נימי בחבילה	5.4 תמונה
217	צינור נימי מוכן לפי מידה קבועה	5.5 תמונה
217	צילום מסך של תוכנת חישוב צינורות קפילריים לקרר R-290 a בתקן בינלאומי	5.6 תמונה
219	שסתום אל-חוזר לצינורות קפילריים	5.7 תמונה
219	שסתום אל-חוזר עם צינור קפילרי משני	5.8 תמונה
220	מדיד צינורות קפילריים	5.9 תמונה
220	חותך צינורות קפילריים	5.10 תמונה
220	קצוות קטומים אלכסונית	5.11 תמונה
221	מסננים עם יציאות לכמה צינורות קפילריים	5.12 תמונה
221	מחליפי חום קו נוזל וקו יניקה	5.13 תמונה
222	ליפוף הצינור הקפילרי	5.14 תמונה
224	שסתום התפשטות אוטומטי	5.15 תמונה
225	שסתום התפשטות אוטומטי (חתך)	5.16 תמונה
225	הכוחות הפועלים על השסתום	5.17 תמונה
225	שסתומי התפשטות תרמיים	5.18 תמונה
226	הכוחות הפועלים בשסתום התפשטות תרמי	5.19 תמונה
227	מבנה השסתום ההתפשטות הטרמי	5.20 תמונה
229	שסתום התפשטות עם משווא לחץ חיצוני	5.21 תמונה
230	אופן התקנת שסתום התפשטות עם משווא לחץ חיצוני	5.22 תמונה
230	מחלק זרימה קוני	5.23 תמונה
231	חתך של מחלק זרימה קוני	5.24 תמונה
231	התקנת שסתום התפשטות תרמי עם משווא לחץ חיצון ומחלק זרימה קוני	5.25 תמונה
232	מילוי רגשים אוניברסלי ומילוי "אנטי האנטינג"	5.26 תמונה
233	מיקום רגשים לפי קוטר קו היניקה	5.27 תמונה
233	אופן הידוק רגשים לקו יניקה	5.28 תמונה
237	שסתום התפשטות מגנטי (On-Off)	5.29 תמונה
237	גרף פעולת שסתום On-Off	5.30 תמונה
237	שסתומי התפשטות בעלי מנועים חשמליים במתח ישר	5.31 תמונה
238	התקנת שסתום חשמלי עם בקרה אלקטרונית	5.32 תמונה
238	מיקום שסתום חשמלי EEV ומחלק זרימה	5.33 תמונה
240	מבנה ורכיבי מצוף לחץ גבוה	5.34 תמונה
240	חתך ורכיבי מצוף לחץ נמוך	5.35 תמונה
241	מיקום מצוף לחץ נמוך ביחס למערכת	5.36 תמונה
241	שומר גובה חשמלי למאייד מוצף	5.37 תמונה

רשימת הטבלאות

16	טבלה 1.1 - המרת יחידות תפוקה והספק נפוצות
17	טבלה 1.2 - מקדמי מעבר חום בחומרים שונים
20	טבלה 1.3 - מקדמי חום מורגש לחומרים שונים (Cs)
28	טבלה 1.4 - מקדמי התפשטות קווית
28	טבלה 1.5 - מקדמי התפשטות נפחית של מים
29	טבלה 1.6 - המרת לחצים
34	טבלה 1.7 - יחידות ספיקה שימושיות נוספות והמרתן
58	טבלה 3.1 - קבוצת בטיחות קררים לפי תקן ASHRAE 34
61	טבלה 3.2 - השפעת הקררים על הסביבה
69	טבלה 3.3 - נתוני קרר R-11
70	טבלה 3.4 - נתוני קרר R-12
71	טבלה 3.5 - נתוני קרר R-502
72	טבלה 3.6 - נתוני קרר R-22
73	טבלה 3.7 - נתוני קרר R-123
74	טבלה 3.8 - נתוני קרר R-401 A-B
75	טבלה 3.9 - נתוני קרר R-402 A-B
76	טבלה 3.10 - נתוני קררים נוספים מהסדרה
77	טבלה 3.11 - משפחות קררים והשפעתם על הסביבה
78	טבלה 3.12 - נתוני קרר R-134a
79	טבלה 3.13 - נתוני קרר R-410A
80	טבלה 3.14 - נתוני קרר R-404A
81	טבלה 3.15 - נתוני קרר R-407C
82	טבלה 3.16 - נתוני קרר R-407A
83	טבלה 3.17 - נתוני קרר R-507
84	טבלה 3.18 - נתוני קרר R-32
86	טבלה 3.19 - נתוני קרר R-1234yf
87	טבלה 3.20 - נתוני קרר R-1234ze
88	טבלה 3.21 - קררים ממשפחת H.C
93	טבלה 3.22 - מקדמים לריכוז קררים
94	טבלה 3.23 - נתוני קרר R-600
95	טבלה 3.24 - נתוני קרר R-600a
96	טבלה 3.25 - נתוני קרר R-290
96	טבלה 3.26 - דוגמאות לחומרים נוספים בדרגת סיכון A3
97	טבלה 3.27 - נתוני קרר R-744
100	טבלה 3.28 - נתוני קרר R-717

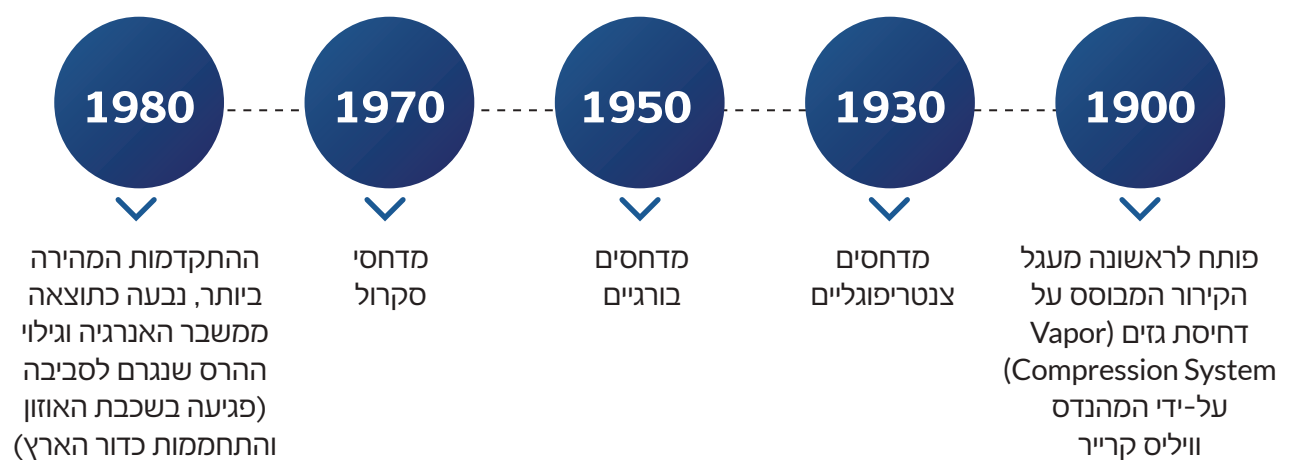
טבלה 4.1 - טבלת לחצי יניקה ודחיסה ויחסי דחיסה מקובלים במערכות מיזוג, קירור והקפאה	111
טבלה 4.2 - השוואת תכונות מדחסים שונים	571
טבלה 4.3 - יתרונות וחסרונות מנוע חד-פאזי	691
טבלה 4.4 - סימונים של קצוות חיבור, סילי סטטורים לפי תקנים	802
טבלה 5.1 - התאמת שסתום התפשטות לפי סוג המתקן, תפוקה וסוג הקרר	235
טבלה 5.2 - טבלת התאמת דיזות לשסתומים לפי סוג הקרר, סוג השסתום ותפוקת המערכת (TR)	236

הקדמה

מערכות הקירור ומיזוג האוויר (HVACR and Heat Ventilation Air Conditioning and Refrigeration) מהוות חלק בלתי נפרד ממגוון מסגרות בחיינו, וכוללות בין השאר:

- מתקני קירור ומיזוג ביתיים, לשמירת מזון ולקבלת תנאי אקלים רצויים.
- מערכות מסחריות, לקירור ולהקפאת מוצרים.
- מערכות תעשייתיות, המשמשות בחלק גדול מתהליכי הייצור במפעלים מסוגים שונים.
- מערכות מיזוג אוויר במבני ציבור, מפעלים וכדומה.

החל מראשית המאה העשרים, עבר תחום מערכות הקירור ומיזוג האוויר (HVACR) שינויים טכנולוגיים מסיביים:



רבים מהשינויים האחרונים בתחום, נובעים גם מהתגברות הפגיעה בסביבה. לדוגמה:

- **כלור:** נמצא בחלק מהקררים, גורם להריסת שכבת האוזון של כדור הארץ - שכבה הממוקמת בגובה של כ-35 ק"מ ומגינה על כדור הארץ מפני הקרניים האולטרה-סגולות המזיקות של השמש.
- **פלואור:** נמצא ברוב הקררים, מעצים את אפקט החממה (Global Warming) הפוגע בוויסות החום הטבעי של כדור הארץ, דבר שימשיך לגרום להתחממות ולפגיעה קשה באקלים.

כדי למנוע פגיעה מתמשכת בשכבת האוזון ולהקטין את אפקט החממה:

- חוקקו חוקים ותקנות גלובליים המגדירים הן את סוגי הקררים המותרים לייצור והן את הנצילות המינימלית המותרת של מערכות הקירור והמיזוג, במטרה לצמצם פליטת גזי חממה לאטמוספירה.
- פותחו בשנים האחרונות מערכות, קררים וציוד חדש, המחייבים הכשרה מקצועית ומיומנות הפעלה גבוהות לפעולה תקינה ויעילה של מערכות אלו.

לאור ההתפתחויות, על תחזוקאי מערכות קירור ומיזוג **להכיר את החידושים** במערכות, לרבות התקני הפיקוד והבקרה האלקטרוניים, ולדעת ליישם אותם תוך הבנה וידיעה של אופן הפעולה והדרכים להגדלת יעילות המערכת, והבטחת עמידה בקריטריונים שנקבעו.

ריבוי מערכות HVACR במגזרי הצריכה הפרטית, המסחר והתעשייה, המהווים חלק משמעותי בצריכת האנרגיה של המדינה, מחייב הכשרת צוותים מקצועיים לרמות השונות. על אנשי האחזקה לתת מענה:

- למערכות קירור ומיזוג אוויר ביתיות.
- למערכות קירור ומיזוג מסחריות.
- למערכות תעשייתיות גדולות שהטיפול בהן דורש ידע רב ומעמיק גם בתחומים נוספים, כגון: הידראוליקה, מערכות שאיבה, פיקוד וכו'.

ספר זה נכתב כדי לספק מידע יסודי ומוסמך על העקרונות הבסיסיים והמתקדמים של קירור ומיזוג אוויר. הספר מכיל את כל המידע הנדרש מתחזוקאי מערכות קירור ומיזוג אוויר, החל מהיסודות הבסיסיים שמטרתם להסביר את עיקרון פעולת המערכות, דרך הכרה והבנה של תפקידם ואופן פעולתם של מרכיבי המערכת הבסיסית והעדכנית ביותר, וכלה בכל הנדרש כדי להכין את התחזוקאי לעבודה בטוחה ומקצועית במערכות המודרניות של היום.

הספר מקיף הן את עקרונות המקצוע והן את ההיבטים הטכנולוגיים של מערכות הקירור והמיזוג. בספר פרקים מיוחדים העוסקים בחומרי הקירור (Refrigerants) הקיימים והחדשים, הטיפול בהם ומיחזורם, והוא מתייחס לחוקים ולתקנות העוסקים בשמירה על איכות הסביבה.

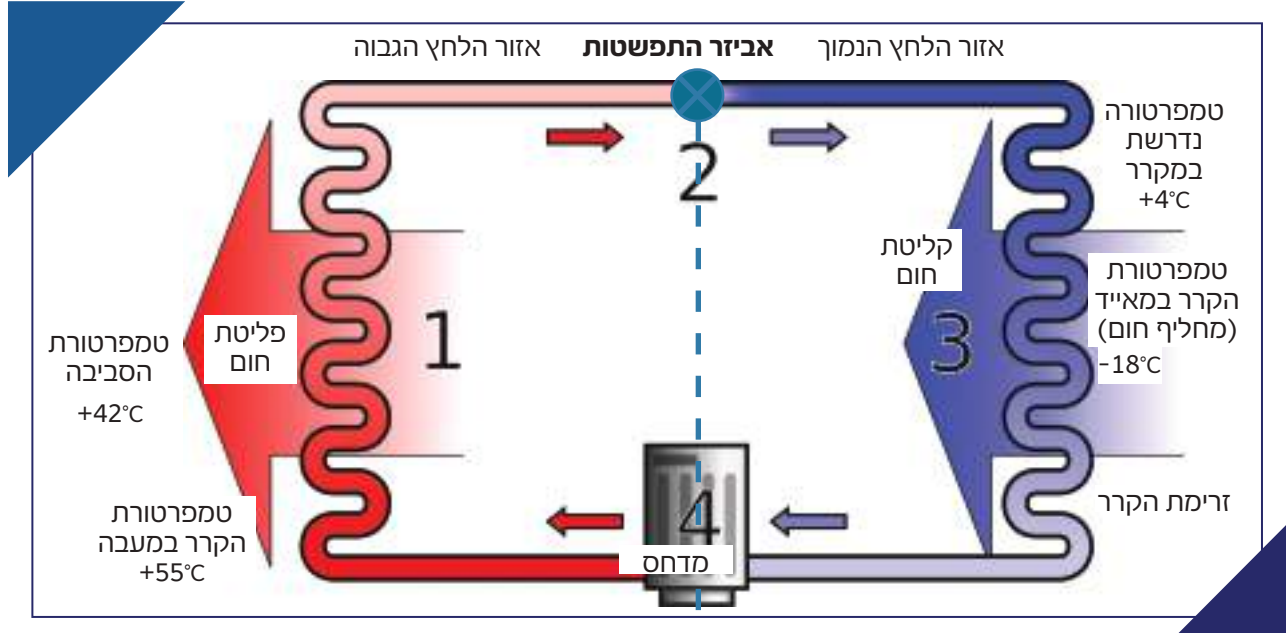
קהל היעד שעבורו נכתב ספר זה הינו:

- תלמידי בתי הספר התיכוניים הטכנולוגיים שבפיקוח משרד העבודה.
- תלמידי המכללות ומרכזי ההכשרה לתלמידים מבוגרים בקורסי ההכשרה המקצועית.
- תלמידי המגמות להנדסאי קירור ומיזוג אוויר.

עיקרון פעולת מערכות הקירור

מערכות הקירור ומערכות מיזוג האוויר, מיועדות להעביר חום ממקום שאינו רצוי (החלל המקורר, חלל החדר) אל הסביבה החיצונית, שם יוכל החום להתפזר ללא הפרעה, בשיטה הנקראת "משאבת חום" (Heat-Pump).

תמונה 1.1 - עיקרון פעולת מערכת הקירור



כפי שמתואר **בתמונה 1.1**, כוללת המערכת 2 מחליפי חום (פנימי וחיצוני), מדחס ואביזר שובר לחץ.

בצינורות המחברים בין רכיבי המערכת, זורם חומר בעל תכונות הולכת חום בתנועה מעגלית. לחומר זה נהוג לקרוא בשם "**קרר**" (refrigerant). החום מהחלל המטופל, עובר למחליף החום וממנו לקרר הזורם בתוכו. בגלל הפרשי טמפרטורות, הקרר הזורם במערכת מעביר את אנרגיית החום למחליף החום החיצוני, וממנו שוב בגלל הפרשי טמפרטורות החום נפלט לאוויר הסביבה. זרימת הקרר בין מחליפי החום מתאפשרת עקב הפרשי הלחצים שיוצרים המדחס ואביזר ההתפשטות.

מהתהליך המתואר ניתן להבין, כי כל מעגל הקירור מבוסס על תהליכים של תורת החום, תורת הלחצים ותורת הגזים (תהליכים תרמודינמיים). תהליכים אלו והחוקים והכללים שמכוחם הם נוצרים, הינם הבסיס להבנת אופן הפעולה של מערכות הקירור ומערכות מיזוג האוויר, והבסיס לכל פעולות התכנון, ההפעלה והתחזוקה של מערכות אלו.

פרק 1: תרמודינמיקה

תרמודינמיקה - ענף בפיזיקה העוסק בחקר האנרגיה, בתמורות שהאנרגיה עוברת בין מופעיה השונים וביכולת של האנרגיה לבצע עבודה. בפרק זה נעסוק בנושאי תרמודינמיקה הקשורים לתהליכים המתרחשים במערכות הקירור.

1.1 הגדרות מונחים

1.1.1 אנרגיה - גודל פיזיקלי, שמציין את כמות העבודה היכולה להיעשות על ידי כוח.

1.1.1.1 אנרגיה פוטנציאלית - אנרגיה האצורה בגוף כלשהו כתוצאה מכוח הפועל עליו. אנרגיה פוטנציאלית ניתנת להמרה לצורות שונות של אנרגיה: אנרגיה קינטית, אנרגיית חום או אנרגיה פוטנציאלית מסוג אחר, ולבצע עבודה. סוגים של אנרגיה פוטנציאלית הם: אנרגיית לחץ, אנרגיה חשמלית, אנרגיה מכנית (קפיץ) ועוד.

1.1.1.2 אנרגיה קינטית או אנרגיית תנועה (Kinetic Energy) - האנרגיה בה ניחן גוף מתוקף תנועתו, והיא תלויה רק במסת הגוף ובמהירותו. במערכות קירור ומיזוג, ניתן למצוא סוג זה של אנרגיה בזרימת הקרר בצינורות המערכת, בזרימת האוויר בתעלות, במערכות המים הקרים והחמים ועוד.

1.1.2 חוק שימור האנרגיה (החוק הראשון של התרמודינמיקה) - חוק זה מתייחס לעובדה שהאנרגיה במערכת סגורה אינה נוצרת במתכונת של "יש מאין" ואינה נעלמת פתאום. כל אנרגיה שנוצרת היא תוצאה של שימוש או המרה של צורת אנרגיה אחרת. אנרגיה יכולה לשנות צורה מסוג אנרגיה אחד למשנהו (לדוגמה: מאנרגיה חשמלית לאנרגיית חום) או להימסר ממערכת אחת למערכת מקבילה (לדוגמה: התהליך במאייד ובמעבה).

1.1.3 יחידות למדידת אנרגיה - מערכת היחידות הנפוצה כיום היא SI (System International). במערכת זו נתמקד. יש להבדיל בין שני מושגים בסיסיים בעולם התרמודינמיקה ולשים לב שלא להתבלבל ביניהם: אנרגיה (כפי שמוגדרת בסעיף 1.1.1) והספק - המוגדר כאנרגיה ליחידת זמן.

1.1.3.1 קלוריה (Cal) היא יחידת מידה לחום ואנרגיה. זוהי כמות האנרגיה הדרושה כדי לחמם 1 גרם מים במעלת צלזיוס אחת, תחת לחץ של אטמוספירה אחת. מכיוון שערך הקלוריה קטן יחסית, נהוג להשתמש ביחידות של קילו-קלוריה (Kcal) שערכן הוא 1000 קלוריות.

1.1.3.2 ג'אול (J-Joule) היא יחידת מידה לאנרגיה ולעבודה במערכת הבינלאומית (SI), ג'אול אחד שווה ערך לעבודה הנדרשת להפעלת כוח של ניוטון למרחק של מטר. ניתן לכנותה גם ניוטון מטר.

1.1.3.3 קילוואט שעה (KWh) היא יחידת מידה לאנרגיה השווה לאנרגיה מושקעת של קילוואט אחד במשך שעה.

1.1.3.4 B.T.U (British Thermal Unit) יחידות למדידת אנרגיה במערכת יחידות בריטית - היא כמות החום והאנרגיה הדרושה לחימום 1 פאונד של מים (כ-0.45 קילוגרם) במעלת פרנהייט אחת, (0.56 מעלות צלזיוס). יחידת מידה זו אינה חלק מיחידות המידה במערכת SI. היא שימושית בעיקר בארצות הברית ובבריטניה, ונפוצה מאוד במערכות קירור ומיזוג אוויר.

1.1.4 יחידות הספק:

1.1.4.1 הספק P - כמות העבודה המתבצעת (מושקעת/מתקבלת) ביחידת זמן.

1.1.4.2 הספק חשמלי - כמות האנרגיה החשמלית המומרת לצורות אנרגיה אחרות (חום, תנועה) ביחידות זמן.

1.1.4.3 וואט (Watt) - יחידה למידת הספק במערכת היחידות הבינלאומית SI, השווה ליחידת האנרגיה ג'אול לשנייה (Joule/Sec).

1.1.4.4 בי.טי.יו (BTU) לשעה - יחידת מידה לתפוקת קירור במערכת יחידות בריטית.

1.1.4.5 טון קירור (TR) - יחידת מידה לתפוקת קירור הנפוצה במערכות קירור ומיזוג אוויר.

1.1.5 המרת יחידות תפוקה והספק נפוצות

טבלה 1.1 - המרת יחידות תפוקה והספק נפוצות

1TR = 12,000 BTU/h = 3,000 Kcal/h = 12,648 KJ/h = 3.515 KW = 3.515 KJ/s	1BTU/h = 0.000293KW = 0.252 Kcal/h	1 Kcal/h = 3.965 BTU/h = 0.00116KW	1KW = 3,410 BTU/h = 860 Kcal/h
---	---------------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------------

1.2 תורת החום

מעבר חום - מושג בפזיקה המתאר מעבר של אנרגיה מגוף או חומר בעל כמות חום גדולה (מבוטא בדרך כלל ביחידות טמפרטורה) לגוף או חומר בעלי כמות אנרגיית חום קטנה יותר.

1.2.1 שיטות להעברת חום

העברת חום מתבצעת בשלוש דרכים שיפורטו להלן, במיוחד בכל הנוגע לקירור ומיזוג אוויר. חום יכול לעבור בין גופים, חומרים או חללים, במידה וקיימים הפרשי טמפרטורה. ברוב המקרים, יעבור חום ממקור בעל אנרגיית חום גדולה לגוף או לחומר שהערך האנרגטי שלו קטן יותר. השיטות הנפוצות למעבר חום:

1. מעבר חום בהולכה - תהליך שבו האנרגיה עוברת באמצעות מגע ישיר בין חומרים שונים או בתווך של החומר עצמו, זאת עקב הפרשי טמפרטורה. תהליך זה נכון לכל מצבי הצבירה.

דוגמאות:

א. בסיר המחומם באמצעות מקור חום (להבה, גוף חימום), מוליך החומר ממנו עשוי הסיר את אנרגיית החום מתחתית הסיר אל הסיר כולו ואל החומר שבתוכו.

ב. הקרר הזורם בסוללת המעבה, מחמם את הצנרת העשויה נחושת שמעבירה את החום לאוויר. בכל המקרים, מעבר החום בהולכה תלוי במקדם הולכת החום. מקדם זה משתנה מחומר לחומר ובזמן החימום.

חומרים מוליכים - במערכות קירור ומיזוג אוויר, עדיף להשתמש בחומרים בעלי מוליכות חום גבוהה, כדי לאפשר מעבר מהיר והפסדי אנרגיה קטנים של החום.

חומרים מבודדים - כדי למנוע העברת חום, משתמשים בחומרים מבודדים בעלי מקדם מוליכות חום נמוך, במטרה למנוע איבוד אנרגיית חום מצנרת, חדירת חום לתוך מבנים (קיץ) ו"בריחת" חום מהמבנים (חורף).

ג. **מקדם הולכת חום (Thermal Conectivity (K)** (ראו טבלה מס' 1.2) - מספר המתאר את קצב הולכת החום מאזור שבו קיימת אנרגיית חום גבוהה לאזור שבו קיימת אנרגיית חום נמוכה, דרך חומר כלשהו. המקדם מתייחס להעברת כמות חום ביחידות וואט (watt) לאורך מרחק מסויים (מטר) בהפרש טמפרטורה (צלזיוס). ככל שערך המקדם גבוה יותר, הפסדי זרימת האנרגיה דרך החומר, קטנים יותר.

טבלה 1.2 - מקדמי מעבר חום בחומרים שונים

מקדם מעבר חום - K $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	החומר	מקדם מעבר חום - K $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	החומר
0.6	מים (20°C)	406	כסף
0.17	אזבסט	385	נחושת
0.15	לבנת בידוד	205	אלומיניום
0.11	שלג יבש	79.5	ברזל
0.04	פיברגלס	50.2	פלדה
0.04	צמר לבד	34.7	עופרת
0.04	שעם	8.3	כספית
0.033	קלקר	1.6	קרח
0.12-0.04	עץ	0.8	זכוכית רגילה
0.024	אוויר (0°C)	0.8	בטון

תרגיל: חישוב מעבר חום דרך קירות

- חשב את קצב איבוד החום דרך הקירות בחדר שאלה נתוניו:
- גודלו 3*3 מטר וגובהו 2.5 מטר
 - בנוי מלבני בידוד בעובי של 15 ס"מ
 - הטמפרטורה בתוך החדר היא 20°C ובחוץ 5°C

שים לב

- היעזר בטבלה 2 לבחירת מקדם מעבר החום המתאים
- עבור מעבר חום בין שני משטחים שטוחים, כגון: איבוד חום דרך קירות הבית, קצב מעבר

$$\Delta Q = \frac{k \cdot A (T_{hot} - T_{cold})}{d}$$

ΔQ - כמות החום המועברת בזמן ΔT ב - W
 k - מוליכות החום המחושבת של הקיר ב - $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

A - שטח הקיר במ"ר

T - טמפרטורה במעלות צלזיוס (°C)

d - עובי הקיר במטרים

פתרון

1. חישוב השטח של 4 הקירות:

$$A = 4 \cdot 3 \cdot 2.5 = 30m^2$$

2. קצב איבוד החום לאור הטמפרטורות הנתונות:

$$\Delta Q = \frac{k \cdot A (T_{hot} - T_{cold})}{d} = \frac{0.15 \cdot 30 \cdot (20 - 5)}{0.15} = 450watt$$

3. חישוב קצב איבוד החום דרך קירות החדר ביום אחד:

$$\Delta Q = \Delta Q \cdot \Delta t = 450W \cdot 24H = 10,800watt \cdot day = 10.8KW \cdot day$$

2. **מעבר חום בהסעה** - בנוזלים ובגזים, נעשית העברת החום בעיקר בדרך של הסעה,

שפירושה: העברת חום על-ידי זרימה ממשית של הנוזל או הגז.

השיטות להעברת חום בהסעה הן:

א. **הסעה טבעית** - בשיטה זו, שואפים הנוזל או הגז המתחממים, לעלות כלפי מעלה,

כאשר המקום שהם מפנים נתפס על-ידי אוויר או נוזל קר יותר. המונח "הסעה טבעית"

(או "הסעה חופשית") מתאר מצב שבו הסעה נגרמת כתוצאה מכוחות ציפה, שנגרמים

עקב שינויים בצפיפות, כתוצאה משינוי הטמפרטורה בזרם.

ב. **דוגמאות:**

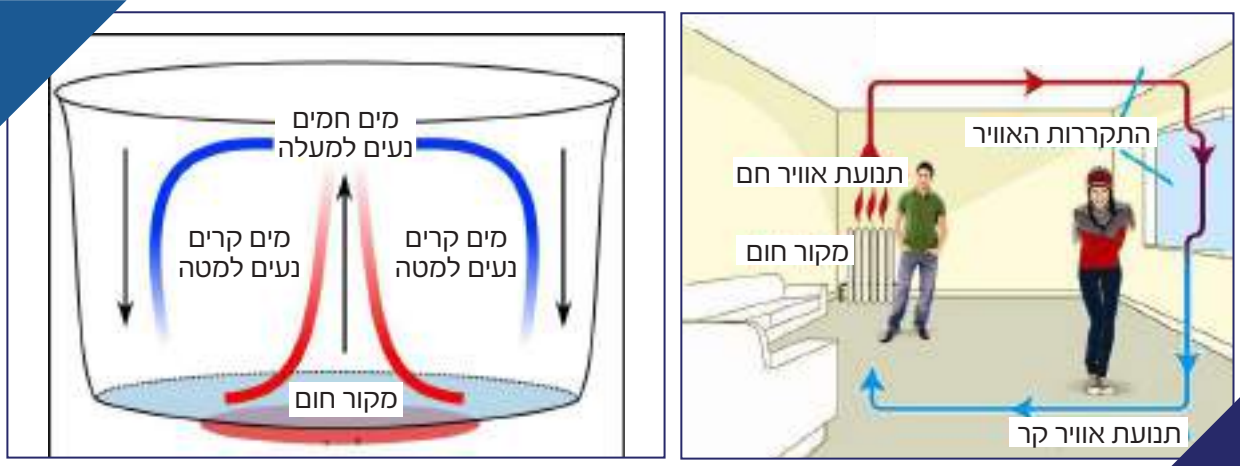
- סירקולציה (סחרור) המים בדוד חימום או בסיר
- מעבה של מקרר ביתי/משרדי
- תנועת אוויר חם בחדר
- אוורור חללים באמצעות פתחים בגג

תמונה 1.2 - מעבר חום בהולכה, הסעה וקרניה



פרק 1: תרמודינמיקה

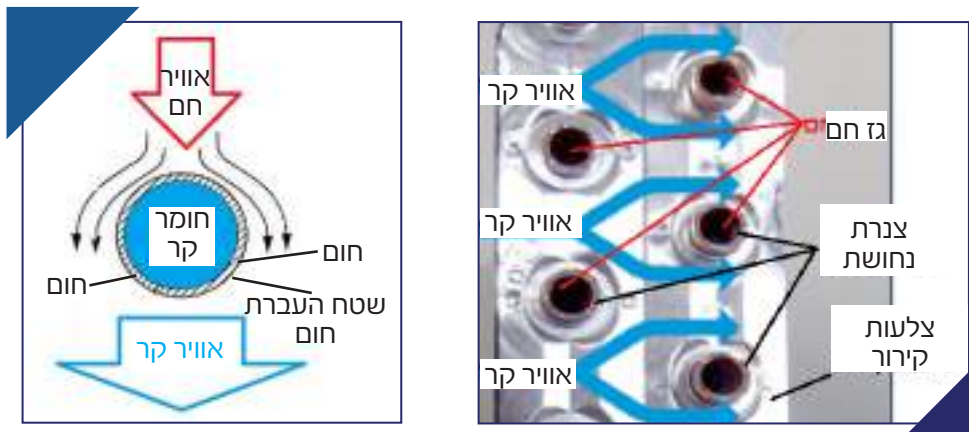
תמונה 1.3 א - הסעת חום טבעית באוויר תמונה 1.3 ב - הסעת חום בצורה טבעית במים



ג. **הסעה מאולצת** - בשיטה זו, מסיעים את הזורם (גז, נוזל) באמצעות מקור כוח חיצוני, כגון: מפוחים, משאבות ומאווררים. החומר מאולץ לנוע ממקום למקום בתוך תעלות אוויר, צנרת למים או בזרימה חופשית. השיטה מקובלת ביחידות מיזוג ביתיות, מסחריות או תעשייתיות.

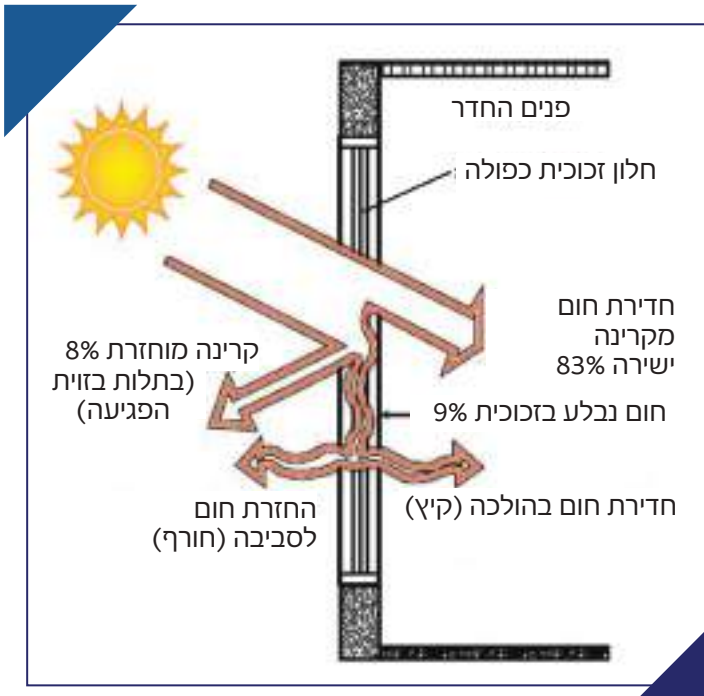
ד. **שילוב שיטות להעברת חום** - ברוב מערכות הקירור והמיזוג, משתמשים במחליפי חום בעלי צנרת מנחושת וצלעות פיזור חום מאלומיניום (חומרים בעלי מקדם העברת חום גבוה).

תמונה 1.4 א - סוללת מעבה (מצב קירור) תמונה 1.4 ב - מעבר חום משולב במאייד



בשיטה זאת, המתארת את מעבר החום במחליפי החום (סוללות) של מתקני הקירור והמיזוג, הגז החם הזורם בתוך הצינורות, מוסר את החום שבו למתכת (מעבר חום בהולכה), אשר מוסרת את החום לצלעות הקירור הצמודות אליה (מעבר חום בהולכה). האוויר הקר הזורם דרך צלעות הקירור ומסביב לצנרת הנחושת, קולט את החום (מעבר חום בהולכה) ומתחמם. האוויר שהתחמם, מוסע באמצעות מפוח אל מעבר לסוללה (הסעה מאולצת), ואילו הגז שבתוך הצנרת שהתקרר הופך לנוזל (מתעבה) ומוסע על ידי המדחס להמשך התהליך.

תמונה 1.5 - מעבר חום בהולכה ובקרינה דרך חלונות



3. מעבר חום בקרינה - קרינת חום נראית, כגון: קרינת השמש או קרינה מתנורים, כמו גם קרינה באורכי גל שאינה נראית לעין, יכולה לעבור דרך משטחים שקופים וגם דרך שכבות אוויר. זאת בניגוד להולכה ולהסעה הדורשות אמצעי תיווך. עוצמת הקרינה משתנה בהתאם למרחק ממקור הקרינה ולמשך הזמן שבו הקרינה מתקיימת. מניעת מעבר החום דרך חלונות זכוכית, הינה אחת הדרישות למיזוג אוויר יעיל.

4. סוגי חום - כאמור, חום הוא סוג של אנרגיה העוברת בין חומרים. ההבדל בכמות החום

העוברת בין החומרים תלוי ביכולת האגירה/השחרור של אנרגיית החום בחומר. יכולת זו מתבטאת בשתי צורות של אנרגיית חום:

חום מורגש (Sensible Heat) - אנרגיית חום, שניתן להרגיש ולמדוד (בעזרת טרמומטר). כמות קליטת/פליטת אנרגיית החום המורגש תלויה במקדם החום המורגש (C_s), השונה מחומר לחומר ומוגדר **כמקדם חום מורגש (סגולי) של חומר** - כלומר כמות החום הנדרשת לשינוי הטמפרטורה של יחידת מסה (משקל) של החומר במעלה אחת. כאשר נעשה שימוש ביחידות בתקן אירופאי (יחידות מטריות), ההתייחסות הינה לשינוי טמפרטורה במעלות צלזיוס ($^{\circ}C$), ואילו בשימוש ביחידות התקן בריטי, ההתייחסות הינה לשינוי טמפרטורה במעלות פרנהייט ($^{\circ}F$). הרחבה לגבי מדידת טמפרטורה תובא בהמשך.

טבלה 1.3 - מקדמי חום מורגש לחומרים שונים (C_s)

החומר	חום סגולי	$\frac{J}{Kg \cdot ^{\circ}Cs}$
מים (נוזלים)	4,190	
קרח	2,050	
ברזל	470	
אלומיניום	910	
נחושת	386	

מהטבלה ניתן ללמוד כי:

- א. מים הינם חומר קירור יעיל. כמות קטנה יחסית של מים יכולה לקלוט/לפלוט כמות גדולה של חום, תוך כדי עלייה מעטה בטמפרטורה.
- ב. קרח דורש פחות השקעת אנרגיה, על מנת להביאו לטמפרטורות נמוכות מטמפרטורת הקיפאון, ולכן גם יעיל ומצוי בשימוש במערכות אגירת אנרגיית קור.
- ג. ברזל פחות יעיל מאלומיניום ונחושת בהעברת חום מכיוון שחימומו איטי יותר, והוא יעביר את האנרגיה השמורה בו לחומר המקרר תוך כדי פליטת כמות חום קטנה יותר.

חום כמוס (Latent Heat) - סוג של אנרגיית חום הדרושה לחומר מסוים, על מנת לשנות את מצב הצבירה שבו הוא נמצא (שינוי פאזה). בדרך כלל, הערך של החום הכמוס של החומר גבוה משמעותית מהערך של מקדם החום המורגש שלו.

לדוגמה: לחימום 1 ק"ג מים ב- 1°C נדרשת כמות חום של 1 Kcal (ערך מקדם חום הוא $C = 1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}\cdot^{\circ}\text{C}}$), לעומת זאת, לצורך איוד אותה של מים נדרשות 540 Kcal. שינוי מצב הצבירה מתבצע בטמפרטורה אחידה מתחילתו ועד סופו (ערך מקדם חום כמוס למעבר ממים לאדים $C_l = 540 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$).

במערכות הקירור, מנצלים את העובדה שתוך כדי שינוי מצב הצבירה, נפלט או נקלט חום רב, ולכן במעבה או במאייד, רוב החום הנפלט או הנקלט הוא כמוס ולא מורגש.

1.2.2 טמפרטורה

טמפרטורה היא הקניית ערך פיזיקלי לסוגים מסוימים של אנרגיית חום.

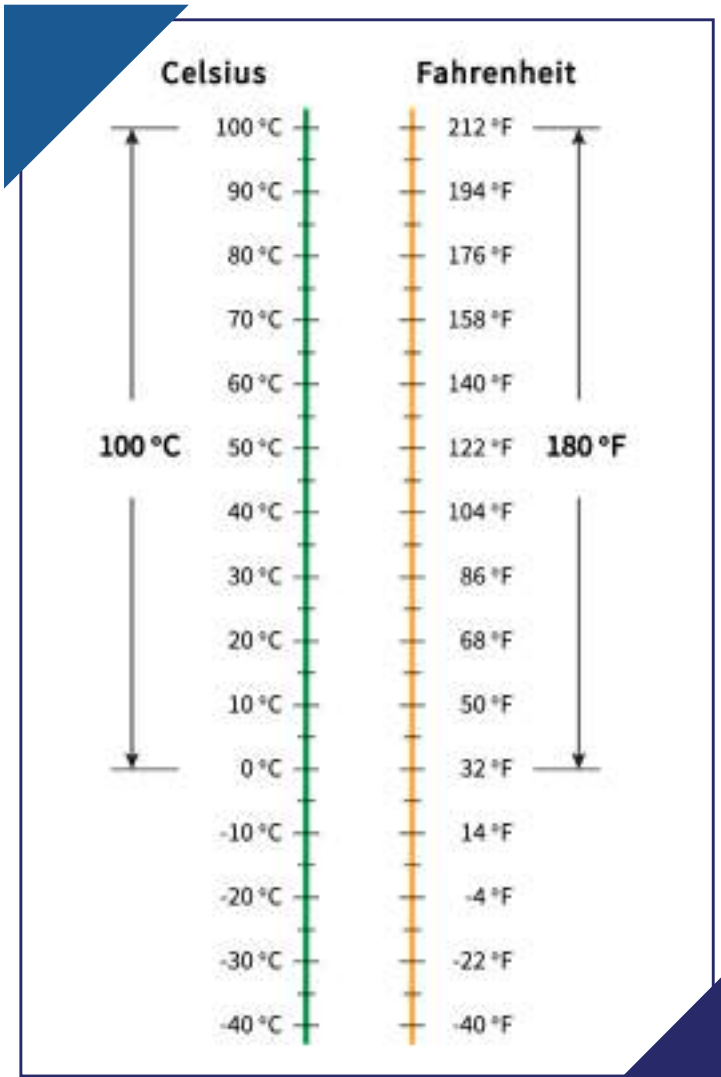
1.2.2.1 טמפרטורה ביחידות צלזיוס (Celsius)

מדידת ערכים של אנרגיית חום באמצעות שימוש ביחידות צלזיוס היא השיטה הנפוצה בתקן הבינלאומי והאירופאי. מקור השיטה הוא במדידות שערך המדען השוודי אנדריאס צלזיוס, ובהן הגדיר לראשונה את טמפרטורת נקודת הקפיאה של המים לערך של 0°C , ואת טמפרטורת נקודת הרתיחה של המים ל 100°C . את הפרש חילק המדען ל- 100 יחידות משנה (שנתות), וכך נוצר מה שמכונה "סולם צלזיוס".

1.2.2.2 טמפרטורה ביחידות פרנהייט (Fahrenheit)

הפיזיקאי הגרמני דניאל גבריאל פרנהייט ערך ניסויים דומים, והשתמש לצורך ניסוייו בתערובת שווה של קרח ומלח. נקודת ה-0 בסולם פרנהייט הינה נקודת ההתכה (המסה) או הקיפאון של תערובת המים והמלח, ונקודת הרתיחה של התערובת היא 212°F . נקודת התייחסות נוספת בסולם פרנהייט היא טמפרטורה של 32°F , המקבילה לטמפרטורת קפיאת המים של 0°C . מדידת הטמפרטורה על פי סולם פרנהייט נמצאת עדיין בשימוש בארצות הברית ובמספר קטן נוסף של מדינות בעולם.

תמונה 1.6 - סולמות טמפרטורה



1.2.2.3 נוסחאות למעבר בין

יחידות צלזיוס לפרנהייט

א. מצלזיוס לפרנהייט יש להשתמש בנוסחה: $T^{\circ}\text{F} = (T^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32$

ב. מפרנהייט לצלזיוס יש להשתמש

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{(T^{\circ}\text{F} - 32)}{1.8}$$

ג. בחישוב הפרשי טמפרטורה, ההתייחסות הינה לטמפרטורות עצמן ללא התייחסות לפער (32°) שבין 0°C ל 0°F ולכן שינוי של $1^{\circ}\text{C} = 1.8^{\circ}\text{F}$

1.2.2.4 סולמות טמפרטורה

נוספים

לצורך חישוב תהליכים תרמודינמיים, משתמשים בסולמות הטמפרטורה המתאימים לטמפרטורה הנמוכה ביותר שניתן להגיע אליה בתנאי מעבדה, המכונה טמפרטורת ה"אפס המוחלט".

להלן נוסחאות הפיכה לחישוב טמפרטורות מוחלטות:

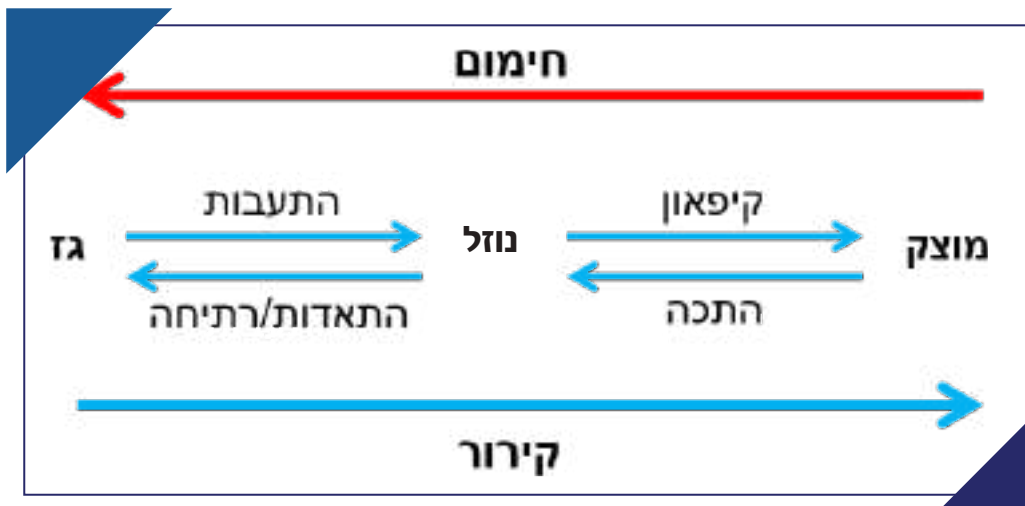
א. סולם קלווין ($^{\circ}\text{K}$) (מקביל לסולם צלזיוס) - $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$

ב. סולם רנקין ($^{\circ}\text{R}$) (מקביל לסולם פרנהייט) - $^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460$

1.2.3 מצבי צבירה של החומר והמעבר ממצב למצב

1.2.3.1 לכל חומר ישנם מספר מצבי צבירה שבהם הוא יכול להימצא. מצבי הצבירה העיקריים הם: **מוצק, נוזל וגז**. לחומרים מסוימים ייתכנו פאזות נוספות, אך כדי להגיע אליהן יש להשתמש בטכנולוגיות ובתנאים שאינם סטנדרטיים. חומר יכול לשנות את מצבו ממצב צבירה אחד לאחר בטמפרטורה מסוימת, הנקראת טמפרטורת מעבר. טמפרטורות המעבר שונות עבור כל חומר.

תמונה 1.7 - תהליכי שינוי מצב צבירה

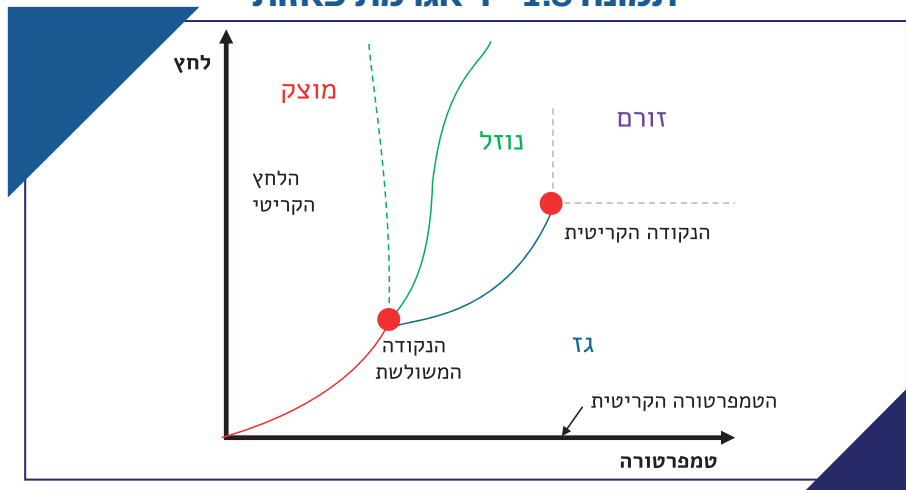


הסבר

התכה: מעבר של חומר ממוצק לנוזל (המסה במעבר מקרח למים).
רתיחה או אייד: מעבר מנוזל לגז.
עיבוי: מעבר מגז לנוזל.
הקפאה או התמצקות: מעבר מנוזל למוצק.

טמפרטורת המעבר תלויה בסוג החומר אך גם בלחץ. בדרך כלל, ככל שהלחץ גדול יותר טמפרטורת המעבר תהיה גבוהה יותר, וגם להיפך: ככל שהלחץ נמוך יותר, טמפרטורת המעבר תהיה נמוכה יותר. את הקשר בין מצבי הצבירה, לחץ וטמפרטורה אפשר לצייר בדיאגרמת פאזות:

תמונה 1.8 - דיאגרמת פאזות

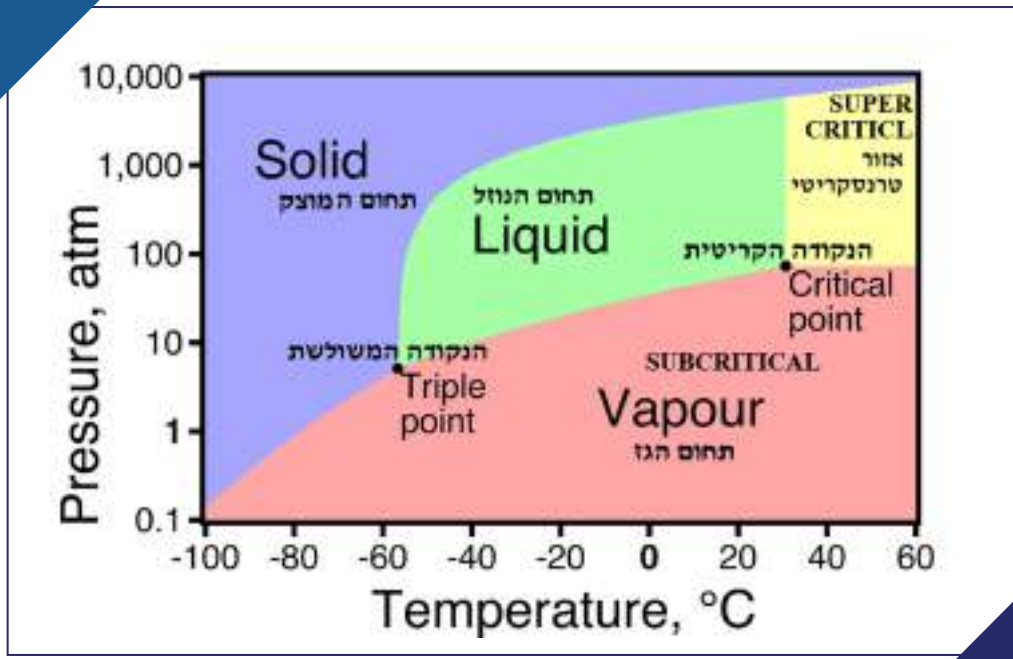


לא כל החומרים בטבע מופיעים בכל מצבי הצבירה, לדוגמה:
 א. פחמן-דו-חמצני (CO_2), בעוברו מלחץ גבוה ללחץ אטמוספרי רגיל, עובר היישר ממצב מוצק למצב גז, ללא מעבר דרך פאזת הנוזל (תהליך הנקרא סובלימציה או המראה).
 ב. אבקת מגנזיום (מתכת), בהגיעה לטמפרטורת המעבר, תתלקח ותעבור ישירות ממצב מוצק למצב גז.

1.2.3.2 הגדרות

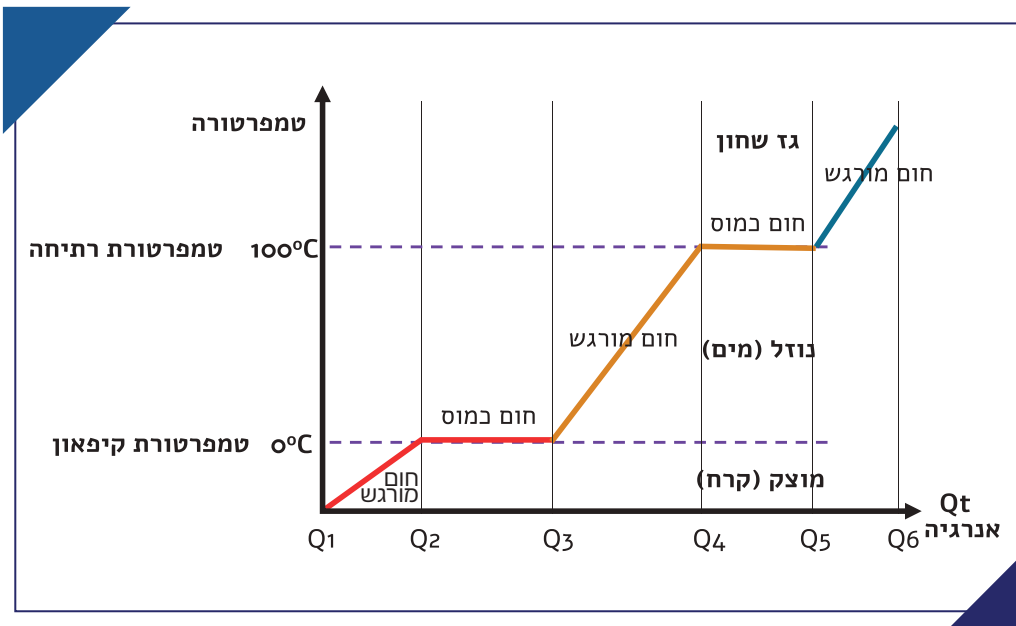
- א. **עיבוי:** תהליך הפיכת גז לנוזל. מתבצע באמצעות גריעת חום מהחומר או באמצעות הגדלת הלחץ על החומר. תהליך המתבצע במערכות הקירור ביחידת המעבה. כמו כן, בקיץ, אדי המים שבאוויר מתעבים על סוללת המאייד הקרה.
- ב. **הקפאה:** תהליך הפיכת נוזל למוצק, על ידי גריעת חום מהנוזל או הגדלת הלחץ השורר עליו.
- ג. **רתיחה:** הפיכת כל החומר בבת אחת מנוזל לגז באמצעות הוספת חום או הקטנת הלחץ. תהליך המתבצע ביחידת המאייד ובאביזר ההתפשטות.
- ד. **איוד:** הפיכת חומר מנוזל לגז בצורה איטית, על ידי חום גבוה הפועל על השטח העליון של הנוזל. לדוגמה: איוד מים משלולית, איוד זעה מהגוף.
- ה. **התכה:** הפיכת החומר בבת אחת ממוצק לנוזל. תהליך המתבצע בעת פעולת הפשרה, כאשר כמות גדולה של חום מועברת לחומר הקפוא.
- ו. **המראה:** הפיכת החומר בבת אחת ממוצק לגז.
- ז. **הנקודה המשולשת:** הנקודה המשולשת היא נקודה על הדיאגרמה, המציינת את התנאים התרמודינמיים לקיומן של שלוש הפאזות של החומר במקביל, כשהן במצב שיווי משקל תרמודינמי. לדוגמה: ניתן למצוא בדיאגרמת הפאזות של המים, כתלות בלחץ ובטמפרטורה, נקודה אחת של טמפרטורה ולחץ שבה מתקיימות כל שלוש הפאזות: מים, קרח ואדים.
- ח. **נקודה קריטית:** זו נקודה על דיאגרמת "לחץ/טמפרטורה" של החומר, המציינת את ה"גבול" שבו עדיין ניתן למצוא בחומר שני מצבי צבירה, הן של גז והן של נוזל. מעבר לנקודה זאת, כל תוספת של לחץ או טמפרטורה תגרום למעבר למצב צבירה "חדש" הנקרא: "**זורם**".
- הערה:** מכל חומרי הקירור (הקררים) החדשים שבהם נעשה שימוש במערכות הקירור, הקרר מסוג פחמן דו-חמצני (CO_2), הפועל בלחצים גבוהים במיוחד הינו בעל שני מצבי עבודה:
- **מצב Sub Critical** - לעבודה בלחצים נמוכים מהלחץ בנקודה הקריטית (כ-75 בר), ושבתחום זה ניתן לבצע מעבר בין פאזת הנוזל והגז.
 - **מצב Trans Critical** - לעבודה בלחצים גבוהים מעל הנקודה הקריטית, כשבלחץ זה החומר הוא במצב צבירה אחד ללא אפשרות לשינוי.

תמונה 1.9 - דיאגרמת פאזות R-744 (CO₂)



1.3 תיאור ההשפעה של אנרגיית החום על מצבי הצבירה של המים (H₂O)

תמונה 1.10 - דיאגרמת טמפרטורה/אנרגיה לתיאור הפיכת קרח לאדי מים



הסבר

כמות האנרגיה הנדרשת לצורך:

חימום הקרח עד לטמפרטורת ההתכה - השקעת חום מורגש.	Q1-Q2
שינוי מצב צבירה ממוצק לנוזל השקעת חום כמוס.	Q2-Q3
חימום המים מ-0°C (נקודת ההתכה) עד ל-100°C - השקעת חום מורגש.	Q3-Q4
שינוי מצב צבירה מנוזל לגז - השקעת חום כמוס.	Q4-Q5
חימום הגז מעל טמפרטורת הרוויה לגז שחון.	Q5-Q6

תרגיל

מהי כמות אנרגיית החום שיש לגרוע לצורך הפיכת 10 ק"ג אדי מים בטמפרטורה של 120°C, לקרח בטמפרטורת 20°C-?

להלן, מקדמי חום מורגש Cs, ומקדמי חום כמוס Ci של תהליכים שונים בקרח, מים ואדים:
 Cs=0.46 kcal/kg°C - חימום או קירור אדים של מים
 Cs=1 kcal/kg°C - חימום או קירור מים
 Cs=0.5 kcal/kg°C - חימום או קירור קרח
 Ci=540 kcal/kg - איוד או עיבוי מים
 Ci=80 kcal/kg - התכה או קפאון קרח

יחידות אלו הן לפי התקן האירופאי. ניתן לפתור תרגילים אלו גם במערכת היחידות הבינלאומית SI.

תיאור התהליך:

א. קירור אדי מים מטמפרטורה של 120°C לאדים בטמפרטורה של 100°C

$$Q_1 = m \cdot C_s \cdot \Delta t \rightarrow 10 \text{Kg} \cdot \frac{0.46 \text{ Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{c}} \cdot 20^\circ\text{c} = 92 \text{ Kcal}$$

ב. הפיכת אדים בטמפרטורה של 100°C למים בטמפרטורה של 100°C

$$Q_2 = m \cdot C_i \rightarrow 10 \text{Kg} \cdot \frac{540 \text{ Kcal}}{\text{Kg}} = 5,400 \text{ Kcal}$$

ג. קירור מים מטמפרטורה של 100°C למים בטמפרטורה של 0°C

$$Q_3 = m \cdot C_s \cdot \Delta t \rightarrow \frac{10 \text{Kg} \cdot 1 \text{ Kcal} \cdot 100^\circ\text{c}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{c}} = 1,000 \text{ Kcal}$$

ד. הפיכת מים מטמפרטורה של 0°C לקרח בטמפרטורה של 0°C

$$Q_4 = m \cdot C_i \rightarrow \frac{10 \text{Kg} \cdot 80 \text{ Kcal}}{\text{Kg}} = 800 \text{ Kcal}$$

ה. הקפאת קרח מטמפרטורה של 0°C לקרח בטמפרטורה של 20°C-

$$Q_5 = m \cdot C_s \cdot \Delta t \rightarrow \frac{10 \text{Kg} \cdot 0.5 \text{ Kcal} \cdot 20^\circ\text{c}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{c}} = 100 \text{ Kcal}$$

תשובה: $Q_{total} = 92 + 5,400 + 1,000 + 800 + 100 = 7,392 \text{ Kcal}$

מתרגיל זה, ניתן לראות כי הערך של האנרגיה הנפלטת בשני הקטעים שבהם נדרש שינוי במצב הצבירה של החומר (6200 Kcal), גדול בהרבה מהאנרגיה שהחומר פלט במהלך שלושת הקטעים, שבהם נפלט חום מורגש (1,192 Kcal) מהחומר.

1.3.1 הקשר בין טמפרטורת הרתיחה ללחץ

עם עליית לחץ של חומר עולה גם טמפרטורת הרתיחה שלו וההיפך: עם ירידת לחץ החומר יורדת טמפרטורת הרתיחה שלו. רתיחה = שינוי מצב צבירה מנוזל לגז. זאת בתנאי שהחומר בשני התהליכים הנ"ל לא משנה את נפחו.

1.3.2 ערבוב חומרים בטמפרטורות שונות

במערכות לקירור ולמיזוג אוויר ישנם מצבים רבים שבהם מתערבבים חומרים זהים בכמויות ובטמפרטורות שונות. לדוגמה, אוויר חם הנכנס לחדר ממוזג, מתערבב עם האוויר הקר שבחדר, מים חמים המתערבבים עם מים קרים יותר, ועוד. חישוב טמפרטורת התערובת חשוב ומשפיע על המשך התהליכים.

כדי לחשב את טמפרטורת החומר אחרי הערבוב משתמשים בנוסחה הבאה:

$$T = \frac{m_1 \cdot t_1 + m_2 \cdot t_2}{m_1 + m_2}$$

m_1 - משקל חומר ראשון

t_1 - טמפרטורת חומר ראשון

m_2 - משקל חומר שני

t_2 - טמפרטורת חומר שני

1.3.2.1 התארכות חומרים בהשפעת החום

כמעט כל חומר במצב צבירה מוצק משנה את מידותיו בעליית טמפרטורה. שינוי המידה הינו בתלות במקדם ההתארכות (קוויט/נפחית) של החומר. בתכנון מתקני קירור (צנרת, תעלות, מבנים) יש לקחת בחשבון את השינויים הצפויים כדי למנוע תקלות.

1.3.2.1.1 התפשטות קוויט

נוסחת חישוב תוספת האורך כתוצאה מחימום/קירור:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$$

Δl - תוספת האורך (ס"מ)

α - מקדם התארכות

Δt - השינוי בטמפרטורה ($^{\circ}\text{C}$)

L - אורך התחלתי (ס"מ)

טבלה 1.4 - מקדמי התפשטות קווית

מקדם התפשטות $\alpha(^{\circ}\text{C})^{-1}$	חומר (מוצק)
$15 \cdot 10^{-6}$	קרח
$23.1 \cdot 10^{-6}$	אלומיניום
$20.3 \cdot 10^{-6}$	פליז
$16.5 \cdot 10^{-6}$	נחושת
$12 \cdot 10^{-6}$	פלדה
$1.2-0.8 \cdot 10^{-6}$	בטון
$1.18 \cdot 10^{-6}$	ברזל
$0.9 \cdot 10^{-6}$	זכוכית
$0.32 \cdot 10^{-6}$	פיירקס

1.3.2.1.2 התפשטות נפחית

נוסחת חישוב שינוי הנפח כתוצאה מחימום/קירור:

$$\Delta v = \beta \cdot v \cdot \Delta t$$

Δv - תוספת הנפח

β - מקדם התפשטות

Δt - השינוי בטמפרטורה

V - נפח התחלתי

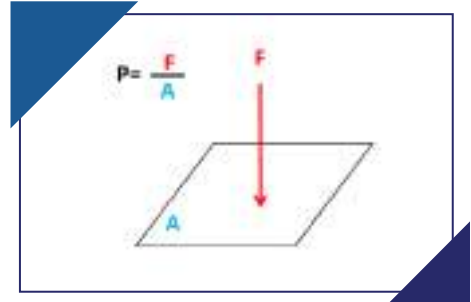
טבלה 1.5 - מקדמי התפשטות נפחית של מים

מקדם התפשטות נפחית $\beta(^{\circ}\text{C})^{-1}$	טמפרטורת המים
$-5 \cdot 10^{-6}$	(1°C)
$0 \cdot 10^{-6}$	(4°C)
$8.8 \cdot 10^{-6}$	(10°C)
$30.3 \cdot 10^{-6}$	(30°C)
$45.7 \cdot 10^{-6}$	(50°C)
$58.2 \cdot 10^{-6}$	(70°C)
$96.5 \cdot 10^{-6}$	(90°C)

1.3.3 לחץ (P)

תמונה 1.11 - לחץ

לחץ הינו מושג בפיזיקה המתאר את היחס בין כוח לבין יחידת השטח עליה הוא מופעל במאונך. לחץ יכול להיות מוגדר גם בתוך חומר, כשהוא פועל בתוך נזלים ובתוך גזים (פלואידים) הנמצאים בכלי/במערכת סגורים. לחץ זה יפעל בצורה שווה על כל דפנות הכלי (חוק פסקל). בקיור ובמיזוג אוויר, מקובל למדוד ולציין את יחידות הלחץ ב-PSI (Pounds Per Square Inch).



1 psi משמעו: משקל של פאונד (ליברה) אחד (כ-453 גרם), הלוחץ על שטח של אינץ' מרובע אחד. ישנן יחידות לחץ נוספות. ראו טבלה 1.6 לצפייה באופן ההמרה בין היחידות השונות.

טבלה 1.6 - המרת לחצים

PSI	מטר מים m h ₂ O	מ"מ כספית mm Hg	אטמוספירה Atm'	ק"ג/סמ"ר Kg/Cm ²	בר bar	1 קילו פסקל K.Pa	
20.9	0.1	7.5	0.987 · 10 ⁻⁵	0.01	0.01	1	1 קילו פסקל K.Pa
14.5	10.2	750	0.987	1.02	1	100	בר 1 bar
14.22	10	736	0.968	1	0.981	0.98	1/cm ²
0.02	0.01	1	0.00132	0.00136	0.00133	0.13	1 מ"מ כספית מ"מ
1.42	1	73.55	0.1	0.1	0.1	9.81	1 מטר מים
1	0.7	51.72	0.07	0.07	0.07	6.89	1 PSI

1.3.3.1 סוגי לחצים

לחץ ברומטרי (לחץ אטמוספרי P_{atm}) - הלחץ שנוצר כתוצאה ממשקל האוויר באטמוספירה של כדור הארץ. הלחץ האטמוספירי הממוצע בגובה פני הים הוא 1 ק"ג/סמ"ר. ככל שעולים לגובה, קטן אורכו של עמוד האוויר, והלחץ הברומטרי קטן בערך של 1 מיליבר לכל 8 מטר. ערכי הלחץ הברומטרי בגובה פני הים: **1 atm = 760 mmHg = 1.013 bar = 1 Kg/Cm²**

תמונה 1.13 - מד לחץ בעל 2 סקלות מדידה



תמונה 1.12 - ברומטר



לחץ שעון (Pg) - לחץ הנמצא בכלי או מערכת סגורים ונמדד באמצעות מד לחץ (מנומטר).
לחץ מוחלט (Pabs) - סכום הלחצים של הלחץ הברומטרי והלחץ הנמדד.
 $P_{abs} = P_{atm} + P_g$

לחץ סטטי (Ps) - לחץ הנוצר על ידי משקל הפלואיד (החומר) כשהוא במצב מנוחה, הפועל במערכת פתוחה או סגורה. הלחץ פועל בכל הכיוונים בצורה שווה, בניצב לדופן (שטח).

לחץ דינמי (Pd) - לחץ הנוצר עקב תנועה של הפלואיד על גבי גוף הניצב במסלול תנועתו. הלחץ הדינמי תלוי בצפיפות החומר הזורם ($\rho - Kg/m^3$) ובמהירות הזרימה ($V - m/sec$). ערכי הלחצים הסטטיים והדינמיים בזרימה במערכת קשורים זה בזה. עם עליית הלחץ הסטטי, יקטן הלחץ הדינמי ולהיפך. הקשר מתבטא בנוסחה הבאה:
 $P_s + P_d = \text{const}$ (ערך קבוע).

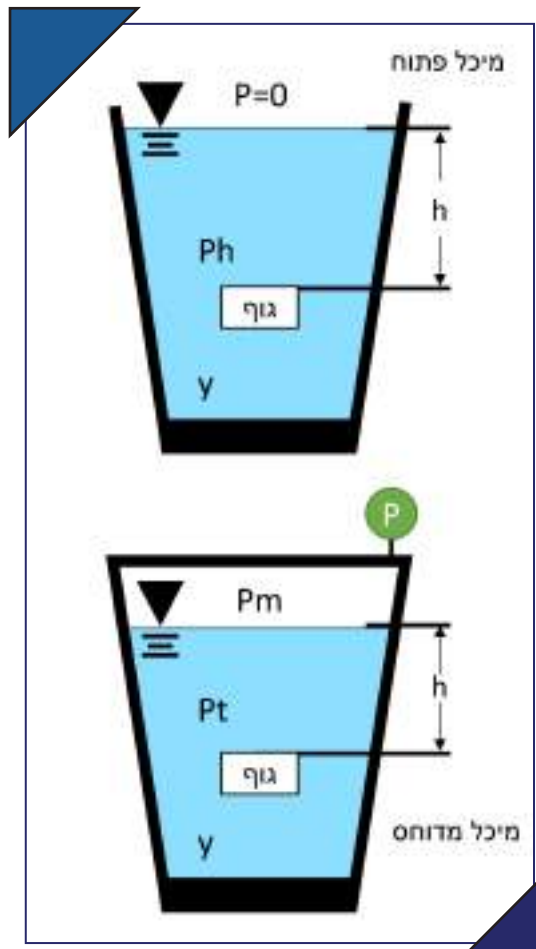
תמונה 1.14 - לחצים הידרוסטטיים במיכלים

לחץ הידרוסטטי - לחץ הנוצר בתוך הנוזל כתוצאה ממשקל הנוזל.

מקרה 1 - לחץ הידרוסטטי על גוף השקוע במיכל פתוח: במיכל פתוח, ערכו של הלחץ ההידרוסטטי יהיה בהתאם לגובה עמוד הנוזל (h) מעל הגוף ולמשקלו הסגולי של הנוזל + הלחץ הברומטרי הפועל על פני הנוזל שבמיכל (P_{atm}).

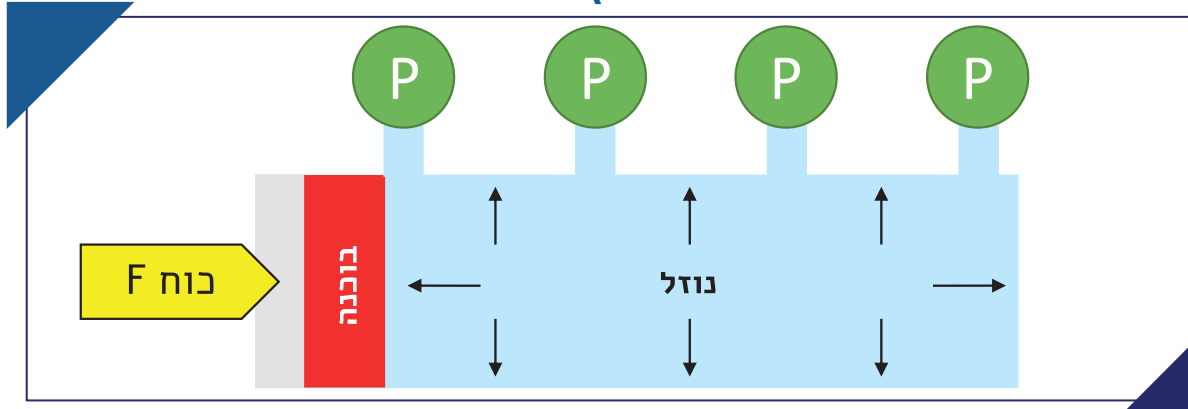
מקרה 2 - לחץ הידרוסטטי במיכל לחץ סגור: במיכל סגור, ערך הלחץ הכללי הפועל על הגוף יהיה שווה ללחץ ההידרוסטטי במיכל פתוח, ובנוסף הלחץ המנומטרי הנמצא מעל הנוזל (P_m).

בעומק זה, הלחץ ההידרוסטטי יהיה שווה בכל נקודה במיכל. לפי חוק פסקל לנוזלים וגזים, לחץ בכלי/במערכת סגורה מתפשט בכל הכיוונים, ופועל בניצב לדופן הכלי.



לחץ הידרואולי - זהו לחץ הנוצר בכלי סגור כתוצאה מהפעלת כוח על הנוזל שבכלי. לפי חוק פסקל, הלחץ יתפשט בצורה שווה ויפעל בניצב לדפנות הכלי.

תמונה 1.15 - לחץ הידראולי



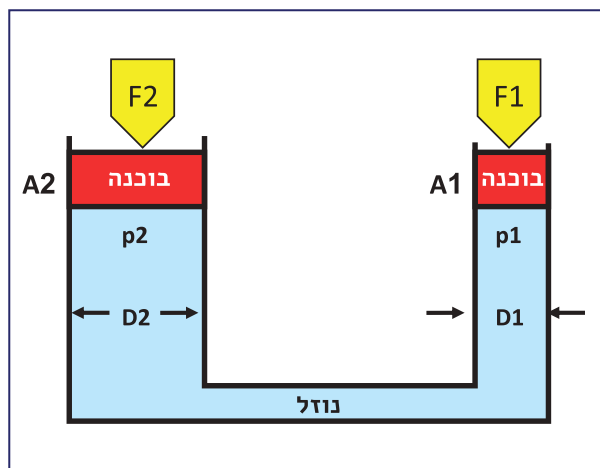
לחץ הידראולי ככוח

הלחץ ההידראולי הנוצר בנוזל (P1) הוא פונקציה של משקל הבוכנה והכוח (F1) שלוחץ על הנוזל.

תמונה 1.16 - לחצים במיכל סגור

$$P = F/A$$

כוח F1 המופעל על הבוכנה הקטנה A1, מזיז כמות קטנה של נוזל לכיוון הבוכנה הגדולה A2. כיוון שכמות הנוזל המגיעה לבוכנה A2 מתחלקת על פני שטח גדול יותר, תנוע זו לאט יותר, לגובה קטן, אך בעוצמת כוח רבה יותר.

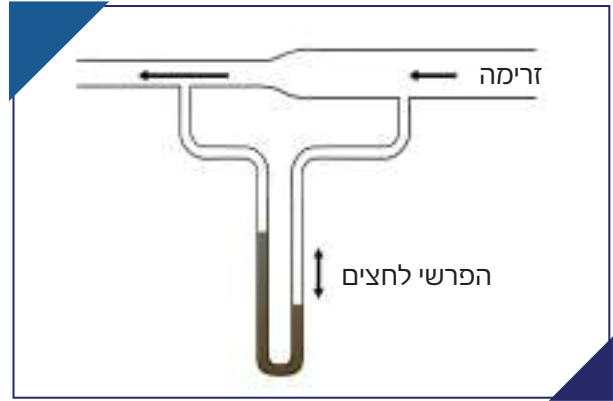


תת-לחץ (ואקום) - זהו מצב המציין לחץ הנמוך מהלחץ האטמוספרי. לחץ הוואקום המוחלט הינו $-1 \text{ k}^{\circ}\text{g}/\text{cm}^2$ או -760 mmHg . במדי הלחץ המכילים ביחידות בריטיות, תחום הוואקום מצוין גם ביחידות -30 inHg (אינץ' כספית).

אפקט ונטורי - אפקט הנוצר במוליך (צינור/תעלה) בעל שטח חתך מתכנס, אשר עקב עיקרון **שימור מסת החומר**, נוצרת בו מהירות זרימה גבוהה הגורמת לירידת הלחץ, ולעתים, אף ליצירת **תת-לחץ**.

אפקט זה משמש, בין היתר, על מנת ליצור יניקת פלואידים (גזים או נוזלים) מאזור שבו הלחץ גבוה יותר, ללא צורך בשימוש במשאבות או במפוחים, בשיטת האינדוקציה, במפזרי אוויר מסוג: **"קורות קורנות"** ואחרים.

תמונה 1.17 - אפקט ונטורי



תמונה 1.18 - קורה קורנת דגם "קסטה"



1.4 חוקי הגזים האידיאליים/הקשר בין הלחץ, הנפח והטמפרטורה

1.4.1 חוק בויל-מריוט - מגדיר את השפעת הלחץ על נפח הגז בטמפרטורה קבועה. ככל שהלחץ הפועל על הגז גדול יותר כך קטן הנפח שהגז יתפוס, ולהיפך. **כלומר, קיים יחס הפוך בין הלחץ לבין נפח הגז.**

$$P \cdot V = K$$

P = הלחץ

V = הנפח

K = מספר קבוע התלוי בסוג הגז

1.4.2 חוק שארל - מגדיר את השפעת הטמפרטורה על נפח הגז בלחץ קבוע. ככל שהטמפרטורה עולה כך גם לחץ הגז שואף לעלות. כדי לשמור על לחץ קבוע, הנפח שהגז תופס גדל. **כלומר, קיים יחס ישר בין הטמפרטורה לבין נפח הגז.**

$$\frac{V}{T} = \text{const}'$$

1.4.3 חוק גה-ליסאק - קובע שעבור גז שנמצא בנפח קבוע V , הלחץ P והטמפרטורה T נמצאים ביחס ישר, כלומר: בגז שתופס נפח קבוע, ככל שנחמם אותו יותר כך יגדל הלחץ שלו ולהיפך.

$$\frac{P}{T} = \text{const}' \quad \text{או} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

1.4.4 משוואה המצב של הגזים האידיאליים - משוואה המאחדת את שלושת חוקי הגזים המפורטים מעלה.

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

הערה: בכל המשוואות והנוסחאות התרמודינמיות משתמשים בערכים מוחלטים. כלומר: לחצים יהיו לחץ מוחלט (Pabs) וטמפרטורות יצינו בערכי מעלות קלווין $^{\circ}K$ (תקן בינלאומי) או מעלות רנקין $^{\circ}R$ (תקן בריטי).

1.5 זרימה וספיקה

במערכות הקירור ומיזוג האוויר, מזרימים כל הזמן את חומרי הקירור (קררים, אוויר ומים) דרך צנרת, תעלות ופתחי אוויר. כדי לחשב את המידות לצורך תכנון מוקדם של התעלות, הצנרת, המשאבות והמפוחים, יש להשתמש בתקנים מטה ובנוסחת חישוב ספיקה נפחית:

1.5.1 מהירות זרימה - הזמן שגוף עובר לאורך דרך. המהירות נמדדת ביחידות לפי:
התקן הבינלאומי - יחידות של: ק"מ בשעה (Km/h), מטר בדקה (m/min), מטר בשנייה (m/sec).
התקן האמריקאי - יחידות של: מיל לשעה (MPH), רגל לשנייה (FPS), רגל לדקה (FPM).

המרות

FPM	FPS	m/sec
197	3.28	1

תמונה 1.20 - מד מהירות זרימה/ספיקה לנוזלים



תמונה 1.19 - מכשיר למדידת מהירות זרימת אוויר



1.5.2 ספיקה נפחית - כמות של נוזל או גז העובר דרך שטח חתך נתון ביחידת זמן. כדי להפוך מהירות לספיקה, יש לכפול את מהירות הזרימה בשטח פני התעלה/צינור לפי הנוסחה הבאה:

$$M^3/min = M/min \cdot M^2$$

הסבר: ספיקה נפחית = מהירות זרימה X שטח חתך תעלה / צינור

לדוגמה: בתעלת פח במידות 20 ס"מ X 30 ס"מ, מזרם אוויר במהירות של 500 רגל בדקה (FPM). מהי כמות האוויר המסופקת לחלל הממוזג ביחידות מ"ק לדקה וביחידות רגל מעוקב לדקה (CFM)?

שלבי הפתרון:

שלב א' - חישוב שטח חתך התעלה (A) -
 1. המרת יחידות אורך מס"מ למטר $20 \text{ ס"מ} = 0.2 \text{ מטר}$, $30 \text{ ס"מ} = 0.3 \text{ מטר}$.

מטר	רגל (tf')	מטר ² (מ"ר)	רגל ² (tf' ²)	מטר ³ (מ"ק)	רגל ³ (tf' ³)
מטר	3.28	-	-	-	-
רגל (tf')	1	-	-	-	-
מטר ² (מ"ר)	0.3	1	10.76	-	-
רגל ² (tf' ²)	-	0.093	1	-	-
מטר ³ (מ"ק)	-	-	-	1	35.3
רגל ³ (tf' ³)	-	-	-	-	1

2. חישוב שטח במ"ר: $0.06 \text{ מ"ר} = 0.3 \times 0.2$

3. המרה ל ft^2 : $0.06 \times 10.76 = 0.645 \text{ Ft}^2$

שלב ב' - חישוב ספיקה (ר"ק/דקה): $0.64 \times 500 = 322.5 \text{ cfm}$

המרה ל מ"ק/דקה: $322.5 : 35.5 = 9.08 \text{ m}^3/\text{min}$

ספיקת האוויר שווה לשטח חתך התעלה כפול מהירות האוויר.
 יש לשמור על אותה מערכת יחידות.

טבלה 1.7 - יחידות ספיקה שימושיות נוספות והמרתן

Gallon/min	Ft ³ /min	M3/h	Litter/min	
0.26	0.04	0.06	-----	Litter/min
264.2	$1.35 \cdot 10^{-5}$	-----	16.7	M3/h
7.48	-----	1.7	28.32	Ft ³ /min
-----	0.13	0.23	3.79	Gallon/min

שאלות סיכום

1. חומר מבודד הוא חומר:

- א. בעל מקדם מעבר חום גדול
- ב. משולב במתכת
- ג. בעל מקדם מעבר חום קטן
- ד. משמש לאיטום חלונות

2. בחישוב כמות חום העוברת דרך קירות, יש:

- א. להתחשב בהפרשי הטמפרטורה משני צדי הקיר
- ב. להכפיל הפרשי טמפרטורות במקדם ההתפשטות המרחבית של הקיר
- ג. להתחשב בעומס החום הנפלט מהאנשים הנמצאים בחדר
- ד. לחשב את שטח החדר

3. הערך של הטמפרטורה בנקודת ה"אפס המוחלט" הוא:

- א. -273°K
- ב. 0°F
- ג. 32°F
- ד. -273°C

4. כשמפשירים קרח בטמפרטורה 0°C למים בטמפרטורה 0°C :

- א. מוסיפים לקרח חום מורגש
- ב. מוסיפים לקרח חום כמוס
- ג. גורעים מהקרח חום מורגש
- ד. גורעים מהקרח חום כמוס

5. לחץ מוחלט הוא:

- א. סכום הלחצים הסטטיים והדינמיים
- ב. סכום הלחץ המנומטרי והלחץ הברומטרי
- ג. ההפרש בין הלחץ המנומטרי והלחץ הברומטרי
- ד. מכפלת הלחצים הסטטיים והדינמיים

6. נתונים שני מיכלי מים בנפח ובגובה זהים. מיכל מס' 1 הוא מיכל בעל מכסה סגור, מיכל מס'

2 הוא ללא מכסה. למיכלים מחובר מד לחץ במפלס הקרקעית. באיזה מהמיכלים יראה מד

הלחץ לחץ גבוה יותר, ומדוע?

- א. הלחץ שיימדד בשני המיכלים יהיה זהה מכיוון שהגובה זהה
- ב. הלחץ שיימדד בשני המיכלים יהיה זהה מכיוון שהנפח זהה
- ג. במיכל הפתוח הלחץ יהיה גדול יותר
- ד. במיכל הסגור הלחץ יהיה גדול יותר

7. במחליף חום מסוג "קורה קורנת", יניקת האוויר החם מהחדר לכיוון הסוללה נעשית על ידי:
- הזרמת אוויר דרך נחיר צר, ואפקט "ונטורי" הגורם לירידת הלחץ הסטטי ליד הקורה.
 - הקטנת שטח סוללת הקירור והקטנת מהירות הזרימה.
 - הזרמת אוויר דרך נחיר צר, ואפקט "ונטורי" הגורם לירידת הלחץ הדינמי ליד הקורה.
 - הגדלת שטח סוללת הקירור והקטנת מהירות הזרימה.
8. במיכל סגור בנפח של 30 ליטר, הנמצא בטמפרטורה של 25°C , נמדד לחץ של 2 בר. עם חימום המיכל לטמפרטורה של 50°C , יש להניח כי:
- הלחץ במיכל יגדל
 - נפח המיכל יגדל ל-60 ליטר
 - יהיה שינוי בנפח ובלחץ
 - לא יהיה שינוי בנפח ובלחץ

תשובות לשאלות

שאלה מס'	תשובה
1	ג
2	א
3	א
4	ב
5	ב
6	ג
7	א
8	א

פרק 2: תורת הקירור

2.1 מבוא

בפרק זה נבין את אופן פעולת מעגל הקירור הבסיסי, בהסתמך על הנושאים שלמדנו בפרק הראשון.

המעגל הבסיסי הוא מערכת הכוללת את מספר האיברים המינימלי הדרוש לצורך קיום פעולת הקירור. בפרק זה נכיר את רכיבי מערכת הקירור ואת אופן פעולתה. בפרקים הבאים יוסברו בהרחבה מבנה ואופן פעולתם של רכיבי מערכת נוספים.

מערכות הקירור נמצאות בכל אשר נפנה:

- במתקני קירור ביתיים (מקררים, מקפיאים ומתקני קירור מים).
- במקררים מסחריים הנמצאים בחנויות ובמרכולים.
- במתקני קירור תעשייתיים גדולים, כמו: חדרי קירור והקפאה הנמצאים במפעלי מזון מכל הסוגים, מתקנים לקירור תהליכים כימיים ועוד.

אותה המערכת בדיוק משמשת אותנו גם לצורך הפעלת מערכות מיזוג אוויר, החל ממזגנים ביתיים וכלה במערכות מיזוג גדולות המשמשות לקירור או לחימום האוויר בקניונים ובבתי משרדים.

מחזור הפועל בשיטת דחיסת אדים {Vapor-Compression Refrigeration System} (VCRS): במחזור קירור זה, הקרר {Refrigerant}, שהוא החומר הזורם במערכת ומבצע את פעולת הקירור, עובר תהליכים תרמו-דינמיים של שינויי לחץ, טמפרטורה ומצבי צבירה, מגז לנוזל ולהיפך.

בנוסף, קיימים מחזורי קירור נוספים, כגון: קירור בשיטת ספיגה (Absorption Systems), אותם נזכיר בהרחבה בהמשך.

תפקידה של מערכת הקירור הוא לסלק חום מחומרים שונים כגון אוויר או מים, וזאת בכדי להשיג את המטרות הבאות:

א. בקירור האוויר:

1. יצירת תנאי נוחות במקום הממוזג.
2. קליטת חום ממוצרים שאנו רוצים לקרר בחדרי קירור.

ב. בקירור המים:

3. העברת מים קרים למטרת קירור מוצרים ומכונות.
4. העברת מים קרים למחליפי חום במערכות מיזוג אוויר גדולות.

ניתן להגדיר את פעולת מערכת הקירור כפעולה של **שאיבת חום (Heat Pump System)** ממקומות או מחומרים חמים שם הוא אינו רצוי, והעברתו למקום שבו הוא אינו מפריע לנו. בכל המקרים, נשאר עיקרון פעולת מערכת הקירור זהה, והשוני מתבטא בחומר שממנו אנו שואבים את החום, ו/או החומר שאליו אנו פולטים את החום ששאבנו.

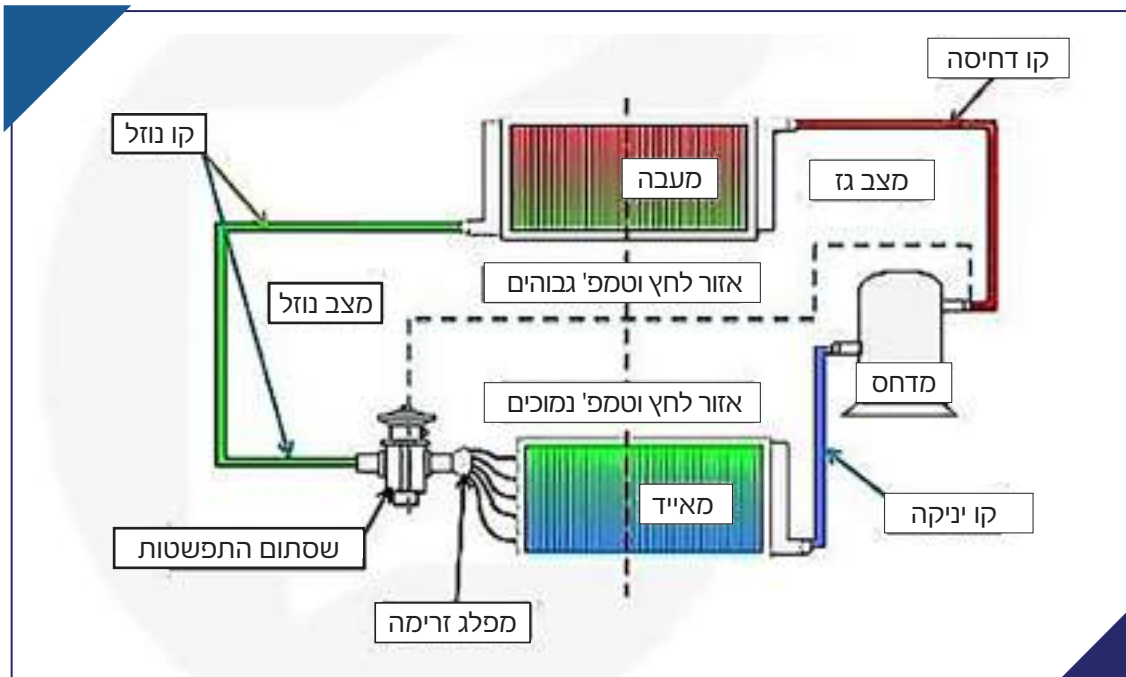
2.2 עיקרון פעולת המערכת כמשאבת חום

2.2.1 מערכת בהתפשטות ישירה (DX System)

המערכת המתוארת בתמונה 2.1, היא מערכת שבה פעולת קליטת החום וסילוקו נעשים ישירות על ידי הקרר, באמצעות מחליפי חום המטפלים ישירות בחומר המקורר (אוויר, מים, מוצר וכו') ופולטים את החום מצד שני לאוויר הסביבה, בדומה לתהליך המתבצע במקררים ובמזגנים ביתיים.

- תהליך זרימת הקרר בין רכיבי מערכת הקירור, נעשה באמצעות צנרת המחברת את מרכיבי המערכת. התהליך הינו מחזורי, כלומר הקרר הזורם במערכת הסגורה, חוזר על פעולת קליטת החום (במאייד) ופליטתו (במעבה) מספר רב של פעמים.
- תפוקת הקירור של המערכת, שהיא כמות אנרגיית החום שהקרר מסוגל לקלוט ולפלוט ביחידת זמן (המקובל הוא למדוד את התפוקה ביחידות אנרגיה לשעה), נקבעת בהתאם לנפח הקרר שהמדחס יונק ותלויה במשקלו הסגולי.

תמונה 2.1 - רכיבי מעגל הקירור הבסיסי



2.2.1.1 תהליך קליטת החום במאייד

המאייד הינו מחליף חום העשוי מצינורות או מלוחות מתכת בעלי מקדם מעבר חום גבוה, שנועד להקל על מעבר אנרגיית החום מהאזור המקורר אל הקרר הזורם בו. כדי להשיג החלפת חום טובה, **הלחץ** במאייד יהיה נמוך, בכדי להביא לירידת הטמפרטורה של הקרר הזורם במאייד.

הפרש הטמפרטורה המקובל במערכות הקירור בין חומר הקירור שבתוך הצנרת לחומר שאנו רוצים לקרר, הינו כ- 6°C עד 8°C .

לחץ האיזוד המתאים לקבלת טמפרטורות אלו, משתנה בהתאם לסוג הקרר הזורם במערכת, כאשר סוג הקרר המתאים לקבלת תנאים אלו משתנה בהתאם לסוג המערכת ולייעודה.

לדוגמה: קררים מסוג R-410A או R-32, יתאימו לשימוש במערכות בעלות טמפרטורות איוד גבוהות **שמעל ל-0°C** (מזגני אוויר, קירור מוצרי חלב וכו'), ואילו במערכות המיועדות לפעול בטמפרטורות **נמוכות מ-0°C**, נשתמש בקררים מסוג R-134A, R-290 ו-R-600a (מקררים, מקפיאים וכו').

על מנת להוציא כמות אנרגיית חום גדולה ככל האפשר מהאזור המקורר, אנו מנצלים את העיקרון הפיזיקלי שלפיו בעת שינוי מצב צבירה של חומר, הוא פולט או קולט כמויות חום גדולות במיוחד.

- הלחץ הנמוך שנוצר במאייד אחרי אביזר ההתפשטות, גורם הן לירידת הטמפרטורה של הקרר הנכנס למאייד והן לירידת טמפרטורת הרתיחה של הקרר עד לנקודה שבה הוא מסוגל לשנות את מצב צבירתו ולהפוך מנוזל לגז (להתאייד) גם בטמפרטורה נמוכה.
- איוד הקרר במאייד גורם למעבר אנרגיית חום כמוס, שערכה גבוה לאין שיעור מאנרגיית החום המורגש שייקלט על ידי הקרר שבמאייד בגלל הפרשי הטמפרטורה.
- גודלה הפיזי של סוללת המאייד נקבע על פי הדרוש כדי להבטיח את השלמת תהליך האיוד של הקרר במאייד, וכדי לאפשר לקרר להתחמם לטמפרטורה גבוהה יותר מטמפרטורת האיוד (חום שיחון). במטרה לשמור על מצבו של הקרר כגז במהלך זרימתו מיציאת המאייד אל יניקת המדחס.

2.2.1.2 קו היניקה

קו היניקה מחבר בין יציאת המאייד ליניקת המדחס.

קוטרו הגדול של קו היניקה:

- מאפשר את המעבר החופשי של גז הקירור הנמצא בלחץ נמוך, מן המאייד אל המדחס.
- מונע עליית לחץ אפשרית של הקרר בקו היניקה ואת האפשרות לעיבוי חוזר וכניסת נוזל ליניקת המדחס, דבר העלול לגרום לנזק מכני בלתי הפיך למדחס.

2.2.1.3 התהליך במדחס

המדחס הינו מערכת מכנית, שלרוב מונעת באנרגיה חשמלית.

- המדחס יונק גז בלחץ ובטמפרטורה נמוכים מאוד. ערכי הטמפרטורה וערכי הלחץ משתנים ממערכת למערכת בהתאם לסוג הקרר ולטמפרטורת העבודה של המאייד, אשר תלויה בטמפרטורה הנדרשת בחלל המקורר.
- למרות שניתן למצוא מדחסים המסוגלים לעבוד עם מספר קררים בעלי תכונות דומות, בדרך כלל המדחס מיועד לעבודה עם **קרר מסוים**, כאשר שינוי בסוג הקרר יגרום בדרך כלל לירידה בתפוקת המדחס, לעומס יתר על המנוע או לבעיה אחרת.
- תפקיד המדחס במעגל הקירור הינו לינוק את הקרר מקו היניקה, ולהוסיף לו תוך כדי דחיסתו את אנרגיית הלחץ והטמפרטורה שיאפשרו לקרר להשלים את מחזור הקירור בשלמותו. לחץ וטמפרטורת הקרר הדחוס היוצא מהמדחס לקו הדחיסה ולמעבה, משתנים בהתאם ל: סוג הקרר, טמפרטורת הסביבה, ואנרגיית החום שהתווספה לקרר (חום מורגש) בתהליך הדחיסה בהתאם לסוג המדחס.
- **המדחס** הינו הרכיב היחיד **שצורך אנרגיה חשמלית** מתוך 4 הרכיבים הבסיסיים. תהליך הדחיסה של הקרר במדחס מוסיף לקרר אנרגיית לחץ וחום, זאת במטרה להביא את הקרר לטמפרטורה גבוהה יותר מטמפרטורת הסביבה, ועל ידי כך תתאפשר פליטת חום מהמעבה.

