

## הנדסת אוויר דחוס

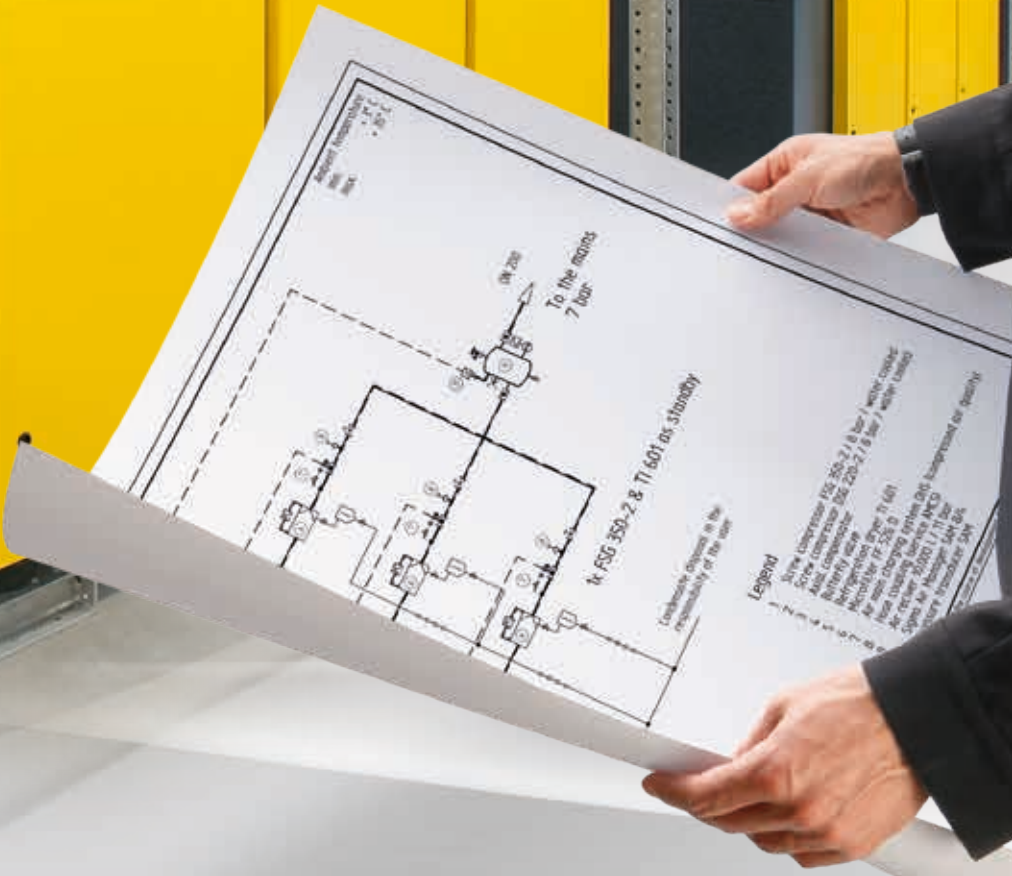
מושגים, עקרונות ועצות שימושיות



Kompressor 5

KAESER

FSD 571



# תוכן העניינים

## מושגים בסיסיים

4	..... עקרונות בסיסיים בהנדסת אוויר דחוס	פרק 1
6	..... הטיפול היעיל באוויר דחוס	פרק 2
8	..... למה לייבש את האוויר הדחוס?	פרק 3
10	..... משקעים: הביקוד הנכון	פרק 4
12	..... משקעים: הטיפול הנכון והחסכוני	פרק 5
14	..... בקרת מדחס יעילה	פרק 6
18	..... להתאים את המדחסים לצריכת האוויר הדחוס	פרק 7
20	..... לחסוך באנרגיה באמצעות מיחזור חום	פרק 8
22	..... ליצור רשת אוויר דחוס חדשה	פרק 9
24	..... לשדרג רשת אוויר דחוס קיימת	פרק 10
26	..... ניתוח צרכים (ADA) – להגדיר מצב קיים	פרק 11
30	..... להגדיר את הפתרון הטוב ביותר	פרק 12
32	..... לקרר ביעילות את התחנה	פרק 13
34	..... להבטיח אמינות לטווח ארוך ואופטימיזציה של עלויות	פרק 14

## עצות שימושיות

40	..... חיסכון גדול יותר עם לחץ אופטימלי	עצה 1
42	..... לחץ נכון בחיבורים	עצה 2
44	..... חלוקת אוויר דחוס יעילה	עצה 3
46	..... הצנרת בתחנת האוויר הדחוס	עצה 4
48	..... להתקין נכון את המדחסים	עצה 5
49	..... לאזורר את תחנת האוויר הדחוס (יניקה)	עצה 6
50	..... לאזורר את תחנת האוויר הדחוס (פינוי אוויר)	עצה 7

## נספחים

50	..... נומוגרף - לקבוע את קוטר הצינורות	נספח 1
52	..... שאלון לדוגמה עבור המערכת לחיסכון באנרגיה	נספח 2

## הקדמה



Dipl.-Wirtsch.-Ing.  
Tina-Maria Vlantoussi-Kaeser



Dipl.-Wirtsch.-Ing.  
Thomas Kaeser

### קורא יקר

זו הסיבה שב- KAESER COMPRESSORS משקיעים באפיקים רבים בהכשרה הרציפה של הלקוחות. לאורך כל השנה, המומחים של KAESER מסתובבים ברחבי העולם. במהלך הרצאות, אירועים וסמינרים, החברה משתפת בידע איך מייצרים אוויר דחוס באמינות ויעילות. בנוסף, החברה מפיצה פרסומים טכנולוגיים רבים באפיקי תקשורת מגוונים.

חוברת זו היא תמצית הידע הרחב של המומחיות שלנו. כאן תמצאו מבוא מעמיק לעולם הטכנולוגי של האוויר הדחוס. כמו כן, תגלו שורה של עצות ליישום עבור המפעילים והמשתמשים. עם קריאת החוברת, תיווכחו שבמקרים רבים, שינויים קטנים יכולים לחולל תוצאה שתשפר משמעותית את התפוקה ואת זמינותו של האוויר הדחוס.

לפני אלפיים שנה, סוקרטס, הפילוסוף היווני המפורסם, הגדיר שהידע הוא הנכס היקר ביותר של האנושות והבורות היא רעה גדולה.

האמרה הנצחית של אב הפילוסופיה המערבית עומדת על סדר היום של ההווה כי נראה שאין קבוע יותר מהשינוי. היקף וקצב התמורות כתוצאה מההתפתחות הטכנולוגית וכלכלה חובקת עולם דורשים תשובות ואסטרטגיות חדשות.

יותר מתמיד, עלינו לעמוד באתגרים לניצול הזדמנויות והשגת ההצלחות הבאות. עלינו לנצל את כל הפוטנציאל במלואו. העולם צומח במורכבותו ורשתות המידע בהתפתחותן המתמדת הופכות את הידע לחומר הגלם העיקרי ביצירת העתיד. רק אלה בעלי מכוונות חזקה להכשרה רציפה יקצרו את הפירות האמיתיים של ידע שאינו פוסק להתרחב.

בעולם הנדסת האוויר הדחוס, כבר מזמן לא מספיק לדעת איך לייצר מדחסים חזקים ולהפעילם נכון.

כדי לנצל כראוי את יתרונותיו של האוויר הדחוס, צריך להתייחס למערכות אוויר דחוס כמכלול. בנוסף, צריך להכיר בתוך המערכת עצמה את האינטראקציות הרבות והשלכותיהן וכמובן איך הכל משתלב בסביבת הארגון.

# עקרונות בסיסיים בהנדסת אוויר דחוס

$$P = U_n \times I_n \times \sqrt{3} \times \cos \phi_n$$

באמצעות הנוסחה הבאה:  
 $U_n, I_n$  ו- $\cos \phi_n$ : הערכים רשומים  
 על לוחית המנוע.

## 4. הכוח המוגדר

הכוח המוגדר של מדחס (איור 2) הוא היחס בין צריכת החשמל לאוויר הדחוס המיוצר בלחץ עבודה נתון. צריכת האנרגיה הכוללת היא סך תצרוכת האנרגיה של כל מרכיבי המדחס, כמו המנוע הראשי, המאוורר, משאבת השמן, החימום הנוסף וכו'. אם נדרש לחשב את הכוח המוגדר כדי לחשב עלויות ייצור, יש להתייחס לתחנה כולה בלחץ עבודה מקסימלי. לשם כך, צריך לחלק את הכוח המוגדר הכולל בלחץ המקסימלי בספיקת המדחס:

$$P_{\text{spec.}} = \frac{\text{צריכת החשמל}}{\text{ספיקה}}$$

## 5. IE - הנוסחה החדשה לחיסכון באנרגיה

בעקבות מאמצים רבים במציאת דרכים לחסוך באנרגיה בשטח המנועים התלת פאזיים האסינכרוניים, ארצות הברית יצרה אמנה בשם

התוצאה המתקבלת משקפת את ספיקת המדחס (FAD). שימו לב לא להתבלבל עם ספיקת האוויר מיחידת הדחיסה (ספיקת יחידת הדחיסה).

הערה:

רק DIN 1945 ו ISO 1217 מגדירים את ספיקת יחידת הדחיסה.

## 2. כוח ציר המנוע

כוח ציר המנוע הוא הכוח שהמנוע משחרר באופן מכני לתוך ציר המנוע. הערך של כוח ציר המנוע הוא אופטימלי כאשר מגיעים לצריכת החשמל האופטימלית ופקטור הכוח  $\cos \phi$  הושג מבלי שהמנוע יגיע לעומס יתר. כוח ציר המנוע האופטימלי נמצא בטווח ההספק הנומינלי. ערך זה מופיע על לוחית המנוע החשמלי.

הערה: אם תהיה סטייה מההספק הנומינלי בכוח ציר המנוע, המדחס יעבוד בחוסר ו/או תגדל שחיקתו.

## 3. צריכת האנרגיה

צריכת האנרגיה היא הכוח שמנוע המדחס צריך להזרים למרכיבים השונים בהפעלת עומס מכני מוגדר על צירו. צריכת האנרגיה שווה לכוח ציר המנוע בתוספת הפסדי המנוע במאוורר וכדומה. ניתן לחשב את צריכת P

כמו בשטחים רבים בחיים, כך גם עם האוויר הדחוס: אירוע קטן יכול להשפיע רבות - במובן החיובי והשלילי. כאשר בודקים לעומק, הדברים נראים שונים מההתרשמות הראשונית. בתנאים שלא תוכננו ככון, אוויר דחוס עשוי להיות יקר מאוד. לעומת זאת, בתכנון ככון, החיסכון הוא משמעותי. בפרק הראשון אנו נציג בפניכם את המושגים השגורים בתחום הנדסת האוויר הדחוס.

## 1. ספיקת אוויר

ספיקה של מדחס (הידועה בכינוי FAD) היא נפח האוויר הנדחס לתוך המערכת בזמן קצוב. השיטה הנכונה למדוד אוויר דחוס נקבעה לפי התקנות הבאות: DIN 1945, Part 1, Annex F ISO 1217, Annex C. מדידה של ספיקת מדחס מתבצעת כרשום באיור 1. ראשית מודדים את הטמפרטורה, את הלחץ הסביבתי ואת לחות האוויר הנשאב לתוך המערכת. בהמשך, מודדים את לחץ העבודה המקסימלי, הטמפרטורה וכן נפח האוויר הדחוס שהמדחס מוציא. לבסוף הנפח  $V_2$  שהוא נפח האוויר הדחוס ביציאה, נמדד על ידי משוואה של נתוני הכניסה לתוך המערכת. (ראה נוסחה).

$$V_1 = \frac{V_2 \times P_2 \times T_1}{[p_1 - (p_0 \times F_{rel})] \times T_2}$$



איור 1: מדידת הספיקה על פי ISO1217, Appendix C (DIN 1945 Appendix F)



איור 2: תרשים עיקרון פעולת המדחס הבורגי, הגדרת ההספק המוגדר

האמנה EPACT (Energy Policy Act) קיבלה תוקף חוקי ב-1997. זמן קצר לאחר מכן, גם אירופה הצטרפה עם תקנות לסינוג היעילות האנרגטית. החל משנת 2010, מנועי החשמל כפופים לתקנות הבינלאומיות IEC. התקנות וכן דרישות החוק שיפרו משמעותית את היעילות האנרגטית של מנועי החשמל השייכים לקטגוריה הגבוהה ביותר. מנועים אלה בעלי הספק גבוה מציעים יתרונות רבים:

**א. טמפרטורת הפעלה נמוכה יותר**

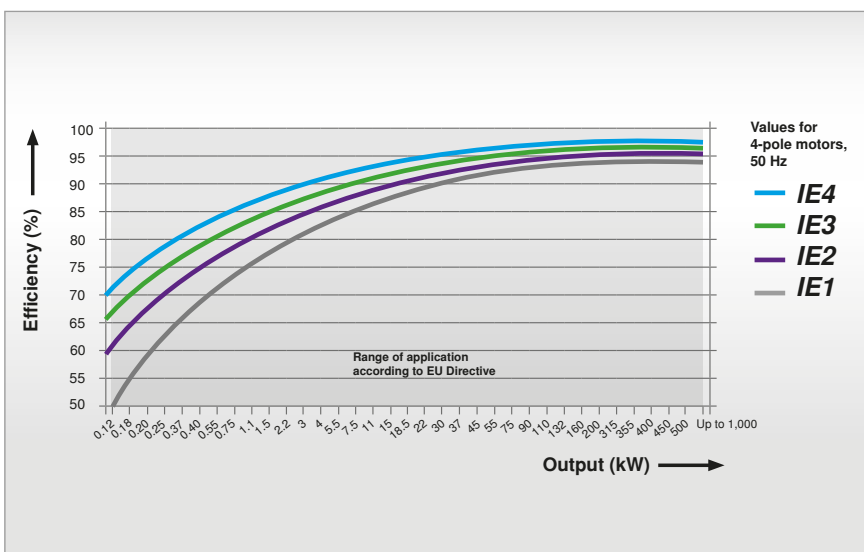
יצירת חום ושחיקה גורמים להפסדים בתפוקה. הפסדים אלו יכולים להגיע ל-20% במנועים קטנים ול-5%-4% במנועים בעלי הספק גבוה מ-160 kW. מנועי IE3/IE4 מתחממים הרבה פחות ועל כן התוצאה היא פחות הפסדים (איור 3). מנוע קונבנציונלי בסיווג F, פועל ברמה של 80K עם דרבה של 20K לטמפרטורה. בתנאי הפעלה זהים, מנוע IE VDCR, הטמפרטורה לא תעבור את 65K עם דרבה של 40K.

**ב. אורך חיי המנוע**

טמפרטורת הפעלה נמוכה פירושה שהמנוע, הרצועות, המסבים והמסופים פועלים תחת עומס תרמי נמוך יותר. התוצאה היא חיי מנוע ארוכים יותר.

**ג. 6% יותר אוויר דחוס בפחות צריכת אנרגיה**

ככל שהפסדי החום נמוכים כך גדלה היעילות. תוך התאמה מלאה בין המדחס לבין המנוע, KAESER הגדילה ב-6% את ספיקת האוויר ושיפרה ב-5% את הכוח המוגדר. התוצאה היא ספיקה גבוהה יותר בזמני הפעלה קצרים יותר וצמצום בצריכת האנרגיה.



איור 3: הסיווג החדש של המנועים החשמליים על פי התקנה IEC. החל מה-1 בינואר 2015, באיחוד האירופי, התקנה מחייבת את השימוש במנועי IE3. בינתיים, הוגדר סיווג חדש משופר בשם IE 4.

# הטיפול היעיל באוויר דחוס

מהו המדחס המתאים ביותר כדי לספק אוויר דחוס נטול שמן? מבלי להתייחס להצהרות יצרן זה או אחר, התשובה ברורה: ניתן להשיג אוויר דחוס נטול שמן באיכות גבוהה מאוד, גם עם מדחס בורגי יבש וגם עם מדחס מקורר שמן או מקורר נזל. הפקטור המרכזי הקובע את הבחירה הנכונה הוא פקטור היעילות.

1. מה הכוונה באוויר דחוס "נטול שמן"? על פי התקנה ISO 8573-1, אוויר דחוס נחשב לנטול שמן אם תכולתו בשמן (כולל אדי שמן) היא נמוכה מ- $0.01 \text{ mg/m}^3$ . זה בערך 4% מהתכולה הקיימת באוויר הסביבתי הרגיל. כמות זו כה מזערית שכמעט בלתי אפשרי לאתר אותה. אך מה בנוגע לאיכות אוויר היניקה הנשאב לתוך המדחס?

היא תלויה כמו כן בתנאי הסביבה. באזורים עם זיהום אוויר ממוצע, כתוצאה מפליטה תעשייתית ותנועת רכבים, תכולת פחמימנים (hydrocarbons) באוויר נעה בין  $4 \text{ mg/m}^3$  ל- $14 \text{ mg/m}^3$ . באזורי תעשייה, כאשר השמן משמש לסיכה, לקירור ולמטרות אחרות, תכולת השמן המינרלי באוויר יכול לעבור בהרבה  $10 \text{ mg/m}^3$ . עוד נמצא מזהמים נוספים כמו פח, מתכת ואבק וכן sulphur dioxide ו-hydrocarbon.

## 2. למה לטפל באוויר הדחוס?

המדחס פועל כמו שואב אבק ענק השואב מהאוויר גם חלקיקים מזהמים הנעשים מרוכזים מאוד במהלך הדחיסה. במידה ולא מסירים אותם הם יעברו לתוך רשת האוויר הדחוס.

### א. מדחסים "נטולי שמן"

המתואר כאן מעלה קורה גם במדחסים הנקראים "יבשים" או "נטולי שמן". בגלל הדיהום המוזכר בסעיף 1, בלתי אפשרי לייצר אוויר דחוס נקי משמן עם מדחס המצויד רק במסנן אבק של 3 מיקרון. בנוסף למסננים אלה, למדחסים הנקראים "נטולי שמן" אין ציוד נוסף מטפל באוויר.

### ב. המדחסים בקירור נזל או שמן

לעומת זאת, במדחסים הבורגיים, הנזל (או השמן) מנטרל את החומרים הרעילים ורוב החלקיקים המזהמים שבאוויר הדחוס נשטפים החוצה.

## 3. לטפל באוויר הדחוס להשגת איכות

גם אם האוויר הדחוס נקי יחסית, הטיפול בו הכרחי. בתנאי יניקה אוויר סביבתי רגילים וברמת זיהום ממוצעת, הדחיסה "היבשה" לבדה או עם נזל קירור לא מאפשרת להשיג איכות אוויר דחוס נטול שמן כנדרש בתקנת ISO 8573-1.

מידת יעילותו של ייצור האוויר הדחוס תלויה בטווח הלחץ ובספיקה המתוכננת. הם אלה הקובעים איזה סוג מדחס נדרש. הייבוש מהווה חלק מהותי במערכת טיפול של כל יישום אוויר דחוס. בדרך כלל, השיטה החסכונית ביותר היא שיטת הייבוש בקירור (ראה פרק 3 עמוד 9).