- מאחר שהמדחס הוא הרכיב העיקרי של המערכת, הצורך אנרגיה לצורך פעולתו, פעולו יצרניות המדחסים בשנים האחרונות במטרה להגדיל את יעילות פעולת המדחס (נצילות המדחס) ובכדי להביא להגדלת התפוקה התרמית שלו, במקביל להקטנת גודל המנוע החשמלי המפעיל אותו.

הגדלת מקדם ביצוע המדחס התאפשרה בזכות פיתוח קררים הפועלים בלחצי דחיסה נמוכים יותר, הגדלת לחץ וטמפרטורות היניקה והגדלת מקדם ביצוע המנוע החשמלי. על סוגי המדחסים השונים ואופי פעולתם נרחיב בהמשך, בפרק המדחסים (פרק 4).

2.2.1.4 קו הדחיסה

בצינור המחבר את קו הדחיסה של המדחס עם מחליף החום החיצוני (המעבה), נמדדים הלחץ והטמפרטורה הגבוהים ביותר במערכת. כדי לשמור על ערכים אלו ולאפשר לקרר לזרום לכיוון המעבה מבלי לאבד מהלחץ הדרוש לפעולה תקינה של המעבה, קוטר קו הדחיסה יהיה קטן יחסית.

2.2.1.5 המעבה

המעבה הינו מחליף חום, העשוי מצינורות או לוחות בעלי מקדם העברת חום גבוה, כמו נחושת או ברזל. **במעבה מתבצעת החלפת חום בין הקרר החם לאזור הסובב אותו (אוויר הסביבה).**

- מאחר שהמעבה צריך לפלוט כמות גדולה של חום, הן את החום שנקלט במאייד והן את החום שהתווסף בפעולת הדחיסה, ינוצל כאן האפקט התרמי של פליטת כמויות חום גדולות בעת תהליך שינוי מצב הצבירה של הקרר מגז לנוזל.
- תהליך הפיכתו של הקרר במעבה מגז חם בלחץ גבוה לנוזל, מתאפשר בשל העובדה שהגדלת הלחץ מעלה את טמפרטורת הרתיחה של הקרר לטמפרטורה מעל טמפרטורת הסביבה, כך שהזרמת אוויר הסביבה הנמצא בטמפרטורה נמוכה יותר, מקררת את המעבה וגורמת לקרר להתעבות מגז לנוזל.
- בניגוד לפעולת המאייד, המתבצעת בתנאי טמפרטורה קבועים ובסביבת עבודה נקייה, פעולת המעבה ויעילותו מושפעים מתנאים המשתנים לעיתים תכופות, כגון: טמפרטורות אוויר הסביבה (פעולה בקיץ, בחורף ובעונות המעבר) או כמויות הזיהום באוויר, המורידות את יעילות החלפת החום של סוללת המעבה (אבק, בוץ ושומנים).
- כדי לשמור על לחץ עיבוי תקין בכל ימות השנה, אנו נדרשים לשמור על:
 - בחורף (בעיקר): שמירה על לחצים מינימליים המאפשרים עיבוי של הקרר.
 - בקיץ: מניעה של עליית לחצים עקב התחממות הסביבה.
- כמו כן, בכל עונות השנה יש להקפיד על ניקיון המעבה כדי למנוע ירידה בכושרו לבצע החלפת חום ולגרום עקב כך להגדלת העומס על המדחס.

2.2.1.6 קו הנוזל

- כאמור, מהמעבה יוצא הקרר במצב צבירה נוזלי. הצינור המחבר את יציאת המעבה לאביזר ההתפשטות (שובר הלחץ) נקרא קו הנוזל:
- תפקידו של קו הנוזל הוא להביא את הקרר לאביזר ההתפשטות כשהוא במצב צבירה נוזלי.
 - לפיכך, קוטר קו הנוזל, מיקומו או אופן התקנתו, יכולים לגרום לשינוי במצב הקרר העובר בו, וכפועל יוצא גם לגרום לפגיעה חמורה בתפוקת מערכת הקירור.
 - מבין קווי הצנרת שבמערכת הקירור, קוטרו של קו הנוזל תמיד יהיה קטן מקוטר קו היניקה, וקטן או שווה לקוטר קו הדחיסה.

התקנתו ומבנהו של קו הנוזל חייבים להבטיח:

- א. **שמירה על לחץ גבוה בקו הנוזל, כדי למנוע איוד עצמי של הקרר הנוזלי (Flash-gas)**
תופעת האיוד העצמי נגרמת בגלל ירידת הלחץ (וכניסה לתחום הרוויה) בנוזל הנמצא בטמפרטורות גבוהות. כתוצאה מכך, החומר מנצל את החום העצמי שבו כדי לרתוח ולהפוך בצורה ספונטנית מנוזל לגז.
איוד ספונטני יביא לאספקת קרר שחלקו במצב גז לאביזר ההתפשטות, ולירידה בתפוקת המערכת.
- ב. **שמירה על לחץ גבוה בקו הנוזל לפני אביזר ההתפשטות**
פעולה יעילה של אביזר ההתפשטות (עליו נרחיב בהמשך בפרק 5) תלויה ביצירת הפרש לחצים על האביזר. נפילת הלחץ בקו הנוזל לפני האביזר, תגרום להקטנת הפרש הלחצים על האביזר ולירידה בתפוקת הקירור של המערכת.

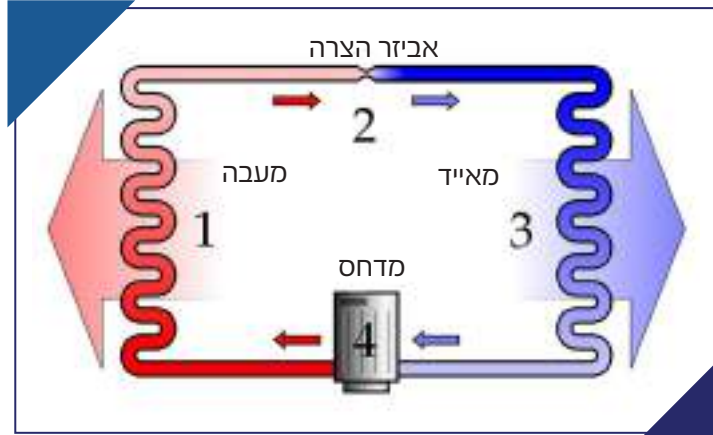
כדי למנוע תקלות מעין אלה, על קו הנוזל להיות בעל קוטר קטן ככל האפשר, לעבור במסלול קצר ככל האפשר וללא כיפופים ופיתולים רבים ולהיות מבודד בקטעים העוברים במקומות קרים (בעת מעבר בחדרי הקירור/הקפאה).

2.2.1.7 אביזר ההתפשטות (שובר לחץ)

- אביזר זה מפריד בין אזור הלחץ הגבוה (לחץ העיבוי) לאזור הלחץ הנמוך (לחץ האיוד).
 - תפקידו לגרום למפל לחץ בנוזל שבקו הנוזל וליצור תהליך שיאפשר רתיחה חלקית של הנוזל אחרי השסתום בקו הנוזל בכניסה למאייד. כתוצאה מרתיחת חלק מהנוזל, נגרעת מהנוזל כמות חום גדולה (חום כמוס), דבר שמביא לירידת הטמפרטורה וקירור הנוזל הנכנס למאייד לטמפרטורה הרצויה.
- קיימים מספר סוגים של אביזרי התפשטות, שעליהם נרחיב בפרק 5 העוסק באביזרי התפשטות.

תמונה 2.2 - מחזור הקירור

- כאמור, תהליך הקירור הינו תהליך מחזורי, ולכן, עם כניסת הנוזל הקר למאייד, הוא משלים בעצם מחזור אחד של תהליך הקירור ומחזיר את הקרר לנקודה [המפורטת בראשית הפרק](#), בה תיארו את התחלת התהליך במאייד.
- התהליך המחזורי משיך "להסיע" את החום מהחלל המקורר אל מחוצה לו וחוזר חלילה, עד להפסקת פעולת המערכת.



- כמות החום "הנשאבת" מהחלל/החומר המקורר, תלויה בספיקה המסית של הקרר. לכן:
- במערכות שבהן המדחס הינו בעל מהירות סיבוב קבועה, תפוקת הקירור לא תשתנה במשך כל זמן פעולת המערכת.
 - במערכות שבהן מהירות סיבוב המדחס ניתנת לשינוי (מדחסי אינוורטר), תפוקת הקירור תשתנה כתלות במהירות סיבוב המדחס, וביחס ישר לכמות הקרר המשקלית (ספיקה מסית) שמסחרר המדחס במערכת.

את מצב הקרר והתנאים הפיסיקליים (לחץ וטמפרטורה) שבהם הוא נמצא בכל נקודה במערכת, ניתן להציג על גבי **דיאגרמת לחץ-אנטלפיה (גרף מולייר)**, הייחודית לכל סוג של קרר.

2.3 דיאגרמת לחץ-אנטלפיה (גרף מולייר)

2.3.1 כללי

- דיאגרמה זו ידועה גם בשם "**גרף מולייר**", להצגת של פעולת מערכת הקירור במצביה השונים (פאזות שונות) בהתייחס למצבו של הקרר, כגון: מצב צבירה, טמפרטורה, לחץ, אנטלפיה, נפח וצפיפות (משקל סגולי).
1. תפקיד דיאגרמת לחץ אנטלפיה הוא לתאר פאזות של חומר אחיד או תערובת של חומרים, כתלות בריכוז של כל אחד מהמרכיבים.
 2. לכל סוג קרר קיימת דיאגרמה "אישית" המשקפת את נתוני החומר בנפרד, או כתערובת/תרכובת של חומרים המרכיבים את חומר הקירור.

כאנשי קירור ומיזוג, אנו משתמשים בדיאגרמה זו כדי:

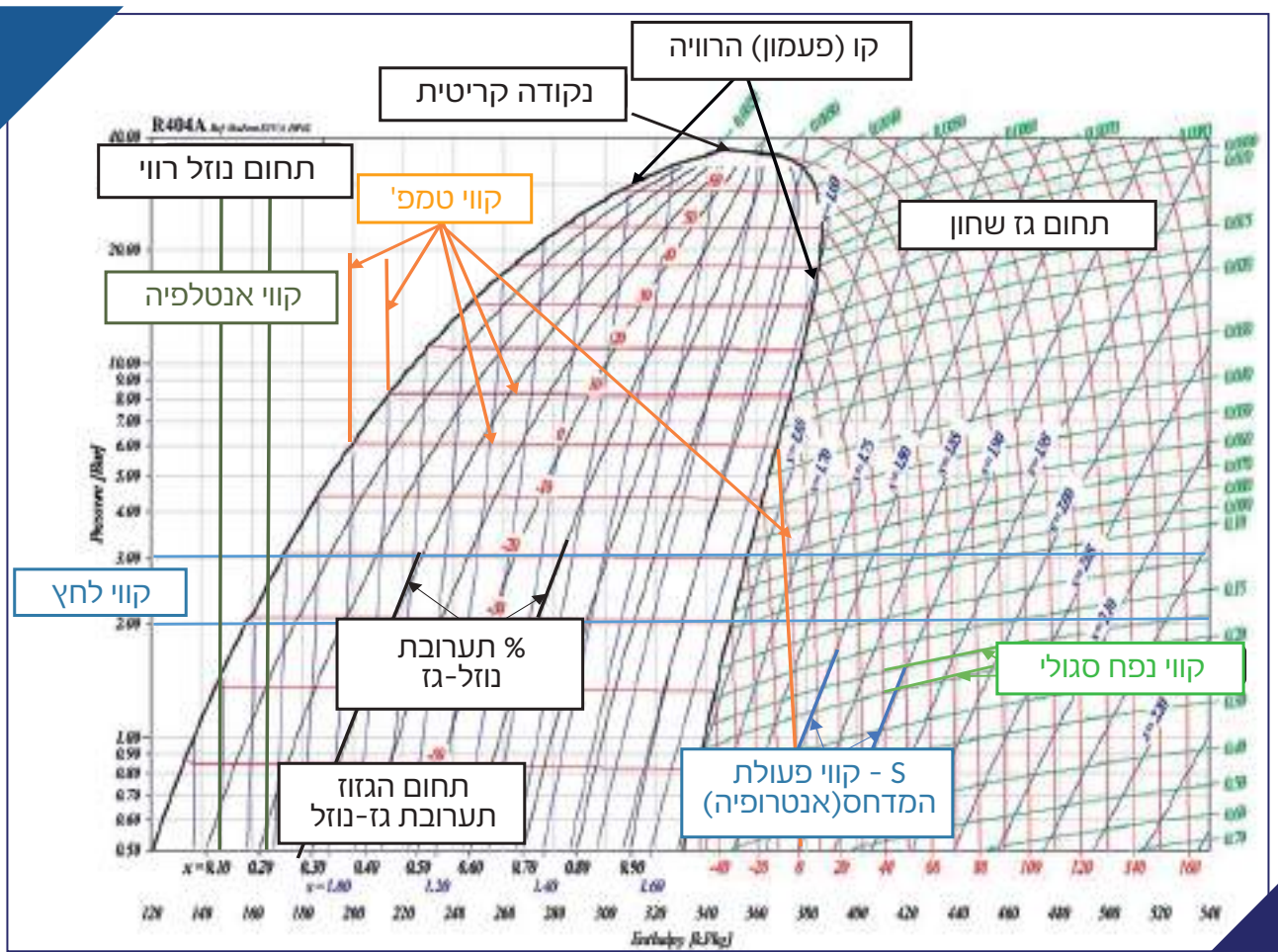
א. לתכנן מערכות, על ידי "בניית" מחזור תיאורטי ועל פי נתונים שקבענו מראש (טמפרטורת אידוד, טמפרטורת עיבוי), במטרה לקבל מידע על הנתונים הפיזיקליים של חומר הקירור הנבחר לשימוש במערכת, בכל נקודה במחזור הקירור. הדבר יאפשר את חישובי כמויות החום במאייד או במעבה, כמו גם לחצי עבודה נדרשים ועוד, כדי לתכנן או לבחור את רכיבי המערכת למטרת בניית מחזור קירור תיאורטי, וגם לצורך תכנון אב טיפוס המערכת, הרצתה ובדיקתה.

ב. לבדוק את תקינות המערכת ויעילות אביזריה לאחר הפעלתה, או לאתר תקלות במערכת על ידי קריאה בשטח של נתוני המערכת ומרכיביה, הצבתם על גבי הדיאגרמה לצורך השוואה עם הנתונים על פי התכנון הראשוני, וכך לאתר את נקודות הכשל ולאפשר תיקון ופתרון בעיות בזמן קצר ובעלות נמוכה.

2.3.2 מבנה הדיאגרמה ומרכיביה

ניתן למצוא דיאגרמות לחץ-אנטלפיה גם ביחידות שבתקן SI וגם ביחידות בריטיות. אנחנו נתמקד בדיאגרמות שהנתונים שלהן הם ביחידות SI. הדיאגרמה בתמונה מספר 2.3 הינה דיאגרמה ייחודית לקרר מסוג HFC R-404a, שנעשה בו שימוש במתקני קירור לטמפרטורות בינוניות ונמוכות.

תמונה 2.3 - דיאגרמת לחץ-אנטלפיה



2.3.2.1 הפרמטרים המצוינים בדיאגרמה

א. פעמון (קו) הרוויה:

כפי שהוסבר בפרק הקודם, **קו הרוויה** הינו קו דמיוני שמפריד בדיאגרמת הפאזות של החומר, בין תחום הנוזל והגז. בכל נקודה הנמצאת על קו הרוויה יכול להתחיל או להסתיים תהליך של שינוי מצב צבירה.

כל נקודה על קווי הרוויה מציינת השקה בין הלחץ שבו נמצא החומר לבין הטמפרטורה שלו. מאחר ושינוי במצב צבירה הוא תהליך הדרגתי, וכדי שאפשר יהיה לאמוד את כמויות הגז והנוזל בחומר בכל נקודה בתהליך, "הרחיבו" את קו הרוויה **לצורה הדומה לפעמון**, וחילקו את התחום באמצעות קווים המציינים ב- % את כמות מרכיב הגז בתערובת, כאשר החלוקה היא ל-10 תחומי משנה.

הערה: תהליך מהיר של שינוי מצב מנוזל לגז נקרא רתיחה, בעוד שאיזוד הינו תהליך הדרגתי ואיטי יותר.

ב. נקודה קריטית (Critical Point) היא מונח תרמודינמי המתאר נקודה במרחב פיזיקלי של

לחץ, נפח וטמפרטורה, שבה מתרחשת תופעה של טשטוש במצבי צבירה בין נוזלים ואדים.

- במהלך חימום של נוזל הנתון בלחץ קריטי, הגבול בין פאזת הנוזל ופאזת הגז (אדים) "נמחק".

- צפיפות הנוזל פוחתת וצפיפות הגז עולה.

בהמשך התהליך, כאשר הטמפרטורה ממשיכה לעלות ומגיעה לערך מסוים, צפיפות שתי הפאזות משתווה, ומתקבלת פאזה אחת הנקראת "**זורם (Fluid)**". הלחץ, הנפח והטמפרטורה בנקודה קריטית זו נקראים בהתאמה: **לחץ קריטי, נפח קריטי וטמפרטורה קריטית.**

- תהליך המתבצע בחומרים המצויים בתנאים של לחץ וטמפרטורה **הגבוהים** מהתנאים הקריטיים, נקרא תהליך **על-קריטי (Trans-critical)**.

- תהליך המתבצע בתנאים של לחץ וטמפרטורה **הנמוכים** מהתנאים הקריטיים, נקרא תהליך **תת-קריטי (Sub-Critical)**.

ג. **טמפרטורת רוויה (טמפרטורת מעבר) -** הטמפרטורה שבה מתבצע תהליך רתיחה (איזוד או עיבוי) של החומר.

- **איזוד נגרם** כשמוסיפים אנרגיית חום כמוס לחומר (פעולת חימום).

- **עיבוי מתבצע** כאשר גורעים אנרגיית חום כמוס מהחומר (פעולת קירור).

ניתן לשנות את מצב הצבירה של כל חומר, על ידי שינוי הלחץ או הטמפרטורה. שינוי הלחץ גורם לשינוי הטמפרטורה של החומר, ובנקודה מסוימת כשטמפרטורת הרוויה משתווה לטמפרטורת החומר, יכול החומר לשנות את מצבו.

ד. **לחץ רוויה -** כמוסבר לעיל, שינוי של טמפרטורת החומר יביא את החומר למצב שבו בלחץ

מסוים, יתבצע הליך שינוי מצב צבירה. הגדלת הלחץ תגרום לאיזוד בטמפרטורות גבוהות יותר, בעוד הקטנת הלחץ תגרום להתחלת תהליך העיבוי בטמפרטורות נמוכות יותר.

ה. **גז שחון** - חומר המוגדר כגז שחון הינו חומר במצב צבירה גז, הנמצא בטמפרטורה הגבוהה מטמפרטורת הרוויה שלו בלחץ מסוים. חומר שחון יצטרך לעבור תהליך קירור (סילוק חום מורגש) כדי להגיע לטמפרטורת הרוויה (במקרה זה, טמפרטורת "העיבוי"), בה יוכל להתחיל להפוך לנוזל. כמות החום המורגש שיהיה עלינו לסלק כדי להגיע לקו הרוויה, תלויה בהפרש שבין טמפרטורת הגז לטמפרטורת הרוויה באותו הלחץ.

ו. **נוזל רווי** - מוגדר כנוזל הנמצא בטמפרטורה נמוכה מטמפרטורת הרוויה שלו באותו הלחץ.

ז. **תחום הגזז (תערובת גז-נוזל)** - בתחום זה החומר נמצא בהליכי שינוי ממצב גז לנוזל (עיבוי) וממצב נוזל לגז (איוד).

בעת המעבר של הקרר בתחום הגזז, הוא הופך מגז לנוזל (במעבה) או מנוזל לגז (במאייד), תוך פליטה או קליטה של חום כמוס בלבד, תהליך שכידוע אינו גורם לשינוי טמפרטורה. תחום תערובת הגז-נוזל שבין קווי הרוויה של הפעמון, הינו **התחום היחיד** בדיאגרמת לחץ-אנטלפיה שבו קווי הלחץ והטמפרטורה חופפים.

ח. **אנטלפיה (h) (Entalpy)** - האנטלפיה מבטאת את הערך של אנרגיית הקרר בנקודה מסוימת. שינוי האנטלפיה מבטא את כמות אנרגיית החום שהתווספה או נגרעה מהמערכת. **נמדדת ביחידות: Kj / Kg**

ט. **אנטרופיה (S)** - קווי אנטרופיה קבועה בדיאגרמת לחץ אנטלפיה מתארים תהליך אידיאלי של השקעת חום ולחץ ללא שום איבוד אנרגיה. זהו תהליך תיאורטי, מכיוון שבמציאות לא כל האנרגיה מושקעת בהעלאת הלחץ והטמפרטורה, וחלקה הופך לאנרגיה מכנית (חיכוך) במדחס.

י. **נפח סגולי (Specific Volume) (v)** - $\frac{m^3}{kg}$ - $\frac{cm^3}{g}$ מוגדר כנפח של יחידה משקלית של החומר.

יא. **משקל סגולי (Specific Weight) (g)** - $\frac{kg}{m^3}$ - $\frac{g}{m^3}$ מוגדר כמשקל של יחידת נפח של החומר.

כדי להפוך משקל סגולי לנפח הסגולי, יש להציבם במשוואה: $g = \frac{1}{v}$

יב. **לחץ (P)** - קווי הלחץ בדיאגרמה, מציינים את הלחץ המוחלט, שהוא הלחץ הנמדד במערכת + 1 בר.

יג. **טמפרטורה (T)** - קווי הטמפרטורה בדיאגרמה, מציינים את הטמפרטורה ב - °C בשלושת התחומים: תחום הגז, תחום הנוזל ותחום הגזז.

קווי עזר הנמצאים בדיאגרמת לחץ-אנטלפיה:

י. **קווי הלחץ** - קווים אופקיים החוצים את הדיאגרמה לאורכה, מסומנים בסקאלה ביחידות בר (לחץ אבסולוטי).

טו. **קווי טמפרטורה** - קווים אלו מחולקים ל:

- **אזור הנוזל** - קווים אנכיים הנמשכים מקו הרוויה כלפי מעלה.
- **תחום הגזז** - קווים אופקיים, הנמתחים בין קווי פעמון הרוויה.
- **אזור הגז** - קווים עקומים, הנמשכים מקו הרוויה כלפי מטה.

טז. **קווי אנטלפיה** - קווים אנכיים החוצים את הדיאגרמה לכל גובהה.

יז. **קווי אנטרופיה** - קווים עקומים, הנמשכים מציר ה-X של הדיאגרמה בתחום הגז.

יח. **קווי נפח סגולי/משקל סגולי** - קווים עקומים, הנמשכים מקו הרוויה בתחום הגז לכיוון ימין עם נטייה מעלה.

2.3.3 תיאור בניית מחזור קירור תיאורטי על דיאגרמת לחץ-אנטלפיה**2.3.3.1 בחירת אופי עבודת המערכת**

הגדרת טמפרטורת איוד - טמפרטורת האיוד נקבעת בהתאם לסוג המתקן. זאת היא הטמפרטורה הנדרשת בחלל המקורר בהפחתה של הפרש טמפרטורות מקובל, במטרה לאפשר ([בהתאם לחוק השני של התרמודינמיקה](#)) זרימת חום מהחומר המקורר לקרר הזורם במאייד.

הגדרת טמפרטורת העיבוי - טמפרטורת העיבוי נקבעת בהתאם לסוג המתקן ומיקומו הגיאוגרפי כתלות בתנאי הסביבה. הטמפרטורה הנדרשת במעבה תהיה גבוהה יותר בהפרש טמפרטורות מקובל, במטרה לאפשר זרימת חום מהקרר, דרך סוללת המעבה אל החומר המקרר את המעבה (אוויר הסביבה במעבים מקוררי אוויר או המים, במעבים המקוררים באמצעות מים).

בחירת סוג הקרר - הקרר נבחר בהתאם לייעוד המתקן, כלומר בהתאם להתאמתו לטמפרטורות האיוד והעיבוי שבהן הוא אמור לפעול, בהתאם לכושר קליטת/פליטת החום שלו, **ולאפשרות** של עבודה תוך צריכת אנרגיה מופחתת ובהתאם לחוקים ולתקנות של איכות הסביבה.

לאחר קביעת סוג הקרר הנדרש, ניתן לתאר גרפית את מחזור הקירור על גבי הדיאגרמה הייחודית לאותו סוג של קרר.

2.3.3.2. תיאור גרפי של מחזור הקירור על גבי הדיאגרמה

המרת טמפרטורות ללחץ לפי סוג קרר

ניתן להמיר את הטמפרטורות ללחצים באמצעות אפליקציה לטלפון הנייד, או באמצעות טבלאות המרה המפורסמות על ידי החברות המייצרות את הקררים.

כפי שניתן לראות בדוגמה הבאה:

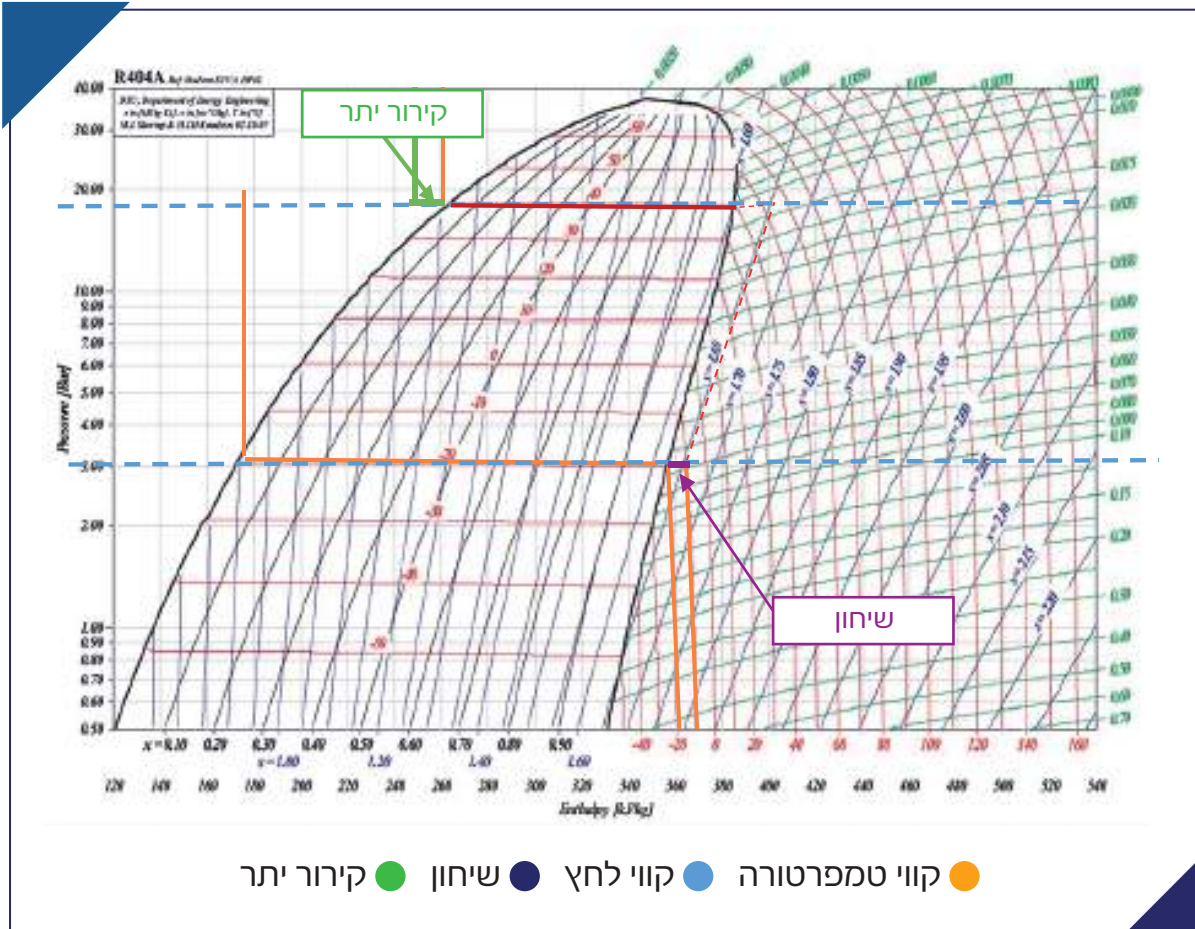
תמונה 2.4 - אפלייקציית Refrigerant Slider של חברת דנפוס



דוגמה להליך בחירת טמפרטורות ושרטוט קווי הלחץ על הדיאגרמה:

- לדוגמה, עבור מקפיא מסחרי שזורם בו קרר R-404A, העובד בטמפרטורת חדר של -10°C , נקבע טמפרטורת אידוד של -20°C . נשרטט קו ישר, החופף את קו הטמפרטורה של -20°C בתוך הפעמון, עד למפגש עם סקלת הלחץ. מסקלת הלחץ המוחלט ביחידות bar, נקבל עבור קרר R-404a, הלחץ במאייד (Pe) הינו שווה ערך ל 3 bar.
- עבור טמפרטורת סביבה של $+32^{\circ}\text{C}$, נבחר טמפרטורת עיבוי של $+40^{\circ}\text{C}$. נשרטט קו ישר, החופף את קו הטמפרטורה של 40°C בתוך הפעמון, עד למפגש עם סקלת הלחץ המוחלט. עבור קרר R-410a בטמפרטורת עיבוי של 40°C הלחץ המוחלט הינו 19 bar.

תמונה 2.5 - שרטוט קווי לחץ טמפרטורה של המאייד והמעבה.



קביעת ערכי השיחון (Super Heat) וקירור יתר (Sub Cooling)

שיחון - תוספת החום המורגש (הגדלת הטמפרטורה) לקרר, לאחר סיום תהליך האיוד. מטרתו:

- להבטיח כניסת קרר במצב צבירה אד ליניקת המדחס. יניקת הקרר כנוזל למדחס, עלולה לגרום לנזק מכני בלתי הפיך ולהרס המדחס.
- לשפר את תנאי הקרר ביניקה. עליית טמפרטורת הקרר ביניקה, מגדילה את משקל הקרר ביניקת המדחס ומשפרת את תפוקת המדחס והמערכת.
- לאפשר בניית לחץ גבוה בקו הדחיסה תוך שמירה על יחס דחיסה סביר ללא הגדלת המנוע וצריכת האנרגיה של המדחס. והגדלת הנצילות של המדחס והמערכת.
- להגדיל את כמות החום (חום מורגש) שהקרר קולט באמצעות המאייד ועל ידי כך להגדיל את תפוקת המאייד והמערכת.

ערכי חום שיחון מקובלים הינם בין 5°C ל- 10°C .

קירור יתר - תהליך המתבצע בקו הנוזל (במעבה או במחליף חום חיצוני), כדי לקרר את הנוזל לטמפרטורות נמוכות מטמפרטורת הרוויה, ובכך למנוע תופעות של רתיחה (איוד) ספונטני (Flash-gas) של הקרר בקו נוזל.

כך נוכל:

א. לוודא שלאביזר ההתפשטות (שסתום, צינור קפילרי) יגיע הקרר ב-100% נוזל, ובכך יובטח תהליך אדיאבטי יעיל, שיוריד את הטמפרטורה של הנוזל בכניסה למאייד לטמפרטורה הרצויה. ב. להכניס לשסתום את הקרר בטמפרטורה נמוכה, כדי שנוכל לקבל הפרשי טמפרטורה גדולים על אביזר ההתפשטות, גם בהפרש לחצים קטן יחסית. ג. לאפשר לקרר הזורם במעבה או במחליף חום חיצוני נוסף, להמשיך לפלוט אנרגיית חום ולהתקרר, במטרה לשפר את יעילות המעבה והמערכת.

ערכי קירור יתר מקובלים נעים בין 5°C ל- 8°C

בדוגמה שבחרנו:

טמפרטורת הקרר בסוף תהליך האיזוד (על קו הרוויה בתחום הגז) הייתה 20°C ותוספת חום השיחון לקרר הינה 10°C . המשמעות היא שטמפרטורת הקרר ביניקת המדחס תהיה 10°C . טמפרטורת הקרר בסוף תהליך העיבוי (על קו הרוויה בתחום הנוזל) הייתה 40°C וגריעת החום הנוספת מהקרר הינה 8°C , כך שטמפרטורת הקרר בכניסה לאביזר ההתפשטות תהיה 32°C .

ראו סימוני קירור היתר וחום השיחון בתמונה 2.5.

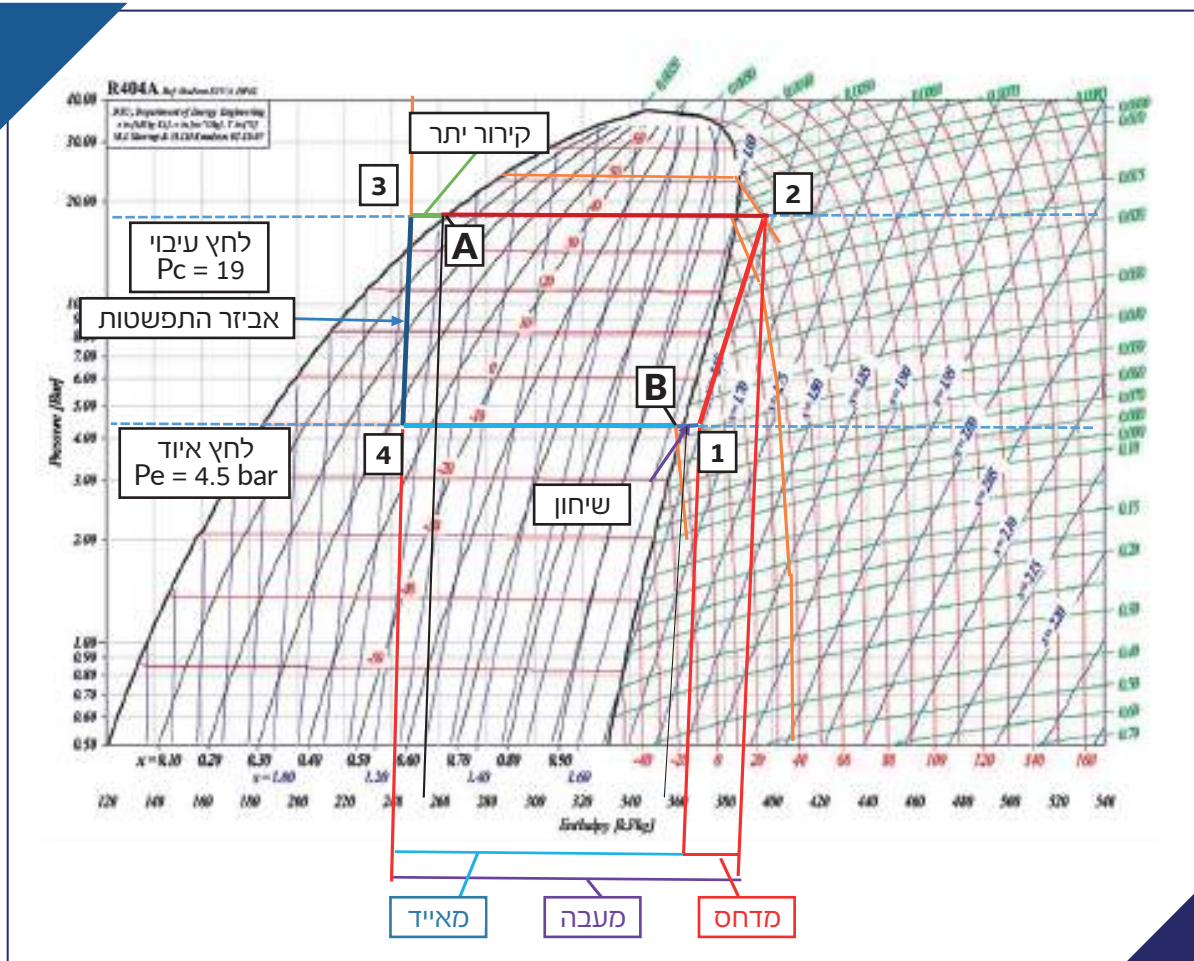
קביעת קווי עבודת המדחס והתהליך באביזר ההתפשטות

- **התהליך במדחס** - מתחיל בנקודת היניקה, לאחר חום השיחון. בנקודה זאת, הנמצאת בתחום הגז השחון, המדחס יונק קרר בלחץ וטמפרטורה נמוכים ודוחס אותו בלחץ גבוה וטמפרטורה גבוהה למעבה. קווי עבודת המדחס בדיאגרמת לחץ אנטלפיה מקבילים לקווי האנטרופיה (S) ומסתיימים בהשקה עם קו הלחץ של המעבה.
- **התהליך באביזר ההתפשטות** - הינו מעבר הנוזל מלחץ גבוה (לחץ העיבוי) ללחץ נמוך (לחץ האיזוד). התהליך מוגדר כתהליך אדיאבטי, כלומר ללא שינוי בכמות אנרגיית החום הנמצאת בקרר (ערך אנטלפיה קבוע). קו התהליך הינו קו אנכי המחבר את נקודת יציאת הקרר מהמעבה לנקודת תחילת תהליך האיזוד. מכיוון שהתהליך האדיאבטי מתבצע, תוך כדי איזוד חלק מסוים מהקרר הנוזלי הנכנס לתהליך, הרי שבכניסת הקרר למאייד, הוא במצב "גזוז" (ערבוב של גז ונוזל), ולפיכך, תחילת התהליך במאייד הינה בתוך תחום פעמון הרוויה.

2.3.3.2 מציאת שינוי ערכי החום (אנטלפיה) בתהליכי המחזור

כמוגדר בראשית הפרק, האנטלפיה (h) הינה כמות אנרגיית החום הפנימי שבחומר הקירור. ניתן למדוד על גבי סקאלת האנטלפיה שבדיאגרמה את השינוי באנרגיית החומר, בערכים של אנרגיה ליחידת מסה (KJ / kg) של החומר המשתתף בתהליך, וזאת על ידי הורדת קווים אנכיים (קווי אנטלפיה) מהנקודות המציינות את תחילת וסיום התהליכים במדחס, במעבה ובמאייד, ובאמצעות ערכים אלו, לחשב בשלבים הבאים את תפוקת המערכת ומרכיביה.

תמונה 2.6 - דיאגרמת לחץ אנטלפיה עם מחזור קירור תיאורטי



התהליך המחזורי של הקירור מתואר על ידי:

התהליך במאייד

מתחיל: בנקודה 4, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 240 (kJ/kg)

מסתיים: בנקודה 1, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 365 (kJ/kg)

תוספת האנטלפיה בתהליך היא: $\Delta h = 365 - 240 = 125$ (kJ/kg)

התהליך במדחס

מתחיל: בנקודה 1, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 365 (kJ/kg)

מסתיים: בנקודה 2, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 390 (kJ/kg)

תוספת האנטלפיה בתהליך היא: $\Delta h = 390 - 365 = 25$ (kJ/kg)

התהליך במעבה

מתחיל: בנקודה 2, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 390 (kJ/kg)

מסתיים: בנקודה 3, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 240 (kJ/kg)

גריעת האנטלפיה בתהליך היא: $\Delta h = 390 - 240 = 150$ (kJ/kg)

תהליך ההתפשטות

מתחיל: בנקודה 3, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 240 (KJ/kg)
מסתיים: בנקודה 4, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 240 (KJ/kg)
 בתהליך זה, אין תוספת או גריעת אנטלפיה.

קירור יתר

מתחיל: בנקודה A, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 250 (KJ/kg)
מסתיים: בנקודה 3, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 240 (KJ/kg)
גריעת האנטלפיה בתהליך היא: $\Delta h = 250 - 240 = 10 \text{ (KJ/kg)}$

חום שיחון

מתחיל: בנקודה B, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 355 (KJ/kg)
מסתיים: בנקודה 1, בה ערך האנטלפיה (h) הוא: 365 (KJ/kg)
תוספת האנטלפיה בתהליך היא: $\Delta h = 365 - 355 = 10 \text{ (KJ/kg)}$

תרגיל

חישובי תפוקות נדרשות לפי תהליך קירור תיאורטי

לצורך התרגיל, אנו מניחים כי הספיקה המשקלית (מסית) של הקרר, המסוחררת במערכת (Gr - מסה ביחידת זמן) על ידי המדחס, הינה **200 ק"ג בשעה**.
 כמות זו היא פונקציה של הספיקה הנפחית (Vr - נפח ליחידת זמן) של המדחס, ומושפעת ממשתנים רבים שעליהם נרחיב בפרק 4.

2.3.3.3.1 נוסחאות לחישוב תפוקה של מרכיבי המערכת

א. תפוקת המאייד Q_e היא: $Q_e = Gr \cdot (h_1 - h_4)$

ב. תפוקת המעבה Q_c היא: $Q_c = Gr \cdot (h_2 - h_3)$

ג. עבודת המדחס W_c היא: $W_c = Gr \cdot (h_2 - h_1)$

ד. מקדם ביצוע המערכת (COP) הוא: $COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$

הערות:

1) נהוג לחשב את תפוקות הקירור ביחידות טון-קירור T.R - $1 \text{ T.R} = 12,648 \frac{\text{KJ}}{\text{hour}}$
 2) נצילות מערכת הקירור (COP): היא מספר טהור המשמש אותנו להשוואה בין מערכות הקירור, כדי שנוכל לבחור את המערכת החסכונית יותר. ככל שה-COP בעל ערך גבוה יותר, המשמעות היא כי ניתן להפיק תפוקות קירור גדולות יותר (במאייד) באמצעות מדחס קטן וחסכוני.

$$Q_e = 200 \cdot \left(365 \frac{KJ}{kg} - 240 \frac{KJ}{kg} \right) = 25,000 \frac{KJ}{hour} = 1.98 T.R \frac{kg}{hour} - \text{חישוב תפוקת המאייד}$$

$$Q_c = 200 \cdot \left(390 \frac{KJ}{kg} - 240 \frac{KJ}{kg} \right) = 30,000 \frac{KJ}{hour} = 2.37 T.R \frac{kg}{hour} - \text{חישוב תפוקת המעבה}$$

$$W_c = 200 \cdot \left(390 \frac{KJ}{kg} - 365 \frac{KJ}{kg} \right) = 5,000 \frac{KJ}{hour} = 0.39 T.R \frac{kg}{hour} - \text{חישוב עבודת המדחס}$$

$$COP = \frac{\left(365 \frac{KJ}{kg} - 240 \frac{KJ}{kg} \right)}{\left(390 \frac{KJ}{kg} - 365 \frac{KJ}{kg} \right)} = \frac{125}{25} = 5 - \text{חישוב נצילות המערכת}$$

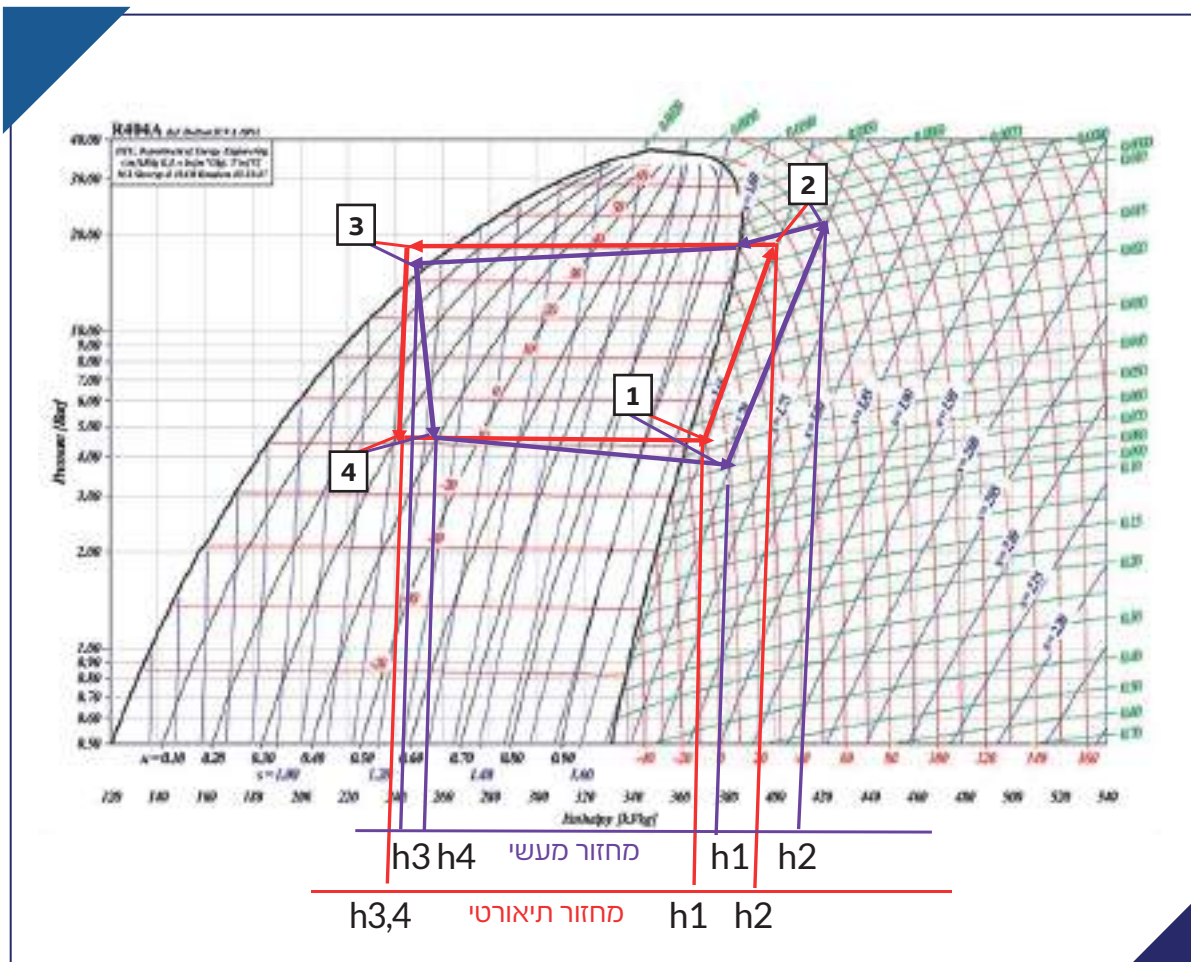
2.3.4 מחזור קירור מעשי

במחזור הקירור התיאורטי, אנו מתייחסים ללחצי העיבוי והאיוד **כלחצים קבועים** לאורך כל התהליכים.

בפועל, גם במעבה וגם במאייד, זרימת הקרר דרך מחליפי החום יוצרת מפלי לחץ ומשנה את מיקומן של הנקודות של 1-4 ואת הערכים שלהן.

אנו משתמשים במחזור התיאורטי כדי לחשב את החישובים העקרוניים של בחירת רכיבי המערכת, ללא התייחסות למפלי הלחץ והפסדי החום הנובעים מחיכוך הקרר תוך כדי זרימתו בצנרת במחליפי החום ודרך אביזרי המערכת השונים.

המעגל המעשי מביא בחשבון את הנתונים האמיתיים של כל רכיבי המערכת, ומתייחס לכל ההפסדים, כך שנוכל לקבל את התפוקות האמיתיות של המערכת ורכיביה ולבדוק את התאמתם לצרכינו.



2.3.4.1 הבדלים ומשמעותם

- א. נקודה מס' 1** - לחץ ביניקת המדחס - נמוך יותר בגלל נפילת הלחץ בין כניסת ויציאת המאייד.
- ב. נקודה מס' 2** - יציאת הגז הדחוס - טמפרטורת הדחיסה גבוהה יותר בגלל הגדלת הפרש בין לחץ היניקה ללחץ הנדרש במעבה. כתוצאה מהפרש הלחצים המדחס נדרש להשקיע יותר אנרגיה לבניית הלחץ הנדרש במעבה ולכן כמות אנרגיית החום המועברת לקרר (אנטרופיה **S**) גדלה, כמות צריכת האנרגיה המושקעת בהנעת המדחס גדלה, ונצילות המדחס יורדת.
- ג. נקודה מס' 3** - כניסת הנוזל לאביזר ההתפשטות נמצאת בלחץ נמוך יותר, וגורמת לרתיחה גדולה יותר בעת מעבר הנוזל דרך אביזר ההתפשטות, כך שנקודה 4 נמצאת בפועל עמוק יותר בתוך תחום הגז ומקטינה את יכולתו של המאייד לקלוט חום כמוס. קירור היתר קטן או לא קיים כלל. לפיכך, נפגעת יעילותו של המאייד.
- ד. נקודה מס' 4** - המרחק בין נקודה 3 לנקודה 4 התקצר, אחוז הנוזל הנכנס למאייד קטן, כך שכמות החום שהמאייד יכול להוסיף לקרר קטנה, וביחד איתה קטנה גם תפוקת המאייד והמערכת.

2.3.5. מחזורי קירור הפועלים בתחום העל-קריטי (Trans-critical Systems)

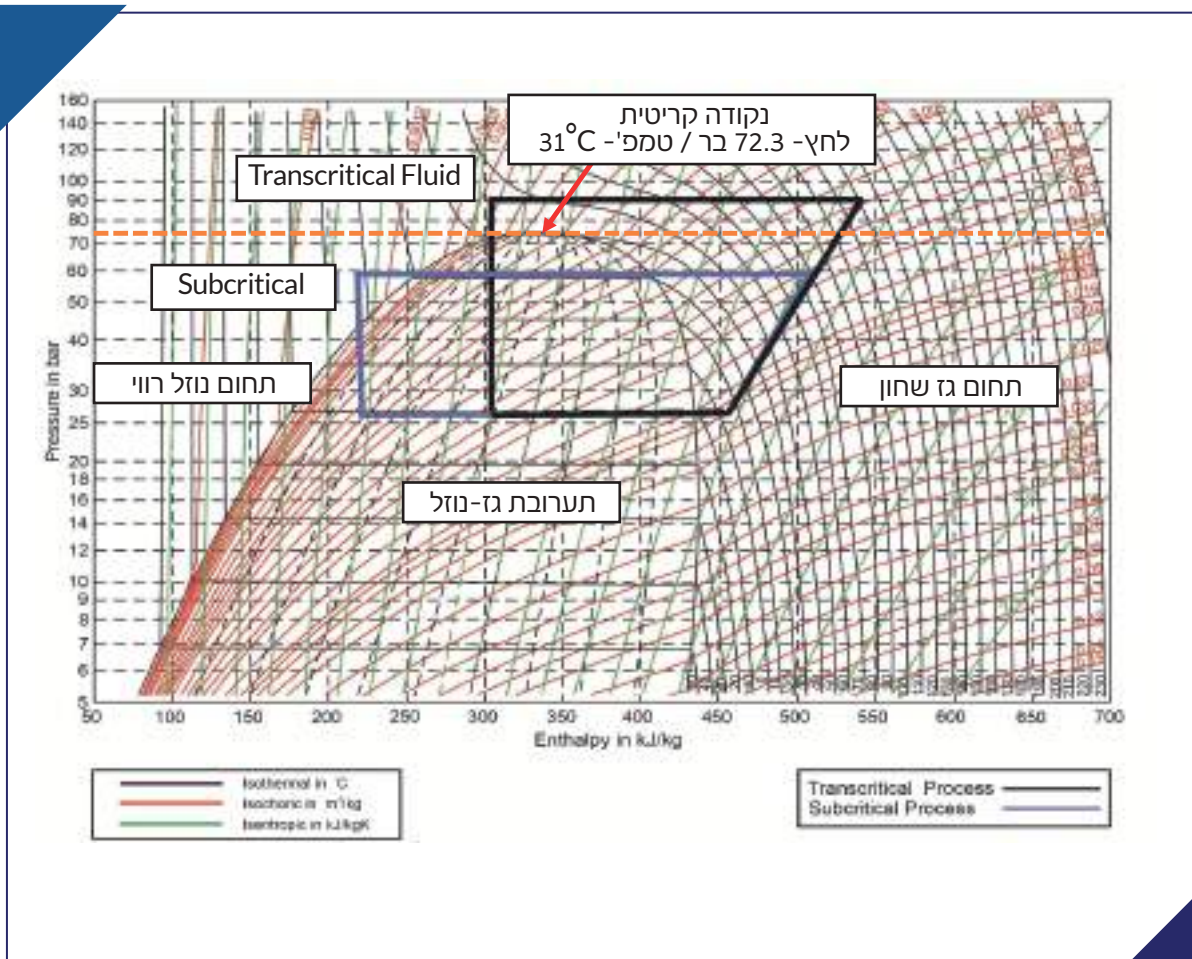
מחזורי קירור הפועלים בלחצים גבוהים מאוד, עשויים לפעול בתחום שמעל ללחץ הקריטי, כלומר במצב שבאזור הלחץ הגבוה של המחזור (במעבה) - הקרר נמצא מחוץ לתחום הרוויה בפאזת נוזל.

עבודת המערכת בלחצים אלו דורשת בחירת רכיבים (מדחס, מעבה, צנרת) שיהיו מסוגלים להתמודד עם הלחצים הגבוהים.

כמו כן, יש לקחת בחשבון את העובדה **שהחומר אינו מסוגל** בפאזה זאת לשנות את מצב הצבירה, ולפיכך נשללת מהמערכת היכולת לפלוט אנרגיית חום כמוס במעבה. עובדה זו מחייבת גם שימוש במחליפי חום (מעבים) גדולים ועילים יותר, כדי שיוכלו לפלוט את החום שהקרר מסיע מהחלל/החומר המקורר.

כיום, **הקרר היחיד הפועל בתחומים אלו** הינו קרר מסוג דו-תחמוצת הפחמן (CO_2), שסימונו R- 744.

תמונה 2.8 - דיאגרמת לחץ-אנטלפיה לקרר R-744



שאלות חזרה לפרק 2

1. המונח Heat Pump מתייחס ל:

- א. מזגני אוויר בלבד.
- ב. מערכות הפועלות בחימום בלבד.
- ג. כל סוגי מערכות הקירור והמיזוג.
- ד. מערכות הפועלות בטמפרטורות גבוהות.

2. מערכת שבה הקרר פולט את החום ישירות לאוויר הסביבה, תוך כדי שינוי מצב צבירה היא:

- א. מערכת הפועלת בתחום העל-קריטי.
- ב. מערכת בהתפשטות ישירה (DX).
- ג. מערכת עם מחזור קירור תיאורטי.
- ד. מערכת הפועלת מתחת לתחום הרוויה.

3. החום במאייד עובר מהחלל המקורר לקרר בגלל:

- א. הפרש טמפרטורות.
- ב. הפרש לחצים.
- ג. מבנה הצנרת של המאייד.
- ד. הטמפרטורה של קו הנוזל.

4. הקו במערכת, שיש חשיבות שיהיה בעל קוטר קטן הוא:

- א. קו יניקה.
- ב. קו נוזל.
- ג. קו דחיסה.
- ד. קו הנוזל וקו היניקה.

5. מדיאגרמת לחץ-אנטלפיה (גרף מולייר), ניתן לקבל נתונים על:

- א. מבנה מערכת הקירור הבסיסית.
- ב. מקדם ביצוע המעבה/המאייד.
- ג. קוטר הצנרת של קווי הדחיסה והיניקה.
- ד. המצב והתנאים של הקרר בכל נקודה במערכת.

6. נוזל המוגדר כנוזל עם קירור יתר הוא:

- א. נוזל שסיים להפוך לאדים (גז).
- ב. נוזל בטמפרטורה גבוהה מטמפרטורת האיזוד.
- ג. נוזל בטמפרטורה נמוכה מטמפרטורת הרוויה.
- ד. נוזל בטמפרטורה גבוהה מהטמפרטורת הקריטית.

7. בזמן תכנון מתקן קירור, כיצד מחליטים מה יהיה הלחץ במאייד?

- א. בהתאם לטמפרטורת הסביבה.
- ב. בהתאם לטמפרטורה הנדרשת במאייד ולפי סוג הקרר.
- ג. לפי גודלו של המאייד ולפי ה-COP של המערכת.
- ד. לפי הפרש הלחצים בין הכניסה והיציאה של המאייד.

8. מהו שיחון?

- א. תהליך שעובר הקרר במעבה, כדי להבטיח הגעת נוזל לאביזר ההתפשטות.
- ב. חלק מהחום הכמוס שנקלט על ידי הקרר במאייד.
- ג. חום מורגש הנוסף לקרר בתום האיוד.
- ד. חום המתווסף לקרר בתהליך הדחיסה במדחס.

9. קירור יתר הוא:

- א. קירור הקרר היוצא מהמעבה, במטרה למנוע איוד ספונטני בירידת הלחץ בקו הנוזל.
- ב. קירור החומר מתחת לנקודה הקריטית בלחץ גבוה.
- ג. קירור הקרר העוזב את המאייד, במטרה להקטין את העומס על המדחס.
- ד. החלפת חום בין הקרר במצב גז לקרר הנוזלי באביזר ההתפשטות.

10. במערכות העובדות בתחום העל-קריטי צריך:

- א. להפריד את קווי היניקה וקווי הדחיסה.
- ב. להשתמש בציוד ובצנרת העומדים בלחץ גבוה.
- ג. להשתמש בצנרת עם קוטר קטן בקווי היניקה.
- ד. להשתמש בצנרת בעלת קוטר גדול בקווי הנוזל.

תשובות לשאלות

שאלה מס'	תשובה
1	ג
2	ב
3	א
4	ב
5	ד
6	ג
7	ב
8	ג
9	א
10	ב

פרק 3: קררים (Refrigerants) לשימוש במערכות קירור ומיזוג אוויר

3.1 מבוא

אפקט הקירור במערכות הקירור ומיזוג האוויר נוצר על ידי קרר (Refrigerant). הקרר זורם במעגל סגור, ומסיע את אנרגיית החום מהמאייד אל המדחס והמעבה (בתהליך קירור) תוך מעבר בין פאזות נוזל וגז, בטמפרטורות ובלחצים משתנים. בפרק זה נסקור את ההיסטוריה של משפחות הקררים לסוגיהן. החל מהשימוש בקררים טבעיים בתחילת הדרך, דרך המעבר לקררים סינטטיים, ועד לסגירת המעגל בשנות האלפיים, עם החזרה לשימוש בקררים הטבעיים במטרה לשמור על הסביבה. מאחר שקצרה היריעה מלפרט את כל עשרות סוגי הקררים שהיו ועודם בשימוש, נתמקד בסוגי הקררים שישמשו ומשמשים במערכות הקירור, ההקפאה והמיזוג הנפוצות בארץ.

3.1.1 פרמטרים לבחירת קררים

- לפני בחירת מרכיבי המערכת (כגון: מדחס, מעבה, מאייד ושוברי לחץ), מתכנן מערכת הקירור בוחר תחילה את הפרמטרים הבאים:
- סוג הקרר שיפעל במערכת בהתאמה לטמפרטורה הנדרשת בחלל המקורר (טמפרטורת המאייד תהיה נמוכה יותר).
 - מאפייני התכנון של המדחס (בוכנתי/בורגי/צנטריפוגלי).
 - צנרת המערכת.
 - טמפרטורת העיבוי הדרושה לסילוק החום לסביבה.

השיקולים העיקריים לבחירת הקרר ייגזרו ממענה לדרישות המפורטות להלן:

3.1.1.1 טווח טמפרטורות יעיל

לרוב, יצרני הקררים ממליצים על טווח טמפרטורת איוד לכל סוג קרר. טווח זה ישיג את התפוקה המקסימלית מהקרר, ולכן התאמת הקרר לטמפרטורת האיוד הנדרשת בהתאם לסוג המתקן, תבטיח התאמה אופטימלית וחסכון באנרגיה.

דוגמה להמלצות היצרנים לטווחי טמפרטורת איוד לקררים נבחרים:

- R-407C טווח טמפ' איוד מומלץ: $15^{\circ}\text{C} \div -20^{\circ}\text{C}$
- R-410A טווח טמפ' איוד מומלץ: $5^{\circ}\text{C} \div -40^{\circ}\text{C}$
- R-134a טווח טמפ' איוד מומלץ: $22^{\circ}\text{C} \div -20^{\circ}\text{C}$
- R-507A טווח טמפ' איוד מומלץ: $-5^{\circ}\text{C} \div -40^{\circ}\text{C}$

3.1.1.2 לחצי עבודה מתאימים

לחצי העבודה צריכים להיות סבירים ומתאימים ללחצי העיבוי והאיוד הרצויים, על מנת להקל על פעולת המדחס (הגדלת יעילות המדחס = חיסכון באנרגיה), וכן מטעמי בלאי ובטיחות.

למרות שהאפשרות קיימת, רצוי שלחץ היניקה לא יהיה בתחום הוואקום (לחץ נמוך מהלחץ האטמוספרי) כדי למנוע חדירת אוויר למערכת במקרה של תקלה, ורצוי שלחץ הדחיסה יהיה נמוך מהלחץ הקריטי, כדי להימנע מירידה בנצילות המעבה והמערכת וכדי להקטין את צריכת האנרגיה ואת האפשרות לנזק פיזי לציוד ולאנשים.

3.1.1.3 יציבות כימית בכל טווח הטמפרטורות והלחצים שבהם הקרר אמור לפעול.

3.1.1.4 מתאים לעבודה עם החומרים הנמצאים במערכת (שמן קירור, אטמים, מתכות וכו'): הקרר צריך לאפשר לשמן הקירור להתמוסס בתוכו, כדי לאפשר לשמן לנוע לאורך המערכת ולחזור למדחס. במערכות רבות שבהן הקרר והשמן אינם "מתחברים זה לזה", כמו במערכות אמוניה, או במערכות לטמפרטורות נמוכות מאוד, או במערכות בעלות צנרת ארוכה ו/או מאיידים מוצפים (ראו הרחבות בפרקים הבאים), יש להתקין אמצעים מכניים, כגון מפרידי שמן בקו היציאה מהמדחס (ראו בפרק אביזרי מערכות קירור), להפרדת השמן מהקרר.

3.1.1.5 כושר קליטת חום כמוס גבוה כדי לאפשר קליטת/פליטת כמויות חום גדולות במאייד ובמעבה בהתאמה.

3.1.1.6 מוליכות תרמית גבוהה.

3.1.1.7 צפיפות גדולה: מאפשרת נפח אחסון קטן יותר לקרר והקטנת הגודל של המערכות ואביזריהן.

3.1.1.8 קל לגילוי במקרה של דליפה.

3.1.1.9 זמינות הקרר כיום ובעתיד.

3.1.1.10 עלויות הקרר (במיוחד במערכות בעלות תפוקות גדולות).

3.1.1.11 שמירה על איכות הסביבה (עמידה בתקנים, מדד $O.D.P = 0$, מדד $G.W.P$ קטן ככל האפשר).

3.1.1.12 רמת סיכון נמוכה בשימוש ובתחזוקה (רעילות נמוכה/דליקות (נפיצות) נמוכה).

טבלה 3.1 - קבוצת בטיחות קררים לפי תקן ASHRAE 34

רעילות גבוהה	רעילות נמוכה	
B1	A1	לא דליקים
B2L	A2L	דליקות נמוכה
B2	A2	דליקות בינונית
B3	A3	דליקות גבוהה

3.1.2 ההיסטוריה של הקררים

השימוש הראשון בקררים במערכות דחיסת אדים החל בשנת 1856. מפתחי מערכות הקירור השתמשו אז בקררים מסוג אתר, אלכוהול ואמוניה מומסת במים. בשנת 1876, בגרמניה, פיתח פרופ' קרל פון לינדה שורה של חומרי קירור חדשים שהיו יעילים יותר מהקררים הראשונים, וכללו אמוניה נוזלית, גופרית דו-חמצנית (SO_2) ומתיל כלוריד (CH_3CL).

חומרים אלו, **שהיו רעילים וקורוזיביים**, הוחלפו בראשית המאה העשרים בחומרים ממשפחת ההלוגניים. הם פותחו על ידי חברת "דו-פונט" ונקראו על ידה בשם "פריאונים". חומרים אלו, שייצורם הורחב למפעלים רבים מסביב לעולם, היו תרכובות אורגניות שהכילו מרכיבים של פחמן, פלואור וכלור במולקולות שלהם.

הרכב חומרים זה **התגלה כשורד לאורך זמן רב באוויר החופשי**, ולכן שחרור קררים אלו לאטמוספירה - בין אם כתוצאה מדליפה או במהלך פעולות אחזקה - **גורם לפגיעה ארוכת שנים** כתוצאה מפירוק שכבת האוזון (O_3) באטמוספירה, המגינה על החיים על פני כדור הארץ מפני קרינה אולטרא-סגולית (UV) מוגברת.

מדד פגיעתם של הקררים השונים בשכבת האוזון נתון ב- ODP (Ozone Depletion Potential) ונמדד יחסית ל-R-11.

עד לסוף שנות השבעים של המאה הקודמת, לא היו מחקרים מתועדים על הפגיעה בשכבת האוזון. השינוי חל כאשר חלליות ששוגרו אל מחוץ לאטמוספירה צילמו את שכבת האוזון ואת החור שנוצר בה מעל יבשת אנטרקטיקה.

בשנת 1985, נחתם בחסות האו"ם ההסכם הבינלאומי הראשון לשמירה על שכבת האוזון. לאחר מחקר ועיון להגדרת היקף הבעיה, נחתמה ב-1987 אמנה בינלאומית הידועה **כאמנת מונטריאול**, המגבילה את ייצור החומרים הפלואורו-פחמנים המוכלרים (C.F.C) ואת השימוש בהם.

פרט לשימושן כקררים, תרכובות ה-C.F.C שימשו בענפי תעשייה רבים גם כחומרים הודפים (אירוסולים), וכחומרים מקציפים בתעשיית חומרי הבידוד.

באמנת מונטריאול המקורית הוסכם כי ייצור חומרי C.F.C יופחת ב- 50% עד שנת 2000, אולם לאור התעוררות התנועה לאיכות הסביבה בעולם תוקנה האמנה (שנחתמה ע"י 110 מדינות), ונקבע כי ייצור פלואורו-פחמנים מוכלרים וכן ייצור מתקני קירור ומיזוג המשתמשים בחומרים אלו במדינות מפותחות, **יופסק למעשה בינואר 1996**.

הקררים שייצורם הופסק לחלוטין בשנת 1996 היו: CFC-11, CFC-12, CFC-13, CFC-113, R-502, R-503. כמו כן נאסר הייבוא שלהם.

במקביל, **הותר המשך השימוש לזמן מוגבל** של תרכובות תחליפי קררים מוכלרים חלקית, הידרו-פלואורו-פחמימנים מוכלרים (H.C.F.C), שנוקם לשכבת האוזון קטן בהרבה, ושעתידים לצאת מהשימוש בשלב מאוחר יותר.

לדוגמה:

- **קרר נפוץ מסוג HCFC-22**, שמשמש עד היום במערכות קירור (לטמפרטורות גבוהות) ובמערכות מיזוג אוויר, **נאסר לשימוש במתקנים חדשים** החל משנת 2010 ונאסר לחלוטין בשנת 2020.

- **קרר מסוג HCFC-123 נאסר לשימוש במתקנים חדשים** החל משנת 2020, ולחלוטין בשנת 2030.

בפעול, החלפת קררים ממשפחת ה-H.C.F.C החלה אף מוקדם יותר, כשפותחזן הקררים התחליפי הכולל מימן, פלואור ופחמן (H.F.C - HydroFluoroCarbons) ואינו כולל את מרכיב הכלור.

- **הקררים ממשפחת ה-H.F.C כוללים את R-410A**, שהוא הקרר המוביל כיום **במתקני מיזוג אוויר** הן במגזר הביתי והן במגזר התעשייתי, ואת הקרר R-134a, שהחליף את הקררים המזיקים במערכות קירור והקפאה מכל הגדלים, כמו גם במערכות מיזוג אוויר ברכב.

מעבר לפגיעה בשכבת האוזון, השימוש בקררים מסוג C.F.C, H.C.F.C, ואפילו בקררים "חדשים" מסוג H.F.C, התגלה כתורם להגדלת אפקט החממה הגורם להתחממות כדור הארץ - אפקט (Global Warming Potential) G.W.P.

אפקט החממה נוצר כאשר גזים המכילים פחמימנים, כגון CO_2 , הנפלטים כתוצאה משימוש באנרגיה המתבססת על דלקים פוסיליים (נפט, גז טבעי, פחם), מתרכזים באטמוספירה המקיפה את כדור הארץ, ומייצרים מעין מעטפת המונעת מאנרגיית החום הנקלטת בה במשך שעות היום מלהשתחרר בחזרה לאטמוספירה. התוצאה היא עלייה בטמפרטורה ושינויי אקלים (שינויי מזג אוויר, סופות, המסת הקרחונים).

הפגיעה בסביבה נגרמת מפליטת גזי החממה הן בעת תהליכי ייצור הקררים והן בעת השימוש בקררים אלו במערכות הקירור והמיזוג.

תרומתם של הקררים השונים להתחממות כדור הארץ נתונה ב-G.W.P (Global Warming Potential) ונמדדת יחסית ל- CO_2 .

הערכת תרומת פליטת הפלואורו-פחמימנים המוכלרים לעליית התחממות כדור הארץ בשנות השמונים, מראה כי הם תרמו **24% מכלל תרומת פעילות האדם לעליית הקרינה** הגורמת להתחממות עתידית של כדור הארץ. תרומה זאת נמצאת במקום השני, לאחר פליטת CO_2 בגזי שריפה המוערכת ב- 55%.

הערכים היחסיים נתונים בטבלה הבאה:

טבלה 3.2 - השפעת הקררים על הסביבה

מקדם GWP ביחס ל- CO ₂	מקדם OPD	נוסחה כימית	קרר
4660	1.00	CCl ₃ F	*CFC-11
10200	1.00	CCl ₂ F ₂	*CFC-12
5820	0.80	CCl ₂ FCClF ₂	CFC-113
8590	0.70	CClF ₂ CClF ₂	CFC-114
7670	0.40	CClF ₂ CF ₃	CFC-115
1760	0.05	CHClF ₂	*HCFC-22
79	0.02	CF ₃ CHCl ₂	*HCFC-123
529	0.02	CHClFCF ₃	HCFC-124
150	0.10	CH ₃ CCl ₂ F	HCFC-141b
782	0.06	CH ₃ CClF ₂	HCF C-142b
650	0	CH ₂ F ₂	HFC-32
3170	0	CHF ₂ CF ₃	HFC-125
1300	0	CF ₃ CH ₂ F	*HFC-134a
4800	0	CH ₃ CF ₃	HFC-143a
138	0	CH ₃ CHF ₂	HFC-152a
2090	0	- R-32 - ch2f2 50% R-125 - chf2cf2 50%	HFC-410A
>1	0	NH ₃	R-717
0	0	H ₂ O	*R-718
4	0	C ₃ H ₈	HC-290
28	0	C ₄ H ₁₀	HC-600a

מדדי GWP נמדדים ביחס לנזק השקול לפליטת CO₂ בפרק זמן של 100 שנים.
* קררים בשימוש תדיר.

3.1.3 רגולציה ותקינה לקררים בישראל

מדינת ישראל אשררה בשנת 1992 את אמנת וינה ופרוטוקול מונטריאול, ומיישמת את הדרישות הקבועות באמנה ובפרוטוקול בדבר חומרים המדללים את שכבת האוזון. החובות הנגזרות מיישום האמנה והפרוטוקול בתחום הייבוא נקבעו בחובת רישוי יבוא שנחקקה באמצע שנות התשעים, ובהמשך באמצעות תקנות החומרים המסוכנים "יישום פרוטוקול מונטריאול", כפי שנחקקו בשנת 2004 על ידי המשרד להגנת הסביבה.

לגבי קררים הפוגעים בשכבת האוזון - יבוא קררים מסוג C.F.C נאסר לחלוטין. ייצור מתקני קירור ומיזוג אוויר חדשים לשימוש עם קררים מסוג H.C.F.C נאסר לחלוטין, מותרת הקצבת יבוא של קררים אלו למטרת תחזוקת מערכות קיימות. משנת 2016 ועד שנת 2020, קטנה המכסה המותרת לישראל ל-10% בלבד משנת הבסיס (כ-82 טון חומרי O.D.P).

בשנת 2016 עמדה הצריכה במדינת ישראל על 33 טון של חומרים בעלי מקדם פגיעה באוזון הגבוה מ-0.

תיקון קיגאלי לפרוטוקול מונטריאול:

במפגש בין הצדדים לפרוטוקול מונטריאול (להגנה על שכבת האוזון) שהתקיים בקיגאלי (רואנדה) בשנת 2016, אומץ תיקון לפרוטוקול אשר יצמצם את הייצור ואת השימוש של גזי חממה חזקים המשמשים בעיקר במערכות קירור ומיזוג אוויר.

התיקון חייב את רוב המדינות המפותחות, לרבות ישראל, להתחיל לצמצם את השימוש ב-H.F.C החל משנת 2019, כאשר מדינות מתפתחות יוכלו להתחיל כמה שנים לאחר מכן.

להלן לוחות הזמנים ליעדי צמצום השימוש בגזי חממה במדינות המפותחות:

- משנת 2019 ועד 2023: 90%
- משנת 2024 ועד 2028: 60%
- משנת 2029 ועד 2033: 30%
- משנת 2034 ועד 2025: 20%
- משנת 2036 ואילך: 15%

3.1.4 זיהוי הרכב ותכונות הקררים

תמונה 3.1 - אחסון קררים במכלים בצבעים שונים



רוב אנשי הקירור נוהגים לזהות את הקררים השונים לפי צבע האריזה (המכל) שבו הקרר מאוחסן.

אך הזיהוי הוודאי נעשה על פי מספר שניתן לקרר בהתאם להסכמים בינלאומיים. המספר כולל בין 2 ל-3 ספרות המצורפות לאות R (Refrigerant), ומציין את מרכיבי החומר ותכונותיהם.

שינוי בצבע מכלים לאיכסון קררים:

בעבר כשמספרם של הקררים היה קטן יחסית, היה קל לזהותם על פי צבעי המכלים שבהם אוכסנו, וגם אז, דרשה התקינה לציין על המכלים את סוג הקרר המאוכסן בהם.

עם ריבוי כמות הקררים שבשימוש, נאלצו היצרנים להשתמש בצבעי ביניים מעבר לצבעים הבסיסיים (לבן, ירוק, חום, כחול וכו') שבהם כבר נעשה שימוש לסימון מכלי קררים, מה שהפך את הגוונים לדומים וגרם שההבדלים בצבעי המכלים קטנו והתרבו המקרים שבהם הוטענו למערכות השונות קררים לא מתאימים.

חשוב לציין כי במקרים של ערבוב קררים שונים וטעינת קררים לא מתאימים למערכות השונות עלולים להיגרם נזקים למדחסים ולמערכות, כמו גם פגיעות באדם וברכוש הנמצאים בסמוך למערכות אלו.

כדי להקטין את הסכנה שבטעויות הזיהוי של גווני מכלי הקררים, החליטו במכון האמריקאי למיזוג, חימום וקירור (ASHREA), שהינו הגוף הרגולטרי לנושא תקנות ותקנים במקצועות אלו בארה"ב, לעבור, החל מינואר 2020, לשימוש בסטנדרט חדש לסימון מכלי קרר. בסטנדרט זה כל המכלים יצבעו בצבע אחיד בגוון אפור שמספרו בטבלת הצבעים (מניפת RAL) הינו 7044. כאשר על כל מיכל תצבע טבעת היקפית שעליה יצוין באופן בולט מספר הזיהוי של הקרר. (ראה תמונה מס' 3.2).

במקרים של קררים דליקים כמו הבוטן, הפרופן ונגזרותיהם שהשימוש בהם גדל, יסומן המכל בחלקו העליון, בטבעת היקפית נוספת בצבע אדום.

(מניפת צבעי RAL - הינה קטלוג בין לאומי המגדיר קשת של גוונים לצביעה על ידי מספר קטלוגי ומשמש כסטנדרט מוכר בכל העולם).

למרות ש ASHREA הינו מכון תקנים אמריקאי, ההיסטוריה מלמדת שרוב התקנים שנקבעו על ידו, אומצו לשימוש כתקנים סטנדרטיים ברוב מדינות העולם ולפיכך, יש להניח כי מיכלים בסימון זה יכנסו לשימוש גם בישראל.

תמונה 3.2 - שינוי בסימון מכלי קרר



תמונה 3.3 - דוגמה לסימון מכלי קרר לפי תקן אמריקאי



להלן פירוש המספרים של קררים המסומנים לפי התבנית R-xyz על פי ההסכמים הבינלאומיים:

3.1.4.1 תרכובות קררים מבוססי פחמימנים

בתרכובות אלו:

- **הספרה הראשונה (X)** מציינת את מספר אטומי הפחמן שבהרכב הכימי של החומר:
- לחומרים המכילים מתאן (CH_4), $0=X$, ולכן אינו מצוין, לדוגמה: קררים מסוג R-12, R-22.
- לחומרים המכילים אתאן (C_2H_6), $1=X$, לדוגמה: R-114, R-124, R-134a.
- לחומרים המכילים פרופאן (C_3H_8), $2=X$, לדוגמה: R-290.
- **הספרה השנייה (y)** מציינת את מספר אטומי המימן (H) שבהרכב הכימי של החומר.
- **הספרה השלישית (z)** מציינת את מספר אטומי הפלואור (F) שבהרכב הכימי של החומר.

לאחר ייצורם, החומרים המרכיבים את הקררים הופכים לתרכובות.

כלומר, מרכיבי התרכובת משנים את תכונותיהם והופכים להיות חומר "חדש", בעל תכונות (לחצים וטמפרטורות אידוד, משקל סגולי וכו') משלו.

3.1.4.2 בתערובות זיאטרופיות (zeotropic mixture), שהן תערובות שלמרכיבן יש

טמפרטורת רתיחה שונה לאותו הלחץ (ההפרש בטמפרטורות הרתיחה בין מרכיבי התערובת נקרא glide, וככל שהוא גדול יותר, כך תהיה נצילות המאייד קטנה יותר) או בתערובות א-זיאטרופיות (azeotropic mixtures), שהן תערובות שבהן לא קיים הפרש טמפרטורות בין מרכיבי התערובת הנמצאים באותו הלחץ (כמו גם תערובות בעלות הפרש (glide) קטן מאוד בין טמפרטורות הרתיחה של מרכיבי התערובת, שנקראות "Near Azeotrope"):

הספרה (X) הראשונה מציינת כי הקרר הינו:

• $X = 4$ הקרר הינו תערובת זיאטרופית. לדוגמה, R-407A, R-407C.

• $X = 5$ הקרר הינו תערובת א-זיאטרופית לדוגמה, R-502, R-507A.

בניגוד לתרכובות (compounds), התערובות (bland) שומרת על תכונות מרכיביה.

לכן, בקררים שהינם תערובות, **הקשר בין הלחץ לטמפרטורה של האיוד/עיבוי שונה לכל מרכיב**, וכתוצאה מכך כל מרכיב מתאייד/מתעבה בטמפרטורה שונה למרות שהם נמצאים באותו הלחץ. ההפרש הנמדד בין טמפרטורות האיוד של מרכיבי התערובת נקרא **glide** (החלקה, גלישה).

• **הספרה השנייה (y) והספרה השלישית (z)**, מציינות את המספרים בסידורים של החומרים שבקבוצה:

• תערובות בעלות glide קטן מ- 1°C ($\text{glide} < 1^{\circ}\text{C}$) נחשבות תערובות א-זיאטרופיות.

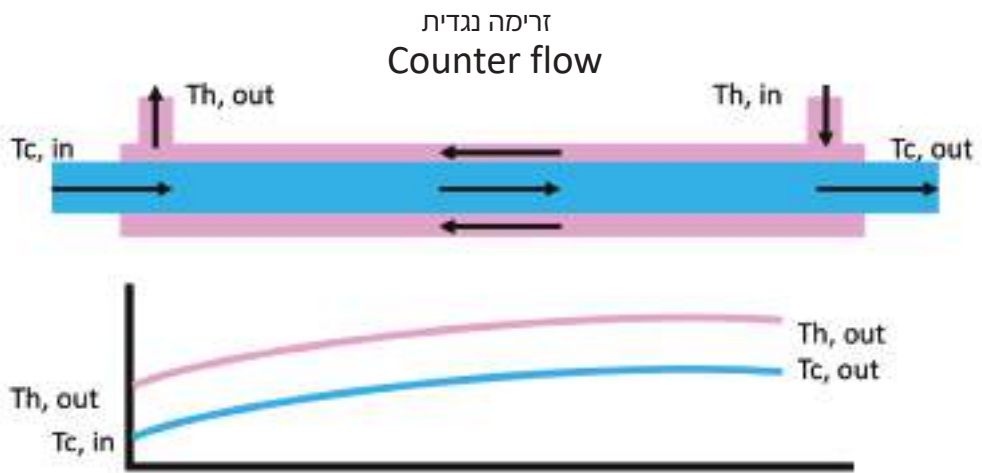
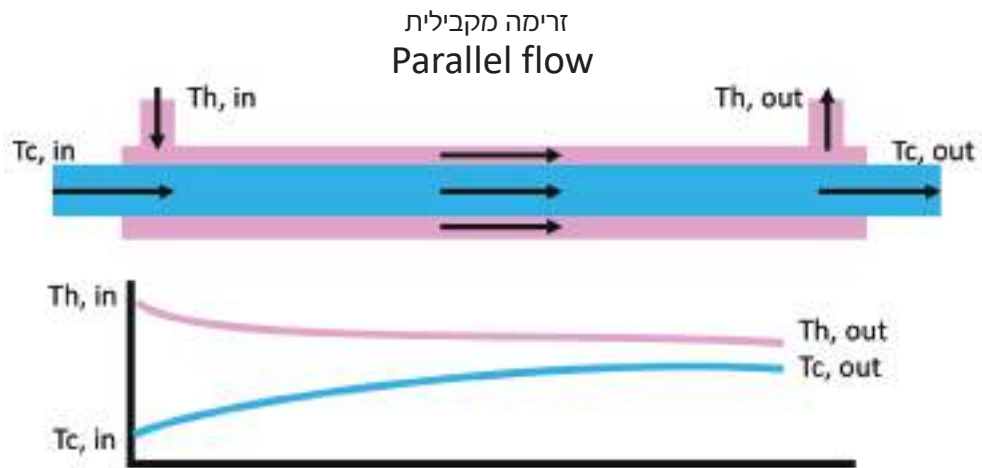
• תערובות בעלות glide גדול מ- 1°C ($\text{glide} > 1^{\circ}\text{C}$) נחשבות תערובות זיאטרופיות.

השימוש בקררים זיאטרופיים מחייב את מילוי הקרר למערכת במצב צבירה נוזל, כדי להבטיח את הכנסת התערובת תוך שמירה על היחס הנכון בין מרכיביה.

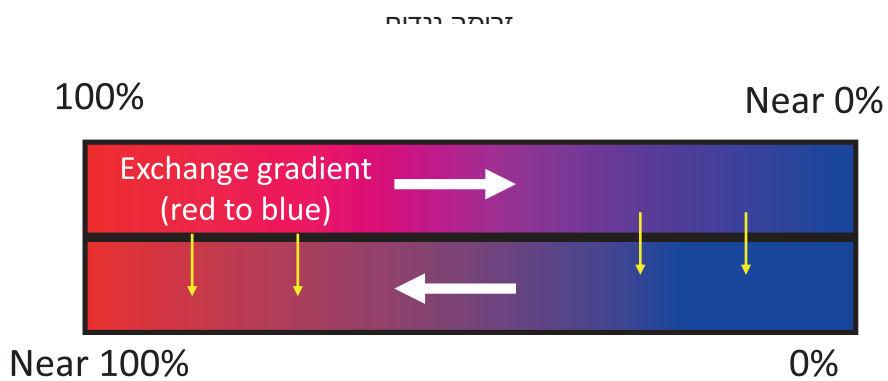
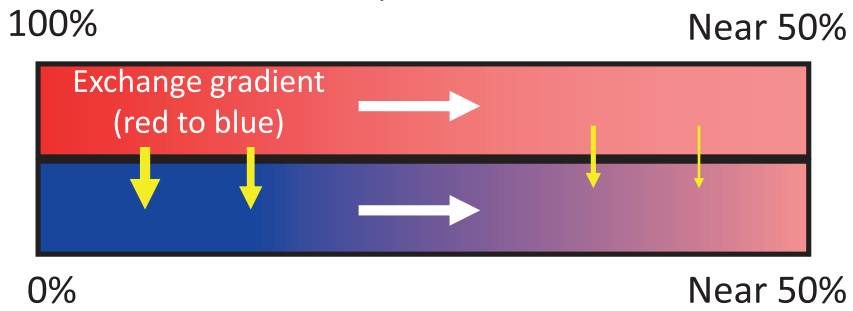
כמו כן, **השימוש בקררים זיאטרופיים בעלי glide גדול, מצריך בחירה נכונה** של שסתומי התפשטות ומחליפי חום. מכיוון שבעת תהליך ההתפשטות, בשסתום או במחליף החום, החומר הנדיף יותר יהפוך ראשון מנוזל לגז, הרי **שאנו עלולים לאבד בתהליך** חלק מתפוקת השסתום (טמפי' כניסת נוזל למאייד גבוהה יותר) וחלק מתפוקת המאייד, בגלל שבחלק מהתהליך במאייד רק אחוז מסוים מהקרר ישנה את מצבו בכל פעם (המצב זהה גם בעת תהליך העיבוי).

כדי לנצל את התהליכים במחליפי החום הפועלים במערכות עם קררים זיאטרופיים בצורה מקסימלית, יש להשתמש במחליפי חום הפועלים על-פי העיקרון של זרימה נגדית (Counter-current flow).

תמונה 3.4 - מחליפי חום בזרימה נגדית ובזרימה מקבילית



Co-Current flow



מהשרטוטים הנ"ל, ניתן לראות כי במחליפי החום הפועלים בזרימה מקבילית, הפרש הטמפרטורות בין כניסת החומרים למחליף החום קטן לאורך התהליך, מה שמקטין את יעילות מחליף החום. **לעומת זאת**, מחליפי חום הפועלים לפי עיקרון זרימה נגדית, שומרים על הפרש טמפרטורה קבוע ויציב לאורך כל התהליך במחליף החום.

מבין מחליפי החום שנהוג להשתמש בהם, מחליף חום מסוג **פלטות מולחמות** (BPHE - Brazed Plate Heat Exchanger) **נחשב היעיל ביותר** למערכות הפועלות עם קררים שהם תערובות זיאטרופיות.

תמונה 3.5 - מחליף חום פלטות בזרימה נגדית



בזכות תכונותיהם הכוללות זרימה טורבולנטית והחלפת חום יעילה, **מחליפי חום אלו מאפשרים** קבלת חום שיחון, להבטחת איוד כל מרכיבי הקרר ביציאת המאייד בטמפרטורות סבירות. כמו כן מתקבל קירור יתר גדול, להבטחת קבלת 100% נוזל ביציאת המעבה בלחצים סבירים.

3.1.4.3 בתרכובות אורגניות:

- $X = 6$ מצוין כי הקרר עשוי מתרכובת של חומרים אורגניים (בדרך כלל חומרים פחמימניים), כגון: R-600 בוטאן, R-600a איזו בוטאן.
- לקבוצה זו קיימות קבוצות משנה, כמו תרכובות המשלבות חמצן, גופרית (Sulfuric), או חנקן (Nitrogen).
- **הספרה השנייה (y) והספרה השלישית (z)** מציינות תתי-קבוצות בקבוצה.

3.1.4.4 בתרכובות אי-אורגניות (Inorganic compounds):

- $X = 7$ מצוין את קבוצת הקררים האי-אורגניים.
- תרכובות אלו כוללות קררים כגון: R-717 אמוניה, R-718 מים, R-744 CO₂.
- **הספרה השנייה (y) והספרה השלישית (z)** מציינות את המשקל המולי של החומר.
- לדוגמה: המשקל המולי של המים הינו $M_{H_2O} \approx 18.015 \text{ g/mol}$, ומכאן שהסימון יהיה R-718.

3.1.4.5 בתרכובות אורגניות לא רוויות (Unsaturated organic compounds):

- $X = 11$ מציינ את קבוצת הקררים על בסיס תרכובות אתאן (Ethane) כגון: R-1150.
- $X = 12$ מציינ את קבוצת הקררים על בסיס תרכובות פרופאן (Propan) כגון: R-1270.
- **הספרה השנייה (y) והספרה השלישית (z) מציינות תתי-קבוצות בקבוצה.**

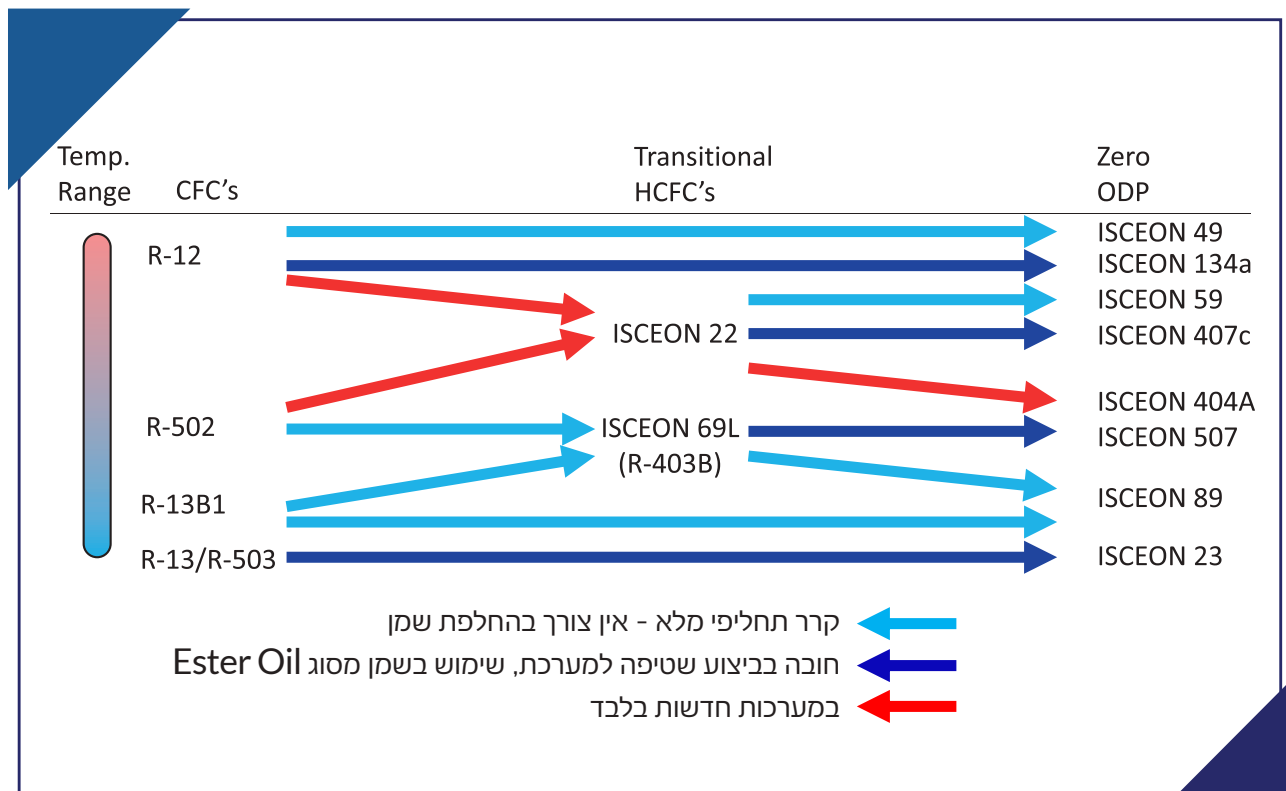
3.2 סוגי קררים ושימושיהם

כאמור, ניתן למצוא בישראל קררים רבים המיועדים לשימוש הן במערכות סטנדרטיות של קירור ומיזוג ביתי (כמו R-12 ו-R-134a למקררים ביתיים, R-22 ו-R-410a למזגנים) והן קררים ייעודיים למערכות מסוימות (כמו R-123 למדחסים צנטריפוגליים).

בפרק הנוכחי, **נסקור את הקררים** שהיו ו/או הינם הנפוצים ביותר בישראל, **נשווה** את תכונותיהם ו**נתאר** את יתרונותיהם, חסרונותיהם, את הדרישות והשינויים שיש לעמוד בהם כדי לאפשר שינוי ומעבר בין קררים ישנים לחדשים, **ומה צופה לנו העתיד** בנושא הקררים הטבעיים.

קררים תחליפיים מ-C.F.C ל-H.C.F.C ל-H.F.C:

תמונה 3.6 - קררים תחליפיים



3.2.1 קררים ממשפחת C.F.C (ChloroFluoroCarbons)

קררים אלו, המכילים אטומים של כלור, הוצאו משימוש בשנת 1996 בגלל פגיעתם הקשה בשכבת האוזון (O_3) ובישראל הם אסורים בייבוא ומכירה. קרר R-11 ממשפחה זו הוגדר כבעל פוטנציאל הפגיעה הגבוה ביותר באוזון, וערכו נקבע ל-100% O.D.P.

קררי C.F.C שהיו נפוצים בשימוש ועדיין ניתן למצוא אותם במערכות ישנות הממשיכות לפעול:

תמונה 3.7 - קרר R-11



טבלה 3.3 - נתוני קרר R-11

שימושים	CCl_3F	R-11
מדחסים	$+23.8^\circ\text{C}$	טמפ' רתיחה (p=1bar)
צנטריפוגליים	18.6 " Hg	לחץ איזוד ($t = 0^\circ\text{C}$)
גדולים לטמפ' נמוכות	11 Psig	לחץ עיבוי ($t = 40^\circ\text{C}$)
	1	O.D.P
	4750	G.W.P
	מינרלי, Alkylbenzene	שמן
	A1	דירוג בטיחות
	R-123	קררים תחליפיים

תמונה 3.8 - קרר R-12



טבלה 3.4 - נתוני קרר R-12

שימושים	CCL_2F_2	R-12
<ul style="list-style-type: none"> מתקני קירור ביתיים + מסחריים לטמפ' בינוניות ונמוכות מזגנים ברכב צ'ילרים גדולים הקצפה 	-29.8°C	טמפ' רתיחה ($p=1\text{bar}$)
	6.8 Psig	לחץ איזוד ($t = -20^\circ\text{C}$)
	124.5 Psig	לחץ עיבוי ($t = 40^\circ\text{C}$)
	1	O.D.P
	10910	G.W.P
	מינרלי, Alkylbenzene	שמן
	A1	דירוג בטיחות
	R-134a, R-401a, R-414B	קררים תחליפיים

תמונה 3.9 - קרר R-502



טבלה 3.5 - נתוני קרר R-502

שימושים	תערובת אזיאטרופית R-22 = 48% R-115 = 52%	R-502
מתקני הקפאה מסחריים	-45°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	13 Psig	לחץ איזוד (t = -30°C)
	224 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0.23	O.D.P
	6200	G.W.P
	Alkylbenzene, מינרלי	שמן
	A1	דירוג בטיחות
	R-402a, R-404A, R-507A	קררים תחליפיים

3.2.2 קררים ממשפחת H.C.F.C (HidroChloroFluoroCarbon)

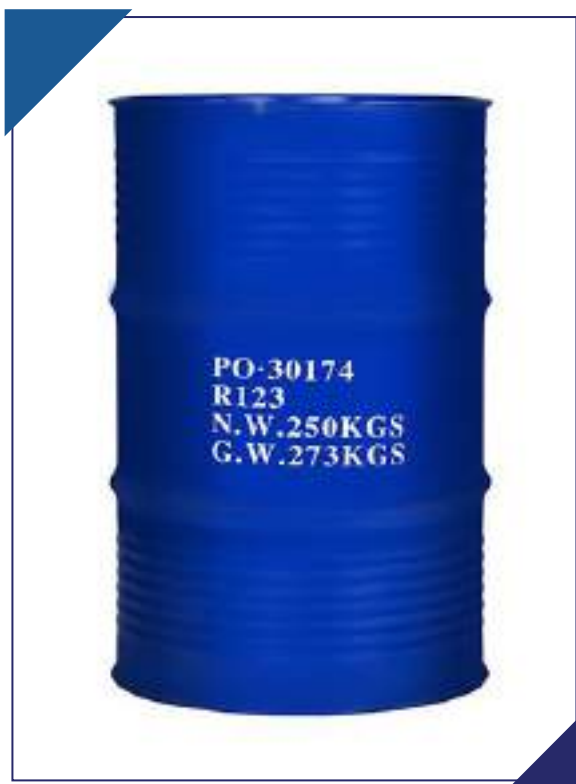
תמונה 3.10 - קרר R-22



טבלה 3.6 - נתוני קרר R-22

שימושים	CHClF ₂	R-22
<ul style="list-style-type: none"> מתקני מיזוג אוויר ביתיים ומסחריים מתקני קירור 	-41°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	60 Psig	לחץ איזוד (t = 0°C)
	205 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0.055	O.D.P
	1810	G.W.P
	מינרלי, Alkylbenzene, Polyolester	שמן
	A1	דירוג בטיחות
R-410A , R-407 A-C	קררים תחליפיים	

תמונה 3.11 - קור R-123



טבלה 3.7 - נתוני קור R-123

שימושים	CF_3CHCl_2	R-123
צילרים בעלי מדחסים צנטריפוגליים (במקום R-11 ו-R-113)	28°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	-10 Psig	לחץ איזוד (t = 0°C)
	8 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0.06	O.D.P
	77	G.W.P
	מינרלי, Alkylbenzene	שמן
	B1 (רעיל)	דירוג בטיחות
	R-1234ze	קורים תחליפיים

תמונה 3.12 - קרר R-401A-B



טבלה 3.8 - נתוני קרר R-401 A-B

שימושים	הרכב הקרר	מספר הקרר
תחליפים ל- R-12 לטמפרטורות נמוכות במערכות בהתפשטות ישירה	R-22 = 53% R-152a = 13% R-124 = 34%	R-401 A-B
	-26.4°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	6.5 Psig	לחץ איזוד (t = -20°C)
	140 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0.037	O.D.P
יש למלא קרר במצב נוזלי	1182	G.W.P
	Mineral + • Alkylbenzene • Polyolester •	שמן
	5°C	גלייד (glide)
	A1	דירוג בטיחות
	R-404A	קררים תחליפיים

תמונה 3.13 - קרר R-402 A-B



טבלה 3.9 - נתוני קרר R-402 A-B

שימושים	הרכב הקרר	הרכב הקרר	מספר הקרר
תחליפים ל - R-502 לטמפרטורות נמוכות במערכות בהתפשטות ישירה יש למלא קרר במצב נוזלי	R-402 B	R-402 A	R-402 A-B
	R-125 = 38%	R-125 = 60%	
	R-290 = 2%	R-290 = 2%	
	R-22 = 60%	R-22 = 38%	
		-46.9°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
		6 Psig	לחץ איזוד (t = -40°C)
		261-250 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
		0.031 - 0.021	O.D.P
		4457 - 2788	G.W.P
		Mineral + • Alkylbenzene • Polyolester •	שמן
	5°C	גלייד (glide)	
	A1	דירוג בטיחות	
	R-507	קררים תחליפיים	

תמונה 3.14 - קררים נוספים מהסדרה שגם בהם נעשה שימוש:



טבלה 3.10 - נתוני קררים נוספים מהסדרה

הרכב הקרר					מספר הקרר
R-124	R-403 B R-290 = 5% R-22 = 56% R-218 = 39%	R-408 A R-125 = 7% R-143a = 46% R-22 = 47%	R-409 A R-22 = 60% R-124 = 25% R-142b = 15%	R-414 B R-22 = 50% R-124 = 39% R-600A = 1.5% R-142b = 9.5%	תרכובת
<ul style="list-style-type: none"> + Mineral Alkylbenzene 	<ul style="list-style-type: none"> + Mineral Alkylbenzene Polyolester 				שמן
<ul style="list-style-type: none"> מיזוג אוויר תחליף ל R-114 	<ul style="list-style-type: none"> מתקני קירור ביתיים ומסחריים לטמפ' נמוכות מאוד תחליף ל R-13B1 	<ul style="list-style-type: none"> מתקני קירור ביתיים ומסחריים לטמפ' בינוניות ונמוכות תחליף ל R-502 	<ul style="list-style-type: none"> מתקני קירור ביתיים ומסחריים לטמפ' בינוניות ונמוכות תחליף ל R-12 	<ul style="list-style-type: none"> מתקני קירור ביתיים ומסחריים לטמפ' בינוניות ונמוכות תחליף ל R-12 	שימושים

3.2.3 קררים ממשפחת H.F.C (Hidro Fluoro Carbon)

קררים אלו נחשבו עד לפני מספר שנים כפתרון לבעיית הפגיעה בכדור הארץ, שכן בתערובות שמהן הם מורכבים לא קיים מרכיב הכלור (Cl) שפגע באוזון.

קררים ממשפחת H.F.C הם תערובות שלחלקן **תכונות זיאטרופיות** (Zeotrope).

בעת מילוי קררים זיאטרופיים למערכת, יש לטעון אותם כתערובת של **נוזל בלבד** כדי להבטיח שמירה על היחסים בין מרכיבי התערובת כפי שקבע היצרן. הכנסת התערובות **במצב צבירה גזי תגרום לכך** שבעת המילוי, המרכיב בעל טמפרטורה האיזוד הנמוכה ביותר יתאייד ראשון ויתפוס את רוב הנפח של המערכת. הדבר יגרום לשינוי היחס בין המרכיבים, ומכאן לשינוי בתכונות הקרר המקורי, **לכן:**

- מילוי קררים זיאטרופיים למערכת **ייעשה תמיד בפאזת נוזל**.
- במקרה של דליפה ואובדן **כמויות ניכרות של קרר, לא ניתן להוסיף קרר** למערכת, אלא יש לרוקן את הקרר מהמערכת, ולטעון את המערכת בקרר מחדש לאחר ביצוע ואקום, וכשהקרר במצב נוזלי בלבד.

תערובות קררים כאלו מסומנות באות A (לדוגמה: R-410A).

קיימות גם תערובות **א-זיאטרופיות** (AZEOTROPE).

לאחר שקררים אלו פותחו, תשומת הלב לשינויי האקלים על פני כדור הארץ (אפקט החממה) הביאה לשינויים בפרוטוקול מונטריאול ולכך שגם קררים אלו, שלרובם מקדם GWP גדול, הגיעו **לסוף דרכם** והחל חיפוש אחר קררים חדשים שיחליפו אותם.

טבלה 3.11 - משפחות קררים והשפעתם על הסביבה

סוג גז קירור	פרוטוקול מונטריאול (מזיק לשכבת האוזון)	השפעה מזיקה על שינוי האקלים	רגולציה להגבלת כמות נצרכת בישראל משיקולים סביבתיים
HCFC	מזיק	-	יבוא וצריכה מוגבלים בישראל עד הפקת צריכה סופית ב - 2030
HFC	מזיק	גבוה	תיתכן הגבלה בשנים הקרובות
אמוניה, CO ₂ , פרופאן ועוד	לא מזיק	נמוך	אין הגבלה

הקררים הנפוצים הנמצאים בשימוש ממשפחה זו:

תמונה 3.15 - קרר R-134a



טבלה 3.12 - נתוני קרר R-134a

שימושים	F_3CCH_2F	R-134a
<ul style="list-style-type: none"> • קירור ביתי, מסחרי ותעשייתי • מיזוג אוויר לרכב • משאבות חום • קירור נזלים 	$-26.4^{\circ}C$	טמפ' רתיחה ($p=1bar$)
	5 Psig	לחץ איזוד ($t = 20^{\circ}C$)
	133 Psig	לחץ עיבוי ($t = 40^{\circ}C$)
	0	O.D.P
	1430	G.W.P
	POE	שמן
	$0^{\circ}C$	גלייד (glide)
	A1	דירוג בטיחות
		קררים תחליפיים

תמונה 3.16 - קרר R-410A



טבלה 3.13 - נתוני קרר R-410A

שימושים	הרכב הקרר	מספר הקרר
<ul style="list-style-type: none"> • מערכות מיזוג אוויר מכל הגדלים • משאבות חום 	R-32 = 50% R-125 = 50%	R-410A
	-51.4°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	105 Psig	לחץ איזוד (t = 0°C)
	340 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	2088	G.W.P
	POE	שמן
	0°C	גלייד (glide)
	R-22 = 100% R-407a = 102%	תפוקה ביחס לקרר
	A1	דירוג בטיחות
R-1234 _{YE} , R-600, R-32	קררים תחליפיים	

תמונה 3.17 - קרר R-404A



טבלה 3.14 - נתוני קרר R-404A

שימושים	הרכב הקרר	מספר הקרר
<ul style="list-style-type: none"> מערכות קירור והקפאה מסחריות הובלה בקירור 	R-143 = 52% R-125 = 44% R-134 = 4%	R - 404A
בגלל מקדם GWP גבוה, מוגבל בשימוש עד 1/2020 באירופה	-45.5°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	15 Psig	לחץ איזוד (t = -30°C)
	250 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	3922	G.W.P
	POE	שמן
	1°C	גלייד (glide)
	A1	דירוג בטיחות
	R-502 = 100%	תפוקה ביחס לקרר
	(במערכות חדשות) R-290	קררים תחליפיים

תמונה 3.18 - קור R-407C



טבלה 3.15 - נתוני קור R-407C

שימושים	הרכב הקור	מספר הקור
<ul style="list-style-type: none"> • מערכות מיזוג אוויר • מתקני צילר לקירור נוזלים 	R-32 = 23% R-125 = 25% R-134a = 52%	R-407C
	-36.6°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	52 Psig	לחץ איוד (t = 0°C)
	210 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	1774	G.W.P
	POE	שמן
	6.4°C	גלייד (glide)
	A1	דירוג בטיחות
	R-22 = 100% R-410a = 98%	תפוקה ביחס לקור
	R-600 (במערכות חדשות)	קורים תחליפיים

תמונה 3.19 - R-407A



טבלה 3.16 - נתוני קרר R-407A

שימושים	הרכב הקרר	מספר הקרר	
<ul style="list-style-type: none"> • מערכות קירור מסחריות • תחליף ל R-404A בגלל מקדם GWP נמוך יותר 	R-32 =23%	R-407A	
	R-125 =25%		
	R-134 =52%		
	-38.9°C		טמפ' רתיחה (p=1bar)
	20 Psig		לחץ איזוד (t = -20°C)
	225 Psig		לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0		O.D.P
	2107		G.W.P
	POE		שמן
	7°C		גלייד (glide)
A1	דירוג בטיחות		
	R-22 =100%	תפוקה ביחס לקרר	
	R-410a =98%		
	R-600, R-290 (במערכות חדשות)	קררים תחליפיים	

תמונה 3.20 - R-507



טבלה 3.17 - נתוני קרר R-507

שימושים	הרכב הקרר	מספר הקרר
<ul style="list-style-type: none"> למערכות קירור תעשייתיות ומסחריות לטמפרטורות נמוכות ובינוניות 	R-134a =50%	R-507
	R-125 =50%	
	-28°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	-10 Psig	לחץ איזוד (t = 0°C)
<ul style="list-style-type: none"> מוגבל לשימוש באירופה עד 1/1/2020 	8 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	3985	G.W.P
	POE	שמן
	1°C	גלייד (glide)
	A1	דירוג בטיחות
	R-404A =100%	תפוקה ביחס לקרר
	R-600, R-290 (במערכות חדשות)	קררים תחליפיים

תמונה 3.21 - קרר R-32



טבלה 3.18 - נתוני קרר R-32

שימושים	CH ₂ F ₂	R-32
מערכות מיזוג אוויר יחידות קטנות ובינוניות לפי הגבלת כמות הקרר בהתאם לתקן EN-378	-51.7°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	103 Psig	לחץ איזוד (t = 0°C)
	345 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	675	G.W.P
	מינרלי	שמן
	A2L	דירוג בטיחות
		קררים תחליפיים

קרר R-32 מחליף כיום את הקרר מסוג R-410A במערכות מיזוג אוויר ביתיות ומסחריות חדשות. אמור להכנס לשימוש גם בישראל בכפוף לאסדרת המקצוע.

יתרונות קרר R-32 מול קררים אחרים ממשפחת HFC:

- דורש פחות קרר, משקל הקרר במערכת נמוך בכ-30% מקרר R-410A.
- דורש קוטרי צנרת קטנים יותר.
- יעילות COP גבוהה יותר ב-10%.
- ביצועים טובים יותר בטמפרטורות חוץ קיצוניות.
- במקרה של הדלקות הגז, **קצב התפשטות האש נמוך** בהרבה מגזים טבעיים דליקים אחרים (פרופאן 6.7 מטר לשנייה לעומת 46 מטר לשנייה בגז R-290).
- כדי שיידלק - חייב ריכוז באוויר של לפחות 13%.

חסרונות קרר R-32 לעומת קררים אחרים ממשפחת HFC:

- בגלל לחצים וטמפרטורות של דחיסה גבוהים, קיימת:
- סכנה להפחתת שימון.
- דרישה לקירור המדחס.
- דליק (ובכל זאת קשה להצתה - A2L) חייב ריכוז מינימלי של 13% לעומת 2%-3% בגזים פחמימנים אחרים.
- בחשיפה ללהבה גלויה, הקרר מייצר חומצת מימן פלואורי (Hydrogen Fluoride). בליעת החומר או שאיפתו יכולים לגרום לנזקים כבדים לריאות, ושט, קיבה ועוד, עד מוות.
- במגע עם העור, יגרמו נזקים כבדים שיופיעו לפעמים רק אחרי 12 עד 24 שעות. חשיפת העור לחומצה בשטח העולה על 160 סמ"ר עלולה לגרום למוות.
- לפני ביצוע הלחמות, יש לשטוף את הצנרת באמצעות חנקן או אוויר ולהבטיח אזור מאוורר.

3.2.4 קררים ממשפחת H.F.O (Hidro Fluoro Olefins)

קררים אלו פותחו לקראת שנת 2011, **אז נכנסו לתוקף התקנות האירופאיות** הדורשת שימוש בקררים בעלי מקדם GWP הנמוך מ-150. החומר הינו תערובת אורגנית לא רוויה, המקשרת פרופאן (ch_3) לא רווי עם מימן (H) ופלואור (F).

עד היום פותחו מספר קררים ממשפחה זו שהינם בעלי הרכב כימי דומה, המיועדים להחליף את הקרר מסוג R-134a במתקני מיזוג אוויר ברכב, מערכות צ'ילרים, משאבות חום ומקררים מסחריים. **מבחינה בטיחותית, הקרר קיבל דירוג A2L**, כלומר **דליק במידה נמוכה**, זאת בגלל היותו מכיל פרופאן שהינו חומר דליק.

(תחום דליקות: $L.E.L = 6.2\% v/v$ - $U.E.L = 12.3\% v/v$). בניסויים שנערכו, נמצא כי **ניתן לערבב את הקרר** עם כ-11% R-134a כדי להפוך אותו לבטוח לשימוש (A1), **וכך לקבל קרר חדש** (R-451A) בעל מקדם $G.W.P = 149$ **שאינו חורג** מתחום מקדם אפקט החממה המותר.

יש לציין כי קררים אלו **אינם** חלופת "drop-in", (כלומר מאפשרים הכנסת הקרר החדש ללא ביצוע טיפול/שינוי במערכת הקיימת), למערכות שפעלו עם קרר מסוג R-134a, מכיוון שהצמיגות שלהם שונה ולכן מהירות הזרימה שלהם בצנרת קיימת תהיה נמוכה בכ-11%, דבר שיגרום להקטנת התפוקה של המערכת ולפגיעה בהסעת השמן דרך המערכת והחזרתו למדחס.

כמו כן, שימוש בקררים אלו במערכות קיימות יגרום להגדלת לחץ הדחיסה בכ-6%.
להתאמת המערכת הקיימת לקררים אלו, **יש לשנות את המדחס** (הגדלת מהירות הסיבוב, הגדלת נפח העברת החומר) ואת אביזר ההתפשטות. לחלופין, אפשר להשתמש בקררים אלו במערכות חדשות שתוכננו בהתאם.

תמונה 3.22 - קרר R-1234yf



טבלה 3.19 - נתוני קרר R-1234yf

שימושים	$\text{CH}_2=\text{CF}_3$	R-1234yf
• מקררים	-30°C	טמפ' רתיחה ($p=1\text{bar}$)
• מסחריים	6.5 Psig	לחץ איזוד ($t = 0^\circ\text{C}$)
• צילרים	133 Psig	לחץ עיבוי ($t = 40^\circ\text{C}$)
• משאבות חום	0	O.D.P
• מזגנים ברכב	4	G.W.P
	מינרלי, POE	שמן
	90%	תפוקה ביחס לקרר R-134a
	A2L (דליק במידה מועטה)	דירוג בטיחות

תמונה 3.23 - קור R-1234ze



טבלה 3.20 - נתוני קור R-1234ze

שימושים	$C_3H_2F_4$	R-1234ze
<ul style="list-style-type: none"> • מקורים • מסחריים • צילרים • משאבות חום • מזגנים ברכב 	-19°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	-1 Psig	לחץ איזוד (t = 0°C)
	97 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	7	G.W.P
	מינרלי, POE	שמן
	88%	תפוקה ביחס לקור R-134a
	A2L (דליק במידה מועטה)	דירוג בטיחות

3.2.5 קררים ממשפחת H.C (Hydro Carbon)

טבלה 3.21 - קררים ממשפחת H.C

הקרר	R-600	R-600a	R-290
נוסחה כימית	CH ₃	CH(CH ₃) ₃	C ₃ H ₈
שם	בוטאן	איזו-בוטאן	פרופאן
טמפ' רתיחה (°C) בלחץ 1bar	-11.6	-11.6	-42.1
כמות ספיגת חום באיוד בטמפ' -25°C (kj/kg)	373	376	406
לחץ איוד בטמפ' -25°C (bar)	0.58	0.58	2.03
תחום דליקות (%)	8.5%-1.5%	8.5%-1.5%	9.5%-2.1%
גרם/מ"ק	203 - 38	203 - 38	177 - 39
טמפרטורת הצתה	460°C	460°C	470°C

הקררים ממשפחת ההידרו-קרבונים (H.C) אינם חדשים במערכות הקירור. קררים אלו היו בשימוש בשנות ה-40 של המאה הקודמת, אך הוצאו משימוש לאחר ריבוי התאונות שנגרמו בשל היותם גז דליק ונפיץ.

קררים אלו הינם תוצרי זיקוק נפט, **ונמצאים בשימוש כגזי בעירה** הן כחלק מגז הגפ"מ (בוטאן ופרופאן) בישראל, והן כגזים למתקני בישול וחימום בארצות אחרות (ארה"ב/אירופה - פרופאן).

מכיוון שכאמור, גזים אלו הינם תוצרי זיקוק של נפט גולמי, **הם זמינים וזולים** ובעלי מקדם הרס אוזון (O.P.D) אפסי ומקדם אפקט חממה (G.W.P) נמוך מאד.

בהתאם לרגולציה האירופאית בדבר הפסקת השימוש בגזי קירור מופלרים (F-GAS), **קררים אלו, מיועדים לתפוס את מקומם של הקררים מהדורות הקודמים** במתקני קירור והקפאה קטנים לשימוש ביתי ובמתקנים בינוניים לשימוש מסחרי.

בהשוואה לקררים שהם מיועדים להחליף, ניתן לראות מהנתונים בטבלה 3.21 כי לקררים החדשים כושר קליטת חום משופר לעומת הקררים הקודמים, וכי הם עובדים בלחצי יניקה נמוכים. R-600 / R-600a בהשוואה לקרר R-12 (54%) ובהשוואה לקרר R-134a (46%).

לקררים החדשים משקל סגולי קטן, כך שאפשר לטעון אותם בכמות קטנה יחסית, **העומדת ברגולציה האירופאית** המגבילה את כמות הקררים הדליקים שניתן לטעון למתקני קירור ביתיים (עד 150 גרם) ולמתקני קירור מסחריים (עד 250 גרם).

המשקל הסגולי הקטן ומכאן משקלם המועט של הקררים במערכת (40% פחות ביחס ל-R-12 ו-45% פחות בהשוואה ל-R-134a), מחייבים את היצרנים להשתמש במדחסים בעלי נפח העברת קרר גדול עבור מערכות הפועלות עם קררים אלו, וזאת כדי לשמור על תפוקות זהות או גבוהות יחסית לקררים הישנים, ועל מהירות זרימה מינימלית בצנרת המערכת של כ-5 מטר/שנייה כדי לאפשר את החזרת השמן מהמערכת למדחס.

שמן הקירור שבו ניתן להשתמש עבור קררים אלו הינו **שמן מינרלי** (כמו במדחסי R-12) או שמן POE. אם משתמשים בשמן מינרלי, מומלץ לדלל אותו בכמות קטנה של שמן מסוג Alkylbenzene (10%-15%), כדי לשפר את מסיסותו בקררים ולהקל את תנועת השמן עם הקרר במערכת עד לחזרתו למדחס.

- **מכיוון שקררים אלו דליקים**, יצרני הציוד חייבים לבצע מספר שינויים בציוד המופעל באמצעותם, כגון:
 - הוצאת כל הרכיבים החשמליים מתוך החלל הפנימי במתקנים שבהם סוללת המאייד נמצאת בחלל הפנימי של המקרר/מקפיא.
 - העלאת רכיבי החשמל שנשארו בתוך המקררים גבוה מעל סוללת המאייד וחיבוריה (הגזים כבדים מהאוויר).
 - החלפת ממסרי ההתנעה של המדחסים לממסרים יצוקים (ptc).

תמונה 3.25 - ממסר התנעה לא אטום



תמונה 3.24 - ממסר התנעה אטום למדחס



- **הוצאה והגבהה** של חיבורי החשמל מעל אזור מיקום המדחס.

כמו כן, **יש לוודא** כי במקרה של דליפת חומר הקירור, נפח הגז שידלוף לא יעלה על הערך של סף הנפיצות/דליקות התחתון (LFL) של החומר ביחס לנפח האוויר, כמפורט בטבלה 3.21. בכל מקרה, **התקנות באירופה אוסרות** לאחסן/להפעיל מתקני קירור והקפאה המכילים קררים אלו בחללים שנפחם קטן מ-1 מ"ק לכל 8 גרם קרר שבמערכת הקירור.

בנוסף, **חל איסור על עיסוק בתיקון מקררים ומקפיאים הפועלים עם קררים מסוג H.C על כל מי שלא עבר תהליך הסמכה ממשלתי, הכולל הדרכה ואימון בטיפול במערכות המכילות גזי קירור דליקים!**

קררים דליקים: קביעת כמות קרר מקסימלית ביחידת מיזוג אוויר/קירור:

על פי תקן 34 של איגוד מהנדסי הקירור והמיזוג האמריקאי ASHRAE, נקבעו מדרגות הסיכון לרעילות הקרר בסימון B (כאשר B1 הינו הנמוך). כמו כן נקבעו מדרגות הסיכון לדליקות/נפיצות הקרר בסימון A כאשר A1 מציין דרגת סכנה נמוכה, ו-A3 מציין את רמת הסכנה הגבוהה ביותר.

קררים	סימון	רמת הדליקות
R-22, R-410a, R-134a	A1	לא דליק
R-32	A2L	דליק ברמה נמוכה
R-1234YF	A2	דליק ברמה בינונית
R-600, R-600a, R-290	A3	דליק ברמה גבוהה

כדי להקטין את הסכנה בשחרור קרר דליק, במקרי דליפה מהמערכת לחלל שבו היא מותקנת נקבעו אמות מידה ודרך חישוב לכמויות מקסימליות של קרר במערכות השונות בהסתמך על **גבול הדליקות התחתון** ו/או על ידי **גבול הדליקות המעשי** כמפורט בטבלה הבאה:

סוג הקרר	גבול דליקות תחתון	גבול מעשי
R-600	0.043 Kg/m ³	0.011 Kg/m ³
R-290	0.038 Kg/m ³	0.008 Kg/m ³
R-32	0.307 Kg/m ³	0.061 Kg/m ³

על סמך נתונים אלו ובהתחשב בנתוני יצרן לגבי כמות הקרר המאוכסנת ביחידת הקירור/מיזוג (כולל בצנרת המחברת את היחידות) ובהתחשב בנפח החלל שבו תותקן היחידה הפנימית ואליו עלול להתנקז הקרר במקרה של דליפת קרר, ניתן קודם לרכישת היחידה, לחשב האם ניתן יהיה להתקינה באותו החלל ללא סיכון בגין הצטברות גז דליק בכמות העולה על המינימום המותר.

סימנים וביאורים:

- A** - שטח החדר
- h₀** - גובה היחידה הפנימית מהרצפה
- h** - גובה החדר
- LFL** - גבול דליקות תחתון
- PL** - גבול דליקות מעשי
- M_{max}** - כמות קרר מקסימלית מותרת
- A_{min}** - שטח חדר מינימלי
- V_r** - נפח החדר הממוזג

א. נוסחת חישוב כמות קרר מקסימלית לפי גבול דליקות תחתון:

$$M_{max} = 2.5 \cdot LFL^{1.25} \cdot h_0 \cdot A^{0.5}$$

ב. נוסחת חישוב לפי גבול דליקות מעשי:

$$M_{max} = PL \cdot V_r$$

דוגמת חישוב מספר 1:

נתון חדר שבו עומדים להתקין מזגן עילי המכיל על פי נתוני היצרן קרר מסוג R-32 בכמות משקלית של 0.6 ק"ג. האם לפי התקינה, יהיה מותר להתקין מזגן זה בחדר שמידותיו הן:

שטח רצפת החדר: 12 מ"ר

גובה החדר: 2.75 מטר

גובה התקנת המזגן מהרצפה: 2.5 מטר

פתרון:

א. חישוב כמות קרר מקסימלית לפי גבול דליקות תחתון:

$$M_{max} = 2.5 \cdot LFL^{1.25} \cdot h_0 \cdot A^{0.5}$$

נציב ונפתור:

$$M_{max} = 2.5 \cdot 0.307^{1.25} \cdot 2.5 \cdot 12^{0.5} = 4.95 \text{ k}^g$$

מכאן: כמות קרר משקלית מותרת לחדר זה על-פי גבול דליקות תחתון הינה 4.95 ק"ג והיא גדולה משמעותית ממשקל הקרר הנמצא ביחידת המיזוג.

ב. חישוב לפי גבול דליקות מעשי:

$$M_{max} = PL \cdot V_r$$

נציב ונפתור:

$$V_r = h \cdot a = 12 \text{ מ"ר} \cdot 2.75 \text{ מ' } = 33 \text{ מ"ק}$$

$$M_{max} = 0.061 \cdot 33 = 2 \text{ ק"ג}$$

מכאן: גם לפי חישוב זה, כמות הקרר הדליק שיכולה להיות בחדר, גדולה יותר מכמות הקרר הדליק שמכיל המזגן, ולכן אין מניעה להתקינה בחדר המבוקש.

דוגמת חישוב מס' 2:

היחידה הפנימית של מזגן מפוצל דירתי ("מיני מרכזי") מיועדת להתקנה מעל תקרה מדומה (תקרת גבס) שגובהה 2.4 מ' בחדר אמבטיה ששטחו 6 מ"ר וגובהו 2.90 מ'. לפי נתוני היצרן וחישובי אורך הצנרת, כמות הקרר שתכיל יחידת המיזוג תהיה 3.85 ק"ג. **האם ניתן על פי הטבלה (והתקן) להתקין את המזגן על פי המתוכנן?**

א. חישוב כמות קרר מקסימלית לפי גבול דליקות תחתון:

$$M_{\max} = 2.5 \cdot LFL^{1.25} \cdot h_0 \cdot A^{0.5}$$

$$M_{\max} = 2.5 \cdot 0.307^{1.25} \cdot 2.4 \cdot 6^{0.5} = 3.36 \text{ k"g}$$

ב. חישוב לפי גבול דליקות מעשי:

$$M_{\max} = PL \cdot V_r$$

נציב ונחשב:

$$V_r = h \cdot a = 6 \text{ מ"ר} \cdot 2.90 \text{ מ"ק} = 17.4 \text{ מ"ק}$$

$$M_{\max} = 0.061 \cdot 17.4 = 1.06 \text{ ק"ג}$$

מכאן: לפי חישובים אלו, כמות הקרר הדליק שמכיל המזגן גדולה בהרבה מהכמות המותרת להתקנה שיכולה להיות בחדר, ולכן אין להתקינו בחלל המבוקש.

קררים כגזים אינרטיים - כמות קרר מרבית ליחידת מיזוג בהתאם להתפשטות הגז ולנפח החדר

גם קררים שאינם מוגדרים כדליקים או כרעילים המאוכסנים בלחץ גבוה מאד במערכת, באם יפלטו לחלל החדר, עלולים לתפוס את מקום האוויר ולגרום לחנק כתוצאה מחוסר חמצן.

לצורך כך נקבעו גם מקדמים לריכוזי הקררים שונים (השונים בהרכבם ובתכונותיהם) כמפורט בטבלה.

טבלה 3.22 - מקדמים לריכוז קררים

ריכוז משקלי מותר בחדר	סוג הקרר
0.42 Kg/m ³	R-410a
0.21 Kg/m ³	R-22
0.21 Kg/m ³	R-134a
0.5 Kg/m ³	R-404a
0.9 Kg/m ³	R-12
0.52 Kg/m ³	R-507

לדוגמה: האם ניתן להתקין מזגן עילי שבו קרר מסוג **R-410a** במשקל 1.3 ק"ג בחדר שנפחו 21 מ"ק?

פתרון:

Vr - ריכוז הקרר המותר בחדר נמדד ב ק"ג/מ"ק (kg/m³)
M - כמות משקלית של הקרר ביחידת הקירור/מיזוג (ק"ג, kg)
V - נפח החדר ב מ"ק (m³)

$$Vr = \frac{M}{V}$$

$$Vr = \frac{1.3 \text{ ק"ג}}{21 \text{ מ"ק}}$$

$$Vr = 0.0619 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

מכאן: מאחר והתוצאה המתקבלת, קטנה מהריכוז המותר בחדר לקרר זה ניתן להתקין בחדר זה, את המזגן המוצע.

להלן ריכוז תכונות הקררים הנפוצים מסוג זה:

תמונה 3.26 - קרר R-600



טבלה 3.23 - נתוני קרר R-600

שימושים	N-BUTHAN	R-600
מחליף את R-12 ואת R-134a במתקני קירור ביתיים ומסחריים קטנים	-11.6°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	-8.5 Psig	לחץ איוד (t = -25°C)
	40 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	4	G.W.P
	מינרלי או POE	שמן
	A3 (דליק)	דירוג בטיחות

תמונה 3.27 - קרר R-600a



טבלה 3.24 - נתוני קרר R-600a

שימושים	ISO-BUTHAN	R-600a
מחליף את R-12 ואת R-134a במתקני קירור ביתיים ומסחריים קטנים	-12.4 °C	טמפי' רתיחה (p=1bar)
	8 Psig	לחץ איזוד (t = 0°C)
	63 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	20	G.W.P
	מינרלי או POE	שמן
	A3(דליק)	דירוג בטיחות

תמונה 3.28 - קרר R-290



טבלה 3.25 - נתוני קרר R-290

שימושים	PROPANE	R-290
מחליף את R-12 ואת R-134a במתקני הקפאה ביתיים ומסחריים	-42.5°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	9.3 Psig	לחץ איוד (t = -30°C)
	185 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	3	G.W.P
	POE	שמן
	A3 (דליק)	דירוג בטיחות

שימו לב: משפחת הקררים מסוג H.C כוללת קררים רבים נוספים מעבר לקררים המפורטים לעיל, שנכון ליום כתיבת פרק זה, הם השימושיים ביותר בישראל. קררים אלה יכולים להיות חומרים טהורים או תרכובות הבנויות ממספר חומרים. כל החומרים הינם דליקים ומסווגים בדרגת סיכון A3.

טבלה 3.26 - דוגמאות לחומרים נוספים בדרגת סיכון A3

R-1270	R-1150	R-601a	R-601	R-170	R-50	מספר הקרר
Propylane	Ethylane	Iso-Pentane	n-Pentane	Ethane	Methan	שם
פרופילן	אתילן	איזו-פנטן	פנטן	אתאן	מתאן	

3.2.7 קררים טבעיים נוספים
3.2.7.1 CO₂ - ידיד או אויב?

תמונה 3.29 - קרר R-744



טבלה 3.27 - נתוני קרר R-744

שימושים	CO ₂	R-744
שימושי למערכות הקפאה לטמפ' קיצוניות, יכול לפעול במערכת כפולה או דו-שלבית	-78.5°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	83 Psig	לחץ איזוד (t = -50°C)
	1,400 Psig (95 atm) טרנס-קריטי	לחץ במעבה (t = 40°C)
	0	O.D.P
	1	G.W.P
	מינרלי	שמן
	B1	דירוג בטיחות

מצד אחד, על פי מחקרים הריכוז הגדל של דו-תחמוצת הפחמן (CO₂) באטמוספירה הוא הגורם העיקרי להתגברות אפקט החממה ולהתחממות הגלובלית.

מצד שני, אחד הפתרונות המקובלים כיום להקטנת אפקט החממה, הוא החלפתם של גזי הקירור המשמשים כיום במערכות הקירור, בגז ה- CO_2 כגז קירור ידידותי לסביבה. הכיצד? **כדי להסביר את הסתירה לכאורה בנושא הפחמן הדו-חמצני, יש להכיר את יתרונותיו ועקרונות פעולתו כחומר קירור.**

כללי:

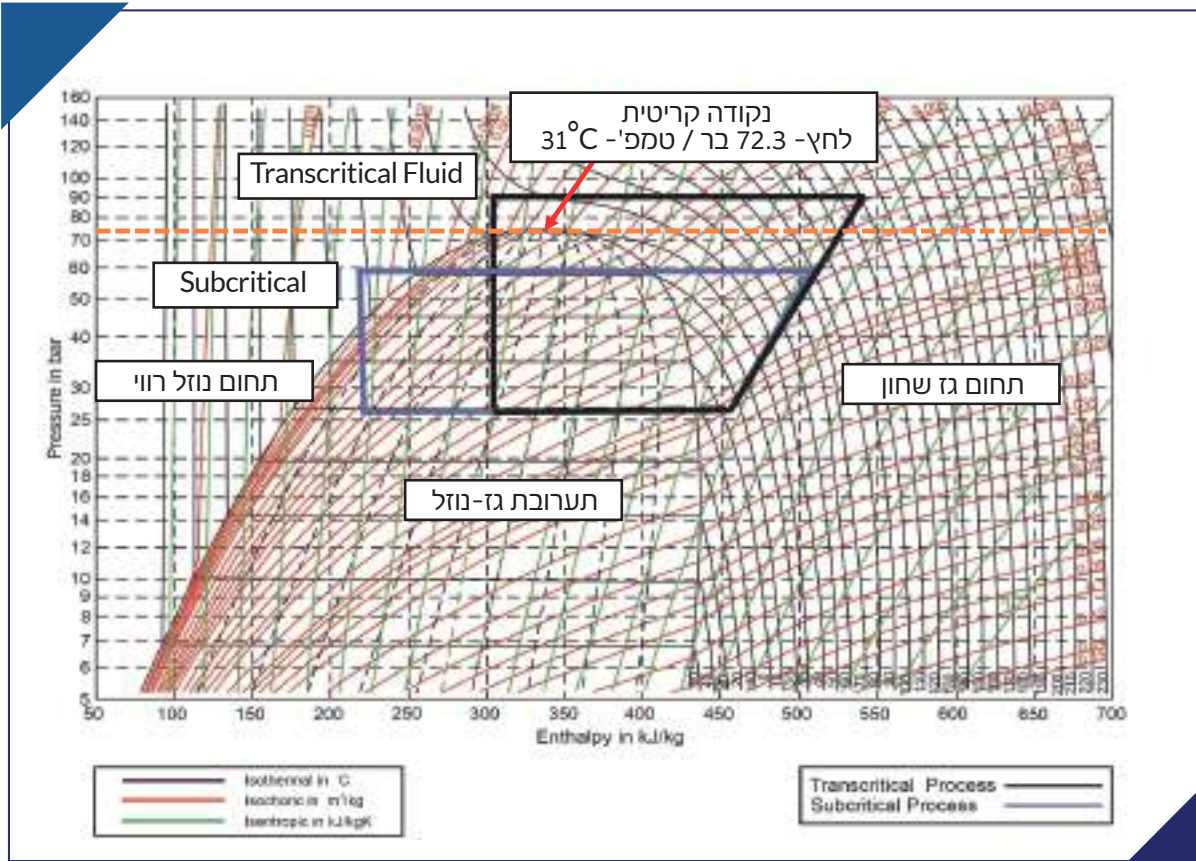
אחת מהטכנולוגיות המתחדשות של מערכות הקירור מתבססת על **שימוש בדו-תחמוצת הפחמן כגז קירור משני** במערכת מסוג "קסקדה", שהיא מערכת המורכבת משתי מערכות קירור מקבילות, בעלות מחליף חום אחד משותף.

במערכות אלו, גז ה- CO_2 משמש כקרר למערכת הלחץ הנמוך הפועלת בטמפרטורות נמוכות (עד -55°C).

במערכות הפועלות בטמפרטורות ולחצים כה נמוכים, **הגדלת הלחץ והטמפרטורה** לערכים הנחוצים לפעולת סילוק החום במעבה, **גורמת להגדלת העומס על המדחס** (צריכת אנרגיה מוגברת, בלאי מואץ). לכן נהוג להשתמש במערכת מקבילה, המקררת את המעבה של מערכת הלחץ הנמוך לערכי טמפרטורה ולחץ סבירים, אותם ניתן להזין למדחס המערכת ללחץ גבוה (המערכת הראשונית), שבה גז הקירור הראשוני הוא בדרך כלל אמוניה.

בשיטה זו, מערכת ה- CO_2 פועלת בלחצי עבודה נמוכים יחסית, הנמצאים מתחת ללחץ הקריטי של הקרר ($31^\circ\text{C} = 72 \text{ bar}$). **תחום לחצים זה מוגדר כתת-קריטי (sub-critical).**

קיימות גם מערכות שבהן משתמשים בקרר מסוג דו-תחמוצת הפחמן במעגל קירור בודד, ואז מתבטא הדבר בעבודת הקרר בתחומים **שמעבר לטמפרטורה הקריטית** שלו (**trans-critical**) (ראו תמונה 3.30).



שמירה על איכות הסביבה:

כאמור, ל- CO_2 כגז קירור יש מקדם אפקט חממה הנמוך מאוד באופן יחסי לגזי קירור אחרים שאותם הוא מחליף (R-410A - GWP = 2088, R-22 - GWP = 1810). **כדי להבין את ההבדל**, די אם נציין כי הנזק שיגרם 1 ק"ג קרר HFC 410A שייפלט לאטמוספירה, שווה ערך לנזק שייגרם מפליטה של כ-2,088 ק"ג קרר CO_2 .

היבט כלכלי:

בהשוואה למערכות המופעלות באמוניה (R-717), שגם הוא גז טבעי, הקרר CO_2 מצטיין **ביתרונות כלכליים רבים** המתבטאים בעלות נמוכה יותר של הציוד ובצריכת אנרגיה מופחתת במתקני הקפאה (מתחת ל- -35°C), **מהסיבות הבאות:**

1. צפיפותו הגבוהה של גז דו-תחמוצת הפחמן (R-744) מאפשרת להקטין את גודלה הפיזי של המערכת ומרכיביה ביחס של 1:8, לעומת מערכות הפועלות עם אמוניה.
2. כמות השמן במערכת CO_2 קטנה ביחס של 1:25 בהשוואה לאמוניה.
3. צריכת האנרגיה קטנה ב-20% ביחס למתקן אמוניה דו-שלבי מסורתי.
4. חומר הקירור זול יותר, זמין, ואינו מזיק לאדם ולסביבה במקרה של דליפה.

מבין הקררים הטבעיים לטמפרטורות נמוכות מאוד (-55°C), ה- CO_2 הינו היעיל ביותר.

בטיחות:

בניגוד לאמוניה שהינו גז רעיל (סיווג B2), ולבוטאן (R-600a) ולפרופאן (R-290) שהינם גזים דליקים ומסוכנים (סיווג A3), **גז ה- CO_2 אינו דליק ואינו רעיל** (דירוג בטיחות A1 לפי ASHRAE).

למרות זאת, במקום סגור יש למנוע מצב שדליפת CO₂ תגרום ליצירת ריכוז גבוה של הגז, שכן אז יש חשש לחנק כתוצאה מכך שהגז, בהיותו חומר אינרטי, ידלוף ויתפוס את נפח החלל. לכן רצוי שלא למקם את רכיבי המערכת במקום נמוך ולא מאוורר. כמו כן, רצוי למקם גלאי התרעה על חוסר חמצן.

3.2.7.2 אמוניה (NH₃)

תמונה 3.31 - קרר R-717



טבלה 3.28 - נתוני קרר R-717

שימושים	אמוניה	R-717
קרר משני במערכות מסחריות לקירור ולמיזוג אוויר	-33.6°C	טמפ' רתיחה (p=1bar)
	48 Psig	לחץ איזוד (t = 0°C)
	210 Psig	לחץ עיבוי (t = 40°C)
	0	O.D.P
	0	G.W.P
	מינרלי	שמן
	B2 (רעיל)	דירוג בטיחות

גם גז האמוניה הינו חומר טבעי המופק מהטבע או בתהליכים סינטטיים. למרות היות האמוניה גז רעיל (דירוג בטיחות B2 לפי ASHRAE), יתרונותיו הרבים הביאו לכך ששנים רבות ישמש כחומר קירור בחדרי קירור גדולים ובמערכות מיזוג אוויר. מאחר שגז האמוניה הוא חומר מסוכן, נהוג להשתמש בו במערכות דו-שלביות שבהן הוא נמצא מחוץ למתקנים, בחדרי מכונות ומתחמים מופרדים.

במקרים כאלה, העברת הקור תתבצע על ידי קירור המים (במערכות לטמפרטורות גבוהות) או תמלחת (brine) במערכות לטמפרטורות הנמוכות מ-0°C, והעברה ליחידות הקצה הנמצאות בתוך חדרי הקירור או באזורים הממוזגים.

יתרונות האמוניה:

במערכות משולבות אמוניה-CO₂ או אמוניה-brine (מים + אתילן גליקול), **ניתן למצוא את היתרונות הבאים:**

- זהו הקרר **היעיל ביותר מבחינה אנרגטית** למטרות מיזוג אוויר, צינון וקירור לטמפרטורות בינוניות (תפוקת איוד הגבוהה ביותר ליחידת משקל של הקרר).
- גז האמוניה הוא **זול וזמין**.
- נדרשת **כמות קטנה יחסית** של גז אמוניה לקבלת תפוקות קירור גבוהות בהשוואה לקררים מסוג HFC.
- זהו הקרר **הידידותי ביותר לסביבה**: GWP=0, ODP=0.
- גז האמוניה נותר בחדר המכונות: באזור הטכני, מחוץ למתקן, תחת בקרה של מפעילים מיומנים.
- לקרר ריח חריף המאפשר **גילוי מהיר וקל** של דליפות.
- כמות האמוניה במתקן משולב עם דו-תחמוצת הפחמן **קטנה** עד כדי 1/10 ממתקן האמוניה.
- משתמשי הקצה **אינם נחשפים לסיכונים קיימים** מהחשיפה לדליפות אמוניה במתקן מסורתי.
- המתקן בכללותו **בטוח יותר לסביבה** הקרובה והרחוקה.

חסרונות השימוש באמוניה מבחינה בטיחותית:

- קרר האמוניה מסווג בדרגת בטיחות B2 לפי ASHRAE.
- בעל **ריח חריף ובלתי נסבל** גם ברמות ריכוז נמוכות באוויר.
- אמוניה הוא גז רעיל ונגרמו מקרי מוות מדליפות שלו, למשל בהוד חפר באזור התעשייה עמק חפר. כמו כן הוא עלול להטיל מגבלות על שימושים בסביבתו ונדרשים לעיתים מרחקי הפרדה גדולים!
- הגז **קל מהאוויר ומתפשט** מהר בסביבה.
- יש **להגביל** את נוכחות האמוניה לאזורים הטכניים בלבד (מרכז אנרגיה, חדר מכונות וכו').
- על פי **תקנות המשרד להגנת הסביבה**, יש חובה להגביל את כמויות האמוניה המאוחסנות לפי פרמטרים מחמירים, ובהתאם למיקום מכלי האחסון ביחס למבנים וכו'.

טיפול בדליפות אמוניה:

דליפות אמוניה **יזוהו בקלות בגלל הריח החריף** הייחודי לגז זה. מכיוון שגז האמוניה מסיס במים, **ניתן לנטרל אותו** ולפרקו על ידי שימוש במערכת מתזים שתותקן מעל מכלי האמוניה, או באזור שבו מרוכז הצידוד של מערכות האמוניה. בכל מקרה, **הנחיות הבטיחות דורשות התקנת אמצעי גילוי ונטרול אוטומטיים** של החומר.

3.2.7.3 קררים טבעיים נוספים

פרט לקררים הטבעיים שהוזכרו לעיל, **קיימים עוד מספר חומרים שיכולים לשמש כקררים**, אך השימוש בהם **אינו נפוץ**, הן בגלל תפוקות נמוכות ונצילות נמוכה ביחס לקררים שהוזכרו, והן בגלל שימוש בקררים אלו דורש מערכות מיוחדות ויקרות.

הקררים הם:

- אוויר - R-729
- מים - R-718

3.3 קביעת נתוני לחץ/טמפרטורה לקררים

אם בעבר היה נהוג להשתמש בטבלאות מודפסות כדי להצליב נתוני לחץ וטמפרטורה לכל קרר וקרר, הרי שכיום ישנן מספר אפליקציות חינמיות שמפרסמות חברות יצרניות של קררים או רכיבי מערכות הקירור ונותנות מענה לנושא.

תמונה 3.32 - מסכים מתוך אפליקציית Refrigerant Slider



3.4 מחזור קררים

כדי למנוע נזקים נוספים, הן לשכבת האוזון והן בהגדלת אפקט החממה, **תוקנו ב-1992 תקנות האוסרות** שחרור פלואורו-פחמנים מוכלרים (C.F.C) והידרו-פלואורו-פחמימנים מוכלרים (H.C.F.C) לאטמוספירה, **ומחייבות מחזור של הקררים.**

כמו כן, התקנות מחייבות **סילוק מתקנים** המכילים קררים לאתרי מחזור מיוחדים, שבהם יישאבו הקררים למכלים מיוחדים ויובלו למפעלים לשם פירוק, או יאוחסנו באתרים מיוחדים.

3.4.1 הגדרות

3.4.1.1 ציוד מיזוג אוויר/קירור: מערכות המיועדות לקירור, מיזוג אוויר וחימום, שתהליכיהן מושגים באמצעות שימוש בקררים המופיעים ברשימת החומרים שבפיקוח.

3.4.1.2 שירות לציוד: התקנה, בדיקה, תחזוקה ופירוק של ציוד, כולל פעולות מחזור והשבה של חומרי קירור שבפיקוח.

3.4.1.3 השבת קררים (Recovery): פעולה שמטרתה לאסוף קררים ממערכת או ציוד לפני הטיפול במערכת או לפני הוצאתה משימוש, ולאחסנם במכל רב-פעמי במטרה להשיב את חומר הקירור למערכת לאחר מכן (Recycling), או להעבירו למפעל לצורך השבתו למצבו כקרר חדש (Reclaiming).

3.4.1.4 תהליך מחזור קררים (Recycling): פעולה הכוללת ניקוי הקרר מלכלוך ורטיבות באמצעות מערכת סינון בסיסית, במטרה להשיבו לפעולה במערכת שממנה הוצא.

3.4.1.5 תהליך חידוש קררים (Reclaiming): פעולה הכוללת תהליך ריקון המערכת/הציוד מהקררים הנמצאים בהם, והעברתם בתהליך הכולל סינון, ייבוש, טיהור וזיקוק בתהליכים כימיים, עד לרמה שבה תכונות החומר הממוחזר זהה לתכונות חומר זהה שלא נעשה בו שימוש קודם (פעולות אלו נעשות בדרך כלל במפעלי יצרני הקררים).

3.4.1.6 מתקן/ציוד להשבת קררים: מתקן/ציוד או מכונה שמאפשרים לבצע את התהליך המתואר לעיל (והמתאים לתקן האמריקאי 740 - A.R.I).

3.4.1.7 מתקן/ציוד למחזור קררים: מתקן/ציוד או מכונה המאפשרת את הוצאת הקררים מהמערכת/ביצוע תהליך המחזור כמתואר בסעיף 3.4.1.3 לעיל (ומתאים לדרישות תקן 700 - A.R.I).

3.4.1.8 מכל מחזור קררים: מכל רב-פעמי המסומן (על-פי התקן האירופאי) בצבע כתף צהוב, בעל ברז כפול להכנסה או הוצאה של גז/נוזל. הברז יהיה מוגן במגן קבוע (גדר) כנגד פגיעה.

תמונה 3.35 -

ברז כפול במכל מחזור



תמונה 3.34 -

מכונת מחזור קררים



תמונה 3.33 -

מכל למחזור קררים



3.4.1.8 חומרי קירור שבפיקוח

מדינת ישראל אשררה בשנת 1992 את **אמנת וינה ופרוטוקול מונטריאול**, ומיישמת את הדרישות הקבועות באמנה ובפרוטוקול בדבר חומרים המדללים את שכבת האוזון. **החובות הנגזרות מיישום** האמנה והפרוטוקול בתחום הייבוא נקבעו על ידי חובת רישוי יבוא שנחקקה באמצע שנות התשעים, ובהמשך באמצעות **תקנות החומרים המסוכנים "יישום פרוטוקול מונטריאול" כפי שנחקקו בשנת 2004** על ידי המשרד להגנת הסביבה. נושא הקררים התורמים להגדלת אפקט החממה, בא לידי ביטוי במפגש שהתקיים בקיגאלי שברואנדה באוקטובר 2016. במפגש זה אומץ תיקון לפרוטוקול מונטריאול (להגנה על שכבת האוזון), אשר מגדיר את החומרים המשפיעים על אפקט החממה **ומצרף אותם לרשימת החומרים שבפיקוח**. כמו כן, נקבעו מדיניות ולוחות זמנים לצמצום הייצור והגבלת השימוש בחומרים מסוג HFC, שהינם גזי חממה חזקים ועיקר שימושם הינו כגזי קירור (קררים) במערכות קירור ומיזוג אוויר.

1. קררים מפוקחים מסוג **C.F.C**, הם חומרים שסימונם הבינלאומי הינו:
 - R-11, R-12, R-13, R-113, R-114, R-115, R-211, R-212, R-213, R-214, R-215, R-216, R-217
2. קררים מפוקחים מסוג **H.C.F.C**, הם חומרים שסימונם הבינלאומי הינו:
 - R-21, R-22, R-31, R-121, R-122, R-123, R-124, R-131, R-132, R-133, R-141, R-142, R-142b, R-151, R-221, R-222, R-223, R-224, R-205, R-225a, R-226, R-231, R-232, R-233 R-234, R-235, R241, R-242, R-240, R-244, R-251, R-252, R-253, R-261, R-262, R-27
3. קררים מפוקחים מסוג **H.F.C** שאינם מכילים כלור אמנם אינם מזיקים לאוזון, אך שייכים לגזי החממה.
 - לדוגמה: R-404A, R-407A, R-410A

3.5 נוהל ריקון וטעינת קררים למערכות/מתקנים של ציוד קירור, מיזוג אוויר וחימום

3.5.1 הגדרות

3.5.1.1 מתקין ציוד/מערכות לקירור ומיזוג אוויר: איש שירות/אחזקה או התקנה, הנושא תעודת מקצוע בתחום הקירור/מיזוג אוויר מטעם מנהל האגף להכשרה מקצועית במשרד העבודה או משרד החינוך. לאחר אסדרת המקצוע: המחזיק ברישיון מורשה קירור ומיזוג אוויר בתוקף, מטעם האגף לרישוי ורישום עיסוקים במשרד העבודה (בהתאם להרשאות וההגבלות שברישיונו).

3.5.1.2 נוהל שירות לציוד קירור ומיזוג אוויר: רשימה לוגית של פעולות טכניות שעל נותן השירות המוסמך לבצע לצורך ביצוע פעולות אחזקה במערכות קירור ומיזוג אוויר, במטרה למנוע שחרור אקראי או יזום לאטמוספירה של חומר קירור מפוקח. **הנוהל יכלול** את הפעולות הנדרשות גם לצורך ביצוע **מטלות נלוות**, כגון אחסון, הובלה ופיקוח על הקררים לסוגיהם.

3.5.1.3 ציוד מיזוג אוויר/קירור: מערכות המיועדות לקירור, מיזוג אוויר וחימום, שתהליכיהן מושגים באמצעות שימוש בקררים המופיעים ברשימת החומרים שבפיקוח.

3.5.1.4 שירות לציוד: התקנה, בדיקה, תחזוקה ופירוק של ציוד, כולל פעולות השבה ומחזור של חומרים (קררים) שבפיקוח.

3.5.2 מטרת הנוהל:

א. הנוהל בא להגדיר את אופן ביצוע פעולות השירות/אחזקה למתקני קירור ומיזוג אוויר, המבוצעות למטרת בניית המערכות, הפעלתן מחדש לאחר ביצוע פעולות האחזקה ו/או לצורך הוצאתן משימוש.

ב. הנוהל מגדיר ומפרט את מהלך ביצוע פעולות האחזקה הקשורות בשימוש בחומרים מפוקחים, כגון:

- ריקון המערכת מהקרר.
- טעינת המערכת בקרר.
- בדיקות מונעות לצורך מניעת דליפת קררים.

כל זאת במטרה להקטין את הסיכון שבשחרור לא מבוקר של החומרים המפוקחים (קררים) לאטמוספירה.

ג. הנוהל יקצה ויגדיר את הציוד הסטנדרטי לביצוע פעולות האחזקה המפורטות, תוך כדי ציון מאפייני הציוד הנדרש וההבדלים שבין סוגי הציוד.

3.5.3 טיפול ואחזקה במערכות הקירור של מתקני קירור ומיזוג אוויר

1. לא ייגש מתקין ציוד קירור/מיזוג אוויר לביצוע פעולות שירות למערכת/ציוד המכילים קררים שבפיקוח, אלא אם הוא מצויד במתקן השבת קררים הכולל מכונת השבה ומכל רב-פעמי לאחסון הקרר, ומיומן בהפעלתם.

הפעולות המחייבות את האמור לעיל הינן:

א. איתור נזילות.

ב. ריקון מערכת הקירור מהקרר שבתוכה.

ג. חיתוך, פירוק והסרה של צנרת הקירור או חלק ממנה.

ד. פירוק והסרה לצורכי שיפוץ או החלפה של אחד ממרכיבי מערכת הקירור.

הערה: במערכות המצוידות בהתקן ריכוז קרר בכונס הנוזלים, ניתן לרכז את הקרר לכונס טרם התחלת פעולות האחזקה, ובלבד שהכונס ייסגר בברז שאינו חשמלי ושהאחזקה לא תתבצע על רכיבי צד הלחץ הגבוה של המערכת.

2. **איתור נזילות:** איתור נזילות יבוצע באמצעות גלאי דליפות בעל קתודה קרה C.C.D. ורגישות (יכולת איתור נזילות) של כ-10 גרם/שנה.
3. **תיקון הדליפה:**
- בדליפה הנובעת** מחיבור הברגה רופף, יש **להדק** את אומי החיבור עד לביטול הדליפה.
 - בדליפה הנובעת** מפגם/סדק/שבר בצינור או באביזר, יש **להשיב** את הקרר באמצעות מתקן השבת קררים למכל אחסון בטרם התחלת פעולות תיקון הדליפה.
4. **ריקון המערכת מחומר קירור (לצורך השבה/מחזור):**
- יש **לחבר** למערכת סעפת שירות בעלת מדי לחץ מתאימים לקררים המושבים.
 - יש להפעיל את מכונת ההשבה על מנת **לרוקן את הקרר** מהמערכת.
 - יש להשתמש בצינורות שאביזריהם **מתאימים** לסוגי ההברגות בהתאם לסוג הקרר.
 - עם סיום הוצאת הקרר, יש **לחתום** את המערכת למניעת חדירת רטיבות ולכלוך לתוכה.
 - יש לשמור את המכל **ולהעבירו לספק/יצרן** הקררים למחזור ו/או השמדה.
5. **שימוש במכונת השבה/מחזור:**
- מכונת השבה/מחזור הן **מכונות אוטומטיות** המצוידות במדחס ומעבה (מערכת פיקוד לחץ המכבה את המכשיר עם הגעת הלחץ ל 1 - אינץ' כספית).
 - מכונת ההשבה/מחזור תהיה **בעלת כושר** יניקת קרר של 30-38 ק"ג/שעה פאזה גזית ושל 230-250 ק"ג/שעה נוזל.
 - מכונת ההשבה (Recovery) תצויד** בהתקנים להפרדת שמן הקירור מהקרר ובאביזרי סינון בקו לפני הכנסת הקרר למיכל ההשבה.
 - מכונת המחזור (Recycling) תצויד** בנוסף גם במסנני פחם ואביזרי ניטור נוספים, בכדי לטפל בקרר לפני הכנסתו למכל ההשבה או הכנסתו למערכת אחרת.
 - רצוי להשתמש במכונת השבה/מחזור ניידת בעלת התקן נשיאה על שכם נותן השירות. מכל ההשבה במכונות אלו אינו חלק אינטגרלי מהמכונה **ויש לשאתו בנפרד**.
 - מיכל האחסון לקררים המושבים/מוחזרים יהיה מכל תקני לשימוש **רב-פעמי**, בעל ברז כפול וידיית אחיזה המגינה על אביזרי המכל.
6. **מילוי המערכת בקרר ממוחזר/מושב:**
- לאחר תיקון הליקויים והחזרת המערכת למצב תקין, ניתן להחזיר את הקרר למערכת.
- המילוי ייעשה בצורה הבאה:**
- הכנת המערכת לקליטת הקרר:** ביצוע ואקום למערכת הקירור באמצעות משאבת ואקום. **הערה:** משאבת הוואקום הרצויה תהיה דו-דרגתית, בעלת כושר ריקון אוויר של 5-3 cfm למתקנים ביתיים ושל 8-5 cfm למתקנים מסחריים.
 - מכונת הוואקום תהיה מסוגלת להוריד את הלחץ במערכת אטומה לכדי 30-30 אינץ' כספי (25 מקרון).
- ב. השבת הקרר למערכת:**
- יש להשתמש במתקן שקילה אלקטרוני** בכדי לאפשר את השבת הקרר בפאזה נוזלית למערכת (נדרש בקררים מסוג HFC ורצוי בקררים מסוג HCFC ו CFC) בהתאם למשקל הקרר, כפי שנקבע ע"י יצרן מערכת הקירור/מיזוג האוויר.
 - רצוי להשתמש במערכת שקילה** בעלת ברז (מודול) חשמלי העוצר אוטומטית את מילוי הקרר כשהמשקל מגיע לערך הרצוי.

ג. אופן מילוי קרר למערכת באמצעות מערכת שקילה ממוחשבת:

1. יש לוודא את **סוג הקרר** המוכנס למערכת.
 2. **לאחר ביצוע הוואקום**, יש לחבר את צינור השירות למכל האחסון מצד אחד ולברז החשמל מצד שני. את הברז יש לחבר למכל באמצעות סעפת שירות המתאימה ללחצי עבודת הקרר המוחזר.
 3. **יש לכוון את המשקל והמודול** לכמות הקרר המדויקת שיש להכניס למערכת.
 4. יש להפעיל את המשקל **ולאפשר כניסת קרר** בפאזה נוזלית למערכת עד להפסקה אוטומטית של המילוי ע"י מערכת השקילה הממוחשבת.
- הערה:** בזמן המילוי המערכת לא תופעל.

ד. אופן מילוי קרר למערכת ללא ברז חשמלי:

- א. יש לחבר ישירות את המכל למערכת באמצעות סעפת שירות תקנית בעלת מנומטרים שיכולים לעמוד בלחצי הקרר הרלוונטי.
 - ב. יש לפתוח את ברזי הסעפת ולאפשר הכנסת קרר בפאזה נוזלית למערכת עד הגעת המשקל המוכנס לערך הרצוי.
 - ג. יש לסגור את ברזי הסעפת ואת ברזי המכל ולנתק את הצנרת מפתחי המערכת.
- הערה:** בזמן המילוי בפאזה נוזלית, המערכת צריכה להיות במצב של ואקום (ריקנות) בכדי לאפשר כניסת קרר ללא צורך בסיוע משאבות עזר.

7. בדיקות לאחר מילוי קרר:

- בדיקת **אטימות/נזילות** תיעשה לרכיבי המערכת הנמצאים באזור הלחץ הנמוך לפני הפעלתה (אזור הלחץ הנמוך נמצא אז בלחץ גבוה יחסית).
 - בדיקת **נזילות לאביזרים וחיבורים** באזור הלחץ הגבוה תיעשה לאחר הפעלת המערכת.
 - לצורך הבדיקה **נשתמש שוב** במתקן גילוי נזילות מסוג C.C.D כמתואר בסעיף 2 לעיל.
 - במתקנים ומערכות גדולים הנמצאים ופועלים במקום שבו מרוכזות מערכות קירור רבות, **ניתן ואף רצוי** "לצבוע" את הקרר בצבע (רגיל או זרחני), בכדי לאפשר לגלות דליפות קרר גם בבדיקות ראייה המבוצעות מדי יום ביומו למערכות מאין אלו.
- הערה:** יש לבחור צבע המאושר לשימוש הן ע"י יצרני הקררים והן ע"י יצרני המדחסים הפועלים במערכת.

3.5.3 טיפול בקררים ואחסון קררים

- א. **אין להשתמש בקררים לכל צורך אחר**, פרט לשימוש כקררים במערכות קירור למיזוג אוויר.
- ב. **אין לבצע** "שטיפת" מערכת באמצעות כל חומר מהחומרים המפורטים בפרק ג'. לצורך "שטיפת" המערכות יש להשתמש בגז הודף שיוצר במיוחד לצורך זה, ובדטרגנט בעל $ODP = 0$, $GWP > 250$.
- ג. יש להקפיד לאחסן **קררים במכלים המיועדים להם** בלבד.
- ד. **יש לציין בבירור** על המערכת/המתקן את סוג הקרר וכמות הקרר המאוחסנים במערכת.
- ה. יש **לנהל יומן שירות** המפרט במדויק כל פעולת תיקון שבוצעה במערכת, לרבות פעולות ריקון והשבת קררים ובציון הכמות המדויקת לצורך מעקב.

1. מהו המרכיב העיקרי בקררים מסוג CFC שפוגע באוזון?

- א. מימן
- ב. כלור
- ג. פלואור
- ד. פחמן

2. בחרו את התשובה הנכונה - קררים מסוג HFC:

- א. מכילים פלואור הפוגע בשכבת האוזון.
- ב. הינם בעלי מקדם $GWP=0$.
- ג. הינם בעלי מקדם $ODP=0$.
- ד. הינם דליקים ונפיצים.

3. הסכנה בשהייה בחדר מכונות שאליו השתחררה מסה גדולה של קרר R-744 היא:

- א. חנק
- ב. הרעלה
- ג. שריפה/פיצוץ
- ד. החומצה הפלואורית הנפלטת מהקרר

4. קרר זיאטרופי הינו:

- א. תערובת של מספר קררים בעלי ערך "גלייד" גבוה.
- ב. תערובת של מספר קררים בעלי ערך "גלייד" נמוך.
- ג. תרכובת של מספר קררים בעלי ערך "גלייד" גבוה.
- ד. תרכובת של מספר קררים בעלי ערך "גלייד" נמוך.

5. הקררים ממשפחת ה-HFC, בעלי מקדם $ODP=0$, שבהם משתמשים כיום במערכות מיזוג

אוויר, הם:

- א. R-410a כתחליף ל-R-22 במערכות קיימות.
- ב. R-407c כתחליף ל-R-22 במערכות קיימות.
- ג. R-410a כתחליף ל-R-22 במערכות חדשות.
- ד. R-407c כתחליף ל-R-502 במערכות חדשות.

6. המונח "RECOVERY" (השבת קררים) כולל:

- א. הוצאת הקרר מהמערכת, ביצוע סינון וטיפול כימי לקראת החזרה למערכת הקודמת.
- ב. הוצאת הקרר מהמערכת, לצורך איכסון במיכל חיצוני ולכל מטרה.
- ג. הוצאת הקרר ממערכת מושבתת לצורך העברה למערכות אחרות.
- ד. הוצאת הקרר מהמערכת בזמן ביצוע פעולת "pump-down".

7. מה נכון לגבי שימוש בקרר CO₂:
- לקרר לחצי עיבוי גבוהים מאוד.
 - הקרר מוגדר כקרר דליק בסיווג A3.
 - אין צורך בשמן למדחסי הקירור בשימוש בקרר CO₂.
 - טמפרטורת האיוד של קרר זה גבוהה מ-100c.
8. מה נכון לגבי אמוניה כחומר קירור:
- הקרר דליק מאוד ונפיץ.
 - היעילות של האמוניה כחומר קירור נמוכה בהשוואה לשאר הקררים.
 - החומר מתמוסס היטב במים.
 - הקרר מותר לשימוש רק במערכות התפשטות ישירה (D.X).
9. לפי תקן בטיחות מספר 34 של ASHRAE, קררים בסיווג A2 הינם:
- קררים בעלי ערך דליקות גבוה.
 - קררים שאינם דליקים או נפיצים.
 - קררים שאינם רעילים ובעלי ערך דליקות נמוך.
 - קררים בעלי ערך דליקות בינוני.
10. באלו מהקררים הבאים חובה להשתמש במתקן מחזור מוגן פיצוץ?
- R-32, R-125, R-23
 - R-290, R-600, R-600a
 - R-134a, R-1234a
 - R-744, R-1254, R-507

תשובות לשאלות

שאלה מס'	תשובה
1	ב
2	ג
3	א
4	א
5	ג
6	ב
7	א
8	ג
9	ד
10	ב

פרק 4: מדחסים

4.1 מבוא

מערכות קירור ומיזוג אוויר פועלות בשיטה הנקראת דחיסת גזים. כפי שתיארנו בפרקים הקודמים (2.2), המדחס יונק קרר בלחץ וטמפרטורה נמוכה המגיע מהמאייד, מעלה לו את הלחץ והטמפרטורה, ומזרים אותו לכיוון המעבה.

המדחס הוא אחד הרכיבים העיקריים במערכת הקירור ומיזוג האוויר. מדחסי הקירור הם מכלולים מכניים המונעים בדרך כלל על ידי מנועים חשמליים. במקומות שאין בהם אספקת חשמל רצופה (הובלה, הובלה ימית וכולי) גם על ידי מנועי שריפה פנימיים. הצורך להקטין את ההפסדים של האנרגייה המושקעת בתהליך הדחיסה הביא את היצרנים לשיפור נצילות המדחסים מבחינה מכנית וחשמלית. הדבר הביא לשינויים במבנה המדחסים, להקטנת המסה של המדחס ולהקטנת ממדיו. יש חשיבות רבה להבנת עיקרון פעולת המדחס, מכיוון שהוא אחד המרכיבים העיקריים בכל מערכת קירור ומיזוג אוויר. כמו כן יש חשיבות רבה בבחירת מדחס מתאים למערכת, כדי להביא את האנרגייה המושקעת בהפעלתו לניצול מרבי. על ידי כך תושג יעילות אנרגטית גבוהה (COP) של מערכת הקירור.

בהיותם מכלולים עתירי חלקים, מדחסים עלולים להינזק בקלות, מן הסיבות הבאות:

1. כניסת קרר נוזלי ביניקת המדחס.

2. לחצי דחיסה גבוהים מהרצוי.

3. זרמי עבודה גבוהים מהרצוי.

4. שימון חסר.

בפרק זה נכיר את עולם המדחסים, את היתרונות ואת החסרונות שלהם, ואת ההתאמה למאפייני המערכות השונות. נלמד על אמצעי ההגנה המקובלים נגד נזק חשמלי ומכני, על פעולת מערכת השימון במדחסים השונים, וכן על איתור תקלות ומניעתן.

4.2 מונחי יסוד למדחסים

4.2.1 תפוקת המדחס (Compressor Capacity)

נתון מספרי המציג את כמות החום המושקעת במדחס ביחידת זמן, לצורך דחיסת הקרר.

4.2.2 תפוקה משקלית

נתון מספרי המציג את משקל הקרר העובר דרך המדחס ביחידת זמן. התפוקה המשקלית מחושבת, על-ידי חלוקת תפוקת הקירור הנדרשת, במקדם החום הכמוס של הקרר (כמות החום הנדרשת לקרר מסוים לצורך איוד יחידה משקלית אחת שלו). לדוגמה: לקרר מסוג R-134A, מקדם החום הכמוס (במעבר מנוזל לאדים ב-0°C) הוא 217 kJ/kg . (כלומר כדי לאייד קילוגרם אחד של קרר זה, דרושה כמות אנרגייה של 217 קילו ג'אול). כדי לספק תפוקת מערכת של טון קירור אחד, נדרשים 12,630 קילו ג'אול ($\text{kJ}\cdot\text{h}$). מכאן, עבור מערכת כזו על המדחס לסחרר 58.2 ק"ג קרר בשעה.

$$58 \frac{kg}{h} = \frac{12630 \frac{kJ}{h}}{217 \frac{kJ}{kg}} \leftarrow G \frac{kg}{h} = \frac{Q(\frac{kJ}{h})}{Cl(\frac{kJ}{kg})}$$

4.2.3 ספיקה נפחית (Compressor Displacement)

ספיקה נפחית היא כמות הקרר ביחידות נפח (סמ"ק $[cm^3]$, או רגל מעוקב $[ft^3]$), העוזבת את המדחס ביחידת זמן (דקה $[min]$ או שעה $[hr]$). ניתן לחשב את הכמות הנדרשת על ידי הנתונים הבאים: 1. משקל הקרר המסתחרר במדחס ביחידת זמן. 2. הנפח הסגולי של הקרר ביניקת המדחס. או לחלופין על ידי הוצאת ערכו של הנפח הסגולי של הקרר ביניקת המדחס, מנתונים המתקבלים בדיאגרמת לחץ-אנתלפיה (גרף מולייר). נתוני הספיקה הנפחית מאפשרים לקבוע את גודל המדחס המתאים למערכת, בהתאם לגודלו הפיזי (נפח היניקה המעשי) ולמהירות הסיבוב שלו.

4.2.4 נצילות נפחית (Volumetric Efficiency)

נצילות נפחית של מדחסים היא היחס בין הספיקה הנפחית התיאורטית שהמדחס יכול היה להעביר למערכת, ובין ספיקת הקרר המעשית היוצאת מהמדחס באותם תנאים. הנצילות הנפחית משתנה לפי סוגי המדחסים השונים. ידוע שהנצילות הנפחית של מדחסי בוכנה קטנה יחסית לנצילות הנפחית של מדחסים סיבוביים, בשל מבנה ועיקרון פעולה שונים. כמו כן, הנצילות הנפחית תלויה במשתנים רבים, כמו יחס דחיסה, טמפרטורת העיבוי, טמפרטורת האידוד ועוד. נצילות נפחית נמוכה משמעותה עבודה ממושכת יותר של המדחס, והקטנת יעילות המתקן.

4.2.5 יחס דחיסה (Compressor Ratio)

יחס דחיסה מוגדר כיחס בין לחץ היניקה (Inlet Pressure) ובין לחץ הדחיסה (Discharge Pressure) בערכים מוחלטים. טמפרטורת העיבוי קבועה ותלויה בתנאי הסביבה, ואילו טמפרטורת האידוד (וכתוצאה מכך גם לחץ האידוד) תלויה בסוג המתקן וייעודו. לכן ניתן לומר שכלל שהמתקן נדרש לעבוד בטמפרטורות אידוד נמוכות יותר, כך יורד הלחץ ביניקת המדחס, וההפרש בינו ובין לחץ הדחיסה גדל. לפיכך, ניתן להבין כי ערכו של יחס הדחיסה משתנה ממערכת למערכת בהתאם לייעודה, גם עבור אותו סוג קרר, כמתואר בטבלה 4.1.

טבלה 4.1 - טבלת לחצי יניקה ודחיסה יחסי מקובלים במערכות מיזוג, קירור והקפאה

סוג המתקן	קרר	טמפרטורת אידוד (C°)	לחץ אידוד (psia)	טמפרטורת עיבוי (C°)	לחץ עיבוי (psia)	יחס דחיסה
מקרר ביתי	R-134a	- 22	17	50	200	1:11.7
מקפיא	R-134a	- 30	12	50	200	1:16.6
מזגן בקירור	R-410a	2	125	50	450	1:3.6
מזגן בחימום	R-410a	2	125	60	550	1:4.4

מהטבלה ניתן ללמוד כי מדחסים הפועלים במקררים ובמקפיאים ביתיים הם בעלי תפוקות נמוכות יחסית למתקני מיזוג אוויר ביתיים. הם פועלים בתנאים קשים יותר וצורכים אנרגיית חשמל בכמות רבה יותר יחסית לגודלם, בגלל יחסי דחיסה גבוהים.

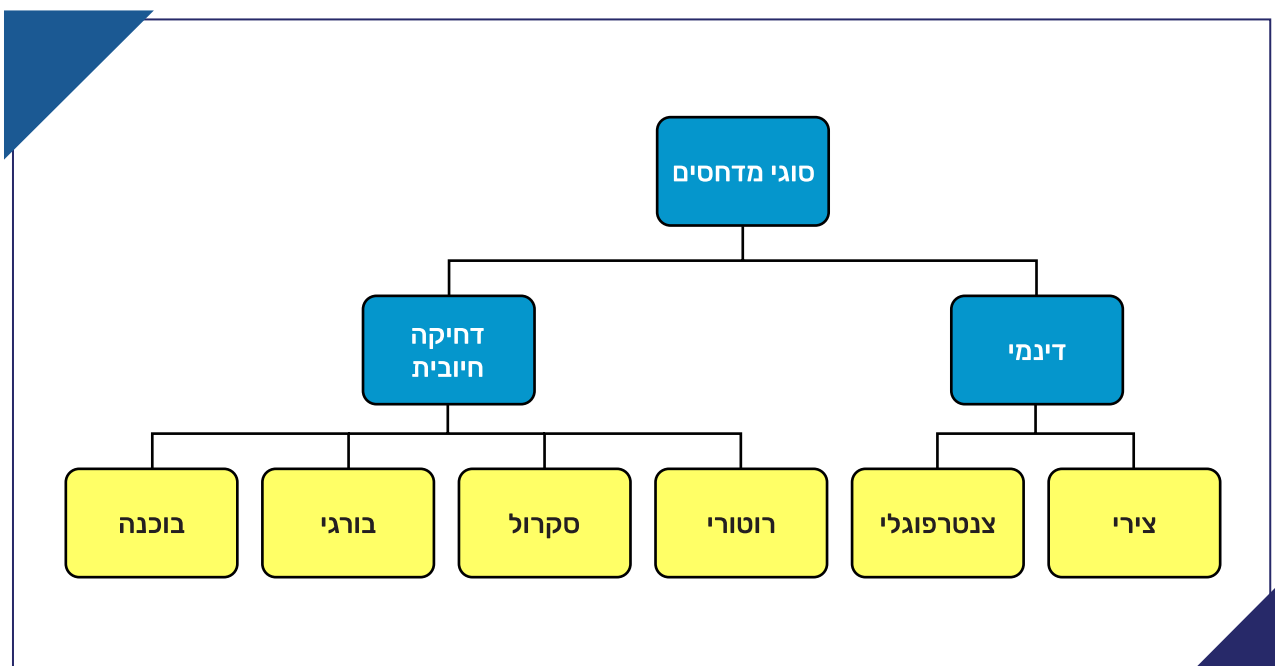
4.2.6 ויסות תפוקה של מדחסים

- המונח "ויסות תפוקה" במדחסי קירור מציין את האפשרות לשנות את התפוקה המשקלית של המדחסים, כדי לאפשר את הדברים הבאים:
- התאמת כמות הקרר לעומסי החום שבהם צריכה המערכת לטפל. בין היתר, כדי למנוע את הצפת המאייד בעודפי קרר שאין ביכולתו לאייד.
 - השגת נצילות טובה של המדחס בזמן עבודה בתפוקות מערכת קטנות, על ידי צמצום צריכת האנרגיה.
 - התנעת המדחס ללא עומס או כנגד עומס חלקי, כדי להביא להקטנת הספק המנוע וצריכת החשמל בהתנעה.

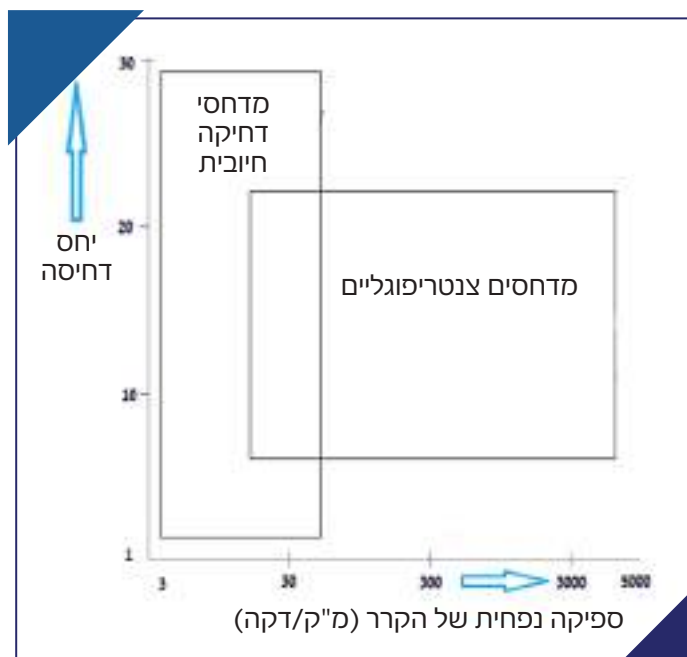
השיטה המתאימה לרוב סוגי המדחסים היא שינוי תפוקת המדחס על ידי שינוי מהירות הסיבוב של המנוע המניע אותו. שיטה זו בשימוש במדחסים הרמטיים וסמי הרמטיים. כיום ניתן למצוא מדחסים בעלי מהירות משתנה (אינוורטר), החל ממערכות קירור ומערכות מיזוג אוויר ביתיות, ועד למערכות מסחריות בעלות מדחסים הרמטיים בהספק גבוה. ראו הרחבה בפירוט המדחסים השונים בהמשך הפרק.

4.3 סוגי מדחסים

מדחסי הקירור נחלקים לשתי קטגוריות עיקריות, כמתואר להלן:

תמונה 4.1 - סוגי מדחסים

תמונה 4.2 - התאמת מדחסים



4.3.1 מדחסי דחיקה חיובית (Positive Displacement Compressors)

מדחסי דחיקה חיובית הם מדחסים היונקים את גז הקירור בלחץ ובטמפרטורה נמוכים, ומוסיפים לו אנרגיית לחץ וחום על ידי העברת גז הקירור מנפח גדול לנפח קטן. הקטנת הנפח גורמת להגדלת הלחץ ועליית הטמפרטורה של גז הקירור, ביציאה מהמדחס. כדי לאפשר את תהליך הדחיסה, מותקנים במדחסים אלה שסתומים בפתח יציאת הקרר למערכת (פתח הדחיסה - Discharge Valve). שסתומים אלה נשארים סגורים במשך כל זמן תהליך הדחיסה, ומאפשרים למדחסים לספק את הקרר למערכת כגז, בלחץ ובטמפרטורה גבוהים.

מדחסי בוכנה (Reciprocating Compressors)

מדחסי בוכנה מצוידים במנוע שמעביר תנועה סיבובית לגל ארכובה (Crankshaft). גל הארכובה מעביר את התנועה הסיבובית לבוכנות באמצעות מוטות קישור (טלטלים - Connecting Rods). הקשר המכני מאפשר להפוך את התנועה הסיבובית של המנוע וגל הארכובה, לתנועה קווית של הבוכנות בחלל הצילינדרים, תוך כדי ביצוע פעולות יניקה ודחיסה. מדחסי הבוכנה מיוצרים בטווח גדול של תפוקות. החל ממדחסים למתקנים ביתיים בהספק של כ-1/10 כ"ס, ועד למדחסים המונעים על ידי מנועי ענק בהספקים של עשרות ואף מאות כ"ס.

יתרונות מדחסי בוכנה

- זולים לייצור ולרכישה.
- קלים לתפעול ותחזוקה בזכות מבנה פשוט.
- מתאימים ללחץ עבודה גבוה.

חסרונות מדחסי בוכנה

- רועשים, בגלל פעולת דחיסה לא רציפה המחייבת לעיתים התקנת משתיק קול בקו הדחיסה.
- ריבוי חלקים נעים היוצר חיכוך גבוה וגורם לשחיקה ולבזבז אנרגייה.
- נצילות נפחית נמוכה יחסית למדחסים סיבוביים.

4.3.1.1 סוגים של מדחסי בוכנה (Reciprocating Compressors)

מדחסי בוכנה נחלקים לשלושה סוגים:

- מדחסים פתוחים.
- מדחסים פתוחים למחצה.
- מדחסים סגורים.

מדחסים פתוחים (Open Compressors)

מדחסים פתוחים מונעים על ידי מנוע הנמצא בנפרד מיחידת הדחיסה. המנוע מחובר אליה באמצעים מכניים דוגמת גלגלי הנעה, רצועות (חגורות) גומי, או באמצעות מחברים בחיבור ישיר הנקראים מצמדים. מכיוון שבמדחסים אלה המנוע נפרד מיחידת הדחיסה, הדבר מאפשר שימוש במגוון מנועים, בין אם חשמליים או מונעים בדלק נוזלי. בנוסף, במעטפת המדחס יש פתחי גישה לרכיבי המדחס, כך שניתן להחליפם לצורך שיפוץ או תחזוקה מונעת (Preventive Maintenance).

יתרונות המדחס הפתוח

- בעל פתחי גישה רבים למכלולים הפנימיים וניתן לשיפוץ בעלויות נמוכות יחסית.
- בעל יכולת פעולה במגוון רחב של מנועים.
- בעל אמינות ועמידות גבוהה.
- יש בו אפשרות למדידת מפלס השמן במדחס ולהוספת שמן בעת הצורך.

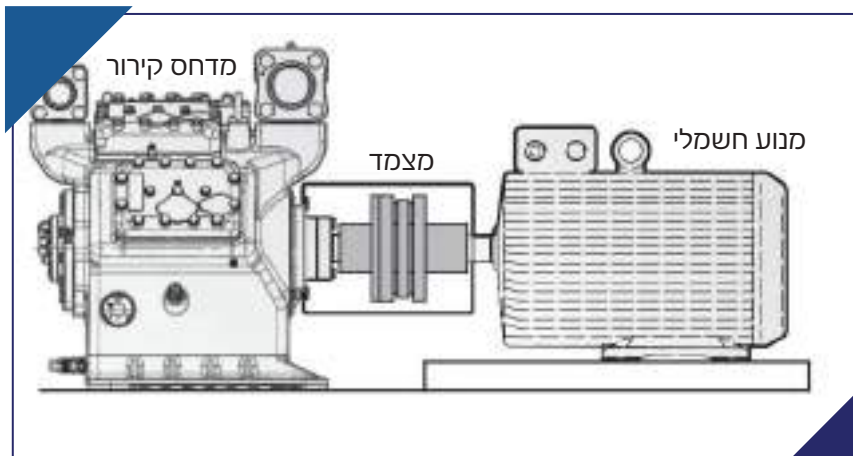
חסרונות המדחס הפתוח

- למדחסים המונעים בתמסורת רצועות נדרש שטח התקנה גדול.
- הנצילות של העברת התנועה בתמסורת רצועות נמוכה יחסית להנעה ישירה.
- רגיש לנזילות, דורש התקנת אטם מכני (רכיב בעל שחיקה גבוהה) המותקן על ציר המדחס, למניעת נזילת קרר.
- התקנתו וחיבורו למנוע באמצעות מצמדים/תמסורת רצועות מחייבת מיומנות גבוהה, בשל ביצוע איפוס מרכזי הצירים של המנוע והמדחס (פעולת "ליינינג" [Linning]).
- רגיש ליניקת קרר במצב נוזלי, ומחייב התקנת מפריד טיפות, או מחליפי חום בקו היניקה של המדחס.
- דורש תחזוקה ובדיקות לעתים קרובות.

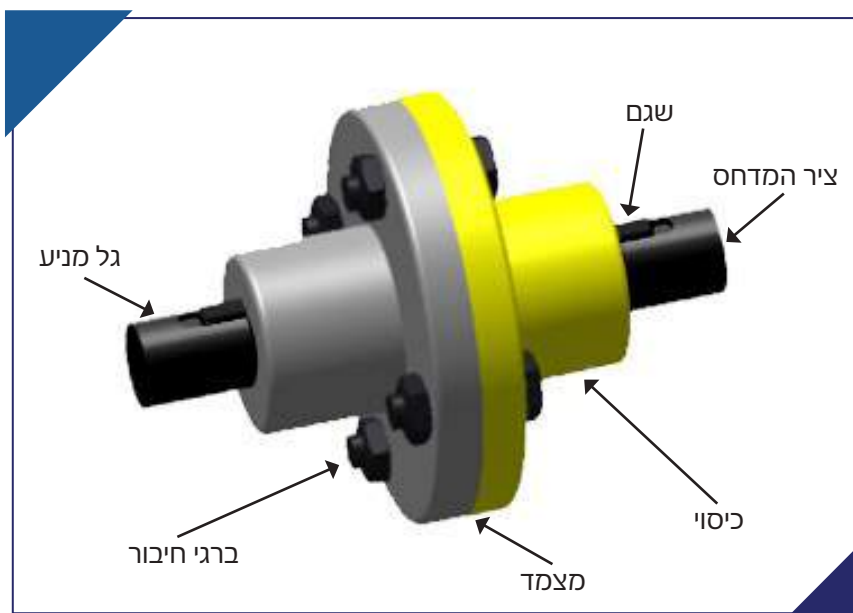
הנעת מדחסים פתוחים - חיבור ישיר/חיבור מצמדים

בשיטה זו, ציר המנוע וציר המדחס מחוברים בצורה קשיחה באמצעות מצמד העשוי שני חצאים. שני חצאים אלה מחוברים לצירים בעזרת שגם, הממוקם בחריץ מתאים בציר ובגוף המצמד. חלקי המצמד מחוברים בצורה קשיחה (מצמד פינים), או על ידי אלמנט גמיש מגומי המקנה לחיבור גמישות מסוימת.

תמונה 4.3 - חיבור באמצעות מצמד



תמונה 4.4 - המצמד וחלקיו



הנעת מדחסים פתוחים - הנעת רצועות גומי בחתך V (טרפזיות)

בשיטה זו, הכוח המניע מועבר מציר המנוע לציר המדחס באמצעות גלגלי רצועה (Pulleys), ורצועות גומי בחתך V המחברות ביניהן. שיטה זו, שהייתה נפוצה מאוד בעבר, אינה מיועדת להנעת מדחסים גדולים בשל נצילות נמוכה יחסית של העברת התנועה. הנצילות הנמוכה נובעת מהחלקה של החגורות על הגלגלים בעת העברת כוחות גדולים, והגבלת כמות הרצועות המשתתפות בתהליך. שיטה זו דורשת מקום גדול יותר ומרחק מינימלי בין המנוע למדחס, המושפע מקוטר גלגלי הרצועות.

תמונה 4.6 - חתך רצועה V



תמונה 4.5 - העברת תנועה באמצעות רצועות גומי טרפזיות



חישוב וקביעת קוטר הגלגל המונע, בהתאם לקוטר הגלגל המניע ומהירות סיבוב נדרשת (יחס הנעה)

$$D1 \times N1 = D2 \times N2 \quad \rightarrow \quad D2 = \frac{D1 \times N1}{N2}$$

נוסחת החישוב:

D1 - קוטר גלגל מניע N1 - מהירות סיבוב גלגל מניע
 D2 - קוטר גלגל מונע N2 - מהירות סיבוב גלגל מונע

חיבור גלגלי רצועות לציר באמצעות תותבי הידוק קוניים (Taper-lock)

חיבורי Taper-lock הם השיטה הנפוצה לחיבור גלגלי רצועות לציר המנוע והמדחס. יתרונם הוא בפירוק והתקנה מהירים.

תמונה 4.8 - גלגלי רצועה מותאמים לחיבור מהיר Taper-lock



תמונה 4.7 - גלגלי רצועה בחיבור שגם



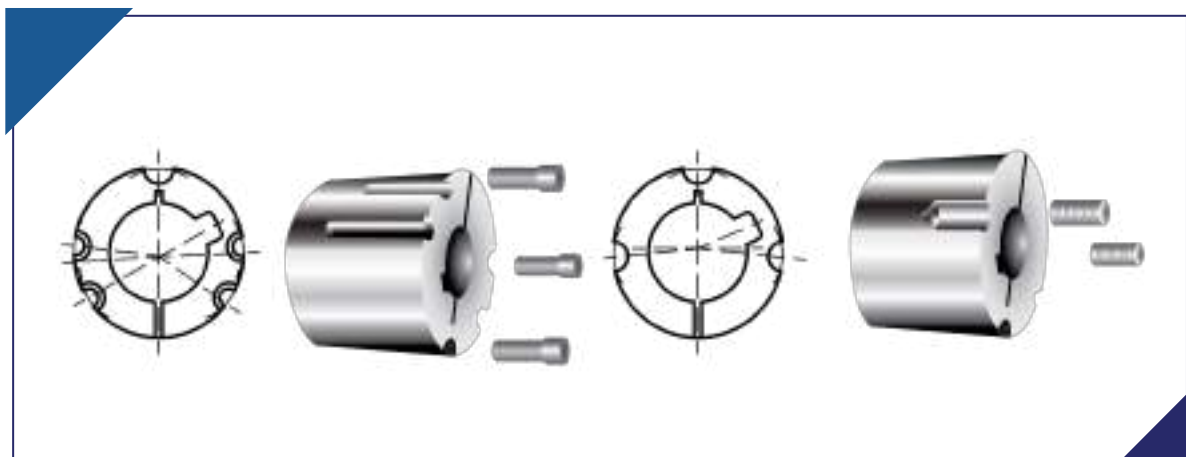
מדחסים פתוחים למחצה (Semi-Hermetic)

מדחסים פתוחים למחצה מונעים באמצעות מנועים חשמליים, המחברים ישירות לגל ההינע של המדחס. המנוע החשמלי ויחידת הדחיסה נמצאים בתוך מעטפת משותפת, בעלת פתחי גישה רבים. פתחי הגישה מאפשרים את הפרדת המנוע מהמדחס וגישה לרכיבי המדחס השונים (בין אם לצורך ביצוע פעולות תחזוקה, או לצורך שיפוץ והחלפה). מדחסים אלה הם הנפוצים ביותר במערכות מסחריות ותעשייתיות, וניתן למצוא אותם בתפוקות נמוכות ועד לתפוקות גבוהות של עשרות ומאות טון קירור.

בין סוגי המדחסים הפתוחים למחצה:

- בוכנתיים בעלי צילינדר אחד, או כמות רבה של צילינדרים בעלי דרגת דחיסה אחת או יותר.
- מדחסים בורגיים.
- מדחסי סקרול.
- מדחסים צנטריפוגליים.