## 4. לטפל באוויר עם

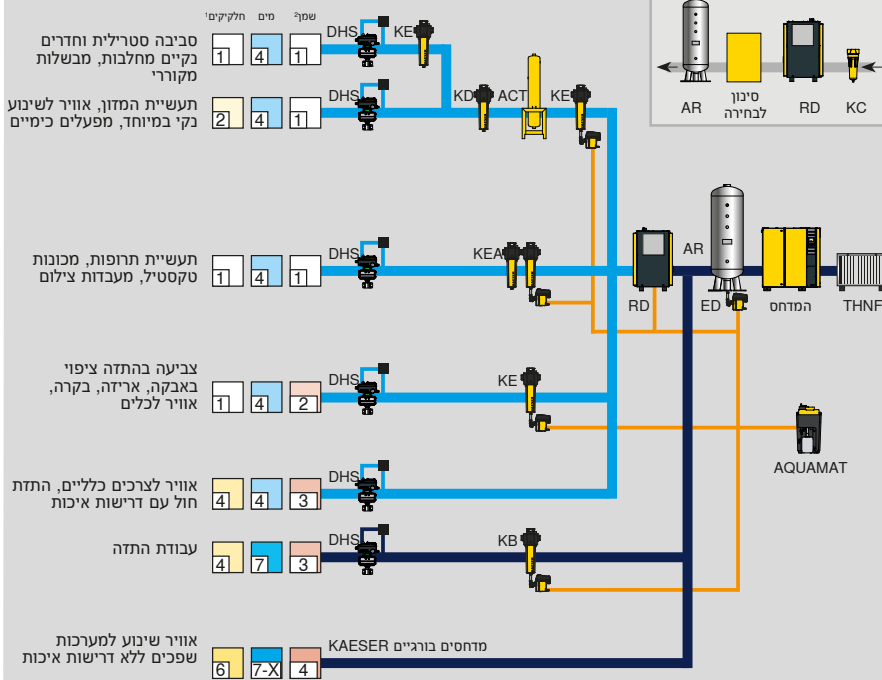
### KAESER Pure Air System

המדחסים הבורגיים המודרניים, בקירור נזל או שמן, הם ב-10% יותר יעילים מהמדחסים "היבשים" או "נטולי השמן". מערכת Pure Air System שפותחו על ידי KAESER עבור המדחסים הבורגיים היבשים או מדחסים בהזרקה שמן, מאפשרים עד 30% חיסכון בהוצאות. תכולת השמן המתקבלת נמוכה מ- $0.003 \text{ mg/m}^3$ . זהו ערך הנמוך בהרבה מהגבול שנקבע בתקני ISO עבור רמת האיכות 1 (בנוגע לשמן). המערכת כוללת את כל מרכיבי הטיפול להשגת איכות אוויר דחוס נדרשת. בהתאם ליישום, משתמשים במייבשי קירור או במייבשי ספיחה בשילוב עם מסננים שונים (ראה פרק 3 עמוד 9). בדרך יעילה וחסכונית, מקבלים אוויר דחוס באיכות שונות: אוויר יבש, נקי מחלקיקים, נטול שמן או אוויר נקי סטרילי התואם את כל רמות האיכות המוגדרות בתקני ISO (איור 1).

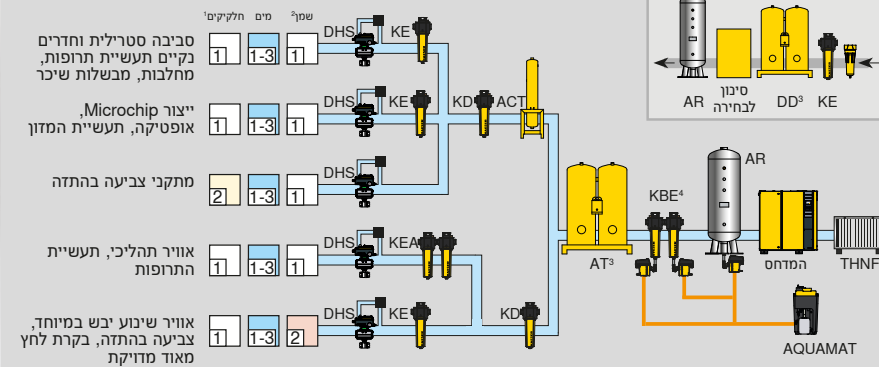
**לבחור ברמת הטיפול הנדרשת לפי הצרכים:**

**דוגמאות:** רמות איכות אוויר דחוס על פי ISO 8573-1 (2010)

טיפול באוויר על ידי מייבש קירור



טיפול באוויר דחוס על ידי מייבש ספיחה



<sup>1</sup> איכות הביטוח להשגה עם צורת ההקמה ברמה מקצועית מאוד גבוהה.  
<sup>2</sup> תכולת שמן כוללת הביטוח להשגה בתנאי משתמשים בשמן מדחס מומלץ ואוויר היבקה עומד בתנאים הנדרשים.  
<sup>3</sup> נדרש מצנן ומסננים המתאימים לטמפרטורות גבוהות. בחלק התחתון של מייבש הספיחה עם מיחזור החום.  
<sup>4</sup> השימוש ב-"Extra Combination" (שילוב של מסנן KB ומסנן KE בחלק התחתון של מערכת האוויר) מומלץ עבור יישומים מיוחדים בהם נדרש אוויר דחוס מאוד נקי (לפי בתחום האלקטרוניקה או האופטיקה).

הסבר	
מיכל פחם פעיל	ACT
AQUAMAT	AQUAMAT
מייבש ספיחה	DD
מערכת בקרת לחץ	DHS
מיכל אוויר דחוס	AR
ECO-DRAIN	ED
מסנן פחם פעיל, ספיחה	KA
מסנן עדין, Basic	KB
מסנן משולב Extra	KBE
מסנן חלקיקים, אבק	KD
מסנן עדין, Extra	KE
משולב פחם פעיל	KEA
מייבש קירור	RD
מסנן אבק	THNF
מפריד ציקלוני	KC

רמות איכות אוויר דחוס על פי ISO 8573-1 2010:

חלקיקים מוצקים/אבק			
רמה	מקסי' חלקיקים פר m <sup>3</sup> בגודל של d ב-[µm]	רמה	
	1.01 ≤ d ≤ 5.0	0.5 ≤ d ≤ 1.0	0.1 ≤ d ≤ 0.5
0	KAESER התייעץ עם לגבי דרישות מיוחדות		
1	≤ 20,000		
2	≤ 6,000	≤ 400,000	
3	≤ 90,000	לא מוגדר	
4	לא מוגדר	לא מוגדר	
5	≤ 10,000	לא מוגדר	
	≤ 100,000	לא מוגדר	
רמה			
6	0 < C <sub>p</sub> ≤ 5		
7	5 < C <sub>p</sub> ≤ 10		
X	C <sub>p</sub> > 10		

מים		
רמה	נקודת טל [°C]	
0	התייעץ עם KAESER לגבי דרישות מיוחדות	
1	≤ -70 °C	
2	≤ -40 °C	
3	≤ -20 °C	
4	≤ +3 °C	
5	≤ +7 °C	
6	≤ +10 °C	
רמה	תכולה במים C <sub>w</sub> in g/m <sup>3</sup> *	
7	C <sub>w</sub> ≤ 0.5	
8	C <sub>w</sub> ≤ 5 > 0.5	
9	C <sub>w</sub> ≤ 10 > 5	
X	C <sub>w</sub> ≤ 10	

שמון	
רמה	ריכוז שמן כולל (נחל, תרטיס, גז) [mg/m <sup>3</sup> ]
0	התייעץ עם KAESER לגבי דרישות מיוחדות
1	≤ 0.01
2	
3	
4	≤ 5.0
X	> 5.0

\*לפי ספק תנאי לחות 20°C, 1 bar(a), 0% יישום

**איור 1: תרשים זה מופיע בכל חוברות המדחסים הבורגיים של חברת KAESER. במבט אחד ניתן לקבוע עבור כל יישום מהו הציוד הנכון לטיפול באוויר.**

# למה לייבש את האוויר הדחוס?

הבעיה היא באוויר - תרתי משמע: כאשר האוויר הסיביתי מתקרר - זה המקרה לאחר דחיסתו במדחס - האדים הופכים למשקעים. מדחס עם ספיקה של  $5 \text{ m}^3/\text{min}$ , בטמפרטורה סביבתית של  $20^\circ\text{C}$  עם לחות יחסית של 70%, ב- $1 \text{ bar}_{\text{abs}}$ , "מייצר" כ-30 ליטר מים במהלך שמונה שעות משמרת. צריך לסלק את המים האלה ממערכת האוויר הדחוס כדי למנוע הפעלה לקויה ובזק לציוד. על כן, ייבוש חסכוני ולא מזהם הוא חלק חיוני בטיפול באוויר הדחוס כדי להתאים אותו לדרישות.

## 1. דוגמה שימושית

מדחס בורגי מקורר מים/שמן שואב  $10 \text{ m}^3$  אוויר בדקה. נפח אוויר זה בלחץ סביבתי ובטמפרטורה של  $20^\circ\text{C}$  ועם לחות יחסית של 60% מכיל קרוב ל-100 ג' אדי מים. אם האוויר יידחס בלחץ של  $10 \text{ bar}$ , ביחס של 1:10, נקבל מטר מעוקב אוויר דחוס. בטמפרטורה של  $80^\circ\text{C}$  בעקבות הדחיסה, האוויר עשוי להכיל עד 290 ג' מים פר מטר מעוקב אוויר. עם תכולת מים של רק 100 ג', הלחות היחסית תגיע ל-35% בלבד. האוויר נחשב לייבש יחסית כך שלא נוצרים משקעים. טמפרטורת האוויר לאחר הקירור במצגן יורדת מ- $80^\circ\text{C}$  ל- $30^\circ\text{C}$  בקירוב.

בטמפרטורה זו, מטר מעוקב אוויר יכיל רק 30 ג' מים. העודף של כ-70 ג'/min הופך למשקעים ואז הוא מופרד. כך נוצרים מדי יום, במהלך משמרת עבודה קרוב של 35 ליטרים של משקעים. עליהם מתווספים עוד 6 ליטרים אם מייבש הקירור מותקן לאחר המדחס. בשלב הראשון, האוויר הדחוס מקורר עד

לטמפרטורה של  $3^\circ\text{C}$  ולאחר מכן הוא מחומם עד הטמפרטורה הסביבתית. התוצאה היא מצב של תת לחות של כ-20% ולכן, האוויר הדחוס יבש יותר ובאיכות גבוהה יותר (איור 1).

## 2. הסיבות ללחות

האוויר סביבנו תמיד מכיל לחות פחות או יותר גבוהה. לחות זו משתנה בהתאם לטמפרטורה. למשל: אוויר רווי ב-100% לחות מכיל בטמפרטורה של  $25^\circ\text{C}$  קרוב ל-23 ג' מים למטר מעוקב.

## 3. היווצרות משקעים

נוצרים משקעים כאשר מצמצמים את נפח האוויר ומורידים בו זמנית את הטמפרטורה שלו. על כן, יכולת האוויר להכיל המים יורדת. זה בדיוק מה שקורה ביחידת הדחיסה הקירור של המדחס.

## 4. מונחים חשובים ומשמעותם

### א. לחות מוחלטת

הלחות המוחלטת מצביעה בערכים של  $\text{g}/\text{m}^3$  על תכולת אדי המים שבאוויר.

### ב. לחות יחסית ( $H_{\text{rel}}$ )

הלחות היחסית מצביעה על אחוז הרוויה, זאת אומרת על היחס בין תכולת אדי המים לנקודת הרוויה של האוויר ( $100\% H_{\text{rel}}$ ). נקודה זו תלויה בטמפרטורה: האוויר החם מסוגל להכיל יותר לחות מהאוויר הקר.

## ג. נקודת טל

נקודת טל היא הטמפרטורה בה האוויר רווי ב-100% לחות ( $H_{\text{rel}}$ ) בלחץ האטמוספרי (תנאים סביבתיים).

## ד. נקודת טל (בלחץ)

לחץ נקודת טל (PDP) הוא הטמפרטורה בה האוויר הדחוס מגיע לנקודה של ריווי לחות ( $100\% H_{\text{rel}}$ ) בלחץ המוחלט. כמו במקרה הקודם, עם נקודת טל של  $3^\circ\text{C}$ , בלחץ של  $10 \text{ bar(a)}$  הלחות המוחלטת של האוויר תעמוד על 6 ג' למטר מעוקב. להבהרה - אם אותו מטר מעוקב אוויר מתרחב מ- $10 \text{ bar}$  ללחץ האטמוספרי, אזי יהיה צורך בלהכפיל פי 10 את נפחו. התכולה באדי מים נשארת תמיד של 6 ג', אבל עכשיו היא מתחלקת על פני פי 10 נפח. על כן, כל מטר מעוקב אוויר מורחב מכיל עכשיו רק 0.6 ג' אדי מים המקביל לנקודת טל של  $24^\circ\text{C}$ .

## 5. ייבוש אוויר דחוס חסכוני ולא מזהם עם

### מייבש קירור או עם מייבש ספיחה?

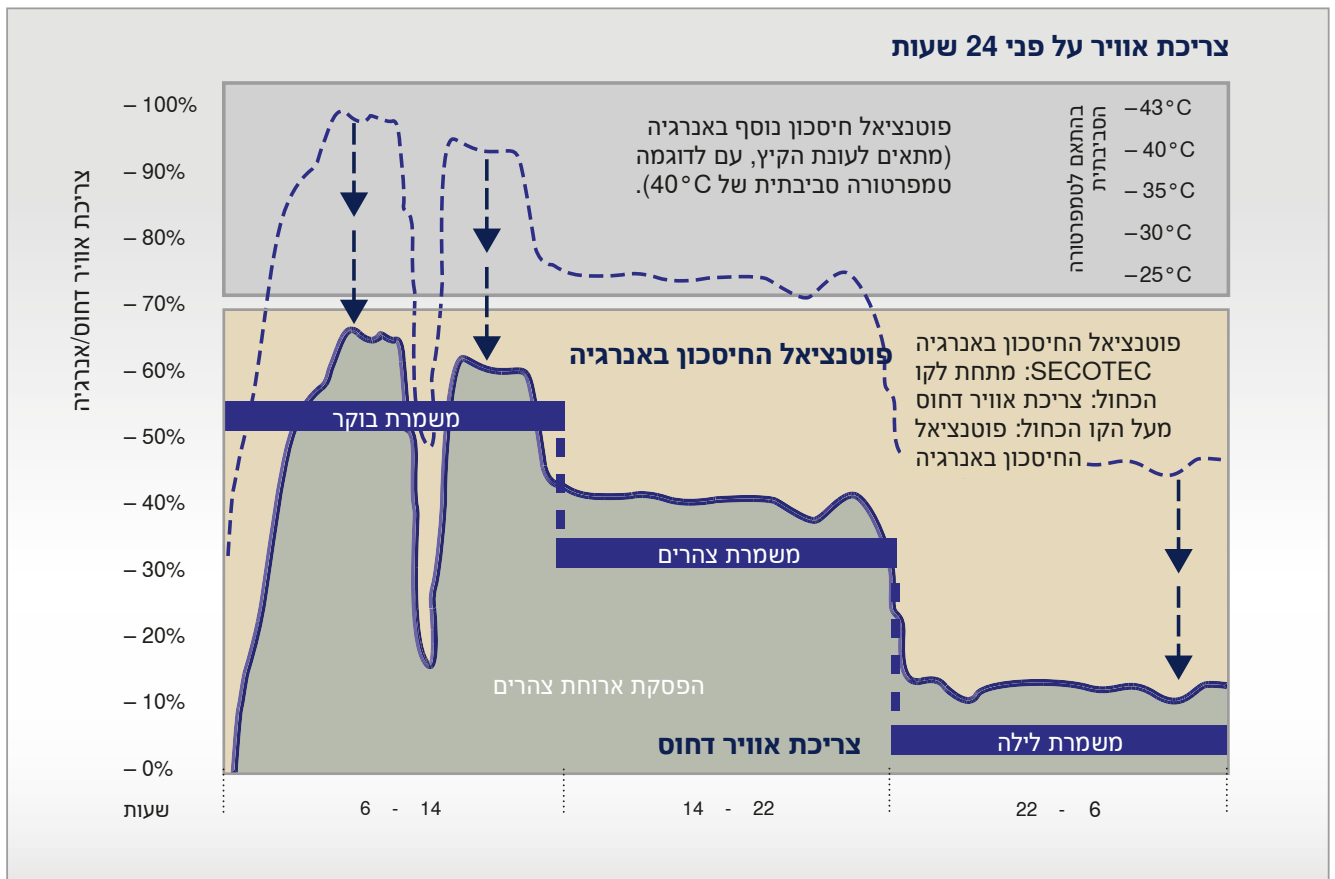
למרות התקנות החדשות בנוגע לשימוש בקרר, לא נוכל לשנות את העובדה שמייבשי הספיחה אינם מהווים תחליף למייבשי הקירור, לא ברמת החיסכון והכדאיות ולא ברמת השמירה על איכות הסביבה. מייבש קירור צורך רק 3% מסך האנרגיה שהמדחס צורך, לעומת מייבש הספיחה הצורך בין 10 ל-25% ואף יותר. מסיבה זו, עדיף להשתמש במייבש קירור ככל הניתן.

עם זאת, השימוש במייבש ספיחה מוצדק במקרים בהם נדרש אוויר דחוס באיכות גבוהה מאוד עם נקודת טל נמוכה מ-20,



איור 1: הייצור, האחסון והטיפול באוויר הדחוס יוצרים משקעים. הכמויות הרשומות מתייחסות למשמרת של 8 שעות עבודה, בטמפרטורה של  $20^\circ\text{C}$ ,  $60\% H_{\text{rel}}$ ,  $10 \text{ bar}_{\text{abs}}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{min}$





וכאן נדרש להשיג את אותה רמת ביצוע. המערכת של המייבש HYBRITEC חסכונית ויעילה מבחינה אנרגטית: ניתן להפחית משמעותית את צריכת האנרגיה כאשר משלבים מייבש קירור עם מייבש ספיחה. בשלב הראשון, מייבש הקירור החסכוני באנרגיה מקרר את האוויר הדחוס בלחץ נקודת טל של 3°C. האוויר עובר לאחר מכן למייבש הספיחה. בזכות הייבוש הראשוני, מייבש הספיחה זקוק להרבה פחות אנרגיה כדי לייבש את האוויר בנקודת טל של -40°C.

במהלך היום, רוב מערכות האוויר הדחוס חשופות לתנודות צריכה חדות. התנודות גם מורגשות על פני השנה כתוצאה משינויי הטמפרטורה. על כן, יש צורך לתכנן את המייבשים לתנאי עבודה כמו לחץ נמוך מאוד, צריכה מקסימלית, טמפרטורה סביבתית וטמפרטורת יניקת אוויר גבוהה מאוד.

בעבר, כדי להתמודד עם מצבים אלה, המייבש פעל ללא הפסקה. הבדל באנרגיה היה רב, בעיקר בדחיסה חלקית. מייבש הקירור המודרני עם בקרה יעילה על מחזורי העבודה, מתאים את צריכת האנרגיה לשינויים בתנאי הפעלה תוך שמירה על איכות האוויר (איור 3). ברמה השנתית, ניתן לחסוך עד 50% מצריכת האנרגיה.

חשוב במיוחד לפנות לטכנולוגיה של חיסכון באנרגיה כדי להגיע לנקודת טל בטווח השלילי. מייבש הספיחה הוא זולל אנרגיה

הספק נדרש אופייני kW/m <sup>3</sup> /min**	נקודת טל °C	מערכת ייבוש
0.1	+3	מייבש קירור
0.2 0.3	-40/+3*) -40	HYBRITEC
0.6 - 0.5	-40	מייבש ספיחה עם מיחזור חום
1.6 - 1.4	-20 -70	מייבש ספיחה ללא מיחזור חום

איור 2: מספר מערכות ייבוש אפשריות, תלוי בנקודת הטל

# המשקעים: הניקוז הנכון



איור 1: משקעים נוצרים בנקודות שונות במערכת האוויר הדחוס

משקעים הם תוצר נלווה בייצור אוויר דחוס. הסברנו בפרק הקודם שבתנאים ממוצעים, מדחס של 30 kW בספיקה של  $5\text{m}^3/\text{min}$ , מייצר כ-20 ליטר משקעים בכל משמרת עבודה. חייבים לסלק את הנוזל ממערכת האוויר כדי למנוע תקלות מערכת, עלויות השבתת עבודה וקורוזיה. בפרק זה, אנו נסביר איך מנקזים נכון משקעים ומצמצמים הוצאות כספיות.

## 1. ניקוז המשקעים

משקעים נוצרים בנקודות שונות בכל מערכת האוויר הדחוס (איור 1). סילוקם בדרך אמינה הוא צעד הכרחי. איכות האוויר, בטיחות ההפעלה וכן יעילות הפעלתה של התחנה תלויים בכך.

## א. נקודות איסוף וניקוז

כ-70 עד 80% מסך המשקעים נאספים בקרבת הרכיבים המכניים - בתנאי שהמדחס מצויד במצנן יעיל.

### מפריד ציקלוני

זהו מפריד מכני המבצע הפרדה בין המשקעים לאוויר הדחוס על ידי כוח צנטריפוגלי (איור 2). צריך להצמיד לכל מדחס מפריד מסוג זה כדי להבטיח ביצועים אופטימליים.

### מצננים

במדחסים בעלי שתי דרגות דחיסה עם מצננים, המשקעים נאספים גם אחרי המצנן הראשוני.

### מיכלי אוויר דחוס:

בנוסף לתפקידו העיקרי שהוא איסוף האוויר הדחוס, מיכל האוויר הדחוס גם מפריד את המשקעים מהאוויר על ידי גרביטציה (איור 1) במידה וגודלו מותאם לצרכים (ספיקת המדחס ב-  $\text{m}^3/\text{min}$  לחלק ל-3 = נפח המיכל ב-  $\text{m}^3$ ), הוא יעיל לא פחות ממפריד ציקלוני.

עם זאת, בשונה ממנו, ניתן להרכיב את המיכל בקו הראשי של המערכת האוויר הדחוס כאשר כניסת האוויר היא למטה ויציאת האוויר היא למעלה. יותר מזה, בזכות השטח הנרחב לפיזור החום, מיכל האוויר גם מקרר אותו. הקירור עוד תורם להפרדת המשקעים.

## מלכודות מים בקו האוויר:

כדי למנוע זרימה בלתי נשלטת של משקעים, מתכננים את קו האוויר הדחוס כך שכל הכניסות וכל היציאות מחוברות מלמעלה או מהצד.

כדי לאפשר סילוק משקעים מקו האוויר הראשי, הם מובלים כלפי מטה אל מלכודות המים. בתכנון נכון ובמהירות זרימת אוויר של 2 עד  $3\text{ m/s}$  (איור 3), מלכודת המים התחתונה יעילה כמו מיכל אוויר דחוס לפיכוי המשקעים הנמצאים בחלק הלח של מערכת האוויר (איור 1).

## ב. מייבש אוויר דחוס

קיימות גם נקודות איסוף וניקוז משקעים לאורך תהליך ייבוש האוויר.

### מייבש קירור:

משקעים נוספים נוצרים כתוצאה מייבוש האוויר הדחוס במהלך קירורו.

### מייבש ספיחה:

קירור האוויר בקו האוויר גורם להיווצרות משקעים במסנן של מייבש הספיחה. במייבש הספיחה עצמו, קיימת לחות בצורה של אדים בגלל תנאי הלחץ.

## ג. מפרידים מקומיים

כאשר לא תוכנן ייבוש אוויר מרכזי, נוצרות כמויות גדולות של משקעים במפרידים המקומיים. מערכות אלה דורשות טיפול רב.

## 2. ניקוז

כיום, קיימות שלוש שיטות:

### א. מנקז מצוף

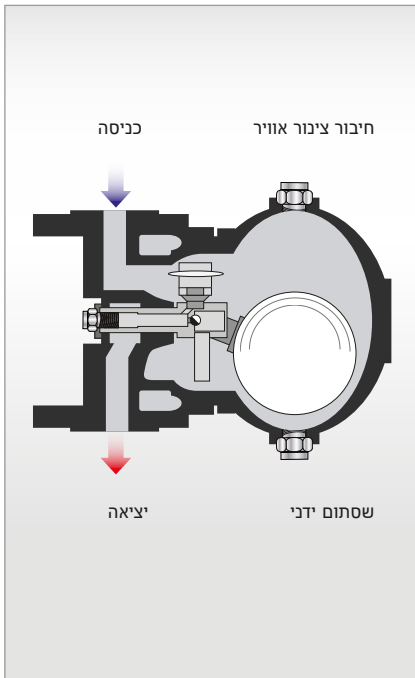
ניקוז עם מצוף הוא שיטת הניקוז הותיקה ביותר: הוא החליף את הניקוז הידני שגם היה לא יעיל ולא כדאי. יש לציין שניקוז המשקעים עם מצוף (איור 4) רגיש במיוחד לתקלות והוא מצריך טיפול לעתים קרובות בגלל הלכלוך והחלקיקים הנמצאים באוויר הדחוס.

### ב. שסתום סולנואיד

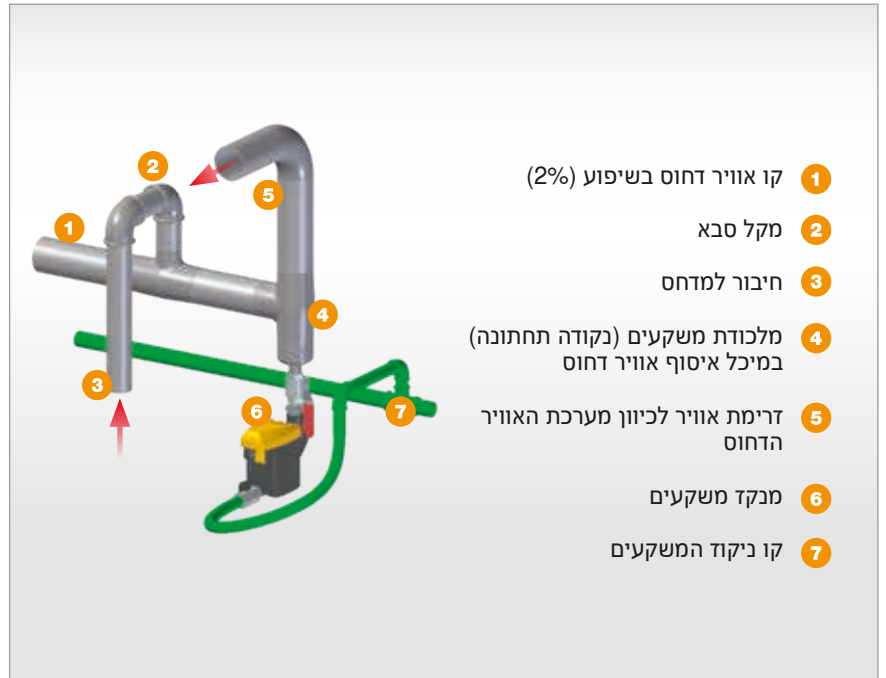
שסתום זה ודאי אמין יותר מהמנקז עם המצוף אבל חייבים לבדוק אותו בקביעות כדי



איור 2: מפריד ציקלוני עם מנקז משקעים



איור 4: מנקד משקעים עם מצוף



איור 3: מלכודת מים עם מנקד משקעים באזור "הלח" של מערכת האוויר הדחוס



איור 5: מנקד משקעים עם חיישן בקרה (ECO DRAIN)

למנוע סתימות. כיוון לא מדויק של זמני פתיחת השסתום עלול לגרום להפסדי אוויר ועל כן לצריכת אנרגיה מוגברת.

**מנקד משקעים עם חיישן בקרה**

כיום, ברוב המנקדים מורכב חיישן בקרה חכם (איור 5). היתרון שלו הוא שהמצוף שהיה רגיש לתקלות מוחלף כאן בחיישן אלקטרוני. אותו התקלות השכיחות של המנקד עם מצוף בגלל לכלוך מצטבר או שחיקה מכנית כאן לא קיימות. בנוסף, זמני הפתיחה של השסתום מותאמים ומחושבים במדויק כך שאין הפסדים באוויר דחוס. הבקרה האוטומטית והאפשרות לשדר אותות למערכת בקרה מרכזית הן ודאי יתרונות נוספים.

**ד. התקנה נכונה**

צריך תמיד לתכנן צינור קצר עם ברז ניתוק בין מערכת הפרדת המשקעים לבין המנקד (איור 2 ו-3). זה מאפשר לבדוד את המנקד כאשר רוצים לבצע טיפולי תחזוקה מבלי להפריע להמשך הפעלת התחנה.

# המשקעים: הטיפול הנכון והחסכוני

יתכן והמושג "משקעים" אינו מובן כהלכה. הוא אינו מתייחס רק לעיבוי של אדי מים. שימו לב! כל מדחס פועל בדיוק כמו שואב אוויר גדול: הוא שואב את האוויר הסביבתי ואת כל המזהמים הנמצאים בו. נמצא אותם מרוכזים במשקעי האוויר הדחוס טרם הטיפול בו.

## 1. למה לטפל באוויר הדחוס?

מי שמסתפק בסילוק המשקעים על ידי שפיכתם למערכת הביוב, נחשף לקנסות כבדים. הסיבה היא שהמשקעים הנוצרים במהלך ייצור האוויר הדחוס הם תערובת של חומרים מאוד רעילים. בגלל זיהום האוויר הסביבתי, המשקעים מכילים לא רק חלקיקים מוצקים. יש בהם גם פחמימן, דיוקסיד גופרתי, נחושת, עופרת, ברזל וגם חומרים אחרים. בגרמניה, סילוק משקעים מעוגן בחוקי איכות המים. התקנות מגדירות ומסדירות את

דרכי הטיפול במים מזוהמים. הן נוגעות גם למשקעים הנוצרים במדחסים "נטולי שמן". התקנות מגדירות ערכי גבול עבור כל חומר מזהם וגם עבור רמות ה-PH. ערכים אלה משתנים על פי הענף בתעשייה והאזור הגאוגרפי. הגבול המותר למשל של פחמימנים עומד על 20 mg/l ורמת ה-PH נעה בין 6 ל-9.

## 2. הרכב המשקעים (איור 1)

### א. פיזור

הרכב המשקעים משתנה מאוד. הפיזור מתרחש בדרך כלל במדחסים בורגיים המשתמשים בקררים סינתטיים כמו "Sigma Fluid S460" של חברת KAESER. למשקעים אלה רמת ה-PH נעה בין 6 ל-9, זאת אומרת PH בסיסי. במשקעים אלה, חלקיקים מזהמים מהאוויר הסביבתי נלכדים בשכבת השמן הצפה. בקלות מפרדים אותם מהמים.

## ב. תחליב (אמולסיה)

הסימן הברור לנוכחות תחליב הוא הימצאו של נוזל חלבי שאינו נפרד גם לאחר מספר ימים. סוג זה של משקעים מופיע לעתים קרובות במדחסים בוכנתיים, במדחסים בורגיים, או במדחסי להבים המשתמשים בשמנים רגילים. הפסולת המזהמת גם שם נלכדת בשמן. בהיות התרכובת מאוד יציבה, אין לכוח הכבידה (גרביטציה) היכולת להפריד את השמנים מהמים וגם לא כל פסולת מזהמת אחרת כמו אבק וחלקיקי מתכת. אם השמנים מכילים רכיבים אסטרים (ester), המשקעים עלולים להיות חומציים. צריך להפוך אותם לבסיסיים. הטיפול בסוג זה של משקעים אפשרי רק באמצעים פירוק התחליב.

## 3. סילוק על ידי גורמים מומחים

ניתן לאסוף את המשקעים ולתת לחברה חיצונית לסלק אותם. שיטה זו עולה בין



איור 1: המדחס שואב יחד עם האוויר הסביבתי, אדי מים ופסולת מזהמת.

על כן, רק משקעים (איור 1.1) נקיים משמן ומפסולת מזהמת (איור 1.2) ניתנים לביקוד למערכת הביוב כמים נקיים (איור 1.3).



- 1 תא התרחבות
- 2 מיכל הפרדה
- 3 מיכל אגירה הניתן להסרה
- 4 מיכל איסוף שמן
- 5 מסנן
- 6 תא מסנן ראשי
- 7 יציאת המים
- 8 יציאה לבדיקת דגימות משקעים

איור 2: מערכת הפרדת משקעים מהאוויר הדחוס באמצעות טכנולוגית כוח הכבידה.

המפרידים הקיימים כיום בשוק מתאימים לספיקה של עד  $105 \text{ m}^3/\text{min}$ . עבור ספיקה גדולה יותר, צריך להרכיב מספר מפרידים במקביל.

**ב. הטיפול בתחליב (אמולסיה)**

כיום, משתמשים בשני סוגים של מפרידים לטיפול בתחליבים יציבים: מערכות הפרדה הפועלות באמצעות ממברנה על פי עיקרון סינון הנקרא "cross-flow process". במהלך זה, המשקעים לאחר סינון מתפשטים על הממברנה.

חלק מהנזל עובר דרך הממברנה. הוא יוצא מהמפריד כמים הנחשבים לנקיים והניתנים לסילוק למערכת הביוב. בסוג השני משתמשים בחומר אבקתי. החומר עוטף את חלקיקי השמן והופך אותם לפתיתים שקל לסנן אותם. מסננים במידות המתאימות לכך עוצרים את הפתיתים. ניתן לסלק את המים שנותרו למערכת הביוב.

40 €-ל-150 € לכל מטר מעוקב, תלוי בהרכב המשקעים. בהתחשב לכמויות המשקעים שמערכת מייצרת, הטיפול בהם מהווה אלטרנטיבה משתלמת יותר. הטיפול הפנימי מפחית ב-25% את כמות המשקעים שיש לסלקה על פי תקנות חוק הגנת הסביבה.

**4. דרכי טיפול**

**א. הטיפול במשקעים**

כדי לטפל בסוג זה של משקעים משתמשים במפריד הבנוי משלושה חדרים. שנים מהם מיועדים להפרדה ראשונית והשלישי הוא חדר סינון פחם פעיל (איור 2). תהליך ההפרדה מתקיים תחת כוח הכבידה. שכבת השמן צפה בחדר ההפרדה. השמן נאסף לתוך המיכל ומסולק לאחר מכן כפסולת שמנים. המים שנותרו מסוננים במהלך שני שלבי סינון. ניתן לאחר מכן לשפוך אותם למערכת הביוב. תהליך זה חוסך כ-95% מעלויות סילוק המשקעים על ידי חברה חיצונית.

# בקרת מדחס יעילה

רק התאמה נכונה של ספיקת האוויר הדחוס לתנודתיות בצריכה מאפשרת להגביל פאדות של דחיסה חלקית. עבודה בתדר לא מתאים עשויה להיות יקרה מאוד. מערכת הבקרה מקבלת תפקיד מפתח כשמדובר ביעילות ניצול האנרגיה.

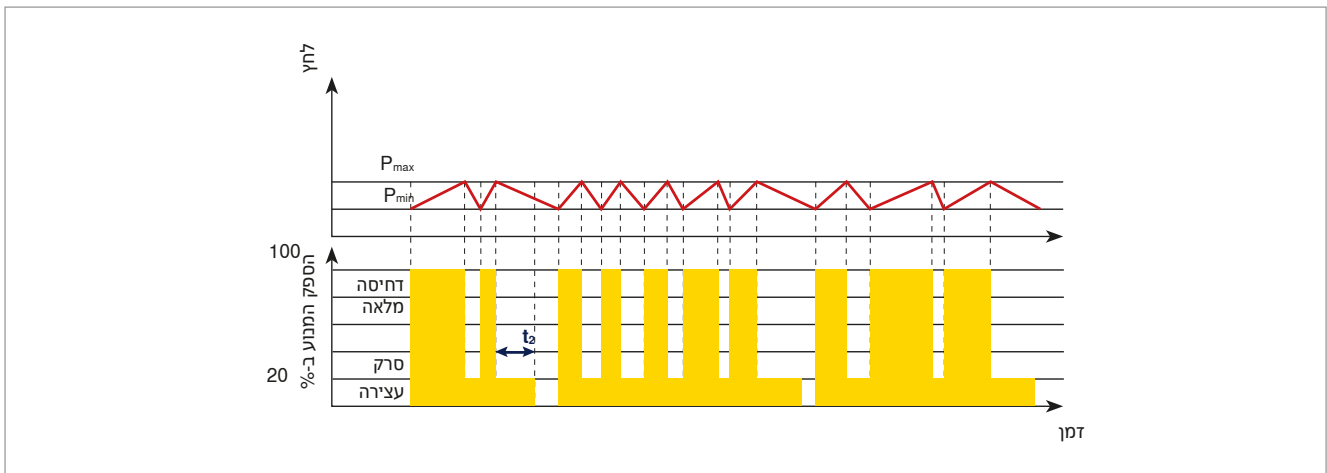
כאשר מפעילים את המדחסים בפחות מ-50% תפוקה, פעמון האזעקה של בזבז האנרגיה מצלצל. משתמשים רבים אינם מודעים לכך כי המדחס שלהם מצויד במונה שעות הפעלה אבל לא במונה שעות דחיסה. מערכות בקרה מכוונות היטב יגדילו את פקטור הדחיסה עד ל-90% יותר, וישגו למעלה מ-20% חיסכון באנרגיה.