תמונה 4.9 - תותבי הידוק קוניים (Taper-lock) לחיבור גלגלי רצועות



תמונה 4.11 - מדחס רב-בוכנות פתוח למחצה



תמונה 4.10 - מדחס חד-דרגתי פתוח למחצה



יתרונות מדחס פתוח למחצה

- ניתן לשיפוץ, אפשר לשפץ רק את המנוע או את יחידת הדחיסה בנפרד.
- ציר המנוע וציר המדחס מחוברים בחיבור ישיר, לקבלת נצילות העברת תנועה מקסימלית.
- מנוע ומדחס נמצאים ביחידה אחת סגורה, ולכן אין חשש לדליפות קרר דרך ציר המדחס.
- קירור יעיל של המנוע החשמלי באמצעות הקרר החוזר למדחס.
- העברת היניקה דרך חלל המנוע החשמלי מאפשרת את הגדלת הטמפרטורה ביניקה, ואת הגדלת התפוקה של המדחס.
- ניתן לשלב אמצעים לשינוי תפוקות ולהתנעה בזרם חשמלי נמוך.
- ניתן להתאמה לשימוש בקררים שונים בעלות נמוכה יחסית.
- יש אפשרות למדידת מפלס השמן במדחס ולהוספת שמן בעת הצורך.

חסרונות מדחס פתוח למחצה

- עלויות ייצור ורכישה גבוהות ביחס למדחסים הרמטיים.
- תקלה במנוע החשמלי מחייבת הורדת המדחס בשלמותו (בהשוואה למדחס פתוח).
- הסיכויים לנזילות קרר גבוהים יותר בהשוואה למדחסים הרמטיים.
- כניסת לחות אל מערכת הקירור עלולה לגרום להתחמצנות שמן הקירור ולפגיעה בסלילי המנוע החשמלי.

תמונה 4.12 - מראה/חתך מדחס רב-בוכנות פתוח למחצה**מדחסים סגורים (הרמטיים)**

מדחסים סגורים (Hermetic) הם המדחסים הנפוצים ביותר במערכות קירור ומיזוג אוויר בהספקים קטנים ובינוניים. החל ממערכות קירור ביתיות ועד למערכות קירור ומיזוג אוויר מסחריות, שבהן ניתן למצוא כמה מדחסים הרמטיים המחברים במקביל לקווי דחיסה ויניקה משותפים.

תמונה 4.14 - מדחס בוכנה הרמטי ליחידת קירור



תמונה 4.13 - מדחס בוכנה הרמטי למקרר ביתי



יתרונות מדחס הרמטי

- תופס שטח קטן.
- אין חשש לנזילת קרר דרך ציר המדחס.
- גל ארכובה וציר מנוע חשמלי משותפים - נצילות העברת תנועה מקסימלית.
- קירור המדחס והמנוע מתבצע בעיקר באמצעות הקרר הקר שחוזר מקו היניקה.
- זול לייצור ולרכישה.

חסרונות מדחס הרמטי

- מדחס הרמטי הוא מדחס חד פעמי שלרוב אינו מיועד לפתיחה ולשיפוץ (למעט מדחסים יקרים בהספקים גדולים, שיש כדאיות לשפצם).
- רגיש לנוכחות רטיבות (מים) במערכת הקירור.
- שינוי תפוקת המדחס או התנעה בעומס נמוך יכולים להיעשות על ידי מכלולים חיצוניים בלבד.
- אין אפשרות למדידת מפלס השמן במדחס. יש סכנה לבלאי מואץ, עקב אי החזרת השמן היוצא מהמדחס למערכת.

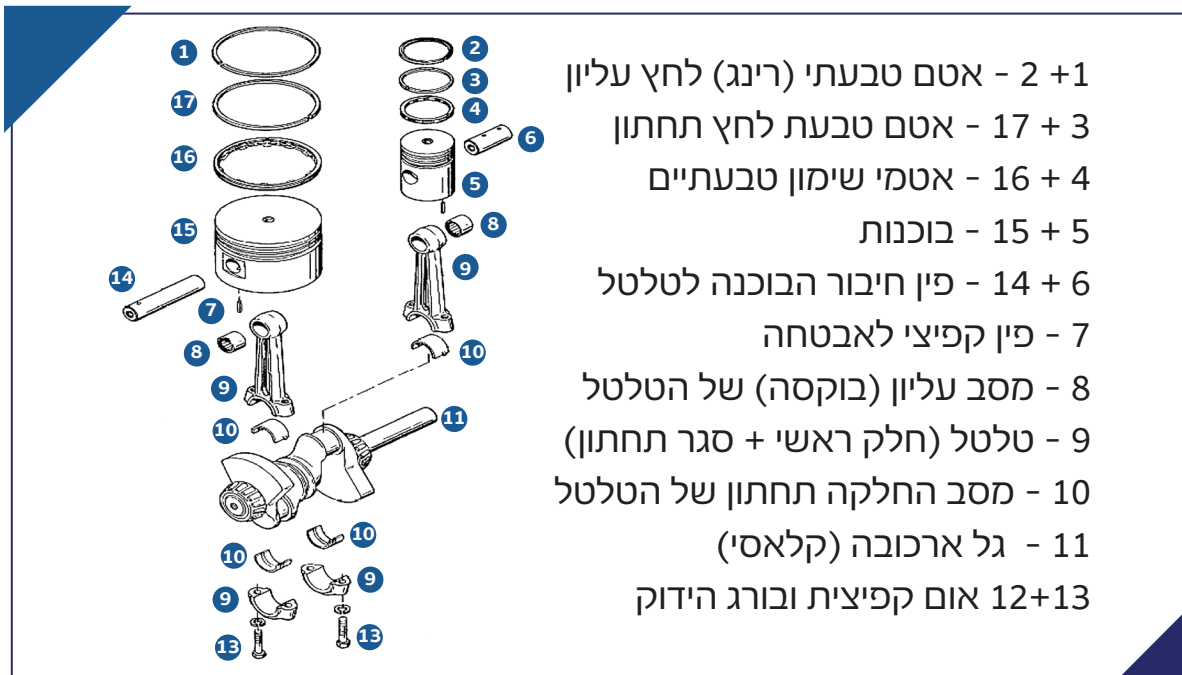
סיווג מדחסי בוכנה לפי לחץ היניקה

כפי שהגדרנו בתחילת הפרק ([ראו סעיף 4.1](#)), תפקידו של המדחס ליצור הפרשי לחצים במערכת הקירור בין צד הלחץ הגבוה, שנקרא "לחץ דחיסה" (Discharge Pressure) או "לחץ עיבוי" (Condensation Pressure), ובין צד הלחץ הנמוך שנקרא "לחץ איוד" (Evaporation Pressure). יש חשיבות רבה לאפשרות לייצר לחץ נמוך ביניקת המדחס, מכיוון שלחץ זה קובע את לחץ האיוד המאפשר קבלת טמפרטורת איוד מתאימה לסוג מתקן הקירור. לדוגמה, במערכות לקירור עמוק (Deep Freezing), נדרשת טמפרטורת איוד של כ-40°C-, המחייבת לחץ יניקה נמוך מאוד (היחס בין טמפרטורה ולחץ היניקה שונה מקרר אחד למשנהו). לעומת זאת במערכות קירור למיזוג אוויר, נדרש לחץ יניקה גבוה המשקף טמפרטורות איוד הגבוהות מ-0°C.

- לפיכך, ניתן לסווג את המדחסים לפי החלוקה הבאה:
- מדחסים לטמפרטורות איוד הגבוהות מ-0°C מסווגים כמדחסי HBP (High Back Pressure).
 - מדחסים למתקני קירור העובדים בטמפרטורות איוד של עד 20°C- מסווגים כמדחסי MBP (Medium Back Pressure).
 - מדחסים למתקני הקפאה עמוקה העובדים בטמפרטורות איוד נמוכות מ-20°C ומטה מסווגים כמדחסי LBP (Low Back Pressure).

4.3.1.2 מבנה, רכיבים ואופן פעולה של מדחסי בוכנה (Reciprocating Compressors)

תמונה 4.15 - רכיבים נעים במדחס בוכנה



4.3.1.3 רכיבי המדחס

אחד מחסרונותיו של מדחס הבוכנה הוא ריבוי חלקיו, ובפרט חלקים נעים היוצרים חיכוך רב ודורשים שימוש במסבים ובמערכות שימון יעילות. בתמונות הבאות נראה ונסביר על המרכיבים של מדחסי הבוכנה, בהתאמה לסוגים השונים.

גל הינע (ציר המדחס)

גל הינע משמש להעברת התנועה מהמנוע המניע את המדחס אל גל הארכובה. סוגי ההנעה המקובלים במדחסים פתוחים הם הנעת רצועות גומי והנעה ישירה באמצעות מצמדים. במדחסים הרמטיים וסמי הרמטיים ההנעה ישירה. ציר המנוע וגל הארכובה הם יחידה אחת.

אטם ציר המדחס

במדחסים פתוחים שבהם המנוע של המדחס נמצא מחוץ לקופסת המדחס, ציר ההינע הוא מקום רגיש לנזילות. זאת מכיוון שיש קושי באטימת חלקים נעים, ובמיוחד-צירים וגלי הינע. לצורך אטימת היקף הציר משתמשים באטם מכני העשוי שני חלקים. האחד נע עם הציר והשני קבוע לבית האטם. האטימה מושגת על ידי לחיצת דיסקית העשויה חומר עמיד בפני שחיקה, כמו פחם או גרפית, האוטמת את החיבור.

בית גל הארכובה

בית גל הארכובה הוא החלל הנמצא בתוך קופסת המדחס. בו נמצא גל הארכובה ובו מאוחסן השמן לשימון וקירור המדחס. אם המדחס מצויד במשאבת שמן, אז יהיו בחלל זה גם קו יניקת השמן וגם המסנן. תפקיד המסנן למנוע יניקת משקעים העלולים לחסום את המשאבה ואת מעברי השמן.

גל הארכובה

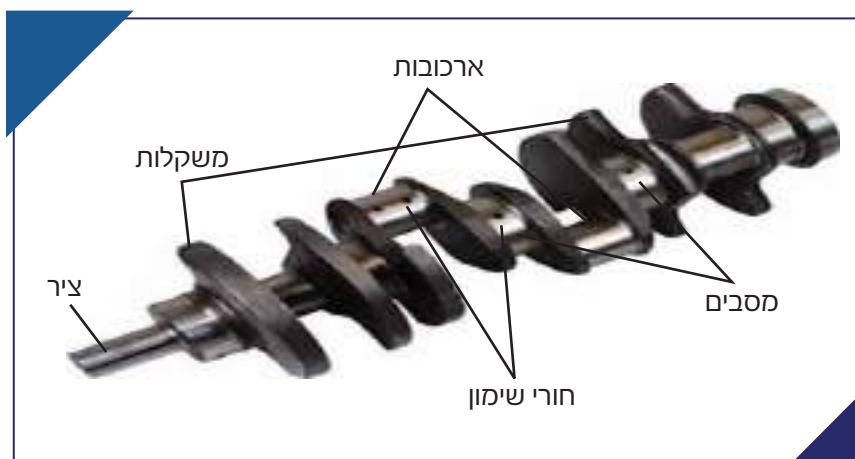
גל הארכובה הוא המשכו של ציר המדחס, המקבל ממנו את התנועה הסיבובית. תפקיד גל הארכובה להניע את הטלטלים והבוכנות המחוברות אליהם, כדי לאפשר המרת התנועה הסיבובית של הגל לתנועה קווית של הבוכנות.

שני סוגים נפוצים של גלי ארכובה

1. גל ארכובה אקסצנטרי: גל ארכובה זה מניע טבעות המחוברות בחיבור אקסצנטרי ביחס לציר הגל. בשיטה זו הציר המניע אינו מחובר לטבעות במרכזן, כך שתנועה סיבובית של הציר הופכת לתנועה קווית של נקודה הנמצאת על היקף הטבעת.

2. גל ארכובה קלאסי: כמתואר בתמונה 4.16, שמו של הגל נובע מצורתו המדמה ארכובות (בדומה לארכובות לרגליים הקשורות לאוכף רכיבה). ציר הארכובות נמצא מחוץ לגל. סיבוב הגל יוצר תנועות משיכה ודחיפה קווית של הטלטלים המחוברים אליו, בחיבורים הכוללים מסבים.

תמונה 4.16 - גל ארכובה קלאסי



מסבי גל הארכובה

גל הארכובה נתמך בכמה נקודות על ידי מסבים, שתפקידם להקטין את החיכוך הנוצר בין הגל ובין גוף המדחס. כמו כן להקטין את החיכוך בין הגל לטלטלים הנעים עליו. במדחסים קטנים, המסבים הם מסוג מסבי החלקה (קליפות), המחולקים לשני חלקים ועשויים ברונזה (ראו תמונה 4.17). במדחסים גדולים יותר, המסבים עשויים מסגסוגת של מתכות (Cooper+Antimony+Tin) בעלת תכונות של חוזק, התנגדות לשחיקה ויכולת אגירת שמן

בנקבוביות שבחומר. בגלל צבעה הכסוף-לבן של הסגסוגת היא נקראת גם "מתכת לבנה". יש גם מסבים העשויים מסגסוגת של בדיל, נחושת ואנטימון (הנקרא "בביט"). מסבי החלקה מסוג זה מחייבים שימון רצוף ויעיל, כדי לשמור על עמידותם לאורך זמן. במקרים של מהירויות סיבוב גבוהות (3,500-4,000 סל"ד) המקובלות במדחסים חדשים, ובמקרים של עומס רדיאלי גבוה, משתמשים במסבים כדוריים (ראו תמונה 4.18).

להלן כמה תכונות הנדרשות ממסבי גל הארכובה והטלטל

- עמידות במגע עם שמן הקירור בטמפרטורות גבוהות.
- עמידה בעומסים מכניים.
- מקדמי חיכוך וסילוק חום גבוהים.

תמונה 4.18 - מסב כדורי



תמונה 4.17 - מסבי החלקה



רכיבי גל הארכובה (ראו תמונה 4.16)

- 1. משקולות:** גל הארכובה הוא גוף גלילי הסובב במהירויות גבוהות. כמו כל גוף גלילי, יש לאזן את הגל באיזון סטטי ובאיזון דינמי (כמו שמבצעים לגלגלי הרכב) לפני הפעלתו. המשקולות מאפשרות להסיר חומר מהיקף הגל (על ידי קידוח), וכך להביאו לאיזון דינמי.
- 2. מעברי שמן:** השמן מוזרם בלחץ למסבי הגל, לטלטלים ולבוכנות באמצעות קדחים העוברים דרך גל הארכובה. זאת במדחסים שבהם השימון למסבים ולטבעות הבוכנה מתבצע בלחץ, באמצעות משאבת שמן (המותקנת לרוב בקצה גל הארכובה ומונעת באמצעותו).
- 3. טלטלים (Connecting Rods):** הטלטל הוא מוט עשוי מתכת, המחבר את הבוכנה אל גל הארכובה. יחד הם יוצרים מנגנון של דחיפה ומשיכה, המאפשר המרה של תנועה סיבובית לתנועה קווית. תנועה זו מתבטאת בפעולת דחיסה ויניקה של הבוכנה. הטלטל עשוי ממתכות שונות. החל מיציקת אלומיניום ועד ליציקת פלדה, בהתאם לסוג המדחס ולמאמצים אותם הוא אמור לשאת (כתלות בשטח הבוכנות ובלחצי הדחיסה בחלק התחתון, מחובר הטלטל לגל הארכובה באמצעות מסבי החלקה שצורתם כשתי קליפות (תמונה 4.18). מסבי החלקה מקטינים את החיכוך שנוצר עקב תנועת הטלטל סביב הגל. בחלק העליון, הטלטל מחובר אל הבוכנה באמצעות ציר הבוכנה. ציר זה נע בתוך תותב גלילי (בוקסה), ומאפשר תנועה יחסית בין הטלטל לבוכנה. הטלטלים הפועלים במדחסים בעלי מערכת שימון בלחץ כוללים לאורכם קדחים, המשמשים כמעברי שמן אל ציר הבוכנה וטבעת השימון שעל חלקה העליון של הבוכנה.

הבוכנה

- הבוכנה היא גליל מתכת, המונע בתוך הצילינדר בתנועה קווית על ידי הטלטל.
- עם ירידת הבוכנה, היא יוצרת לחץ נמוך בחלל הצילינדר המסייע לקרר לפתוח את שסתום היניקה ולהיכנס לצילינדר, תהליך הנמשך עד הגעת הבוכנה לסוף טווח תנועת הבוכנה כלפי מטה.
- מנקודה זו, הנקראת "נקודה מתה תחתונה" (נ.מ.ת), מתחיל מהלך הבוכנה בתוך הצילינדר כלפי מעלה תוך כדי דחיסת הקרר, ועד לסוף טווח התנועה, הנקרא "נקודה מתה עליונה" (נ.מ.ע).
- כדי להקטין את החיכוך והשחיקה של הבוכנה בצילינדר, יש לשמן את דופן הצילינדר.
- הבוכנות במדחסים קטנים, נעות במגע ישיר עם דופן הצילינדר. ולכן, בכדי להקטין את החיכוך, הן עשויות פלדה בעלת טיב פני שטח מעולה. לעומת זאת, במדחסים גדולים יותר הבוכנות עשויות בדרך כלל מיציקת אלומיניום או ברזל, ומצוידות באטמי לחץ, למניעת מעבר הגז הדחוס אל בית גל הארכובה. כמו כן לבוכנות יש טבעות שימון שמציפות את המרווח בין הבוכנה לצילינדר בשמן, לצורך קירור ולהקטנת החיכוך.

תמונה 4.19 - בוכנה וטלטל



תמונה 4.20 - צילינדר, בוכנה, פין בוכנה ואטמים



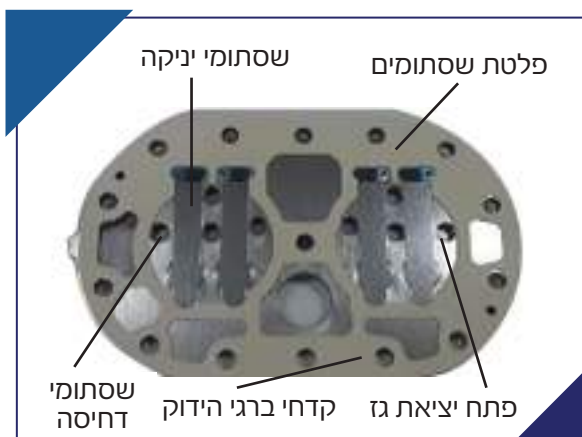
צילינדר

- הצילינדר הוא גליל שבתוכו נעה הבוכנה.
- הצילינדר עשוי מתכת קשה בעלת תכונות של הולכת חום טובה ועמידות טובה בלחץ ובשחיקה.
- שטחו הפנימי של הצילינדר מעובד ברמה גבוהה, כדי לאפשר את תנועת הבוכנה בתוכו במינימום חיכוך בין טבעות הבוכנה לצילינדר.
- ההפרש בין קוטרו הפנימי של הצילינדר לקוטר הבוכנה, או לקוטר הבוכנה והטבעות שעליה, קטן מאוד ונמדד באלפיות האינץ'. זאת כדי לאפשר יצירת אטימות בין הבוכנה לצילינדר.
- קצהו התחתון של הצילינדר נמצא בחלל בית גל הארכובה, ואילו בקצהו העליון של הצילינדר נמצאת פלטת השסתומים, שבה שסתומי היניקה והפליטה (ברוב המדחסים). מכיוון שמבחינה מעשית לא ניתן לסיים את מהלך תנועת הבוכנה (נ.מ.ע) במפגש עם פלטת השסתומים, היצרנים מחויבים להשאיר מרווח מסוים בין הנ.מ.ע לפלטת השסתומים. זאת כדי למנוע נזק לבוכנה, לטלטל ולשסתומים.
- מרווח זה, שגודלו בין 0.1 ל-0.2 מ"מ, נקרא חלל שווא מכיוון שהוא מקטין את נפח היניקה המעשי של הקרר לצילינדר, וגורם להקטנת הנצילות הנפחית של הצילינדר והמדחס.

פלטת השסתומים

פלטת השסתומים נמצאת בקצהו העליון של הצילינדר ומכילה (בחלק גדול מהמדחסים) את פתחי היניקה והדחיסה של המדחס, את שסתומי היניקה והדחיסה, ואטמים. בין פלטת השסתומים וגוף הצילינדר, וכמו כן גם בינה ובין ראש הצילינדר, נמצאים אטמים המונעים נזילת קרר אל מחוץ למדחס.

תמונה 4.22 - שסתומי יניקה



תמונה 4.21 - שסתומי דחיסה



תפקיד השסתומים במדחסי בוכנה הוא לאפשר יניקה של גז שחון מהמאייד. היניקה תהיה בכמות שתמלא את חלל הצילינדר מצד אחד (שסתומי היניקה), ותאפשר למדחס לבנות לחץ גבוה בצילינדר במהלך הדחיסה. זאת עד ללחץ הרצוי במעבה בהתאם לסוג הקרר ולתנאי הסביבה (שסתומי הדחיסה). לפיכך, ומכיוון שהלחצים תלויים בסוג הקרר ומשתנים בהתאם לתכונות הקררים השונים, הרי שגודל פתחי היניקה והדחיסה, חוזק הכוח האלסטי של השסתומים וצורתם, שונה ממדחס למדחס בהתאם לסוג הקרר המיועד. בעבר, רוב שסתומי המדחס היו מסוג שסתומים שטוחים (פְּלֶפְּרִים) העשויים מפלדה קפיצית.

חסרונם של שסתומים אלה היה בשטחם הקטן, עקב היותם שבירים ורגישים לתנועות פתיחה/סגירה מהירות, לטיפות קרר נוזלי שהצליח להגיע ליניקת המדחס, ולהיחלשות המתכת עקב עייפות החומר. כדי לשפר את נצילות המדחסים, פותחו סוגים רבים נוספים של שסתומים, כמו שסתומי דיסקה, שסתומי טבעת ושסתומים בעלי צורה קונית (Puppet). אלה בנויים מכמה שכבות ובעלי כושר עמידות בלחצים גבוהים יותר, טווחי תנועה משופרים ויכולת העברת כמות קרר גדולה.

הכוחות הפועלים על שסתומי המדחס

שסתומי יניקה

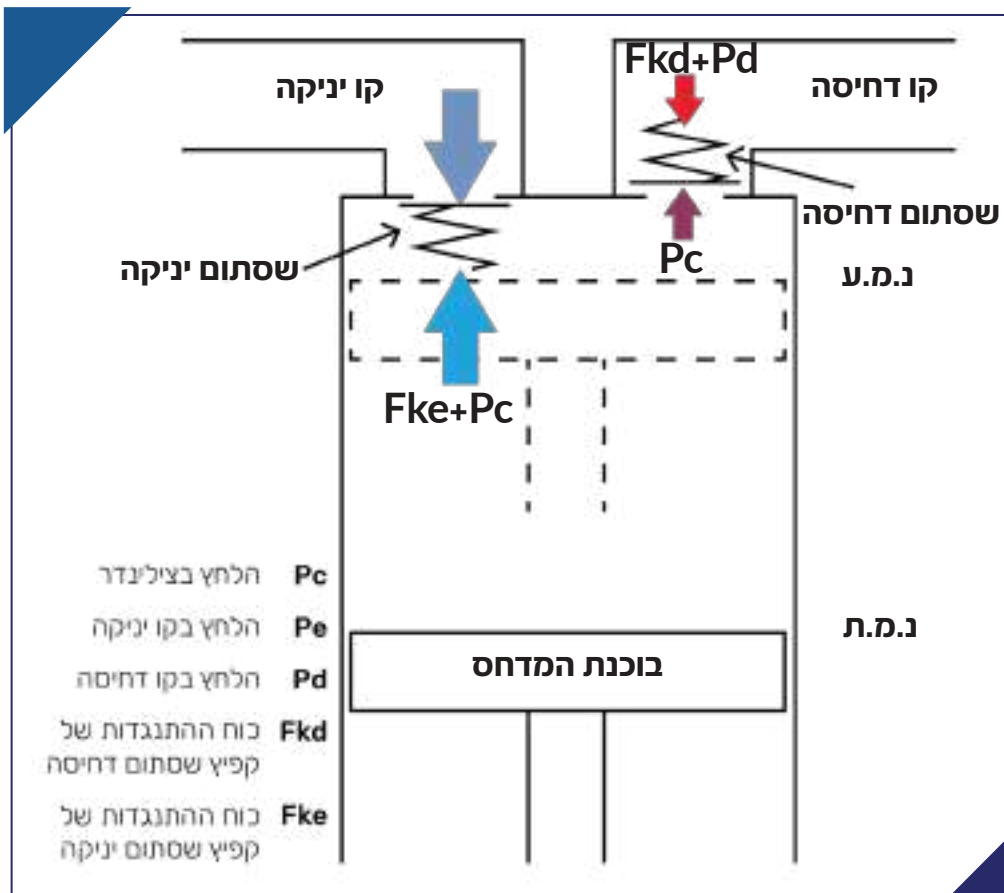
כמתואר בתמונה 4.23, שסתומי היניקה בעלי כוח אלסטי (קפיץ P_{ke}) הפועל לסגירתם. שסתומי היניקה ייפתחו כאשר הלחץ בקו היניקה (P_e) יהיה בעל ערך גבוה יותר מכוח הנוצר מלחץ הגז בצילינדר (P_c) + הכוח האלסטי של השסתום (P_{ke}).

שסתומי דחיסה

שסתומי הדחיסה יישארו סגורים, כל עוד לחץ הגז הנדחס בצילינדר (P_c) לא יהיה גדול מהלחץ בקו דחיסה (P_d) + הכוח האלסטי של שסתום הדחיסה (F_{kd}).

לאור זאת, מובנת החשיבות של התאמת המדחס לקרר במערכת.

תמונה 4.23 - הכוחות הפועלים על שסתומי המדחס



ראש הצילינדר

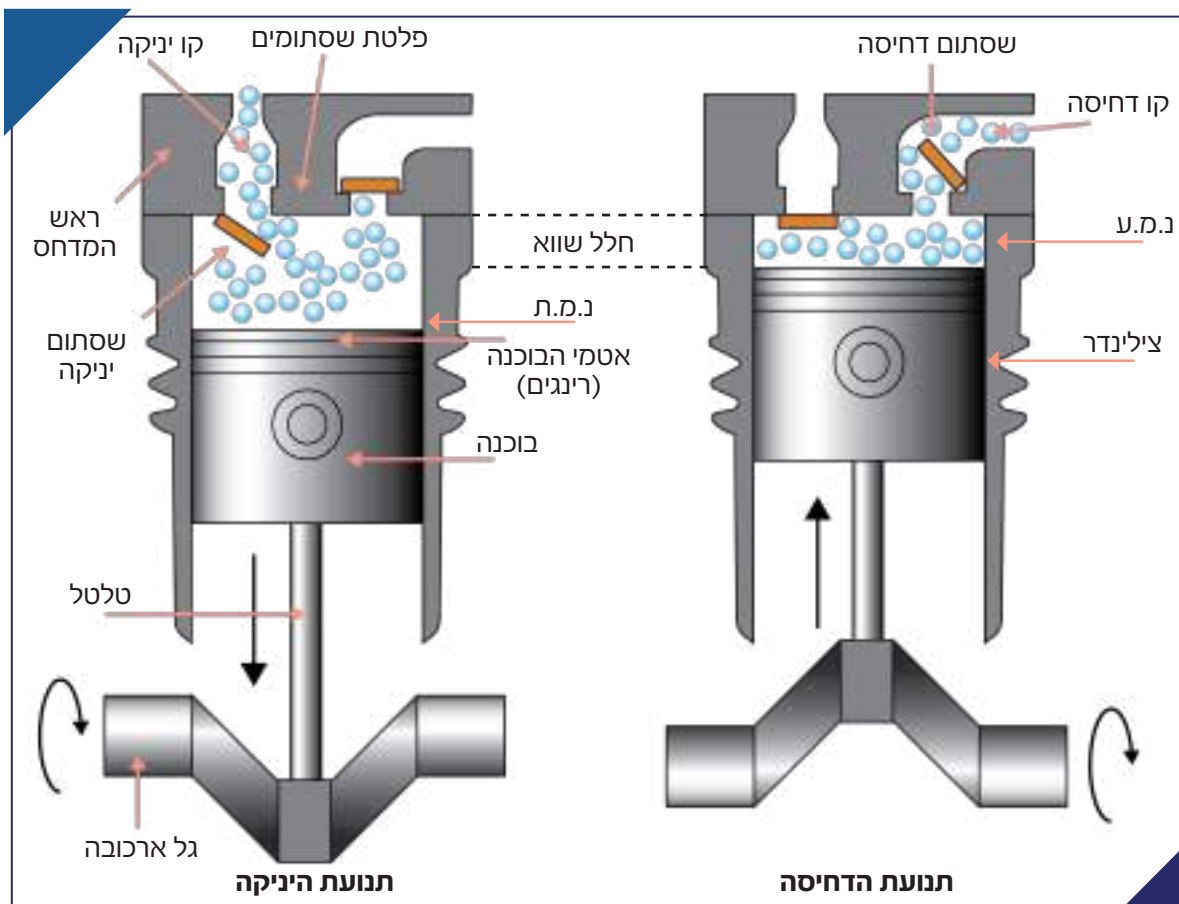
ראש המדחס נמצא בקצה הצילינדר ומעל פלטת השסתומים. ממוקמים בו פתחי היניקה והדחיסה, ברוב המדחסים הפתוחים וההרמטיים. במדחסים שאינם הרמטיים, פתחים אלה מצוידים בברזי שירות (תמונות 4.27-4.29) המאפשרים פירוק והרכבה של המדחסים לצורך תחזוקה, מבלי לאבד מכמות הקרר במערכת.

על ראש המדחס ניתן למצוא פתחים לחיבור מדי לחץ ואביזרי בקרת לחצים. כמו כן אביזרים לנטרול חלק מתפוקת הקרר היוצאת מהמדחס, לצורך התאמת תפוקת המדחס לדרישות המערכת (פריקת דרגות).

עיקרון פעולת המדחס

עיקרון פעולת מדחסי הבוכנה הוא יניקה של הקרר כגז בלחץ נמוך מהמאייד, ודחיסתו כגז בלחץ גבוה לקראת העברתו למעבה. תהליך היניקה והדחיסה מתבצע באמצעות בוכנות, שנעות בתנועה קווית בתוך צילינדר גלילי. בראש הצילינדר ממוקמת פלטת שסתומים, המאפשרת כניסת קרר לחלל הצילינדר עם ירידת הבוכנה מצד אחד, ואת איסוף הגז הנדחס עם עליית הבוכנה, עד לקבלת הלחץ הדרוש באמצעות שסתומי הדחיסה. כמות הקרר שהמדחס יונק ביחידת זמן, מושפעת מנפח חלל הצילינדר, ממהירות סיבוב המדחס ומהנצילות הנפחית שלו. בעת פעולתו, מעביר מנוע המדחס (בהנעה ישירה או באמצעות רצועות גומי) תנועה סיבובית לגל הארכובה. התנועה מועברת מגל הארכובה אל הטלטל, שהופך את התנועה הסיבובית לתנועה קווית של הבוכנה בתוך הצילינדר.

תמונה 4.24 - עיקרון פעולת מדחס בוכנה



מצב יניקה

מצב יניקה מתחיל כאשר הבוכנה נמצאת בנ.מ.ע (נקודה מתה עליונה). גל הארכובה מושך את הבוכנה כלפי מטה במהלך הנמדד ב-1/2 סיבוב (180 מעלות) של גל הארכובה. האטימה בין הבוכנה לצילינדר, שנוצרת באמצעות טבעות הבוכנה ושכבת השמן המצפה את דופן הצילינדר, גורמת ליצירת תת-לחץ בחלל הצילינדר בעת ירידת הבוכנה. הפרש הלחצים שנוצר משני צידי שסתום היניקה גורם לפתיחתו, וקרר במצב גז שחון נכנס מקו היניקה לחלל הצילינדר וממלא אותו. בזמן פעולת היניקה, שסתום הדחיסה (בעל כוח אלסטי רב) נשאר סגור. זאת בגלל האלסטיות שלו, וכן בגלל הפרש הלחצים בין הלחץ הגבוה שבקו הדחיסה ללחץ הנמוך שבתוך חלל הצילינדר. עם סיום תהליך היניקה, כשהבוכנה נמצאת בנ.מ.ת (נקודה מתה תחתונה), נוצר שוויון לחצים בין קו היניקה לחלל הצילינדר ושסתום היניקה נסגר.

מצב דחיסה

המשך סיבוב גל הארכובה מנ.מ.ת כלפי מעלה יגרום לטלטל להרים את הבוכנה כלפי מעלה. זאת תוך צמצום החלל שמעל הבוכנה, המכיל את הגז שנכנס בפעולת היניקה. כך ייגדלו הלחץ והטמפרטורה של הקרר. בעת מהלך הבוכנה כלפי מעלה, שסתום הדחיסה יישאר סגור עד שהבוכנה תגיע כמעט לנ.מ.ע. במצב זה, הלחץ שנבנה בצילינדר יוצר על שסתום הדחיסה כוח הגבוה מהכוח האלסטי של השסתום, וגם מהכוח הנגרם מהלחץ הגבוה של הגז בקו הדחיסה. כוח זה מאפשר לגז להתגבר על כוח השסתום, לפתוח אותו, ולאפשר לקרר לצאת אל קו הדחיסה לכיוון המעבה, כגז חם בלחץ גבוה.

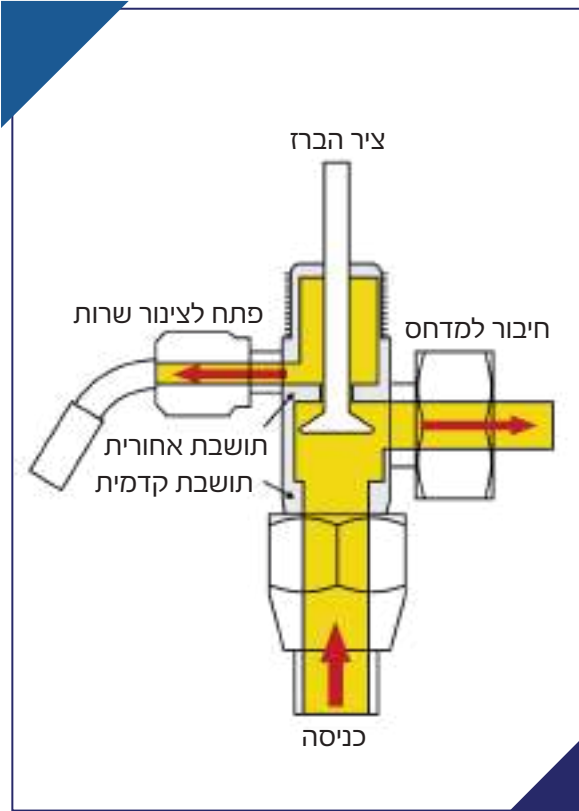
ברזי שירות לקווי יניקה ודחיסה

תמונה 4.25 - ברז שירות למדחסים

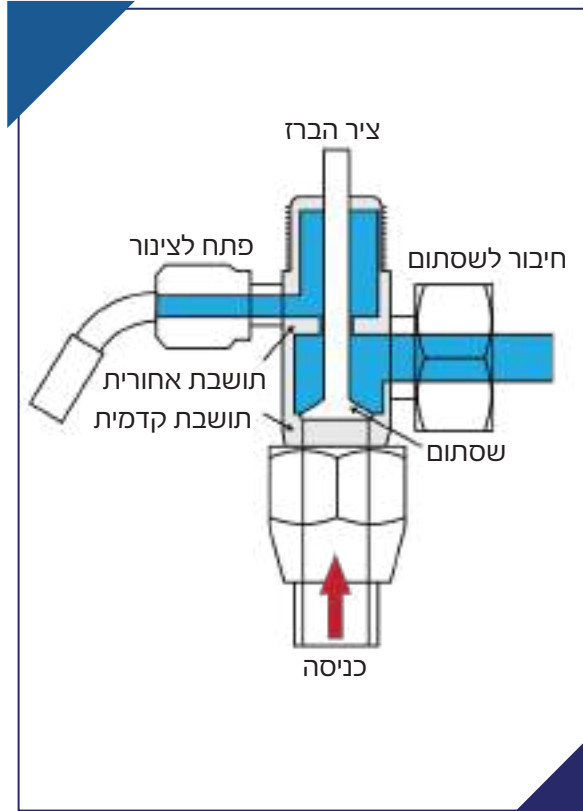


לצורך חיבור או ניתוק של מדחסים בוכנתיים מסוג מדחס פתוח, מדחס סגור למחצה או מדחסים מסוגים אחרים, משתמשים בברזי שירות בעלי שלושה מצבים. אלה מאפשרים ניתוק הצנרת מהמדחס ללא איבוד קרר, כמו גם חיבור סעפת שירות עם מדי לחץ. החיבור יהיה לקווי הדחיסה והיניקה של המערכת, מבלי שיהיה צורך בריקון הקרר מהמערכת או ללא חשש מאיבוד קרר.

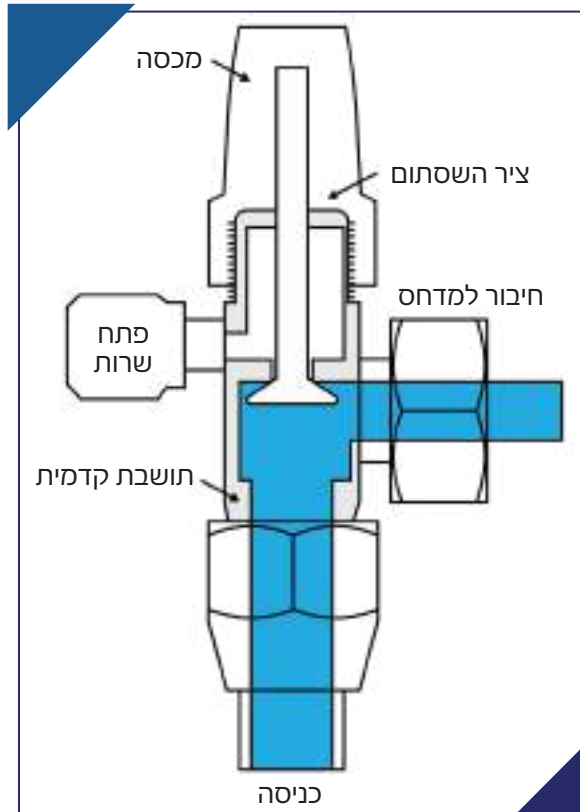
תמונה 4.27 - ברז שירות, מצב אמצע



תמונה 4.26 - ברז שירות סגור



תמונה 4.28 - ברז שירות פתוח



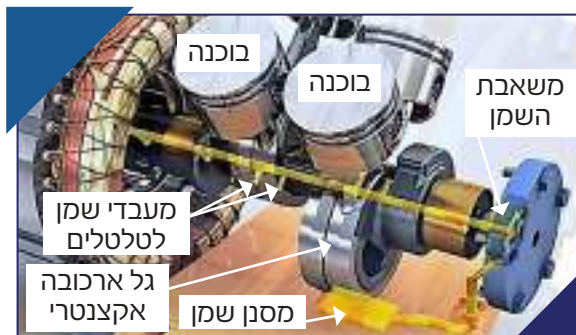
משאבת השמן

השמן במערכת הקירור נועד לשמן (לסוך) את המדחס אשר דוחס את חומר הקירור. החלקים הניסוכים במדחסי בוכנות הם הבוכנות, מסבי גל הארכובה ומסבי הטלטלים. במדחסי בוכנה מסוג מדחסים פתוחים ופתוחים למחצה יש משאבת שמן מסוג גלגלי שיניים, הנמצאת בדרך כלל בקצה גל הארכובה ומונעת על ידי. המשאבה יונקת את השמן דרך צינור יניקה ומסנן (הנמצאים באגן השמן שבחלל בית גל הארכובה). לאחר מכן מעבירה אותו בלחץ גבוה דרך צינורות ומעברים אל הרכיבים שיש לשמן (על מערכות השימון נרחיב בהמשך). במדחסי בוכנה הרמטיים, שאיבת השמן נעשית על ידי סליל בורגי המעלה את השמן מאגן השמן אל גל הארכובה והבוכנה. יש מדחסים שיחידת הדחיסה שלהם טובלת באגן השמן. מדחסים אלה לא זקוקים להתקן שימון נוסף.

תמונה 4.30 - משאבת שמן מסוג גלגלי שיניים



תמונה 4.29 - מערכת שימון במדחס בוכנה



ויסות תפוקה במדחסים בוכנתיים

הסיבות לביצוע ויסות תפוקה

- לאפשר התאמת כמות הקרר לעומס הקירור בצד המאייד.
- חיסכון באנרגייה (הפעלת המדחס בעומס נמוך).
- הארכת חיי המדחס על ידי צמצום פעולות כיבוי והתנעות מרובות.

שיטות לויסות תפוקה

- פריקה מכנית חשמלית בדרגות.
- פריקה מכנית חשמלית רציפה על ידי התקן חיצוני למדחס.
- שינוי (ויסות) מהירות סיבוב המדחס.

ויסות תפוקה למדחסי בוכנה יבוצע בהתאם לסוג המדחס. במדחסי בוכנה סגורים, ויסות תפוקת המדחס יכול להתבצע על ידי שינוי מהירות המדחס באמצעות טכנולוגיית V.S.D (Variable Speed Drive), או טכנולוגיית A.S.D (Adjustable Speed Drive). לחלופין, ניתן לעשות זאת באמצעות שסתום עוקף (ByPass) מכני המופעל על ידי הפרש לחצים או המופעל חשמלית.

תמונה 4.31 - בקרי מהירות מנועים



במדחסי בוכנה פתוחים או פתוחים למחצה, הוויסות ייעשה באמצעות התקנים פנימיים המשנים את נפח הצילינדר או במערכת לפריקת דרגות, כמתואר להלן:

- פריקת דרגות (ויסות תפוקת המדחס) במדחסי בוכנה פתוחים/פתוחים למחצה.
- במדחסי בוכנה, הבוכנות נעות בתוך הצילינדרים, אשר מאוכסנים בתוך בתי צילינדרים (Barrel). כל בית צילינדרים כזה יכול להכיל צילינדר אחד או יותר.
- במדחסי קירור ומיזוג אוויר, בתי צילינדרים אלה מכונים "ראשים". לכל בית צילינדרים המכיל צילינדר אחד או יותר, יש פלטת שסתומים אחת וראש אחד (מכסה עליון) עם פתחי יניקה ודחיסה.
- ניתן להגדיר כל בית צילינדרים כזה כ"דרגת דחיסה", המספקת קרר בכמות מסוימת למערכת (בהתאם לכמות הצילינדרים שבבלוק ולנפחם).
- אנו בוחרים את גודל המדחס לפי תפוקת המערכת המקסימלית במצב של עומסי חום מרביים. לכן, עם ירידת עומסי החום שבהם צריכה מערכת הקירור לטפל, נוצרת הדרישה להתאמת כמות הקרר שמוציא המדחס, לעומס החדש והקטן יותר שבו המערכת צריכה לטפל.
- אחת מהשיטות הרבות להתאמת תפוקת המערכת לעומס המעשי (המקובלת במדחסי בוכנה פתוחים ופתוחים למחצה) היא "ביטול" דרגת דחיסה, כלומר הפסקת עבודת הדחיסה של דרגת הקירור הכוללת צילינדר אחד או יותר (כאשר הבוכנה ממשיכה בתנועתה בתוך הצילינדר).

התהליך שנקרא פריקת דרגות הוא מניעה של בניית לחץ בצילינדר. זאת על ידי אילוף שסתום היניקה להישאר במצב פתוח, גם תוך כדי תהליך הדחיסה. הקרר שנדחף מעלה על ידי הבוכנה מוחזר לחלל היניקה. תהליך זה ניתן לביצוע באמצעות שסתום המותקן בפתח ייעודי בראש המדחס, ומפקח על פתח כניסת הקרר לתא היניקה. התהליך ניתן לביצוע גם על ידי התקן חיצוני דומה, השולט על מעבר עוקף במכלול ראש הצילינדרים, בין תאי הדחיסה והיניקה.

שתי שיטות להפעלת התקנים אלה:

- א. בוכנות הידראוליות (לחץ שמן) או פניאומטיות (לחץ גז מקו הדחיסה), המופעלות על ידי סליל מגנטי חשמלי.
- ב. שסתומים אלקטרומכניים בחיבור ישיר.

לדוגמה, במדחס בוכנה בעל ארבע דרגות דחיסה (ארבעה ראשים), ניתן להפעיל את המדחס בתפוקות של 25%, 50%, 75% ו-100%.

עיקרון פעולת וסת תפוקה אלקטרו-פניאומטי במדחס (תמונות 4.33-4.34)

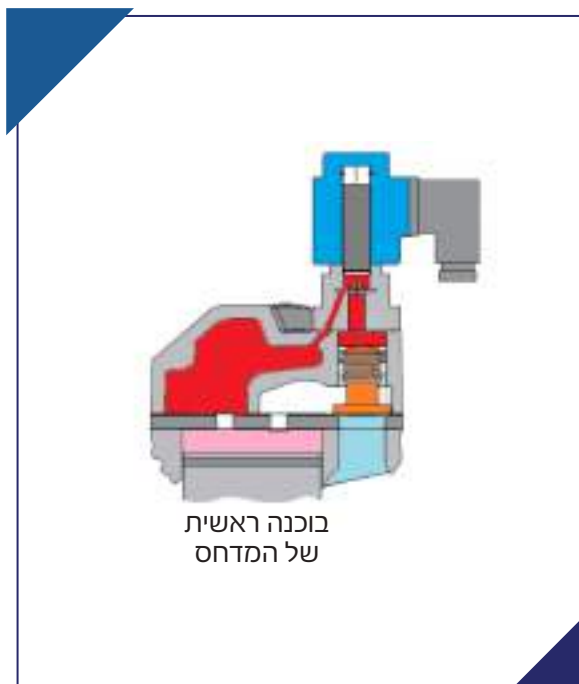
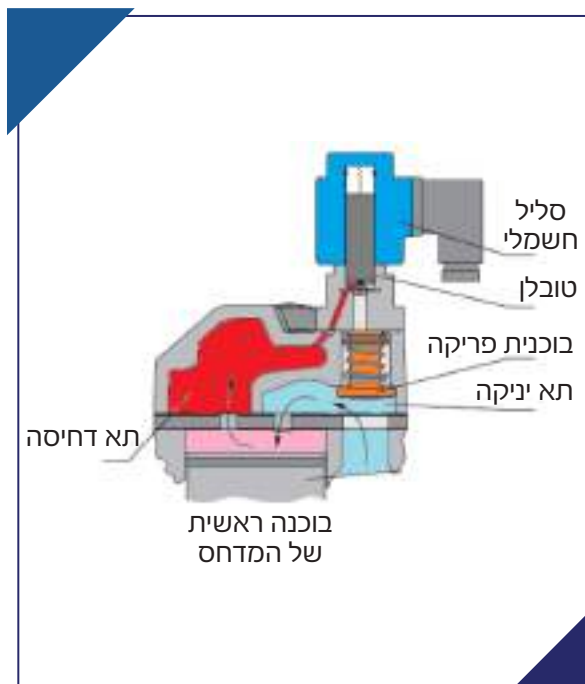
סליל חשמלי המוזן במתח מיחידת הבקרה, מאפשר או סוגר מעבר של גז חם בלחץ גבוה מחלל הדחיסה אל מעל בוכנית פריקה קטנה (בצבע כתום בתמונות). כמו כן הסליל מאפשר את תנועת הבוכנית השולטת על מעבר הקרר, דרך פלטת השסתומים מצד היניקה אל חלל הבוכנה.

במצב פירוק, הסליל מוזן במתח. הכוח המגנטי שנוצר בסליל מושך את הטובלן כלפי מעלה ומאפשר מעבר של לחץ מקו הדחיסה אל הבוכנית. לחץ הדחיסה דוחף את בוכנית הפריקה כלפי מטה, וגורם לסגירת מעבר הגז מחלל היניקה לצילינדר. במצב עבודה מלאה, הסליל לא מוזן במתח. הכוח המגנטי שהרים את הטובלן פסק, ולחץ קו הדחיסה אינו מגיע יותר לבוכנית הפריקה. הבוכנית נמשכת כלפי מעלה מכוח הקפיץ, מעבר הגז מחלל היניקה לתא היניקה בראש הצילינדר נפתח, והקרר יוכל להיכנס לחלל הצילינדר.

דוגמה לפריקת מדחס בעל שלושה ראשים (שלוש דרגות): כאשר מורכב פורק דרגות על ראש אחד בלבד, המדחס יכול לעבוד בתפוקות של 66%, 100%. כאשר מורכבים שני פורקים, המדחס יכול לעבוד בתפוקות של 33%, 66%, 100%.

תמונה 4.33 - פורק דרגות מכני חשמלי במצב פירוק

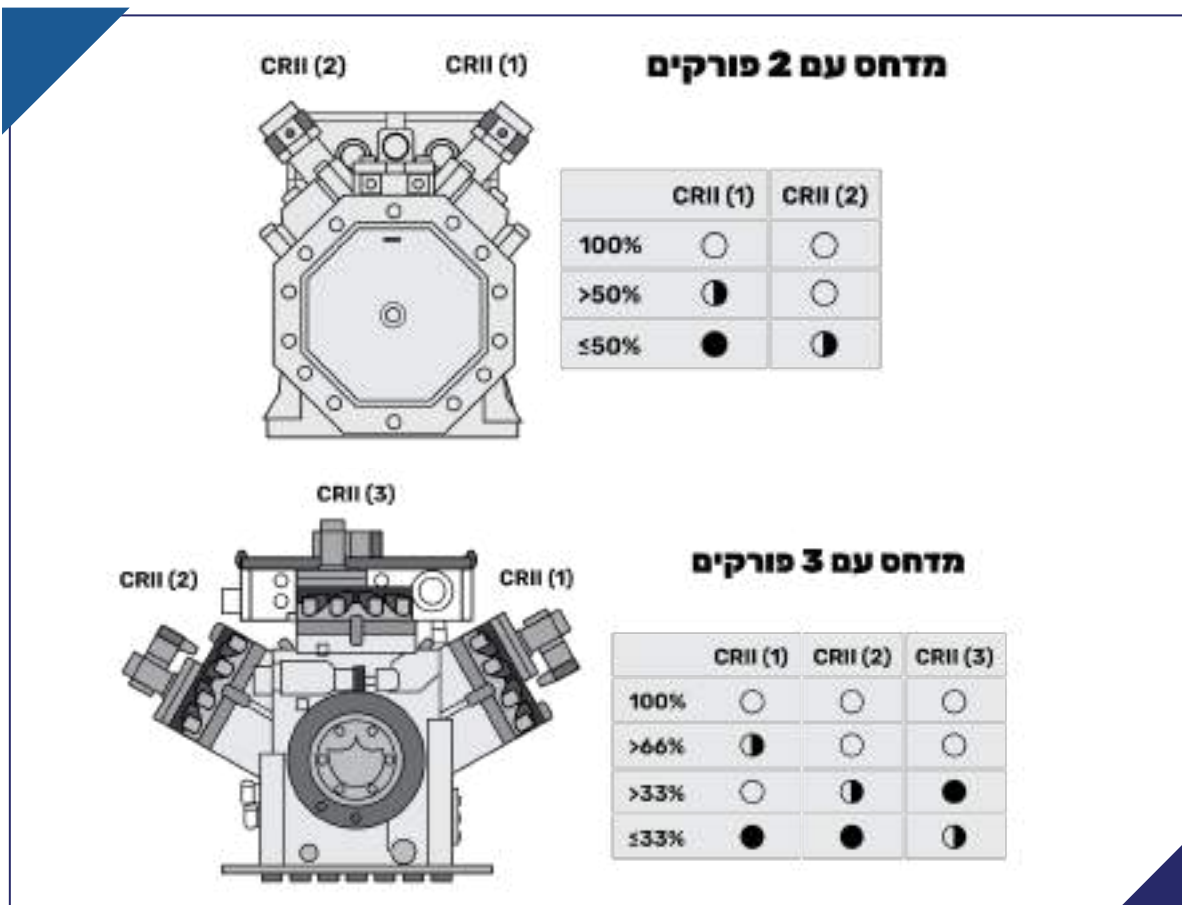
תמונה 4.32 - פורק דרגות מכני חשמלי במצב עבודה רגיל



פריקה מכנית חשמלית רציפה

פריקה מכנית חשמלית רציפה היא הפעלת חלק ממערכת הפריקה במדחס בעל כמה דרגות, באמצעות בקר אלקטרוני, במרווחי זמן קצרים מאוד. פריקה זו מאפשרת לקבל תפוקה משתנה, כפי שנקבע על ידי הפורק המכני. כלומר, כאשר במדחס בעל שני ראשים מותקן פורק דרגות אחד, ניתן לקבל תפוקה רציפה בין 50% ל-100%, על ידי הפעלת הפורק בפרקי זמן משתנים. יתרה מכך, אם מחברים למדחס פורקים בכל הראשים, ניתן לקבל תפוקה רציפה בין 10% ל-100%. כמובן, הפעלה כמוסבר לעיל תהיה עם בקרה מתאימה, המאפשרת הפעלה בפולסים. זאת תוך שמירת ערך הבקרה הרצוי ובקרה על טמפרטורת המדחס. שיטה זו נקראת פריקה רציפה בשיטת PWM - Pulse Wide Modulation.

תמונה 4.34 - דגמים של מדחסים עם פורק דרגות מכני חשמלי



יסוּת מהירות כאמצעי לשינוי בתפוקה

המדחס מופעל באמצעות וסת מהירות, המשנה את מהירות התנועה הסיבובית של המדחס. כך, ביחידת זמן נתונה המדחס יבצע פעולות דחיסה/יניקה בכמות משתנה, ובכך יגרום לשינוי הספיקה הנפחית הכללית (כמות הקרר שהמדחס יונק ודוחס). כדי לא לאפשר חריגה ממעטפת העבודה של המדחס, לא רצוי להשתמש גם בַּמְשָׁנָה מהירות וגם בפורקים, אלא אם במדחס קיימת מערכת בקרה מתאימה. לכן עדיף לא לשלב במדחס בעל משנה מהירות גם מערכת פריקת דרגות. בהפעלה עם משנה מהירות, יש לשים לב להוראות היצרן בדבר מהירויות מותרות לכל מדחס, ולמהירות המינימלית המותרת, כדי לאפשר אספקת שמן תקינה במדחסים עם משאבת שמן.

פריקת דרגות כאמצעי להנעה בעומס נמוך

בזמן הנעת המדחס, בנוסף לעומס המכני שיוצרים החלקים הנעים שבמדחס, על המנוע להתגבר גם על ההתנגדות שנוצרת. התנגדות זו נובעת מן הצורך בהפעלת המדחס כנגד הלחץ השורר בקו הדחיסה. ההתנגדות מחמירה ככל שלמדחס בוכנות רבות יותר, ובמיוחד כאשר המדחס פועל עם קרר הנמצא בלחצים גבוהים. יש החמרה גם כשהמערכת אינה פועלת, או כשיש צורך בהנעת המדחס בסמוך למועד הדממתו, כשהלחץ בקו הדחיסה עדיין גבוה. כדי לאפשר את הנעת המדחס בעומס מופחת, במדחסים המצוידים במנגנוני פריקת דרגות, ניתן להפעיל את המדחס כשהוא פרוק. על ידי כך נקטין את המומנט הנדרש להנעה, את הבלאי של המדחס ואת צריכת הזרם הנדרש להנעה. התהליך יתבצע באופן אוטומטי על ידי מערכת הפיקוד של המדחס בכל הנעה והנעה.

4.3.1.4 קירור מדחסי בוכנה

בגלל ריבוי החלקים הנעים והחיכוך הנובע מכך, מייצרים מדחסי הבוכנה כמות גדולה של חום. את החום יש לסלק כדי לסייע למדחס בפעולתו. רוב החום העודף נוצר באזור בית גל הארכובה והצילינדרים, שם נמצאים רוב הרכיבים הנעים המייצרים חיכוך. אנרגיית חום זו מתווספת לחום הנוצר בצילינדרים כתוצאה מדחיסת הגז. החום הנוצר בצילינדרים גורם לעליית לחץ הגז, הנשאר בחלל השווא שבצילינדר לאחר סיום פעולת הדחיסה. לחץ הגז הנשאר בצילינדר לוחץ על שסתום היניקה ומשהה את פתיחתו. כתוצאה מכך, נמנעת כניסת קרר בכמות המתאימה לנפח הצילינדר, דבר שמקטין את הכמות המשקלית של הקרר המסתחרר במערכת, וגורם להורדת נצילות המערכת כולה (COP קטן). הצורך בהקטנת טמפרטורת הצילינדרים גדל במדחסי מערכות להקפאה עמוקה, בהן טמפרטורות האיוז נמוכות במיוחד (לדוגמה מערכות הקפאה מהירה [Shock Freezer], או מנהרות קירור). זאת בגלל יחס הדחיסה הגבוה, הגורם לעליית טמפרטורה גבוהה בצילינדרים במקביל לתוספת החום מחיכוך.

קירור המדחסים יתבצע באמצעים הבאים:

- **קירור טבעי:** קירור טבעי מבוצע על ידי זרימת אוויר מסביב לבתי הצילינדרים, המצוידים בצלעות קירור על המעטפת החיצונית שלהם. זאת במטרה להגדיל את שטח מעבר החום מהמתכת לאוויר. מדחסים אלה יהיו מסוג מדחסים פתוחים או פתוחים למחצה, ויותקנו בדרך כלל במערכות בעלות מעבה מקורר אוויר. במדחסים פתוחים קטנים, המונעים באמצעות תמסורת רצועות, אפשר שגלגל הינע של המדחס יכלול התקן מניפה. לפיכך, בכדי להפיק יעילות קירור מקסימלית, יש להקפיד על ניקיון המעטפת וצלעות הקירור, כמו גם על אי צביעת אזורים אלה בצבעים מבודדים (על בסיס לכות). זאת כדי למנוע יצירת שכבת בידוד שתקשה על סילוק החום.

תמונה 4.35 - מדחס חד דרגתי בעל צלעות קירור על המעטפת החיצונית של הצילינדר



- **קירור באוויר מאולץ:** בשיטה זו מתקינים מפוח (מאוורר) מעל ראש המדחס, במטרה לסלק את האוויר החם העוטף אותו, ולאפשר כניסת אוויר קר יותר שסייע בקירור המדחס. שיטה זו נפוצה בעיקר במדחסים למערכות הקפאה, בהם יחס הדחיסה הגבוה גורם להתחממות המדחס.

תמונה 4.36 - קירור מדחס על ידי מאוורר חשמלי המותקן על ראש המדחס



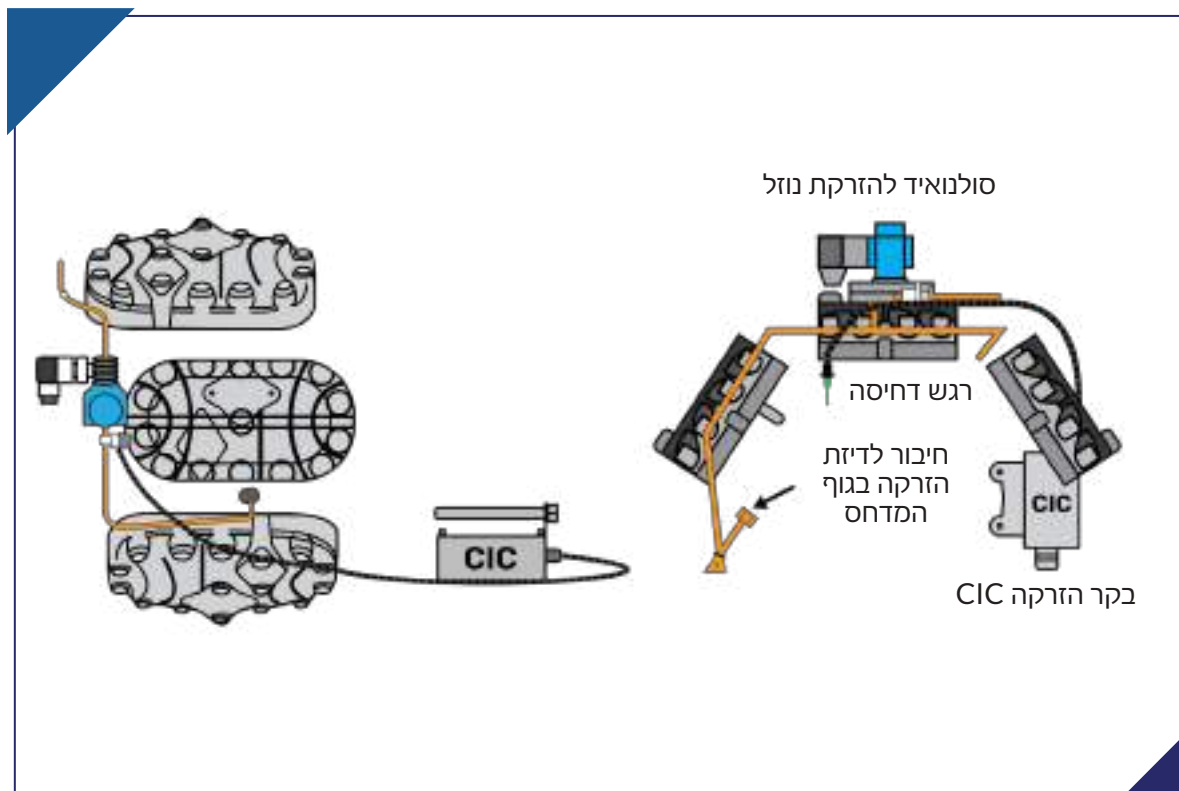
- **קירור על ידי הזרקת קרר נוזלי (Demand Cooling):** בשיטה זו משתמשים במדחסים הפועלים במערכות לטמפרטורת איוד נמוכה מאוד. האנרגייה המושקעת כדי להתגבר על הפרש הלחצים הגדול בין היניקה לדחיסה, גורמת להיווצרות טמפרטורות גבוהות מאוד במדחס. הטמפרטורה הגבוהה פוגעת בנצילות הנפחית של המדחס, כמו גם בשמן הקירור, שמתחמם

מעבר לדרוש ומשנה את תכונותיו. ניתן להשתמש בשיטת הזרקת קרר במצב נוזל כגיבוי למדחסים בעלי מפוחים לקירור ראש המדחס. לחלופין ניתן להשתמש כשיטה בלעדית, במקומות סגורים שבהם טמפרטורת הסביבה גבוהה וקירור באמצעות מפוחים אינו יעיל.

להלן עיקרון הפעולה של הקירור בהזרקת נוזל (Controlled Injection Cooling) CIC, שפותח על ידי יצרנית המדחסים Bitzer:

- בשיטה זו מותקן בצמוד למדחס בקר טמפרטורה בעל חישן, המחובר לפתח הנמצא בראש המדחס.
- כאשר הטמפרטורה בראש המדחס עולה מעל הערך המכוון בבקר, נסגר מגע המפעיל ברז חשמלי שמותקן בקו נוזל.
- אז מתאפשרת העברת נוזל אל כניסות ההזרקה המובנות בסעפת היניקה, או בחלל בית גל הארכובה.
- במדחסים שבהם היניקה נעשית מחלל זה, הנוזל המוזרק בכמויות קטנות עובר דרך שסתום ה"מרסק" אותן לטיפות קטנות, מתאייד, ועל ידי כך מקרר את חלל בית הארכובה, או סעפת היניקה.
- כך נגרמת ירידת הטמפרטורה וירידת הלחץ של הקרר הנכנס לצילינדרים.

תמונה 4.37 - מערכת הזרקת נוזל ליניקה



סיבות לשימוש במערכת הזרקה לקירור המדחס

הזרקה למדחס נדרשת כאשר נקודת העבודה של המדחס יכולה לגרום לעלייה בטמפרטורת הדחיסה מעבר לנקודה המומלצת. הדבר עלול להתרחש בתפוקה חלקית ומלאה ובהתאם לתנאי הסביבה המשתנים.

הגורמים לעלייה בטמפרטורת הדחיסה

1. טמפרטורת יניקה גבוהה מהמתוכנן. הסיבות האפשריות לכך הן:
 - א. חוסר קרר במערכת.
 - ב. כיוון שגוי של דרגת השיחון בשסתום ההתפשטות.
2. ספיקת גז נמוכה בלחצי יניקה נמוכים (במערכות הקפאה בדרך כלל).
3. לחץ דחיסה גבוה מהמתוכנן.
4. המדחס עובד פְּרָאק במשך פרקי זמן ארוכים.
5. צנרת יניקה לא מבודדת היטב או מותקנת בסביבה חמה, תורמת אף היא לעליית טמפרטורת הגז בכניסה אל המדחס.

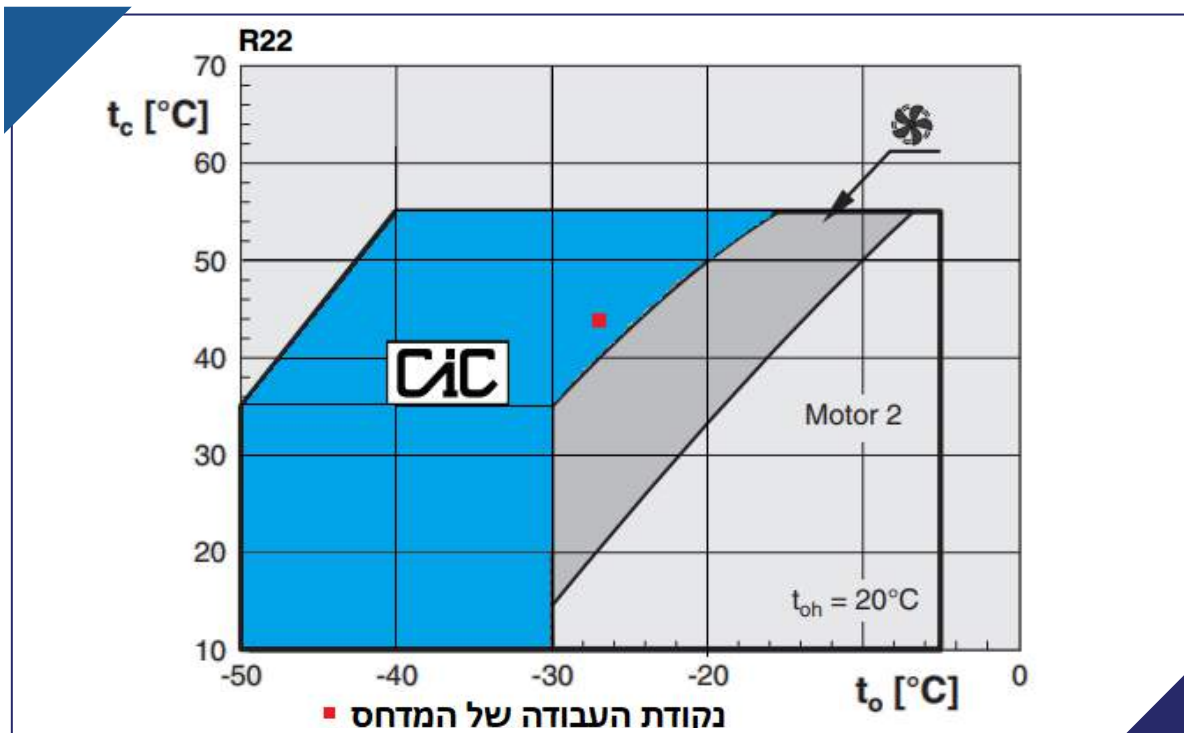
הסכנות בעלייה של טמפרטורת הדחיסה

1. התחממות ראשי המדחס גורמת לעלייה בטמפרטורת השמן ולירידה חדה באיכותו. דבר שיגרור בלאי מואץ של אטמי הבוכנה (רינגים) ושל דפנות הצילינדר, עד ליצירת פגם בצורת מדרגה בדופן הצילינדר.
2. ירידה בנצילות הנפחית של המדחס.
3. התחממות ראש המדחס עד למצב של התייבשות האטמים, והתפרקותם בחלל ההפרדה שבין היניקה והדחיסה. הדבר יגרום למעבר גז מהדחיסה ליניקה, או לדליפות קרר מחוץ למדחס.

שילוב מערכת הזרקת נוזל ומאוורר המותקן על ראש מדחס

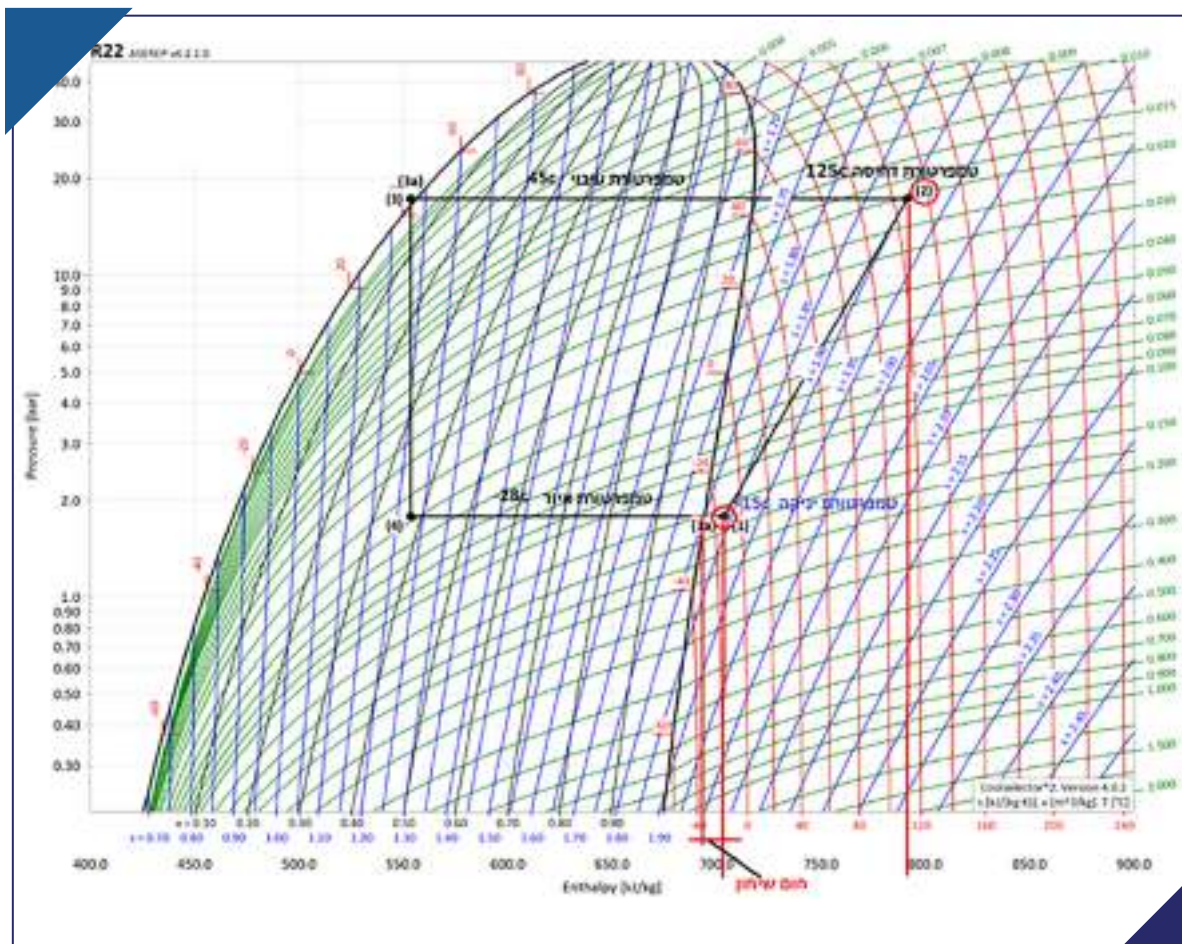
בתמונה 4.38, ניתן לראות טווחי עבודה של מדחס במתקן הקפאה. הגרף מראה בקווים אופקיים את טמפרטורת החוץ, ובקווים אנכיים את טמפרטורת האידוי שבמתקן. הימצאות נקודת העבודה של המדחס בתחום האפור תאפשר שימוש במאוורר בלבד. בתחום הכחול יהיה הכרח במערכת הזרקה.

תמונה 4.38 - תנאי עבודה של מדחס במערכת הקפאה



כדי להבין טוב יותר את הצורך בהורדת הטמפרטורה של הקרר הנכנס לדרגה השנייה (דרגת הלחץ הגבוה), נראה את תהליך הקירור של מערכת ההקפאה המתוארת לעיל על גבי דיאגרמת לחץ-אנטלפיה לקרר R-22 (ראו גרף למטה). טמפרטורת האידוד היא -28°C (נקודה 1a). ערך חום השיחון ביניקה הוא 13°C . יוצא מכך שטמפרטורת הקרר ביניקה היא -15°C (נקודה 1). בנקודה זו, ערך האנטלפיה (כמות החום ביחידת משקל) היא כ-700 KJ / KG. על פי קווי עבודת המדחס, ניתן לראות כי תהליך הדחיסה מביא את טמפרטורת היציאה מהמדחס ל- 125°C (נקודה 2) על פי הדיאגרמה. ערך האנטלפיה בנקודה זה הוא כ-790 KJ/KG. הפרש כה גדול באנטלפיה מצביע על כמות אנרגייה גדולה שמושקעת בתהליך הדחיסה, ומשמעותה צריכת אנרגייה גבוהה ויעילות (COP) נמוכה של המערכת. השימוש במערכת דו-דרגתית עם קירור ביניים (עם או בלי מאוורר ראש מדחס), יגרום להקטנת טמפרטורת הדחיסה, ויקטין את צריכת האנרגייה.

תמונה 4.39 - גרף מולייר למערכת חד דרגתית, לטמפרטורות נמוכות מאוד



קירור באמצעות מים

קירור באמצעות מים מתבצע במדחסי קירור גדולים, הפועלים עם קררים העובדים בלחצי דחיסה גבוהים. כמו כן במערכות אמוניה שבהן הקרר יוצא מהמדחס, בטמפרטורות גבוהות יחסית בהשוואה ללחצי הדחיסה. כדי לסלק ביעילות את החום שנוצר בצילינדרים ובראש המדחס, ובמיוחד במדחסים חד דרגתיים בעלי כמות צילינדרים קטנה, יש במדחסים אלה דופן צילינדר כפולה (Double Jacket) דרכה זורמים מים במעגל סגור הכולל משאבה ומחליף חום מקורר באוויר. באמצעות שינוי מהירות הסיבוב של המשאבה (VSD), ניתן לשלוט על כמות המים לקירור ולמנוע קירור יתר של המדחס.

4.3.1.5 סיווג מדחסים לפי דרגות דחיסה

- 1. מדחסים חד-דרגתיים:** מדחסים אלה יכולים להיות בעלי יותר מבוכנה אחת. הבוכנות יהיו מסודרות בתצורות שונות בבלוק צילינדרים, אחד או יותר. מדחסים חד-דרגתיים יונקים את הקרר מקו יניקה, ישירות לברז היניקה שבראש המדחס, דרך סעפת יניקה משותפת, או דרך בית גל הארכובה. במדחסים אלה לחץ הדחיסה מכל הצילינדרים מועבר ישירות לקו הדחיסה ולמעבה. דחיסה חד-דרגתית מתאימה למערכות שבהן יחס הדחיסה הוא עד 1:10 (מערכות מיזוג אוויר, קירור מים וכולי). היא תתאים גם למדחסים קטנים במתקנים ביתיים ומסחריים, שבהם המדחס אינו עובד שעות ארוכות ברציפות.
- 2. מדחסים דו-דרגתיים ורב-דרגתיים:** מדחסים אלה מיועדים למערכות שבהן יחס הדחיסה גדול, כמו במערכות עם טמפרטורות איוד נמוכות מאוד, או במערכות הפועלות בלחצי דחיסה גבוהים. הפרש הלחצים הגבוה יגרום לעומס גדול על המדחס ועל המנוע שמניע אותו, יביא לצריכת חשמל גבוהה, ירידה בנצילות המדחס ובלאי גבוה.

במדחסים בעלי דחיסה דו-דרגתית, תהליך הדחיסה מחולק לשניים כפי שניתן לראות בדיאגרמה [שבתמונה 4.42](#). בדרגה הראשונה, אזור הלחץ הנמוך. המדחס יונק קרר בלחץ נמוך מאוד מהמאייד, ודוחס אותו ביחס דחיסה סביר ללחצים שלא מעמיסים על המדחס. מכיוון שהקרר העוזב את דרגת הדחיסה הראשונה נמצא בלחץ גבוה יחסית, ואינו מתאים ללחץ הרצוי ביניקת הדרגה השנייה, חייב הקרר לעבור תהליך של הורדת הטמפרטורה לפני כניסתו לדרגה השנייה. בדרגה השנייה, הקרר נכנס בטמפרטורה ולחץ גבוהים יחסית ונדחס ללחץ המתאים לטמפרטורת העיבוי באותו סוג קרר. הפרש הלחצים בין היניקה והדחיסה בדרגה זו קטן יחסית, ואינו גורם להעמסת יתר של המדחס.

תהליך הורדת הטמפרטורה של הקרר מבוצע בשיטות הבאות:

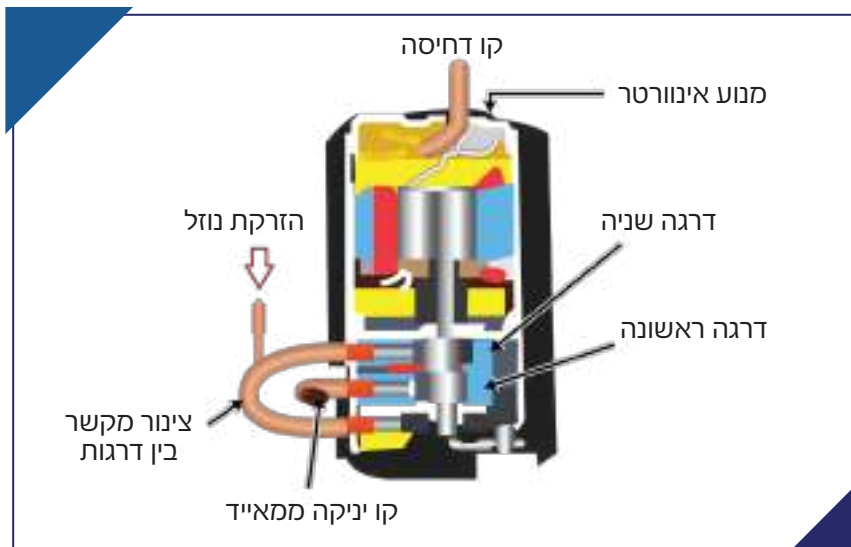
- 1. קירור ביניים על ידי הזרקת נוזל** - הזרקה לתא פנימי בחלל בית גל הארכובה או למיכל חיצוני, בו זורם הקרר כגז חם בין דרגות הקירור. ההזרקה מבוצעת באמצעות דיזת ריסוס מיוחדת, המקבלת את הנוזל דרך ברז חשמלי. הברז החשמלי מפוקח על ידי מערכת הבקרה של המדחס.
- 2. הזרקת נוזל ישירות אל סעפת היניקה של דרגת הלחץ הגבוה** - בשיטה זו הנוזל מתאייד ביניקת הדרגה השנייה ומקרר את הגז לטמפרטורה נמוכה יותר תוך הורדת הלחץ.
- 3. העברת הקרר בין דרגות הקירור, דרך מחליף חום חיצוני המקורר בחומר קר** - בדרך כלל משתמשים בשיטה זו במערכות שבהן יש זמינות למי קירור, כמו מערכות הפועלות עם מעבים מקוררי מים.

4. קירור במכל איוד (Flash Tank) המשמש גם כמכל לצורך קבלת קירור יתר מוגבר בקו הנוזל, לפני הכניסה לאביזר ההתפשטות (Economizer) - בשיטה זו, אנו מכניסים לחלקו התחתון של המכל (בדרך כלל גלילי) בעל נפח גדול יחסית, קרר נוזלי מקו הנוזל. מעבר הנוזל לחלל גדול יגרום לירידת הלחץ ולאידוד עצמי של חלק מהנוזל (Flash Gas). הנוזל המתאייד בחלקו מאפשר לקרר את יתרת הנוזל לפני כניסת הנוזל לאביזר ההתפשטות. בכך מושג קירור יתר יעיל יותר, שיפור בנצילות המתקן וחסכון באנרגייה הנדרשת להפעלתו. אפשרות נוספת במכל איוד היא העברת גז הקירור מדרגת הקירור הראשונה לכיוון יניקת הדרגה השנייה, דרך החלק העליון של המכל. זאת כשהוא מוזרם מעל מחיצה (Buffer) המפרידה בין אזור הנוזל והגז, או בתוך צינור המשמש כמחליף חום. כך מקבלים קירור (וירידה בלחץ) של הגז החם הנכנס ליניקת הדרגה השנייה.

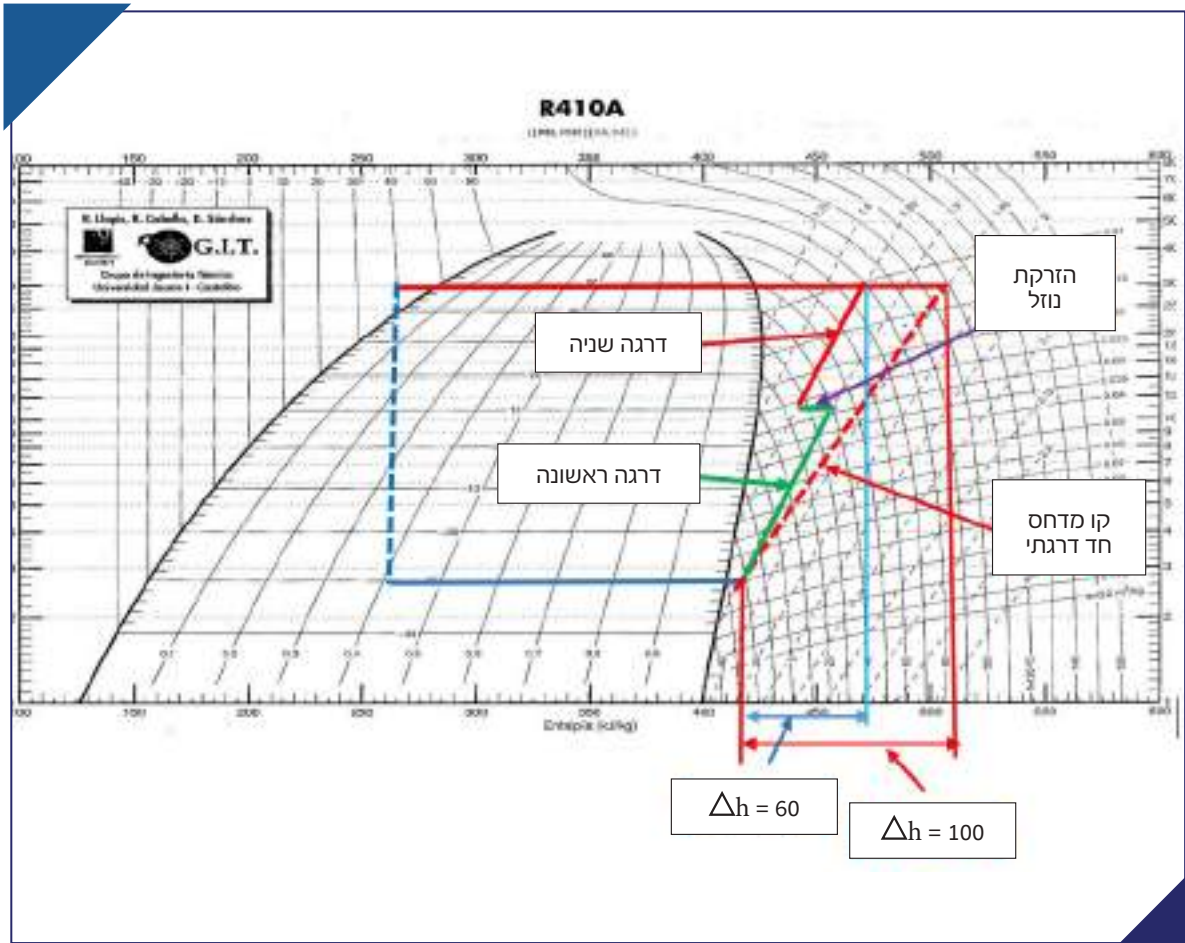
תמונה 4.40 - מדחס בוכנה דו-דרגתי עם קירור ביניים



תמונה 4.41 - מדחס סיבובי דו דרגתי עם הזרקת נוזל לקו יניקה



תמונה 4.42 - תיאור מעגל קירור דו-דרגתי בדיאגרמת לחץ/אנטלפיה



אופן פעולת המערכת

פעולת הדחיסה המתחילה עם כניסת הגז למדחס נקטעת במחליף החום. שם עליית הלחץ והטמפרטורה נבלמת על ידי קירור הגז, באמצעות הזרקת נוזל לקו היניקה או לתוך מכל הביניים, וממשיכה מטמפרטורה נמוכה יותר ועד ליציאת הגז החם מהמדחס לכיוון המעבה. התהליך מאפשר קבלת יחסי דחיסה נמוכים יותר בשתי הדרגות, המורידים את העומס על המדחס ומביאים להגדלת יעילותו.

4.3.1.6 מבנה ורכיבים של מדחסים הרמטיים

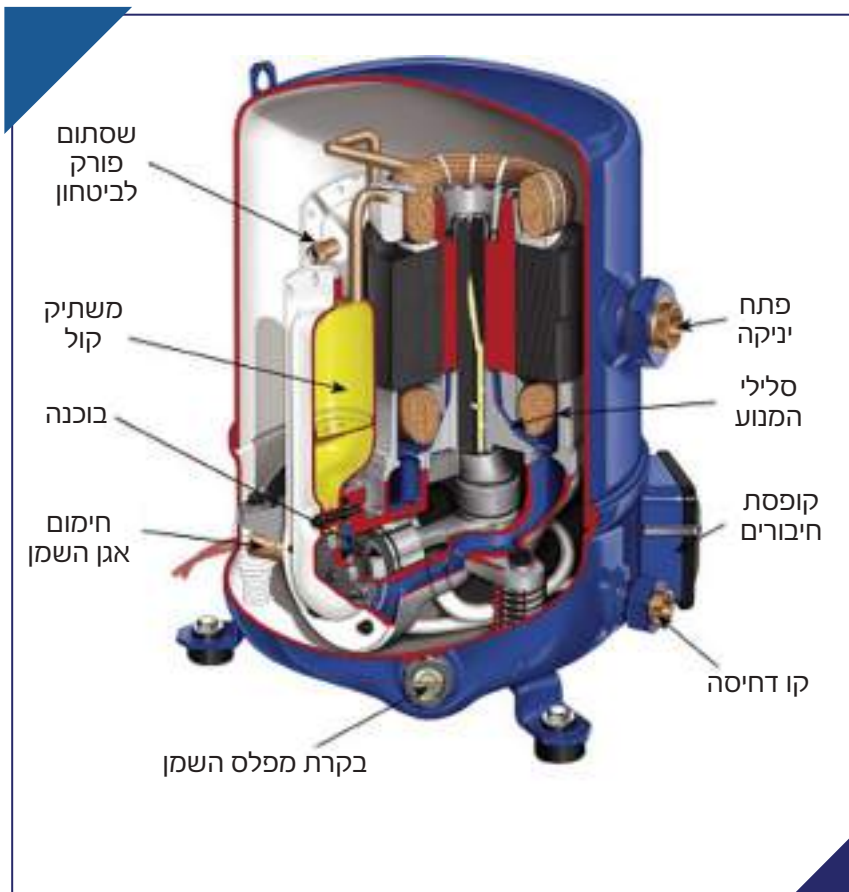
מדחסי בוכנה הרמטיים שונים ממדחסי בוכנה פתוחים ופתוחים למחצה, בכך שהם ממוקמים במעטפת מתכתית סגורה המורכבת משני חלקים. החלקים מחוברים זה לזה בריתוך. מדחסים אלה נחשבים חד-פעמיים, מכיוון שמחירם הזול אינו מצדיק את פתיחתם לצורך שיפוץ.

הבדלים העיקריים בין כלל מדחסי הבוכנה למדחסי בוכנה הרמטיים

1. למדחסי בוכנה הרמטיים אין משאבת שמן. בחלק מהמדחסים יחידת הדחיסה ממוקמת בתוך אגן השמן של המדחס. במדחסים שבהם יחידת הדחיסה נמצאת בחלק העליון של קופסת המדחס, החלק הפנימי של ציר המנוע החשמלי מעוצב בצורת לולין (סוג בורג), שבעת סיבובו גורף את השמן ומעבירו ליחידת הדחיסה ומרכיביה.
2. יחידת הדחיסה והמנוע החשמלי הם גוף אחד, שמוחזק וממוקם בתוך חלל קופסת המדחס, באמצעות 3-4 קפיצים.

3. יחידת הדחיסה מושתקת באמצעות משתיק קול (Muffler). היחידה מהווה חלק אינטגרלי מצינור הדחיסה, שמוביל ליציאת הגזים מקופסת המדחס.
4. צינור דחיסה גמיש עשוי נחושת. הוא בנוי בצורה מפותלת המקנה לו גמישות, כדי שלא יישבר בגלל התנועה היחסית שבין גוף המדחס לקופסה שבה מורכב.
5. פתח היניקה ממוקם ליד המנוע החשמלי בחלק העליון של קופסת המדחס, כדי למנוע יניקת קרר נוזלי.

תמונה 4.43 - מראה חתך של רכיבי מדחס הרמטי למיזוג אוויר



4.3.1.7 הגורמים המשפיעים על נצילות מדחסי בוכנה

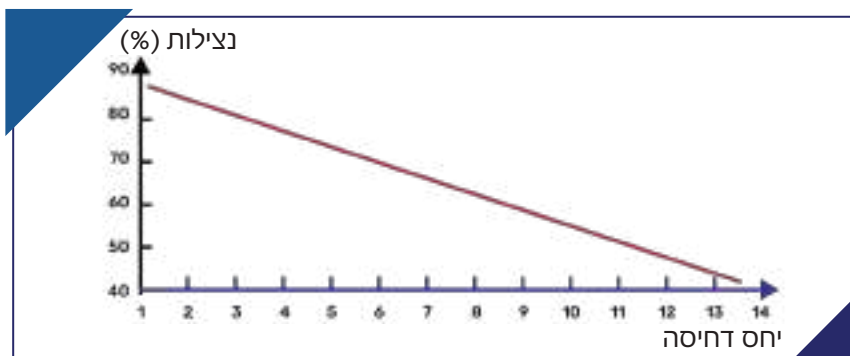
הנצילות הכוללת של המדחסים תלויה בשלושה גורמים:

1. בהפסדים המכניים הנובעים מריבוי רכיבים נעים והחיכוך הנוצר ביניהם.
 2. בהפסדים הנובעים מהפיכת התנועה הסיבובית של גל הארכובה לתנועה קווית של הבוכנות.
 3. בהפסדים הנובעים מעצם עיקרון פעולת הדחיסה של הקרר (יחס דחיסה) המורידים מנצילותו הנפחית.
- הבנה של הגורמים המשפיעים על הנצילות הנפחית של המדחס, יסייעו בהקטנת הפסדים אלה ושיפור הנצילות הכללית של המדחסים.

הגורמים העיקריים שמשפיעים על הנצילות הנפחית

1. **גודל (נפח) חלל השווא (Clearance Volume):** בגלל מבנהו הפנימי של מכלול הצילינדר, וכדי להימנע ממגע בין הבוכנה העולה ובין לוח השסתומים, תהיה הנקודה העליונה שבה מסתיים תהליך הדחיסה (נ.מ.ע.) מרוחקת 0.2 מ"מ מתקרת הצילינדר. עם סגירת שסתומי הדחיסה, נשארת במרווח זה כמות מסוימת של גז דחוס שלא יכול לעזוב את המדחס. עם תחילת היניקה וירידת הבוכנה, נפח הגז הכלוא בחלל השווא מתפשט בצילינדר. אז הוא גורם להשהייה בפתיחת שסתומי היניקה ומקטין את הנפח הפנוי אליו היה אמור להיכנס קרר מקו היניקה.
2. **התנגדות השסתומים:** שסתומי היניקה במדחס הם בעלי כוח אלסטי, הדרוש כדי להצמידם לפתח היניקה בתחילת תהליך הדחיסה. כוח זה משהה את פתיחת השסתום בתחילת תהליך היניקה ומקטין את כמות הקרר הנכנס לצילינדר. מצד שני, גם שסתומי הדחיסה בעלי התנגדות לפתיחה, לצורך שמירתם סגורים עד לקבלת לחץ הדחיסה הנדרש. התנגדות זו תמנע את יציאת כל הנפח הדחוס מהצילינדר לקו הדחיסה. עם ירידת הבוכנה, הגז הנשאר בצילינדר יתפשט וימנע כניסת קרר חדש לחלל המדחס. כל ניסיון להקטין את כוח קפיץ השסתום יכול להוביל לדליפה דרך תושבת השסתום ולפגיעה בבניית הלחץ בצילינדר. הפתרון לבעיה זו נמצא בידי יצרני המדחסים, הנוטים לפתור זאת על ידי הגדלת פתחי הדחיסה ושימוש בשסתומים יעילים יותר.
3. **טמפרטורת דופן הצילינדר:** כאמור בסעיף 1, כמות מסוימת של גז נשארת בצילינדר במהלך פעולתו. נפח הגז הנותר והלחץ שהוא יוצר תלויים בטמפרטורה השוררת בצילינדר. ככל שטמפרטורת הצילינדר תהיה גבוהה יותר, כך הגז הנותר יתפוס מקום רב יותר בצילינדר ותפוקת המדחס תרד. ניתן להקטין את טמפרטורת הצילינדר על ידי קירור יעיל של המדחס, באמצעות הזרמת גז קר מהמאייד, התקנת מפוחים לקירור המדחס ועוד.
4. **יחס דחיסה:** יחס הדחיסה הוא התוצאה של חילוק הערך המספרי של לחץ הדחיסה, בערך לחץ היניקה. לדוגמה, במערכות מיזוג אוויר שיוצרו בעבר עם קרר R-22, לחץ הדחיסה עבור טמפרטורת עיבוי בתנאים סטנדרטיים של $+50^{\circ}\text{C}$ הוא כ-280 psig, ואילו לחץ היניקה המתאים לטמפרטורת איוד של כ- $+4^{\circ}\text{C}$ הוא כ-60 psig. מכאן, יחס הלחצים הוא $\frac{280}{60} = 4.67$ (יחס הדחיסה הוא 1:4.67). כיום משתמשים בקרר מסוג R-410a, שבו לחצי הדחיסה והיניקה לאותן טמפרטורות הם 450 psig ו-120 psig בהתאמה, ולגביהם יחס הלחצים הוא $\frac{450}{120} = 3.75$ (יחס הדחיסה הוא 1:3.75). במקרה זה אנו רואים שהמעבר לקרר החדש גרם לשיפור ביחס הדחיסה. כך נגרם מאמץ מכני קטן יותר של המדחס, צריכת אנרגייה פחותה ויעילות מוגברת.

תמונה 4.44 - גרף השפעת יחס דחיסה על נצילות המדחס



כך ניתן למנוע את הגדלת יחס הדחיסה מעל המתוכנן

- שמירה על לחץ ועל טמפרטורה נכונים במעבה, על ידי החלפת חום יעילה (תקינות, ניקיון, קירור).
- שמירה על טמפרטורה ולחץ מתאימים במאייד (תקינות, ניקיון, בקרת טמפרטורה).
- תכנון נכון של צנרת המערכת.
- תקינות מערכת הקירור של המדחס (שמן, מיקום, אוורור חיצוני).
- תקינות מערכת הקירור (פילטרים, צנרת וברזים).

4.3.2 מדחסים סיבוביים (מדחסים רוטאריים - Rotary Compressors)

מדחסים סיבוביים בשימוש מזה שנים רבות. בעבר, כאשר רוב המערכות צוידו במדחסי בוכנה, המדחסים הסיבוביים שימשו בעיקר במערכות תעשייתיות (בעיקר מדחסים בורגיים). זאת מכיוון שבמערכות אלה היה צורך להעביר כמויות קרר גדולות במיוחד. טכנולוגיות ייצור ועיבוד מתכת יקרות, כמו גם מערכות שירותים נלוות גדולות (שימון או הפרדת שמן וקירור), מנעו ממדחסים סיבוביים להפוך למובילים בתעשיית מדחסי הקירור ומיזוג האוויר. עם הגדלת השימוש במערכות מיזוג אוויר שלא למטרות תעשייתיות, וכניסת מערכות מיזוג אוויר בתפוקות גדולות יותר ויותר, פנו יצרני המערכות והמדחסים לשימוש במדחסים סיבוביים. בין היתר, מתוך רצון להפחתת כמות האנרגייה הנצרכת על ידי מערכות אלה, ובמטרה להקטין את צריכת האנרגייה הגלובלית. הדבר נגזר ממבנה המדחסים ואופן פעולתם, כמתואר להלן:

א. מדחסים אלה בעלי כמות קטנה יותר של חלקים נעים הדורשים שימון.

ב. מבנה המדחסים ואופי פעולתם מקנה להם תנועה סיבובית רציפה המאפשרת הוצאה רציפה של קרר למערכת. זאת בניגוד למדחסי הבוכנה, שבהם הבוכנה מוציאה רק כמות נפחית אחת למערכת בכל שתי פעולות של הבוכנה (יניקה + דחיסה).

ג. היעדר חלל שווא והיעדר שסתומי יניקה ודחיסה, וכן העבודה בטמפרטורות נמוכה יותר, מאפשרים קבלת נצילות נפחית גדולה משמעותית מזו המושגת במדחסי בוכנה.

ד. מכיוון שאין במדחסים סיבוביים שסתומי דחיסה, הגדלת הלחץ בחלל הדחיסה מושגת ביניקת קרר רב דרך פתחי יניקה גדולים ורבים, והעברתו לקו דחיסה דרך פתחי יציאה קטנים משמעותית.

הערה: אף שאינם מצוידים בשסתומי דחיסה, במדחסים אלה יש להתקין שסתום חד-כיווני (Check Valve) ביציאת המדחס. זאת כדי למנוע בעת כיבוי המדחס השוואת לחצים דרך המדחס בין צד הלחץ הגבוה לצד הלחץ הנמוך. בעקבות כך תימנע הצפה של המאייד בקרר נזלי ובשמן. מדחסים סיבוביים אינם מוגבלים בסוגי הקררים שבהם הם מיועדים לפעול: קררים מסוג H.F.C, H.C.F.C, גזים טבעיים ואמוניה.

יתרונות מדחסים סיבוביים

- נצילות נפחית גדולה מאוד יחסית למדחסי בוכנה. זאת בגלל צילינדר קטן יחסית, ללא חלל שווא וכן טמפרטורות נמוכות ביחס למדחסי בוכנה.
- צריכת אנרגייה נמוכה יחסית למדחסי בוכנה, התורמת להגדלת נצילות המערכת (COP גבוה).
- כמות קטנה של חלקים נעים מאפשרת בלאי נמוך ואורך חיים רב.
- אינם רועשים ותופסים שטח קטן יותר.

חסרונות מדחסים סיבוביים

- מדחסים צנטריפוגליים ומדחסים בורגיים הם יקרים, ולכן משמשים בעיקר במערכות גדולות.
- המדחסים הבורגיים דורשים כמויות שמן גדולות, וכן מערכות להפרדה והולכה של שמן. אלה יקרות לתחזוקה.
- המדחסים הרוטאריים (מדחסי להבים) רגישים יותר לכניסת נוזל קירור ליניקת המדחס.
- ויסות תפוקה באמצעות פריקת המדחס, דורש תוספת מערכות מורכבות ויקרות.

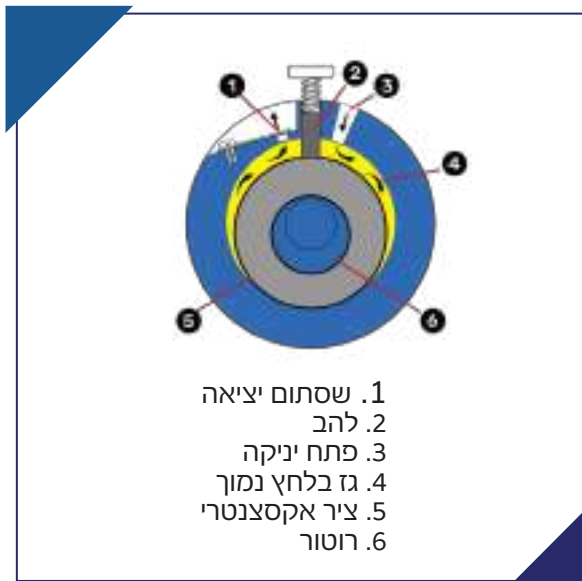
המדחסים הסיבוביים נחלקים לשני סוגים**4.3.2.1 מדחסי להבים רוטאריים (Blades, Vanes)****1. מדחסי להב קבוע (Stationery Compressors)**

מדחסים אלה בנויים ממנוע חשמלי המסובב טבעת (רוטור). הטבעת מחוברת אל ציר המנוע בחיבור לא ממורכז (אקסצנטרי), כך שטבעת הסיבוב הטבעת תמיד צמודה לדופן הצילינדר בנקודת השקה אחת. נפח הצילינדר מחולק בין צד היניקה (לחץ נמוך), לצד הדחיסה (לחץ גבוה) על ידי להב מפלדה מחוסמת, המנוע מעבר של הקרר מצד לצד. בגלל מבנהו, נקרא מדחס זה גם "Divided Block Compressor".

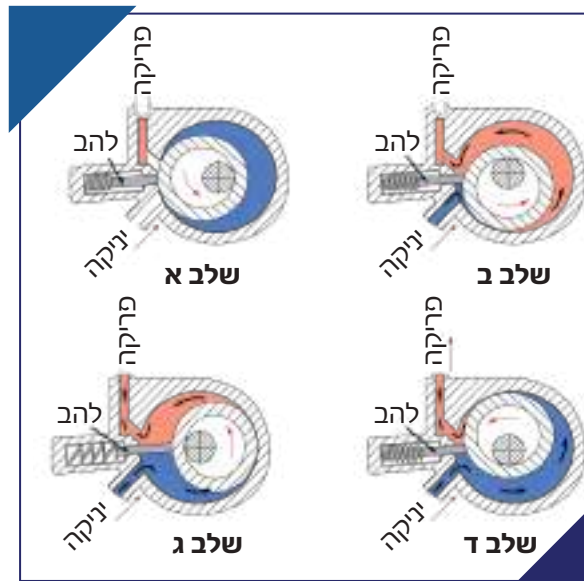
עיקרון פעולת המדחס (ראו תמונה 4.45)

- בתחילת הפעולה (שלב א'), הרוטור המסתובב עובר את פתח היניקה, וגורף איתו את הקרר שנמצא בתוך הצילינדר (בצד היניקה).
- בהמשך תנועת הסיבוב (שלב ב'), הרוטור (טבעת) הצמוד לדופן הצילינדר חוסם את אפשרות חזרת הקרר לכיוון פתח היניקה, ולכוד את הקרר בינו ובין הלהב הנלחץ אל הרוטור בכוח הקפיץ. תנועת הרוטור מצמצמת את הנפח שבו נמצא הקרר, תוך אילוצו לכיוון פתח היציאה הקטן. עם צמצום הנפח, כשהרוטור השלים חצי סיבוב (180 מעלות), הלחץ של הקרר עולה והוא יוצא לקו הדחיסה בלחץ גבוה.
- במקביל (שלב ג'), מצידו השני של הרוטור, נוצר אזור לחץ נמוך שאליו נשאב הקרר המגיע מכיוון המאייד אל פתח היניקה החשוף, וממלא שוב את החלל שבין הרוטור לצילינדר.
- המשך סיבוב הרוטור (שלב ד') יגרום לפעולה זהה, שבה הרוטור ישלים סיבוב שלם (360 מעלות), ויוציא לקו הדחיסה כמות נוספת של קרר בלחץ גבוה.

תמונה 4.46 - מדחס סיבובי להב - מבנה קבוע



תמונה 4.45 - מדחס סיבובי להב קבוע (Stationary Blade) - שלבי פעולה

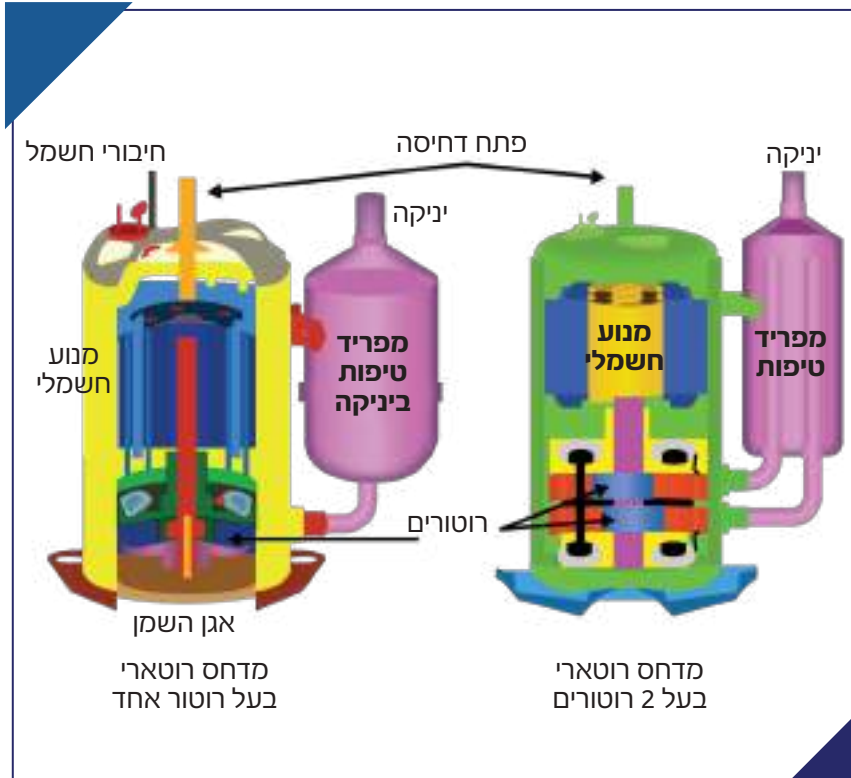


במדחסים הרוטאריים בעלי הלהב הקבוע יש נפח יניקה קטן והגבלה ביחס הדחיסה, כתוצאה מגודל הלהב ומכוסר עמידה מוגבל שלו. הפתרון לכך נמצא במדחסים בעלי שני צילינדרים. מדחסים בעלי שני צילינדרים מכפילים את נפח היניקה, ומדחסים דו-דרגתיים מאפשרים קבלת לחצי דחיסה גבוהים יותר.

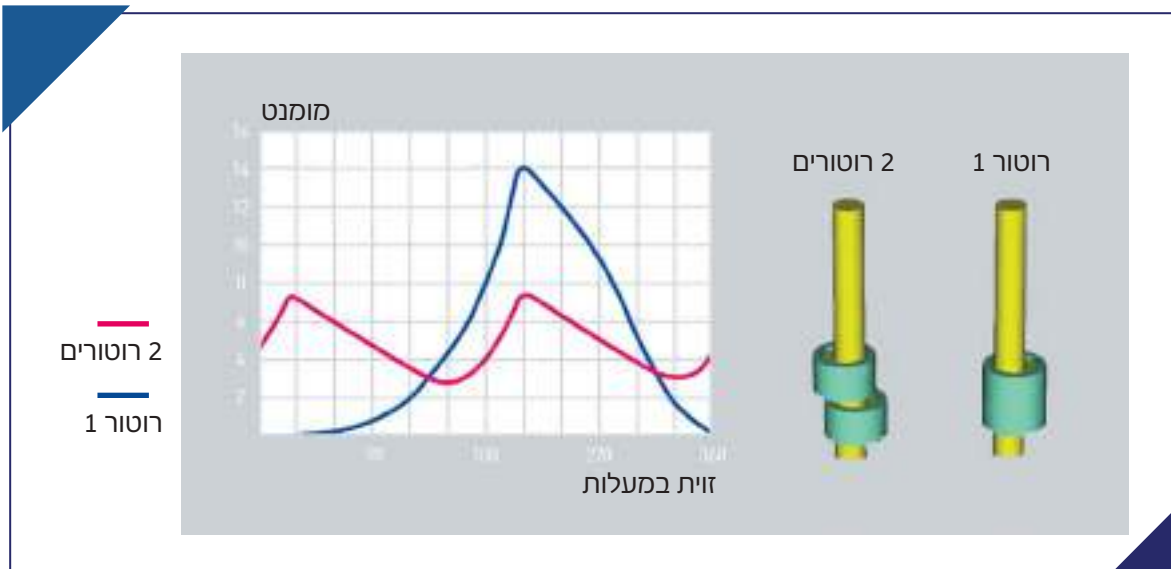
מדחסים רוטאריים

במדחס מימין בתמונה 4.47, הקרר מגיע (במצב גז קר) ממפריד הטיפות דרך שני צינורות, לשני תאי דחיסה - עליון ותחתון. הרוטור מסתובב בתוך צילינדר, ותוך כדי הסיבוב מקטין את נפח חלל הדחיסה בין הרוטור לצילינדר ויוצר אזור לחץ גבוה המופרד באמצעות הלהב, מאזור הלחץ נמוך (יניקה). בנוסף הוא מגדיל את הלחץ שמועבר דרך צינור לחלק העליון במדחס. השימוש בזוג רוטורים מאפשר להקטין את המומנט בציר המדחס. כתוצאה מכך, רעידות המדחס קטנות וגדלה הספיקה הנפחית, על ידי שני תאי דחיסה וצריכת אנרגייה חשמלית נמוכה יותר. במדחס משמאל, התהליך שאותו עובר הקרר זהה, וההבדל העיקרי בין שני המדחסים הוא כמות קטנה יותר של הקרר העובר מיניקה לדחיסה, וכתוצאה מכך נצילות מדחס נמוכה יותר. הגדלת מהירות הסיבוב כדי להשיג ספיקת קרר גבוהה יותר, תגרום לרעידות ולטמפרטורת מדחס גבוהה יותר. מדחסים מסוג זה מתאימים ליחידות קירור ומיזוג אוויר בתפוקות 1KW-19KW.

תמונה 4.47 - מדחסים רוטאריים



תמונה 4.48 - השוואת שינוי תפוקה במדחס סיבובי

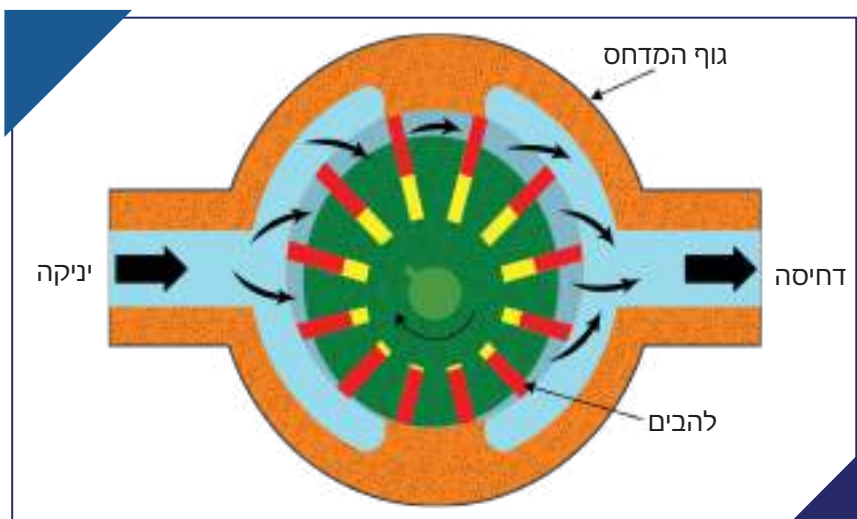


ניתן לראות בגרף המתואר בתמונה 4.48 השוואה בין מדחס רוטורי יחיד למדחס רוטורי כפול. המומנט ביחס לזווית הסיבוב: המומנט נמוך יותר במדחס עם הרוטור הכפול (הגרף האדום) 2 רוטורים, לעומת הרוטור היחיד המתואר בגרף הכחול רוטור 1.

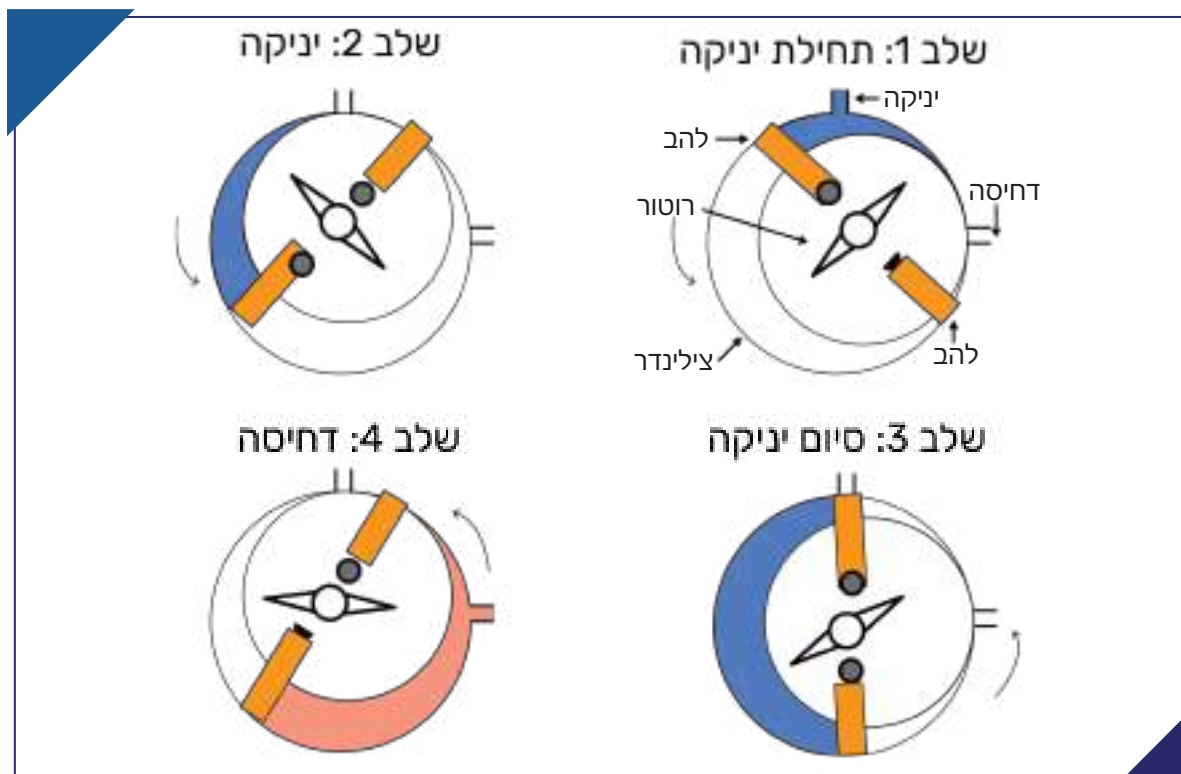
2. מדחסי להבים סובבים (Rotating Blades)

במדחס זה, להבדיל ממדחס בעל להב קבוע, הלהבים (שניים או יותר) נמצאים בתוך חריצים ברוטור המסתובב. הלהבים נצמדים לדופן הצילינדר באמצעות כוח צנטריפוגלי, הנוצר עקב מהירות הסיבוב הגבוהה של הרוטור (ראו תמונה 4.49). ללהבים אין קפיצים הדוחפים אותם אל שטחו הפנימי של הצילינדר, ותנועתם בתוך המובילים (חריצים) תלויה במהירות הסיבוב של הרוטור, ובמרחק (מיקום) טבעת הרוטור מדופן הצילינדר. בשל ריבוי הלהבים, ניתן להגדיל את כמות פתחי היניקה והדחיסה, דבר המאפשר העברת קרר בכמויות גדולות יותר וברציפות מקו היניקה לקו הדחיסה של המערכת. בכך אפשר להגדיל את תפוקת המדחס והמערכת.

תמונה 4.49 - מדחס רוטארי מסוג להבים סובבים



תמונה 4.50 - עיקרון הפעולה של מדחס רוטארי עם 'להבים סובבים'



תיאור התהליך במדחס (תמונה 4.50)

שלב 1: עם תחילת הסיבוב, הלהב הסמוך לפתח היניקה גורף את הקרר מקו היניקה ומעביר אותו לתוך הצילינדר. במקביל, נפחו של הקרר שנלכד בין שני הלהבים מצטמצם ולחצו גדל.

שלב 2: הרוטור ממשיך לנוע, נפח הקרר הנכנס מקו היניקה גדל ונפח הקרר הלכוד בין שני הלהבים ממשיך להצטמצם, תוך כדי הגדלת הלחץ.

שלב 3: הלהב עובר את פתח היניקה ונפח חדש של קרר נלכד בין הלהבים. הקרר מהצד השני של הלהב ממשיך בתנועתו לכיוון קו הדחיסה בלחץ גבוה.

שלב 4: סיום ההליך - הקרר שבצד הלחץ הגבוה מסיים לצאת דרך שסתום היציאה לקו הדחיסה, הקרר הלכוד בין הלהבים ממשיך בתנועתו כשנפחו מצטמצם והלחץ שלו גדל, ונפח קרר חדש נכנס למדחס דרך קו היניקה.

התהליך חוזר על עצמו כל עוד המדחס ממשיך לפעול.

שימון מדחסים רוטאריים

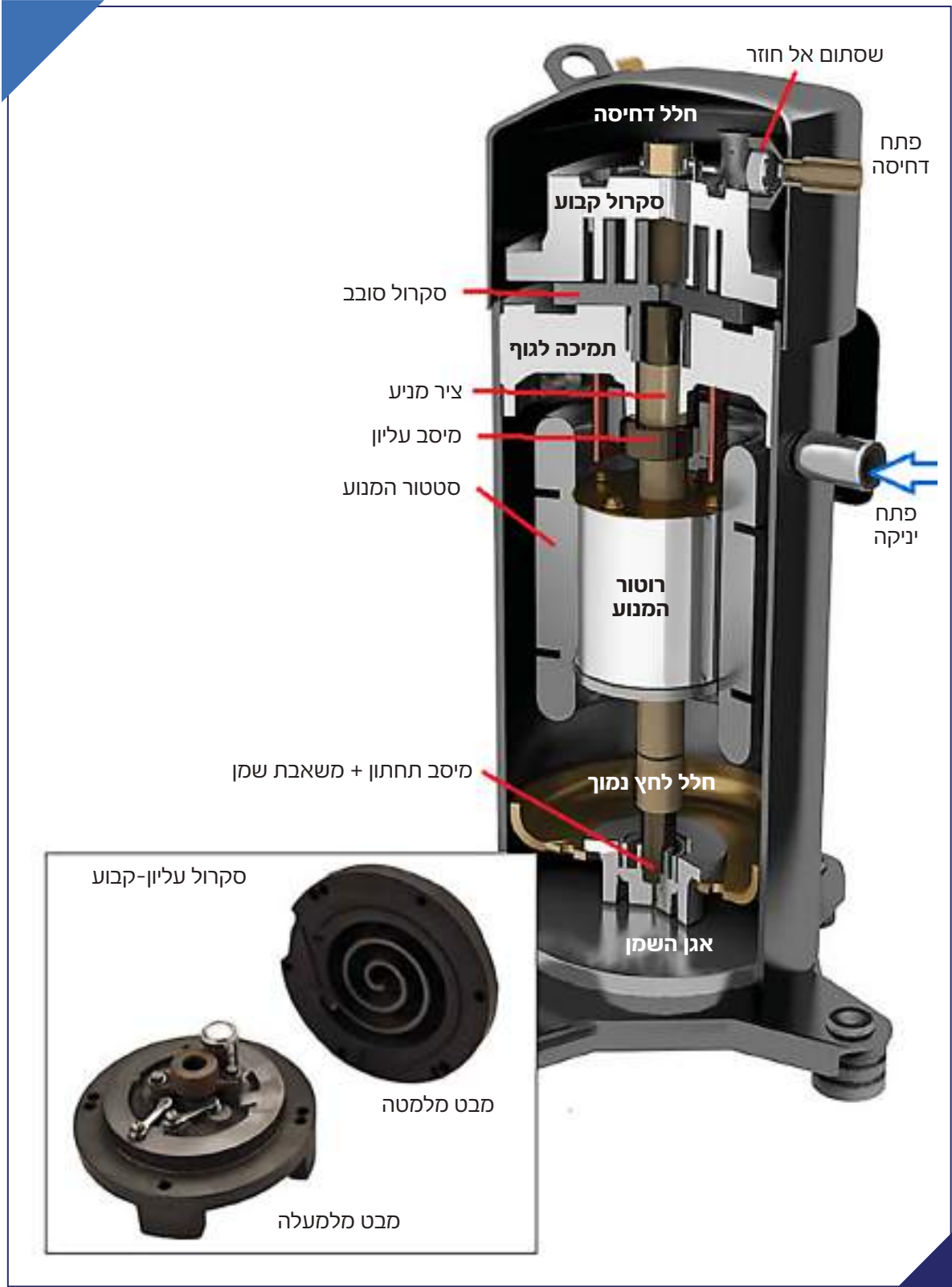
שימון חלקי יחידת הדחיסה הוא מרכיב מרכזי בפעולה תקינה ויעילה של מדחסים רוטאריים. השמן מקטין את החיכוך הגבוה בין הלהבים ודופן הצילינדר, ומשמן את מסלול התנועה של הלהבים. כדי לאפשר שימון יעיל, מנגנון הדחיסה מותקן כשהוא טבול בשמן (באגן השמן של המדחס).

4.3.2.2 מדחסי סקרול (Scroll)

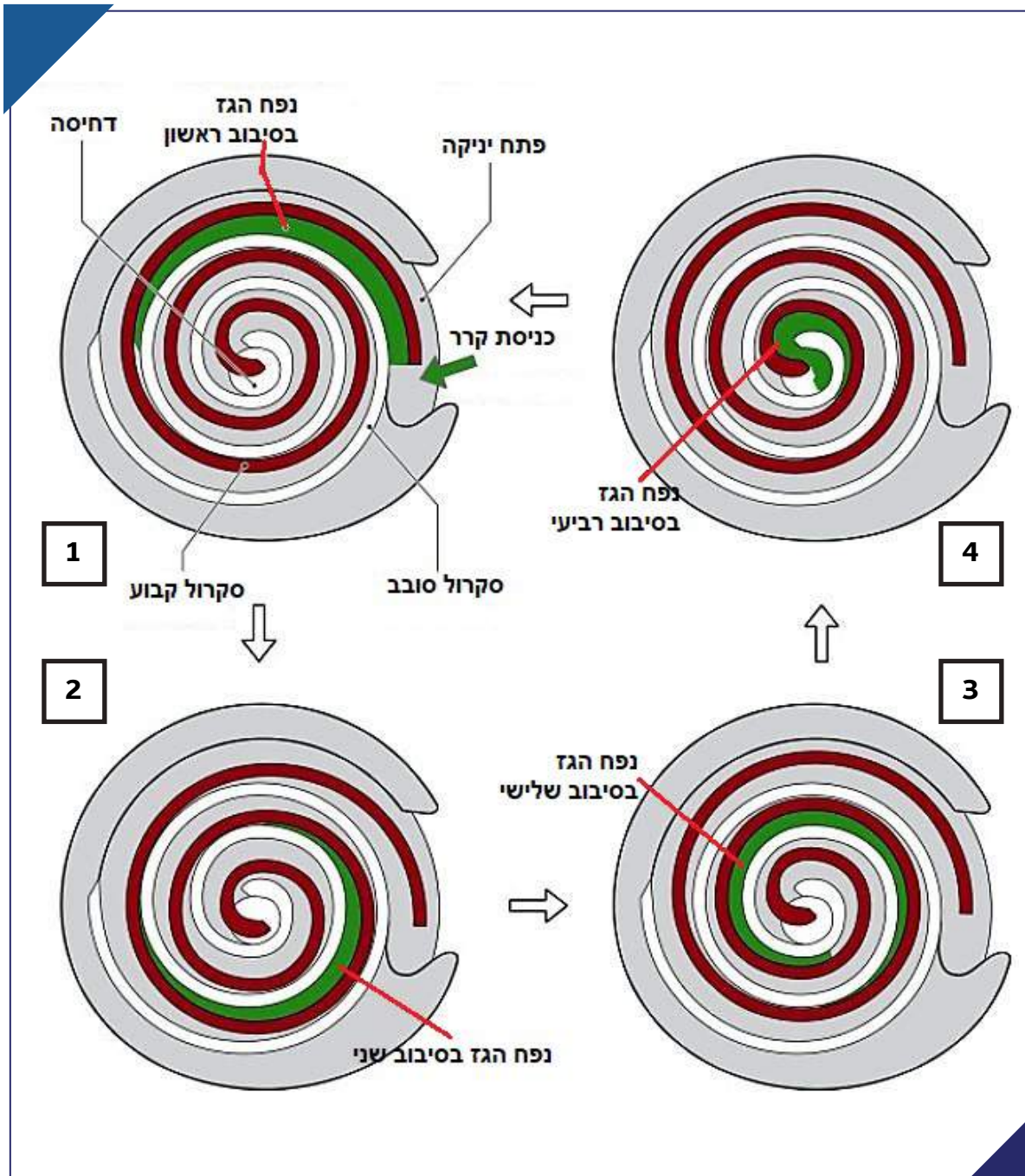
מדחסי סקרול פותחו כבר בשנות ה-70 של המאה העשרים. זאת במענה לדרישה למדחסים סיבוביים שיוכלו להזרים כמויות גדולות יותר של קרר. מדחסי סקרול (גלילה) בנויים משני אלמנטים שבלוליים. העליון קבוע, והתחתון מקבל תנועה ממנוע חשמלי, ומותקן על משטח בעל שני צירים לא סימטריים. הצירים גורמים לו להסתובב בתוך החלק הקבוע בתנועת "בחישה", המשנה את המרווחים שבין השבלולים ארבע פעמים במהלך סיבוב אחד (360°). האטימה במדחס בין החלק הקבוע לחלק המסתובב נעשית על ידי תנועת הסיבוב המהירה והשמן שבמדחס, הנדחס בין שני הסקרולים.

עקב כך נוצרים כיסי גז דחוס, המונעים על ידי השבלולים מאזור היניקה אל המרכז, תוך כדי הקטנת נפחם. פעולה זו גורמת להגדלת לחץ הגז הלכוד בכיסים, עד ליציאתו בלחץ הרצוי בכיוון פתח יציאת הגז מהמדחס.

תמונה 4.51 - חתך ורכיבים של מדחס סקרול



תמונה 4.52 - ארבעת השלבים של דחיסת הקור



שליבי פעולת המדחס (תמונה 4.52)

גז קירור בלחץ נמוך מגיע מהמאייד, נכנס דרך פתח היניקה ונלכד בין הסקרולים (1). לאחר שהסקרול מבצע סיבוב נוסף, הגז הנדחס מועבר לכיוון המרכז, בעוד נפח חדש של גז מהיניקה מתחיל את התהליך מחדש (2). בהמשך, לאחר סיבוב שלישי (3) הגז עובר לחלל בעל נפח קטן יותר עד שבסוף הסיבוב הרביעי (4), הגז מועבר בלחץ גבוה לכיוון פתח היציאה מהסקרול, אל חלל הדחיסה וליציאת המדחס. בכל סיבוב של הסקרול, מתבצעת פעולת הכנסת נפח חדש של קור ביניקה ובמקביל עוזב את הסקרול, גז דחוס שנכנס ארבעה סיבובי מדחס לפני כן.

תמונה 4.53 - מדחס סקרול החלק הנע והקבוע



יתרונות מדחס סקרול

- בעל כושר העברת כמויות גדולות של קרר, המאפשרות תפוקות קירור גבוהות.
- שקט ואינו מייצר רעידות לחץ בצנרת.
- בעל נצילות נפחית (אין שסתומים ואין חלל שווא) ומכנית גבוהה (פחות חלקים).
- חסכוני בצריכת החשמל.
- בלאי נמוך, בשל מיעוט חלקים נעים שדורשים שימון.

חסרונות מדחס סקרול

- היפוך כיוון סיבוב המדחס יגרום לשחיקה מכנית של הסקרולים.
- מחייב התקנת אמצעים למניעת היפוך כיוון סיבוב של המנוע החשמלי.
- בעל תפוקות נמוכות יחסית למדחסים בורגיים.

שיטות ויסות תפוקה למדחסי סקרול

- באמצעות מערכת לשינוי מהירות הסיבוב של המנוע (VSD).
 - שינוי מהירות סיבובי המנוע בשיטת שינוי התדר, או בשיטת שינוי המתח במדחסים עם מנועי זרם ישר (DC). מערכות הפועלות בשיטה זו ידועות גם כמערכות אינוורטר (Inverter).
 - באמצעות הגדלת המרווח בין החלק המסתובב לחלק הקבוע. הגדלת המרווח על ידי הרמת הסקרול הקבוע, מאפשרת לחלק מהקרר לחזור לכיוון אזור היניקה ובכך להקטין את כמות הקרר היוצאת למערכת.
- השסתום העוקף מופעל על ידי לחץ שמן של המדחס ונפתח על ידי סליל מגנטי חשמלי (סולונואיד) פנימי, באמצעות פתיחת מעבר עוקף פנימי בין אזור הדחיסה ליניקה.

יש לציין כי שינוי מהירות הסיבוב במדחסים מסוג סקרול יכולה לנוע בין 20% ל-120% ממהירותו הנומינלית של המדחס. פעולה מתחת ל-30% מהתפוקה הנומינלית של המדחס אינה מומלצת, בעיקר עקב בעייה בחזרת שמן.

שימון במדחסי סקרול

ככלל, מדחסים אלה מיוצרים במבנה הרמטי, והחלק שבו מתבצעת הדחיסה ממוקם בחלקה העליון של קופסת המדחס. לצורך העלאת השמן מקרקעית אגן השמן, משתמשים לרוב במשאבה מסוג בורג לולייני, הגורפת את השמן בתנועה סיבובית ומעלה אותו עד למסבי המדחס ויחידת הסקרולים. במדחסי סקרול גדולים ובמדחסים המשתמשים בלחץ שמן לשינוי המפתח בין הסקרולים בתהליך ויסות תפוקה, ניתן למצוא משאבות שמן פנימיות, הטבולות באגן השמן ומונעות על ידי תמסורת גלגלי שיניים מציר המנוע. לאחרונה, עם עליית הספקי המדחסים והצורך בשימון מוגבר, ניתן למצוא מדחסי סקרול סגורים, שבהם יחידת הדחיסה מותקנת בחלק התחתון של קופסת המדחס ופועלת בתוך אגן השמן. מכיוון שבזמן פעולתם, מעבירים מדחסי הסקרול כמויות גדולות יחסית של שמן מהמדחס למערכת, ניתן למצוא במתקנים בעלי תפוקה גדולה מתקני הפרדת שמן והחזרתו. אלה מותקנים בקו הדחיסה קרוב ליציאה מהמדחס.

4.3.2.3 מדחסים בורגיים (Helical Screw Compressor)

המדחס הבורגי פותח לראשונה בשוודיה בשנת 1934 על ידי חברת SRM. משנת 1958 יוצר בצורה מסחרית, כמדחס למערכות קירור בינוניות הפועלות בלחצים גבוהים. עד לרבע האחרון של המאה העשרים, מדחסים בורגיים שימשו בעיקר במערכות גדולות, לתפוקות גבוהות מ-80 טון קירור. זאת בשל גודלם וגודל מערכות העזר הנלוות אליהם. המדחסים הבורגיים נחשבים כמדחסים אמינים בעלי אורך חיים רב, ולכן הפכו לנפוצים בתעשיית הקירור. עם התפתחות התעשייה והשאיפה לחיסכון באנרגייה והקטנת ההתחממות הגלובלית, התעורר צורך לעבוד במערכות הקירור עם מדחסים בורגיים בעלי נצילות גבוהה, הן נפחית (זרימה מתמשכת) והן מכנית (כמות קטנה של חלקים נעים) גם בתפוקה קטנה יותר. זאת על מנת לאפשר חיסכון באנרגייה ובהחזר עלויות ההקמה בזמן סביר. נכון להיום, ניתן למצוא מדחסים אלה גם בתצורת מדחס חצי סגור, לשימוש במערכות לתפוקות קטנות יותר.

המדחס הבורגי מאפשר ספיקה קבועה ורציפה של הקרר. לכן במערכות הפועלות עם מדחס בורגי לא קיימת תופעה של "מכות הלחץ" הקיימת במדחסי בוכנה. כמו שאר המדחסים הסיבוביים, גם המדחס הבורגי יכול לפעול בתנאי לחץ ובספיקות משתנים מבלי להיכנס לתופעת ה-Surging (הנחשול). תופעה זו מתפתחת על היקף הרוטור, במדחסים דינמיים בעלי מהירויות סיבוב גבוהות מאוד (כמו המדחסים הצנטריפוגליים). בעבר, הוגבל השימוש במדחסים בורגיים למערכות הקפאה והם פעלו עם קררים שכיום כבר אינם בשימוש, כמו R-11, R-12. כיום, המדחס הבורגי עובד במערכות לטמפרטורות שונות, כולל במערכות למיזוג אוויר, כתחליף למדחס הצנטריפוגלי ועם קררים מסוגים שונים. החל מ-R-22 וכלה בגזים הטבעיים מסוג פרופן (R-290), בוטן (R-600), CO₂ (R-744) וגז טבעי.

יתרונות מדחסים בורגיים

- יעילות נפחית ומכנית גבוהה.
- העברת כמויות גדולות של קרר.
- זרימה רציפה - אין מכות לחץ ורעידות בצנרת.
- פעולה יחסית שקטה.
- טווח תפוקות 30-600 כ"ס.
- טיפול ואחזקה קלים יותר.

חסרונות מדחסים בורגיים

- יקרים לרכישה, בגלל מערכות עזר רבות.
- המנועים החשמליים בעלי הספק גדול בגלל מהירות סיבוב נמוכה יחסית (ניתן להשתמש במנועים בעלי מהירות סיבוב גבוהה, אך הדבר יביא לצורך בהתקנת ממסרות הפחתה, שפוגעות ביעילות המדחס ודורשות שימון רב).
- עלויות אחזקה גבוהות.
- תופסים נפח רב בגלל המערכות הנלוות.

סוגי מדחסים בורגיים

מדחס דו-בורגי (Double Screw Helical Rotary Compressor)

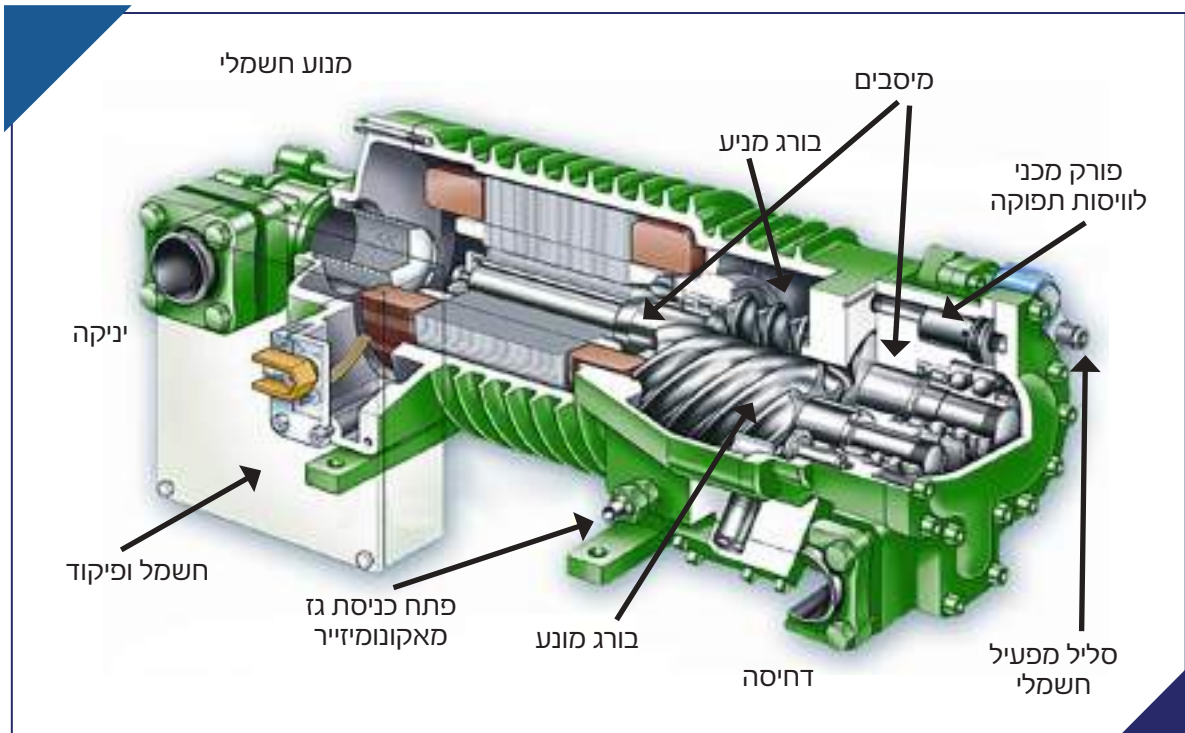
המדחס הדו-בורגי יוצר כמדחס בורגי בלעדי עד לשנת 1970, בתצורה של מדחס פתוח או סגור למחצה, שבו שני רוטורים עשויים מפלדה. רוטור אחד הוא בעל צורת בורג בעל בליטות המסודרות לאורך צירו, שנקרא הבורג הזכרי (בורג מוביל או בורג מניע) ומקבל תנועה ממנוע חשמלי (פנימי או חיצוני). רוטור בורגי נוסף בעל שקעים תואמים הממוקם במקביל אליו נקרא הבורג הנקבי (בורג מונע או בורג מובל).

עיקרון הנעת הבורג המונע שונה ממדחס למדחס

יש מדחסים שבהם ההנעה היא ישירה על ידי הבורג המניע, ושכבת השמן המציפה את המדחס חוצצת בין הברגים ומונעת נזק כתוצאה מחיכוך. מעבר לתפקידה באיטום המרווחים שבין הברגים ובין החלל שבתוכו הם נעים, במדחסים אלה שכבת השמן בין הברגים מתפקדת כשכבת "ריפוד". זו מונעת מגע ישיר בין הברגים וכך מונעת את שחיקתם.

במדחסים אחרים, ניתן למצוא תמסורת גלגלי שיניים המשמשת להנעה ולסנכרון, ושכבת השמן משמשת רק כאטם המונע חזרת הקרר לכיוון קו היניקה. בכל המדחסים, הרוטורים מקובעים למקומם בקופסת המדחס בעזרת זוגות של מסבים כדוריים, המתאימים למהירויות ולעומסים רדיאליים גדולים. מדחסים דו-בורגיים מתוכננים לעבוד בלחצי דחיסה גבוהים, ומסוגלים להגיע עד ליחס דחיסה של כ-1:36 לעומת יחס דחיסה אופטימלי של עד 1:10 במדחסי בוכנה.

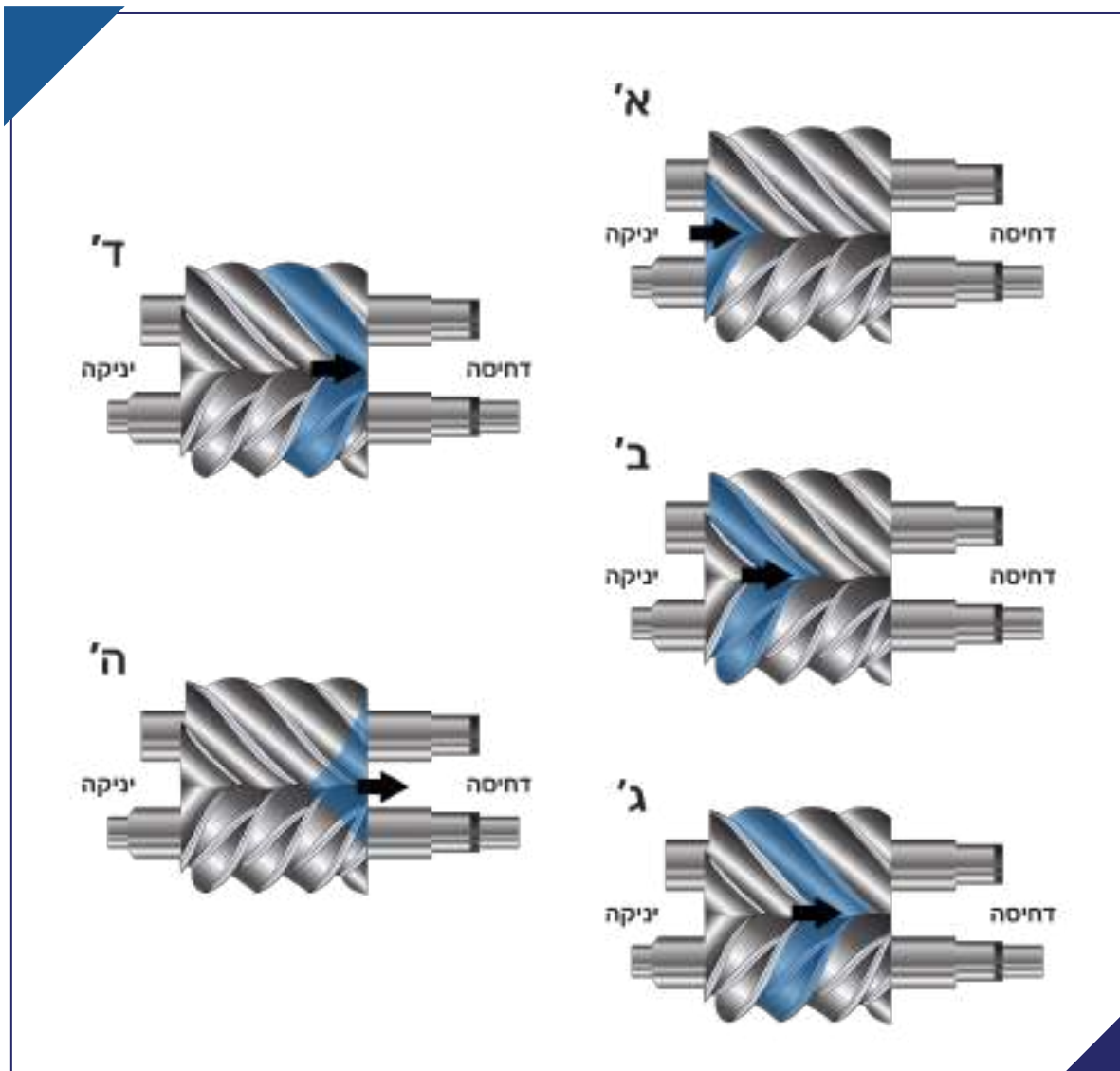
תמונה 4.54 - מדחס דו-בורגי פתוח למחצה



עיקרון פעולה של מדחס דו-בורגי

- במדחס דו-בורגי, הדחיסה מבוצעת על ידי שני רוטורים מקביליים בעלי תצורה בורגית. הרוטורים משתלבים זה בזה בהתאמה תוך כדי תנועה בכיוונים מנוגדים.
- הקרר מועבר במדחס דרך שני פתחים ליניקה ולדחיסה, הנמצאים על ציר הסימטריה של המדחס.
- בעת פעולת המדחס, הקרר נכנס דרך פתח היניקה אל המרווח שמול שני הרוטורים הבורגיים.
- הקרר נלכד בחלל הנמצא מול הכניסה למדחס, ומוסע על ידי הברגים בהיקף הרוטורים לכיוון פתח היציאה, מצידו השני של ציר המדחס.
- בזמן תנועתו של הקרר לאורך הברגים, מצטמצם הנפח שבו הוא נלכד, ככל שהוא מתקדם לכיוון פתח היציאה. הדבר גורם לעליית לחץ הקרר.
- במקביל לתנועת הקרר וליציאתו אל קו הדחיסה, נמשכת פעולת היניקה ברציפות. כך מתקיימת תנועה רציפה של יציאת קרר בלחץ גבוה לכיוון קו הדחיסה (כל עוד המדחס בפעולה).

תמונה 4.55 - עיקרון פעולה של מדחס דו-בורגי



יתרונות המדחס הדו-בורגי

- בעל תפוקות גבוהות, הנובעות מיכולת המדחס להעביר כמות גדולה של קרר.
- כמות קטנה של חלקים נעים, ומכאן הפסדי חיכוך נמוכים, בלאי נמוך ואמינות גבוהה.
- רגיש במידה פחותה לכניסת קרר במצב נוזלי, אם כי קליטת כמויות גדולות של קרר נוזלי יגרמו לדילול של השמן (הקטנת הצמיגות), לירידה ביכולת השימון והקירור ולנזקים למדחס.
- נצילות נפחית גבוהה בזכות אופן הפעולה הרציף והיעדר שסתומי יניקה ודחיסה.
- יכולת שינוי תפוקה בטווחים גדולים, מבלי לגרום לתופעות לוואי כמו במדחסים צנטריפוגליים (שיתוארו בהמשך).

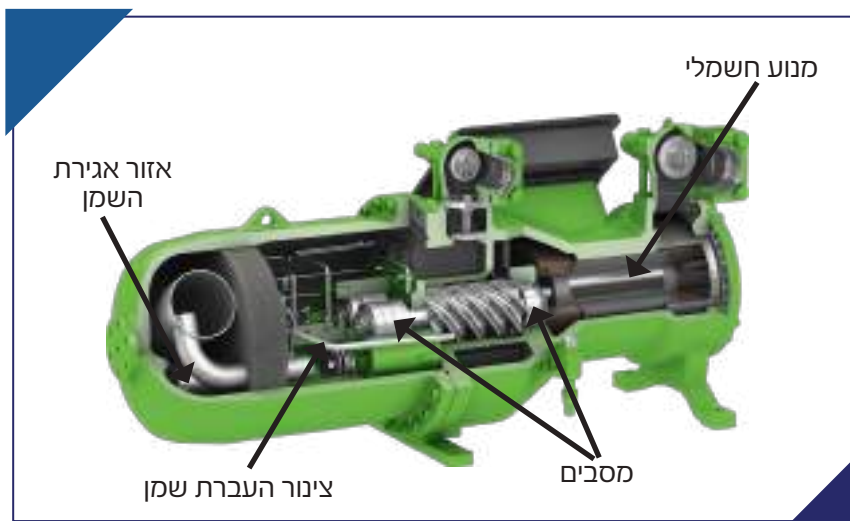
חסרונות המדחס הדו-בורגי

- יקר לייצור, ודורש מערכות הפרדה והחזרת שמן גדולות ויקרות.
- המדחס ומערכות העזר שלו תופסים שטח גדול יחסית למדחסים אחרים.
- בלאי מהיר יחסית של מסבי הברגים וציריהם, בגלל עומס חד-צדדי של הקרר רק על צד ההיקף החיצוני של הברגים.

שימון מדחס בורגי

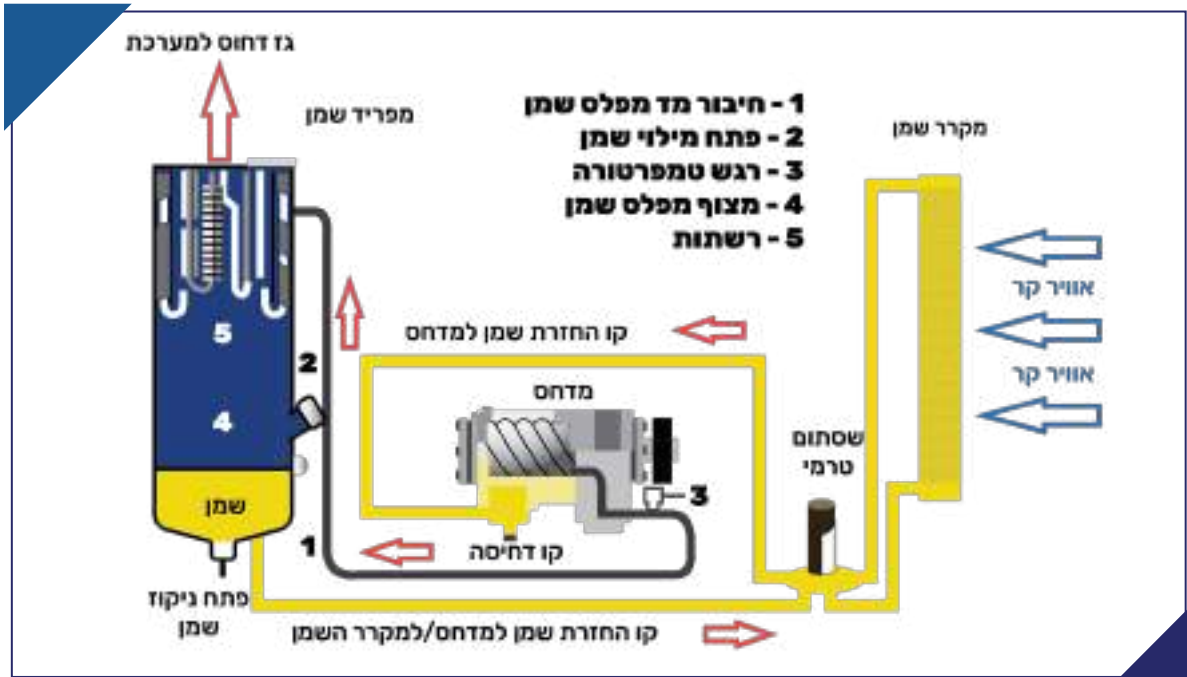
כאמור, המדחס הבורגי מחייב שימוש בכמויות גדולות של שמן לצורך שימון מסביו, לחציצה בין הרוטורים, כדי ליצור שכבת אטימה בינם לבין גוף המדחס ובין רוטור אחד למישנהו. חלק מהמדחסים בעלי מערכת הפרדת שמן פנימית (אינטגרלית), וחלק דורשים מערכת חיצונית. במדחסים בעלי הפרדת שמן פנימית, השמן מאוחסן לרוב בחלל התחתון של בית המדחס לאחר הפרדתו מהקרר, ומוחזר לכיוון הברגים באמצעות הפרש לחצים, ללא צורך במשאבות שמן.

תמונה 4.56 - מדחס דו-בורגי עם הפרדה ואחסון שמן פנימיים



מדחסים בורגיים שאינם כוללים מפריד שמן ומיכל אחסון פנימיים, נזקקים למפרידי שמן חיצוניים, שגודלם משתנה בהתאם לגודל המדחס ולכמות הקרר היוצאת ממנו. בגלל כמויות השמן הגדולות והחום שנקלט בהן, מקררים את השמן טרם החזרתו למדחס באמצעות מחליפי חום חיצוניים. אלה מקוררים באוויר, במים או בהזרקת נוזל. במקרים כאלה, כדי לא לקרר את השמן יתר על המידה, מותקן שסתום תרמי הנמצא בקו החזרת השמן למדחס (ומופעל חשמלית, או על ידי טמפרטורת השמן החוזר). שסתום זה מאפשר הזרמה דרך מקרר השמן כשטמפרטורת השמן גבוהה מדי (תמונה 4.57).

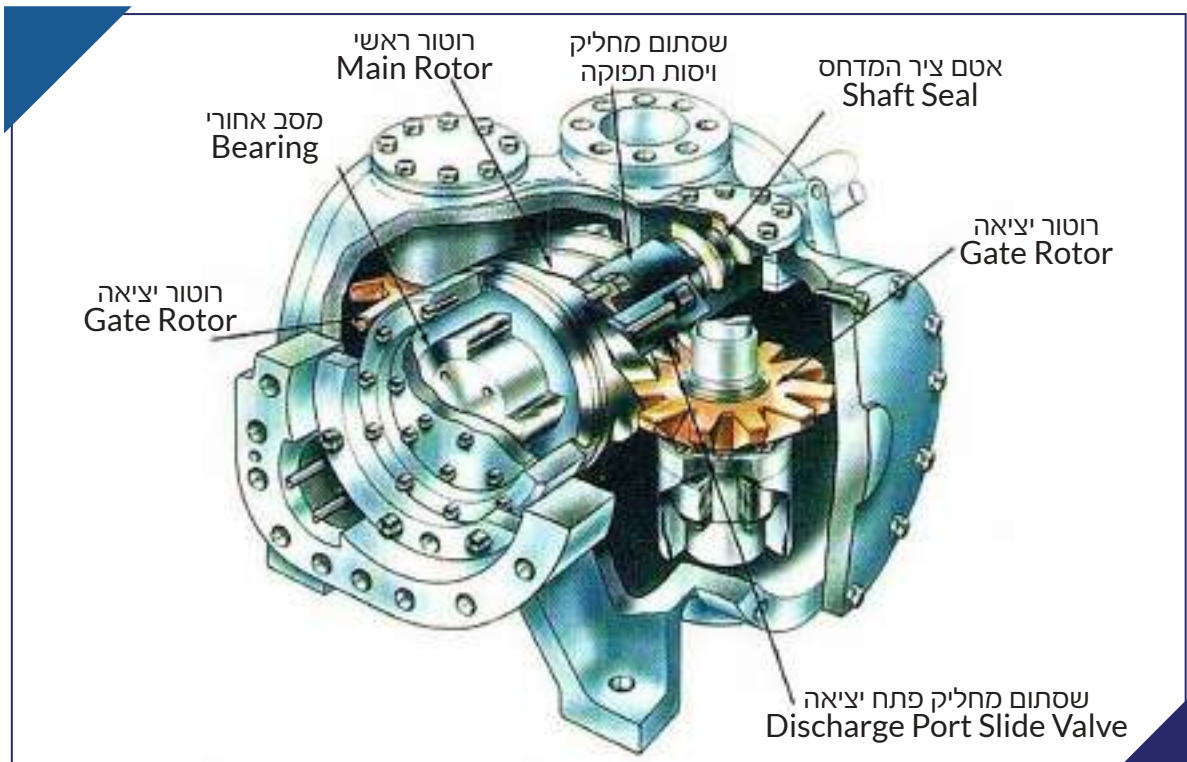
תמונה 4.57 - מערכת הפרדת והחזרת שמן למדחס בורגי



מדחסים חד-בורגיים

מדחס זה תוכנן במטרה להתגבר על חלק מחסרונותיו של המדחס הדו בורגי "הקלאסי". המדחס החד-בורגי קטן וזול יותר, ולכן מיועד למערכות קטנות יותר שבעבר לא היה כדאי כלכלית להתקין בהן מדחסים בורגיים. בנוסף, הוא אמין ובעל אורך חיים ארוך יותר, לאור הקטנת המאמצים הנוצרים על מסבי המדחס - בזכות העומס השווה מכל צידי הבורג. המדחס מסוגל להגיע ליחסי דחיסה של 1:20 וניתן להשיגו לתפוקות שמעל 40kw.

תמונה 4.58 - מדחס חד-בורגי

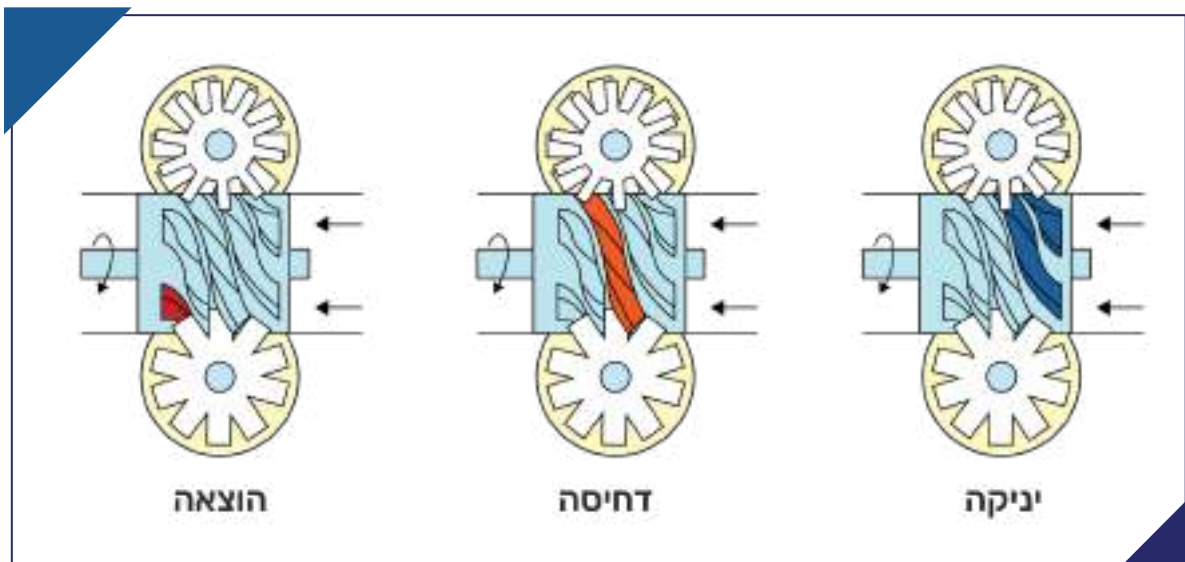


רכיבי המדחס

- בורג ראשי קצר.
- שני רוטורים אופקיים המסתובבים בכיוונים מנוגדים ונמצאים לפני פתח הדחיסה.

עיקרון פעולה

כמו במדחס הדו-בורגי, הקרר הנכנס מפתח היניקה בצד אחד של הבורג הראשי, מועבר על ידי סיבוב הרוטור בתנועה רציפה אל קצהו השני. הגדלת הלחץ במדחס זה נעשית באזור הרוטורים האופקיים, שם שטח המעבר קטן וגורם להגדלת הלחץ. הקרר עובר דרך הרוטורים (Gates), ובעקבות הקטנת נפח המעבר, מגדיל את לחצו, פותח את שסתום הדחיסה, ויוצא בלחץ גבוה לקו הדחיסה של המערכת. מכיוון שבמדחס זה הקרר זורם בהיקפו של הרוטור, העמסת הרוטור סימטרית מכל צדדיו ולא מתפתחים עומסים לא סימטריים על מסבי המדחס.

תמונה 4.59 - עיקרון פעולת מדחס חד-בורגי**ויסות תפוקה**

כמו במדחס דו-בורגי, גם במדחס זה ויסות התפוקה נעשה על ידי שילוב בין שינוי מהירות הסיבוב של המדחס ובין מערכת הפותחת מעברים בין חלל הדחיסה לחלל היניקה (Slide Valve).

שימון

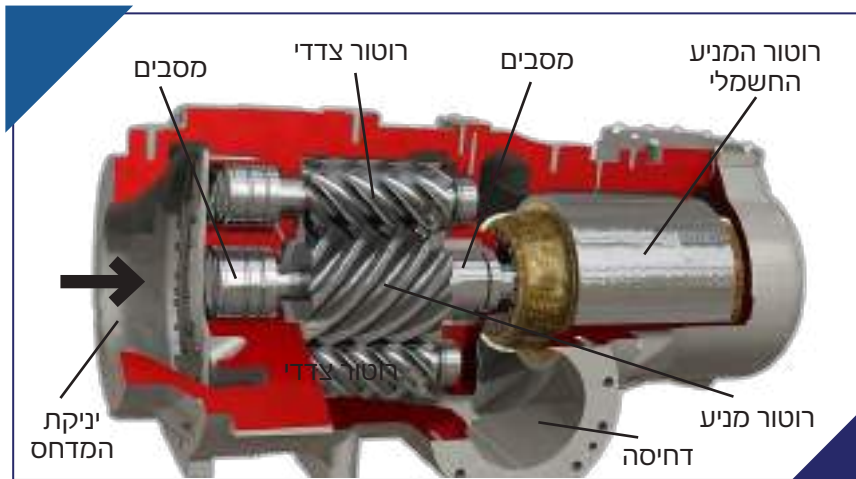
אחד מיתרונותיו של המדחס החד-בורגי הוא מידותיו הקטנות, שמאפשרות את התקנתו בחללים קטנים יחסית.

בשל הרצון לשמור על גודלו הקטן של מדחס זה, הפרדת השמן ואחסונו נעשים לרוב בהתקנים חיצוניים. כשמשמשים בהתקן חיצוני, החזרת השמן למדחס נעשית בהתאם למרחק בין מכל האכסון למדחס. כשהמרחק בין המדחס למאגר השמן קצר, יוחזר השמן באמצעות הפרש לחצים. במקרים אחרים יעשה שימוש במשאבת שמן חיצונית.

מדחס תלת-בורגי

בדומה למדחס החד-בורגי, מדחס זה פותח כדי למנוע העמסה חד-צדדית על הרוטורים ומסביהם. מבנה שלשת הברגים מאפשר הגדלת תפוקתו, תוך הקטנת גודלו הפיזי, גודל המנוע החשמלי המניע אותו וגודל מערכות העזר שלו.

תמונה 4.60 - מדחס תלת-בורגי



יסוּת תפוקה במדחסים בורגיים, פריקת המדחס

יסוּת התפוקה במדחסים הבורגיים מאפשר את התאמת תפוקת המדחס לדרישות המערכת, בטווח תפוקות של בין 10% ל-100%. זאת מבלי להקטין במידה ניכרת את יעילות המדחס ונצילות המערכת. מדחס העובד בתפוקה מלאה ללא התאמת הספיקה לעומס החום על המאייד, יגרום לכיבוי והנעה של המדחס פעמים רבות בפרקי זמן קצרים, ולהצפת המאייד והמדחס בנוזל קירור. בנוסף, פריקת המדחס מאפשרת הנעה כנגד עומס נגדי נמוך ושמירה על המנוע החשמלי.

כדי להתאים את תפוקות הקרר היוצא ממדחסים בורגיים, אנו משתמשים בשלוש שיטות שמטרתן יסוּת כמות הקרר. הוויסות יתבצע על ידי החזרת חלק מן הקרר, מצד הלחץ הגבוה במדחס, לחלל היניקה.

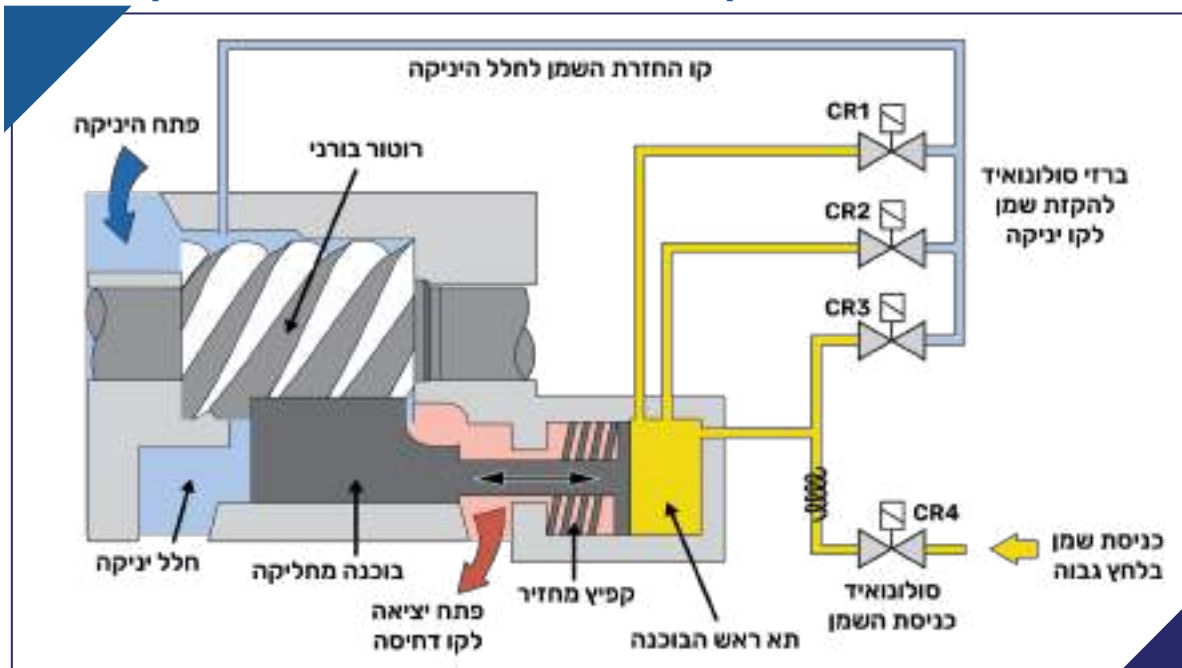
להלן השיטות:

- 1. באמצעות בוכנת החלקה (Sliding Valve):** בשיטה זו, הנהוגה בחלק גדול של המדחסים, פתח בדופן חלל הדחיסה (שנשלט על ידי בוכנה צפה [מחליקה]) מאפשר החזרת חלק מהקרר מאזור הלחץ הגבוה שבהיקף הברגים לכיוון חלל היניקה. בדרישה לתפוקה מלאה, המעבר בין הברגים לחלל היניקה סגור לגמרי, ובכל מצב אחר קיים יחס הפוך בין גודל הפתח לתפוקה הנדרשת. לפתיחה, הבוכנה מופעלת על ידי לחץ הידראולי המגיע ממשאבת השמן של המדחס, ותנועתה בכיוון השני נעשית בכוח קפיץ או בלחץ הידראולי. השמן מוזרם אל הבוכנה דרך שסתום חשמלי (Solenoid Valve). השסתום החשמלי נשלט על ידי מערכת הפיקוד של המדחס, בהתאם לנתונים של לחץ וטמפרטורה המתקבלים מרגשים שמותקנים באזור המאייד.

תמונה 4.61 - מראה רכיבים של מדחס חד-בורגי עם שתי בוכנות החלקה



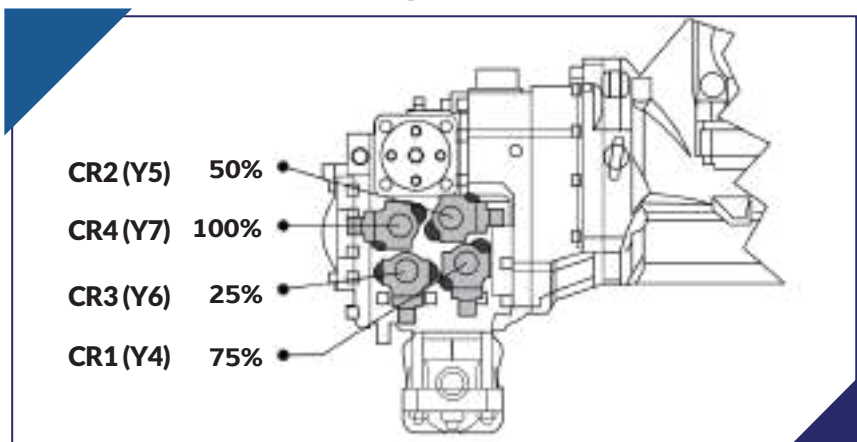
תמונה 4.62 - מערכת ויסות תפוקה במדחס בורגי באמצעות בוכנה מחליקה וברזים חשמליים. פריקת מדחס בורגי באמצעות בוכנת החלקה



הסבר לתמונה 4.62: בקר התפוקה של המדחס שולט על תנועת בוכנת החלקה, באמצעות לחץ שמן הנשלט על ידי ארבעה ברזים חשמליים במעטפת המדחס. לחץ השמן מאפשר למדחס לפעול במצבים הבאים: 25%, 50%, 75%, 100%. במצב עבודה בתפוקה מלאה (100%), שמן נכנס לתא הבוכנה דרך ברז CR4 (ברזים CR1+CR2+ CR3 סגורים), ודוחף את הבוכנה שמאלה כך שהפתח בין חלל הרוטורים לחלל היניקה סגור לחלוטין. במצב זה, כל תפוקת המדחס מופנית לקו הדחיסה ולמערכת.

כאשר רוצים להוריד את תפוקת המדחס ל-75%, ברז CR1 נפתח ומאפשר לחלק מהשמן להתנקז דרכו אל חלל היניקה של המדחס. כתוצאה מניקוז השמן, כוח הקפיץ שבתא הבוכנה יניע את הבוכנה ימינה והפתח בין חלל הרוטורים לחלל היניקה יפתח לכדי 25%. תהליך דומה מתבצע באמצעות ברזים CR2 ו-CR3, כאשר המדחס במצב פירוק מקסימלי (מינימום תפוקה 25%), ברז CR4 סגור וברזים CR1+CR2+CR3 פתוחים. במצב זה כל השמן שהיה בתא ראש הבוכנה מנוקז לחלל היניקה. הקפיץ המחזיר דוחף את מכלול הבוכנה ימינה, מקטין את היציאה לדחיסה ל-25% ופותח מעבר רחב בין הרוטור הבורגי לחלל היניקה. רוב התפוקה (75%) של המדחס תופנה לחלל היניקה. החזרת המדחס לעבודה בתפוקות גבוהות יותר תיעשה על ידי סגירת ברזים CR1-CR3 ופתיחת ברז CR4.

תמונה 4.63 - מיקום סילי הפעלה (סולנואידים) של ברז מערכת ויסות תפוקה במדחס בורגי



2. באמצעות שסתומים במחיצת הפרדה בין חלל הדחיסה ליניקה (Lift Valve): בשיטה זו, שסתומים המבצעים תנועה קווית סוגרים על פתחים הנמצאים במחיצה. המחיצה מפרידה בין אזור הדחיסה שבהיקף הברגים ובין חלל היניקה. בעת ירידת הדרישה לתפוקת קירור, נפתחים כל השסתומים או חלקם, ומאפשרים לחלק מסוים מהקרר שאמור היה לצאת למערכת, לחזור שוב לקו היניקה. לפתיחת השסתומים משתמשים בסלילים אלקטרומגנטיים, המקבלים הוראה ממערכת הפיקוד של המדחס. ההוראות ניתנות בהתאם לנתונים של לחץ וטמפרטורה, המתקבלים מרגשים.

תמונה 4.64 - מדחס תלת-בורגי



3. ויסות הקרר על ידי הקטנת מהירות סיבוב המנוע: במרוצת השנים, השתכללה והוזלה מאוד שיטת שינוי מהירות הסיבוב של המנועים החשמליים, הן באמצעות שינוי מתח ההזנה של המנוע, ובמיוחד באמצעות שינוי (הקטנה או הגדלה) של התדר שבו פועל המדחס. שיטה זו יעילה מאד למדחסים בורגיים, בשל העובדה שמדחסים אלה פועלים במהירות סיבוב יחסית נמוכה (כ-4,000 סל"ד). זאת בניגוד למדחסים דינמיים המסתובבים במהירויות גבוהות בהרבה. הורדת מהירות הסיבוב של מדחסים דינמיים עלולה לגרום לתופעת הזדקרות או לנחשול של הטורבינה (המאיץ). כיום, שיטת השליטה על מהירות סיבובי המנוע החשמלי באמצעות בקר V.S.D (Variable Speed Drive) בשימוש נרחב. החל מיחידות ביתיות קטנות, דרך מדחסים ליחידות מסחריות, ועד למדחסי ענק בורגיים וצנטריפוגליים. השיטה ידועה בכינוי "אינוורטר" (invert פירושו להפוך), בגלל מערכת הפיקוד ההופכת את מתח החילופין למתח ישר.

שמירה על יחס לחצים קבוע לאורך כל שלבי פעולת המדחס

שינוי תפוקה באמצעות החלפת מהירות הסיבוב של המדחס או באמצעות בוכנה מחליקה, אינו יכול להתבצע כמהלך עצמאי. הוא חייב להיות מלווה באמצעי לשמירה על יחסי דחיסה קבועים. התהליך מתבצע כשילוב של אמצעי השולט על גודל פתחי היציאה של המדחס, ומקטין את פתח היציאה ככל שפריקת המדחס גדלה. זאת כדי לא להגיע לתופעות הבאות:

- 1. תת-לחץ (Under Compression),** מצב שבו הלחץ לאורך מסלול הדחיסה נמוך מדי. הדבר יכול לגרום ל"בריחת" הגז הנמצא בצד הדחיסה, בחזרה לכיוון פתח היניקה.
- 2. דחיסת יתר (Over Compression),** תופעה שכתוצאה ממנה נקבל תופעות לוואי שליליות, כמפורט:

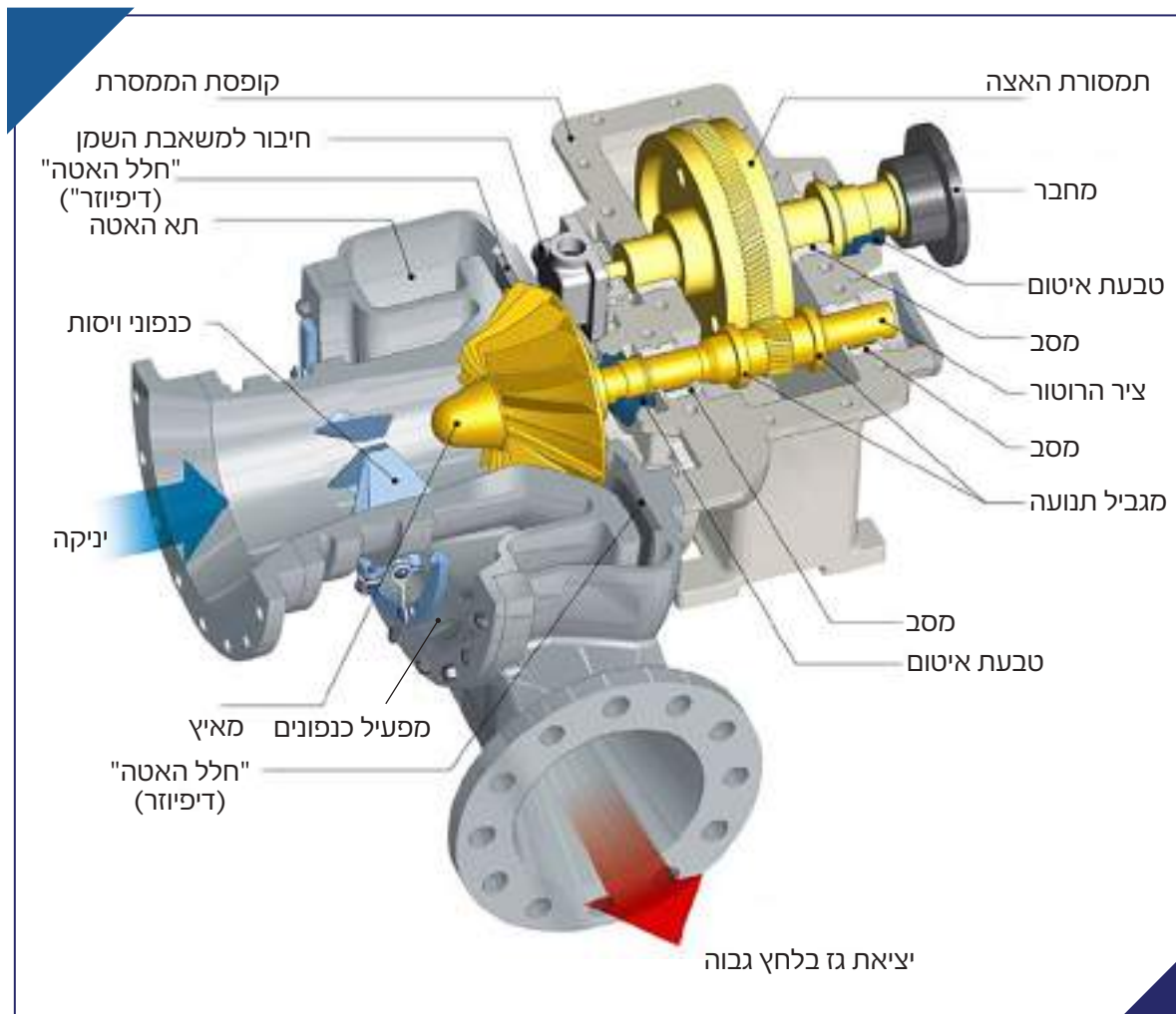
- הקצפת השמן והעברתו בכמות גדולה יחסית אל קו הדחיסה ולמערכת.
- העמסת יתר על צירי הברגים הלולייניים, שעלולה לגרום לנזק מצטבר למסבי המדחס ולהגדלת ההספק הנדרש מהמנוע החשמלי.
- איבוד היכולת להזרקת קרר כגז או כרסיסי נוזל למדחס (לצורך הגדלת יעילותו).
- הקטנת האפקטיביות של השימוש בהתקני "אקונומיזר" (לצורך קירור במדחס והגדלת יעילותו).

במדחסים בורגיים, תהליך השמירה על יחס הדחיסה (V_i) מתבצע על ידי בוכנה מחליקה נוספת, השומרת על יחס קבוע בין היניקה לדחיסה (ראו תמונה 4.62)

ניתן לסכם את נושא ויסות התפוקה למדחסים דו-בורגיים כך:

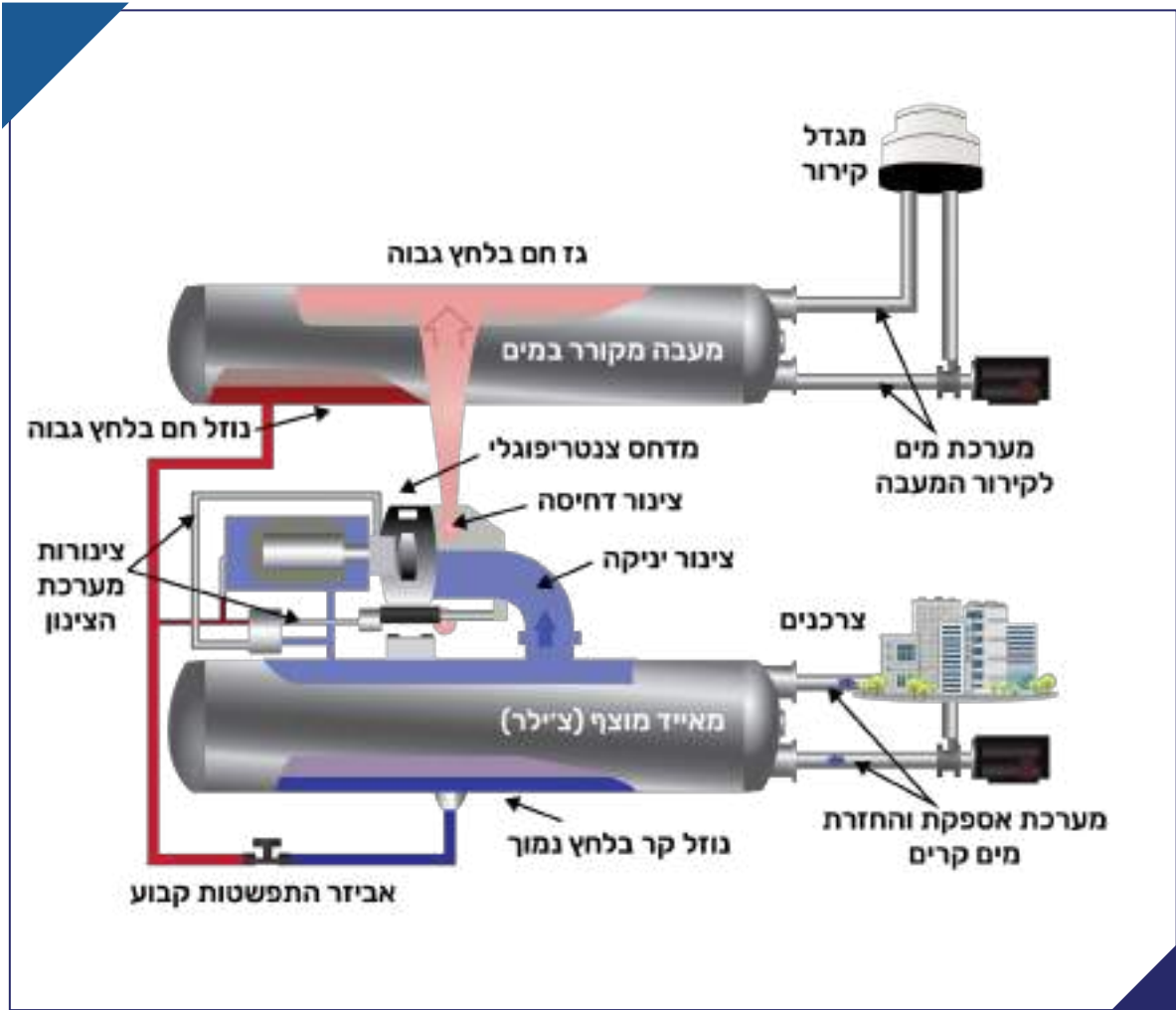
- אפשר להשתמש בשיטות מסוג "Lift Valve Unloading" או "Slide Valve Unloading" המפורטות לעיל באופן עצמאי, כאמצעי לבקרת תפוקת מדחסים בורגיים.
- במעבר לשיטת שינוי המהירות (VSD), יש לשלב גם אפשרות לפתיחת שסתומי החזרת קרר ליניקה, כדי למנוע מצבים של דחיסת יתר או תת-דחיסה.
- בשילוב שינוי מהירות עם שמירה על יחס דחיסה קבוע, מתקבלת נצילות אנרגטית גבוהה.

תמונה 4.65 - חתך ומראה חלקים, מדחס צנטריפוגלי חד דרגתי



במדחסים צנטריפוגליים לסוגיהם, הנקראים גם מדחסים רדיאליים או מדחסי טורבו, ניתן להעביר כמויות גדולות מאוד של קרר בלחץ גבוה. הלחץ הגבוה הנדרש במדחסים הדינמיים מושג על ידי האצת כמויות גדולות של גז, שנכנס למדחס באמצעות מאיץ (Impeller). המאיץ מקנה לגז כוח צנטריפוגלי (רדיאלי) גדול ומהירויות זרימה גבוהות (High Velocity). מהירויות זרימה אלה מקנות לגז אנרגייה קינטית (דינמית) גבוהה מאוד, בהסתמך על חוק ברנולי (ראו הסבר בהמשך), הקובע את היחס בין המהירות ללחץ. גז הקירור שיוצא בתנועה סיבובית ובמהירות גבוהה לכיוון יציאת המדחס, עובר לחלל האטה הנקרא דיפיוזר (Diffuser), שם נבלם ומהירותו יורדת משמעותית. כתוצאה מהקטנת המהירות, הלחץ הדינמי קטן והלחץ הסטטי גדל בהתאמה. הקרר, שנמצא כרגע בלחץ סטטי גדול, עובר למאסף (קולקטור, Collector), ומשם זורם לכיוון קו הלחץ הגבוה (דחיסה) של המערכת. מדחסים אלה פופולריים מאוד במערכות מיזוג אוויר גדולות, מכיוון שהם מסוגלים להעביר כמויות קרר גדולות למערכת ביעילות מרבית. לרוב הם ישולבו במערכות מיזוג המקורות מים ומיעדות לקירור מבנים (מערכות צ'ילר, Chiller).

תמונה 4.66 - מערכת צ'ילר עם מדחס צנטריפוגלי

**מבנה מדחס צנטריפוגלי**

מדחסים צנטריפוגליים הם מדחסים מסוג פתוח או פתוח למחצה, המונעים לרוב על ידי מנועים חשמליים. כאמור, מדחסים אלה פועלים במהירויות סיבוב גבוהות. לכן כדי להקטין את צריכת האנרגיה של המנוע המפעיל אותם (המהירות במנועים חשמליים הינה ביחס הפוך לכוח), המנוע מסובב תמסורת האצה ההופכת את כוח המנוע למהירות סיבוב גבוהה של המאיץ. המדחס עצמו בעל כמות מרכיבים קטנה, מה שמקנה לו בלאי נמוך, אורך חיים רב ועלויות תפעול נמוכות. לצורך התאמת תפוקת המדחס לדרישות המערכת, ייעשה ויסות התפוקה במדחס צנטריפוגלי באופן מכני, על ידי כנפוני ויסות (Vans) הנמצאים ביניקת המדחס. לחלופין על ידי שינוי מהירות סיבוב המנוע והמאיץ.

מדחסים צנטריפוגליים נחלקים לכמה סוגים

- מדחסים חד-דרגתיים (תמונה 4.65).
- מדחסים דו-דרגתיים (תמונה 4.72).
- מדחסים ללא שימון, בעלי מסבים מגנטיים.

חוק ברנולי

חוק ברנולי (על שם המתמטיקאי דניאל ברנולי) מסתמך על חוק שימור האנרגיה, וקובע כי ככל שמהירות הזרימה של נוזל או גז על פני משטח מהירה יותר (דינמיקה), כך הלחץ הסטטי הפועל על המשטח יהיה קטן יותר. לצורך הבנת הנושא נזכיר שוב כי אנו מבחינים בין שני סוגי לחצים: **לחץ סטטי (Ps)** משקף אנרגייה פוטנציאלית ופועל בכל הכיוונים בניצב למשטח, ולחץ הנוצר מתנועת הזורם - **לחץ דינמי (Pd)**, הפועל במקביל לכיוון הזרימה. במערכות הקירור מתעניינים יותר בלחץ הסטטי. הלחץ הסטטי מהווה אנרגייה פוטנציאלית שבכוחה לייצר את התהליכים העיקריים לפעולת מערכת הקירור: הלחץ הגבוה במעבה והלחץ הנמוך במאייד.

חוק ברנולי מתבסס על חוק שימור האנרגיה, המגדיר את סך כל האנרגייה בתהליך מסוים כגורם קבוע, כלומר סכום הלחצים הדינמי (אנרגייה קינטית) והסטטי (אנרגייה פוטנציאלית) שווה לערך קבוע. ערך זה מתבטא בנוסחה הבאה:

$$Ps + Pd = \text{קבוע}$$

מנוסחה זו ניתן לראות שהקשר בין הלחצים הוא ביחס ישר, כלומר, כשהלחץ הסטטי גדל, הלחץ הדינמי קטן ולהפך.

במדחס צנטריפוגלי, המאיץ (Impeller) מקנה לגז הנכנס אליו מהירות זרימה גבוהה (לחץ דינמי גדול ולחץ סטטי קטן). מעבר זרימת הגז לדיפוזר (Diffuser), שנפחו גדול ויש בו בנוסף להבי האטה, גורם לבלימת מהירות הזרימה, מקטינה את הלחץ הדינמי ומגדילה את הלחץ הסטטי לערך הנדרש בצד הלחץ הגבוה של המערכת.

מילון מונחים הקשורים למבנה ולפעולה של מדחס צנטריפוגלי

1. מאיץ (Impeller): המאיץ הוא גוף עגול המחולק לקטעים על ידי להבים או כפות (Vanes/Blades). הלהבים נמשכים ממרכז המעגל (שנקרא עין המאיץ) לאורך הרדיוס ועד לקצה המעגל. הלהבים אלה יוצרים תאים שבהם נלכד הגז בעת סיבוב המאיץ, ושם מוקנים לו המהירות והכוח הצנטריפוגלי. האזור שלוכד את הגז נמצא במרכז המאיץ, וממוקם במרכז פתח היניקה של המדחס.

סוגי מאיצים

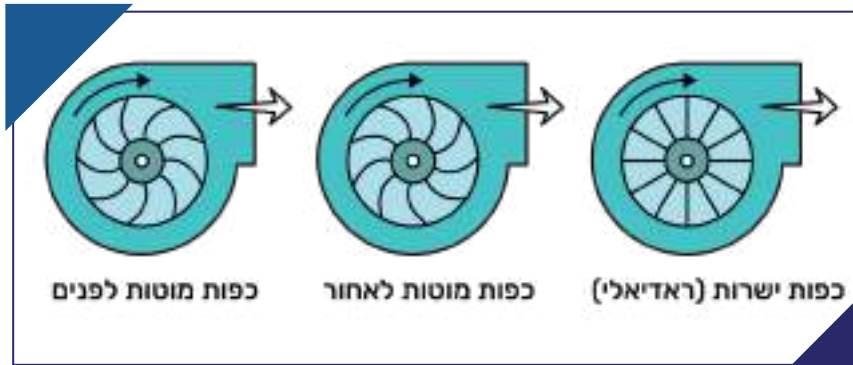
- **מאיץ פתוח:** מעביר כמות גז גדולה, מתאים למהירויות סיבוב גבוהות מאוד.
- **מאיץ פתוח למחצה.**
- **מאיץ סגור:** מתאים לכמויות גז קטנות יחסית, במהירות סיבוב נמוכה. מיועד למדחסים רב-דרגתיים.