## 1. מערכת בקרה פנימית א. דחיסה מלאה/סרק

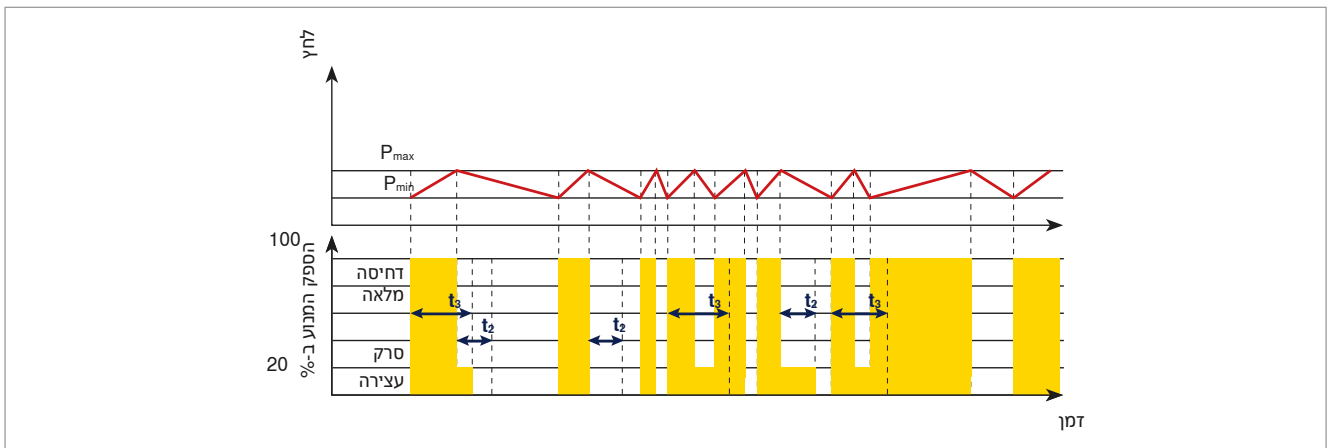
רוב המדחסים מצוידים במנוע תלת פאזי אסיכרוני. ככל שיהיו חזקים וגדולים יותר, תדירות ההתנעה המותרת שלהם יהיה נמוך יותר. אותה תדירות לא מתאימה לתדירות ההתנעה הנחוצה כדי להפעיל ולכבות את המדחס בהתאם לצריכת האוויר כאשר טווח הבקרה נמוך. מחזורי המיתוג רק ישחררו את אזורי הלחץ של מערכת המדחס. המנוע ימשיך להסתובב באינרציה במהלך זמן מסוים כדי למנוע חריגה בתדר ההתנעה שלו (איור 1). במהלך זמן זה, המנוע ממשיך לצרוך אנרגיה לריק. צריכת האנרגיה של מדחס במצב סרק עדיין יהווה 20% מהצריכה במצב דחיסה.

מערכת בקרה ממוחשבת עם מצבי בקרה אופטימליים מצמצמת את זמני ההפעלה היקרים במצב סרק תוך שמירה על המנוע: מצב בקרה Quadro עם בחירה אוטומטית של מצב ההפעלה האופטימלי (איור 2), מצב הבקרה Dynamic המפקח על זמני הפעלה במצב סרק על פי טמפרטורת המנוע (איור 3), ומצב בקרה Vario עם זמני הפעלה במצב סרק בתכנון משתנה (איור 4).

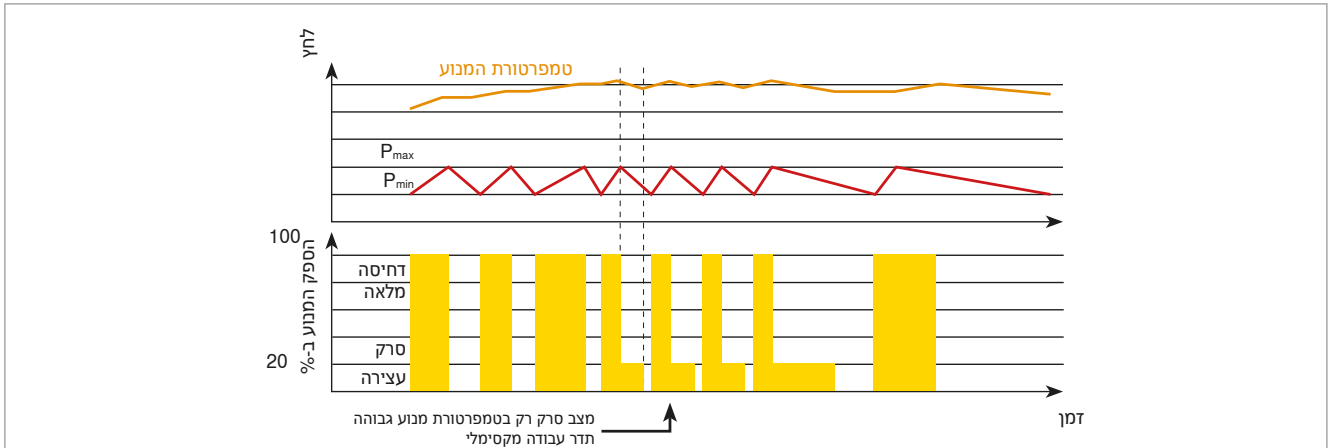
בקרה הדרגתית עם חניקת יניקה אינה מומלצת כי עדיין המדחס יצרוך 90% מהאנרגיה עבור 100% ייצור אך הוא יספק רק 50% מהספיקה המקסימלית.



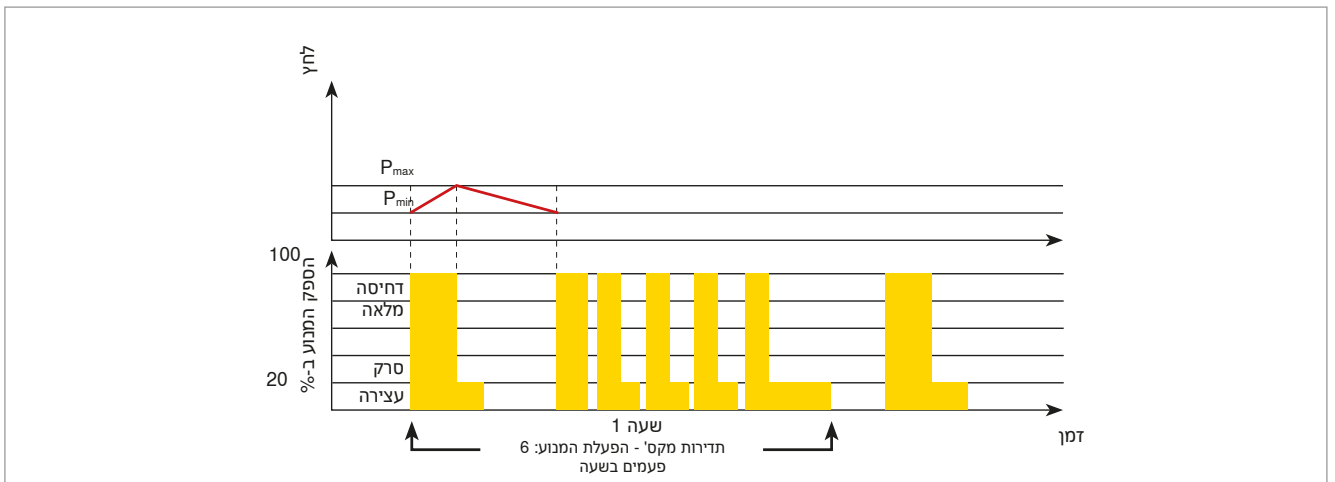
איור 1: מצב בקרה Dual: בקרת דחיסה מלאה - הפעלה/עצירה עם זמני הפעלה במצב סרק קבועים



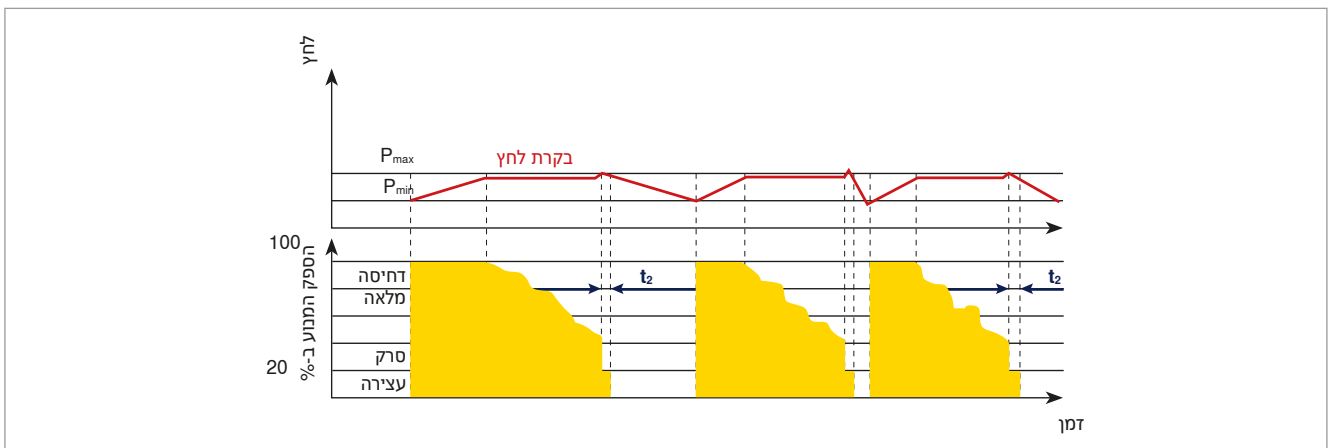
איור 2: מצב בקרה Quadro: בקרת דחיסה מלאה- מצב סרק - הפעלה/עצירה בחירה אוטומטית של מצב ההפעלה האופטימלי.



איור 3: מצב בקרה Dynamic, מבוסס על מצב בקרה Dual, עם ניהול זמני הפעלה במצב סרק התלויים בטמפרטורת המנוע



איור 4: מצב בקרה עם זמני הפעלה במצב סרק מחושבים ומשתנים



איור 5: בקרה רציפה של הספיקה דרך מהירות המנוע

# בקרת מדחס יעילה

## ב. משנה תדר

מדחסים במהירות משתנה באמצעות משנה תדר לא מספקים תוצאות יציבות בטווח הבקרה (איור 5). הספק מנוע של 90 kW נופל מ-94% ל-86% בטווח בקרה שבין 30% ל-100%. על זה מתווספים ההפסדים הפנימיים של הרכיב והעקומות הלא ליניאריות האופייניות של המדחס. צריך להפעיל מדחסים מצוידים במשנה תדר בטווח בקרה של 70%-40 מכיוון ששם, הם החסכוניים יותר.

על המרכיבים האלה להיות מתוכננים ל-100% דחיסה. בשימוש לא נכון, משנה התדר עלול להיות צרכן אנרגיה גדול מאוד מבלי ששימו לב לכך. זאת אומרת שמשנה תדר אינו תרופת פלא כשמחפשים דרך לחסוך מקסימום אנרגיה ולקבל מקסימום יעילות.

## 2. סיווגים בצריכת אוויר דחוס

המדחסים מתחלקים בדרך כלל לפי הפונקציה שהם ממלאים באתר: דחיסת בסיס, דחיסה ממוצעת או צריכה עודפת, או מכונה לשעת צורך.

### א. צריכת בסיס

צריכת בסיס מצביעה על נפח האוויר הדחוס שאתו צורך בקביעות.

### ב. צריכת עודפת (Peak load)

צריכה עודפת היא כמות האוויר הדחוס הדרושה במצבי צריכה נקודתיים (פיקים). הנפח משתנה בהתאם לדרישות השונות של הצרכנים המחוברים.

כדי להיענות לטווח רחב של דרישות, צריך לצייד את המדחסים במערכת בקרה גמישה.

במקרה של תקלה במערכת הבקרה המרכזית, הבקרים התומכים (slave controllers) ידאגו להפעלה התקינה של המדחסים כדי להמשיך ולספק ברצף את האוויר הדחוס הנדרש.

## 3. מערכת בקרה מרכזית

מערכות הבקרה המרכזיות המודרניות מצוידות בתוכנה מבוססת אינטרנט. מטרתן אינה רק יצירת קואורדינציה בין המדחסים תוך מיצוי יעילות צריכת האנרגיה. הן גם אוספות נתוני ייצור ליצירת מסד נתונים לבדיקת יעילותה של המערכת.

### א. מערכת מפוצלת System splitting

בשיטת ה-Splitting מפצלים את המדחסים על פי קריטריונים של ספיקה ומצב בקרה ועל פי צריכת אוויר במהלך זמני דחיסת בסיס וצריכה עודפת (איור 6).

### ב. משימותיה של מערכת הבקרה המרכזית

יצירת התאמה בין המדחסים היא משימה עדינה ומורכבת. על מערכת הבקרה המרכזית לפקח בו זמנית על הפעלתם והפסקת עבודתם של מדחסים בגדלים והספקים

### פיזור המדחסים על פי הצרכים (splitting)

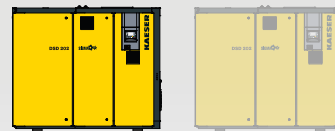
משמרת ראשונה: 15 m<sup>3</sup>/min

משמרת שנייה: 9 m<sup>3</sup>/min

משמרת שלישית: 4 m<sup>3</sup>/min

+ 16 m<sup>3</sup>/min

16 m<sup>3</sup>/min Standby



~ 40%

2x 8 m<sup>3</sup>/min

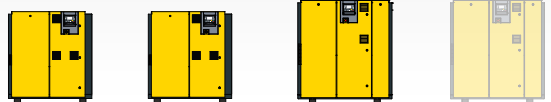
8 m<sup>3</sup>/min Standby



~ 60%

2x 4.5 m<sup>3</sup>/min + 8 m<sup>3</sup>/min + 5.7 m<sup>3</sup>/min

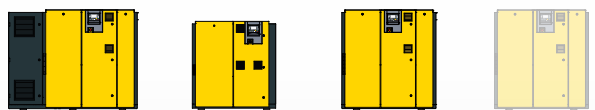
5.7 m<sup>3</sup>/min Standby



~ 95%

+ 3.9 m<sup>3</sup>/min

5.7 m<sup>3</sup>/min Standby



~ 95%

איור 6: פיזור הדחיסה בין מדחסים בעלי ספיקה שונה ובהתאם לצריכה





איור 7: אפשרויות חיבור רבות של מערכת בקרה מרכזית תורמות ליעילות הפעלתה של התחנה

במהירות ועל פני מרחקים גדולים. בשילוב עם חיבור Ethernet ותקשורת טלפונית מודרנית, מערכת הבקרה המרכזית יכולה להתחבר למערכות מידע ומערכות פיקוח ובקרה סטנדרטיות. משמעות הדבר הוא שאין חובה להתקין מערכות ניטור ובקרה באתר התחנה עצמה (איור 7).

**ד. אבטחת מידע**

מהותי לא פחות להפעלה יעילה של מערכת הבקרה המרכזית הוא הצורך בהעברת מידע אמין ובטוח.

אמינות זו הכרחית להעברת הודעות לכל מדחס וכן להעברת מידע בין המדחסים למערכת הבקרה המרכזית. בנוסף, מערכת הבקרה המרכזית צריכה לפקח על החיבורים והכבלים כדי לאתר מידית כל תקלה כמו ניתוק כבל.

דרכי העברת המידע השכיחים הם:

1. מגעים יבשים
  2. אותות אנלוגיים 4 – 20 mA
  3. ממשקים אלקטרוניים כמו RS 232, RS 485, Profibus DP, Ethernet
- Profibus מציע את הטכנולוגיה המתקדמת ביותר להעברת כמויות גדולות של נתונים

שונים. נדרש מהמערכת גם לפקח על המונים שלהם, לאזן שעות הפעלה ולקלוט הודעות תקלה. המטרות הן להוריד עלויות תחזוקה ולשפר את יעילותה ואמינותה של התחנה.

**ג. דירוג ספיקה**

כדי להיות יעילה, מערכת הבקרה המרכזית צריכה לדרג את הספיקות השונות של המדחסים שבתחנה.

הספיקה הכוללת של המכונה בצריכת שיא צריכה להיות גבוהה יותר מהספיקה של המדחס הבא בתור במעבר לצריכת בסיס. אם סוג המדחס לצריכה העודפת הוא מדחס במהירות משתנה, טווח הבקרה שלו יהיה על כן גבוה יותר מספיקת המדחס הבא בתור. אם לא, אספקת האוויר לא תהיה יעילה.

# להתאים את המדחסים לצריכת אוויר דחוס

תחנות אוויר דחוס כוללות בדרך כלל מספר מדחסים במידות זהות או שונות. יש צורך במערכת בקרה מרכזית יעילה אשר תיצור התאמה בהפעלת המכונות: הייצור צריך להתאים לצרכים שהוגדרו תוך יעילות מקסימלית בצריכת האנרגיה.

מערכות הנקראות מערכות בקרה הן בדרך כלל מערכות שתפקידן לווסת את הפעלת המערכת. קיימים ארבעה עקרונות פעולה:

### 1. Cascade control

שיטה זו היא השיטה הקלסית לבקרת קבוצת מדחסים. לכל מדחס משייכות נקודות מעבר עליון או תחתון (pressure set points). ניתן להוריד או להגביר את לחץ ה-set-points בהתאם לצריכה. אם צריך לתאם בין מספר מדחסים, הויסות ההדרגתי מזכיר "מפל" (cascade) או מערכת בקרה מדורגת. כאשר צריכת האוויר נמוכה, רק מדחס אחד

פועל והלחץ שלו נע בין  $p_{min}$  -1  $p_{max}$  בטווח הלחץ העליון של המדחס. לעומת זאת, הלחץ יורד כאשר מספר מדחסים פועלים יחד כדי לתת מענה לצריכת האוויר המוגברת (איור 1, טור 1).

יחסית התוצאה אינה מספיק טובה: ערכי הלחץ במערכת נמצאים במקסימום כאשר הצריכה היא נמוכה. נגרמים הפסדים בצריכת אנרגיה כתוצאה מדליפות. כאשר הצריכה היא גבוהה, לחץ העבודה יפחת וזה יגרום לצמצום הלחץ שברזרבה.

בשל ההקצאה של כל מדחס בנפרד לטווח לחץ מסוים, טווח הלחץ של מערכת הבקרה הוא רחב מאוד עם הבדלים התלויים בסוג המתמר (מתמר לחץ רגיל, מד לחץ או מתמר אלקטרוני). ככל שיותר מדחסים פועלים, סך טווח הלחץ הכולל יותר רחב. כל זה מוביל לויסות לא יעיל עם לחצים גבוהים, דליפות רבות ובזבוז אנרגיה. זו הסיבה שכאשר ישנם יותר משני מדחסים, שיטה זו תוחלף לשיטה אחרת.