המאיצים יכולים להיות חד-צדדיים בעלי כניסה אחת, או דו-צדדיים בעלי שתי כניסות.

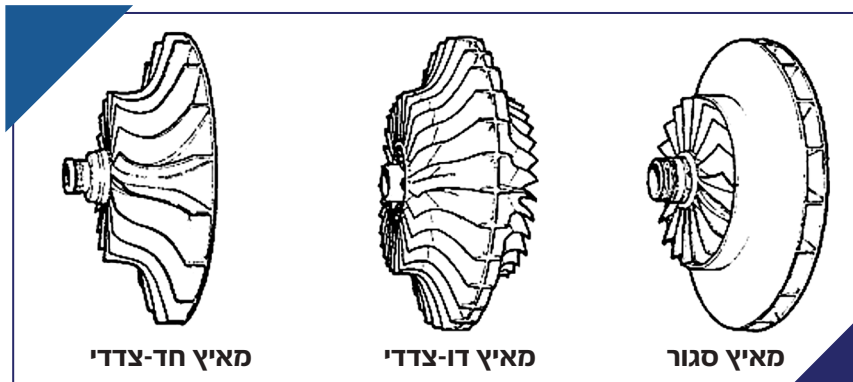
כפות המאיץ יכולות להיות בתצורות הבאות

- **כפות מוטות לפני (Forward Blades):** להעברת כמויות קרר גדולות.
- **כפות מוטות לאחור (Backward Blades):** בעיקר במדחסים מדגמים ישנים.
- **כפות ישרות (Radial Blades):** משמשות ברוב המדחסים המודרניים.

תמונה 4.67 - מאיצים, כיוון הטיית הכפות (Blades)



תמונה 4.68 - סוגי מאיצים (אימפלרים)



- **השפעת תצורת כפות (Blades Shape) המאיץ על צריכת האנרגייה ונצילות המדחס**
- **כפות מוטות אחורה (Backward curve Blades):** כמות קרר קטנה, מהירות סיבוב גבוהה, נצילות נמוכה.
- **כפות מוטות קדימה (Forward curve Blades):** כמות קרר גדולה, מהירות נמוכה, נצילות גבוהה.
- **כפות ישרות (Radial Blades):** כמות קרר בינונית, מהירות סיבוב בינונית.

2. **דיפיוזר (Diffuser):** הדיפיוזר הוא חלל שאליו מוזרם הגז שעוזב את המאיץ במהירות גבוהה. בשל המעבר לחלל בעל נפח גדול יותר, נבלמת מהירות הזרימה ולחץ הגז עולה. שני סוגי דיפיוזרים:

- ללא להבי האטה (Vaneless).
- בעלי להבי האטה, קבועים או ניתנים לשינוי זוויות, לצורך שמירה על יחס דחיסה נדרש. תפקיד להבי הדיפיוזר הוא לאפשר בלימה של זרימת הגז והגדלת הלחץ הסטטי. נפח ההתפשטות שנדרש לעצירת הזרימה של הגז בדיפיוזר בעל להבים, קטן יותר משמעותית מנפחו של דיפיוזר ללא להבים.

3. **קולקטור (מאסף - Collector):** הקולקטור הוא חלל מאסף הבנוי בצורה של קונכיית שבלול (שבלולי), שהחתך שלו מתרחב לכיוון היציאה לקו הלחץ הגבוה של המערכת. מבנה הקולקטור מסייע בהורדת מהירות הגז והגדלת לחץ היציאה למערכת.

4. תופעת ההזדקרות (Stall): תופעת ההזדקרות נובעת מהמהירויות הגבוהות של סיבוב המאיץ, שיכולה להגיע לכדי 30,000 סיבובים בדקה (rpm). בשל המהירות הגבוהה הנמדדת על ציר המאיץ, וככל שקוטרו של המאיץ גדול יותר, המהירות ההיקפית על קצוות המאיץ גדלה ויכולה להגיע למהירות הקול (כ-1,250 קמ"ש). במהירות כזו מתפתחים גלי הלם על היקף המאיץ שגורמים לרעידות חזקות (Vibrations) ולעלייה חדה של הטמפרטורות, העלולות לגרום לנזק ממשי של המאיץ ולהרס המדחס.

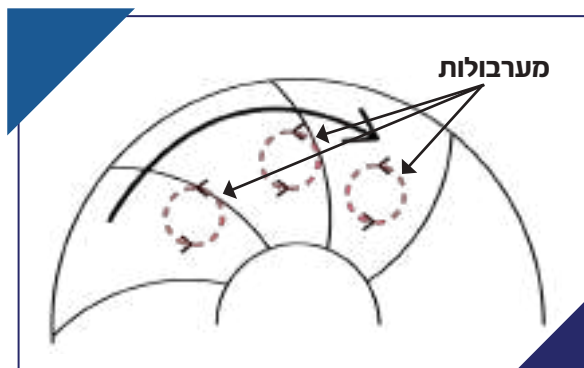
5. תופעת הנחשול (Surge)

- תופעה המתארת מצב שבו אנרגיית הלחץ שבדיפיוזר גדולה מהאנרגייה שהמדחס מסוגל להקנות לקרר ביציאה מהמאיץ.
- כתוצאה מהפרשי הלחצים, זורם הקרר בכיוון הפוך, חזרה לכיוון המאיץ.
- המאיץ המסתובב במהירויות גבוהות מתוכנן להעביר כמות משקלית קבועה בין פתח היניקה לדיפיוזר. במדחס הפועל כשורה, האנרגייה המוקנית לגז על ידי המאיץ תהיה שווה או גבוהה מהאנרגייה הנגדית, והקרר יזרום לכיוון פתח היציאה.
- במקרים של ירידה בספיקה הנפחית/משקלית דרך המאיץ, המאיץ לא מסוגל להקנות לגז העובר דרכו אנרגייה מספיקה כדי להתגבר על הלחץ ביציאה. במקרה כזה, עלולה להיווצר תופעה של זרימה חוזרת (Reverse Flow) של גז הקירור לתוך המאיץ. הדבר יכול להיות בגלל שינוי במהירות המאיץ, צמצום של כמות הגז הנכנס אל המאיץ, כתוצאה מהצורך להתאים את כמות הקרר היוצא לדרישות הקירור של המערכת (ויסות תפוקה), או במקרה של שינוי סוג הקרר במערכת.
- זרימה זו תיצור מערבולות בחללים שבין להבי המאיץ (ראו תמונה 4.69). מערבולות אלה יגרמו לעומסים ציריים גדולים על ציר המדחס ומסביו, לרעידות, ללחצים ולטמפרטורות גבוהות בליווי רעשים חזקים. התופעות הללו יגרמו לעיוות להבי המאיץ, לקריסה ולהרס המאיץ, מסביו ומעטפת המדחס (תמונה 4.70).

תמונה 4.70 - מאיץ שניזוק כתוצאה מתופעת המערבולות



תמונה 4.69 - היווצרות מערבולות על המאיץ

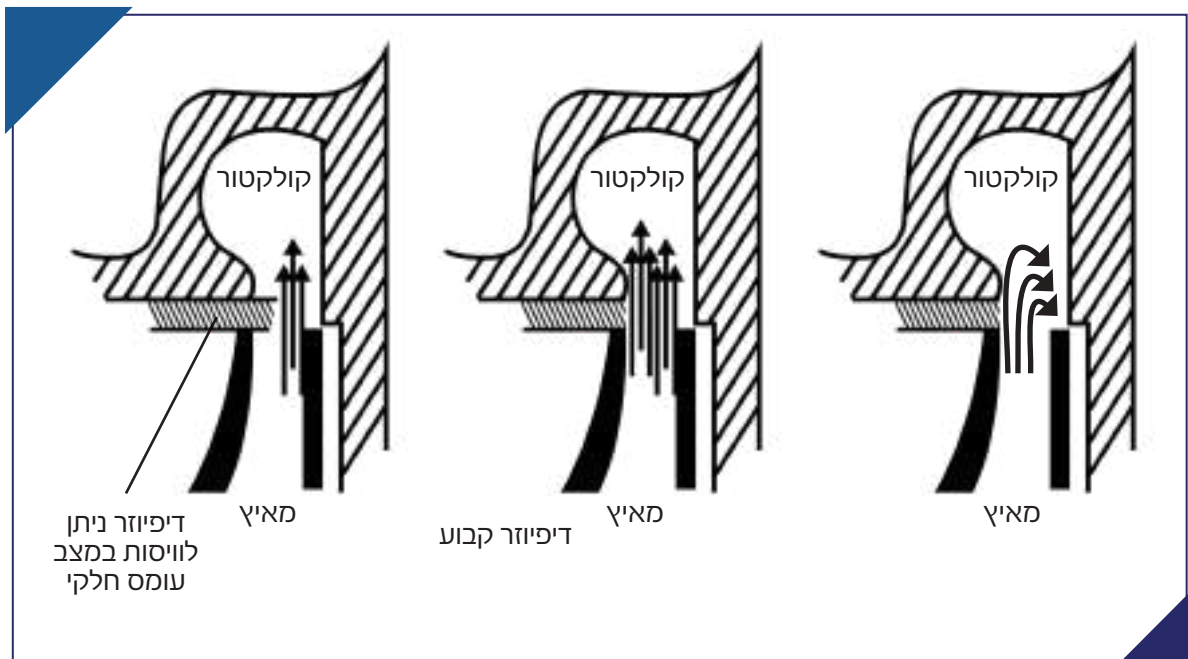


סיבות אפשריות להיווצרות תופעת הנחשול

1. עליית לחץ העיבוי בגלל טמפרטורות עיבוי גבוהות מהמתוכנן. הסיבות האפשריות לכך:
 - תקלות במערכת קירור המעבה (מפוחים, מגדל קירור לא תקין, משאבות).
 - החלפת סוג הקרר.
 - תנאי סביבה קיצוניים.
2. ירידה בכמות הגז הנכנסת למדחס. סיבות אפשריות:
 - מסנן היניקה סתום.
 - מאייד לא מתפקד.
 - וסת מהירות (vsd) לא תקין.

כדי למנוע את היווצרות תופעת הנחשול, על המדחס להיות מצויד במערכות בקרה שמקבלות מידע על הלחצים, על הטמפרטורות ועל מהירות סיבוב המאיץ. כל זאת במטרה לשנות את אופני הפעולה של המדחס בזמן אמת, על ידי סנכרון בין מהירות הסיבוב לכנפוני הוויסות ולצורה הגיאומטרית של הדיפיוזר (תמונה 4.71), ובמקרים קיצוניים אף להפסיק את פעולת המדחס.

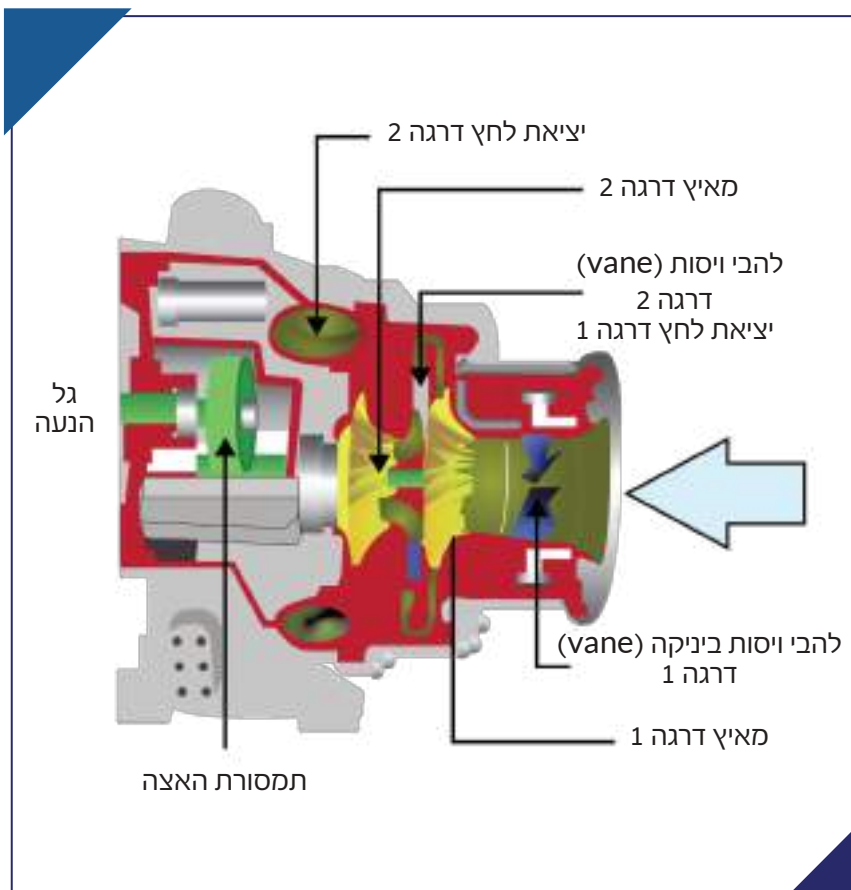
תמונה 4.71 - תופעת הנחשול "surge" ומניעתה



מדחסים צנטריפוגליים חד-דרגתיים/רב-דרגתיים

למדחס הצנטריפוגלי מגבלה של בניית לחץ גבוה, הנובעת מהמרווח בין המאיץ לבית המאיץ. ככל שהלחץ של הגז הנבלם ביציאת המאיץ גדול יותר, כך גם גדלה ההתנגדות לזרימת הגז לכיוון היציאה, וייתכן שהגז יזרום בחזרה לכיוון המאיץ (Reverse Flow). כתוצאה מכך, יחס הדחיסה של מדחס צנטריפוגלי חד-דרגתי מוגבל ל-1:10. אם יש צורך בהגדלת הלחץ, יעשה שימוש במדחסים בעלי כמה מאיצים (רב-דרגתיים), שבהם הגז עובר מיציאת הדיפיוזר של דרגה אחת לכניסת המאיץ שאחריו, ומתאפשרת הגדלת הלחץ תוך שמירה על יחס דחיסה אופטימלי בכל דרגה ודרגה.

תמונה 4.72 - מדחס צנטריפוגלי דו-דרגתי



- טווחי פעולה של מדחסים צנטריפוגליים במערכות קירור ומיזוג אוויר רחבים מאוד, כפי שבא לידי ביטוי בנתונים להלן:
- טמפרטורות איוד: -100°C ועד $+10^{\circ}\text{C}$
 - לחץ איוד (יניקה): 0.15 בר (2 psi) עד 7 בר (105 psi)
 - לחץ דחיסה: עד 20 בר (295 psi)
 - מהירות סיבוב: 1,800 עד 90,000 סל"ד
 - תפוקת קירור: 300 kw עד 30,000 kw (85 עד 8,500 טון קירור)
 - מהירות היקפית מקסימלית של המאיץ (מטעמי חוזק): 300 m/sec

התאמת מדחס צנטריפוגלי לקררים שונים

כעיקרון, מדחסים צנטריפוגליים יכולים לפעול עם קררים מסוגים שונים, אך יש לזכור כי לכל קרר יש תכונות שונות שעלולות למנוע יעילות מרבית ומחייבות ביצוע שינויים במדחס. הדבר מתבטא בכך שבמדחסים צנטריפוגליים השאיפה היא לעבוד בתנאים של יחס דחיסה קבוע ומהירות סיבוב סטנדרטית במאיץ. לכן כל שינוי בקררים יגרום גם לשינוי בצפיפות (Density) ובצמיגות (Viscosity) של הגז הנכנס ליניקת המדחס, הנובעים מטמפרטורות האיוד השונות של הקררים. שינויים אלה יחייבו גם שינויים במהירות הסיבוב של המאיץ ובקוטרו, ובמקרים מסוימים אף לצורך בהחלפה, ממדחס חד-דרגתי למדחס דו-דרגתי בעל שני מאיצים.

ויסות תפוקה במדחסים צנטריפוגליים

ויסות תפוקה מכני

במדחסים אלה מגנון ויסות התפוקה הבסיסי פועל באמצעות להבים (Vanes) שבצינור היניקה של המדחס. הלהבים יכולים להיות פתוחים לחלוטין (תפוקה 100%), או סגורים חלקית. השימוש בשיטה זו בלבד מוגבל לרמת תפוקה מינימלית של עד 40%, עקב הסיכוי להיווצרות תופעת הנחשול בתפוקות נמוכות יותר.

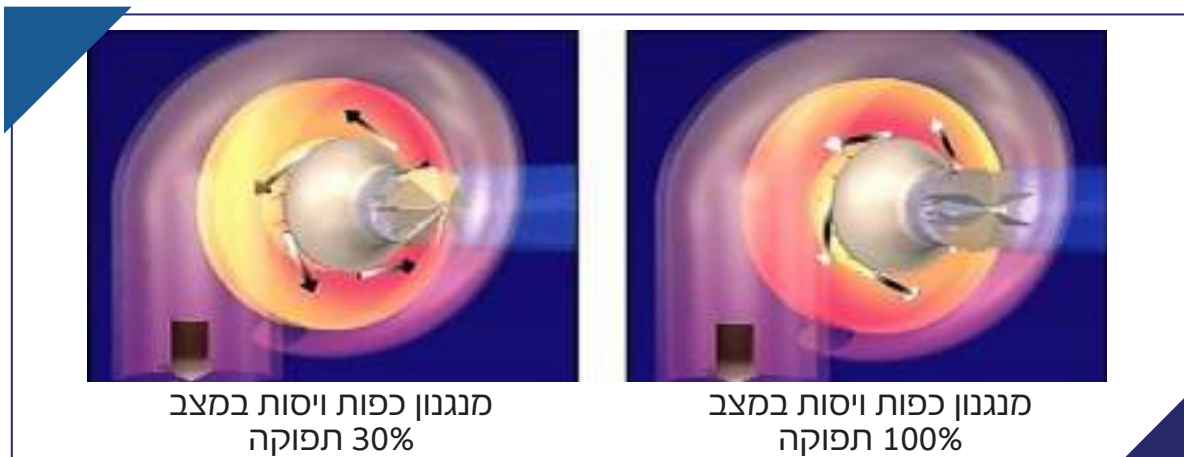
תמונה 4.73 - כפות ויסות תפוקה ביניקת מדחס צנטריפוגלי



עיקרון פעולת הויסות המכני

- מערכת הבקרה מקבלת נתונים על ירידת עומס החום שהמערכת נדרשת לטפל בו.
 - הבקר מעביר אות חשמלי ליחידת ההפעלה החשמלית של מגנון כפות הויסות, המסובב את הכפות.
 - המגנון מניע את הכפות למצב סגירה חלקית, לצמצום מעבר הגז דרך פתח היניקה.
 - כמות הקרר העובר למאיץ קטנה, מקטינה את תפוקת המדחס, ותפוקת הקירור המועברת למערכת פוחתת.
- במצב זה, הספיקה המסית של הקרר יורדת, ונוצרות על המאיץ מערבולות הגורמות לחיכוך יתר ולירידה חדה בנצילות המדחס. מצב זה עלול גם לגרום ליצירת עומסי לחץ, לטמפרטורות גבוהות ולנזק למדחס.

תמונה 4.74 - מגנון ויסות תפוקה מכני במצב 100% ובמצב 30%



הערה: הצבעים מציינים את ערכי הלחץ/טמפרטורה. ככל שהצבע כהה יותר, הלחץ גבוה יותר.

השפעת השילוב של שיטות ויסות תפוקה על יעילות המדחס

השימוש ב־מְשִׁי תדר לוויסות תפוקת המדחסים מאפשר שילוב של שתי השיטות, כדי להתגבר על תופעת הנחשול המתפתחת במדחסים צנטריפוגליים במהירויות סיבוב נמוכות. המטרה - הקטנת מהירות הסיבוב של המנוע ושינוי פתח היניקה במקביל.

השיטה המשולבת לוויסות התפוקות במדחסים צנטריפוגליים מתבצעת באמצעות מערכת בקרה המקבלת אינפורמציה מרגש לחץ (Pressure Transducer) המותקן בפתח הסניקה (לחץ יציאת הקרר) של המדחס, ומהמנגנונים הבאים:

1. מנגנון שינוי תדר העבודה של מנוע המדחס (VSD - Variable Speed Drive).
2. מנגנון מניעת הזדקרות סיבובית המשנה את גודל הדיפיוזר או את מצב הלהבים המותקנים בו (VGD - Variable Geometry Diffuser).
3. מנגנון כפות ההטיה שביניקת המדחס (Pre Rotating Vanes - PRV).

על פי נתונים אלה הבקרה משנה את מהירות הסיבוב של המדחס, או את גיאומטריית הדיפיוזר, או את מצב כפות ההטיה, כולם יחד או את חלקם. זאת במטרה לשמור על יחס דחיסה כמתוכנן ולמנוע את היווצרות תופעות ההזדקרות או הנחשול. ויסות התפוקה באמצעות שילוב כל שלושת המנגנונים יביא להגדלת יעילות המדחס (במצבי הפריקה) עד 40%.

יתרונות מדחסים צנטריפוגליים בהשוואה למדחסים אחרים

- בעלי תפוקות גבוהות מאוד. מתאימים למערכות בגודל של אלפי טון קירור.
- בעלי מעט חלקים נעים והפסדי חיכוך נמוכים. בלאי נמוך, ובעקבות כך אורך חיים רב.
- נצילות נפחית גבוהה, אין שסתומים ביניקה ובדחיסה.
- במדחסים בעלי מערכות בקרה מתקדמות, תהיה יעילות גבוהה גם בתפוקות נמוכות.
- כמעט ואינם מעבירים שמן מהמדחס למערכת הקירור, דבר המונע את ציפוי החלק הפנימי של מחליפי החום בשמן ומשפר את יעילותם.
- מסוגלים לבנות לחץ דחיסה גבוה המתאים למערכות מיזוג אוויר עם עיבוי מים.
- אינם מייצרים רעידות או מכות לחץ בצנרת, בגלל עיקרון הזרימה הרציפה.
- תופסים שטח רצפה קטן, יחסית למדחסים אחרים בעלי אותה התפוקה.

חסרונות מדחסים צנטריפוגליים

- המדחסים פועלים במהירויות סיבוב גבוהות, יוצרים רעש בעוצמות גבוהות ומחייבים בידוד נגד רעשים.
- במדחסים בעלי דרגה אחת, יחס הדחיסה קטן (1:10). יחסי דחיסה גבוהים יותר מחייבים שתי דרגות ויותר.
- המדחסים מחייבים השקעה ראשונית גבוהה, כולל מערכות שימון למסבים ולתמסורות ומערכות שליטה ופיקוח על תנועת המאיץ.
- במדחסים צנטריפוגליים הפועלים בתפוקה נמוכה מ-30%, וללא בקרות לתיאום בין שינויי מהירות המאיץ. לשמירה על יחס דחיסה קבוע, היעילות תהיה נמוכה מאוד.

שימון מדחסים צנטריפוגליים

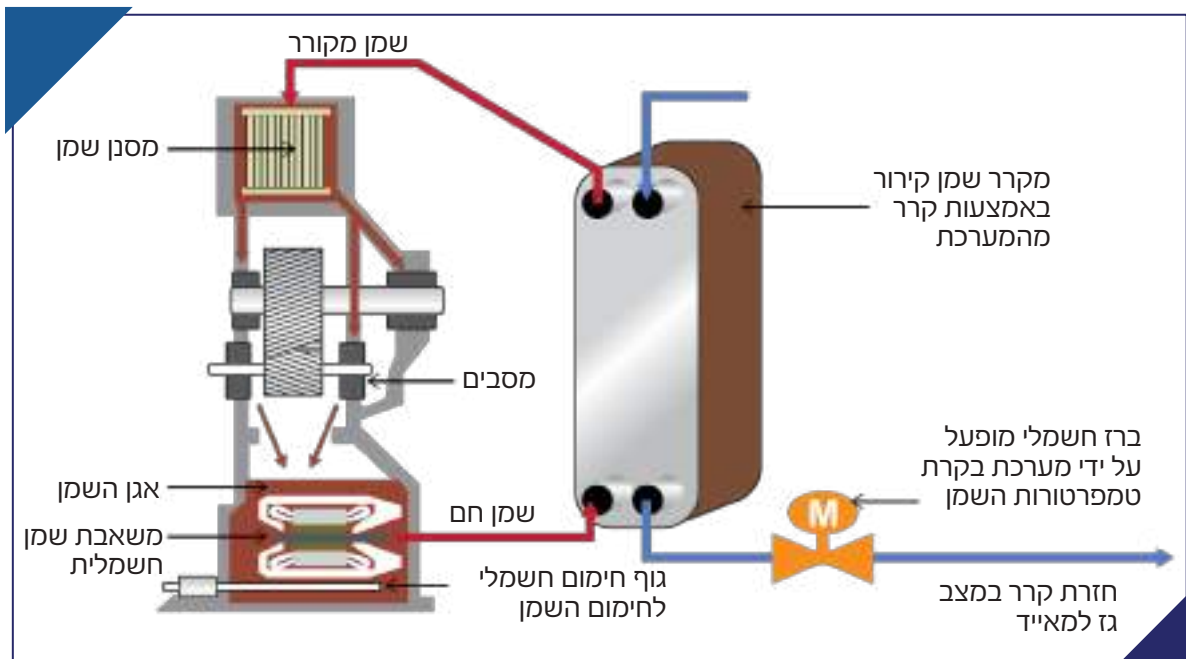
כעיקרון, מערכת השימון של מדחסים צנטריפוגליים מיועדת לשימון ולקירור מסבי המדחס, וכן מערכת ממסרת גלגלי השיניים. בשל העומסים הגדולים הפועלים עליהם, גם המסבים וגם הממסרת מספקים כמויות חום גבוהות, המחייבות שימוש במחליף חום חיצוני (Oil Cooler) לקירור השמן.

הקירור יכול להתבצע בדרכים הבאות

- הכנסת קרר נוזלי מקו נוזל והחזרתו כגז לקו היניקה (ראו תמונה 4.75).
 - הכנסת קרר נוזלי אחרי קירורו באמצעות שסתום התפשטות והחזרתו כגז לקו יניקה.
 - קירור באמצעות מים מקוררים ממגדל קירור.
- שיטת הקירור תיבחר בהתאם למאפייני מערכת הקירור.

מכיוון שבמדחסים אלה השמן מגיע בכמות קטנה, ולא לאזור המאיץ ישירות, כמות השמן העוזבת את המדחס קטנה יחסית. מאחר שמדחסים צנטריפוגליים פועלים לעתים קרובות במערכות צילר בעלות מאיידים מוצפים, יש לצייד את המדחס במפריד שמן בקו הדחיסה.

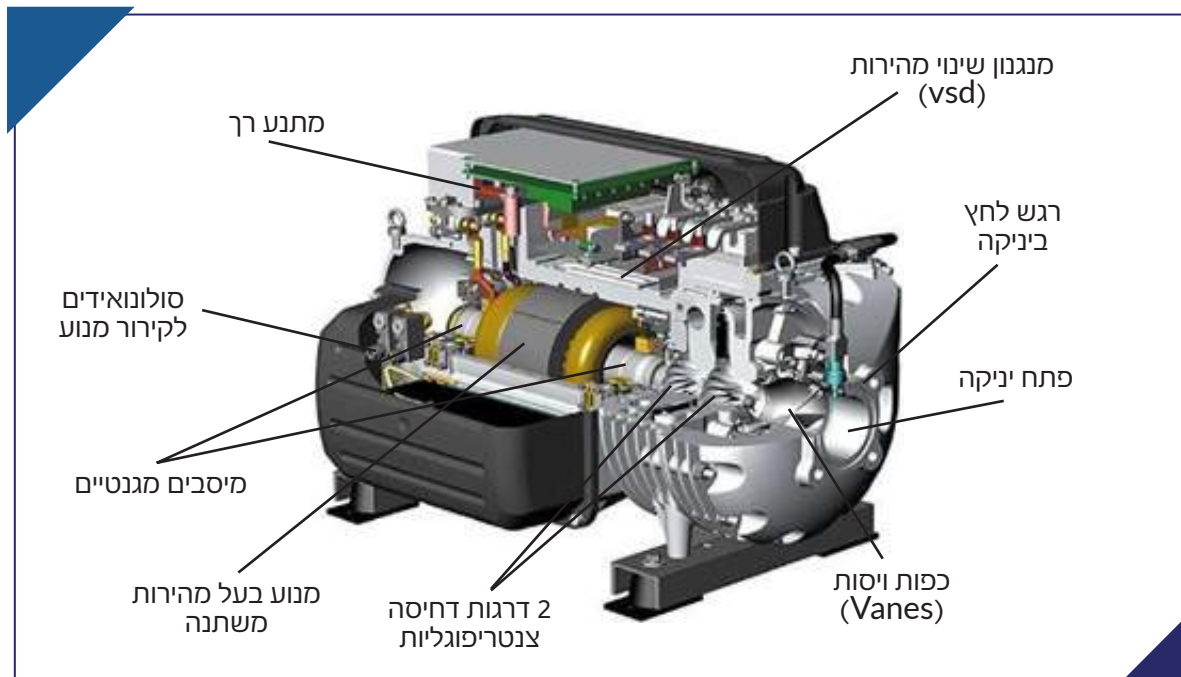
תמונה 4.75 - מערכת שימון למדחס צנטריפוגלי עם מחליף חום לקירור השמן



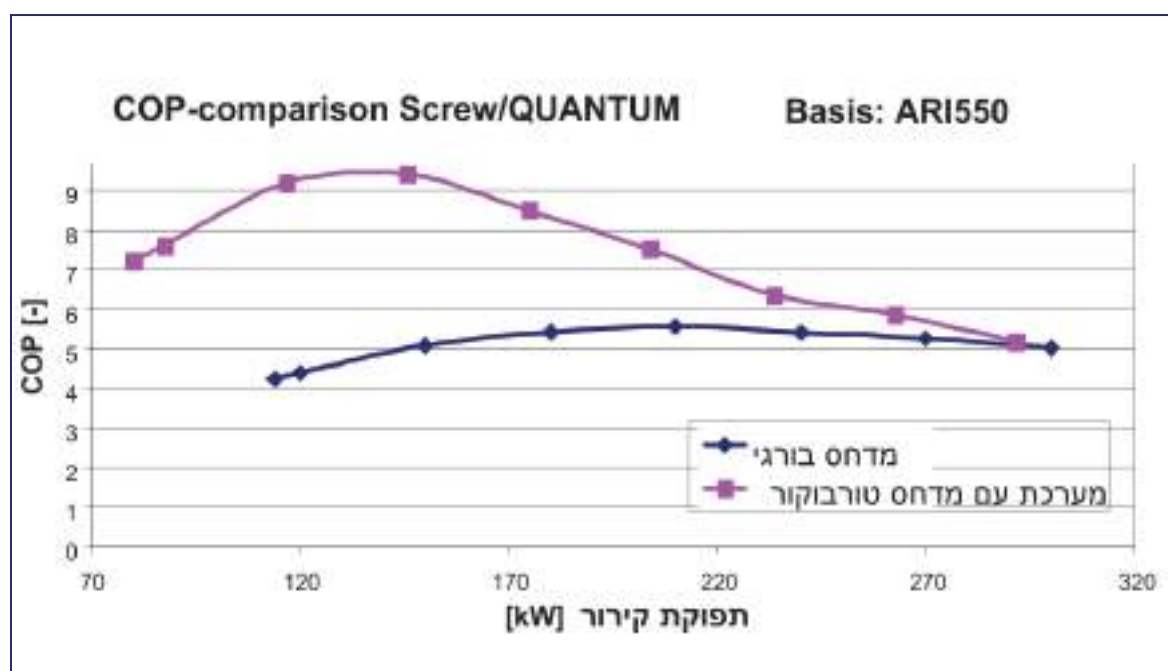
מדחסים צנטריפוגליים ללא שימון - טורבו קור

בשל מהירות הסיבוב הגדולה, אחד החסרונות העיקריים של המדחסים הצנטריפוגליים הוא הצורך במערכת שימון מסועפת, להקטנת החיכוך והבלאי של מסבי המדחס ותמסורת ההנעה. מערכות אלה דורשות תחזוקה יקרה, והתקלות הרבות הנגרמות מחוסר שימון, התחמצנות של השמן ועוד, דורשות תשומת לב ומייקרות את עלויות הפעלת המדחסים הקלאסיים. כמו כן, עלויות ייצור גבוהות ונצילות אנרגטית נמוכה (מהירויות גבוהות פירושו מנועים גדולים וצריכת חשמל גבוהה) מנעו מהמדחסים הצנטריפוגליים להיות זמינים למערכות קטנות ובינוניות.

תמונה 4.76 - מדחס צנטריפוגלי בעל מסבים מגנטיים, טורבו קור



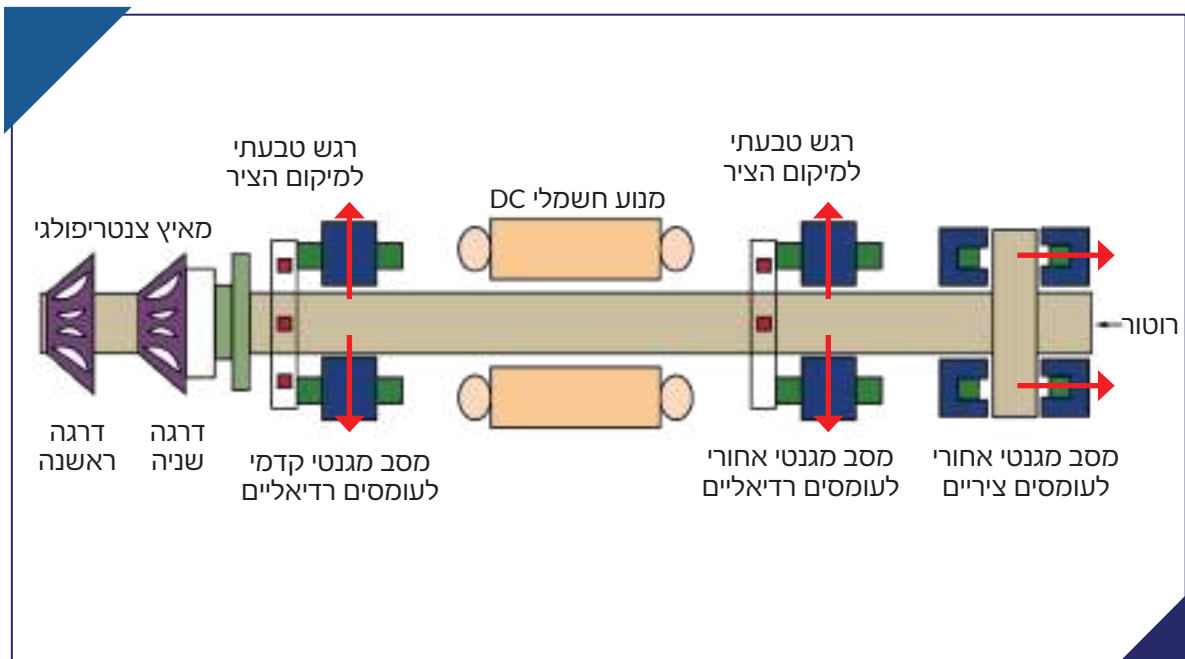
מדחסי הטורבו קור הם מדחסים צנטריפוגליים בעלי שתי דרגות דחיסה, שמסתובבים בתוך שני מסבים מגנטיים. המסבים מחזיקים את הציר המשולב של המנוע והמדחס במצב ציפה, כשהוא נע ללא כל חיכוך בינו ובין החלקים הקבועים. בשל היעדר חיכוך, לא נדרש מנוע חשמלי גדול כדי לסובב את המדחס ורמת הזרם החשמלי בתפוקה מקסימלית היא אמפרים בודדים. כך ההספק הנצרך נמוך משמעותית ממדחסים צנטריפוגליים רגילים. ההספק החשמלי הנמוך מביא את מערכות הקירור שמדחסים אלה מפעילים לנצילות (COP) גבוהה בכל טווחי פעולת המדחס, כמתואר בתרשים מטה.



עיקרון הפעולה

- עם קבלת דרישת הקיחור מִבְּקֵר המערכת, מפעיל הבקר הראשי של המדחס את בקר/ מגבר המסבים, אשר מכניס מתח למסבים המגנטיים.
- ההשראה המגנטית הנוצרת במסבים מעלה את הציר ומרכזת אותו במרכז המסבים.
- לאחר בדיקת מיקום הציר, מניע בקר המנוע את המדחס באמצעות מתנע רך, המאפשר הנעת המדחס בצריכת זרם נמוכה.
- במשך כל זמן עבודת המדחס, מקבלת בקרת המערכת נתונים מבקרת מערכת הקיחור, ומתאימה את תפוקת המדחס על ידי שינוי זווית הכנפונים שבפתח הניקה או על ידי שינוי מהירות המנוע.
- כיבוי המדחס נעשה בשלבים: כיבוי המנוע החשמלי, המתנה לעצירת המדחס, ורק לאחר מכן הקטנה הדרגתית של הכוח המגנטי והנמכת הציר עד הנחתו על משטחי המסבים.

תמונה 4.78 - ציר המדחס והמסבים המגנטיים, מדחס טורבוקור



מכיוון שמדחסים צנטריפוגליים אלה מוגבלים בתפוקתם בגלל הקוטר הקטן של המאיצים, נהוג לחבר כמה מדחסי טורבו קור במקביל לקבלת תפוקה גדולה יותר. ויסות התפוקה במדחסי טורבו קור מגנטיים נעשה כמו בכל מדחס צנטריפוגלי, על ידי שילוב שינוי מהירות סיבוב המנוע יחד עם הקטנת מעבר הגז ביניקת המדחס, בעזרת כנפוני ויסות. חסרונו העיקרי של מדחס זה הוא בתפוקתו המוגבלת ובמחירו, היקר יחסית.

טבלה 4.2 - השוואת תכונות מדחסים שונים

סוג המדחס	עלות המדחס לכל יחידת הספק	יעילות (נצילות) המדחס	רעידות הנוצרות בצנרת הקירור מפעולת המדחס	קושי ומורכבות בייצור המדחס על העלויות	עלות אנרגטית ליחידת תפוקה	
מדחסי דחיקה חיובית	מדחסי בוכנה חד-דרגתיים	נמוכה	נמוכה	גבוהות	קל	נמוכה - גבוהה
	מדחסים סיבוביים מסוג להבים	בינונית	בינונית	בינוניות	קשה	נמוכה
	מדחסים סיבוביים מסוג סקרול	בינונית	גבוהה	בינוניות	קשה	נמוכה
	מדחסים סיבוביים מסוג בורגי	גבוהה	גבוהה מאוד	נמוכות	קשה ומורכב	גבוהה
מדחסים דינמיים	מדחסים צנטריפוגליים	גבוהה	גבוהה מאוד	נמוכות	קשה ומורכב	גבוהה

4.4 מערכות שימון למדחסי קירור

4.4.1 תפקיד השמן במדחסי מערכות הקירור והמיזוג, ותכונותיו

- שימון רכיבי המדחס הנעים (מסבים, בוקסות, טבעות שימון), וקירור חלקים אלה על ידי ספיגת החום והעברתו לאגן השמן או למחליף חום חיצוני.
- אספקת שמן להפעלת מערכות עזר הקשורות לפעולת המדחס (שינוי תפוקה וכדומה).
- בעיות רבות במערכות הקירור, כמו הרס מדחסים ורכיביהם וסתימות באביזרי ההתפשטות ומאיידים, נגרמות בגלל מערכות שימון כושלות. הדבר ניתן למניעה על ידי תכנון מוקדם של המערכות ובחירת השמנים הנכונים לכל סוג קרר ומערכת.

4.4.2 מקבץ נתונים לגבי שמנים המשמשים במערכות הקירור

על אף שברוב הפעמים נעשה שימוש בשמנים שהומלצו על ידי יצרני המדחסים השונים, לאור ריבוי סוגי השמנים, רצוי כי מתכנן מערכת הקירור יהיה בקיא בתכונות השמנים ובהתאמתם.

דרישות משמני קירור

- עמידות בטמפרטורות העבודה (הדחיסה והאיוד) של המערכת.
- צמיגות מתאימה לטמפרטורות העבודה של המדחס ולזרימה בקווי הצנרת.
- עמידה במגע עם הקררים השונים, מבלי לגרום לשינוי או לפגיעה בתכונותיהם או בתכונות השמן.
- כושר היפרדות ממים ומנוזל הקרר.

חשוב! אין לערבב שמנים מינרליים עם שמן סינטטי מלא.

4.4.3 הגדרות ומונחים בנושא שמנים למדחסי קירור

פעולת השימון מתבצעת כאשר שמן נדחף בלחץ בין שני משטחים נעים הנמצאים במגע אחד עם השני. השמן הנדחס בין המשטחים בלחץ הידראולי מרים את המשטחים ומפריד אותם אחד מהשני, עד כדי הקטנת החיכוך ביניהם למינימום.

כדי שיוכל לבצע את תפקידיו ביעילות, יש לבחור שמן העומד בתכונות הבאות:

- **צמיגות (Viscosity):** הצמיגות היא תכונה שמתקבלת כאשר למולקולות החומר יש נטייה להיצמד אחת לשנייה. מכאן אנו מתארים את החומר כסמיך או דליל. הצמיגות משתנה עם שינוי הטמפרטורה. בטמפרטורה גבוהה, צמיגות השמן יורדת. הוא נעשה דליל ויכולת השימון שלו נפגעת. בטמפרטורות נמוכות, כמו אלה הקיימות במאיידים של מערכות קירור, צמיגות השמן עולה והוא נעשה סמיך יתר על המידה, עד כדי כך שהקרר במצבו כגז יתקשה להסיע אותו בחזרה ליניקת המדחס.

הצמיגות המתאימה לשמן הפועל במערכות קירור תהיה כזו, שתבטיח את יכולתם של מרכיבי השמן לא להיפרד גם בטמפרטורות גבוהות (כמו אלו הנוצרות בצילינדר בעת תהליך העבודה). כמו כן תיצור שכבה סמיכה בין החלקים הנעים (בוכנות-צילינדר, מסבים-גל ארכובה) ותאפשר את תנועת השמן במאייד ובקו היניקה בחזרה למדחס.

- **היפרדות פּרָפִינִים (FLOC):** שמנים מינרליים עשויים מתרכובות של אולפינים ופרפינים. כאשר שמנים אלה באים במגע עם קררים מינרליים (סולבנטים) בטמפרטורות נמוכות, מופרד החומר הפרפיני מהשמן, ויוצר משקעים של שעווה (Wax) העלולים לסתום את מעברי השמן במדחס ואת הדיזות בשסתומי ההתפשטות. לכן, בעת בחירת שמן למערכות לטמפרטורה נמוכה, חשוב לוודא את התאמתו של שמן הקירור ליצירת תערובת (Solubility) עם הקרר הפועל במערכת.

- **היכולת להתערבב עם הקררים (Solubility):** כאמור, השמן והקררים צריכים "לחיות ביחד". הן כשהם נמצאים במדחס והן בעת זרימת השמן במערכת הקירור, בכל טווחי הלחצים והטמפרטורות שבהם פועלות מערכות הקירור. במערכות הקירור, חלק מהשמן עוזב את המדחס ומוסע עם הקרר במעגל הקירור עד חזרתו למדחס. יש לוודא כי בכל שלב ושלב, כשהקרר זורם במהירות (דחיסה) כגז, או חוזר ליניקת המדחס (יניקה) בזרימה איטית, תהיה לו היכולת להסיע איתו את השמן ולהחזירו למדחס.

מבין הקררים השימושיים כיום, המתאימים ביותר להחזרת השמן בכל טווחי הלחץ והטמפרטורות מסוג הידרוקרבון (H.C) הם: R-32, R-290, R-600, R-600a ואחרים. קררים כמו R-22 ודומיו אינם מתאימים להחזרת שמן בעבודה בטמפרטורות שמתחת ל-20°C, ויגרמו להצפת המאיידים בשמן. מצב שיוביל לירידת תפוקת המאייד ולנזק בלתי הפיך למדחס. גם קררים מסוג אמוניה (R-717) ו-CO₂ (R-744), שמשקלם הסגולי במצב גז קל מהשמן, "ישאירו" את השמן במאייד בעת זרימתם ליניקת המדחס.

הפתרון לשמנים אלה הוא תכנון נכון של המערכת:

- מיקום המאייד מעל המדחס.
- תכנון נכון של קוטר הצנרת ואורכה, תוך קביעת מהירות זרימה מינימלית.
- הימנעות מיצירת "מלכודות שמן".
- עצירת השמן מיד ביציאת המדחס על ידי התקן מפריד שמן בקו הדחיסה והחזרתו לאגן השמן, ישירות או דרך יניקת המדחס.

4.4.4 סוגי שימון במדחסים שונים

4.4.4.1 שימון מדחסים בוכנתיים

בשל ריבוי החלקים הנעים והחיכוך הגדול שהם יוצרים, המדחסים הבוכנתיים דורשים שימון יעיל כדי להקטין את הפסדי החיכוך ולמנוע בלאי מואץ של רכיביהם.

במדחסים קטנים, ובמיוחד במדחסים הרמטיים, שיטות השימון הנהוגות הן:

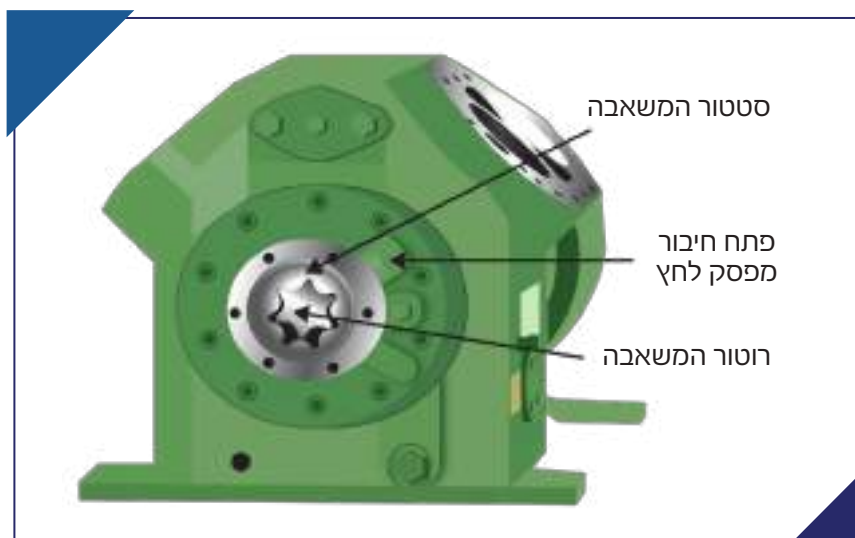
א. שימון בטבילה

- כאשר יחידת הדחיסה מותקנת בתוך אגן השמן שבתחתית המדחס.
- כאשר לגל הארכובה פתחים בהיקף הארכובות, אליהם נכנס השמן בעת שהארכובה מסתובבת. הכוח הצנטריפוגלי שמופעל על השמן מעלה אותו אל המסבים, הטלטים והבוכנות.

ב. שימון בהתזה

- במדחסים הרמטיים, לוחיות המולחמות לארכובות הגל גורפות שמן בעת מעבר בתוך אגן השמן, ומטילות כמויות שמן גדולות אל חלקו העליון של המדחס ואל החלקים הנעים.
- במדחסים גדולים יותר, מסוג מדחסים פתוחים, או מדחסים סגורים למחצה (Semi Hermetic), נהוג להשתמש במשאבת שמן המונעת על ידי גל הארכובה, או תמסורת של המדחס.

תמונה 4.79 - מיקום ומבנה משאבת השמן במדחס סגור למחצה (סמי הרמטי)



מפאת חשיבותו של השימון למניעת נזק למדחסים אלה, המדחסים מוגנים מפני ירידה או עלייה בלחץ השמן באחת מן הדרכים הבאות:

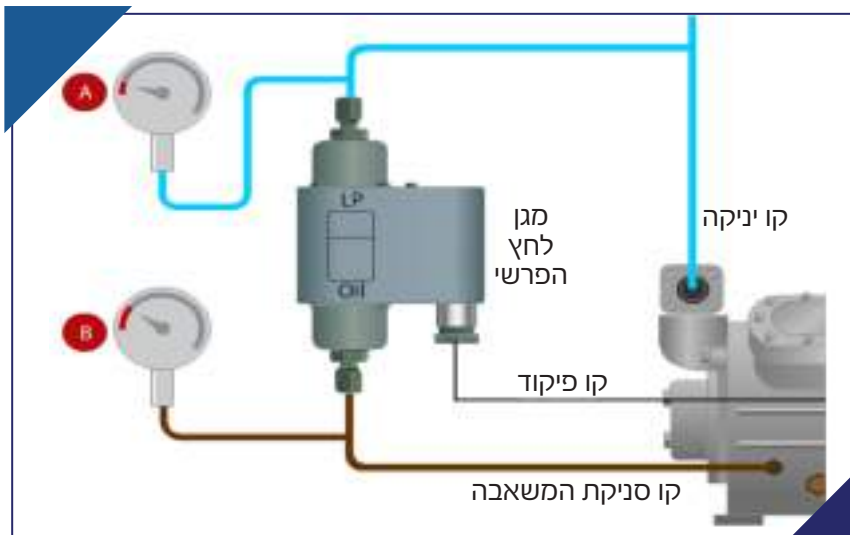
א. מפסקי לחץ נמוך נגד ירידה ביכולת השימון, בעקבות חוסר שמן או סתימת מסנן יניקה השמן.

ב. מפסק לחץ גבוה נגד עלייה בלחץ סניקת המשאבה (יציאת הלחץ), שיכול להצביע על סתימות וחסמת מעברי השמן הפנימיים שבמדחס.

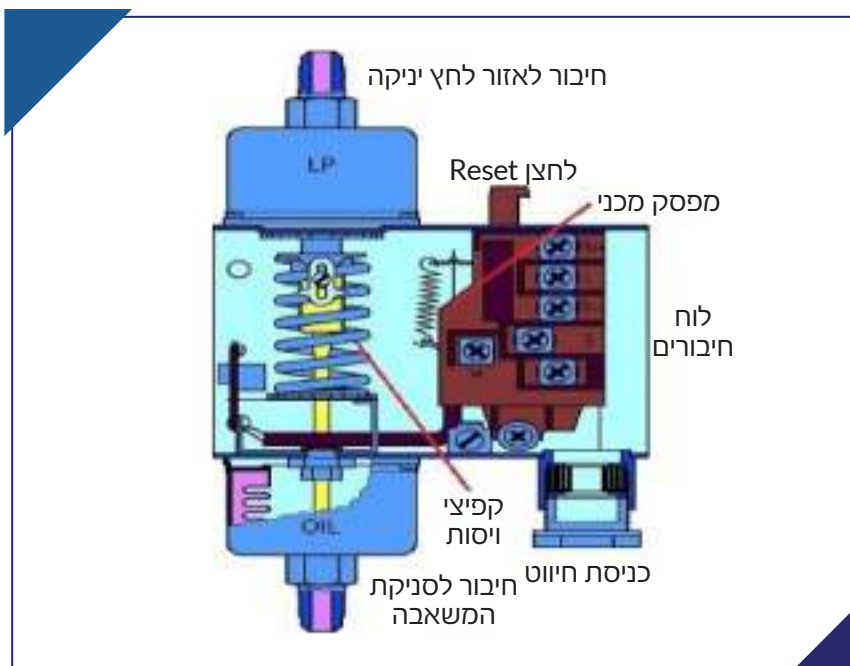
ג. מפסק מגן (פרוסוסטט) לחץ שמן הפרשי זהו מתקן המודד את הפרש הלחצים בין סניקת משאבת השמן (לחץ גבוה) ובין לחץ יניקת המשאבה, הזהה ללחץ בית גל הארכובה, או קו היניקה של המדחס. לחץ הפרשי נמוך ממה שהוגדר על ידי יצרן המדחס יכול להצביע על חוסר שמן במדחס, תקלה במשאבת השמן, או סתימה במסנן יניקת המשאבה. המכשיר מיועד להתריע או לנתק את המדחס כשהלחץ ההפרשי קטן מהלחץ שהוגדר על ידי יצרן המדחס.

הערה: מכיוון שבהתנעת המדחס עדיין לא נבנה לחץ שמן מספיק כדי להפעיל את המפסק, מצוידים מגיני לחץ השמן במנגנון השהייה המאפשר פעולה בלחץ שמן נמוך לזמן קצר. זאת כדי לאפשר פעולה של המדחס בזמן שמשאבת השמן בונה את הלחץ הרצוי. מגן לחץ הפרשי מכני (תמונה 4.80) - מורכב על המדחס או בסמוך אליו, ומחובר לאיזור היניקה (LP) מצד אחד ולסניקת המשאבה מצד שני (HP).

תמונה 4.80 - חיבורי מפסק לחץ הפרשי



תמונה 4.81 - מבנה מפסק לחץ הפרשי אלקטרו-מכני

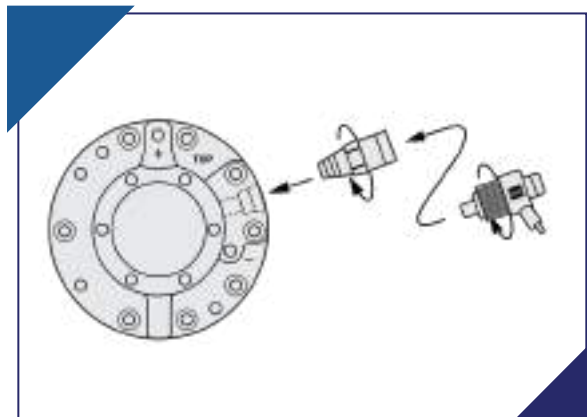


תמונה 4.82 - מיקום פרסוסטט הגנת לחץ שמן



מגן לחץ הפרשי אלקטרוני מחליף כיום את המפסק המכני. הוא מורכב מיחידת בקרה אלקטרונית המקבלת אותות חשמליים ממפסקי לחץ. מפסקי לחץ ממוקמים בנקודות הלחץ וממירים את הלחץ לאותות חשמליים בעוצמה משתנה בהתאם ללחץ הנמדד. יתרונו של המפסק האלקטרוני הוא בכך שניתן למקם אותו רחוק יחסית מנקודות מדידת הלחץ, וכן ניתן לחבר אותו למערכת בקרה ממוחשבת השולטת על כלל מערכת הקירור מחדר בקרה מרוחק.

תמונה 4.84 - מיקום הרגש הכפול במכסה אחורי



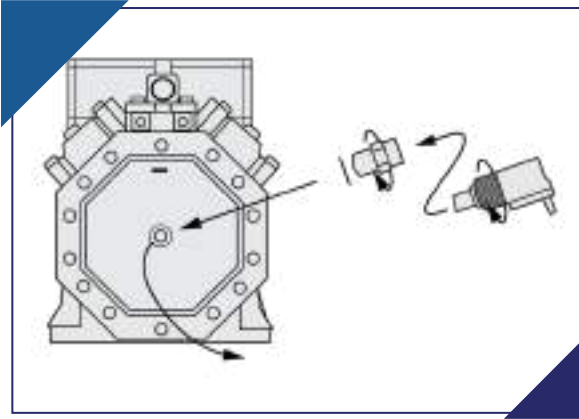
תמונה 4.83 - מגן לחץ שמן הפרשי אלקטרוני



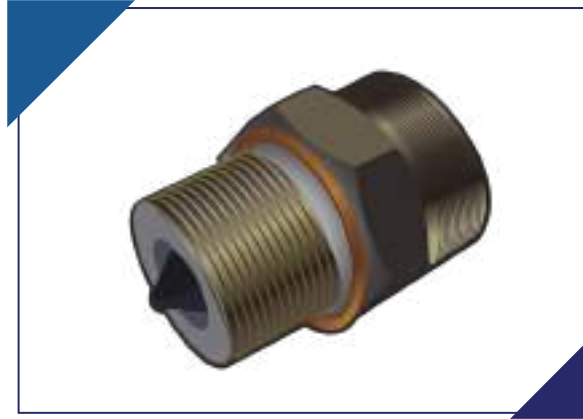
ד. מגן גובה שמן אופטי

במדחסי בוכנה קטנים ובמדחסים שבהם אין משאבת שמן, עדיין נדרשת הגנה נגד חוסר שימון. במדחסים אלה השימון מתבצע באמצעות לוחיות או דיסקה המחוברות לגל הארובה, וההיקף טובל בחלק התחתון של אגן השמן. עם סיבוב המדחס, גל הארכובה מסתובב ואיתו הדיסקיות שטובלות בתוך אגן השמן. הדיסקיות מעלות את השמן לאגן קטן הנמצא מול ציר המדחס ומול העינית האופטית. השמן עובר דרך ציר המדחס החלול שבו קדחים, ואלה מעבירים שמן לכל אורך הציר, אל המסבים ובוכנות המדחס. במצב של שמן בגובה האגן מול החיישן האופטי, החיישן מזהה מצב תקין ומאפשר את פעולת המדחס. כאשר יש חוסר שמן באגן השמן, הדיסקה אינה מעלה שמן לאגן העליון הקטן מול ציר המדחס, והחיישן האופטי אינו מזהה נוכחות שמן ומנתק את המדחס.

תמונה 4.86 - מיקום מגן גובה שמן אופטי



תמונה 4.85 - מגן גובה שמן אופטי



4.4.4.2 שימון מדחסים רוטאריים

מדחסים רוטאריים דורשים שימון רציף. הדבר מתבצע בעיקר על ידי מיקום יחידת הדחיסה בתוך אגן השמן. זאת כדי לבצע אטימה באמצעות שכבת שמן, בין דופן הצילינדר לגליל הנע עליו. במדחסים מסוימים הדורשים שימון יעיל יותר, המדחס מניע משאבת שמן.

4.4.4.3 שימון מדחסי סקרול

מדחסי סקרול זקוקים לשמן לצורך שימון מסבי המדחס, ולביצוע האטימה שבין הסקרול הסובב לסקרול הקבוע, כדי לאפשר בניית לחץ. מדחסים אלה מקבלים את השמן באמצעות חריץ פנימי בגל הארכובה/ציר המנוע, המעוצב בתצורת "בורג" ומאפשר העלאת השמן בכוח צנטריפוגלי.

4.4.4.4 שימון מדחסים בורגיים

מטרות השמן במדחסים בורגיים לסוגיהם

- שימון מסבי הרוטור המניע והמונע.
- אטימת המרווחים שבין הרוטורים ובין עצמם, ובנים לבין בית הרוטורים. זאת כדי לאפשר בניית לחץ בעת דחיפת הקרר מפתח היניקה לכיוון קו הדחיסה, ומניעת חזרת קרר בלחץ גבוה לכיוון פתח היניקה.
- שימון מערכת התמסורת שבין הבורג המניע לבורג המונע ו/או לרוטורי היציאות במדחס חד-בורגי.
- קירור המדחס ורכיביו.

בגלל כמויות השמן הגדולות, וגם בשל העובדה כי מדחסים מסוג זה פועלים לרוב מול מאיידים מוצפים שאין אפשרות להחזיר מהם את השמן דרך קו היניקה, מצוידים המדחסים הבורגיים במערכות אינטגרליות להפרדה והחזרה של שמן. המערכות משולבות במדחס עצמו או חיצוניות, ומפרידות את השמן מיד עם יציאתו מהמדחס.

מערכת הפרדת/החזרת שמן כוללת:

1. מפריד שמן.
2. מסננים.
3. מכלי אגירת שמן.
4. מחליפי חום לקירור השמן, באמצעות:
 - מים קרים ממערכת צ'ילר או ממגדלי קירור.
 - גז קר מיציאת המאייד.
 - הזרקת נוזל קירור בלחץ נמוך.
 - קירור באמצעות אוויר.
 - גופי חימום באגן השמן, לאיזוד קרר נוזלי מתוך השמן.

מערכת הבקרה על מפלס השמן במדחס כוללת

- חיישנים לבדיקת גובה (מפלס) השמן במדחס ובמכל אגירת השמן.
- מד טמפרטורת שמן במדחס ובמכל האגירה.
- הגנה אלקטרו-מכנית מפני חוסר שמן או חוסר לחץ (מפסק לחץ הפרשי).
- ברזים, גופי חימום, ויחידת בקרה ממוחשבת.

במדחסים בורגיים, מנצלים את הפרש הלחצים שבין אזור הלחץ הגבוה ליניקת המדחס ואת אי-קיום שסתומי יניקה, להחזרה שוטפת של השמן מהמערכת למדחס. אולם, בגלל החשיבות המיוחדת לכמות שמן מספיקה במדחסים אלה, ניתן למצוא בצמוד למדחסים מערכות שימון מקבילות (בנפחים קטנים יותר), למקרים של כשל במערכת השבת השמן הרגילה.

4.4.4.5 שימון מדחסים צנטריפוגליים

מדחסים צנטריפוגליים פועלים במהירויות סיבוב גבוהות מאוד, ולכן דורשים שימון בלחץ גבוה ובכמויות שמן גדולות למסביהם.

מערכת השימון כוללת

- משאבת לחץ גבוה, כולל אמצעי הגנה למניעת נזק מלחץ גבוה או מחוסר שימון.
- מפרידי שמן בקו הדחיסה.
- מערכות לקירור השמן.
- מכלי אגירת שמן.
- מערכת גיבוי.

במדחסים בהם משאבת השמן ללחץ גבוה מונעת על ידי ציר המדחס, ישירות או באמצעות תמסורת, יש חשש לפגיעה בזרימת השמן למסבי המדחס ולממסרת גלגלי השיניים ולהריסתם. החשש הוא בעת ירידת מהירות הסיבוב של המדחס (ויסות תפוקה או כיבוי). בעבר היה נהוג להתקין במערכות השימון של מדחסים אלה מיכלי שמן טעונים בלחץ גבוה. מיכלי השמן מפוקחים על ידי מערכת בקרת גובה השמן במדחס, שתאפשר את הזרמת השמן מהם בעת ירידת לחץ השימון של המשאבה. כיום משתמשים במשאבה חשמלית, חיצונית או בנויה בתוך מאגר השמן, לבניית לחץ השמן במערכת הזרקת השמן לרכיבי המדחס.

במערכות עם מדחסים בורגיים וצנטריפוגליים, שבהן השמן מאוחסן במכלי אגירה הנמצאים בלחץ יניקה, כיבוי המערכת יגרום לעלייה בלחץ השורר במכלי האגירה ועלול לגרום להתעבות אדי הקרר ולמהילת השמן בנוזל הקירור.

מצב זה עלול להביא לתוצאות הבאות:

1. בגלל משקלו הסגולי הנמוך, יצוף השמן מעל נוזל הקירור. הדבר יגרום לכך שעם הנעת המערכת והתחלת היניקה של משאבת השמן, המשאבה תינק ותעביר למסבי המדחס נוזל שאינו בעל תכונות שימון, דבר שעלול לגרום להרס המדחס.
2. עם התנעת המערכת, הלחץ במכלי השמן ירד ויגרום להתאיידות הקרר תוך הקצפת השמן. במצב זה, השמן המוקצף שנשאב על ידי המשאבה אינו מסוגל למלא את תפקידו, וייגרם נזק למדחס.

כדי למנוע את התופעות המתוארות לעיל, מתקינים בתוך מכלי השמן ובאגן השמן של המדחסים גופי חימום, המופעלים כשהמערכת בהפסקת פעולה. גופי חימום אלה יחממו את השמן ויאידו מתוכו את נוזל הקירור.

4.4.5 מערכות הפרדה והחזרה של שמן למדחסים

- כפי שהוסבר בפרק זה (4.4.1), השמן הוא חלק בלתי נפרד ממערכת הקירור, אך המעבר של השמן מהמדחס אל המערכת טומן בחובו בעיות:
- ציפוי של צנרת המעבה ושל המאייד בשכבה המקטינה את מעבר החום.
 - יצירת משקעים המפריעים לזרימת הקרר.
 - סתימת אביזרי התפשטות (צינור קפילרי, שסתומי התפשטות).
 - חוסר שימון במדחס.

כעיקרון, הקרר שעוזב את המדחס במהירות זרימה גבוהה מסייע איתו חלק מסוים מהשמן שבמדחס. השמן היוצא מהמדחס מוזרם לכיוון המעבה בקו הדחיסה (בעל קוטר קטן יחסית), ולפיכך מהירות זרימת גז הקירור בתוכו גבוהה. כך מתאפשרת הסעת השמן עד למעבה. במעבה הקרר הופך מגז לנוזל, נמהל בשמן, ומוליך אותו בקו הנוזל עד למאייד. שם מתאייד הקרר ונפרד מהשמן. במערכות בעלות נפח צנרת קטן, אורך צנרת היניקה ומהירות הזרימה מאפשרים את החזרת השמן על ידי הקרר. הקרר זורם ומושך את השמן בחזרה למדחס דרך קו היניקה. אולם במערכות המתוארות להלן תיווצר בעיה בהחזרת השמן, ולכן יהיה צורך להשתמש במערכת הפרדה והחזרה של שמן למדחס.

המערכות שבהן תיווצר בעיה בהחזרת השמן למדחס

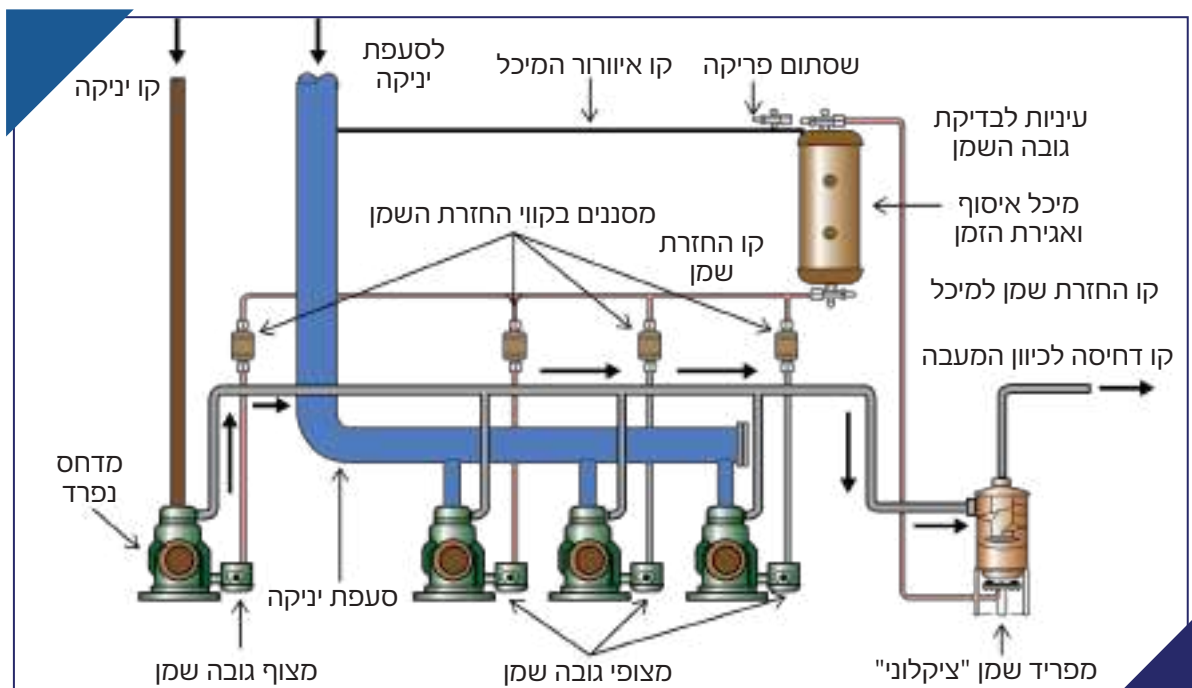
- **מערכות בעלות נפח צנרת ומחליפי חום גדול:** השמן מהמדחס שניכנס למערכת, לא יחזור למדחס במהירות, וכמות השמן במדחס תקטן מתחת למינימום הנדרש לפעולה תקינה של המדחס.
- **מערכות שבהן המדחס מותקן בהפרש גובה גדול מעל המאיידים:** במערכות כאלו, שהן אנכיות לגז הקירור הזורם בקו היניקה (קוטר גדול, מהירות זרימה נמוכה) אין את היכולת לסחוף את השמן, והשמן נשאר במאייד. כתוצאה מכך, גם נפח הקרר שיכול להתאייד קטן ומקטין את תפוקת המערכת, וגם כמות השמן במדחס אינה מספיקה לשימון וקירור המדחס ורכיביו. לכן, זו הסיבה שמהירות הזרימה הנדרשת בקו היניקה (במערכת בעלת קווי קרר אנכיים) היא $1,500 \text{ fpm}$ (1,500 רגל לדקה = 7.5 מטר לשנייה), לעומת 700 fpm (3.5 מטר לשנייה) במערכות בעלות קווי יניקה אופקיים.
- **מערכות בעלות מאיידים מוצפים:** במערכות אלה הקרר מאוחסן במאיידים כנוזל, והאיוד מתבצע בהתאמה לעומס החום. מכיוון שיציאת הקרר כגז נעשית מחלקו העליון של המאייד, השמן נשאר בתחתית המאייד ואינו מסוגל לצאת ולחזור למדחס.
- **הערה:** במערכות קטנות בעלות מדחס אחד, ניתן למצוא מכלי הפרדת שמן המותקנים מתחת למאייד, אליהם זורמים הקרר והשמן בכוח הגרביטציה. הקרר מתאייד וחוזר למדחס דרך קו היניקה, ואילו השמן מוחזר בלחץ דרך צינור נפרד אל המדחס.
- **מערכות להקפאה עמוקה:** במערכות אלה טמפרטורות האיוד הנמוכות מחייבות שימוש בקררים מסוימים שבמצב צבירה גז. תכונותיהם (צמיגות, מהירות זרימה) בשילוב הגדלת צמיגות השמן בטמפרטורות נמוכות, אינן מאפשרות את החזרת השמן ליניקת המדחס.
- **מערכות בעלות כמה מדחסים המחוברים ופועלים במקביל:** מערכות בעלות כמה מדחסים ניתן למצוא בענפים רבים של תעשיית הקירור והמיזוג, דוגמת מערכות קירור ומערכות הקפאה בחנויות מזון. במערכות אלה מדחסים רבים, בשל צרכי תחזוקה וחיסכון באנרגיה. במערכות אלה המדחסים מחולקים לקבוצות לפי ייעודם (קירור או הקפאה) ומותקנים במקביל אחד לשני, מוזנים מקו יניקה משותף, ודוחסים את הקרר לקו דחיסה משותף (נקראות מערכות RACK).
- **מחזורי פעולה קצרים ומעטים של המערכת:** כדי לבנות לחצים ומהירויות זרימה מינימליות שיאפשרו שימון טוב והחזרת השמן למדחס, על המערכת לייצר לפחות 10-12 מחזורי הפעלה בשעה. כמות נמוכה של מחזורים תשאיר את השמן בצינורות ובמאייד.
- **מערכות בעלות אורך צנרת גדול מהמוצע:** כל יצרן של מערכת מפוצלת הניתנת להתקנה במרחקים משתנים בין חלקיה, מחויב להגדיר את האורך המקסימלי לצנרת ואת כמות השמן שיש להוסיף למדחס כדי לפצות על תוספת האורך והנפח.
- **מערכות שחלק גדול מהצנרת שלהן עובר במקומות קרים במיוחד (בתוך חדרי קירור/הקפאה, מערכות באזורים קרים):** במערכות כאלה, אם צנרת המערכת אינה מבודדת כראוי, הקור שחודר למערכת דרך דופן הצינור מביא להגדלת צמיגות השמן ומקשה על החזרתו למדחס.
- **מערכות בעלות צנרת עם פיתולים רבים ושינויים (מעברים) מרובים בקוטר:** במערכות אלה ייווצרו "כיסים" שילכדו את השמן בתוכם וימנעו את חזרתו למדחס. בנוסף, כל שינוי בקוטר או פיתול בצנרת מעלים את ההתנגדות של הקרר לזרימה, ומאטים את מהירותו ואת יכולתו להחזיר את השמן למדחס.

סיבות נוספות להתקנת מערכות "רבות מדחסים"

- אפשרות לבצע פריקת דרגות, כלומר להפסיק את פעולת חלק מהמדחסים, כדי להתאים את תפוקתם לדרישות המערכת.
- חיסכון בצריכת החשמל ובגודל החיבור החשמלי הנדרש, והנעת המדחסים בהשגייה זה מזה.
- מערכות למיזוג אוויר בעלות תפוקה משתנה. כמו במערכות הנ"ל, גם במערכות אלה המטרה היא לאפשר התנעה ועבודה בעומס חלקי.

הבעיה העיקרית בהחזרת השמן במערכות בעלות כמה מדחסים נובעת מהאפשרות שהשמן יחזור רק למדחסים הפועלים בתפוקה מלאה. כדי להתגבר על בעיית החזרת השמן ממערכת הקירור למדחס, נוהגים להתקין מערכת הפרדה והחזרה של שמן כמתואר בתמונה 4.87.

תמונה 4.87 - מערכת הפרדה והחזרה של שמן לארבעה מדחסים



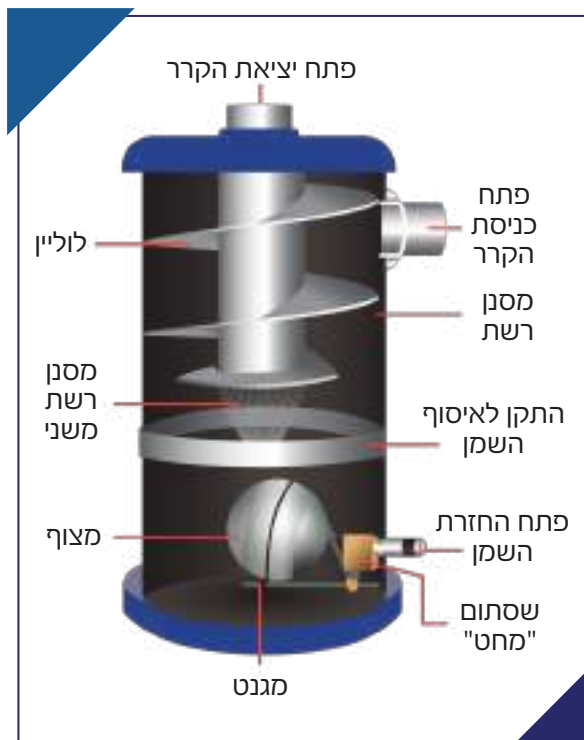
4.4.6 עיקרון פעולת המערכת

- הקרר והשמן היוצאים מכל מדחס עוברים דרך סעפת הדחיסה אל מפריד השמן.
- במפריד השמן, הקרר מופרד מהשמן ויוצא יבש (99.99%) אל קו הדחיסה.
- השמן שהופרד מצטבר בתחתית מפריד השמן, ומועבר באמצעות הלחץ הגבוה (לחץ קו דחיסה) אל מכל אגירה המותקן גבוה ממפלס המדחסים. מפלס המדחסים מחובר לקו היניקה של המדחסים, לצורך השוואת הלחצים בין מכל האגירה ליניקת המדחסים.
- ממכל האגירה, השמן חוזר אל המדחסים בכוח הכובד (Gravity), ומנותב בחזרה אל המדחסים דרך קווי צינורות. קווי הצינורות כוללים מסנן, עין מראה (Sight Glass) ותאי מצוף לגובה מפלס השמן, המותקנים בכניסה לכל מדחס ומדחס.
- המצופים מודדים את מפלס השמן בבית גל הארכובה של המדחס, ועם ירידת המפלס מתחת למינימום, מתאפשרת הכנסת כמות מתאימה של שמן לאגן השמן של המדחס, תוך שמירה על המפלס הרצוי. זאת כדי למנוע מילוי יתר שעלול להפריע לפעולת המדחס.
- בשיטה זו, מובטחת החזרת שמן בכמות רצויה גם למדחסים שאינם פועלים ברציפות.

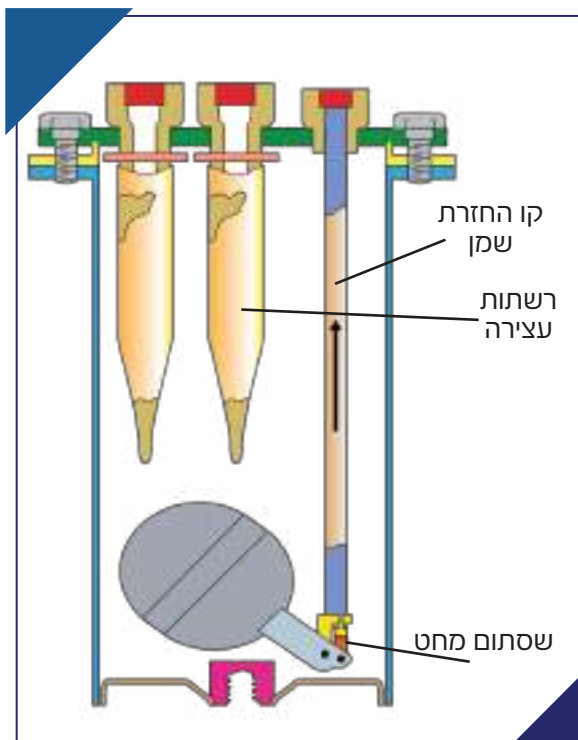
4.4.7 מבנה ואופן הפעולה של מפריד השמן

- מפריד השמן הוא מכל שאליו נכנס הקרר במצב גז, ומושך איתו את השמן שיצא מהמדחס. הקרר נכנס למפריד השמן דרך צינור קו הדחיסה, ושם הוא מופרד באחת השיטות הבאות:
- תנועה סיבובית: השמן מופרד מהקרר באמצעות הכוח הצנטריפוגלי שיוצרת התנועה הסיבובית של הקרר בציקלון (תמונה 4.89).
 - רשתות סינון צפופות: רשתות המאפשרות את המשך זרימת הגז למערכת, אך מונעות מטיפות השמן שצמיגותן גבוהה יותר להמשיך לקו הדחיסה (תמונה 4.88).

תמונה 4.89 - מפריד שמן ציקלוני



תמונה 4.88 - מפריד שמן רשתות



השמן שנכנס למפריד כרסיסים קטנים, מצטבר על הרשתות ונאסף לטיפות גדולות וכבדות, הגולשות לכיוון חלקו התחתון של המכל המפריד. כאשר כמות השמן גדלה ומפלסה עולה, פועל המפריד באמצעות מצוף מכני או רגש גובה אלקטרוני, לפתיחת ברז מחט הסוגר את היציאה למדחס. משם, בעזרת הלחץ הגבוה מקו הדחיסה השורר במפריד השמן, השמן מוחזר באמצעות צינור ישירות לאגן השמן של המדחס (במערכת עם מדחס בודד).

במערכת שבה כמה מדחסים פועלים במקביל, השמן מועבר ממפריד השמן אל מכל האגירה, וממנו לכל תא בקרת מפלס שמן בנפרד דרך מערכת של סעפת וצינורות. במערכות מסוימות, עם בקרת מפלס שמן חשמלית, הסעפת בעלת ברזים חשמליים הנשלטים על ידי בקר. אלה מזרימים את השמן למדחס ללא צורך בהתקנת מצופי מפלס בכניסה לכל מדחס. פתח היציאה של השמן ממפריד השמן מפוקח ונפתח רק כאשר מפלס השמן שהצטבר במפריד עולה לגובה מסוים. תפקיד המצוף הוא למנוע ריקון מלא של השמן מתחתית המפריד, כדי לא לאפשר לקרר הנמצא מעל מפלס השמן לעבור לאגן השמן של המדחס (אזור היניקה).

4.4.8 סוגי בקרת מפלס השמן במפריד

1. בקרת מצוף מכנית.
2. בקרה חשמלית באמצעות אלקטרודות או רגשים אלקטרוניים. במפריד עם בקרה חשמלית, מותקן בקו החזרת השמן ברז חשמלי המופעל על ידי הבקרה.

אופן פעולתו של תא בקרת מפלס השמן במדחס

- **בקרת מצוף:** השמן נכנס לתא המצוף ומותקן במקביל לאגן השמן. המצוף פועל לפי עיקרון חוק הכלים השלובים. המשמעות היא שגובה פני השמן בתא המצוף זהה למפלס השמן באגן המדחס. עם ירידת מפלס השמן, המצוף נפתח ומזרים את כמות השמן החסרה למדחס (תמונה 4.90).
- **בקרה באמצעות אלקטרודות:** בשיטה זו, המעבר בין תא המצוף לאגן השמן של המדחס נשלט על ידי ברז חשמלי, המקבל אות מהתקן חשמלי לקריאת מפלס השמן באגן השמן של המדחס, או תא המצוף המותקן במקביל לו (תמונה 4.91).

תמונה 4.91 - תא שומר מפלס שמן עם ברז חשמלי

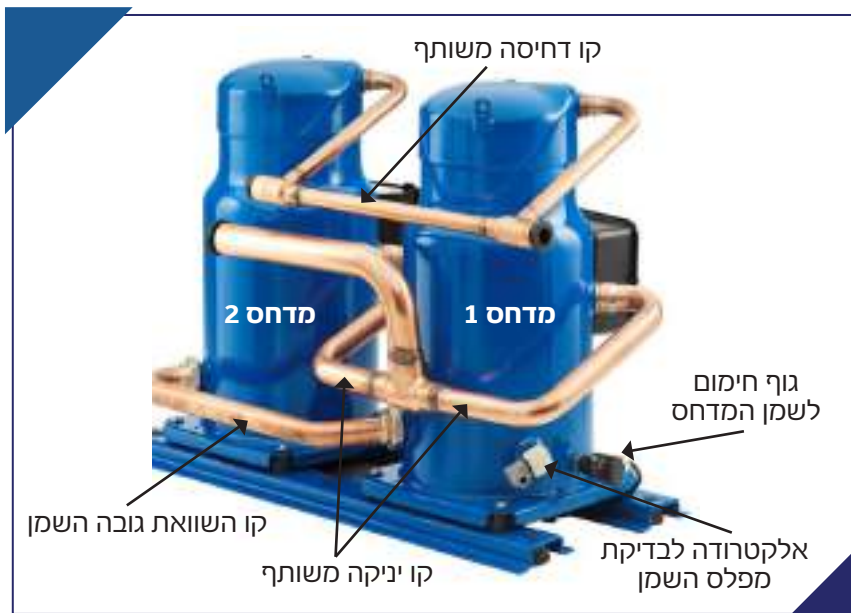


תמונה 4.90 - תא מצוף לשמירת מפלס שמן במדחס



ניתן לחסוך את עלויות מערכת הפרדת השמן והמצופים במערכות Rack, על ידי חיבור תחתיות בתי גל הארכובה בצינור משותף, באזור אגן השמן. הדבר מחייב שימוש במדחסים בעלי הכנה לחיבור צינור משווה (Tube Oil Balancing). סידור זה מאפשר החזרת שמן גם למדחסים הפועלים במערכת רב-דרגתית עם פריקת דרגות (כל מדחס נחשב לדרגת קירור), גם בזמן שרק חלק מהמדחסים פועל ויונק את השמן מקו היניקה.

תמונה 4.92 - השוואת מפלס שמן במדחסים מחוברים במקביל



החזרת שמן למדחסים המותקנים מעל גובה המאייד

בהתקנת מערכות קירור ומיזוג אוויר, נוצרת לעיתים בעיה של החזרת השמן למדחס. זאת כשיחידת העיבוי-מדחס מותקנת גבוה יותר מיחידת המאייד, מהסיבות הבאות:

1. הקרר ביניקה בעל צמיגות נמוכה.
2. הפרשי גובה גדולים.
3. מהירות זרימת קרר נמוכה.

כתוצאה מאי חזרת השמן למדחס יתרחשו התופעות הבאות:

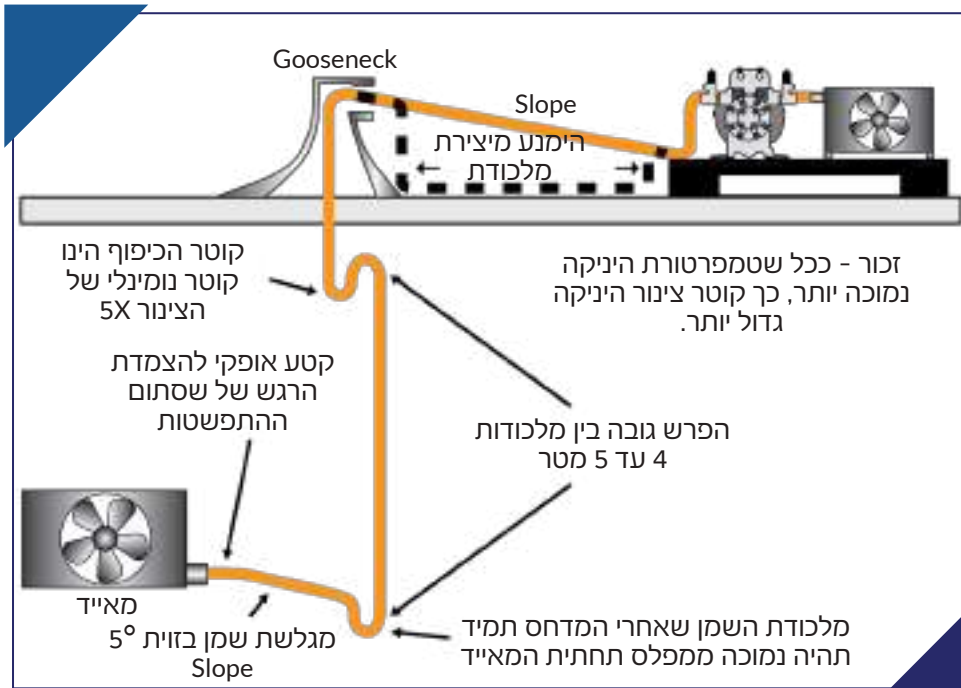
- המדחס לא יקבל את כמות השמן המינימלית הנדרשת לשימון החלקים הנעים ולקירור המדחס. כתוצאה מכך יתחמם ויהרס מכנית.
- צנרת המאייד תתמלא בשמן, שיחסום את המעבר לקרר ויפגע בתפוקת המערכת.

כדי להתגבר על הבעיה ניתן, כאמור, להתקין מפרידי שמן, ואכן כך נעשה תכופות במתקנים גדולים. אך יש דרך נוספת לפתור את הבעיה, במיוחד במתקני מיזוג אוויר וקירור בעלי תפוקות נמוכות, והיא התקנת מלכודת שמן בקו נזל, שיאפשרו את החזרת השמן אל המדחס.

תמונה 4.93 - עיקרון פעולת מלכודת שמן



תמונה 4.94 - כללים להתקנת מלכודת שמן



4.4.9 עיקרון פעולת מלכודת שמן (Oil Trap)

מלכודת השמן תותקן תמיד בקרבת המדחס, ובמפלס הנמוך מחלקו התחתון, כדי לאפשר לשמן לזרום ולמלא אותה בכוח הכובד העצמי של השמן (גרביטציה). גם כשהקרר זורם בצינור במהירות נמוכה. גודל המלכודת יאפשר אצירת שמן בכמות המינימלית שתספיק לחסום את צינור היניקה, במטרה ליצור הפרש לחצים בין שני צידי השמן שבמלכודת. זרימת הקרר בסיוע הכוח שנוצר מהפרשי הלחץ משני צידי החסימה, יספיקו כדי להעלות את השמן לגובה המדחס. הפרש הגובה המומלץ להעלאת שמן בשיטה זו הוא עד חמישה מטר במערכות מיזוג וקירור הפועלות בלחץ יניקה גדול יחסית. בצנרת של מערכות הקפאה עמוקה, בהן קוטר צינור היניקה גדול יחסית ומהירות הזרימה נמוכה, עד כשלושה מטר. במידת הצורך, ניתן להתקין עד שלוש מלכודות אחת אחרי השנייה במרחקים המצוינים לעיל. בחלק העליון של צינור היניקה, לפני כניסתו למלכודת הבאה, או לצינור האופקי המוליך ליניקת המדחס, מומלץ להתקין מלכודת "הפוכה", שתמנע את חזרת השמן לכיוון המאייד כשהמדחס מפסיק לעבוד.

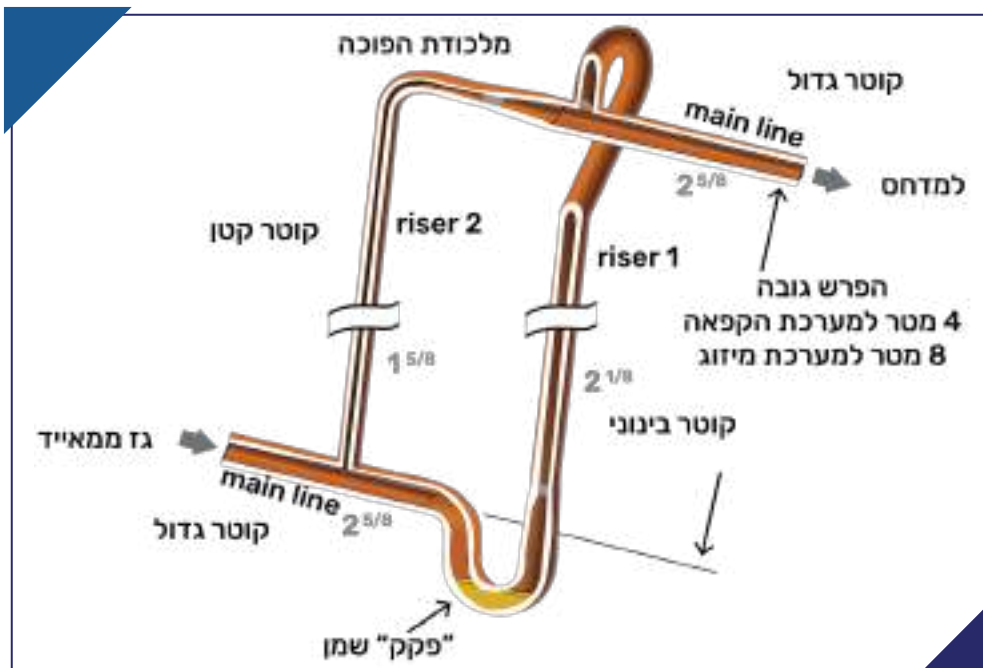
מלכודת שמן במערכות לקירור והקפאה בתפוקות גבוהות

במערכות קירור או הקפאה עמוקה עם צינורות יניקה בקוטר גדול במיוחד, או במערכות הפועלות בתפוקה חלקית, הפרש הלחצים ייבנה לאט מאוד ויגרום לתופעת חוסר קרר ביניקת המדחס. כתוצאה מכך:

- תפוקת המדחס תרד, ותמנע את פעולת המערכת כסדרה.
- הגנות הלחץ הנמוך עלולות להביא לכיבוי המדחס ולהוצאת המערכת מכלל פעולה.

הפתרון לכך הוא התקנת צינור יניקה נוסף, המקביל לצינור היניקה של המערכת (Double Raiser). צינור זה יהיה בקוטר קטן יותר מצינור היניקה הראשי, אך יוכל להעביר מספיק קרר להמשך עבודת המדחס בהספק חלקי. זאת עד שהשמן שימשיך למלא את המלכודת יוחזר למדחס בזכות הפרש הלחצים, שיווצר על פקק השמן שבמלכודת.

תמונה 4.95 - מלכודת שמן במערכת צינורות כפולה (Double Raiser)



4.4.10 הצפת אגן השמן בנוזל קירור (Flood Back)

האפשרות למגע ישיר בין שמן הקירור לקררים במדחס ובצנרת הקירור היא דבר שבשגרה. הדרישה לאפשר מגע ישיר בין החומרים היא תנאי בסיסי שאנו לוקחים בחשבון בעת בחירת השמן למערכת הקירור. למרות זאת, הצפת המדחס בנוזל קירור תגרום לתופעת דילול השמן ("Oil Dilution") הנובעת מהסיכות הבאות:

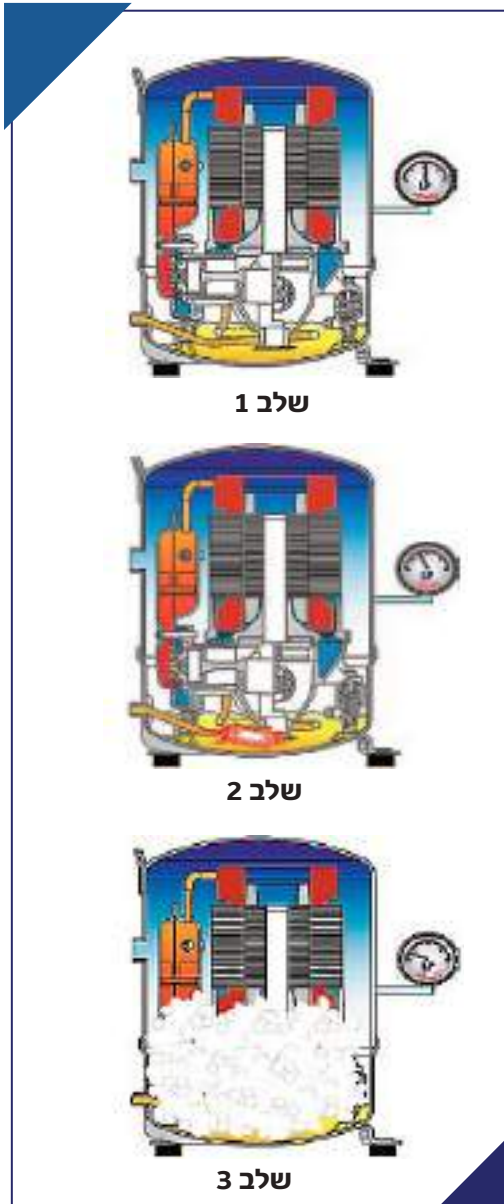
- על פי הגדרת יצרני המדחסים השונים, בעת כיבוי המדחס (בגלל ירידת הדרישה לקירור), כמות הקרר בבית גל הארכובה של המדחס תהיה כ-35% מנפח בית גל הארכובה.
- בעת כיבוי המדחס, הטמפרטורה ולחץ הקרר בחלל בית גל הארכובה (יניקה) יהיו נמוכים.
- אם אין סגירה של מעבר קרר מכיוון המעבה למאיד, קרר בלחץ גבוה יזרים קרר נוזלי לכיוון המדחס, בתהליך השוואת לחצים.
- תוספת הקרר לחלל המדחס, בשילוב הטמפרטורות הנמוכות, יגרמו לחלק גדול מהקרר להתעבות, להפוך לנוזל, ולהתמוסס לתוך השמן במדחס.