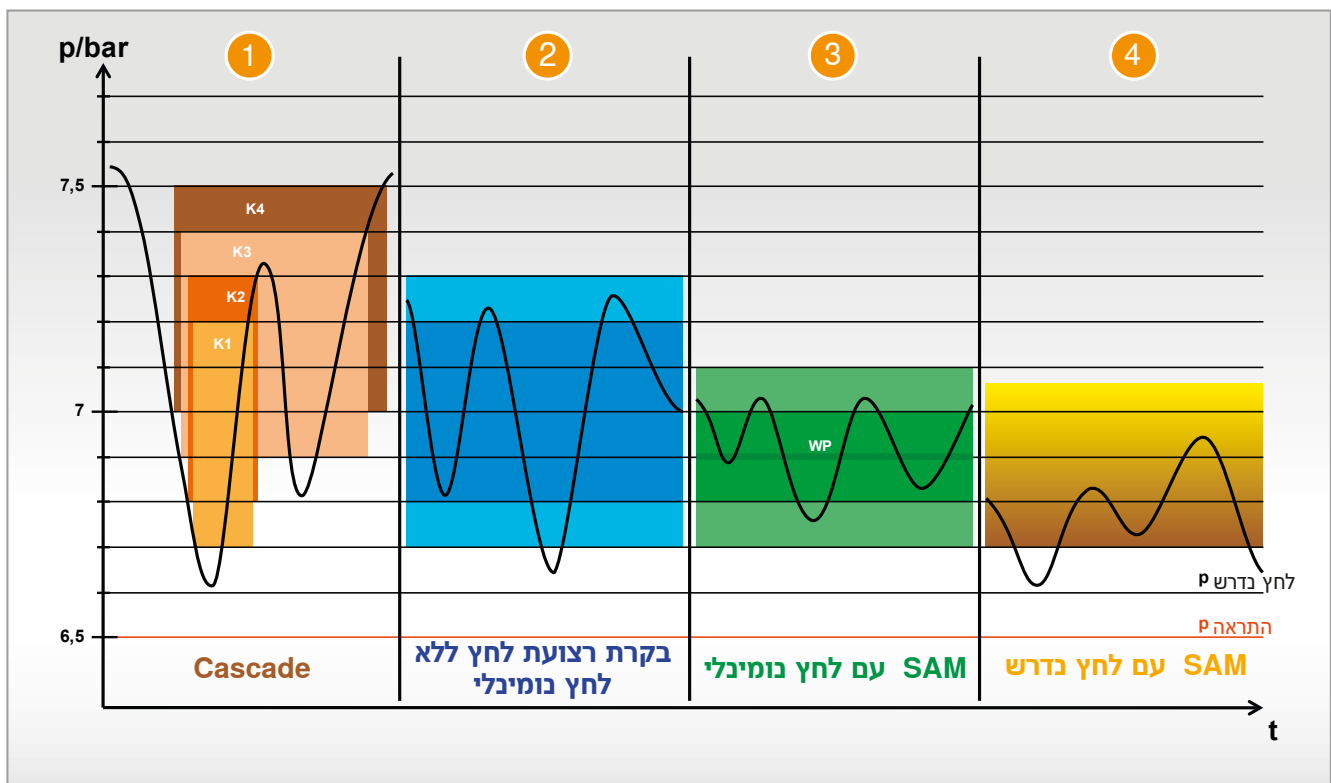
### 2. בקרת רצועת לחץ

בקרת רצועת לחץ (איור 1, טור 2) מאפשרת קואורדינציה בין מספר מדחסים בגבולות טווח לחץ אחד בודד שנקבע. בדרך זו ניתן להגדיר טווח בקרה יחסית נמוך.

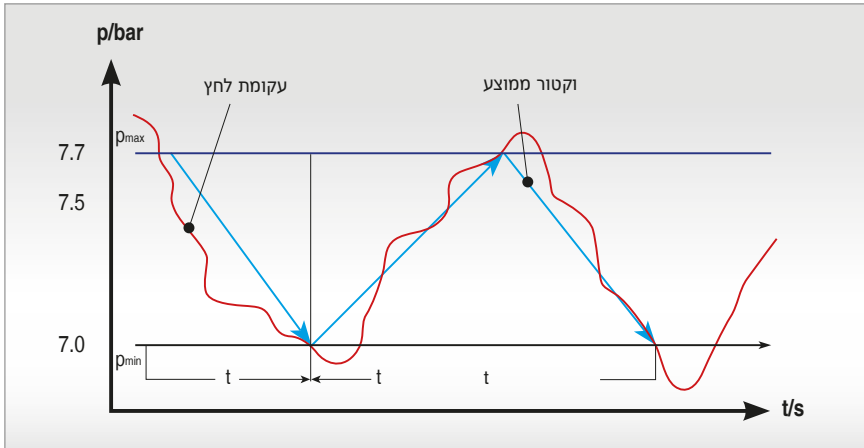
### 2. א. בקרה פשוטה

הגרסאות הפשוטות של בקרת רצועת לחץ אינן מסוגלות לבצע קואורדינציה בין מדחסים בעלי מידות שונות. על כן, הן לא מתאימות לתת מענה לדרישות במצבים של צריכה עודפת (פיקים) במערכות הנתונות כל הזמן לתנודות בצריכה.

על כן, שיטה זו הוחלפה על ידי מערכת שמסוגלת לכסות מצבים של צריכה עודפת (פיקים) כאשר היא לוקחת בחשבון זמני ירידה או עליה בלחץ כדי להפעיל את המדחסים בהתאם. עם זאת, העקומה האופיינית של בקרה זו מצריכה רצועת לחץ יחסית רחבה (איור 2). יתרה מזאת, תגובות של המדחסים ושל רשת חלוקת האוויר הדחוס אינן נלקחות בחשבון. על כן, כמו בבקרת cascade, הלחץ



איור 1: גרסאות שונות של בקרת מדחסים עם מערכת בקרה מרכזית

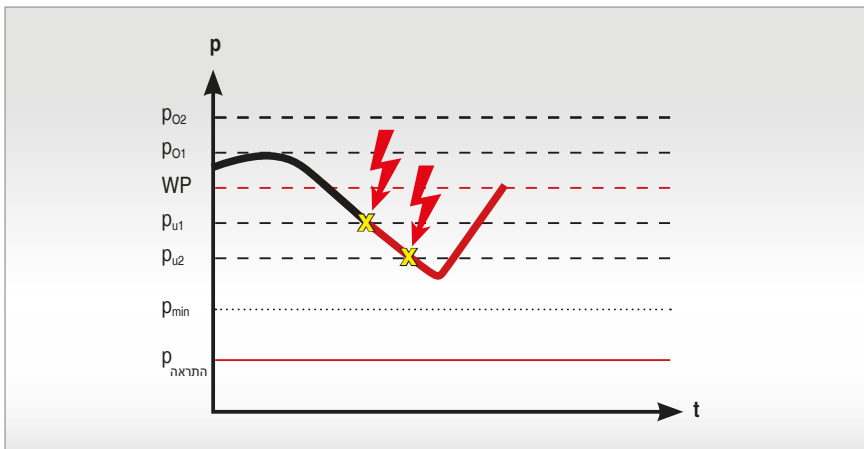


איור 2: המערכת מכונת את הלחץ האופטימלי בהתחשב במפלי הלחץ הקשורים לבקרה

עלול ליפול מתחת לרף המינימלי המותר. אי לכך, נדרש לשמור על טווח ביטחון בין הלחץ המינימלי הנחוץ לבין בקודת המיתוג הנמוכה ביותר במערכת.

**2. בקרת רצועת לחץ בהתאמה ללחץ**

בקרת רצועת לחץ בהתאמה ללחץ הנומינלי מציע שיפור משמעותי (איור 1, טור 3). שיטה זו שואפת לשמור על לחץ נומינלי מוגדר תוך בקרה על מדחסים בעלי ספיקות שונות בהתאם לצריכת אוויר דחוס. היתרון העיקרי של גרסת בקרה זו היא יכולתה להוריד את לחץ העבודה הממוצע במערכת ועל כן לחסוך באנרגיה ובעלויות.

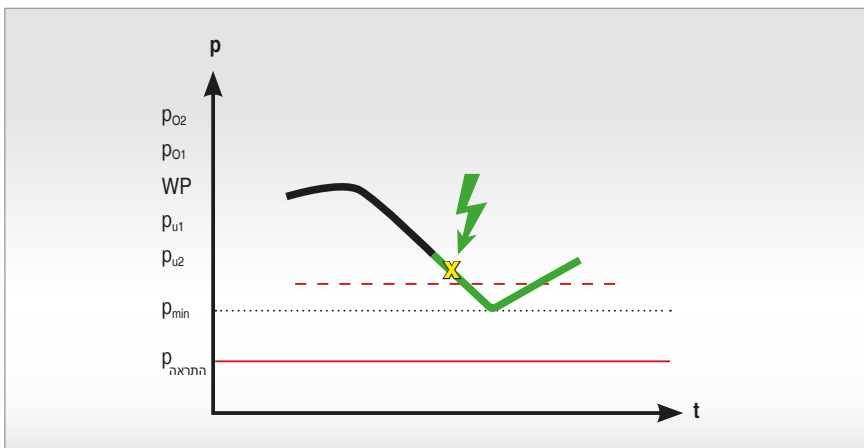


איור 3: עם הבקרה בהתאמה ללחץ הנדרש, אין יותר צורך להגדיר לחץ מינימלי ומקסימלי

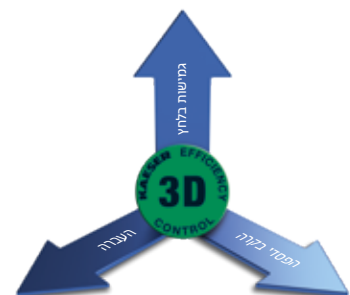
**3. בקרה בהתאמה ללחץ הנדרש**

בקרה בהתאמה ללחץ הנדרש (איור 1, טור 4) מציעה את השיטה הטובה ביותר. בגרסה זו, אין הגדרה של לחץ מינימלי או מקסימלי. מוגדר רק לחץ העבודה המינימלי המותר. בבקרה המדידה של המתמר (איור 3). הבקרה בוחרת בין המדחסים ומשנה את המהירות של מדחס זה או אחר כדי לקבל את התצורה האופטימלית בהתחשב בכל ההפסדים כתוצאה מהעלייה בלחץ, בזמני התחלת הפעלה, בזמני תגובה והפעלה במצב סרק. מכיוון שידועים זמני התגובה של המדחסים השונים, המערכת מסוגלת למנוע מהלחץ לרדת מתחת לרף הנדרש (איור 4).

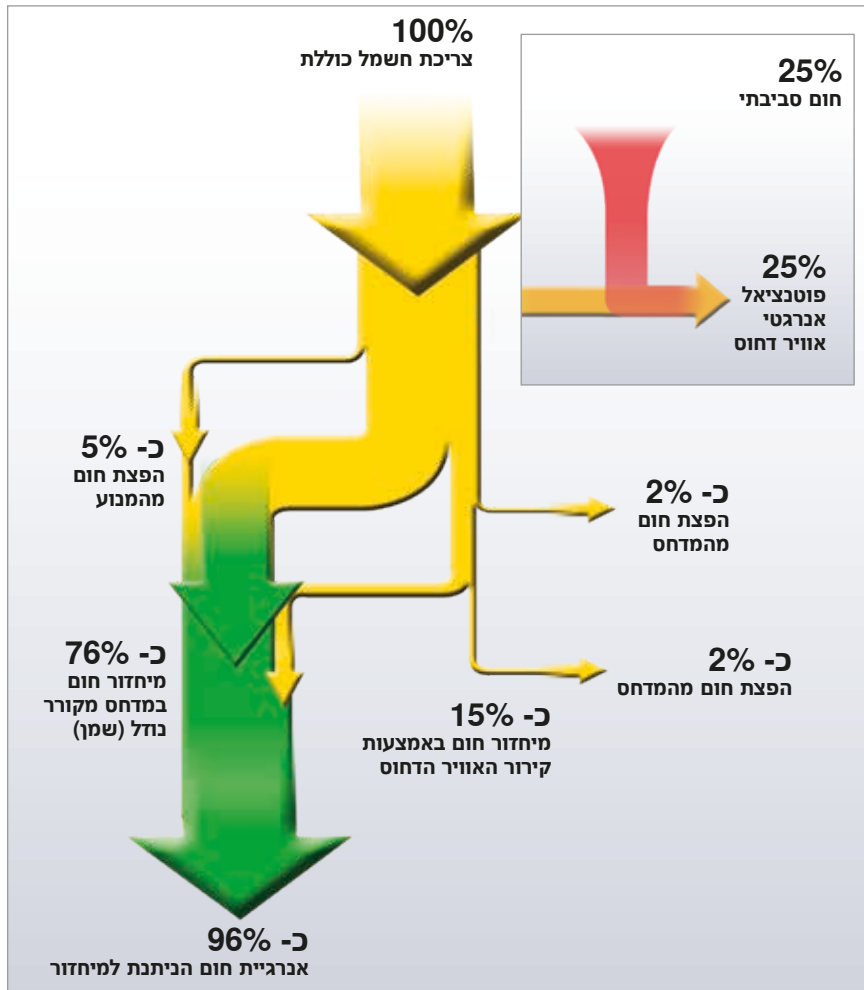
עם הדור החדש של בקרה בהתאמה 3D<sup>advance</sup> ומערכת הבקרה המרכזית SIGMA AIR MANAGER 4.0, ניתן להוריד עוד יותר את צריכת האנרגיה לעומת בקרת רצועת הלחץ המתייחסת ללחץ הנומינלי. הבקרה החדשה מונעת גם נפילות לחץ מתחת לרף המוגדר. מפתיע כמה פשוט המשתמש יכול לכוון בעצמו את הלחץ הנדרש.



איור 4: המערכת מונעת מפל לחץ מתחת לסף הלחץ הנדרש שהוגדר



# לחסוך באנרגיה באמצעות מיחזור חום



איור 1: זרימת אוויר חם - דיאגרמה

השימוש היעיל והמושכל במקורות אנרגיה מול העליה הבלתי פוסקת בעלויותיה הוא צו כלכלי בעל חשיבות רבה בפן האקולוגי. יצרני המדחסים מציעים בתחום זה פתרונות רבים כמו לדוגמה, מיחזור החום המופק על ידי המדחסים הבורגיים.

## 1. ראשית, המדחסים מפיקים חום

מפתיע מאוד: מדחס ממיר 100% מצריכת האנרגיה שהוא צורך לאנרגיה תרמית. במהלך הדחיסה, המדחס מטעין את האוויר בפוטנציאל אנרגטי (איור 1). ניתן להשתמש באנרגיה זו

## 2. האפשרויות למחזור חום

עומדות מספר אופציות בפני המשתמש המעוניין להפוך את ייצור האוויר הדחוס לכדאי.

### א. חימום באמצעות אוויר

הדרך הקלה ביותר למחזר חום ממדחס בורגי מקורר שמן או קרר, היא להשתמש באוויר הקירור שחומם על ידי המדחס. האוויר החם מובל בתעלות לחימום חלל של בתי מלאכה או מחסנים. האוויר החם יכול גם לשרת יישומים שונים כמו ייבוש, מסכי אוויר חם או חימום אוויר בעירה. אם אין צורך באוויר החם, הוא מתפזר לחלל דרך רפפה ידנית או אוטומטית. הבקרה התרמית על הרפפה מאפשרת לשמור על טמפרטורה יציבה כפי שהוגדרה. חימום חללים באמצעות צריכת אנרגיית החשמל של המדחס הבורגי מאפשר מחזור של עד 96% מאותה אנרגיה. הכדאיות קיימת גם עם מדחסים קטנים: החום המופק ממדחס של 7.5 kW יכול בקלות לחמם בית מגורים.

### ב. חימום מים

החום המופק על ידי מדחס הבורגי מקורר אוויר או מקורר מים ניתן למיחזור לצרכים שונים, באמצעות מחליף חום במסלול שמן הקירור. משתמשים במחליפי חום שונים, תלוי אם המים מיועדים לחימום, למכסה או למקלחת, לייצור או לצרכי ניקיון. עם מחליף חום אפשר להגיע לטמפרטורת מים של 70°C. הביסיון מראה שהעלויות בהתקנת מערכת למיחזור חום במדחס של 7.5 kW והלאה, מחזירות את עצמן תוך שנתיים. כמובן זה תלוי בתכנון נכון.

### 3. שיקולי אמינות

מערכת הקירור הראשית של המדחס לא תשרת גם את הקירור וגם את המערכת למיחזור החום. הסיבה היא שבמקרה של תקלה במערכת מיחזור החום, גם מערכת הקירור עלולה להיבזק וייצור האוויר הדחוס יעמוד בסכנה ממשית. על כן, צריך להרכיב מחליף חום נוסף המיועד למיחזור החום. במקרה של תקלה, הפעלת המדחס תהיה מוגנת: אם מחליף החום שמן/מים של מערכת מיחזור החום לא יפעל, המדחס יחזור למערכת הקירור אוויר/מים הראשית הפנימית וימשיך לספק אוויר דחוס (איור 2, 3, 4).



איור 2: חיבור נכון של מדחסים למערכת מיחזור חום



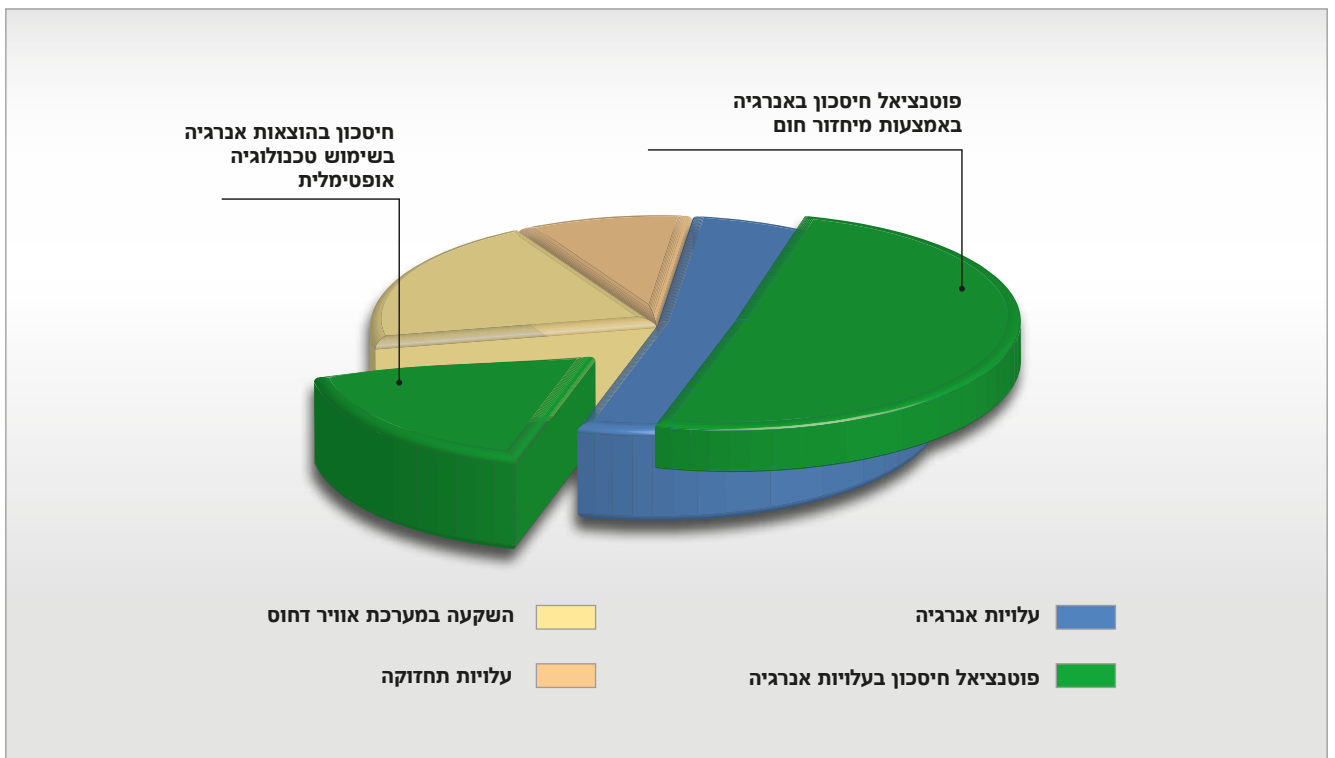
איור 3: תהליך מיחזור חום

**4. עד 96% אנרגיה לשימוש חוזר**

רוב האנרגיה הנצרכת ניתנת למיחזור בצורת חום: 76% נמצא בשמן הקירור של מדחס מקורר שמן, כ-15% אגור באוויר הדחוס עצמו ועד 5% הם הפסדי חום מהמבוע החשמלי. במדחס בורגי מקורר שמן/קורר עם מעטפת אוטמת, ניתן אפילו למחזר את החום מהמבוע החשמלי. בסך הכל, עד 96% מהאנרגיה הנצרכת על ידי המדחס זמינה לשימוש חוזר בצורת חום. מהאנרגיה שנותרה, 2% מתפזר בקרינה מהמדחס ועוד 2% נשאר באוויר הדחוס (איור 1).