כתוצאה מכך, אלה הסכנות שבהצטברות קרר נוזלי בשמן:

לרוב הקררים תכונות של חומרים הממסים שומנים (דגריזרים, Degreaser). הדבר נכון במיוחד לגבי קררים המכילים מרכיבים של פחמן (C) ומימן (H). אלה זהים למרכיביהם של מוצרי נפט ובנזין המשמשים גם כחומרי ניקוי והמסת שומנים. הרכב חומרים זה נמצא בקררים מסוג CFC, HCFC, HFC וכיום, גם בקררים הטבעיים מסוג HC הנכנסים לשימוש מתוקף יישום התקנות להגנת הסביבה. מכאן יכולות להתרחש התופעות הבאות:

- קרר הנמהל בשמן משנה את צמיגות השמן, הופך אותו לדליל יותר ונטול תכונות שימון.
- קרר המוזרם בצינורות השימון ומגיע למסבים ולבוכנות, שוטף מהם את השמן שנצמד אליהם. כך הוא מבטל את תכונות השימון וגורם לבלאי מואץ של החלקים הנעים של המדחס.
- רתיחה (שינוי מצב צבירה מנוזל לגז) מהירה של קרר נוזלי, שהציף את המדחס ונמהל בשמן בעת ירידת הלחץ בבית גל הארכובה (בעיקר בזמן התנעת המדחס אחרי הדממת המערכת), תגרום להקצפת השמן. משמעות הדבר היא כניסה של בועות קרר ליניקת משאבת השמן והעברת הקרר למסבים ולשאר הרכיבים הדורשים שימון. תופעה זו מובילה להרס המדחס.

תמונה 4.96 - שלבים בהקצפת השמן במדחס



תמונה 4.98 - גוף חימום פנימי



שלבים בהקצפת שמן במדחס

1. כאשר המדחס אינו פועל, הלחץ בבית גל הארכובה גבוה. בגלל הלחץ הגבוה, הקרר שנמצא בחלל בית גל הארכובה הופך לנוזל, ונספג בשמן שבבית גל הארכובה.
2. עם התנתעת המדחס, הלחץ בבית גל הארכובה יורד במהירות, והקרר הנוזלי המעורבב בשמן שואף לעבור למצב גז בגלל ירידת הלחץ.
3. הקרר משתחרר מהשמן בצורת בועות ומקציף את השמן. השמן המכיל בועות קרר במצב גז, נשאב על ידי המשאבה ומועבר לחלקים הנעים של המדחס.

פתרונות למניעת תופעת הקצפת השמן במדחס

- כיבוי המערכת בשיטת "שאיבת יתר" (Pump Down).
- חימום השמן בזמן כיבוי המדחס באמצעות גופי חימום חשמליים. גופי החימום ייכנסו אוטומטית לעבודה עם יציאת המדחס מפעולה, ויפסיקו את עבודתם עם חזרתו של המדחס לפעולה. במדחסים פתוחים או פתוחים למחצה, גוף החימום יכול להיות פנימי. הוא מותקן בתוך שרוול באגן השמן של המדחס, בעל הספק של 70 - 250 וואט (תמונה 4.97, תמונה 4.98).
- במדחסים סגורים (הרמטיים) שאינם מצוידים בהתקן פנימי לגוף חימום, מותקן לעיתים גוף חימום בעל הספק של כ-700 וואט בצורת טבעת חימום, המולבשת מסביב לחלק התחתון של קופסת המדחס.

תמונה 4.97 - מדחס הרמטי עם גוף חימום "פנימי"



4.5 תקלות במדחסי קירור - סיבות ומניעה

התקלות מתחלקות לשני סוגים עיקריים:

4.5.1 תקלות חשמל

תקלות אלה יגרמו בסופו של דבר לקצר ושריפה של סליל מסלילי המדחס, או לזליגה בין סלילי המנוע לגוף המדחס. הסיבות העיקריות לתקלות חשמליות הן:

1. ליקויים באספקת החשמל למדחסים: בעיות ברשת החשמל או בחיבורי המדחס יגרמו למתח נמוך, לעליית הזרם ולהתחממות הסלילים.
2. חוסר פאזה במנועים תלת-פאזיים.
3. חיבור שגוי של מוליכי החשמל למדחס.
4. ציוד מיתוג (ממסרים, הגנות) לא תקין.
5. זרמי התנעה גדולים מדי, שעלולים להיגרם בעקבות לחצי דחיסה גבוהים מדי. סיבות אפשריות ללחצי דחיסה גבוהים:

א. אי-ביצוע השוואת לחצים בין אזור הלחץ הגבוה לנמוך לפני ההתנעה (על ידי השהייה או באמצעות שסתום).

ב. לחצים גבוהים מהרגיל במעבה בגלל מעבה לא תקין (מעבר חום לקוי, טמפרטורת סביבה גבוהה במעבים מקוררי אוויר, או חוסר מים ומגדל קירור לא תקין במעבים מקוררים במים).

6. קצר גוף, מצב בו נגרמת פגיעה בציפוי הלכה המבודד את ליפופי הסטטור של המדחס. תופעה זו נגרמת בדרך כלל כתוצאה מהתחממות יתר של הסלילים. בשל היות הקרר בעל תכונת מוליכות חשמלית, זרם חשמלי העובר בסלילי המדחס זולג לכיוון גוף המדחס העשוי מתכת (ומחובר להארקת מערכת החשמל). כתוצאה מכך, מפסק ההגנה מפני "זרם דלף" (התקן נגד התחשמלות) ינתק את אספקת החשמל למדחס. ניתן לזהות "קצר גוף" באמצעות מד התנגדות או מד בידוד מסוג "מגר".

4.5.2 תקלות הגורמות נזק מכני למדחס

כניסת קרר במצב צבירה נוזלי למדחס בעת פעולתו: כעיקרון, המדחס אינו מתוכנן לינוק נוזל. הנוזל אינו דחיס בלחצים המקובלים במערכות קירור ומיזוג, ויש לו כוח הרס רב. כניסת כמות קטנה של נוזל למדחס בזמן פעולת המערכת זניחה, אם היא נמשכת מעט פעמים ולפרקי זמן קצרים, ונובעת בדרך כלל משינויי עומס חום על המערכת בזמן פעולה. הימשכות התופעה לאורך זמן תגרום לנזק מכני מצטבר למדחס, עקב שטיפת השמן המצפה את הצילינדר וטבעות הבוכנה. במקביל, הצפת המדחס בקרר נוזלי תגרום ליצירת לחץ גבוה בחלל הצילינדר והורדת תפוקת המדחס והמערכת. כניסת כמויות גדולות יותר של קרר נוזלי למדחס (ידועה בספרות המקצועית בשם Liquid Slugging). תביא כמובן לפגיעה מידית בשסתומי המדחס, הבוכנות, הטלטלים וגל הארכובה.

ניתן לזהות תופעה זו על פי שכבת הקרח הנוצרת על קו היניקה והמדחס באזור היניקה, המצביעה על הטמפרטורה הנמוכה בשל הלחץ הנמוך.

תמונה 4.99 - הקרחת מדחס וקו יניקה בשל חזרת קרר נוזלי למדחס



הסיבות השכיחות לתופעת ההצפה (Sludge) הן ירידה ביכולתו של המאייד לאייד את כל הקרר הנוזלי הנכנס אליו, בשל הגורמים הבאים:

- מאייד חסום בקרח (מערכת הפשרה לא תקינה, חדירת אוויר לחדר הקירור/ההקפאה, מסנני אוויר מלאי אבק).
- בקרת טמפרטורה לא תקינה (תרמוסטט לא תקין, כיוון לטמפרטורה נמוכה מהמתוכנן).
- שסתום התפשטות פתוח יתר על המידה (Over Feeding) בגלל דיזה גדולה מדי, או בגלל רגש שאינו ממוקם נכון (צינור שאינו אופקי או שאורך הקטע האופקי קצר מדי), או אינו מבודד מהסביבה (חום השיחון המקובל במערכות מיזוג אוויר 5°C-10°C).
- אי-ביצוע כיבוי המערכת בשיטה המרוקנת את המאייד מקרר לפני כל כיבוי (Pump-Down).
- במצב Pump-Down, נזילה מהברז החשמלי בקו הנוזל לפני המאייד.
- במערכות לקירור מים (צ'ילרים): חוסר מים, משאבות לא תקינות ובקרת עומסי חום לא תקינה.

מכיוון שתקלות אלה נגרמות בדרך כלל כתוצאה מרמת תחזוקה לקויה, מתכנן לא נכון, או מבניית המערכת שלא בהתאם לתכנון המקורי, הפתרונות לתקלות אלה פשוטים וניתנים ליישום בקלות, לדוגמה:

- בניית המערכת על פי התכנון המקורי.
- בדיקה ותחזוקה של המאייד ומערכתיו באופן שוטף.
- התקנת מפריד טיפות נוזל (Accumulator) ביניקת המדחס.

הערה

תופעת הצפת המדחס בנוזל קירור נפוצה יותר במערכות בעלות התקן הצרה (שבירת לחץ), מסוג צינור קפילרי או דיזה קבועה. זאת מכיוון שאביזרים אלה אינם מסוגלים לווסת את כמות הקרר שמועברת למאייד. לעומת זאת, שימוש באביזרי הצרה מסוג שסתומי התפשטות תרמיים, או חשמליים, מצמצם מאוד את התופעה, בהנחה שנבחרו השסתומים הנכונים.

4.5.3 הצפת המדחס בנוזל בעת כיבוי המערכת (Oil Dilution)

כפי שהוזכר קודם, הנזק החמור ביותר למדחס הוא התעבות גדולה של שמן בחלל בית גל הארכובה והתמוססותו בקרר.

4.5.4 התחממות המדחס

התחממות המדחס בעת פעולתו עלולה להיגרם בגלל הסיבות הבאות:

- **חוסר קרר:** הקרר הקר שחוזר למדחס (בדרך כלל דרך אזור המנוע ובית גל הארכובה) מסייע בקירור ליפופי המנוע, יחידת הדחיסה, והשמן הנמצא באגן השמן של המדחס. חוסר בקרר יגרום לעלייה משמעותית ברמת השיחון וליניקת גז שאינו קר כלל. ניתן לבצע בדיקה תקופתית של גובה השמן באמצעות עינית הביקורת המותקנת בדופן בית גל הארכובה. העינית מראה את מפלס השמן (מינימום/מקסימום). בכל מדחס יש עינית ביקורת, שעליה ציוני המפלסים לפי הנחיות יצרן המדחס.
- **טמפרטורת עיבוי גבוהה מהרגיל:** גורמת למדחס לעבוד ביחס דחיסה גבוה ולעלייה בצריכת הזרם. דבר שיוצר עומס על המנוע החשמלי והתחממות יתר.

תקלות כתוצאה מטמפרטורות עיבוי גבוהות יכולות להיגרם מהסיבות הבאות:

- **במעבה מקורר באוויר:** מפוחים לא תקינים, סוללת עיבוי סתומה בכלוך, סוללה מזוהמת בציפויים מונעי מעבר חום, חסימת מעבר אוויר על פני סוללת המעבה ועומסי חום מטמפרטורות חוץ חריגות.
- **במעבה מקורר במים:** חוסר מים בצנרת, מגדל קירור לא תקין, טמפרטורות חוץ ולחות קיצוניות, משאבות לא תקינות. ככלל, טמפרטורת עיבוי מקסימלית מומלצת היא כ- 45°C .
- חוסר שימון של המדחס יגרום לחיכוך יתר של החלקים הנעים (בוכנות, מסבים) ולעליית הטמפרטורות. ככלל, יצרני המדחסים ממליצים שלא לחרוג מטמפרטורות דחיסה מעל ל- 120°C . כדי להימנע מעבודה בטמפרטורות גבוהות, מתקינים רגשי טמפרטורה בקו הדחיסה, קרוב ככל האפשר ליציאה מהמדחס. במערכות המתוכננות מראש לעבודה בהפרש לחצים (יחס דחיסה) גבוה, כמו מערכות הקפאה עמוקה, נעזרים באמצעי עזר. דוגמה לאמצעי עזר תהיה מפוחי אוויר למדחסי בוכנה, או מחליפי חום חיצוניים בין קו הדחיסה החם לקו היניקה. זאת כדי להקטין את טמפרטורות הדחיסה ולהקנות חום שיחון יעיל בקו היניקה.

4.5.5 הצטברות חומצה (Acid Formation)

השמן במדחס פועל בתנאים של חום ולחץ גבוהים, ונוטה להתחמצן בנסיבות הבאות:

- **מים:** נוכחות לחות או מים בשמן הקירור.
- **ערבוב שמנים מסוגים שונים:** אין לערבב שמנים מינרליים ושמנים סינטטיים. היוצא מהכלל הוא שמן סינטטי מסוג (Polyalkylene Glycol) p.a.g, שיכול לפעול בנוכחות מינורית של עד 5% שמן מינרלי מבלי להתחמצן.
- **מגע עם מתכות וחומרים אחרים:** השמן שייבחר על ידי יצרן המדחסים יהיה כזה שמגע שלו עם המתכות, הצנרת והאביזרים הנמצאים במדחס או במערכת, לא ישנה את תכונותיו ולא יגרום לו להפוך לחומצי.
- עבודה בטמפרטורות גבוהות מעבר למומלץ על ידי יצרן השמן.

בעיות שעלולות להיווצר עקב התחמצנות השמן במדחס ובמערכת הקירור




- שמן מחומצן וחום גבוה ייגרמו להתהוות שכבת קורוזיה על המתכת בין החלקים הנעים (מסבים, צילינדרים). כמו כן להגדלת החיכוך ולבלאי מואץ.
- ההתחמצנות גורמת לשמן להתגבש. גושים אלה יכולים לסתום את מעברי השמן במדחס, את שסתום ההתפשטות או הצינור הקפילרי. גם את פתח החזרת השמן הנמצא במפריד טיפות הנוזל שביניקת המדחס.
- במדחסים הרמטיים וסמי-הרמטיים החומצה תפגע בבידוד של סלילי המדחס ותגרום לקצר בין הסלילים או לקצר בין הסלילים לגוף המדחס.

כדי להימנע מיצירת שמן חומצי במדחס, יש לדגום תקופתית את השמן ולבדוק את נוכחות הרטיבות בשמן באמצעות "עין מראה" (Sight Glass) המותקנת בקו הנוזל אחרי המייבש. אם השמן חומצי, או שיש בו כמות גדולה של רטיבות, יש לרוקן את הקרר ואת השמן, לשטוף את המדחס והצנרת, להחליף את גוף הייבוש ולמלא שמן וקררים חדשים. ניתן להוסיף לשמן חומר מונע חמצון כדי להתגבר על שאריות החומצה שייטכן שנשארו במערכת.

4.6 זיהוי מדחסים

לכל יצרן מדחסים יש שיטה משלו לסמן את המדחסים שהוא מייצר. הסימון יעשה באמצעות קוד שיופיע בקטלוגים של היצרן, והזיהוי בשטח יעשה לפי תווית שתוצמד לפני המדחס.

תמונה 4.100 - תווית זיהוי למדחס

		Typ 2DES-3Y-40S S.Nr. 1698116104		דגם המדחס מספר סידורי	
BITZER KÜHLMASCHINENBAU GMBH Made in Germany					
מתח עבודה ואופן החיבור	תדירות	זרם עבודה	זרם מנוע תפוס LRA	ספיקה נפחית	סל"ד המדחס
V Δ 3Ph~ VY 3Ph~	Hz	A (Δ) A (Y)	A (Δ) A (Y)	m ³ /h	min ⁻¹
220-240 380-420	50	15,0 8,6	64,0 37,0	13,4	1450
265-290 440-480	60	15,0 8,6	64,0 37,0	16,1	1750
IP 66	ND/HD max	19 / 32 bar			
אטימות	לחץ בדיקה גבוה/נמוך				

בחירת המדחסים על פי קטלוגים של יצרני המדחסים נעשית לפי הקריטריונים הבאים:

- סוג המדחס (בוכנתי, סיבובי).
- מבנה המדחס (הרמטי, סמי-הרמטי, פתוח).
- סוג הקרר או הקררים שאיתם המדחס מתוכנן לפעול.
- טווח לחצים ביניקה (לחץ גבוה למיזוג אוויר וקירור מוצרים נוזליים, לחץ בינוני למתקנים וחדרי קירור והקפאה, ולחץ יניקה נמוך למתקני הקפאה עמוקה).
- טמפרטורות עיבוי מתוכננות.

- הספק נומינלי (תיאורטי) של המדחס.
- סוג המנוע חשמלי (חד-פאזי, תלת-פאזי).

4.7 מנועים חשמליים למדחסי קירור ומיזוג אוויר

4.7.1 עקרונות פעולת המנוע החשמלי

מנועים השראתיים (אינדוקטיביים) מנצלים את השטף המגנטי המתפתח בסלילים חשמליים קבועים (סטטור) ליצירת כוחות אלקטרומגנטיים. תנועתם בין הסלילים מנוצלת להנעת ציר הרוטור הממוקם ביניהם. כאשר מחברים לציר הרוטור גוף המסוגל לנוע גם הוא בתנועה סיבובית (גל ארכובה, רוטור בורגי או צנטריפוגלי), הוא יעביר אליו את התנועה הסיבובית ויניע אותו.

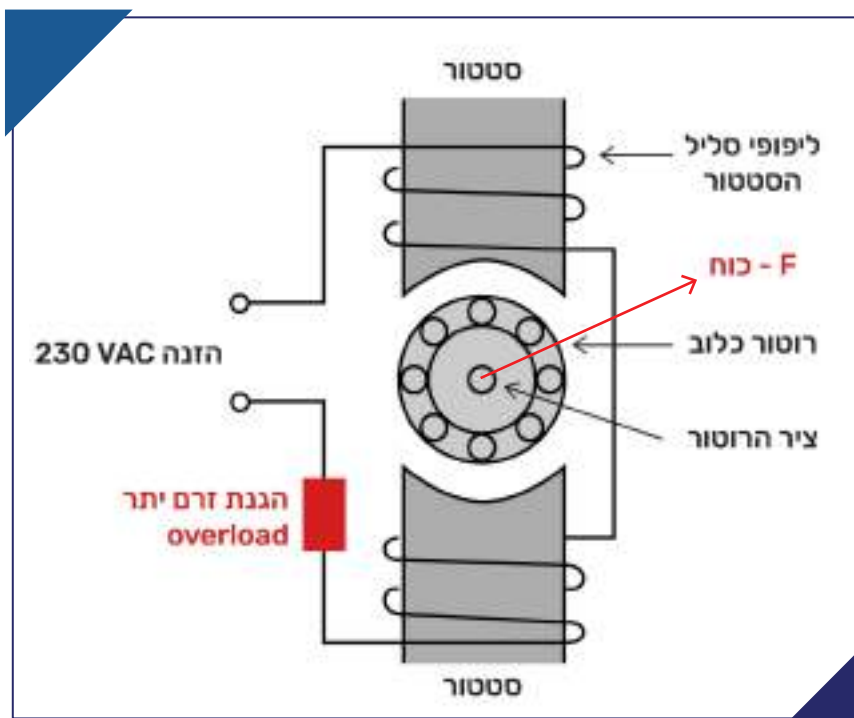
4.7.2 מנוע חד-פאזי

מנוע זה בעל הספק קטן יחסית, ומסוגל לפתח כוח (מומנט) קטן. לכן משתמשים בו להנעת צרכנים שהמומנט הנדרש כדי להוציא אותם ממצב עמידה (מצב סטטי) קטן. לדוגמה, מנועי מאווררים ומפוחים, מנועים לטיימרים אלקטרו-מכניים.

עיקרון פעולת המנוע החד-פאזי

במנוע זה הסליל מלוכף על ליבת ברזל בעלת קוטב (Pole) אחד. השטף המתפתח בסליל יוצר כוח (F) אחד על הרוטור ומסובב אותו.

תמונה 4.101 - מבנה ופעולה של מנוע חד-פאזי חד-קוטבי



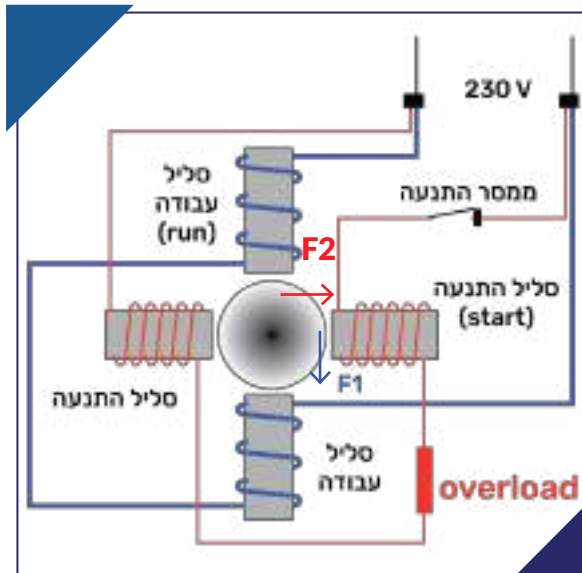
טבלה 4.3 - יתרונות וחסרונות מנוע חד-פאזי

יתרונות	זול וקל לייצור.
חסרונות	מוגבל לצרכנים שאינם דורשים כוח גדול לצורך הנעה ראשונית, כמו מדחסים, מפוחים גדולים ועוד.

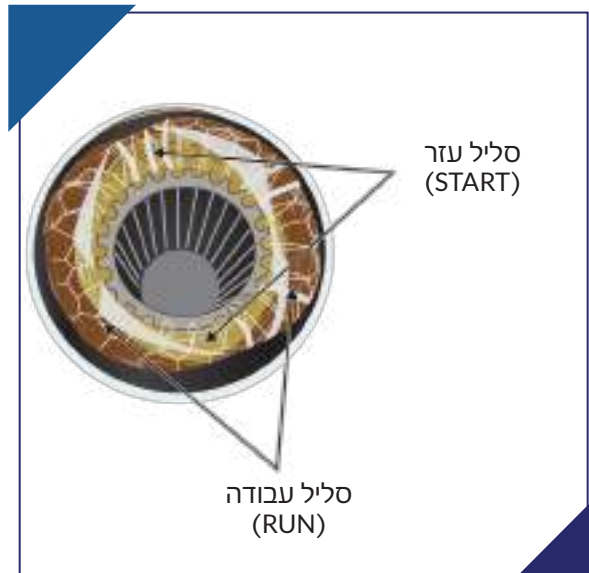
4.7.3 מנוע חד-פאזי בעל פאזה מפוצלת (Split Phase Motor)

הכוח הבודד שמייצר מנוע חד-פאזי בעל קוטב אחד אינו מספיק כדי להניע ולסובב כל מנוע. כדי להתגבר על הבעיה, רצוי להשתמש במנועים המייצרים כמה כוחות, כמו מנועים תלת-פאזיים. מכיוון שלא כל צרכן מצויד בחיבור רשת תלת-פאזי, פותחו מנועים הפועלים על מקור מתח חד-פאזי. במנועים אלה, הזרם הנכנס למנוע מחולק לשני סלילים מקביליים בעלי ערך התנגדות שונה, גורם לשינוי המופע ומאפשר קבלת שני כוחות הפועלים על הרוטור בשני כיוונים שונים.

תמונה 4.103 - סלילי המדחס



תמונה 4.102 - מנוע עם פאזה מפוצלת



כאמור (ראו 4.7.3), לצורך הסטת הכוח משתמשים בשני סלילים:

1. "סליל העבודה" (Run Winding) עשוי ממוליך בעל אורך קצר ועובי גדול, ולפיכך בעל התנגדות נמוכה, היוצרת מפל מתח וחום נמוכים. מכאן שאין מניעה להשתמש בסליל זה לכל משך פעולת המנוע, ללא חשש לנזק לסליל. לכן קרוי סליל העבודה.
2. "סליל ההתנעה" (Start Winding) עשוי ממוליך בעל אורך רב ועובי קטן, ולפיכך בעל התנגדות גבוהה לזרם העובר דרכו. הוא מתחמם מאוד במהלך פעולתו. לכן אנו משתמשים בו בעומס מלא רק בהנעת המנוע, כאשר המומנט הנגדי הפועל נגד כוח המנוע גדול. מנתקים אותו עם הגעת מהירות המנוע לכ-75% ממהירותו הסופית. לכן סליל זה קרוי סליל התנעה. יש מנועים גדולים בהם נדרש המשך השימוש בסליל זה כל זמן פעולת המנוע, כמו מנועי מדחסים, מנועי מפוחים ביחידות מיזוג אוויר ועוד. כדי למנוע התחממות של הסליל בעבודה ממושכת אנו מתקינים קבל שנקרא קבל עבודה (Run Capacitor). הקבל יפיל על הסליל חלק מהמתח והחום, ויאפשר לו להמשיך לפעול ללא נזק. במקרים כאלה סליל זה יכונה "סליל עזר" (Winding Utility).

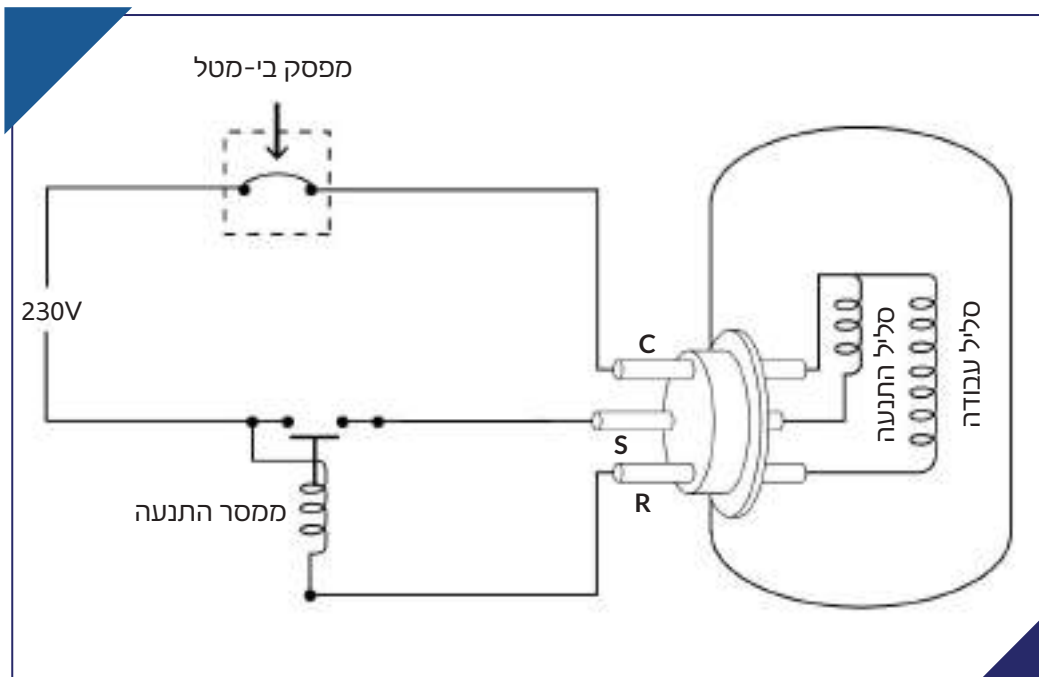
התנעת מנועים עם סליל עבודה בלבד

בשיטה זו אפשר להשתמש רק במנועים המניעים צרכנים קטנים בעלי מומנט התנעה ועבודה קטנים מאוד, כמו מפוחים, מאיידים ומעבים במתקנים קטנים. שיטה זו אינה מתאימה להנעת מדחסים שהעומס על הציר שלהם גבוה יותר.

התנעת מדחסים בשיטת RSIR (Resistance Start Induction Run)

שיטה זו מתאימה להתנעת מנועים בעלי מומנט התנעה ומומנט עבודה נמוכים, כמו מדחסי מקררים ביתיים ומקררים מסחריים (עד להספק 1/3 כ"ס - שווה ערך לכ-250 וואט).

תמונה 4.104 - התנעת מדחס בשיטת R.S.I.R עם ממסר התנעה



עיקרון פעולה

1. עם הקמת הדרישה להפעלת המדחס, המדחס מחובר למתח חד-פאזי של 230 וולט (במערכת זרם חילופין אין חשיבות לקוטביות החיבורים).
2. במצב זה הזרם המגיע לחיבור המשותף (C-Common) מתפצל לשני ענפים (הסלילים) ובונה כוח אלקטרו מניע שעוצמתו משתנה בכל ענף, בהתאם להתנגדות הכוללת (התנגדות הסליל + התנגדות השראית) של סלילי מנוע המדחס. עוצמה שמפעילה את ממסר ההתנעה ומחברת ומפעילה את סליל ההתנעה.
3. המנוע יוצא ממצב נעילה ומתחיל להגביר מהירות תוך שהוא צורך זרמי התנעה גבוהים. כשהמנוע מגיע לכ-75% מהמהירות הסופית (נומינלית) שאותה הגדיר יצרן המנועים/המדחסים, המומנט וזרם ההתנעה קטנים. עקב כך סליל ההתנעה מתנתק בעזרת ממסר זרם, ומשאיר את המנוע והמדחס לעבוד באמצעות סליל העבודה בלבד.
4. המנוע ימשיך בעבודתו באמצעות סליל אחד עד לכיבוי המדחס, או עד לעליית זרם העבודה. עלייה זו עלולה להיווצר בגלל בעיה מכנית או חשמלית, שייגרמו לאביזר ההגנה מזרם יתר (Overload) לנתק את המדחס כדי למנוע נזק למנוע.

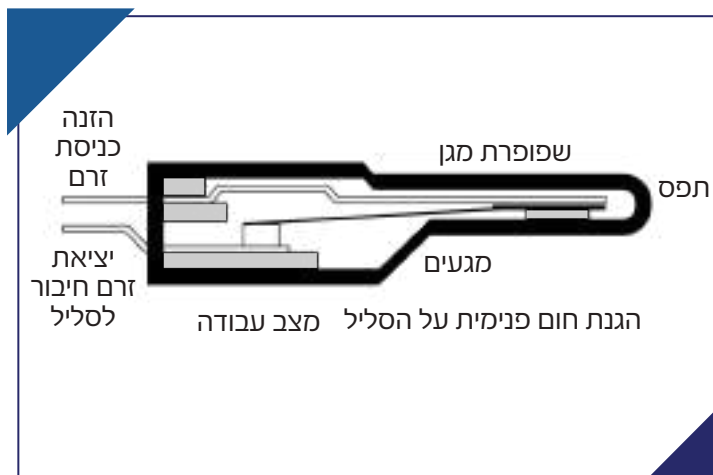
4.7.4 אביזרים נוספים המשתתפים בתהליך העבודה וההתנעה של מנועים חשמליים

מפסק הגנה נגד זרם יתר (Overload) מהסוגים הבאים:

4.7.4.1 הגנה נגד זרם יתר מסוג דו-מתכת (Bi-Metal)

מנגנון זה מותקן על הזנת המדחס וידוע גם בשם הגנרי "קליקסון", על שם המפעל האמריקאי המייצר אותו. המפסק בנוי מגוף חימום קטן המחובר אליו בטור ומגע מסוג דו-מתכת ("בי-מטל") המתעקם כלפי מעלה בטמפרטורה גבוהה. במדחסים קטנים ההגנה מותקנת מחוץ לקופסת המדחס ("אוברלוד" חיצוני) ואילו במדחסים ובמנועי מפוחים, ההגנה ממוקמת בתוך סלילי המדחס (הגנה פנימית), או בצמוד אליו. ההגנה מושפעת מחום סלילי המנוע.

תמונה 4.106 - מגן עומס יתר תרמי דו-מתכת להתקנה פנימית על סלילי המנוע



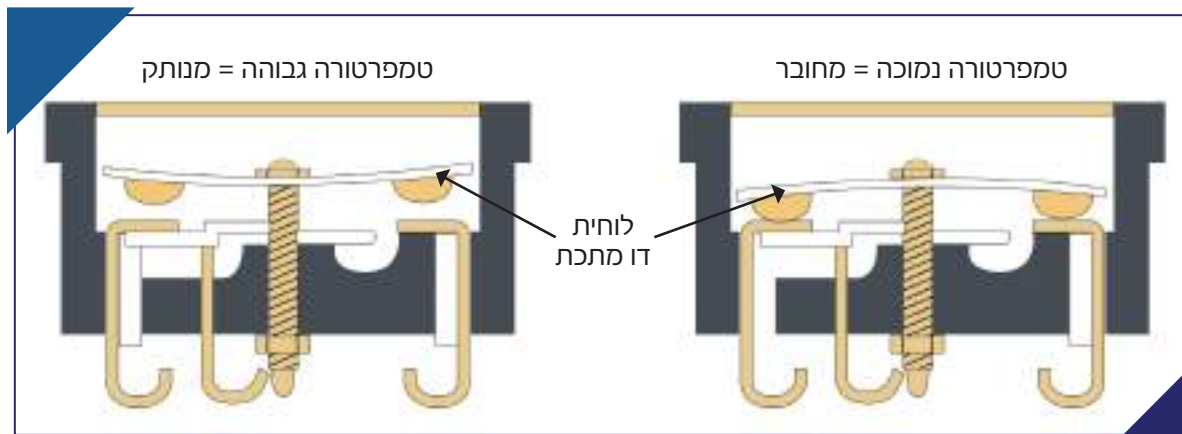
תמונה 4.105 - מגן עומס יתר תרמי במדחס



עיקרון הפעולה של מפסק בי-מטל Bi-Metal

1. מפסק בי-מטל עשוי מלוחית מתכת דקה, המורכבת משתי מתכות בעלות מקדם התארכות שונה. אחת מנחושת שמקדם ההתפשטות שלה גדול (10×17^{-6}), והשנייה מפלדה, ומקדם ההתפשטות שלה קטן יותר (10×11^{-6}).
2. שתי המתכות מוצמדות ומודבקות ביחד. כל זמן שדיסקית הבי-מטל נמצאת בטמפרטורת החדר, היא תהיה ישרה ותקצר בין שני המגעים. אולם עם התחממות הלוחית היא תתעוות כלפי מעלה, משום שהנחושת מתארכת יותר מהפלדה הצמודה אליה, ולכן תנתק את המגעים.
3. כך זרם חשמלי יכול לעבור דרכם לחיבור המשותף של מנוע המדחס (C). כל עוד הזרם העובר במקביל דרך גוף החימום קטן, החום שנוצר אינו מספיק כדי לחמם את דיסקית הבי-מטל, והיא תישאר ישרה.
4. עם עליית הזרם, החום שנוצר יחמם את דיסקית הבי-מטל, והיא תתעקם סביב הציר כלפי מעלה, תוך שהיא מתנתקת מהמגעים ומנתקת את הזרם למנוע המדחס.
5. עם ניתוק הזרם החשמלי והפסקת פעולת המדחס, יחידת הבי-מטל תתקרר וכעבור זמן קצר תחזור למצבה הראשוני (לאוברלוד המותקן בתוך גוף המדחס, ייקח זמן רב יותר להתקרר מאשר אוברלוד חיצוני).

תמונה 4.107 - מפסק זרם יתר, מצבי עבודה



4.7.4.2 הגנת זרם-יתר באמצעות אביזר PTC (Positive Temperature Coefficient Sensor)
 PTC הוא תרמיסטור (נגד בעל ערך משתנה כתלות בטמפרטורה), העשוי מחומר קרמי רגיש לחום.

משני צדדיו מוצמדות שתי לוחיות נחושת שאליהן מחוברים מוליכים. בטמפרטורת החדר, החומר הקרמי בעל התנגדות נמוכה מאוד, ופועל כמוליך המאפשר לזרם לעבור דרכו ללא הפרעה. עליית הטמפרטורה תגדיל את התנגדות החומר לערכים מאוד גבוהים, עד שיהפוך לנתק.

ניתן להשתמש ב-PTC בהתאם לגודלו (משקלית) ולטמפרטורה שבה יהפוך לנתק, לדברים הבאים:

- 1. הגנה תרמית לסלילי המנוע:** התרמיסטור מוצמד לסלילי המנוע (אחד לכל פאזה). התחממות הסלילים בגלל עבודה מאומצת, חוסר קירור לסלילי המנוע, או עבודה תחת זרם גבוה, תגרום להתחממות הנגד שיהפוך לנתק וינתק את הזרם לסליל. טמפרטורות הניתוק נקבעות על ידי היצרן ויכולות לנוע בטווח שבין 100°C ל- 140°C .
- 2. הגנה נגד זרם-יתר:** עליית ערך הזרם העובר דרך הנגד תגרום לעליית התנגדותו, עד לניתוקו.
- 3. ממסר לניתוק סליל ההתנעה בחיבור RSIR, או לצורך מעקף קבל העבודה בחיבור PSC, או לצורך ניתוק קבל ההתנעה בחיבור CSCR.**

4.7.4.3 בהתנעת מדחסים נהוג להשתמש בממסרי התנעה מהסוגים הבאים:

- 1. ממסר מופעל סליל בזרם-יתר:** ממסר זה מנצל את הזרם הגדול המתפתח על סליל העבודה בניסיון להניע את המנוע כשסליל העזר מנותק.

עיקרון פעולת הממסר

1. התרמוסטט מזהה טמפרטורה גבוהה במקרר (דרישת קירור) ומעביר מתח לסליל העבודה (Run) בלבד.
2. הזרם הגבוה, המתפתח על סליל העבודה בניסיון להניע את המדחס, עובר גם בסליל הממסר המחובר בטור לסליל המדחס.
3. מצב זה יוצר בסליל הממסר כוח אלקטרומגנטי חזק, הפועל על דיסקית המתכת ומצמיד אותה למגעי הממסר.

- חיבור המגעים בממסר מחבר את המתח גם לסליל ההתנעה (Start), שנכנס לעבודה ומסייע להנעת המדחס.
- עם ההנעה, עולה מהירות הסיבוב של המנוע החשמלי והזרם העובר בסלילי המדחס נחלש.
- היחלשות הזרם מקטינה את הכוח המגנטי בסליל הממסר, וגורמת לנפילת הדיסקית ולניתוק סליל ההתנעה.
- המדחס ממשיך לעבוד באמצעות סליל העבודה בלבד.

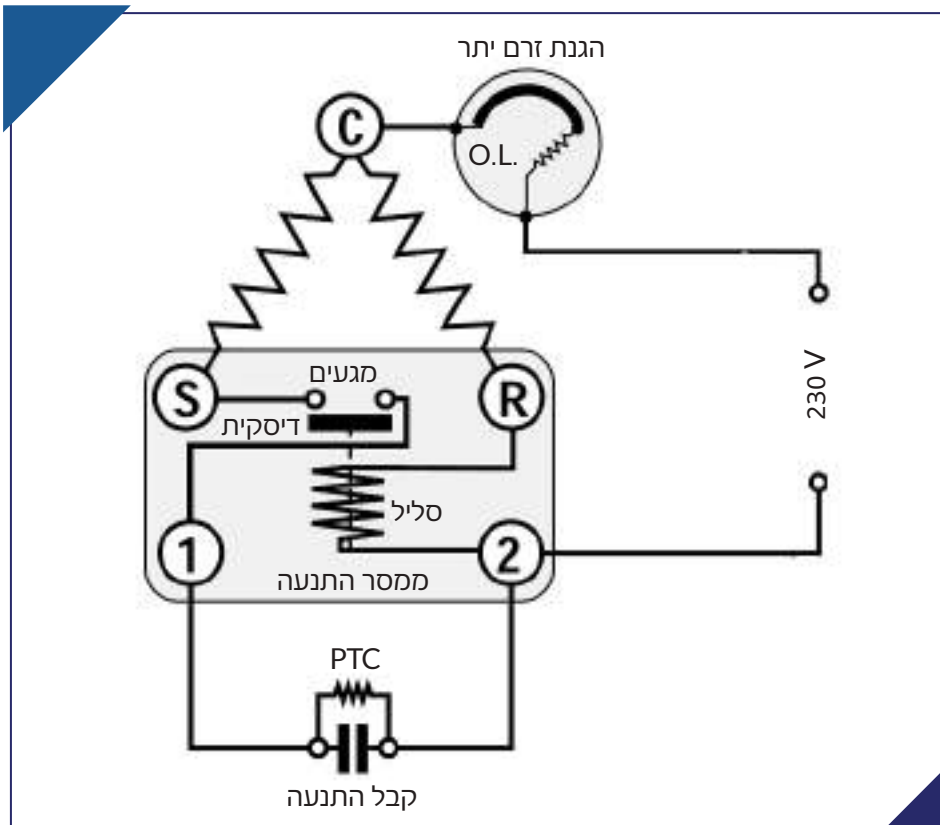
תמונה 4.109 - ממסר התנעה משולב בהגנת זרם יתר



תמונה 4.108 - ממסר סליל זרם יתר



תמונה 4.110 - עיקרון פעולת ממסר זרם יתר להתנעת מדחסים



2. ממסר התנעה PTC

- עיקרון עבודת ממסר זה זהה להתנעה בעזרת ממסר זרם.
- ההבדל הוא שבסיום תהליך ההתנעה, ממסר ההתנעה משתמש בנגד משתנה מסוג PTC לניתוק סליל ההתנעה.
- יתרון ממסר זה הוא בתאימותו למספר גדול של מנועי מדחסים ללא קשר להתנגדות סלילי המדחסים.
- בשיטה זו, רכיב ה-PTC משמש כמונה זמן ("טיימר").
- בחלוף הזמן שנקבע על ידי יצרן המדחס, הוא מתנתק ומונע את מעבר הזרם דרכו למנוע המדחס.

תמונה 4.112 - התקן SPP - קבל התנעה משולב בממסר התנעה



תמונה 4.111 - ממסר התנעה מסוג PTC משולב עם הגנת זרם יתר



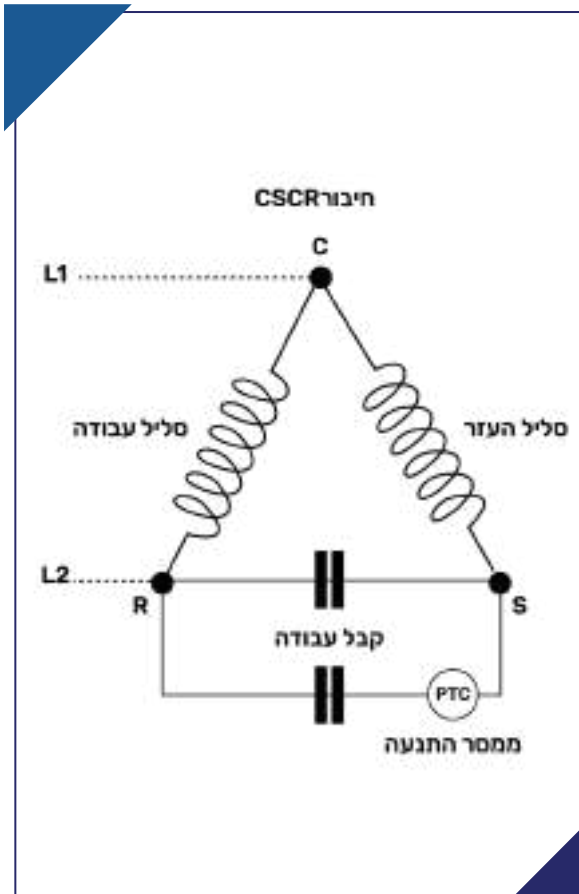
4.7.4.4 חיבור מדחס והתנעה עם ממסר התנעה וקבל התנעה בשיטת CSIR (capacity start-induction run) (ראה תמונה 4.113)

שיטה זו מתאימה למדחסי מקררים מסחריים או למקפיאים, הנדרשים למומנט התנעה גדול מהרגיל. מומנט זה נובע מתדירות התנעות גדולה בשל פתיחת דלתות בתכיפות גבוהה, או מהתנעה ביחסי דחיסה גדולים (במקפיאים).

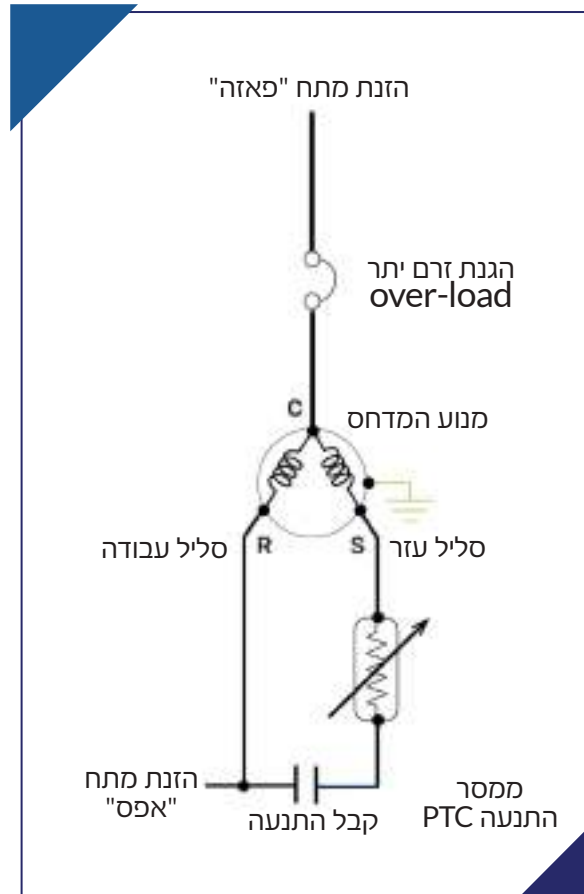
עיקרון פעולה

- בשיטה זו, אנו מחברים בטור לסליל העזר קבל בקיבוליות גדולה (מעל 90 מיקרו-פאראד), המספק מומנט התנעה משופר.
- כאמור, מכיוון שיש לוודא זמן פעולה קצר לסליל ההתנעה, עם הגעת מהירות המנוע לערך הרצוי, ממסר ההתנעה ינתק את הסליל והקבל המורכב בטור.

תמונה 4.114 - התנעת CSCR



תמונה 4.113 - התנעת CSIR



4.7.4.5 חיבור מדחסים והתנעה בשיטת CSCR (Capacity Start - Capacitor Run), תמונה 4.114

- שיטה זו, שמטרתה להקנות מומנט התנעה גדול במיוחד, משמשת למתקני הקפאה ולמערכות שבהן יש קושי בהתנעת המדחס בגלל כשל מכני (שחיקה) של המדחס.
- בשיטה זו מחברים במקביל לקבל העבודה, קבל התנעה בערכים גדולים, המתנתק לאחר זמן ההתנעה באמצעות מסר התנעה מסוג PTC, המחובר אליו בטור.
- בשוק אביזרי העזר לקירור ולמיזוג אוויר, קיימת ערכה המשלבת את שני האלמנטים בקופסה אחת ונקרא "Solid State Starter Power Pack". הוא משווק בישראל בשם SPP (Super Power Pack).
- קיטים כאלה קיימים בגדלים שונים. מכפיל מומנט ההתנעה המתקבל מכל קיט, תלוי בקיבוליות של הקבל הנמצא בו.

שיפור מומנט ההתנעה (לפי פרסומי היצרן)

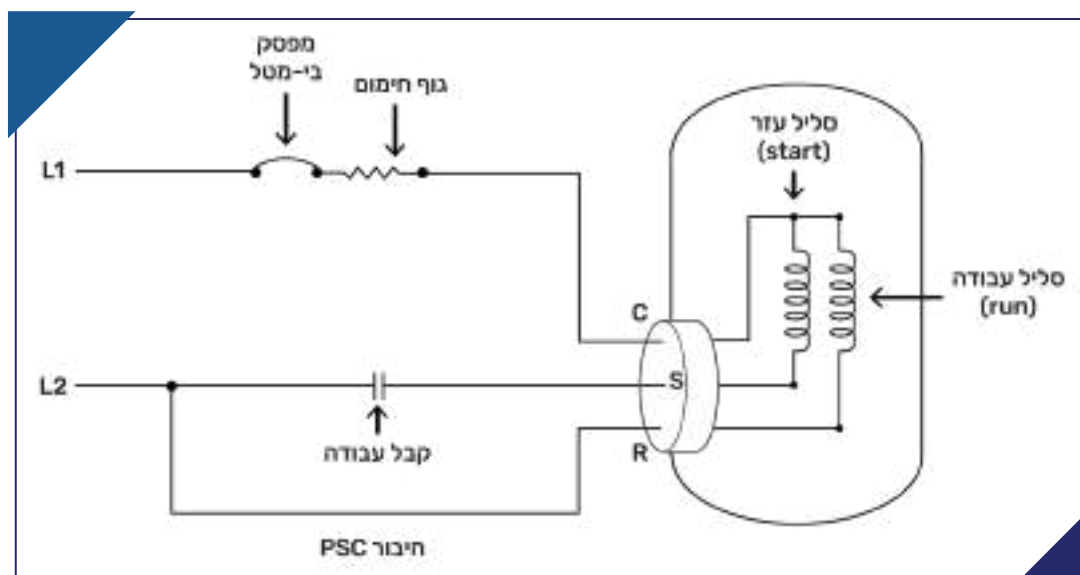
- 200% - SPP
- 300% - SPP 5
- 500% - SPP 6
- 750% - SPP 7

4.7.4.6. חיבור מדחסים והתנעה בשיטת PSC (Permanent Split Capacitor)

בשיטה זו משתמשים במדחסים שבהם נדרש מומנט התנעה גדול ומומנט עבודה גבוה, כמו לדוגמה במדחסים למיזוג אוויר בעלי הספקים גבוהים ופועלים בלחצים גבוהים.

- בשיטה זו מחברים קבל בערכים שבין 15 μF ל-60 μF , בהתאם להספק המדחס בטור לסליל העזר (Start).
- עם חיבור המתח למנוע, הקבל נטען ונפרק במהירות באנרגייה חשמלית.
- הפריקה הגדולה של האנרגייה יוצרת מומנט גדול על ציר המנוע ועוזרת להתנעתו.
- לאחר פריקת הקבל, ההתנגדות הקיבולית שהוא יוצר בטור לסליל העזר קטנה, ומאפשרת היווצרות מפל מתח על סליל העזר ביחס ישר לגודל (קיבוליות) של הקבל.
- ככל שערכו של הקבל יהיה גדול יותר, כך המתח שימשיך לעבור דרכו אחרי ההתנעה יהיה גבוה יותר. מכיוון שעבודה ממושכת בעומס (מתח) גבוה עלולה לגרום נזק לסליל העזר, חובה עלינו להיצמד לערכי הקבלים שקבע יצרן המדחס.
- במקרים מסוימים, יש המחליטים לעקוף את הקבל בזמן ההתנעה, כדי לאפשר למתח בעוצמה מקסימלית לעבור לזמן קצר אל סליל ההתנעה. במקרים כאלה יותקן אביזר PTC בין שני קוטבי הקבל. ממסר זה יתנתק בסיום ההתנעה, כדי לאפשר למנוע להמשיך לעבוד עם סליל העזר.

תמונה 4.115 - חיבור מדחס בשיטת PSC



4.7.4.7 בדיקה וזיהוי סלילי מנוע המדחס

אזהרה: חיבור לא נכון של סלילי המדחס יגרום לפגיעה בסלילים ויביא לשריפת המנוע.



כדי למנוע חיבור לא נכון, על הטכנאי לזהות את סלילי המדחס ולוודא חיבור נכון של מקור המתח להדקי המדחס.

מכיוון שאין אחידות במיקום הדקי הסלילים ולא קיים סימון קבוע למיקומם, על הטכנאי לזהות את ההדקים לפני החיבור באמצעות מדידת ערך ההתנגדות (Ω) של הסלילים, כמפורט:

**תמונה 4.116 - שלבים
בזיהוי וסימון הדקי חיבורי
סלילי מנוע מדחס חד-פאזי
מסוג Split Phase Motor**

שלב א' - סימון ההדקים במספרים 1-3
1. יש לסמן את ההדקים בצורה אקראית.

שלב ב' - מדידת ערך ההתנגדות בין ההדקים וסימונם
1. מדידת ההתנגדויות תבוצע באמצעות מד-התנגדות (Ohm Meter) בין שלוש הנקודות, וציון ערכן.

שלב ג' - סימון הדקי מנוע המדחס לפי הכללים הבאים
1. חיבור ההדק של החיבור המשותף לשני הסלילים, יהיה מול ערך ההתנגדות הגדול ביותר ויצוין באות C (Common).

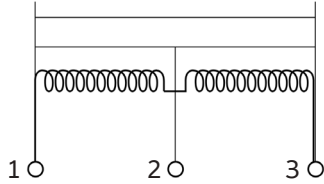
2. הדק החיבור לסליל ההתנעה (Start) ישוּיך לחיבור שערך ההתנגדות בינו ובין הדק C הוא הגדול מבין שתי ההתנגדויות שנותרו.

3. הדק החיבור לסליל העבודה (Run), הוא ההדק שערך ההתנגדות בינו לבין הדק C הוא הקטן מכולם.

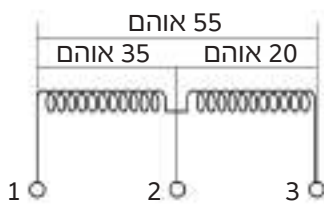
שלב ד' - חיבור ההזנה ואביזרי החשמל למדחס.

שלב ה' - התנעת המדחס ובדיקה לפעולה תקינה.

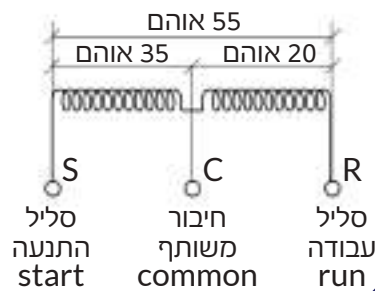
שלב א': בדיקת התנגדות בין ההדקים



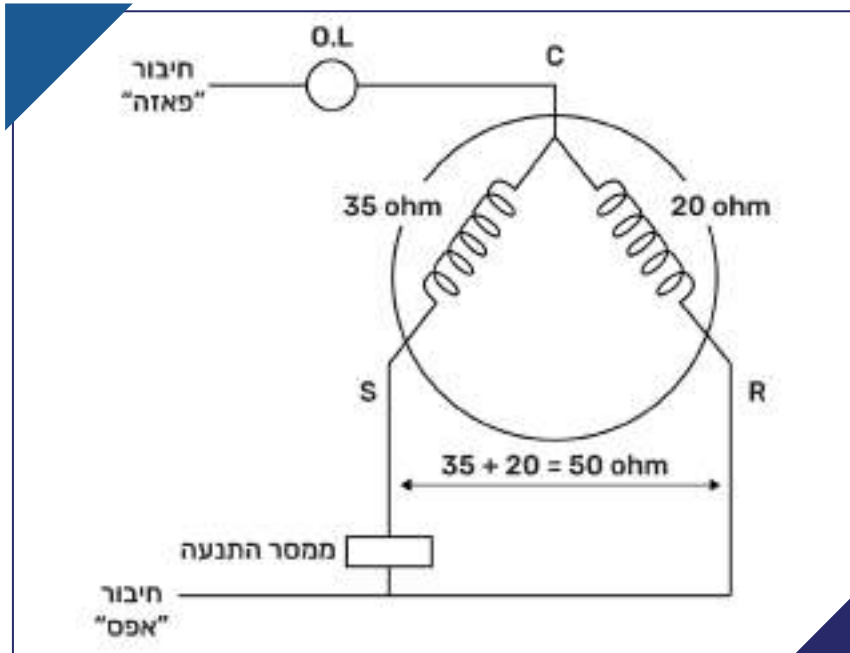
שלב ב': סימון ערך ההתנגדויות



שלב ג': סימון ההדקים



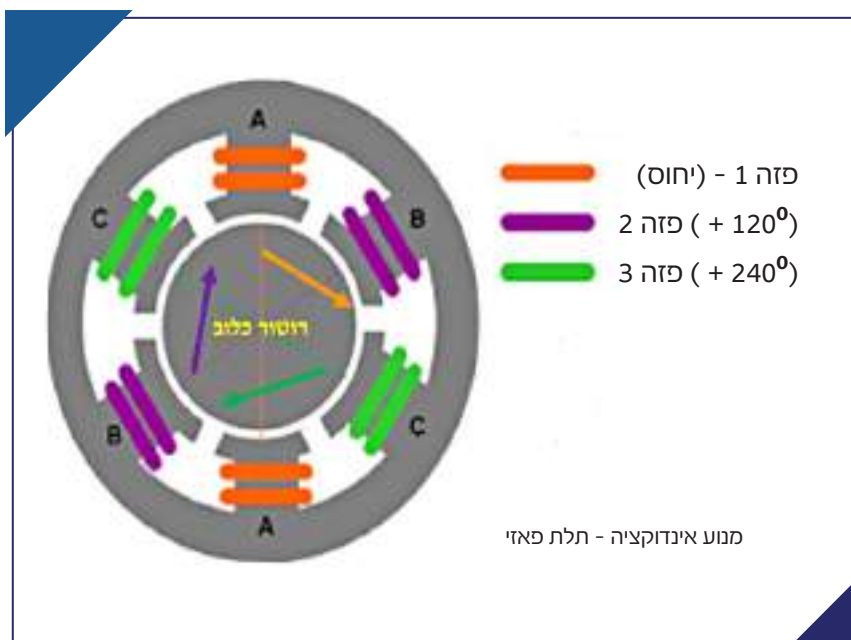
תמונה 4.117 - חיבורי הזנה ואמצעי הגנה למנוע המדחס



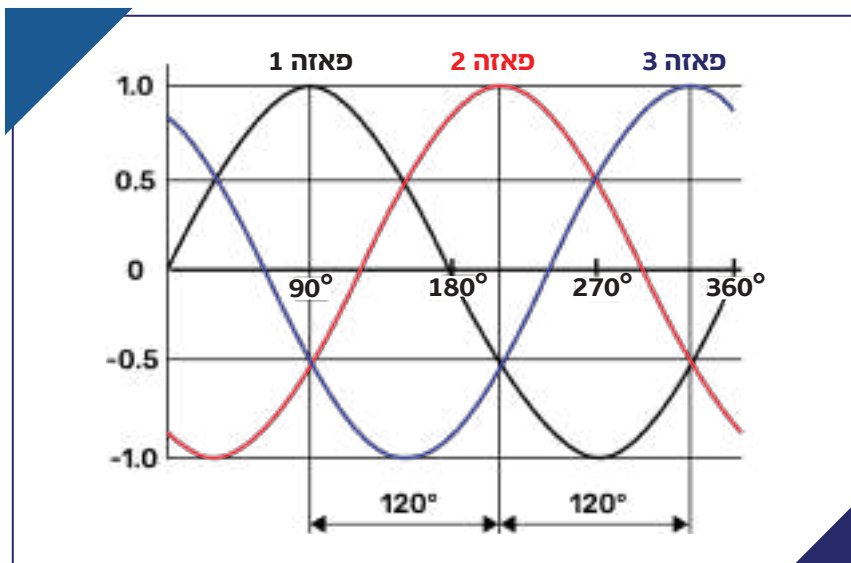
4.8 מנועים תלת-פאזיים (3-Phase Motors)

כאמור, הנעת מדחסים באמצעות מנועים חד-פאזיים רגילים, או בעלי פאזה מפוצלת הינה כורח הנובע מעלויות, או מחוסר זמינות חיבורי חשמל תלת-פאזיים. היא מיועדת למתקני קירור ומיזוג אוויר ביתיים או מסחריים בהספק מצומצם. השיטה העדיפה להנעת מדחסים היא באמצעות מנועים תלת-פאזיים, המאפשרים קבלת מומנטים של התנעה ועבודה קטנים יותר. זאת תוך הקטנת הערכים של זרמי ההתנעה והעבודה הנדרשים, ועבודת המדחסים בנצילות גבוהה יותר (תמונה 4.118).

תמונה 4.118 - מבנה מנוע תלת-פאזי



תמונה 4.119 - הפרשי מופעים במנוע תלת-פאזי



הסטטור במנוע תלת-פאזי בעל 3 סלילים, שהזנתם במתח יוצרת שלושה כוחות הפועלים על הרוטור (ראו תמונה 4.118) בהפרש מופע של 120° אחד מהשני (ראו תמונה 4.119), ומאפשרים קבלת מומנטים גבוהים של התנעה ועבודה. הנעת המנוע מתבצעת בשיטת "כוכב-משולש", חיבור המנוע בתצורת משולש מאפשר התנעה בכוח (מומנט) גדול תוך כדי צריכת זרם נמוכה, ואילו חיבור הסלילים בתצורת כוכב, אחרי הוצאת המנוע והמדחס ממצבם הסטטי, מאפשר את הקטנת הכוח המניע ועבודה רציפה.

4.8.1 עיקרון הפעולה

- במנועים אינדוקטיביים המוזנים בזרם חילופין, הזרם יוצר שדה מגנטי המסתובב בתיאום עם תנודותיו.
- באופן תיאורטי, השדות המגנטיים אמורים היו לגרום לסיבוב בקצב זהה של רוטור המנוע, אך בפועל קיים הפרש מסוים (Slip) הגורם לרוטור להסתובב בקצב איטי יותר.
- ההפרש בין המהירויות גורם ליצירת זרמים נגדיים לזרמים שבסלילי הסטטור, וזרמים אלה מניעים את הרוטור בכוח גדול, המסוגל להוציא ממצב מנוחה את הרוטור ואת העומס המכני (מדחס) שמחובר אליו.
- עם הגדלת מהירות סיבובי המנוע, יקטנו הזרמים שנוצרים בסטטור, במקביל לירידה בהתנגדות המכנית שפועלת על ציר המנוע.
- מכאן, שבמנועים אינדוקטיביים, כאשר מהירות סיבוב השדה בסטטור גדולה מאוד לעומת מהירות סיבוב השדה הנע (רוטור), נוצר כוח (מומנט) גדול מאוד המסוגל להוציא את המנוע והמדחס המחובר אליו ממצב סטטי ולהביא אותם למהירות סיבוב נדרשת.
- בשל שאיפה זו לסינכרוניזציה של השדות הסטטיים והנעים, נקרא מנוע אינדוקטיבי גם מנוע סינכרוני.

מונחים באלקטרומגנטיות

- Slip** - ההפרש בין המהירות הסינכרונית למהירות הסיבוב של הרוטור בתדירות מסוימת של הזרם.
- מומנט (Torque)** - הכוחות הפועלים על רוטור (ציר) המנוע:
 - כוח השדה המגנטי הפועל לסובב את הרוטור.
 - כוח המתנגד לסיבוב הרוטור ונוצר על ידי התנגדות המכנית של המנוע. מדחס המחובר אליו ידוע כ"כוח מנוע תפוס" (Locked-Rotor Torque) כשבמצב זה $slip=100\%$. כוח זה יכול לנוע בערכים של 75% ועד 275% מהכוח הנומינלי שמייצר המנוע במהירות מוגדרת.
- מהירות סינכרונית** - מהירות סיבוב השדות המגנטיים בסטטור כתלות בתדירות הזרם המסופק למנוע. לדוגמה: במנוע המוגדר לפעולה בתדר 50 Hz, מהירות הסיבוב היא 1500 סל"ד (סיבובים לדקה). אותו מנוע שיופעל ב-60 Hz, ינוע במהירות של 1800 סל"ד. יחס המהירויות יהיה 1:1.2 ומשקף את היחס בין התדרים:

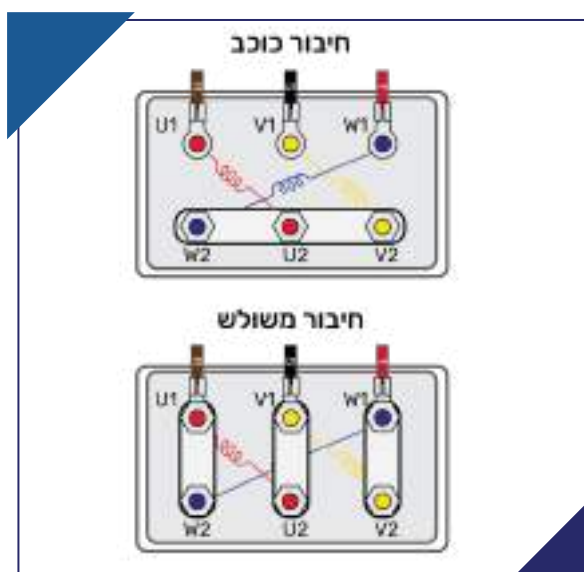
$$\frac{60}{50} = 1.2$$

4.8.2 התנעת מנועים תלת-פאזיים

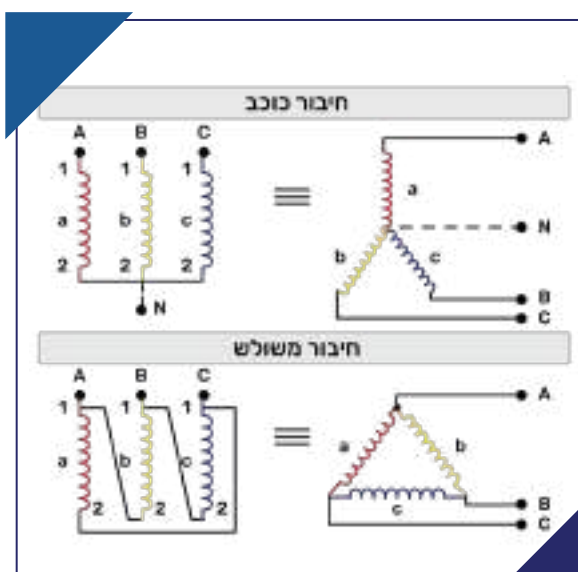
המומנט הגדול הנדרש בהתנעת מנועים גורם לעלייה חדה בזרם ההתנעה, בסדר גודל של פי ארבעה עד פי שמונה מזרם העבודה הנקוב של המנוע. זרם גדול זה מהווה עומס חריג על רשת אספקת החשמל, ולכן כדי להקטין את הזרם הנצרך יש להקטין את זרם ההתנעה באחת מהשיטות הבאות:

1. התנעה בשיטת כוכב-משולש: בשיטה זו מחברים את סלילי הסטטור במבנה של כוכב, ולאחר שמהירות המנוע מגיעה לכ-70% ממהירות הסיבוב הנומינלית שהגדיר היצרן, משנים בעזרת מערכת מיתוג (ממסרים) למבנה משולש (ראו תמונה 4.122). היתרון בשיטה זו הוא שבמבנה כוכב, הזרם הנצרך קטן פי שלושה ביחס לזרם שצורך חיבור משולש. החיסרון הוא הקטנת המתח, וכתוצאה מכך קטן הכוח שמספק המנוע לציר. למרות זאת, חיבור כוכב-משולש נפוץ במנועים בגודל של מעל ארבעה כוחות סוס.

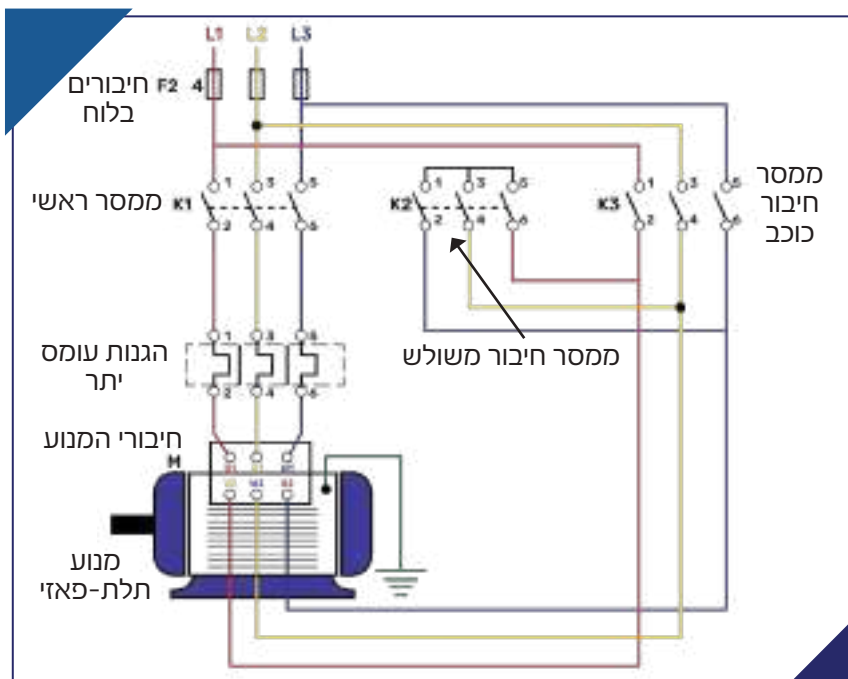
תמונה 4.121 - אופן מיקום לוחית הגישור על מגעי המנוע



תמונה 4.120 - חיבורים בשיטות כוכב ומשולש



תמונה 4.122 - התנעת כוכב-משולש באמצעות ממסרים



טבלה 4.4 - סימונים של קצוות חיבור, סלילי סטטורים לפי תקנים

תקן אמריקאי		תקן גרמני		תקן בריטי	
חיבורים		חיבורים		חיבורים	
T1	T4	U	X	A1	A2
T2	T5	V	Y	B1	B2
T3	T6	W	Z	C1	C2

2. התנעה באמצעות מתנע "רך"

בשיטה זו, אנו שולטים בצורה מבוקרת על מתח ותדירות הרשת המועברים למנוע. ההתנעה מבוצעת תוך כדי שינוי רציף בתדר הרשת, אשר "בונה" את הספק המנוע באופן מדורג. כדי לפצות את המנוע על אובדן יחסי של המומנט הנוצר על ציר המנוע, מגדילים את עוצמת המתח המסופק למנוע. דבר הגורם לירידת צריכת הזרם בעת ההתנעה.

3. שינוי מהירות סיבוב הרוטור

במנועים בעלי "רוטור כלוב", ניתן לשנות את מהירות סיבובי המנוע באמצעות מערכת אלקטרונית המשנה את תדירות הרשת. מנועים הפועלים בשיטה זו ידועים כמנועי "אינוורטר" (Inverter), והבקר המבצע את השינוי ידוע כבקר VSD (Variable Speed Driver).

הערה

בהתנעה בשיטות שבהן המומנט הראשוני שמסוגל המנוע לפתח קטן מהמומנט הנומינלי, רצוי לאפשר הקטנת המומנט הנגדי. המומנט הנגדי פועל על ציר המנוע על ידי הנעת המדחסים בעומסים חלקיים, באמצעות מערכת פריקת דרגות, או מערכת המאפשרת השוואת לחצים בה לפני ההתנעה.

4.8.3 עקרונות הנעת מדחסי אינוורטר (Inverter Drive)

לשיטת שינוי מהירות סיבוב המנוע החשמלי יש שמות רבים, לפי תיאור השיטה:

- Variable Frequency Drive - **VFD**.
- Adjustable Frequency Drive - **AFD**.
- Variable Voltage / Variable Frequency - **VVVF**.
- Variable Speed Drive - **VSD**.

שיטת שינוי מהירות המנועים החשמליים התפתחה במהלך המאה העשרים. החל ממשני מהירות מכניים, מנועים כפולים (שני סטטורים + שני רוטורים המניעים ציר משותף), מנועים בעלי סלילים מחולקים ומנועים הפועלים במתח משתנה, ועד מערכות לשינוי התדירות הנמצאות בשימוש בכל סוגי המערכות בתעשייה. שיטת שינוי המהירות נמצאת בשימוש גם בתעשיית מתקני הקירור והמיזוג, החל ממערכות בהספק קטן של כ-5 KW ועד מתקנים גדולים בעלי מנועים בהספק של מאות KW. כעיקרון, ניתן לצייד כל מדחס במנוע אינוורטר, אך מדחסים סיבוביים דורשים כוחות קטנים יותר להנעתם, ולפיכך נוחים יותר לתפעול בשיטה זאת. שינוי המהירות באמצעות שינוי מתח או תדר ניתן לבצע גם במנועים חד-פאזיים, אך שיטה זו יעילה יותר במנועים תלת-פאזיים.

השיטה המקובלת

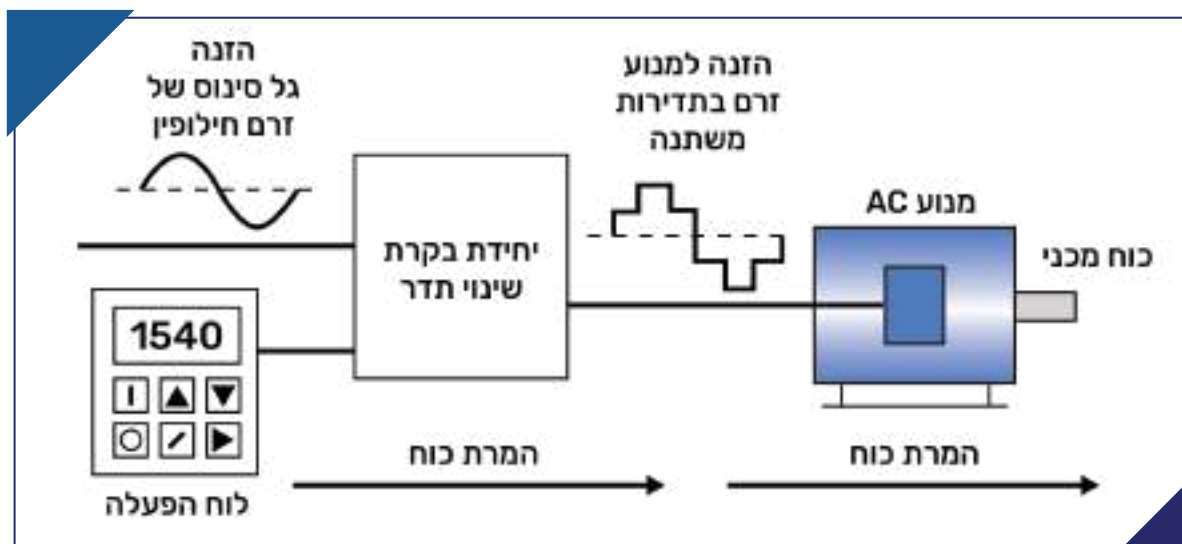
שינוי ישיר במערכת מ-AC ל-DC ומ-DC ל-AC, בה מתח חילופין מומר למתח ישיר באמצעות מיישר זרם. מיישר הזרם כולל גשר בעל ארבע דיודות ("גשר גרץ" - **Greatz Bridge**) ומומר בחזרה למתח חילופין בצורת גל אחר. אותו גל ניתן לשינוי מהירות המופע (תדירות) על ידי יחידת הבקרה.

שתי שיטות מוכרות להמרת הכוח המניע:

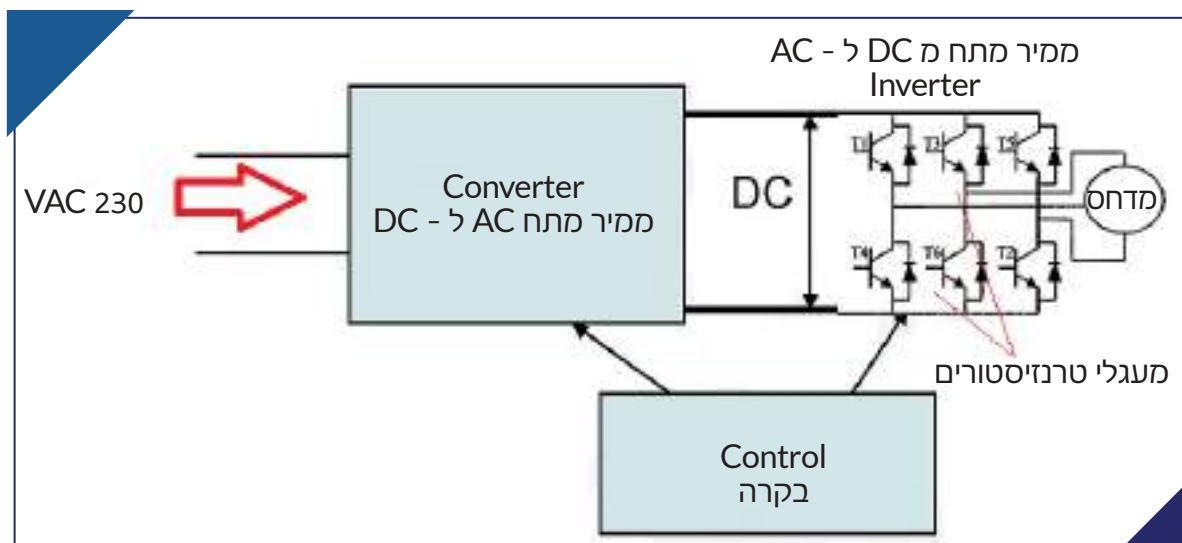
1. המרת הכוח לגל רציף-חיובי.
2. המרת הכוח לגל סינוסיאלי בעל שישה פולסים.

העיקרון בשתי השיטות הוא שליטה בתדר: שינוי של תכיפות המופעים (פולסים) הקובע את קצב התפתחות הכוחות המגנטיים, ושינוי של המתח הקובע את הכוח (**Torque**) שהמנוע יכול ליצור לצורך תנועתו.

תמונה 4.123 - שלבים בפעולה של יחידת שינוי מהירות על ידי שינוי התדר



תמונה 4.124 - עיקרון המרת מתח למדחס אינוורטר



יתרונות השימוש במנועי אינוורטר

- הפעלת המנוע במהירות ובמומנט הנדרשים, כדי לספק את תפוקת הקירור הרצויה ולא מעבר לכך, משפרת את יעילות הפעולה של המנוע ומביאה לחיסכון בעלות החשמל. זאת לעומת ויסות מכני הגורם לבזבז אנרגייה.
- אינוורטר מאפשר התנעה הדרגתית של המנוע (התנעה רכה), ובהתאם גם כיבוי רך.
- אי אחידות באספקת החשמל, המתבטאת בקפיצות מתח, מתוקנת על ידי האינוורטר.
- האינוורטר פותר את הבעיה הבאה: ויסות על ידי כיבוי והפעלה (On-Off) גורם לאי יציבות של הטמפרטורה, במקרה של מזגן הפועל במקומות בעלי עומס חום משתנה (הדבר נכון גם לגבי משאבות הפועלות במערכות מיזוג אוויר באמצעות קירור מים, שבהן נעסוק בהמשך).
- הקטנת בלאי ורעידות הנוצרים במערכות העובדות בהספק גבוה ופועלות בתנאים של דרישה נמוכה. לדוגמה: מדחס העובד בתפוקה גבוהה מהנדרש, יהיה בשימוש רגיל רועש מדי, יפעל בתדירות גבוהה לזמנים קצרים, ויגרום למכות לחץ בצנרת ולבלאי גבוה. מערכת האיננוורטר מאפשרת להפעיל את המדחס בהספק חלקי, בהתאם לצרכים בכל רגע ורגע.

חסרונות השימוש במנועי אינוורטר

- עקב שינויי מהירות, לחצים וכמויות קרר במערכות אינוורטר, יכולה להיפגע היכולת להחזרת השמן למדחס. דבר המחייב לעתים התקנת מפריד שמן ביציאת המדחס.
- עלויות מערכת שינוי התדר/המרת המתח: נכון להיום, עלותה של מערכת ההמרה ממתח חילופין למתח ישר גבוהה. בנוסף, גם הטיפול והשירות במערכות אלה מייקר את עלויות הרכישה והתפעול, ולכן הכדאיות בשימוש בהן גדלה ככל שהמערכת גדולה יותר.

שאלות חזרה לפרק 4

1. נצילות נפחית של מדחס היא:

- ההפרש בין תפוקת המדחס (KW) לצריכת הזרם של המנוע (Amper).
- ההפרש בין תפוקת המדחס (KW) להספק הנצרך על ידי המנוע (KW).
- היחס בין הספיקה הנפחית התיאורטית לספיקה הנפחית המעשית.
- היחס בין הלחץ השורר ביניקת המדחס ללחץ היוצא לקו הדחיסה.

2. ככל שיחס הדחיסה גדל:

- כך גדלה גם נצילות המדחס.
- צריכת החשמל של המנוע קטנה.
- מומנט ההנעה הנדרש להתנעת המדחס קטן.
- צריכת החשמל על ידי המדחס תגדל.

3. מדחסים סיבוביים יעילים יותר ממדחסי בוכנה מכיוון ש:

- יש בהם פחות חלקים נעים ופחות חיכוך הגורם לתוספת חום.
- זרימת הקרר דרך מחליף חום ייחודי מקטינה את העומס.
- מדחסים סיבוביים עובדים במהירות סיבוב נמוכה יותר.
- במדחסים סיבוביים אין צורך בשימון והאטימה בהם היא לכירינטית.

4. מדחסים פתוחים נבדלים ממדחסים סגורים וממדחסים חצי סגורים בכך ש:

- במדחסים אלה הקרר מקו היניקה מסייע לקירור המנוע החשמלי.
- למדחסים פתוחים יש משאבת שמן מסוג גלגלי שיניים.
- חובה להתקין על ציר המדחס אטם מכני למניעת דליפות בהיקף הציר.
- הם מיועדים לעבודה עם קררים בעלי משקל סגולי גבוה.

5. המונח TAPER-LOCK מתייחס לרכיב המשמש ל:

- פריקת גז מקו דחיסה לצורך הורדת לחץ.
- חיבור גלגלי הנעת רצועות לציר המנוע או המדחס.
- שינוי התדר במדחסים מסוג אינוורטר.
- התנעת מדחסים חד-פאזיים בעלי פאזה מפוצלת (Split Phase Motor).

6. החזרת השמן למדחסים במערכות שבהן מותקן מפריד טיפות נוזל (לפני המדחס), נעשית

באמצעות:

- שסתום מצוף המחובר בצינור לאגן השמן של המדחס.
- ברז חשמלי המפוקח על ידי מד גובה שמן המותקן באגן השמן.
- קדח (חריר) הנמצא בתחתית צינור היניקה שבמפריד הטיפות.
- חימום השמן במפריד הטיפות על ידי גוף חימום.

7. ויסות תפוקה במדחסים בורגיים יכול להיעשות באמצעות:

- א. שינוי מהירות הסיבוב או פריקת קרר, מאזור הדחיסה ליניקת המדחס דרך מעבר עוקף.
- ב. שינוי מהירות הסיבוב של הרוטורים בלבד.
- ג. שינוי מהירות סיבוב הרוטורים, או ניתוק ההנעה מהרוטור המשני (הרוטור המונע).
- ד. שינוי מהירות הסיבוב, או על ידי פתיחת שסתום עוקף בראש המדחס.

8. מדחסים המשמשים במערכות להקפאה עמוקה יהיו מסוג:

- א. H.H.B או H.B.P
- ב. L.B.P
- ג. H.B.P או L.B.P
- ד. M.B.P

9. במדחסים דו-דרגתיים משתמשים במערכות:

- א. בעלות יחס דחיסה נמוך במיוחד.
- ב. הכוללות מעבים מקוררים במים.
- ג. בעלות יחס דחיסה גבוה במיוחד.
- ד. ישנות, הפועלות עם קררים מסוג C.F.C בלבד.

10. בתהליך בחירת מדחס למערכת קירור/מיזוג אוויר, יש להתחשב:

- א. בטמפרטורה הנדרשת במאייד בלבד.
- ב. בטמפרטורות הנדרשת במקרר ובטמפרטורת הסביבה.
- ג. בטמפרטורת העיבוי (דחיסה) בלבד.
- ד. בסוג הקרר שנבחר לשימוש במערכת.

11. התנעת מדחסים חד-פאזיים למקפואים נעשית בשיטת:

- א. C.S.C.R
- ב. R.S.I.R
- ג. P.S.C
- ד. I.S.I.R

12. מה נכון לגבי מדחסים סיבוביים מסוג להב סטטי?

- א. מסתובבים במהירויות סיבוב נמוכות מאוד.
- ב. רגישים לכניסת טיפות נוזל קירור ליניקה.
- ג. אינם מתאימים למערכות שבהן נדרש יחס דחיסה גדול.
- ד. מיועדים למתקני מיזוג אוויר בלבד.

13. עיקרון בניית הלחץ ביציאת המדחס הצנטריפוגלי מבוסס על:

- א. חוק פסקל.
- ב. עיקרון שימור הלחץ.
- ג. חוק שימור האנרגיה ועיקרון ברנולי.
- ד. כוח צנטריפוגלי ביחס למישור משופע.

14. הבטחת החזרתו של שמן הקירור למדחס מחייבת:

- א. התקנת מפסק של לחץ שמן.
- ב. מעבר לשימוש בשמנים סינטטיים (POE, PAG).
- ג. צנרת קו יניקה וקו נוזל בעלות קוטר גדול.
- ד. הבטחת מהירות זרימה מינימלית של הקרר דרך צנרת המערכת.

15. שינוי מהירות המנוע החשמלי במזגן אינוורטר נעשה על ידי:

- א. שימוש בקבלים להקטנת או הגדלת הכוח ההשראתי.
- ב. שינוי התדר או שינוי המתח המזין את המנוע.
- ג. שינוי ההפרש של המופע בין הפאזות.
- ד. הגדלת אורך הליפופים של הסטטור בצורה ליניארית.

תשובות לשאלות לפרק 4

מס' השאלה	תשובה
1	ג
2	ד
3	א
4	ג
5	ב
6	ג
7	א
8	ב
9	ג
10	ב
11	א
12	ב
13	ג
14	ד
15	ב

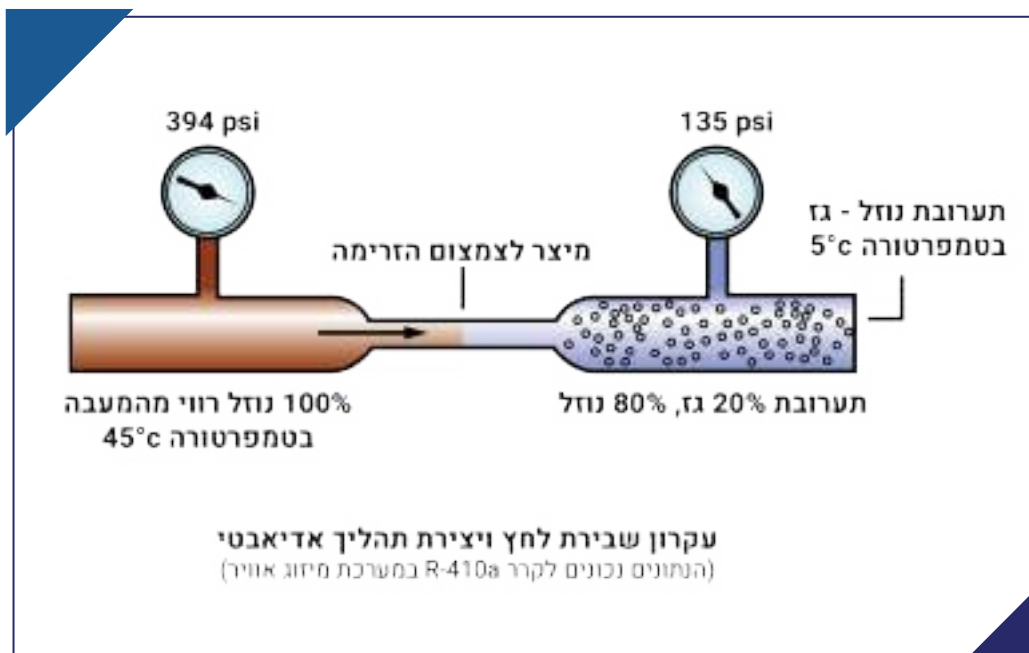
פרק 5: שוברי לחץ - אביזרי התפשטות

5.1 מבוא

- כפי שהוסבר [בחלקו הראשון של פרק 2](#), מערכת הקירור הבסיסית מחולקת **לשני אזורי לחץ**.
- **אזור הלחץ הגבוה** מתחיל ביציאה מהמדחס, ותחום מצדו השני על ידי אחד מאביזרי ההתפשטות הקיימים. אביזר ההתפשטות מאפשר שמירה על לחץ גבוה במעבה כנדרש, לצורך עיבוי הקרר (תוך כדי פליטת חום).
 - **אזור הלחץ הנמוך** מתחיל באביזר ההתפשטות ומסתיים בכניסה למדחס בצד היניקה. אביזר ההתפשטות הוא שיוצר את מפל הלחץ, במטרה להקטין את הלחץ והטמפרטורה לערכים הרצויים במאייד בהתאם לסוג המתקן. לצורך איוד הקרר (תוך כדי קליטת חום), באמצעות יצירת מפל לחץ (הקטנת הלחץ) בין לחץ כניסת הקרר הנוזלי לאביזר ההתפשטות ובין הלחץ הנוצר ביציאה ממנו, אנו גורמים להיווצרות **תהליך קירור (אדיאבטי)**. בתהליך זה חלק מסוים מהקרר הנוזלי מתאייד בתהליך של רתיחה עצמית, ללא קליטת חום ממקור חיצוני.

בתהליך, המתבצע בנקודת המעבר מלחץ גבוה ללחץ נמוך, חלק קטן יחסית של הקרר הנוזלי (כ-10%-20%) משנה את מצב צבירתו מנוזל לגז (רתיחה). החום הדרוש לתהליך הרתיחה נלקח מתוך יתרת הקרר, שאינו משנה את מצב צבירתו ונשאר במצב נוזל. מסירת (גריעת) החום מהנוזל הנותר **גורמת לירידה חדה בטמפרטורת הנוזל** הנכנס לסוללת המאייד, ומאפשרת יצירת הפרש טמפרטורה גדול בין הקרר שבמאייד לסביבתו. הנוזל נדרש כדי לספוג את כמויות החום שיש לסלק מהחלל המקורר.

תמונה 5.1 - עיקרון שבירת לחץ ויצירת תהליך אדיאבטי



מכיוון שאנו משתמשים במערכות שונות (מיזוג אוויר, קירור או הקפאה), **בקררים שונים** (בהתאמה לכל סוג של מערכת) בעלי תכונות לחץ/טמפרטורה שונות, הרי שיש **לשנות** את הספיקה המסית של הקרר ואת הפרש הלחצים (ΔP) בתהליך. כדי להשיג את היעילות המרבית של התהליך ואת הטמפרטורה הנדרשת בכניסה למאייד.

מעבר לתפקידם כשוברי לחץ/אביזרי התפשטות, משמשים חלק מאמצעים אלה גם כאביזרים הקובעים את כמות הקרר שתיכנס למאייד בהתאם לתפוקתו. הכמות יכולה להיות קבועה או משתנה, בהתאם לעומסי החום.

מכאן, בנוסף להגדרתם באנגלית כאביזרי התפשטות Expansion devices, הם מתויגים גם כאביזרי הצרה Throttling devices או אביזרי יסות Metering devices.

בפרק זה נדון בסוגי האביזרים המשמשים אותנו במערכות השונות, לצורך שבירת הלחץ ולוויסות כמויות הקרר:

- הפשוטים ביותר, ללא מנגנון ויסות, בעלי ספיקה קבועה (צינור קפילרי/שסתום ידני).
- שסתומים בעלי ספיקה משתנה, מכניים ואלקטרוניים, המשמשים במערכות הפועלות בהתפשטות ישירה (D.X Systems).
- אביזרים המשמשים במערכות בעלי מאיידים מקררי מים (צ'ילרים) מסוג יבש, או מסוג מוצף.

האביזרים בהם יעסוק פרק זה

- אביזרים ללא מנגנון ויסות, בעלי ספיקה קבועה:
 - ברז ידני
 - צינור קפילרי

- אביזרים בעלי ספיקה משתנה:
 - שסתום אוטומטי
 - שסתום תרמי
 - שסתום תרמי עם משווה לחץ חיצוני
 - שסתום חשמלי/אלקטרוני מבוקר מחשב

- אביזרים למאיידים מוצפים:
 - מצוף לחץ נמוך
 - מצוף לחץ גבוה

5.2 אביזרי התפשטות ללא מנגנון ויסות, בעלי ספיקה קבועה

5.2.1 אביזרים בעלי ספיקה קבועה

משמשים במערכות בהן עומס החום קבוע לאורך כל מחזור פעולת הקירור, ולא נדרש שינוי בכמויות הקרר המוזרמות למאייד. מערכות אלה ניתן למצוא בדרך כלל בתעשייה הכללית (קירור מכונות) או בתעשייה תהליכית.

5.2.2 מייצר קבוע (דיזה)

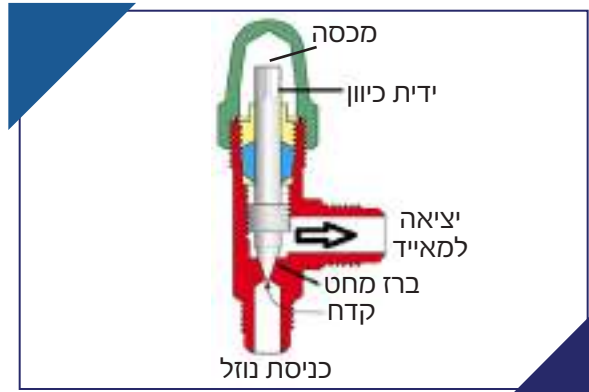
בדרך כלל בשימוש במערכות בעלות עומס חום קבוע, כמו מערכות מיזוג לרכב. **יתרונות:** זולה, פשוטה ואינה דורשת מיומנות בהתקנה. **חסרונות:** מספיקה לתפוקה מוגדרת. אינה ניתנת לוויסות.