**5. לסיכום**

מיחזור חום מהמדחס הוא אמצעי חכם להפוך את תחנת האוויר הדחוס לחסכונית יותר ובו זמנית לתרום לאיכות הסביבה. ההשקעה הנדרשת לכך נמוכה יחסית. היא מוחזרת במהירות בהתחשב לסביבת התחנה, לשימוש המיועד ולשיטת המיחזור שנבחרה (איור 4).



איור 4: מיחזור חום מאפשר חיסכון משמעותי בהוצאות אנרגיה

# ליצור רשת אוויר דחוס חדשה

**כדי שהאוויר הדחוס יהווה מקור יעיל של אנרגיה, מרכיבי הייצור, חלקי הטיפול ורכיבי החלוקה חייבים לפעול בהתאמה מושלמת אחד עם השני. התכנון הנכון של מידות התחנה וההתקנה המתאימה של הרשת, הם צעדים מהותיים.**

## 1. לייצר אוויר דחוס בעלויות נמוכות

כאשר מחשבים את עלויות האנרגיה, עלויות נזלי הקירור, עלויות התחזוקה והפחת, מחיר מטר מעוקב אוויר דחוס נע בין 0.5 ל-2.5 אירו, תלוי בגודל ובדגם המדחס ובתנאים הסביבתיים. ברור שמפעלי תעשייה רבים שמים דגש על ההתייעלות בייצור האוויר הדחוס. זו הסיבה שהמדחסים הבורגיים מקוררי שמן זוכים להצלחה כה רבה. הם מאפשרים חיסכון של עד 20% בעלויות ייצור האוויר הדחוס לעומת סוגי מדחס אחרים.

## 2. חשיבות הטיפול באוויר

הטיפול באוויר הדחוס נחשב לרוב למשני. זה חבל כי הטיפול הנכון באוויר יצמצם הוצאות תחזוקת צרכני האוויר ותחזוקת הצנרת אליהם. הצינורות המובילים אוויר דחוס לח מערכת הייבוש חייבים להיות עמידים בפני קורוזיה. יש לשים לב שאיכותו של אוויר דחוס שעבר טיפול לא תיפגע בגלל צנרת לא מתאימה.

## א. פחות טיפולים עם מייבשי קירור

ב-80% מהמקרים, מייבשי קירור מספקים איכות אוויר נדרשת. לעתים קרובות, עם התקנת מייבש קירור ניתן לוותר על מסננים בקו הגורמים למפלי לחץ. מייבש קירור צורך רק 3% מסך האנרגיה שצורך המדחס עבור ספיקת אוויר מקבילה. בנוסף, העלויות בטיפול תחזוקה, תיקוני צנרת וציוד פנאומטי עולות לפעמים פי עשר יותר מעלויות הייבוש בקירור.

## ב. יחידות קומפקטיות

עבור מפעלים קטנים וישומים מקומיים, קיימות יחידות קטנות וקומפקטיות, הכוללות מדחס בורגי, מייבש קירור ומיכל אוויר דחוס (איור 1).

## 3. ליצור רשת אוויר דחוס

ראשית יש להגדיר אם המערכת מרכזית או מבוזרת. מערכת מרכזית מתאימה בדרך כלל למפעלים קטנים ובינוניים מכיוון שלא מתעוררות הבעיות הקשורות למערכת אוויר מבוזרת כמו התקנה מסובכת, סכנת קיפאון של צנרת חיצונית לא מבודדת ומפלי לחץ כבדים בגלל אורך הצנרת.

## א. לתכנן נכון את מידות הרשת

חישוב מידות רשת הצנרת חייב להיות מדויק. החישוב מתבסס על העיקרון המרכזי שמפלי הלחץ בין המדחס לבין צרכני האוויר (כולל הטיפול באוויר, למשל מייבש הקירור) לא יעלו על 1 bar. אלה חישובי מפלי הלחץ עבור תחשיב כולל (איור 2):

- 1 צינור ראשי
- 2 סעפת חלוקה
- 3 צנרת חיבור
- 4 מייבש
- 5 מסנן/וסת/מגרדת, יחידה וצנרת סה"כ מקסימלי

0.03 bar  
0.03 bar  
0.04 bar  
0.20 bar  
0.50 bar  
0.80 bar

רשימה זו ממחישה כמה חשוב לחשב את מפלי הלחץ בקטעי צנרת שונים כאשר נלקחים בחשבון גם את הזוויות ואת ברדי הניתוק. לא מספיק למדוד כמה מטר צינור יש. צריך לחשב את אורך הצנרת "מנקודת המבט" של החומר העובר דרכו. בשלב הראשוני של התכנון, לא יודעים עדיין כמה זוויות וכמה שסתומים יהיו. כדי לחשב את אורך הצנרת, מכפילים מספר מטר של צנרת כפול 1.6. קיימות נוסחאות מקובלות (איור 3) או תרשימי מדידה כדי לחשב בקלות את קוטר הצנרת (בספח 1, עמוד 54).

**KAESER Toolbox מאפשר גם הוא לבצע את התחשיבים**  
[www.kaeser.com/Online\\_Services/](http://www.kaeser.com/Online_Services/)  
(Toolbox).

## ב. לחסוך באנרגיה בזכות התקנת צנרת

### נכונה

כדי לחסוך באנרגיה, צריך להניח את הצנרת בקו ישר ככל הניתן. כדאי להימנע מהנחת זוויות סביב עמודים למשל. צריך להניח את הצנרת בקו ישר לצד המכשול. זוויות חדות של 90 מעלות גורמות למפלי לחץ. וניתן להחליף אותן בזוויות עם קוטר רחב. במקום להשתמש בשסתומים רגילים, כדאי להשתמש בשסתומים כדוריים או שסתומי פרפר.

באזור הלחץ, זאת אומרת בחדר המדחסים בלבד, הכניסות והיציאות של הקו הראשי יחוברו מלמעלה או לכל הפחות מבצד. הקו

## נוסחה לחישוב

$$d_i = \sqrt[5]{\frac{1.6 \times 10^3 \times V^{1.85} \times L}{\Delta p \times p_s}}$$

$d_i$  = קוטר צנרת פנימי (m)

$p_s$  = לחץ מערכת (מוחלט ב-Pa)

$L$  = אורך נומינלי (m)

$V$  = ספיקה ( $m^3/s$ )

$\Delta p$  = מפל לחץ (Pa)

איור 3: הנוסחה לחישוב קוטר צנרת



איור 1: היחידה השלמה AIRCENTER עבור הייצור, הטיפול ואחסון האוויר הדחוס - קומפקטית וחוסכת מקום.



איור 2: החלקים העיקריים של מערכת חלוקת אוויר דחוס: קו ראשי (1), צנרת חלוקה (2), חיבור צנרת (3), מייבש (4), FRL יחידה/צינור (5)

הצנרת השונים. לפני החלטה, מומלץ להשקיע בלימוד אותן הטבלאות. מומלץ לבצע השוואה על בסיס העומסים שיופעלו בעתיד על הקו הראשי במהלך הפעלה רגילה. סוג הצנרת יקבע בהתאם. זו הדרך היחידה לתכנן צנרת יעילה העונה לצרכים.

#### ד. לשים לב לחבר נכון

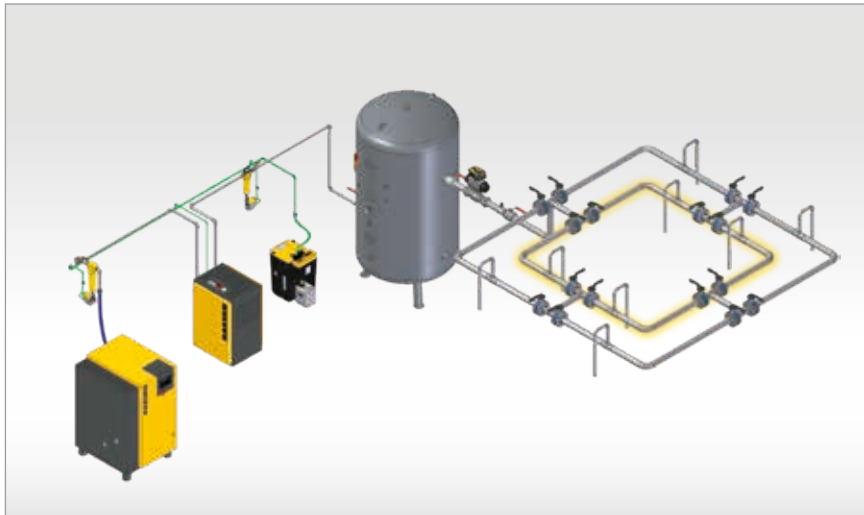
הצינורות יחוברו בהלחמה או ריתוך, אפשר גם על ידי הברגה והדבקה. חשוב שהחיבור יהיה חזק כדי למנוע דליפות ורעשים מכניים ולהבטיח איטום, גם אם הפירוק יכול להיות קשה.

הראשי יותקן בשיפוע של 2%. הניקוז של המשקעים יתוכנן בנקודה הנמוכה ביותר של קו זה. באזור היבש, יש להניח את הצנרת במאוזן ולכוון את הקווים כלפי מטה.

#### באיזו צנרת להשתמש?

אין לנו המלצה מיוחדת לגבי סוג חומר הצנרת. בכל מקרה, בגלל פליטת החום מהמדחסים, צריך להשתמש בצנרת ממתכת. עלות הרכישה אינה הקריטריון הקובע: מגולוונים, מנחושת או מפלסטיק, עלות הצינורות כמעט זהה כאשר מוסיפים עלויות הציוד הנלווה וההתקנה. צינורות נחושת הם ב-20% יותר יקרים. מחירים ירד בעקבות שיטות ייצור חדשות. כיום, יצרנים רבים מציעים טבלאות המגדירות את תנאי השימוש האופטימליים של סוגי

# לשדרג רשת אוויר דחוס קיימת



איור 1: שדרוג קווי הצברת על ידי הנחת טבעת אוויר נוספת

בקרב מפעלים רבים, תחנת האוויר הדחוס לא מתוחזקת או מיושבת. על כן, היא גורמת לבזבז כסף ולבזבז אנרגיה רבה. כדי לפתור את הבעיה, נדרשת עבודה רצינית ומעמיקה. להלן מספר עצות כדי להוביל נכון תוכנית שדרוג תחנת אוויר דחוס.

## 1. תנאי ראשון: אוויר דחוס יבש

תכנון נכון של רשת אוויר דחוס חדשה חוסכת בעיות רבות בהמשך. שדרוג רשת קיימת הוא עניין מסובך יותר. הוא מיועד לכישלון אם קיימת לחות כלשהי ברשת החלוקה. לפני תחילת הביצוע, יש לוודא שהאוויר מיובש כנדרש.

## 2. איך מטפלים במפלי לחץ חריגים ברשת החלוקה?

אם מפלי הלחץ עדיין חריגים למרות שהותקנה מערכת המטפלת באוויר, הסיבה היא לכלוך בצינורות. חלקיקים הנמצאים באוויר הדחוס מצטברים על דפנות הצינורות ולבסוף המעבר נעשה צר.

### א. להחליף או לנקות עם זרם אוויר

אם המשקעים התקשו, אין בדרך כלל פיתרון אחר מאשר להחליף את הצינורות. אם ההיצרות לא גדולה מדי, ישנה אפשרות לנקות את הצינורות בזרם אוויר דחוס ולאחר מכן לייבש אותם.

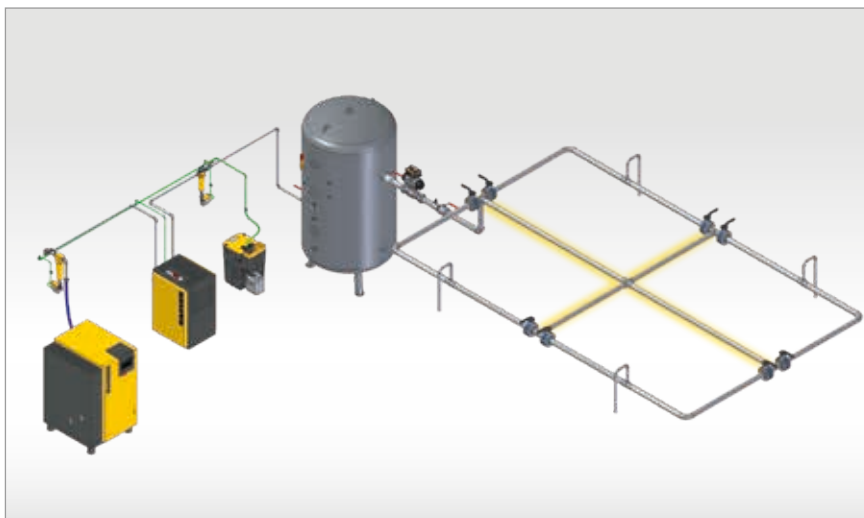
### ב. להניח צינורות נוספים

דרך מצוינת לפתור בעיה של קוטר שלוחה היא לחבר צינור שני במקביל לאותה שלוחה. אם מערכת טבעתית מקורית צרה מדי, אפשר לפתור את הבעיה בהנחת טבעת משלימה נוספת (איור 1).

אם המידות נכונות, שלוחה נוספת או טבעת כפולה לא רק פותרת בעיה של מפלי לחץ. היא גם משפרת את אמינות רשת החלוקה. אפשרות נוספת לשפר את זרימת האוויר ברשת קיימת היא להרחיב את המערכת על ידי קווי חיבור צולבים (איור 2).

### 3. לאתר ולתקן את הדליפות

היעד הראשון הוא לבטל ככל הניתן את הדליפות.



איור 2: הגדלת צנרת החלוקה על ידי חיבור קווי רשת

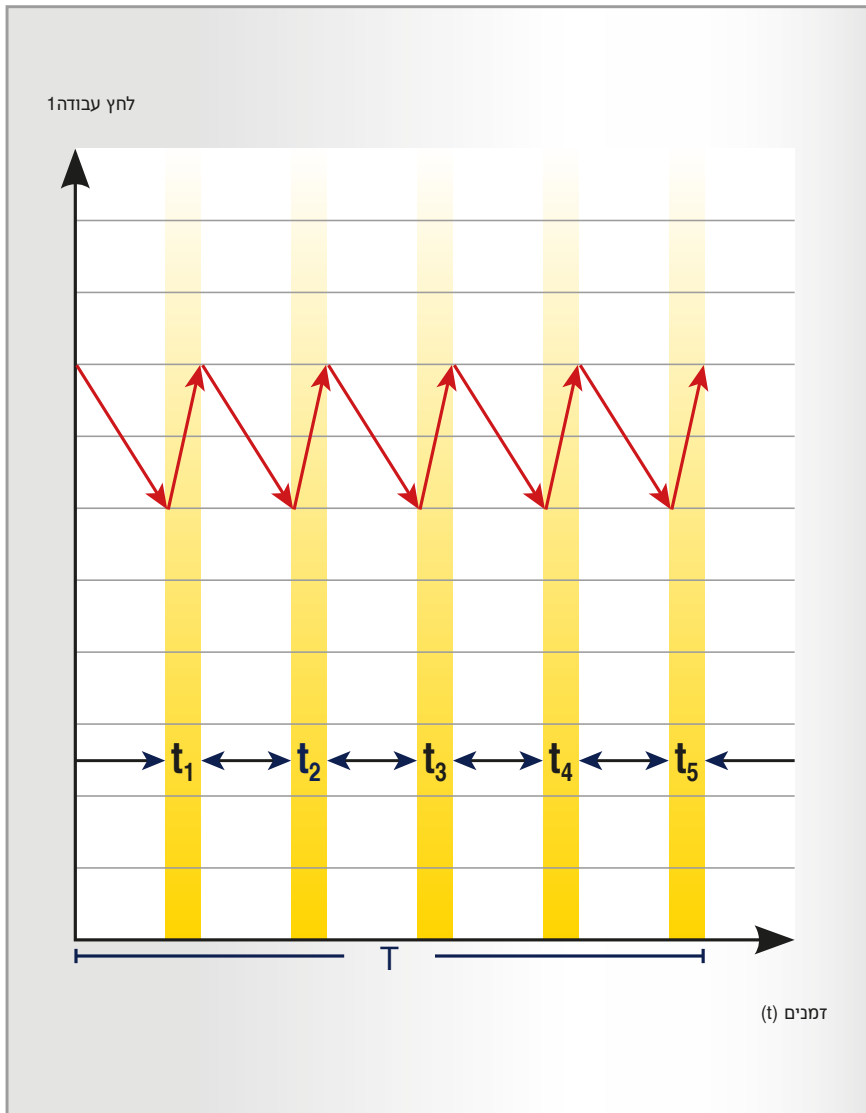
### א. לחשב את הספיקה הכוללת של הדליפות

לפני שמתחילים לחפש היכן הדליפות ברשת, צריך לקבוע את היקפן. קיימת לשם כך שיטה פשוטה: עוצרים את כל הצרכנים ולאחר מכן מודדים על פני זמן מוגדר את מספר הפעמים שהמדחס הופעל (איור 3). אוספים את נתוני המדידה ובעזרת הנוסחה הבאה ניתן לקבוע את היקף הדליפות:

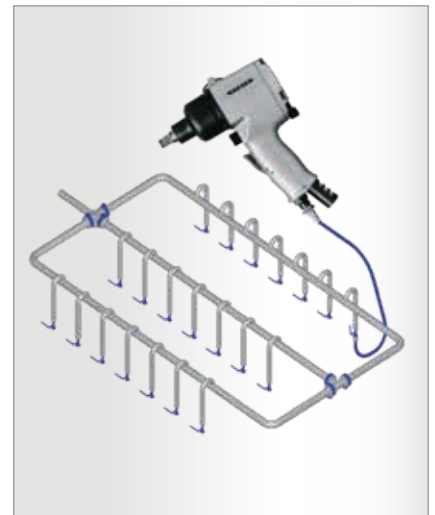
$$VL = \frac{VC \times \sum t_x}{T}$$

מפתח:  
 VL = נפח דליפה (m<sup>3</sup>/s)  
 VC = ספיקת המדחס (m<sup>3</sup>/min)  
 $\sum t_x = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5$   
 זמן שהמדחס פועל במצב דחיסה (min)  
 T = זמן כולל (min)

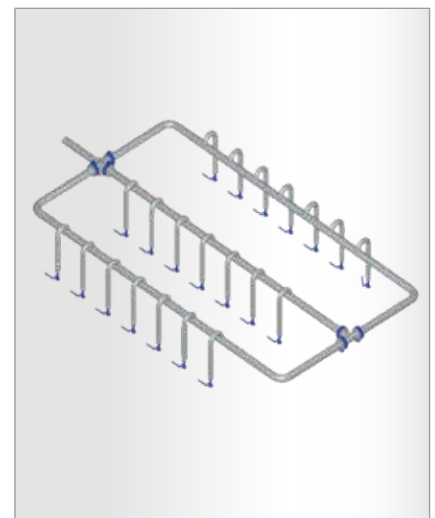




איור 3: חישוב סך הדליפות על ידי מדידת זמני הפעלת המדחס כאשר כל הצרכנים מנותקים



איור 4: מדידת הדליפות בציוד הפנאומטי + צברת



איור 5: מדידת דליפות בצברת

וכאשר הצברת הותאמה לספיקת האוויר הנדרשת, אז הרשת הישנה הופכת למערכת אספקת אוויר דחוס יעילה.

#### 4. איפה נמצאות רוב הדליפות?

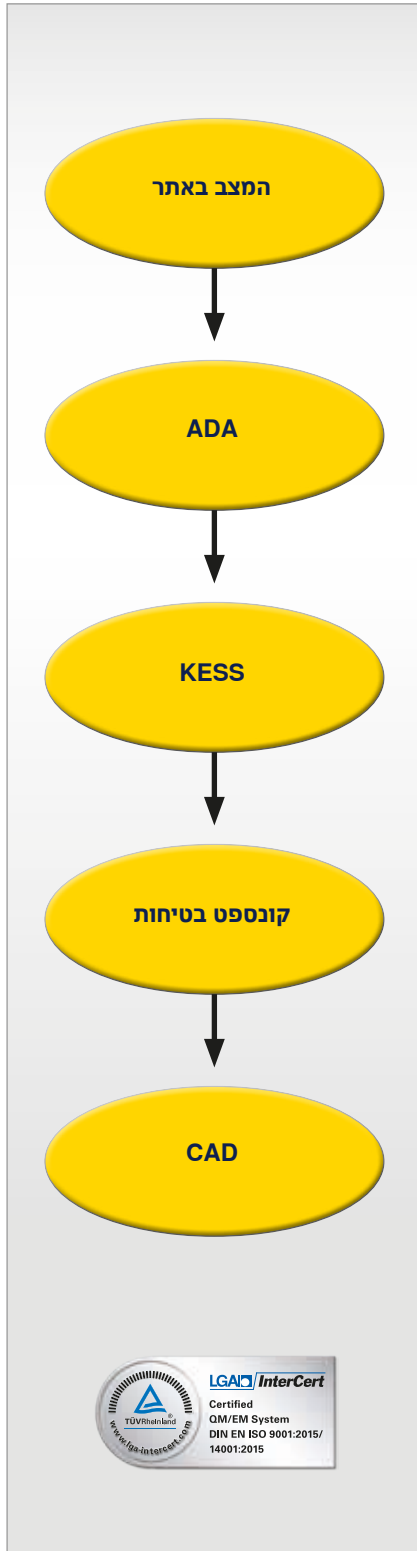
מתוך ניסיון, אנחנו יודעים שקרוב ל-70% מהדליפות ממוקמות בקצה המטרים האחרונים של הרשת - זאת אומרת קרוב לנקודת יציאת האוויר. אפשר לאתר אותן בעזרת מי סבון או ספריי מיוחד. בדרך כלל, קיימות דליפות בצברת הראשית המובילה אוויר יבש מפני שסיבי האיטום הישנים מיועדים לרשת שמובילה אוויר לח התייבשו במגע עם האוויר היבש. קל לאתר את הדליפות בצברת הראשית עם חיישן אולטרה-סאונד. כאשר אותרו הדליפות והן טופלו

#### ב. מדידת הדליפות ברמת הצרכנים

כדי לקבוע את היקף הדליפות ברמת הצרכנים, צריך לחבר את הכלים הפנאומטיים, את המכונות ואת הכלים ולאחר מכן ניתן לחשב את סך הדליפות הכולל (איור 4). לאחר מכן, צריך לסגור את ברזי הניתוק שבמעלה כל הצרכנים כדי למדוד את הדליפות שבצברת (איור 5).

הפרש בין סך הדליפות לבין הדליפות שברשת מבטא את הדליפות ברמת הציוד הפנאומטי, חיבוריהם וצינורותיהם.

# ניתוח צרכים (ADA) - להגדיר מצב קיים



"KAESER Energy Saving System" (KES), מכסה את כל ההיבטים ואף יותר כאשר מדובר בניתוח ותכנון מערכת: היא כוללת ניתוח פרופיל הצריכה, התכנון והיישום (איור 1) הדרכת הצוות ואת השירות ללקוח.

הגורמים הקובעים הם איכות היעוץ והבחירה הנכונה בצידוד המתאים: הפוטנציאל הגדול ביותר לחיסכון הוא בצריכת האנרגיה ובדרישות תחזוקה מינימליות ולא ברמת ההשקעה הכספית ברכישה.

## 2. ניתוח פרופיל הצריכה

תחקיר מפורט וניתוח פרופיל הצריכה הקיימת והעתידי הם הבסיס לאבחון שהמערכת KES מספקת.

כלי האבחון שפותח על ידי KAESER הנקרא Air Demand Analysis ADA מתייחס לתנאים ולדרישות הייחודיים של כל יישום:

## א. תכנון מערכת אוויר דחוס חדשה

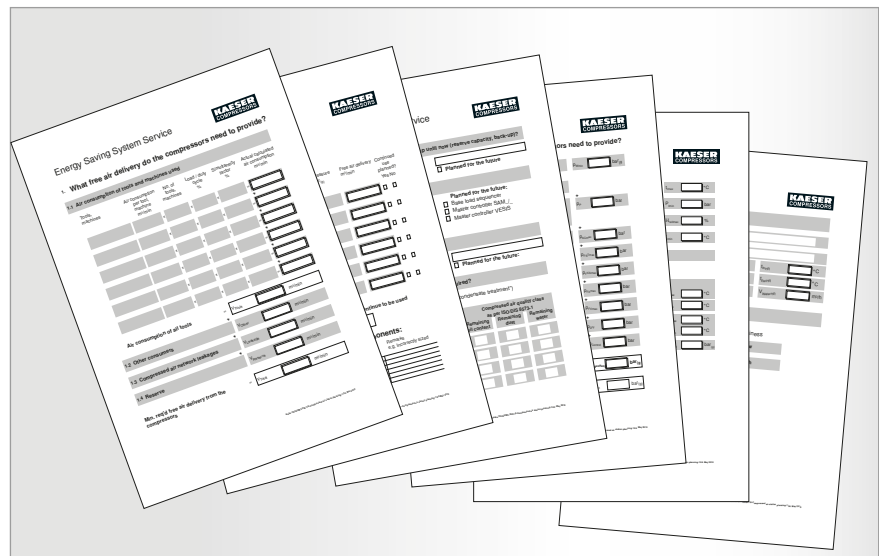
בתחילה, המפעיל מקבל שאלון מיוחד לתכנון מידותיה של התחנה (איור 2). היעוץ של KAESER מנתח את נתוני השאלון כדי להגדיר מהו הצידוד הנדרש המתאים ביותר ליישום שהוגדר. השאלות מכסות כל תחום ותחום באספקת אוויר דחוס וכוללות התייחסות כמובן ליעילות אך גם לשמירה על איכות הסביבה.

בדרך כלל, תחנות אוויר דחוס מודרניות הן מערכות מורכבות. הפעלתן תהיה כדאית רק כאשר אותה מורכבות תילקח בחשבון במהלך התכנון, השדרוג או ההתרחבות של התחנה. חברת KAESER פיתחה מכלול שלם של כלים לתמוך במהלכים כאלה. זה כולל מוצרים, שירותים, יעוץ וליווי הלקוח וכן טכנולוגיה בעיבוד מידע בשטח הבדסת האוויר הדחוס.

השימוש באוויר דחוס בכל תחומי התעשייה עובר כל דמיון. אספקה אמينة וטיפול נכון הם תנאים מוקדמים הכרחיים לשימוש יעיל וכדאי. המערכת צריכה לספק אוויר דחוס בספיקה ובאיכות נדרשת, בעלות המשתלמת ביותר.

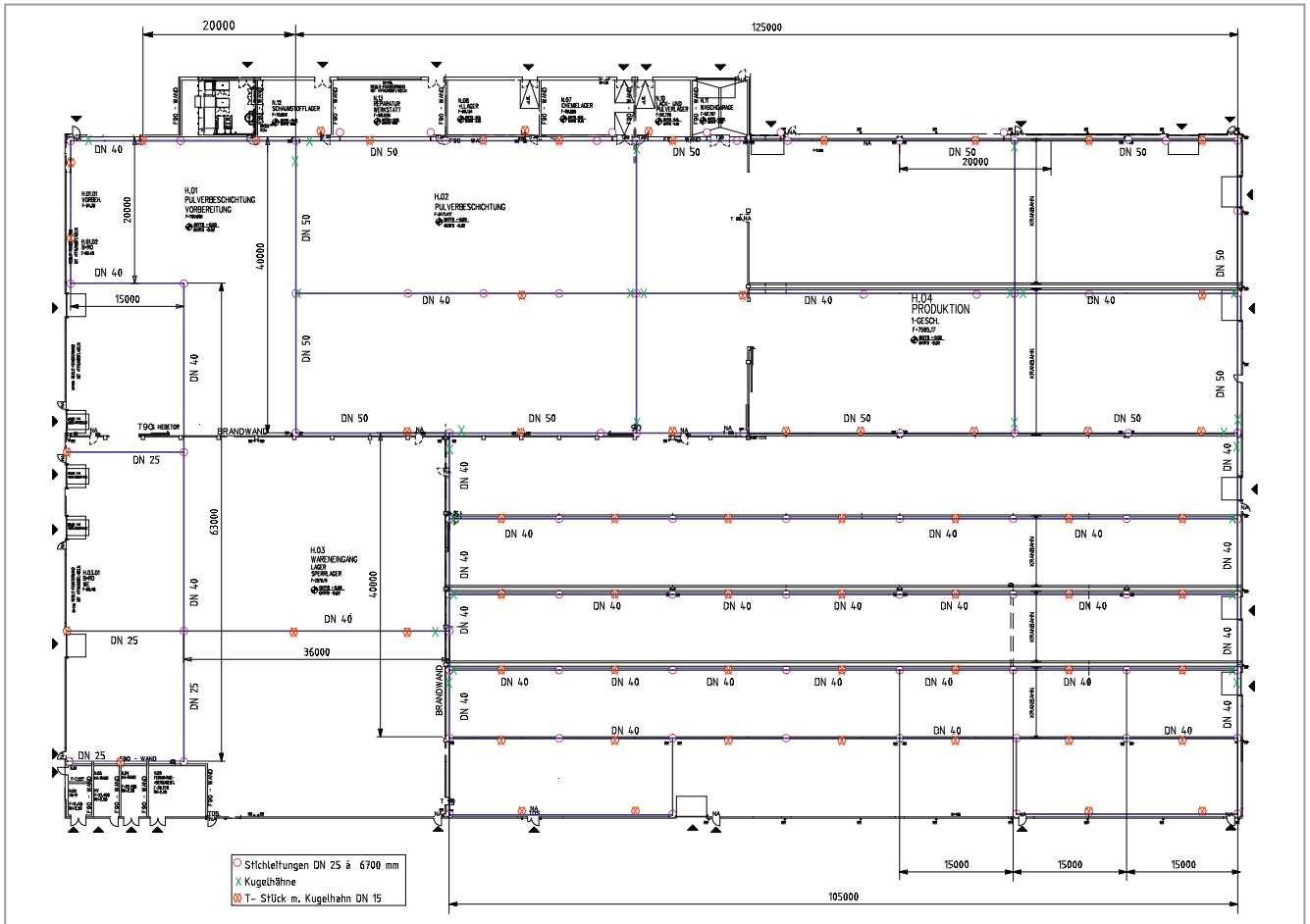
## 1. להתייעץ כדי להשיג יעילות

מערכת האוויר הדחוס משתלמת אם היא מתאימה ליישומים להם היא מיועדת בהתחשב למיקום ולתנאי ההפעלה הסביבתיים. זאת אומרת שאנו חייבים לבחור במדחסים המתאימים, בצידוד הנכון לטיפול באוויר, שהצנרת תהיה במידות הנכונות וכמובן שמערכת הבקרה תהיה יעילה. בנוסף, עלינו גם להתאים את האוויר מבלי לפסוח על הטיפול במשקעים המצטברים. ככל הניתן, יש לבדוק אפשרות למחזר את חום הנפלט מהמדחס. המערכת



איור 1: מערכת ניתוח הנתונים של KAESER Compressors

איור 2: שאלון "תחנת אוויר דחוס" עבור מערכות קיימות או מערכות חדשות (ראה גם בספח בעמוד 56)



איור 3: תרשים כללי של רשת האוויר הדחוס

יצוינו מידות וסוג הצינורות, נקודות צריכת אוויר גבוהה וגם אלה הדורשות לחץ ואיכות אוויר מיוחדים.

**ב. יישומי אוויר דחוס**

מכיוון שהאוויר הדחוס הוא אמצעי רב גוני, ישנה חשיבות גבוהה לדעת במדויק למה הוא מיועד. האוויר הדחוס יכול לשמש כאוויר בקרה ואוויר תהליכי, לטיפול במשטח ולניקוי או עבור כלים ברוטציה.

**ג. המדחסים הקיימים**

המשתמש יציין גם מהו סוג ודגם המדחסים הקיימים בתחנה, את המפרט הטכני שלהם כמו לחץ עבודה, ספיקה, צריכה, סוג קירור והאם קיימת מערכת למיחזור חום.

מומלצת כאשר רוצים להחליף את המדחסים הישנים למכונות חדשות. זו ההזדמנות לתקן פרמטרים, לשפר מחזורי עבודה ולתכנן מערכת בקרה מרכזית מתאימה.

**ד. שינויים בתנאי הפעלה**

**כאשר התנאים משתנים, השכל הישר אומר להתייעץ עם מומחה.** במקרים רבים, שינויים פשוטים כמו שינוי שיטת הטיפול באוויר או כיוון נכון של הלחץ מאפשרים הורדת עלויות.

**3. ה נתונים הנדרשים א.תרשים פריסה**

תרשים הפריסה של מתקן הייצור הכרחי כמידע בסיסי (איור 3). התרשים יראה את הקו הראשי, את קווי החיבור ואת נקודות האספקה במערכת האוויר הדחוס. בנוסף,

**ב. התרחבות ושדרוג**

בשונה מהקמת תחנה חדשה, תוכנית התרחבות או שדרוג של מערכת קיימת יכולה להישען על המערכת הקיימת כדי להציע פתרון תפור לצורכי הלקוח. חברת KAESER מעמידה לרשות הלקוח מכשירי מדידה כדי להגדיר במדויק מהי צריכת האוויר בנקודות עבודה שונות ובזמנים שונים. חשוב ביותר להגדיר לא רק ממוצעי צריכה אלא גם ערכים מקסימליים ומינימליים (איור 8, עמוד 29).

**ג. בדיקת יעילות מערכת קיימת**

גם במערכת קיימת, מומלץ לבדוק מדי פעם, באמצעות מערכת האנליזה הממוחשבת האם הדחיסה (עדיין) נכונה, האם ההגדרות של מערכת הבקרה המרכזית (עדיין) מתאימות או האם רמת הדליפות נמצאת בטווח המקובל הסביר. מערכת האנליזה ADA מאוד

# ניתוח צרכים (ADA) - להגדיר מצב קיים

## ד. הטיפול באוויר הדחוס

בנוגע לטיפול באוויר, חשוב לדעת האם הטיפול באוויר מתבצע במרוכז או שהטיפול הוא מקומי ומה הן דרגות האיכות הנדרשות. גם המפרט הטכני של הציווד המטפל באוויר ייבדק. תרשים זרימה יספק את הסקירה הכללית הנדרשת (איור 4, עמוד 28).

## ה. מערכת הניטור והבקרה

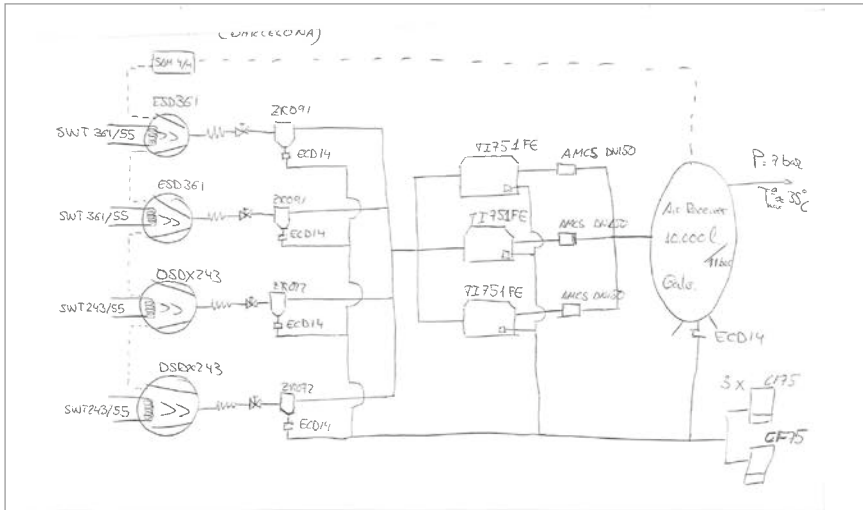
בדיקת מערכת הניטור והבקרה הקיימת גם היא מרכזית מכיוון שיעילותה של תחנה נמדדת על פי יעילותו של כל המדחס בנפרד והיכולת כל המכונות לפעול בתיאום מלא.

## 4. חשיבה משותפת לקוח/יצרן

במהלך השיחה המקדימה, הלקוח יציג את כל המידע שברשותו ויעלה את הבעיות העולות ממערכת אספקת האוויר הקיימת. יתכן שמדובר בלחץ נמוך מדי או בלתי יציב, באיכות אוויר נמוכה, בשימוש לקוי במדחסים או בבעיה של קירור.

## 5. סיור לבדיקה

הסיור לבדיקת המערכות הוא צעד מקדים חשוב מאוד לקראת קבלת תמונת מצב מקיפה. עדיף להתחיל את הסיור באזורים



איור 4: תרשים תחנת אוויר דחוס (P & I), רישום ידני

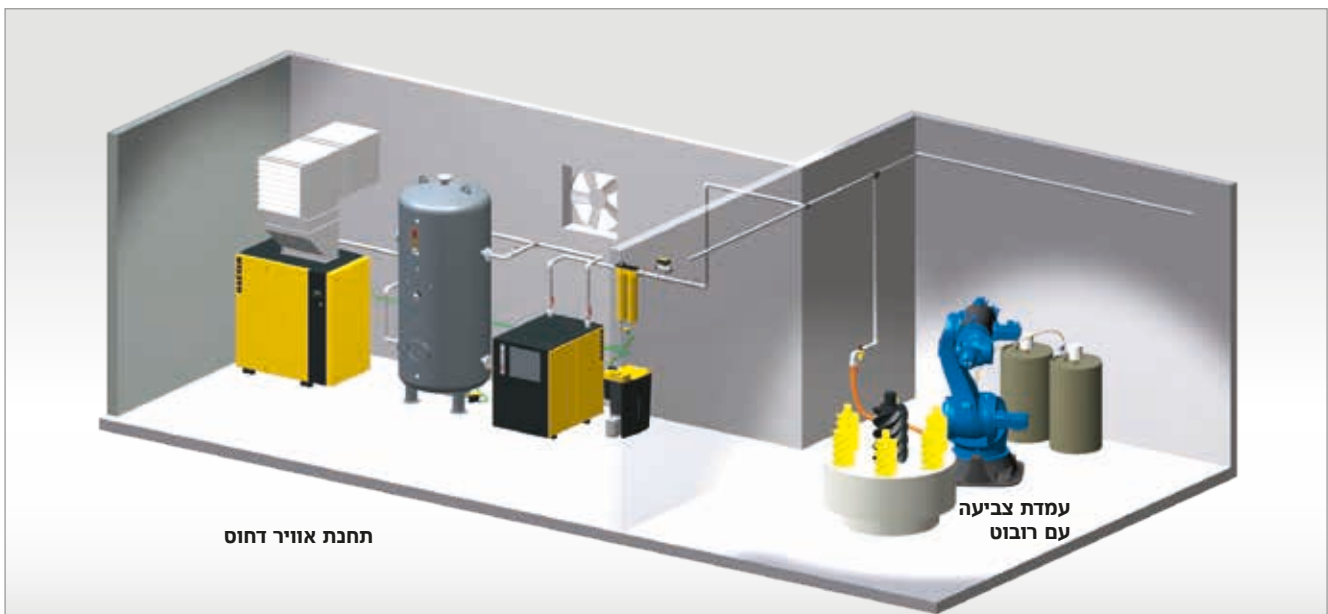
צריך לבדוק את ההגדרות שלהם (לחץ יניקה ולחץ יציאה) במצב דחיסה (איור 6).