5.2.3 ברז ידני

תמונה 5.3 - ברז ידני



תמונה 5.2 - ברז קוני



כאמור, **ברז ידני** משמש אותנו לקביעת גודל החריר, המפריד בין אזור הלחץ הגבוה ואזור הלחץ הנמוך. הברז מעביר ספיקה התלויה בהפרש הלחצים עליו, תוך כדי יצירת מפל לחץ קבוע. הברז נבחר בהתאמה לקוטר צינור הנוזל, ויש לכוון אותו לקבלת מפל לחץ רצוי, בהתאם לסוג הקרר הפועל במערכת ובהתאם לטמפרטורות והלחצים המתוכננים עבור המעבה והמאייד. כיום **לא נעשה שימוש נרחב** בברזים ידניים, אך ניתן למצוא אותם בקווים עוקפים לאמצעי התפשטות אחרים, כדי לאפשר את המשך פעולת המערכת במקרה של תקלה באביזר ההתפשטות.

מבנה הברז

הברז הוא ברז מחט. הרחקת המחט מהקדח הקוני מגדילה את שטח מעבר הנוזל ואת כמות הקרר שיכול לעבור דרכו. **יתרונות:** פשוט, בעל ויסות ידני חד פעמי, דורש תחזוקה מועטה. **חסרונות:** מיועד למערכת בעלת ספיקה קבועה. שינוי בכמות הקרר העוברת דרך הברז מחייב פעולה ידנית.

5.2.4 צינור קפילרי

המונח צינור קפילרי (בעברית צינור נימי), מתאר צינור (מוליך) בעל קוטר פנימי קטן מאוד, המשמש במערכות קירור ומיזוג אמצעי לשבירת לחץ ולהורדת טמפרטורת הקרר לטמפרטורת האיזוד (רתיחה) הרצויה. השימוש בצינור הקפילרי נפוץ בעיקר במערכות ביתיות ומסחריות בעלות הספק נמוך יחסית.

- מפל הלחץ הנוצר בין הכניסה והיציאה של הצינור תלוי בשלושה גורמים:
1. מידות הצינור (קוטרו הפנימי, אורכו, וכמות הצינורות במקביל).
 2. סוג הקרר ותכונותיו.
 3. ספיקת הקרר (פועל יוצא של מהירות הזרימה).

תמונה 5.5 - צינור נימי מוכן לפי מידה קבועה



תמונה 5.4 - צינור נימי בחבילה



הצינורות הקפילריים מגיעים בגלילים באורך של כ-25 מטר. ניתן לחתוך אותם למידה הרצויה (ראו תמונה 5.4), או מוכנים במידות שונות בהתאמה למתקן הספציפי שבו יש להתקין אותם (ראו תמונה 5.5). **קביעת אורך** הצינור הנדרש נעשית בהתאם לקוטר הפנימי של הצינור (I.D - Inside Diameter), ועל פי חישוב מוקדם, באמצעות טבלאות או אפליקציות ממוחשבות, שפותחו על ידי יצרני מדחסים וקררים. **ניתן למצוא את אורך הצינור (בודד או כמה במקביל)**, בהתאם לקוטר הפנימי של הצינור הנימי, ובהסתמך על נתוני תפוקת קירור, טמפרטורות והלחצים במעבה ובמאייד.

תמונה 5.6 - צילום מסך של תוכנת חישוב צינורות קפילריים לקרר R-290 a בתקן בינלאומי

The screenshot shows the CapSel software interface. On the left is a schematic diagram of a refrigeration cycle with a compressor, condenser, evaporator, and capillary tube. On the right, the 'Input Data' section lists: Refrigerant (R-290a), Heat load of the system (A), Evaporating temperature (B), Condensing temperature (C), and Return gas temperature (D). Below this is the 'Capillary Tube Recommendation' table for a flow rate of 3.7 m³/h at delta p 10 mbar.

Length	Inlet Diameter
4.32 m	0.60 mm
5.52 m	0.63 mm
9.24 m	0.70 mm
10.03 m	0.71 mm
18.21 m	0.80 mm
32.82 m	0.90 mm
55.59 m	1.00 mm
97.98 m	1.12 mm
136.32 m	1.20 mm

Below the table, it states: 'Optimal relative is highlighted in yellow'. At the bottom, there are buttons for 'Help', 'Print', and 'Settings'.

5.2.4.1 עיקרון פעולת הצינור הקפילרי

- עם הפעלת המערכת, מתחיל המדחס לדחוס קרר (במצב צבירה גז) בלחץ גבוה, שהופך לנוזל חם במעבה.
- הנוזל הזורם מאזור הלחץ הגבוה שבמעבה, לכיוון המאייד, חייב לעבור דרך הצינור הקפילרי.
- בשל הקוטר הקטן של הצינור, נוצר מפל לחץ ההולך וגובר ככל שמתקדמים לכיוון פתח היציאה (ככל שהצינור הקפילרי ארוך יותר, מפל הלחץ גדל, וטמפרטורת הקרר בסוף התהליך תהיה נמוכה יותר).
- מפל הלחץ גורם לכך שכבר לאחר כ-2/3 מאורכו של הצינור, הלחץ יורד ומגיע ללחץ האייד.
- כ-10% עד 20% מהקרר הופך לגז עוד במהלך זרימת הקרר בצינור עצמו.
- עם יציאת הקרר מהצינור הקפילרי לצנרת המאייד בעלת קוטר גדול בהרבה, מסתיים תהליך מפל הלחץ והבאת הקרר לטמפרטורת האייד הרצויה ([ראו תמונה 5.1](#)).

5.2.4.2 השפעת גודל המדחס על מידות הצינור הקפילרי

כעיקרון, הספיקה הנפחית של המדחס היא שקובעת את כמויות הקרר שיוזרמו על ידו במערכת בכל רגע נתון. לפיכך, אם נוצר צורך בהחלפת מדחס קיים במערכת עובדת, יש לוודא התאמת המדחס החדש למערכת גם מבחינת הספיקה הנפחית (כמות הקרר היוצאת ביחידת זמן) שלו. אם הספיקה גדולה מדי, יגרום הדבר לעליית הלחץ לפני הצינור הקפילרי, כלומר במעבה, מה שיביא לעומס חשמלי ומכני על המדחס. מאידך, החלפת המדחס באחר, בעל ספיקה נפחית קטנה יותר, יביא לירידת לחץ העיבוי ופגיעה בפעולת המעבה.

לכן, הפתרון יהיה:

- בעת התקנת מדחס בעל ספיקה נפחית קטנה יותר, יש להחליף את הצינור הנימי בצינור ארוך יותר או בעל קוטר פנימי קטן יותר.
- בעת התקנת מדחס בעל ספיקה נפחית גדולה יותר, יש להחליף את הצינור הנימי בצינור קצר יותר או בעל קוטר פנימי גדול יותר.

5.2.4.3 צינור קפילרי במערכות בעלות זרימה דו-כיוונית

במערכות לקירור ולחימום כיוון זרימת הקרר משתנה בהתאם לתהליך. לדוגמה: מזגני אוויר עם ברז 4 דרכי (שסתום הופך כיוון זרימה), או במערכות בעלות מנגנון הפשרה בגז חם, לסילוק קרח המצטבר על המאייד (במערכות להקפאה). במקרים כאלה הצינור הקפילרי מאפשר שבירת לחץ בזרימת הקרר בשני הכיוונים.

במצבים אלה, סוללות המעבה והמאייד מחליפות לעיתים תפקידים:

- בפעולת המזגן במצב חימום, הקרר נדחס תחילה לתוך סוללת המאייד שעוברת לתפקד כסוללת מעבה.
- מכיוון שסוללת המאייד קטנה פיזית מסוללת המעבה, נוצר בעת תהליך החימום או ההפשרה לחץ גבוה יותר בצד הדחיסה.
- במטרה למנוע את הגדלת הלחץ הנ"ל, וכדי לאפשר את פעולת תהליך החימום או ההפשרה מבלי לסכן את המדחס, מתקינים במערכות אלה התקן חד כיווני הנקרא שסתום אל-חוזר ([ראו תמונה 5.7](#)).

- **שסתום זה** מאפשר לקרר לעקוף במצב קירור חלק מהצינור הקפילרי כפי שיפורט בהמשך, ובמצב חימום, לאלץ את הקרר לזרום לכל אורך הצינור הקפילרי.

תמונה 5.8 - שסתום אל-חוזר עם צינור קפילרי משני



תמונה 5.7 - שסתום אל-חוזר לצינורות קפילריים



5.2.4.4 אופן פעולת צינור קפילרי עם שסתום אל-חוזר

במצב קירור: הקרר זורם מהמעבה דרך הצינור הקפילרי הראשי, ומשם דרך השסתום אל-חוזר, המאפשר לקרר לזרום דרכו לכיוון המאייד. לקרר קל יותר לעבור דרך השסתום מאשר דרך צינור קפילרי נוסף. במצב זה, מפל הלחץ הנוצר עקב מעבר הקרר בצינור הקפילרי, מביא את הקרר בכניסה למאייד לטמפרטורת האיוד המתוכננת, כ-4°C.

במצב חימום: סוללת המאייד הקטנה יחסית עברה לשמש כסוללת מעבה, ואילו סוללת המעבה הגדולה יותר הפכה למאייד בתנאי טמפרטורה נמוכים יחסית. על פי חוקי הפיזיקה, כדי להשיג מעבר חום יעיל, כלומר כדי שהסוללה החיצונית המשמשת כמאייד תוכל לקלוט חום מהסביבה הקרה, יש להקטין את טמפרטורת הקרר הנכנס לסוללה לטמפרטורה נמוכה משמעותית מטמפרטורת הסביבה. לצורך כך יש צורך במפל לחץ גדול יותר, אשר יושג על ידי מעבר הקרר דרך שתי קפילרות בטור. במצב זה, השסתום אל-חוזר לא מאפשר לקרר לעבור דרכו אלא דרך הצינור המשני.

5.2.4.5 טיפול בצינורות קפילריים

מדידת קטרים פנימיים וחיצוניים: **שימוש בצינורות קפילריים מחייב דיוק רב** בבחירת אורכם וקוטרם הפנימי. כדי לזהות את הצינור, יש **לבצע מדידה מדויקת** של הקוטר הפנימי. מכיוון שלא ניתן להשתמש באמצעי מדידה כמו "מד זחיח" (קליבר), יש להשתמש במדיד מיוחד (כמופיע בתמונה 5.9).

התקנת סט צינורות קפילריים

במקרים רבים, כדי לשפר את הזרימה דרך סוללת המאיד, מחלקים את סוללת המאיד לכמה מעגלי זרימה מקביליים (מעגלי משנה). כדי לאפשר חיבור צינור קפילרי לכניסת כל מעגל בנפרד, מחברים את הצינורות הקפילריים למפצל זרימה, המאפשר חיבור של כמה צינורות במקביל (ראו תמונה 5.12).

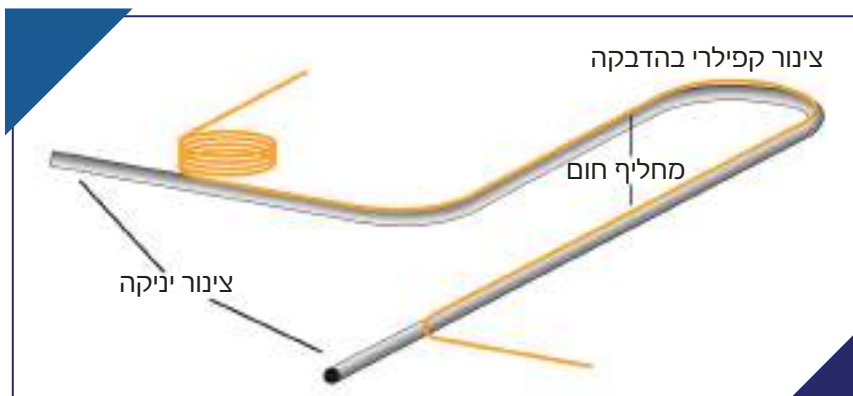
תמונה 5.12 - מסננים עם יציאות לכמה צינורות קפילריים



הצמדת צינור קפילרי לקו יניקה ליצירת מחליף חום

במטרה ליצור החלפת חום בין קו הנוזל החם (הצינור הקפילרי) ובין צינור היניקה הקר (לקבלת חום שיחון בערך גבוה יותר), נהוג להצמיד את הצינור הקפילרי אל קו היניקה. החלפת החום מתבצעת על ידי הצמדת הצינור הקפילרי לקו היניקה בהדבקה או בהלחמה (תמונה 5.13), או על ידי העברת הצינור הקפילרי בתוך צינור קו היניקה. **שימוש במחליף חום כמתואר לעיל מאפשר הגדלת חום השיחון וקירור היתר.**

תמונה 5.13 - מחליפי חום קו נוזל וקו יניקה



ליפוף חלק מהצינור הקפילרי בצורת סליל ביציאה מהמסנן

לאופן העברתו של הצינור הקפילרי ועיצוב הצינור בצורת סליל או כמלופף על גוף המסנן/מייבש, אין חשיבות או יתרון תפעולי, והדבר נעשה מטעמי נוחות ולצורך שמירה על שלמות הצינור.

תמונה 5.14 - ליפוף הצינור הקפילרי



5.2.4.6 זיהוי תקלות במערכות עם צינורות קפילריים

צינור קפילרי ארוך מהרצוי או בעל קוטר קטן מהרצוי

במקרה זה, כמות הקרר המסופקת על ידי המדחס למערכת נתקלת בהתנגדות גדולה מהמתוכנן, ונוצר מפל לחץ גדול מהרצוי משני עברי הצינור הקפילרי. כתוצאה מכך, לחץ הדחיסה יעלה ויגרום להגדלת העומס על המדחס, לצריכת זרם גבוהה מהמתוכנן (יעילות נמוכה) ולבלאי מואץ של המדחס והמנוע שלו. היווצרות לחצי דחיסה/עיבוי קיצוניים יכולים לגרום להפסקת פעולת מנוע המדחס.

מצד שני, צינור קפילרי ארוך או דק מדי יקטין את כמות הקרר שתיכנס למאייד. הדבר יגרום ליצירת לחץ איזוד נמוך מאוד ולקפיאת המאייד. הירידה בכמות הקרר מקטינה גם את כושרו של המאייד לקלוט חום מהחלל המקורר. בנוסף לתופעות אלה, הקטנת כמות הקרר המוחזרת למדחס בשילוב עם קרר "חם" יחסית, תעלה את טמפרטורת הקרר בכניסה למדחס, דבר העלול לגרום להתחממותו והפסקת פעולתו על ידי מגן יתרת זרם (אוברלווד).

צינור קפילרי בעל אורך קצר מהנדרש או בעל פנימי גדול מדי

במקרה זה, ההתנגדות הקטנה יתר על המידה שיוצר הצינור, תגרום להקטנת הלחץ של הקרר הזורם מהמעבה בכניסה לצינור. ירידת לחץ העיבוי תפגע ביכולתו להפוך את הקרר ממצב גז למצב נוזלי, ובכושרו של המעבה לפלוט חום לסביבה.

מצד שני, הקטנת מפל הלחץ תביא לעליית טמפרטורת הקרר המסופק למאייד, וכתוצאה מכך להקטנת כושרו לקלוט חום מהחלל המקורר. במקרה זה מערכת הקירור תפעל כמערכת הפועלת בעודף קרר. יש חשש שהמדחס יוצף בקרר נוזלי.

בשני המקרים המתוארים לעיל, תקטן יעילותה של מערכת הקירור בצורה משמעותית.

סתימה בצינור הקפילרי

יש שני סוגי סתימות שתוצאותיהן מובילות לתופעות המתוארות בסעיף להלן:

1. סתימה הנגרמת מהמצאות לחות במערכת הקירור (סתימת קרח): הסתימה נגרמת בעת שהלחות (בצורת טיפות מים) מגיעה לצינור הקפילרי. בגלל הצמיגות הגבוהה של המים ביחס לקרר, הטיפה חוסמת חלקית את מעבר הקרר בצינור הקפילרי.

במתקני קירור, בהם טמפרטורת האידוי נמוכה מ- 0°C , תקפא טיפת המים ותיהפך לטיפת קרח שתחסום לחלוטין את מעבר הקרר בצינור הנימי. כתוצאה מכך, המאייד יתרוקן מקרר, הלחץ במאייד ירד לוואקום, כל הקרר יתכנס במעבה, והזרם שצורך המדחס יקטן. אך כתוצאה מהתחממותו תופסק פעולתו של המדחס על ידי מנגנון הגנת טמפרטורה פנימי.

2. **סתימה הנגרמת מלכלוך המוסע בצנרת המערכת על ידי הקרר:** סוג זה של סתימה יגרום לתופעות דומות כמתואר לעיל. אבל מכיוון שסתימה הנגרמת מלכלוך "נבנית" במהלך זמן מה, מופיעים **סימנים מוקדמים** כגון הקרחה חלקית של הצינור הקפילרי והכניסה למאייד, ושינויים בלחצי הדחיסה והיניקה.

לאחר היווצרות הסתימה ניתן יהיה לזהות את סוג הסתימה על ידי **כיבוי המערכת**. במקרה של **סתימה כתוצאה מהיווצרות קרח**, לחץ היניקה וטמפרטורת היניקה יעלו, הקרר יימס, והמים יזרמו עם הקרר, בתהליך השוואת הלחצים, אל מעבר לצינור הקפילרי. הפעלת המערכת מחדש אינה גורמת ברוב המקרים לחזרה מיידית של תופעות הסתימה. לעומת זאת, סתימה הנגרמת מלכלוך אינה משתחררת בדרך כלל בעת הפסקת פעולת המערכת, ולכן התופעות הנלוות לסתימה בצינור הקפילרי יחזרו מיידית עם הפעלת המערכת.

הערות

א. הטיפול בסתימות לכלוך בצינור קפילרי דורש השקעת משאבים רבים. לכן במקרים של סתימת לכלוך, יהיה זול יותר לעיתים להחליף את הצינור הקפילרי כולו ואת המסנן הנמצא לפניו.

ב. במקרה של סתימה הנגרמת מלחות רבה במערכת, יש צורך להוציא ולנקות את הקרר (במערכות קטנות יעיל יותר להחליף את הקרר) ולהחזירו למערכת לאחר ביצוע פעולות אחזקה מרובות. למשל סילוק הרטיבות באמצעות משאבת ואקום, התקנת גופי ייבוש בקווי המערכת, החלפת מסנן מייבש ועוד.

5.2.4.7 יתרונות השימוש בצינור קפילרי

1. זול ונוח להתקנה.
2. בלאי נמוך (ללא חלקים נעים).
3. דו כיווני, מתאים למזגנים ולמשאבות חום.
4. מאפשר השוואת לחצים בין צד הלחץ הגבוה ללחץ הנמוך בהדממת המערכת, ומאפשר התנעה קלה של המדחס.
5. מחובר לצנרת בהלחמה, ולכן הסיכונים קטנים לדליפת קרר.

5.2.4.8 חסרונות השימוש בצינור קפילרי

1. **אינו** מסוגל לווסת את כמויות הקרר העוברות דרכו, ולהתאים את כמויות הקרר הנכנסות למאייד לעומס החום שבחלל המקורר. **לכן יכולות להיגרם התופעות הבאות:**
 - א. הצפת המאייד בקרר נוזלי בעת ירידת עומס החום באזור המקורר (שיחון=0).
 - ב. הגעת נוזל למדחס מצד היניקה, דבר המקצר את חייו בצורה משמעותית.

5.2.5 שסתום התפשטות אוטומטי - AEV

תמונה 5.15 - שסתום התפשטות
אוטומטי

תפקידו של שסתום התפשטות אוטומטי

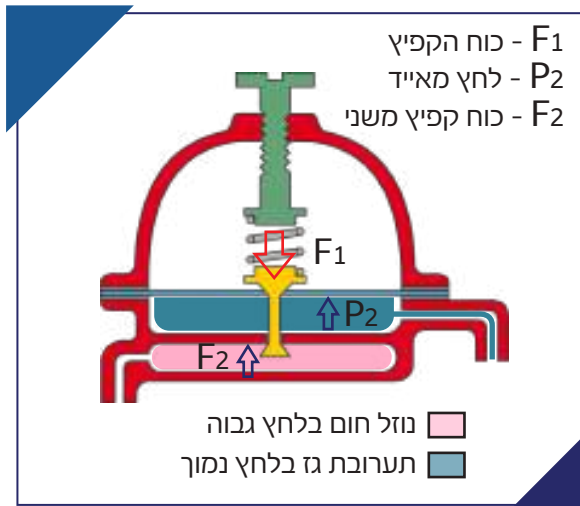
תפקידו של שסתום התפשטות אוטומטי הוא לאפשר כניסת נוזל קר למאייד, כל עוד טמפרטורת החלל המקורר לא הגיעה לערך הרצוי שנקבע על ידי אנשי המקצוע, בהתאם לייעודו של המתקן בו פועל השסתום. השסתום מיועד לעבוד רק במתקנים בהם עומס החום קבוע (קירור מוצרי חלב ניגר, קירור מים, מיזוג אוויר לחדרי מחשבים ולרכב), ושנשלטים על ידי בקר טמפרטורה (טרמוסטט). עם הגעת הטמפרטורה בחלל המקורר לערך הרצוי, מנתק הבקר את מערכת הקירור ומפסיק את פעולתה. במצב זה, כשהמדחס מפסיק לעבוד ואין יניקת קרר מהמאייד, עולה הלחץ במאייד ומביא לסגירת השסתום ולסגירת מעבר הקרר דרכו אל המאייד. זאת במטרה למנוע את הצפת המאייד בקרר נוזלי. הצפת המאייד עלולה להביא ליניקת נוזל על ידי המדחס ולהריסתו. הפעלת המערכת מחדש באמצעות בקר הטמפרטורה, תתאפשר לאחר שהטמפרטורה בחלל המטופל תעלה מעבר לטמפרטורה שנקבעה (Set point). במצב זה, ירידת הלחץ P2 (ראו תמונה 5.17) תאפשר לכוח קפיץ הוויסות לדחוף את הדיאפרגמה כלפי מטה ולפתוח את השסתום למצב מקסימלי. לאחר מכן, בהתאם להפרש הכוחות (ΔF) הפועלים על הדיאפרגמה, יתאזן השסתום במצב אמצע כלשהו ויאפשר לכמות קבועה של קרר להיכנס שוב למאייד.

5.2.5.1 מבנה שסתום התפשטות אוטומטי

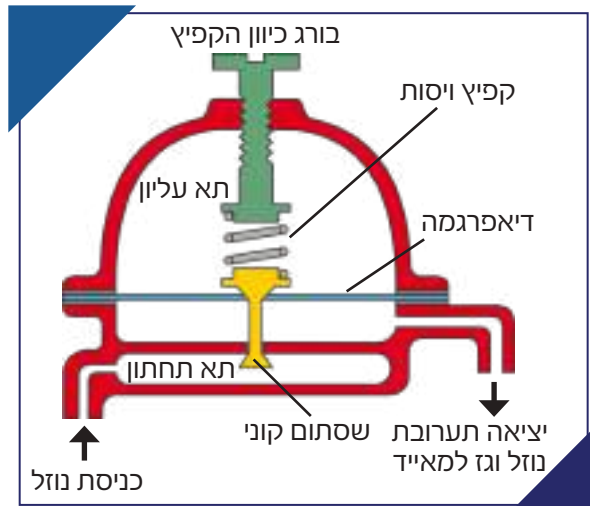
לשסתום שני תאים המופרדים באמצעות דיאפרגמה:

1. **תא עליון:** כולל קפיץ ויסות בעל בורג לכיוון ושינוי כוח הקפיץ.
2. **תא תחתון:** כולל את תושבת השסתום ושסתום מחט קוני הנשלט על ידי מוט דוחף, ומקבל תנועה מהדיאפרגמה.

תמונה 5.17 - הכוחות הפועלים על השסתום



תמונה 5.16 - שסתום התפשטות אוטומטי (חתך)



5.2.5.2 עיקרון פעולת השסתום

כאמור לעיל, תפקידו של השסתום להיסגר עם עליית הלחץ במאייד ולהיפתח שוב כשהלחץ יורד, מיד לאחר התנעה מחדש של המדחס.

- **עיקרון פעולת השסתום** (כפי שניתן לראות בתמונה 5.17): השסתום הקוני נע לכיוון פתיחה או סגירה בהתאם להפרש הכוחות הפועלים על שני צדי הדיאפרגמה.
- מצדו העליון, כוח קפיץ הוויסות F_1 (כוח קבוע), שנקבע בעת התקנת השסתום ופועל בכיוון פתיחת השסתום, בתוספת הלחץ האטמוספרי השורר בתא מעל הדיאפרגמה.
- כנגד, מהצד התחתון, פועל לכיוון סגירת השסתום לחץ המאייד P_2 , בנוסף לכוחו (המזערי) של הקפיץ המשני (F_2) שמתחת לשסתום, המשתנה בהתאם למצב השסתום.

המשוואות לפתיחת וסגירת השסתום

- לסגירה בעת הדממת המערכת: $F_1 < P_2$
- לפתיחה בעת התנעת המדחס מחדש: $P_2 < F_1$
- למצב אמצע בעת עבודת המערכת: $P_2 = F_1$

5.2.6 שסתומי התפשטות תרמיים TEV - Thermostatic Expansion Valve

תמונה 5.18 - שסתומי התפשטות תרמיים



5.2.6.1 תפקידים של שסתומי ההתפשטות התרמיים

תפקידים של שסתומי ההתפשטות התרמיים הוא לספק למאיידים את הכמות הנכונה של נוזל הקירור, בטמפרטורה ובלחץ האיזוד המתאימים למתקנים בהם הם פועלים. השסתומים התרמיים, **בניגוד** לשסתומי ההתפשטות האוטומטיים, מיועדים לשמור על רמת שיחון נתונה (בדרך כלל בין 4°C ל- 7°C). הם מתאימים את עצמם לפי טמפרטורת הקרר העוזב את המאייד, כלומר מאפשרים כניסת כמות גדולה יותר של קרר במקרה של **מאייד "רעב"** (Starved Evaporator) כאשר **טמפרטורת השיחון גבוהה** מהמתוכנן. מנגד, תפקידם לצמצם את כמות הקרר במקרה של **מאייד מוצף** (flooded) שבו יש כבר קרר בכמות עודפת, וטמפרטורת השיחון **הנמדדת תהיה נמוכה** מהמתוכנן.

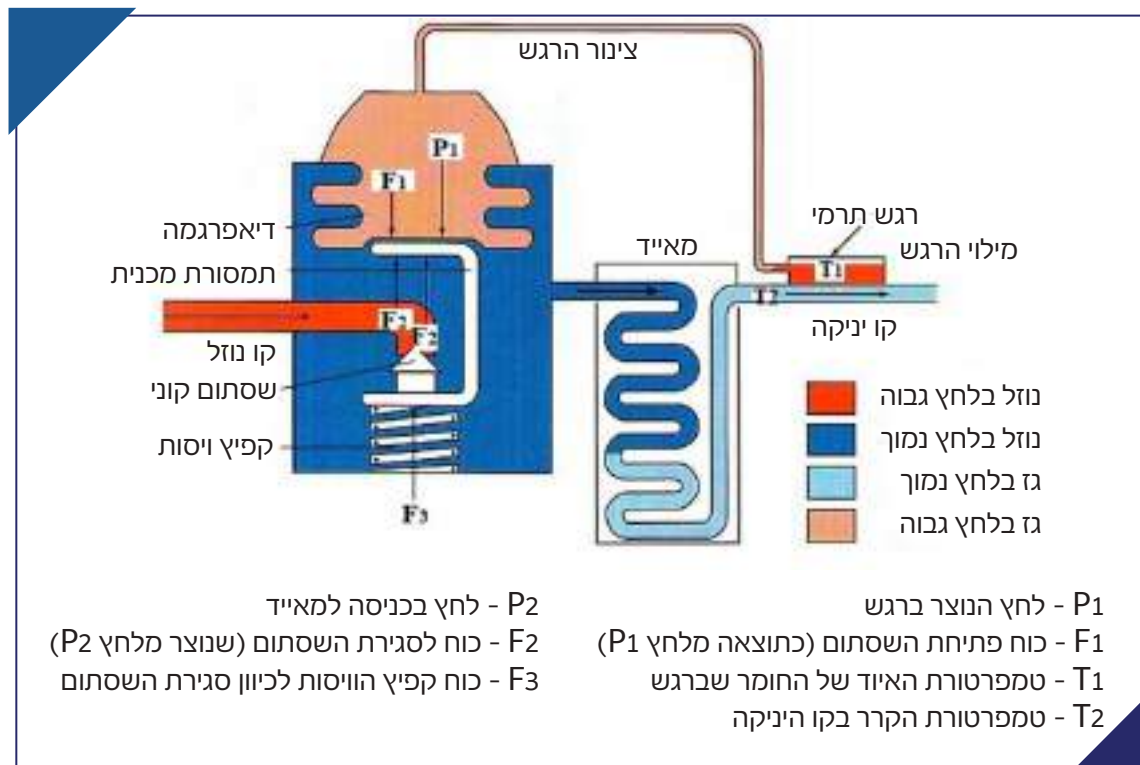
5.2.6.2 מבנה שסתום תרמי (ללא משווה לחץ חיצוני) ואופן פעולתו

לשסתום התרמי גוף הנחלק לשני תאים (ראו תמונה 5.19):

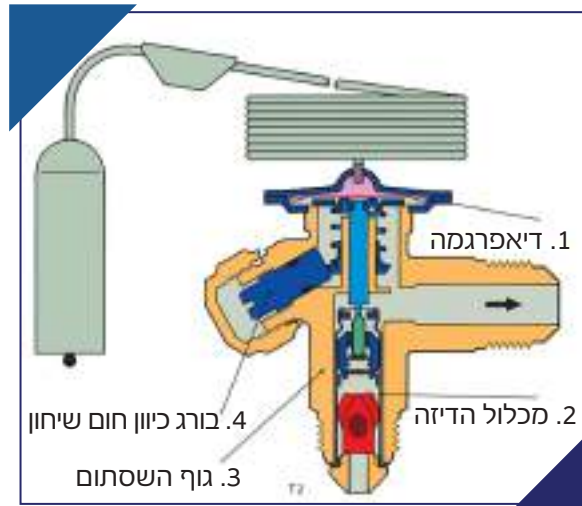
- **התא התחתון**, בו נמצאת יחידת השסתום והדיזה. לתא זה נכנס מצד אחד קו הנוזל החם המגיע בלחץ גבוה מכיוון המעבה, ויוצא מצדו השני כתערובת קרר נוזלי/גזי בלחץ ובטמפרטורה נמוכים לכיוון המאייד.
- **התא העליון** הוא תא לחץ, המחובר לרגש השסתום באמצעות צינורית דקה. תא זה מופרד מהחלק התחתון של השסתום באמצעות דיאפרגמה גמישה בעלת כושר תנועה, המחוברת מכנית באמצעות מוטות דוחפים אל מכלול השסתום הקוני.

תנועת הדיאפרגמה **תלויה** בלחץ המתפתח בתא העליון ופועל כנגד לחץ היניקה. בנוסף, הכוח שיוצר קפיץ הוויסות, נקבע על ידי יצרן השסתום או מתכנן המתקן.

תמונה 5.19 - הכוחות הפועלים בשסתום התפשטות תרמי



תמונה 5.20 - מבנה השסתום ההתפשטות הטרמי

**פעולת השסתום במצב חוסר קרר "Starved Evaporator"**

מצב זה קורה עם עליית עומס החום בחלל המקורר או בעת ההתחלה של פעולת המערכת, כאשר טמפרטורת האוויר העוטף את המאייד עדיין גבוהה מהרצוי. המאייד נמצא במצב של חוסר קרר (זמני). במצב זה, טמפרטורת הקרר העוזב את המאייד וטמפרטורת צינור היניקה עולים. בעקבותיהם, עולה גם טמפרטורת רגש השסתום הטרמי המותקן על קו היניקה בסמוך ליציאה מהמאייד.

המשמעויות של חוסר בקרר

- החומר הנוזלי הנמצא בתוך הרגש הטרמי (bulb), שהינו בעל תכונות דומות לתכונות הקרר הפועל במערכת, קולט את החום מצינור היניקה (T_1), מתחמם וגורם לחלק מהחומר הנוזלי שבתוכו להתאייד.
- כתוצאה מהתאיידות החומר שברגש, לחץ האדים (P_1) הממלאים את נפח הרגש גדל, ועובר דרך הצינורית המחוברת אל התא העליון. הלחץ (P_1) המופעל על השטח העליון של הדיאגרמה הופך לכוח (F_1) שלוחץ את הדיאפרגמה כלפי מטה. זאת במטרה להעביר תנועה דרך המוט הדוחף המחובר אל השסתום הקוני, ולפתוח אותו.
- במצב זה, כל עוד הכוח (F_1) קטן מכוח קפיץ הוויסות (F_2), השסתום יישאר במצבו הראשוני. כלומר כמות הקרר הנכנס למאייד תהיה תלויה בכוח המופעל על ידי קפיץ הוויסות שנקבע על ידי היצרן (בדרך כלל שמירת שיחון של כ- 4°C), או על פי הנחיות מתכנן המערכת.

אם עומס החום על המאייד ימשיך לגדול וטמפרטורת הקרר העוזב את המאייד תמשיך לעלות, יגיע השלב שבו הלחץ שיווצר ברגש יגרום להגדלת כוח F_1 מעבר לכוח F_2 המתנגד לו. הדיאפרגמה והשסתום ינועו כלפי מטה, יאפשרו כניסת כמות גדולה יותר של קרר למאייד, והורדת רמת השיחון לערך שקבע מתכנן המתקן.

מצב זה של פתיחת השסתום והכנסת כמות נוספת של קרר למאייד מבוטא באמצעות

המשוואה הבאה:

$$F_1 > F_2 + F_3$$

פעולת השסתום במצב שבו כמות הקרר מתאימה לעומס החום על המאייד (טמפרטורת שיחון רצויה)

במצב זה, תפוקת המערכת **מתאימה** לעומס החום הנקלט במאייד. כמות הקרר הנכנסת אל המאייד דרך השסתום קבועה, והשסתום נמצא במצב ביניים בין פתיחה מקסימלית למינימלית.

$$F1 = F2 + F3$$

המשוואה המתאימה למצב זה:

מצב ביניים זה הוא **זמני**, ונקבע על ידי ויסות הקפיץ לרמת שיחון נדרשת, בהתאם להנחיות היצרן המצורפות לשסתום. עם חלוף הזמן, אם עומס החום על המאייד ירד, **לא יוכל** המאייד **לאייד את כל כמות** הקרר הנכנסת אליו, ויהיה **צורך בצמצום** כמותו העודפת במאייד, **והגדלת** השיחון לרמתו המקורית כמתואר בסעיף הבא.

פעולת השסתום במצב שבו עומס החום על המאייד קטן (טמפרטורת שיחון יורדת)

במצב זה, בו עומס החום בחלל המקורר יורד, **המאייד אינו קולט מספיק חום בכדי לאייד** את כל כמות הנוזל הנכנסת אליו דרך השסתום.

- המאייד למעשה **מוצף** בקרר נוזלי בטמפרטורה נמוכה, העושה את דרכו לכיוון קו היציאה מהמאייד ועשוי להציף בהמשך את יניקת המדחס ולגרום לו לנזק מכני.
- הקרר הנוזלי, הנמצא בטמפרטורה נמוכה, מקרר את צינור היניקה ואת הרגש התרמי הצמוד אליו.
- החומר הנמצא בתוך הרגש, שהיה ברוכו במצב גזי כשעומס החום על המאייד היה גבוה יותר, מתקרר וחוזר להיות במצב נוזלי תוך שהוא תופס פחות נפח ברגש ולחצו יורד.
- ירידת הלחץ ברגש תגרום לירידת הלחץ בחלל התא העליון המחובר אליו, ולהקטנת כוח $F1$.

$$F1 < F2 + F3$$

משוואת פעולת השסתום תשתנה ותהיה:

כתוצאה מכך, כוח קפיץ הוויסות יחד עם לחץ הכניסה למאייד, גוברים על הכוח שמפעיל הרגש על החלק העליון של הדיאפרגמה. מכלול השסתום נע כלפי מעלה בכיוון סגירת השסתום והורדת כמות הקרר העוברת דרכו לכמות מינימלית.

השפעת גודל המאייד על פעולת השסתום

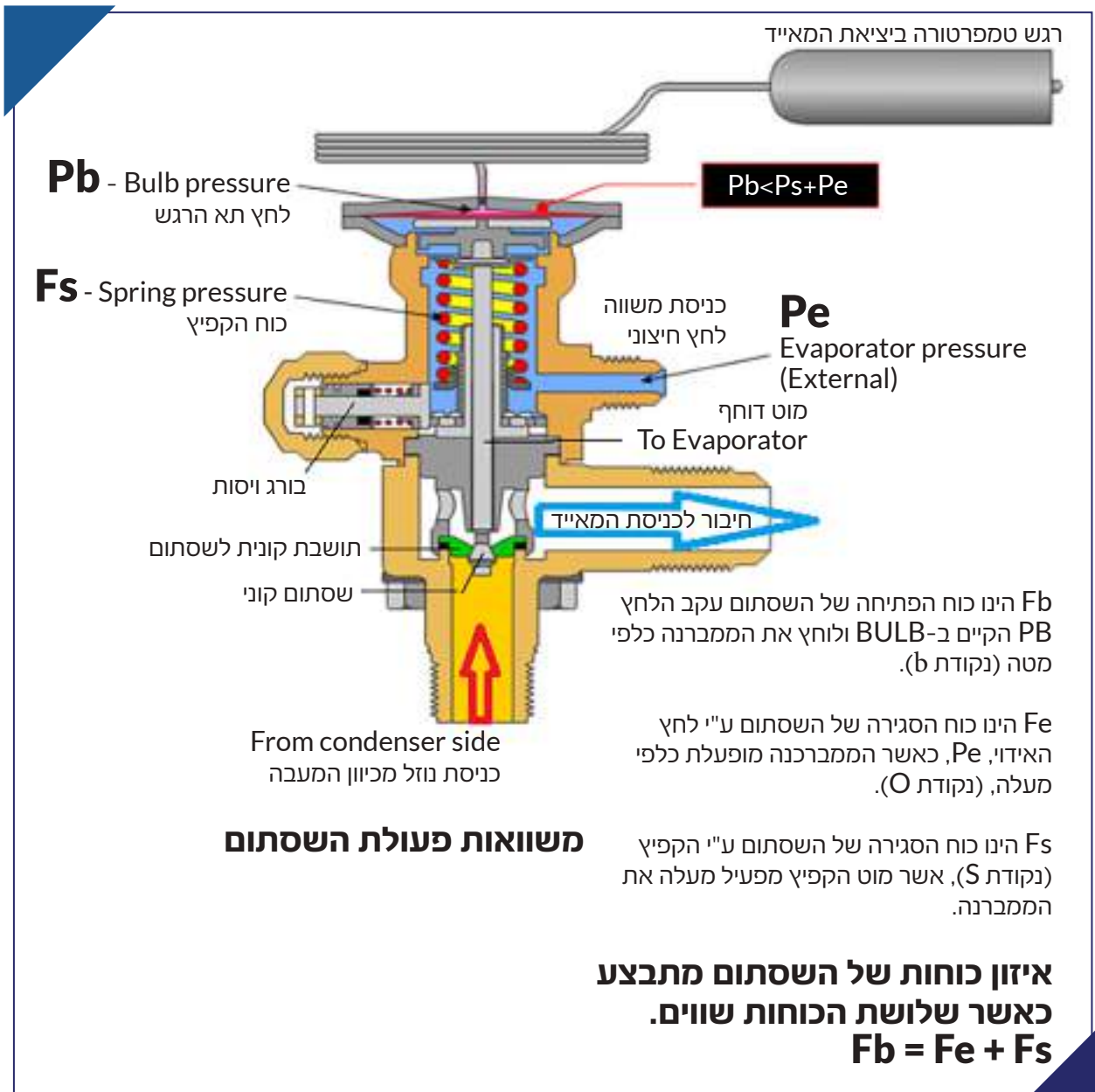
מכיוון שהלחץ בכניסת המאייד הוא אחד מהכוחות הפועלים ומשפיעים על פעולת השסתום, הרי **שכל עלייה** במפל הלחץ (**מפל לחץ** הוא ההפרש בין לחץ הכניסה [Pin] ובין הלחץ ביציאה [Pout] של מחליף החום) על סוללת המאייד, תגרום להקטנת הכוח הנובע מלחץ הרגש. הכוח הנובע מלחץ האיוד יגבר, והשסתום **ייסגר באופן חלקי או מלא**. מכאן נובע שכל **שגודלו הפיזי של המאייד ואורך נחשון האיוד גדולים יותר, כך יגדל הלחץ ($F2$) בכניסה למאייד ובחלל השסתום, דבר שיגרום לסגירת השסתום ולהקטנת** כמויות הקרר שיכנסו למאייד.

במצב זה, רמת חום השיחון תעלה והמאייד יעבוד במצב של חוסר קרר (Starved Evaporator). **יעילותו ויעילות כלל המערכת ייפגעו עד כדי חוסר יכולת למלא את תפקידם**. הלחץ הגבוה שנוצר בכניסה למאייד אינו משקף את לחץ האיוד בפועל. לכן, עלינו לנטרל את השפעת לחץ הכניסה למאייד על פעולת השסתום, ולהביא לתא שמתחת לדיאפרגמה "מידע" על לחץ האיוד בפועל. זאת כדי לאפשר קבלת רמת שיחון תקינה במאייד. כמו כן, עלינו לעשות זאת במטרה להביא את השסתום לפעולה המסתמכת על לחץ האיוד, המשקף את עומסי החום שבחלל המטופל, המשפיעים על הלחץ במאייד.

כדי לנטרל את השפעת לחץ הכניסה למאייד על פעולת השסתום, אנו משתמשים בשסתום התפשטות תרמי בו קיימת מחיצה המפרידה בין לחץ הכניסה לדיאפרגמה. בנוסף, מצויד שסתום זה בפתח כניסה נוסף המחובר באמצעות צינור לחלל שנוצר מתחת לדיאפרגמה. לחלל זה מוכנס קרר בלחץ הנלקח ישירות מקו היניקה בסמוך ליציאת המאייד, המשקף את לחץ האיוד "האמיתי". הצינור המחבר את אזור יציאת המאייד לשסתום ההתפשטות נקרא קו משווה לחץ חיצוני והוא מוכנס לשסתום דרך פתח מיוחד, שמחובר ישירות לחלל שמתחת לדיאפרגמה של השסתום.

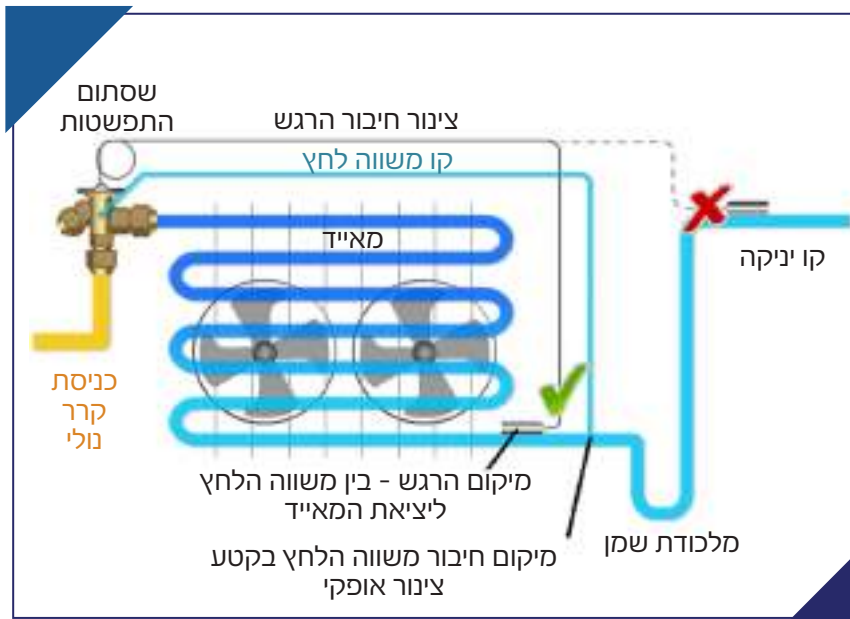
5.2.6.3 מבנה ופעולת שסתום התפשטות תרמי (תמונה 5.21)

תמונה 5.21 - שסתום התפשטות עם משווה לחץ חיצוני



באדיבות חברת Danfoss.

תמונה 5.22 - אופן התקנת שסתום התפשטות עם משווא לחץ חיצוני



5.2.6.3.1 התקנת שסתומי התפשטות תרמיים

בכדי לוודא שכל תהליך האיוד יתבצע בסוללת המאייד ולא מחוצה לה, יותקן שסתום ההתפשטות **קרוב ככל האפשר לכניסה למאייד, רצוי בקו אופקי ובהתאם לכיוון הזרימה המצוין בחץ על גבי השסתום**. אם בשל גודלו, יש למאייד **מעגלי קרר מרובים** (מעגלי משנה שתפקידם להקטין את מפל הלחץ הנוצר בין כניסת הקרר למאייד ובין היציאה מהמאייד, ולחלק בצורה שווה את נוזל הקירור בין כל מעגלי המשנה), משתמשים במחלקי זרימה קוניים המותקנים ביציאת השסתום.

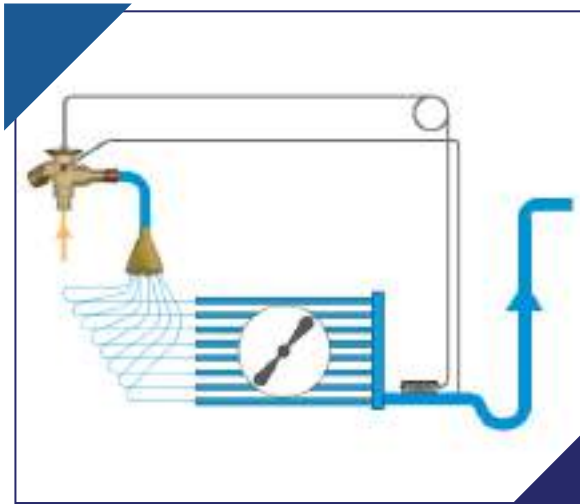
תמונה 5.23 - מחלק זרימה קוני



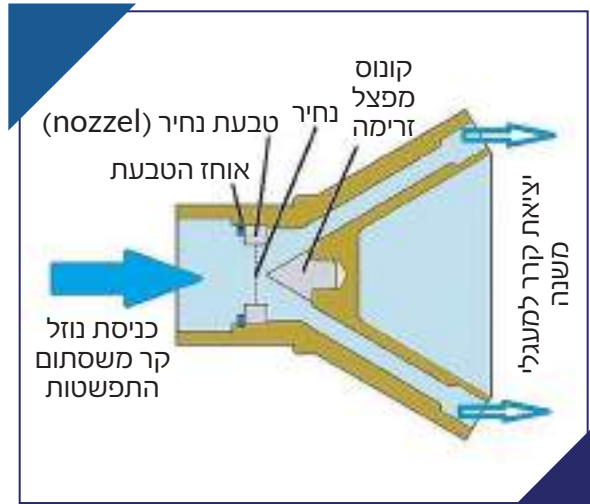
5.2.7 מחלקי זרימה (מפלג - Distributor)

המחלק מתחבר ליציאת השסתום. הזרימה הנכנסת אליו מכוונת באמצעות דיסקית בעלת קדח בקוטר המתאים לתפוקת השסתום אל גוף קוני, המכוון את הנוזל הקר לפתחי היציאה של המחלק. בשל ריבוי הצינוריות ומעגלי המשנה יש המכנים את המפלג גם בכינוי "עכביש" (Spider - ראו תמונות 5.24 ו-5.25).

תמונה 5.25 - התקנת שסתום התפשטות תרמי עם משווא לחץ חיצון ומחלק זרימה קוני



תמונה 5.24 - חתך של מחלק זרימה קוני



5.2.6.4 רגשי השסתום ומיקומם

כפי שתוארנו, **תפקידו של הרגש** לקרוא את טמפרטורת הקרר ביציאה מהמאייד, ובהתאם להפרש הנמדד בין טמפרטורת האיוד לטמפרטורת ביציאת המאייד (חום שיחון), **לפתוח או לסגור את מעבר הקרר דרך השסתום**.

לצורך בניית הלחץ ברגש, טוענים את הרגש בנוזל:

- הנוזל, הנמצא בנפח מוגבל, **יהפוך לגז** עם העלייה בכמות החום שקולט הרגש, או **יחזור להיות נוזל** עם ירידת הטמפרטורה והקטנת כמות החום הנקלט בו.
- איוד החומר **יגדיל את הלחץ** ברגש ובאזור שמעל הדיאפרגמה של השסתום, ויביא לפתיחתו.
- **מנגד**, החזרת **החומר למצב נוזלי** תגרום להקטנת הלחץ ברגש, ולסגירת מעבר הקרר דרך השסתום.

במטרה לאפשר את התאמת השסתום למגוון מערכות ובמגוון מצבי פעולה, יש ארבע שיטות למילוי הרגשים המותקנים בשסתומי התפשטות תרמיים:

א. **מילוי הרגש בנוזל הזהה בתכונותיו לקרר הפועל במערכת (Liquid Charge Bulb)**. מיועד למערכות הפועלות בטמפרטורות איוד בינוניות (חדרי קירור והקפאה), או גבוהות (מערכות מיזוג או מקררים לטמפרטורות מעל 0°C). בשיטה זו, עליית הטמפרטורה ברגש כתוצאה משיחון גבוה, מובילה **לעליית לחץ** ברגש, ותגובת השסתום מתאימה לצורך בהזרמת כמויות גדולות יותר של קרר למאייד. **לחלופין**, הלחץ ברגש ירד עם ירידת טמפרטורת השיחון, ויביא להקטנת כמויות הנוזל הנכנסות למאייד ולמניעת הצפתו.

חסרונה של שיטה זו הוא **שאינ הגבלה ללחץ** שיכול להיבנות ברגש. לפיכך, רגש החש בחום קיצוני כמו בזמן הזרמת גז חם דרך המאייד במצב הפשרה, **יגרום לפתיחה מקסימלית** של השסתום לאורך זמן ויביא להצפת המאייד בנוזל, תוך אפשרות לגלישת עודפי הנוזל לכיוון יניקת המדחס והצפתו.

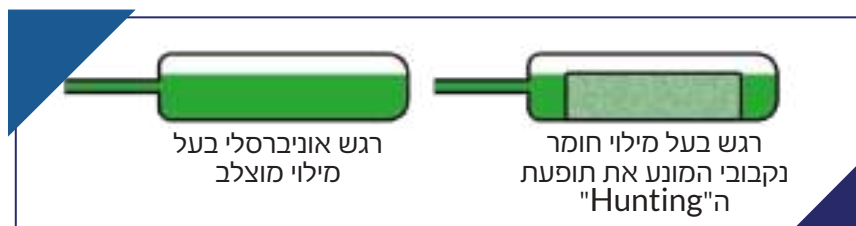
ב. **רגש בעל מילוי בחומר שתכונותיו שונות מתכונות הקרר הפועל במערכת, מילוי צולב (Cross Universal Liquid Charge Bulb)**. בשיטה זאת, הנוזל הנטען ברגש בעל תכונות שונות מתכונות הקרר הפועל במערכת, ותגובתו "מהירה יותר". כלומר במצבים בהם הלחץ במאייד עולה עקב כיבוי המערכת, הלחץ ברגש אינו עולה, **ומנקודה מסוימת השסתום מתחיל להיסגר ומונע** את הצפת המאייד בקרר נוזלי.

החסרון בשיטה זו הוא שכל שינוי בטמפרטורת קו היניקה גורם לפתיחה/סגירה מהירים של השסתום, תופעה הנקראת **Hunting** וגורמת לירידה בתפוקת המערכת וביעילותה.

ג. **רגש הממולא בגז (Vapor Charge Bulb)**, **מילוי חלקי**. ברגש זה טוענים נוזל (התואם לקרר שבמערכת) בכמות קטנה מאוד, **כך שכל שהטמפרטורה ברגש עולה, כך כמות הנוזל יורדת** עד שהוא מתאדה כולו. מרגע זה, המשך עליית הטמפרטורה בקו היניקה וברגש לא יגרמו לעליית הלחץ מעל הדיאפרגמה, וכמות הקרר שיעביר השסתום למאייד תישאר קבועה. **רגש זה שימושי** במערכות להקפאה עמוקה, בהן טמפרטורת הרוויה נמוכה מאד, ויש חשש לפתיחה מקסימלית של השסתום גם בטמפרטורות נמוכות יחסית. בגלל תכונה זאת, רגשים בעלי מילוי חלקי נקראים גם רגשי M.O.P (Maximum Operating Pressure).

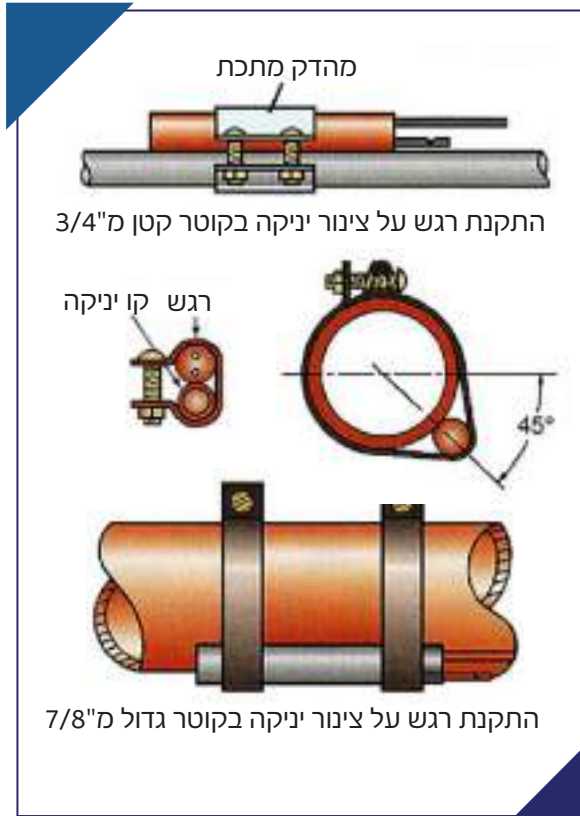
ד. **רגש בעל מילוי חלקי צולב (Cross Vapor Charge)**. נקרא גם רגש "Anti-hunting". השוני הוא במבנהו הפנימי, הבנוי בצורת אבן חרס בעלת חללים פנימיים, בהם מאוחסן חומר המילוי של הרגש. הדבר מעכב את ההתפשטות של החומר בזמן עליית הטמפרטורה, מאפשר קבלת תגובות איטיות יותר של השסתום, מונע את תופעת ה-"Hunting", ומאפשר למאייד "לטפל" בקרר ללא שינויים חדים בטמפרטורת השיחון (ראו תמונה 5.26).

תמונה 5.26 - מילוי רגשים אוניברסלי ומילוי "אנטי האנטינג"

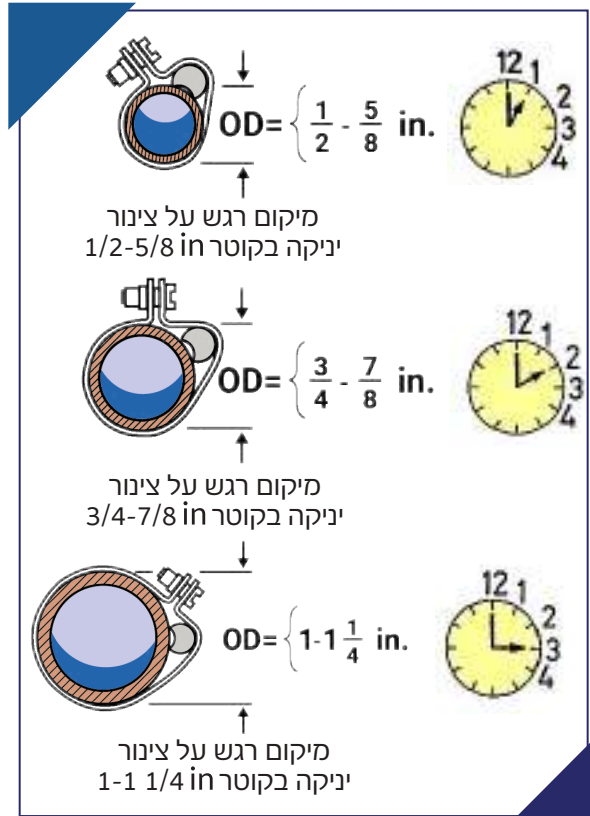


ככלל, ימוקמו הרגשים על צינור היציאה מהמאייד בקטע אופקי, ובסמוך ככל האפשר ליציאת המאייד, לפי הנחיות היצרן. כדי להימנע מהשפעת החום שאוגר השמן הזורם בקו היניקה ושנצמד אל הדופן הפנימית של הצנרת, **מרחיקים את הרגש מאזור ההיקוות של השמן.** לכן, בצינורות בעלי קוטר קטן, הרגש ימוקם בחלקו העליון של הצינור (שעה 12). ככל שקוטר הצינור גדל, כך ניתן למקם את הרגש נמוך יותר עד למיקומו מתחת לקו החצי (ראו תמונה 5.27).

תמונה 5.28 - אופן הידוק רגשים לקו יניקה



תמונה 5.27 - מיקום רגשים לפי קוטר קו היניקה



5.2.6.5 חיבור הרגשים לקו יניקה

הרגשים יוצמדו לקו היניקה באמצעות **חבקים** המסופקים עם השסתום. כמו כן, במטרה **לאפשר לרגש להיות מושפע** רק מטמפרטורת צינור היניקה, יש לבודד מהסביבה את **הרגש** ואת **קטע הצינור** אליו הוא מוצמד.

5.2.6.6 תקלות נפוצות בשסתומי התפשטות**תקלות הגורמות להצפת המאייד והקטנת השיחון**

1. **שסתום בעל דיזה גדולה מדי:** בחירת דיזה גדולה מהרצוי תגרום לכך שגם במצב פתיחה מינימלי, כמות הקרר הנכנס למאייד תהיה גדולה מהיכולת של המאייד להפוך לגז. כתוצאה מכך יש חשש שהקרר שלא יתאייד יציף את המאייד ואת קו היניקה של המדחס.
2. **רגש שאינו מהודק לצינור היניקה:** רגש שאינו צמוד לחלוטין לצינור היניקה, ירגיש טמפרטורה גבוהה יותר מטמפרטורת האיוד. הלחץ שלו בכיוון פתיחת הדיזה יגדל, והמאייד יוצף בנוזל. השיחון הרצוי לא יישמר, ויש חשש כי ייכנס קרר נוזלי למדחס.
3. **כיוון רמת חום שיחון לא נכונה:** כיוון טמפרטורת השיחון נעשית באמצעות בורג ויסות הנמצא על השסתום. כיוון התחלתי של טמפרטורת שיחון נמוכה (שחרור הקפיץ) יגרום לכניסת עודף קרר והצפת המאייד.

תקלות הגורמות לשיחון גבוה

1. **סתימה באזור כניסת הקרר לשסתום:** הסתימה יכולה להיגרם כתוצאה מלכלוך או משקעים הסותמים את המסנן המורכב לפני הדיזה, או את הדיזה עצמה. כתוצאה מכך, כמות הקרר הנכנסת לשסתום תקטן משמעותית, ותביא להגדלת השיחון.
2. **מיקום הרגש לא מבודד באזור קר:** אם הרגש מותקן על צינור היניקה בקטע העובר בתוך אזור קר מאוד (חדר הקפאה וכולי), מבלי שמבודדים בינו ובין האוויר הקר העוטף אותו, הטמפרטורה הנמוכה שבה מצוי הרגש תגרום לסגירת השסתום והקטנת כמות הקרר שתעבור למאייד.
3. **התקנת דיזה קטנה מהרצוי:** דיזה קטנה מהרצוי לא תאפשר לכמות קרר מתאימה להיכנס למאייד ותביא ל"הרעבת" המאייד ויצירת שיחון גבוה.
4. **התקנת שסתום ללא משווה לחץ חיצוני במאיידים גדולים:** כפי שהוסבר בסעיף הקודם, במאיידים בעלי אורך צנרת גדול, מפל הלחץ המתפתח בכניסה למאייד יגרום לסגירת השסתום בטרם עת ולתופעת שיחון גבוה מהרגיל.

5.2.6.7 בחירת שסתומי התפשטות**כדי לבחור ולהתאים את שסתומי ההתפשטות למערכת עלינו להגדיר את הפרמטרים הבאים:**

1. תפוקת השסתום (המערכת) ביחידות טון קירור (T.R) או ביחידות קילוואט (KW).
2. סוג הקרר הזורם במערכת.
3. טמפרטורת העיבוי (Tc).
4. טמפרטורת האיוד (Te).
5. הפרש הלחצים (לחץ העיבוי פחות לחץ האיוד ופחות סכום מפלי הלחץ). הפרש הנוצר על כלל רכיבי מערכת הקירור עקב זרימת הקרר דרכם.

מצוידים בנתונים אלה יש לגשת לטבלאות המתפרסמות על ידי יצרני השסתומים ולבחור את השסתום הרצוי (דגם, גודל) ואת הדיזה המתאימה כדי לקבל את התפוקה הנדרשת.

דוגמה להליך בחירת שסתום התפשטות

טבלה 5.1 - התאמת שסתום התפשטות לפי סוג המתקן, תפוקה וסוג הקרר

DANFOSS TYPE TUA (E), TUB (E), T(E)2, TDE, TDEB, TE, TXI 2, AKV													
שסתומי התפשטות טרמיים של חברת "דנפוס"													
חיבורים			Body Type	תפוקה בטון קירור						דגם משני models	תכונות Features	סוג המתקן Applications	דגם השסתום
ODF X ODF	SAE x ODF	SAE x SAE		משווא לחץ	תצורת גוף	R-407C	/R404 507	R-134a	R-502				
1/4x3/8 1/4x1/2 3/8x3/8 3/8x1/2 1/2x5/8			משווא לחץ פנימי או חיצוני	ישר	01.18-4.80	0.13-3.50	0.13-3.50		0.17-4.50			מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	TUA €
1/4x3/8 1/4x1/2 3/8x3/8 3/8x1/2			משווא לחץ פנימי או חיצוני	ישר או זוויתי	"01.18-4.80"	0.19-3.50	0.19-3.50		0.17-4.50			מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	TUB €
1/4x3/8 1/4x1/2 3/8x3/8 3/8x1/2			משווא לחץ פנימי או חיצוני	ישר או זוויתי	01.18-4.80	0.19-3.50	0.19-3-50		0.17-4.50			מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	TUC €
1/4x1/2 3/8x1/2	3/8 x 1/2	3/8 x 1/2	משווא לחץ פנימי או חיצוני	זוויתי		0.11-2.60	0.11-3.00	0.20-3.00	0.15-4.50	0.20-3.00		מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	T€2
3/8x5/8 1/2x5/8 1/2x7/8 5/8x7/8			משווא לחץ פנימי או חיצוני	straightway	3.0-7.5				3.0-7.5			מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	TDE
5/8x7/8 5/8x 1-1/8 7/8x 1-1/8 7/8x 1-3/8 1-1/8x 1-3/8			משווא לחץ פנימי או חיצוני	ישר	7.5-40.0				7.5-40.0			מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	TDEB
1/2x5/8 1/2x7/8 5/8x7/8		1/2 x 5/8	משווא לחץ פנימי או חיצוני	ישר או זוויתי		3.7-10.3 4.2-13.4 16.5 37.0-56.0	3.7-11.2 4.7-15.0 18.0 41.0-62.0	2.0-8.0 3.0-12.0 20.0 24.0-40.0	3.0-12.0 4.5-30.0 33.0-50.0 55.0-85.0	2.0-8.0 3.0-12.0 20.0 50.0	TE 5 TE 12 TE 20 TE 55	מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	TE
5/8x7/8 7/8x1 7/8x 1-1/6	3/8 x 1/2	3/8 x 1/2	משווא לחץ פנימי או חיצוני	זוויתי					.32-3.36			מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	TXI2
7/8x 1-1/8		3/8 x 1/2 1/2 x 5/8	משווא לחץ פנימי או חיצוני	ישר או זוויתי		0.2-1.8 5.6-22.2	0.2-4.4 6.0-24.0	0.2-3.9	0.3-5.7 7.2-29.0 28.0-179.0		AKV 10 AKV 15 AKV 20	מקררי תצוגה במרכולים חדרי קירור פתוחים במרכולים, מיזוג אוויר ביתי / מסחרי, מכונות קרח, הובלה בקירור.	AKV

טבלה 5.2 - טבלת התאמת דיזות לשסתומים לפי סוג הקרר, סוג השסתום ותפוקת המערכת (TR)

דגם השסתום	דיזה מספר	R407F	R407A	R404A/R507	R22	R134a	R407C	R407F	R407A	R404A/R507/	R22	R134a	R407C	.Code no
TE 5	0.5	11	10.3	8.17	10.4	6.68	10.7	3.14	2.92	2.33	2.97	1.91	3.06	067B2788
	1	20.3	18.8	14.9	19.1	12.2	19.6	5.76	5.35	4.26	5.46	3.49	5.6	067B2789
	2	28.1	25.9	20.5	26.3	17	27.2	8	7.37	5.86	7.51	4.86	7.77	067B2790
	3	35.8	33.3	26.3	33.8	21.8	34.8	10.2	9.48	7.51	9.66	6.23	9.94	067B2791
	4	49	45.3	35.7	46	29.7	47.4	13.9	12.9	10.2	13.1	8.49	13.5	067B2792
TE 12	5	71	56	50.7	57.2	37.7	55.8	20.3	16.1	14.5	16.3	10.8	15.9	067B2708
	6	95	75	64	76.3	50.1	73.9	27.1	21.4	18.3	21.8	14.3	21.1	067B2709
	7	115	96	81.3	97.8	65.7	94.3	32.7	27.5	23.2	27.9	18.8	26.9	067B2710
TE 20	8	141	126	87.1	128	77.8	118	40	36	24.9	36.6	22.2	33.7	067B2771)1
	9	161	148	102	150	92.3	136	45.9	42.1	29.1	42.9	26.4	38.9	067B2773)
TE 55	9B	124	112	84.8	113	77.9	112	35.3	31.8	24.1	32.2	21.9	31.7	067G2705)
	10	173	166	128	169	111	161	49.1	47.4	36.6	48.3	31.7	46	067G2701
	11	188	181	138	184	122	175	53	52	39.4	52.6	34.9	50	067G2704
	12	207	199	152	202	134	191	59	57	43.4	57.7	38.3	54.6	067G2707
	13	250	242	182	245	166	232	71	69	25	70	47.4	66.3	067G2710

5.2.6.8 שסתומי התפשטות חשמליים EEV – Electronic Expansion Valve

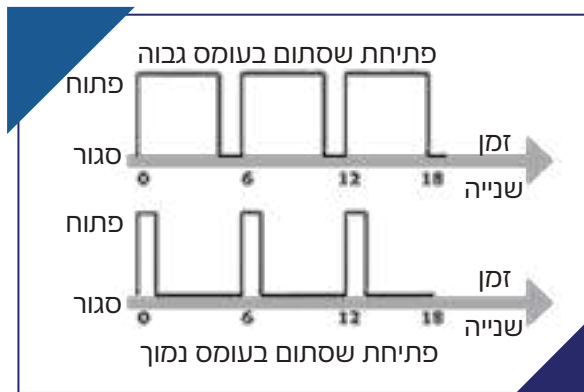
- **שסתומי התפשטות חשמליים פותחו במטרה** לצמצם את תופעות אי הדיוק הנובעות משימוש ברגשי הטמפרטורה הסטנדרטיים הנצמדים לצד החיצוני של צינור היניקה, ואת הצורך בשימוש בצינור משווה לחץ חיצוני.
- השימוש בהם **מקטין** את זמן ההשהיה בפעולת הפתיחה והסגירה של השסתומים, דבר המונע הרעבה או הצפה של המאייד במצבים של שינויים מהירים בעומסי החום המופעלים על המאייד.
- שסתומים אלה "קוראים" את נתוני הטמפרטורה והלחץ שביציאת המאייד באמצעות רגשי טמפרטורה (תרמיסטורים) ולחץ (מתמרי לחץ) חשמליים, המתרגמים את הנתונים מאותות אנאלוגיים לאותות חשמליים.
- האותות מועברים ליחידת בקרה המפעילה את השסתום לפתיחה או לסגירה, תוך כדי מעקב (משוב) רציף על רמת השיחון הנוצר במאייד.

שני סוגים עיקריים של שסתומים חשמליים

א. שסתומים בעלי סליל חשמלי המייצר כוחות מגנטיים

שסתומים אלה בעלי פתח כניסה קוני, הנעים מעלה לפתיחה או מטה לסגירה באמצעות אלקטרו-מגנט המשנה את מצבו (ראו תמונות 5.29 ו-5.30).

תמונה 5.30 - גרף פעולת שסתום On-Off



תמונה 5.29 - שסתום התפשטות מגנטי (On-Off)



באדיבות חברת Danfoss.

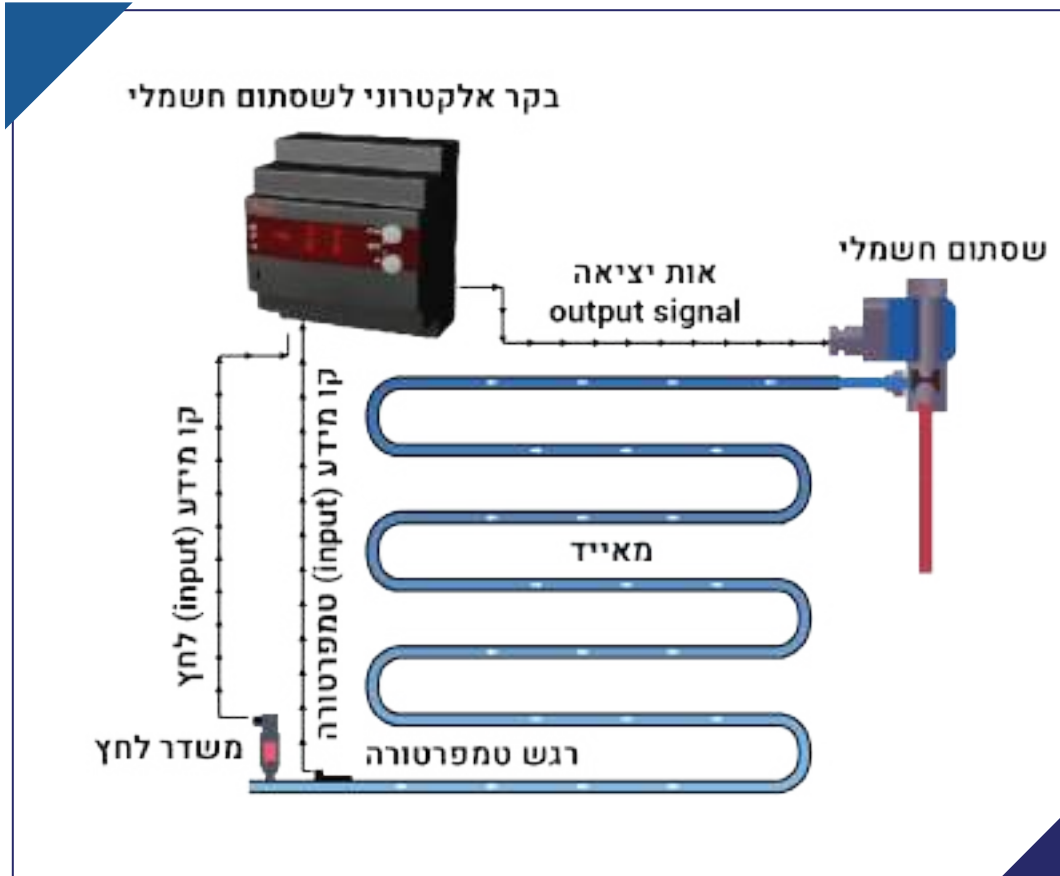
ב. שסתומי התפשטות בעלי מנועים חשמליים במתח ישר (D.C)

שסתומים אלה מופעלים באמצעות מנועים חשמליים, הנשלטים על ידי בקר אלקטרוני. הבקר מקבל אינפורמציה מרגשי לחץ וטמפרטורה, וממיר את האותות הנכנסים לפקודות דיגיטליות המפעילות מנועים חשמליים. אלה מניעים את השסתומים לפתיחה ולסגירה בהתאם לדרוש, באמצעות תמסורת.

תמונה 5.31 - שסתומי התפשטות בעלי מנועים חשמליים במתח ישר

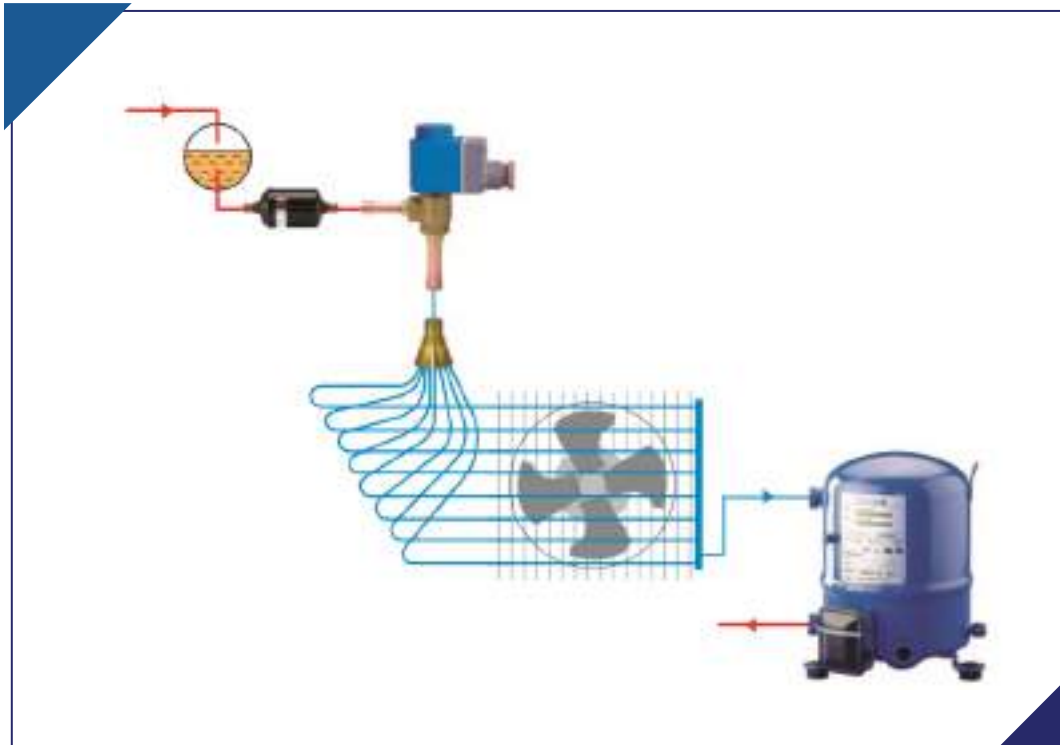


תמונה 5.32 - התקנת שסתום חשמלי עם בקר אלקטרוני לשסתום חשמלי



באדיבות חברת Danfoss.

תמונה 5.33 - מיקום שסתום חשמלי EEV ומחלק זרימה



באדיבות חברת Danfoss.

סוגי מנועים**מנועים רציפים**

מנועים רציפים נעים ברציפות כל עוד הם מוזנים במתח לכיוון פתיחה או סגירה, בהתאם לקוטביות הנקבעת על ידי יחידת הבקרה. **חסרונם** הוא ביכולתם לנוע מעבר לנדרש, וליצור מצבים של פתיחה או סגירת יתר של השסתום. דבר שיצריך הפעלת מנוע השסתום לכיוון הנגדי במטרה לתקן את הסטייה, **וכך שוב ושוב עד לקבלת פתיחה מדויקת.**

מנועי צעד (Step-Motor)

מנועי צעד מסוגלים לנוע בצעדים בעלי ערך קבוע, החל ממעלה אחת ויותר. **תכונה זו מאפשרת ליחידת הבקרה להוציא אות בעל ערך מדויק**, שיביא את השסתום בפעולה בודדת למצב הרצוי.

5.2.7 אמצעי התפשטות למאיידים מוצפים

המאיידים במערכות קירור ומיזוג אוויר **נחלקים לשני סוגים:**

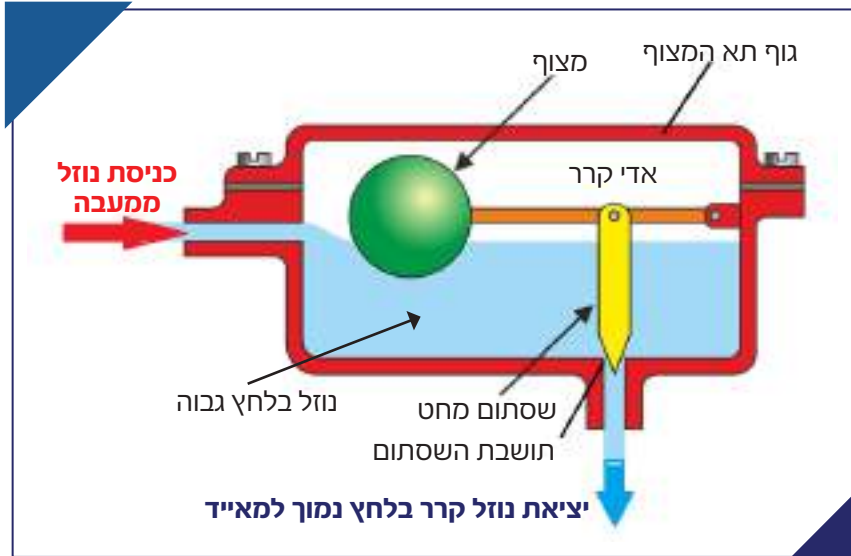
- מאיידים יבשים:** בהם כמות הקרר הנוזלי המוכנסת על ידי אביזרי ההתפשטות למיניהם מותאמת לעומס החום שבו צריך לטפל. **האינדיקציה לפעולה תקינה** של שסתומי ההתפשטות לסוגיהם היא שמירה על רמה קבועה ונכונה של מידת השיחון.
- מאיידים מוצפים:** משמשים בדרך כלל במערכות בהן ייתכנו **שינויים קיצוניים** בעומסי החום על המאייד. לדוגמה מערכות מיזוג אוויר גדולות ומערכות לקירור תהליכים, בהן נדרשת תגובה מהירה של המאייד. תגובה מהירה מושגת על ידי אגירת כמות גדולה של קרר נוזלי בטמפרטורות נמוכות במאייד (בדרך כלל מאיידים מסוג תרמיל וצינורות).

לצורך שמירה על מפלס נוזל הקירור במאיידים מוצפים, משתמשים באביזרים המשלבים פעולת שבירת לחץ (תהליך אדיאבטי לקירור הנוזל) עם מנגנון שמירת מפלס נוזל כמתואר להלן:

5.2.7.1 מצוף לחץ גבוה - High Side Float Valve

מצוף לחץ גבוה הוא אביזר המותקן בסמוך למאייד, בו מאוחסן חלק מהקרר הנוזלי שעזב את המעבה. המצוף שבתוכו מכוון להיפתח ולהעביר את הנוזל החם, דרך החריר (דיזה) עם עליית מפלס הנוזל. עליית מפלס הנוזל בחלל תא המצוף מהווה אינדיקציה לירידת כמותו במאייד, ולצורך להזרים אליו שוב נוזל קר. כל זאת, בכדי לשמור על מפלס קבוע של נוזל במאייד המוצף. **שמו של האביזר, מצוף לחץ גבוה**, נובע מכך שהנוזל הנמצא בתא המצוף מגיע מהמעבה, ונמצא לפני הדיזה שבה מתבצעת פעולת שבירת הלחץ, המקטינה את לחץ הנוזל ללחץ האיוד.

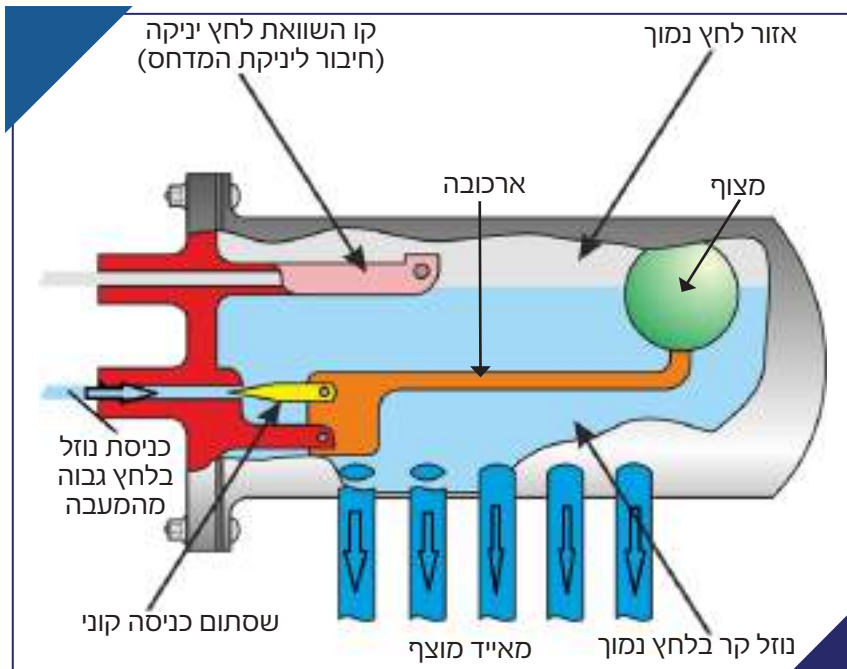
תמונה 5.34 - מבנה ורכיבי מצוף לחץ גבוה



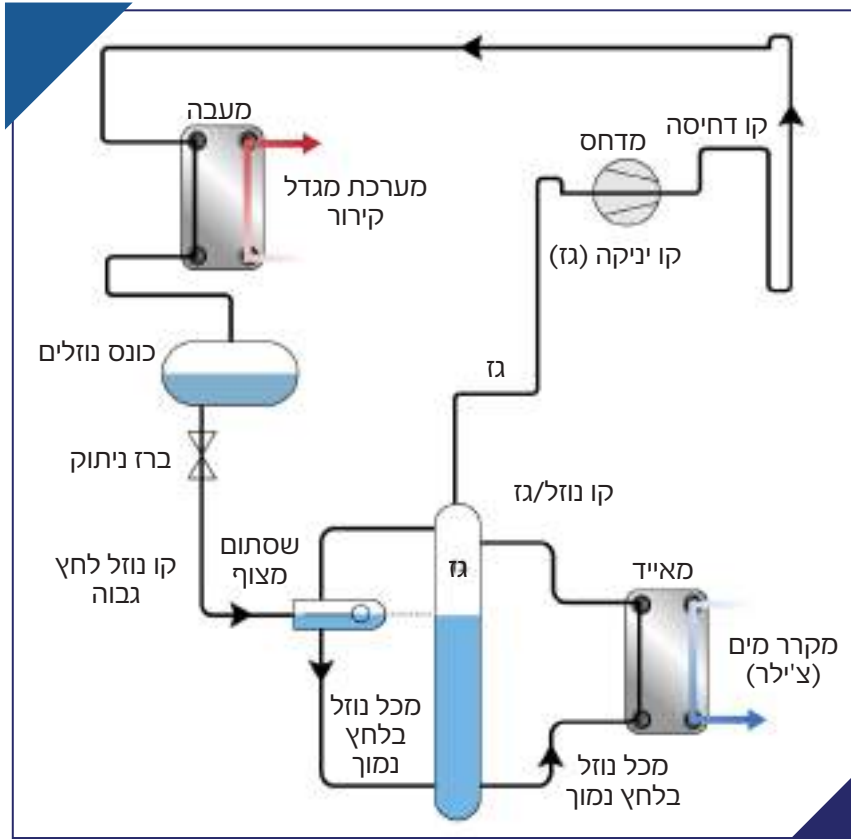
5.2.7.2 מצוף לחץ נמוך - Low Side Float Valve

באביזר זה, הקרר המצטבר בתא המצוף נמצא בצד הלחץ הנמוך, לאחר שעבר את תהליך שבירת הלחץ בכניסה לתא המצוף. בניגוד למצוף לחץ גבוה שיכול להיות מותקן בכל מקום ביחס למאייד, מצוף לחץ נמוך חייב להיות מותקן במקביל למאייד. זאת מכיוון שעיקרון מדידת המפלס מבוסס על עקרונות חוק הכלים השלובים. ניתן גם להשתמש באביזר מצוף לחץ נמוך לצורך שמירת מפלס הנוזל ביותר ממאייד מוצף אחד, ובתנאי שכל המאיידים יהיו במפלס אחד.

תמונה 5.35 - חתך ורכיבי מצוף לחץ נמוך

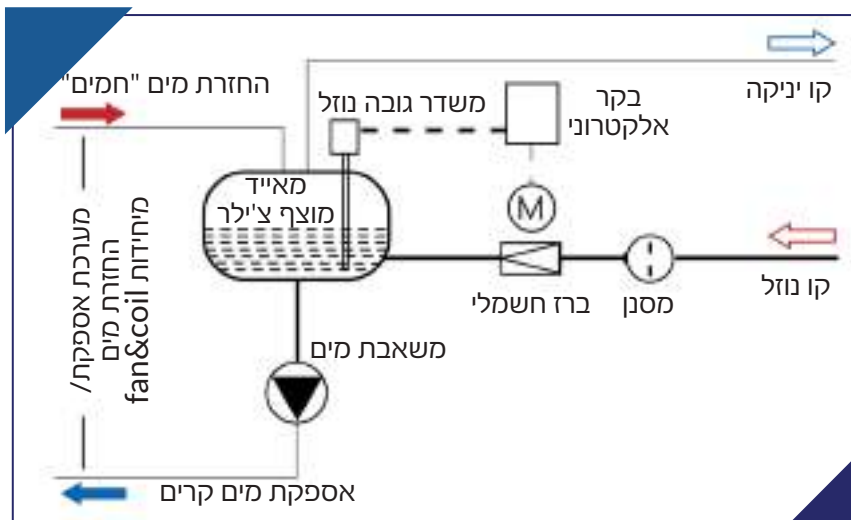


תמונה 5.36 - מיקום מצוף לחץ נמוך ביחס למערכת



5.2.7.3 שומר גובה חשמלי

תמונה 5.37 - שומר גובה חשמלי למאיד מוצף



- מורכב בתא המותקן במקביל למאיד ופועל על פי עיקרון כלים שלובים.
- מותקן בחלל הנמצא בתוך המאיד.

רגש גובה הנוזל פועל באחת מהשיטות הבאות:

- אלקטרודות ייחוס (בדרך כלל 3 אלקטרודות): עלייה או ירידה במפלס הנוזל במאייד, גורמת לקצר בין אלקטרודת הייחוס לאלקטרודות האחרות. עם הגעת המפלס לאלקטרודת המינימום, יפתח הברז החשמלי, ונוזל יכנס למאייד. כשהמפלס יגיע לאלקטרודת המקסימום, הברז ייסגר.
- אלקטרודה קיבולית רציפה (פרופורציונלית): השתנות החשיפה של האלקטרודה לנוזל הסובב אותה גורמת לשינוי אות הכניסה לבקר השולט על הברז החשמלי. בשיטה זו אפשר לפתוח את הברז ביחס משתנה (דיפרנציאלי) בהתאם לגובה המפלס ולכמות הנוזל שניתן להכניס למאייד.

שאלות סיכום

1. רגש של שסתום התפשטות תרמי במערכת מיזוג האוויר נשבר. כתוצאה מכך, שסתום ההתפשטות:
 - א. ייסגר למינימום.
 - ב. יפתח למקסימום.
 - ג. ייתקע במצב הקיים.
 - ד. יציף את המאייד בקרר נוזלי.

2. חוסר תפוקת קירור בשסתום התפשטות יכול להיגרם בגלל:
 - א. טעות בבחירת גודל השסתום או כיוון לא נכון של הקפיץ.
 - ב. רגש שניתק מצינור היניקה.
 - ג. דיזה גדולה מדי שהותקנה בשסתום.
 - ד. פגם במנגנון הכיוון האוטומטי של השסתום.

3. סגירת (הידוק) הקפיץ של שסתום ההתפשטות גורמת ל:
 - א. שיחון גבוה והקטנת תפוקת קירור.
 - ב. שיחון נמוך ללא השפעה על התפוקה.
 - ג. לחץ יניקה גבוה.
 - ד. לחץ דחיסה נמוך.

4. משווה לחץ חיצוני בשסתום התפשטות המורכב לפני מאיידים גדולים מיועד להתגבר על:
 - א. הפרש הלחצים השורר בין הכניסה והיציאה של המאייד.
 - ב. המרחק הפיזי הגדול שבין הכניסה והיציאה של המאייד.
 - ג. זיוף בקריאה של טמפרטורת היניקה, כפי שמרגיש רגש השסתום.
 - ד. עומסי חום שהשסתום לא תוכנן עבורם.

5. הקשר בין ממדי האורך, שטח החתך, ומפל הלחץ בצינור נימי הוא:
 - א. ככל שהאורך גדל ושטח החתך קטן, מפל הלחץ קטן.
 - ב. ככל שהאורך קטן ושטח החתך גדל, מפל הלחץ גדל.
 - ג. ככל שהאורך גדל ושטח החתך קטן, מפל הלחץ גדל.
 - ד. אין השפעה לשטח החתך אלא לאורך בלבד.

6. במתקן קירור, צד הלחץ הגבוה נמצא:
 - א. ביציאה מהמאייד ועד הכניסה למדחס.
 - ב. ביציאה מהמדחס ועד לכניסה לשסתום התפשטות.
 - ג. ביציאה מהמעבה ועד לכניסה לשסתום התפשטות.
 - ד. ביציאה משסתום התפשטות ועד לכניסה למדחס.

7. שסתום התפשטות אוטומטי:
- שימושי לתפוקות גדולות במתקנים בעלי עומס משתנה.
 - שימושי לתפוקות גדולות במתקנים בעלי עומס קבוע.
 - שימושי לתפוקות קטנות במתקנים בעלי עומס קבוע.
 - אינו שימושי במתקני קירור.
8. התהליך שחל בשסתום ההתפשטות הוא:
- מעבר מגז בלחץ נמוך לגז בלחץ גבוה.
 - מעבר נוזל מלחץ גבוה ללחץ נמוך.
 - מעבר מנוזל בלחץ נמוך ללחץ גבוה.
 - מעבר מגז לנוזל או מנוזל לגז.
9. קביעת גודל מפל לחץ הנדרש בשובר הלחץ (שסתום התפשטות) נקבעת בהתאם ל:
- לחץ הדחיסה והיניקה הנדרשים.
 - לחץ היניקה וטמפרטורת היניקה.
 - טמפרטורת האיזוד והעיבוי של המערכת.
 - לחץ הדחיסה וטמפרטורת העיבוי.
10. המפלט (Distributor) במערכת קירור:
- מורכב ביציאה מהמאייד.
 - מאפשר קבלת לחץ הפוך.
 - כולל שסתום מתכוונן.
 - מורכב אחרי שסתום ההתפשטות.

מר יצחק הרשקוביץ: 1.6, 1.7, 1.8, 1.10, 1.11, 1.14, 1.15, 1.16, 1.17, 3.4, 3.6, 4.21, 4.22

Alpha level: 3.5

Bitzer: 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.9, 2.1, 2.2, 2.25, 3.1, 3.7, 3.8, 3.9, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.23, 3.24, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.31, 3.33, 3.34, 3.35, 4.12, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.29, 4.30, 4.31, 4.35, 4.38, 4.39, 4.49, 4.51, 4.54, 4.56, 4.62, 4.63, 4.57, 4.58, 4.59, 4.60, 4.64, 4.65, 4.68, 4.69, 4.70, 4.74, 4.75, 4.76, 4.77, 4.79, 4.81, 4.96, 4.97, 4.98, 4.99, 4.108, 4.109, 4.111, 4.112, 4.123, 4.124, 5.7, 5.8, 5.10, 5.11, 5.14

Bundy: 5.16

Danfoss: 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 3.30, 3.32, 4.13, 4.14, 4.25, 4.32, 4.33, 4.34, 4.38, 4.40, 4.42, 4.43, 4.90, 4.91, 4.92, 5.6, 5.18, 5.19, 5.20, 5.23, 5.29, 5.30, 5.31

Frogz Studio: 4.1, 4.3, 4.9, 4.11, 4.19, 4.23, 4.24, 4.26, 4.27, 4.28, 4.36, 4.71, 4.44, 4.45, 4.46, 4.47, 4.48, 4.49, 4.50, 4.52, 4.53, 4.55, 4.59, 4.66, 4.67, 4.71, 4.72, 4.73, 4.78, 4.79, 4.80, 4.82, 4.83, 4.84, 4.85, 4.86, 4.87, 4.88, 4.89, 4.101, 4.102, 4.103, 4.104, 4.105, 4.106, 4.107, 4.108, 4.109, 4.110, 1.113, 4.114, 4.115, 4.116, 4.117, 4.118, 4.119, 4.120, 4.121, 4.122, 5.1, 5.2, 5.3, 5.13, 5.17, 5.21, 5.22, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35

Istock: 1.12, 1.13, 1.18, 1.19, 1.20, 3.2, 3.22, 3.3, 5.4, 5.5

Parker: 5.15

Rafco: 5.9, 5.12

Wilter: 4.61

מערכות קירור ומיזוג אוויר

הספר מספק מידע יסודי על העקרונות הבסיסיים והמתקדמים של מערכות קירור ומיזוג אוויר. הוא מקיף הן את עקרונות המקצוע והן את ההיבטים הטכנולוגיים הנדרשים לעבודה בטוחה ומקצועית במערכות המודרניות בימינו. החל מעיקרון פעולת המערכות, דרך מרכיבי המערכת וכלה ברגולציה והיבטים סביבתיים, ומומלץ לכל העוסקים בתחום.