צריך לבדוק את מפרידי המים שבמעלה וסתי הלחץ אם לא הצטברו בהם נוזלים ולכלוך. גם את צינורות הניקוז המובילים החוצה כלפי מטה יש לבדוק (איור 7).

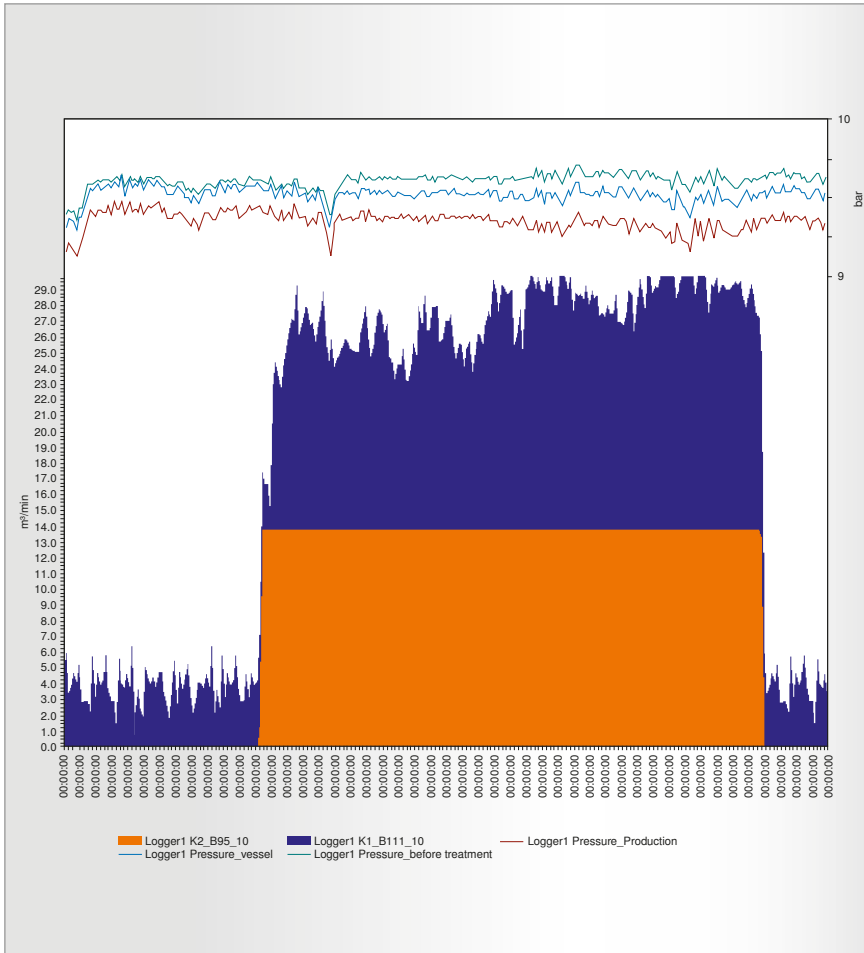
הכי בעייתיים למשל, בנקודות בהן מפלי הלחץ הכי רחבים או שהאיכות האוויר נמוכה (איור 5). בדרך כלל אלה אותן המקומות שמהם לוקחים דגימות.

## א. חיבורי צנרת, וסתי לחץ, מפרידי מים

חיבורי הצנרת לצרכנים מאוד רגישים לדליפות. על כן, צריך לבדוק אותם היטב. אם משתמשים בוסתי לחץ,



איור 5: משמעותי מאוד: בדיקת מצב התחנה



איור 8: פרופיל הלחץ וצריכת האוויר הדחוס שנמדד באמצעות ADA, באתר



איור 6: יחידת תחזוקה עם וסת לחץ



משקעים

איור 7: לבדוק אם קיימת לחות בקו האוויר הדחוס

### 6. מדידת לחץ וצריכת אוויר (ADA)

במשך עשרה ימים, מקליטים את נתוני ההפעלה של מערכת האוויר הדחוס כדי לדלות את פרופיל הלחץ ואת פרופיל הצריכה. קולט הנתונים אוסף את המידע הרלוונטי ומעביר אותו למחשב PC ליצירת גרף מפורט של צריכת האוויר. הגרף מציג את מפלי הלחץ, את התנודות בצריכה, את זמני הפעלת המכונות במצב סרק, את זמני הדחיסה וזמני עצירת המדחסים ואת ביצוע כל מדחס ביחס לצריכת האוויר. כדי להשלים את התמונה, במהלך כל תקופת המדידה יירשמו כל הדליפות. התהליך מתואר בפרק 10, עמ' 24. צריך לבודד מספר חלקים מהקו הראשי במהלך סוף השבוע.

### ה. התחבה

תחבת האוויר הדחוס עצמה עשויה להיות מקור ללקויים חמורים. יש צורך לבדוק את מיקום המדחסים, את האוורור והקירור ואת הצנרת. יהיה צורך להגדיר את מעברי הלחץ בין המדחסים, כמו כן, את הנפח של מיכלי האוויר הדחוס והיכן נקודות מדידת הלחץ במדחסים.

### ו. להגדיר את נקודות המדידה

כאשר הבדיקות הושלמו, המומחה של KAESER יגדיר עם המשתמש את נקודות המדידה עבור האבליזה של צריכת האוויר. לכל הפחות נדרשת מדידת לחץ למעלה ולמטה במערכת הטיפול באוויר וכן ביציאה מרשת חלוקת האוויר הדחוס.

### ב. ברדי ניתוק

מצב קווי החלוקה היוצאים מהקו הראשי משפיעים רבות על יעילותה של המערכת. ברדי ניתוק והדומים להם משחקים תפקיד חשוב: צריך לבדוק האם מדובר בשסתום כדורי או בשסתום פרפר או בברד סגירת מים או בברד זוויתי.

### ג. הטבעת הראשית

כאן, הנקודה החשובה ביותר היא לאתר את הסיבה למפלי הלחץ כמו מקטעים צרים.

### ד. המערכת לטיפול באוויר הדחוס

הנקודות העיקריות לבדיקה הם נקודת הטל בלחץ (מידת היובש) ומפלי הלחץ הנגרמים על ידי המערכת לטיפול באוויר. נדרשות בדיקות איכות בהתאם ליישום.

# להגדיר את הפתרון הטוב ביותר

את החלל לקירור האוויר בדרך יעילה מאוד. מערכות מקוררות אוויר חוסכות בין 30% ל-40% מהעלויות הקירור לעומת מערכות מקוררות מים (איור א 2 עד ג 2).

#### 4. הפעלה ובקרה אופטימלית

כדי שהמערכת תישאר יעילה לטווח ארוך, לא מספיק למקסם את היחס עלות/תועלת. צריך להבטיח שקיפות מוחלטת באמצעות מערכת בקרה יעילה. מערכת הבקרה SIGMA CONTROL היושבת על PC תעשייתית, נותנת את התשובות הנדרשות באמצעות חמישה מצבי הפעלה מתוכנתים מראש. היא אוספת את הנתונים ומעבירה אותם לרשת נתונים. מערכת הבקרה המרכזית SIGMA AIR MANAGER (עמ' 18) גם

עודפת בטווח תנודות לחץ של רק 0.2 bar. מערכות בקרה חכמות כמו SIGMA AIR MANAGER עונות על דרישה זו עם בקרה חכמה ברמה גבוהה. מערכת בקרה זו מתקשרת עם המדחסים ועם כל ציוד נלווה (מקדק משקעים, מייבש וכו') באמצעות מערכת תקשורת נתונים bus.

#### 3. תכנון מרחבי חכם

כאשר מתכננים מערכת חדשה או רוצים לשדרג את קיימת, נרצה גם לחסוך במקום. עיצוב המערכות המודרניות של KAESER נותנות גם כאן תשובות אופטימליות. במהלך התכנון לא מסתפקים במפות שטח כלליות ותרשימים. אנחנו מציעים גם הדמיות תלת ממדיות להמחשה. לעתים קרובות ניתן לנצל

עם מערכת אוויר דחוס מתוכננת ברמה האופטימלית, ניתן לחסוך יותר מ-30% בממוצע בעלות ייצור האוויר הדחוס. קרוב ל-70% ועד 90% מהעלות הכוללת מקורה בצריכת האנרגיה. לאור עליית המחירים הבלתי פוסקת, יעילותה של תחנת אוויר דחוס היא הגורם המהותי ביותר עבור העסק.

באמצעות KAESER Energy Saving System KESS, החישובים האופטימליים מאפשרים להגדיר מבין מספר אפשרויות עבור היישום הקיים, מהי התצורה היעילה ביותר. כאשר מדובר בהקמת תחנה חדשה, שאלון התכנון המקיף מספק את הבסיס לחישובים. עבור מערכות קיימות, החישובים מתבססים על פרופיל הצריכה היומית כפי שהיא נקלטה על ידי ADA - Air Demand Analysis (ראה עמוד 29 איור 8).

#### 1. ניתוח נתונים ממוחשב

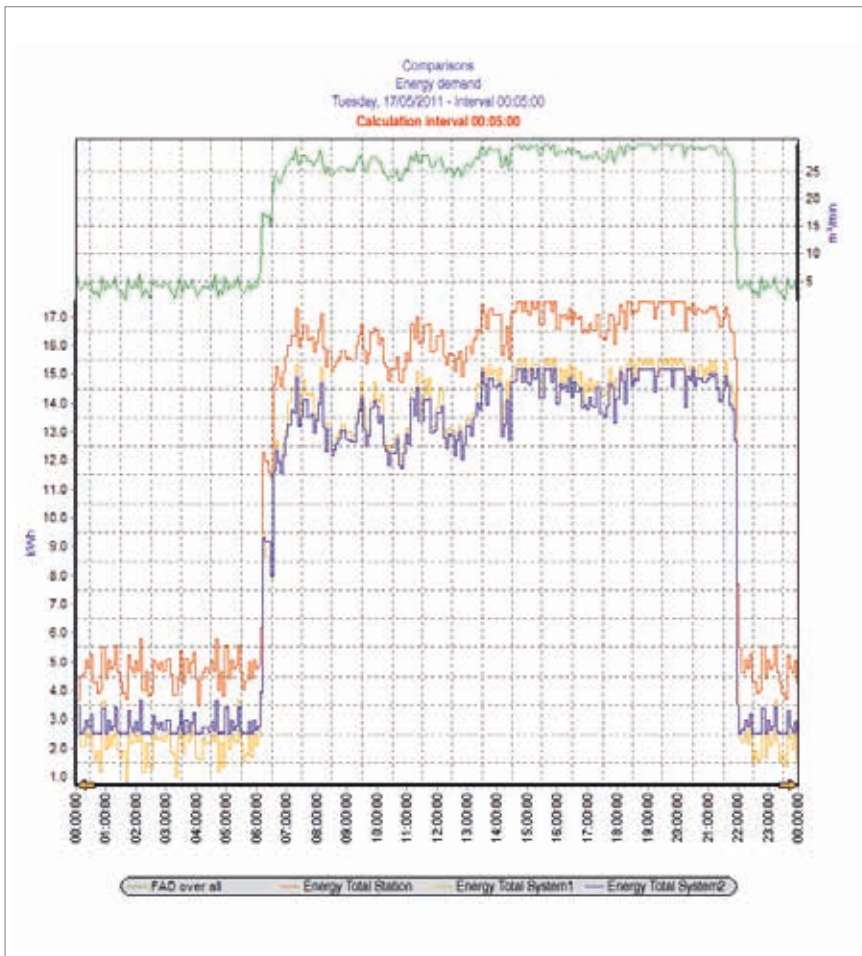
הנתונים הטכניים הקיימים וכן, כל אלטרנטיבה אפשרית נקלטים בתוכנת-KESS. זהו הצעד הראשון להקמת תחנה אופטימלית. מערכת ה-KESS קובעת את התכנון האופטימלי ומחשבת את פוטנציאל החיסכון בעלויות. היא מחשבת את צריכת האנרגיה עבור צריכת אוויר מוגדרת כולל מפלי הלחץ.

היא גם מציגה בתצוגה גרפית מדויקת את פרופיל ההספק של תחנת המדחסים על פני תקופה (איור 1). כך מאתרים מראש את נקודות החולשה ומטפלים בהן. התוצאה הכללית היא תמונה ברורה של פוטנציאל החיסכון והחזר ההשקעה.

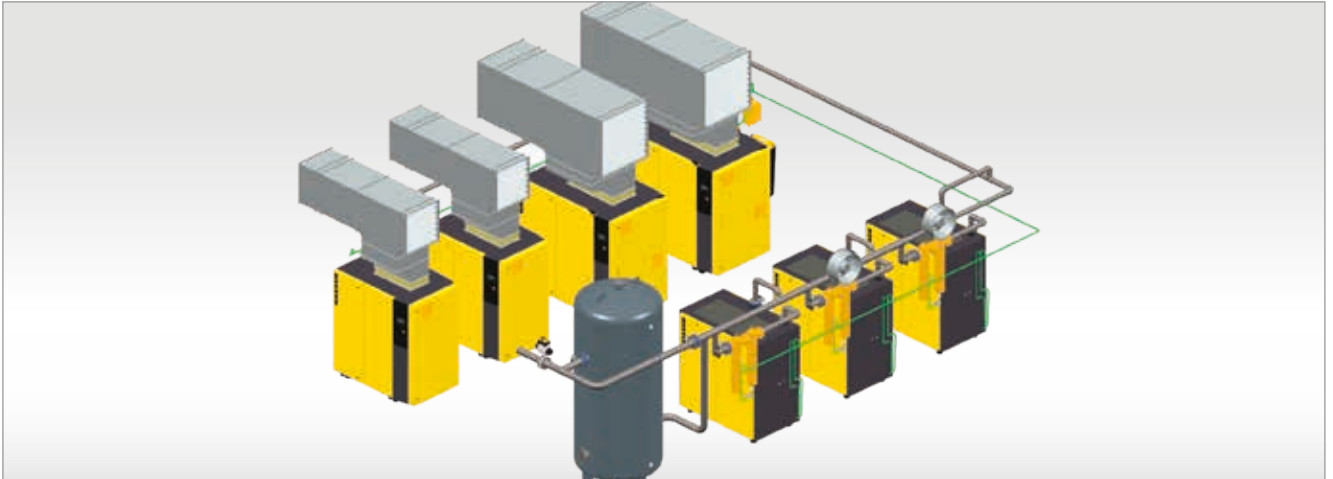
#### 2. מה שקובע!

ברוב המקרים, הפתרון הטוב ביותר הוא שילוב של מדחסים בגדלים שונים בתצורה מדויקת. היא כוללת בדרך כלל מדחסים גדולים עבור דחיסת בסיס ומדחס לגיבוי בשעת צורך, וכן מדחסים קטנים יותר עבור פיקים.

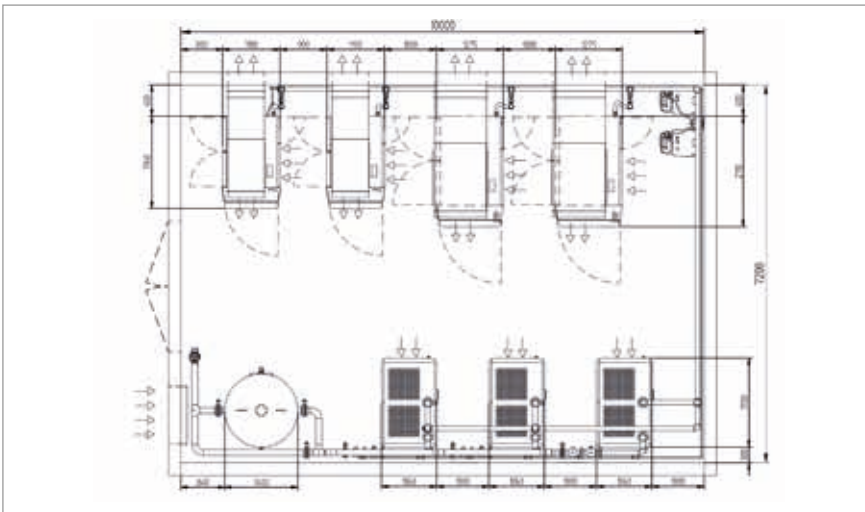
תפקידה של מערכת הבקרה המרכזית היא לאזן ברמה המיטבית את ההספק המוגדר מבין 16 מדחסים לכל היותר. לשם כך, היא תגדיר אוטומטית את שילוב המכונות המתאים ביותר לדחיסת בסיס ולדחיסה



איור 1: השוואה של צריכת האנרגיה בין הצריכה הקיימת למספר אפשרויות אחרות, על פני יום עבודה ועל פי צריכת אוויר מוגדרת

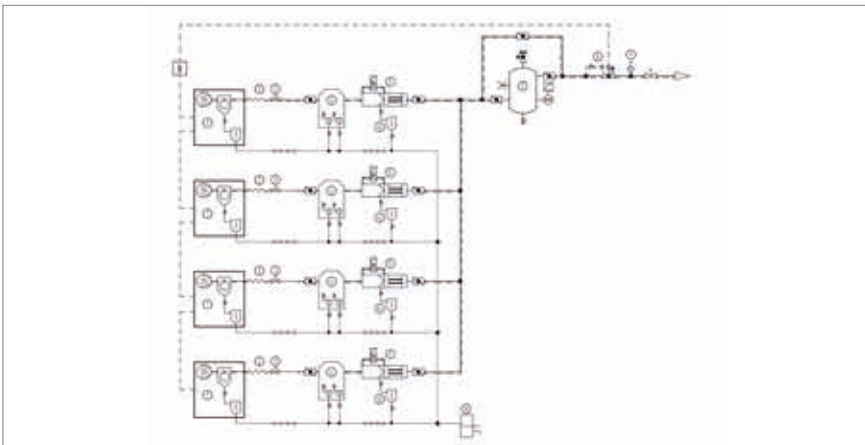


איור א 2: תרשים 3D של תחנת אוויר דחוס באמצעות CAD



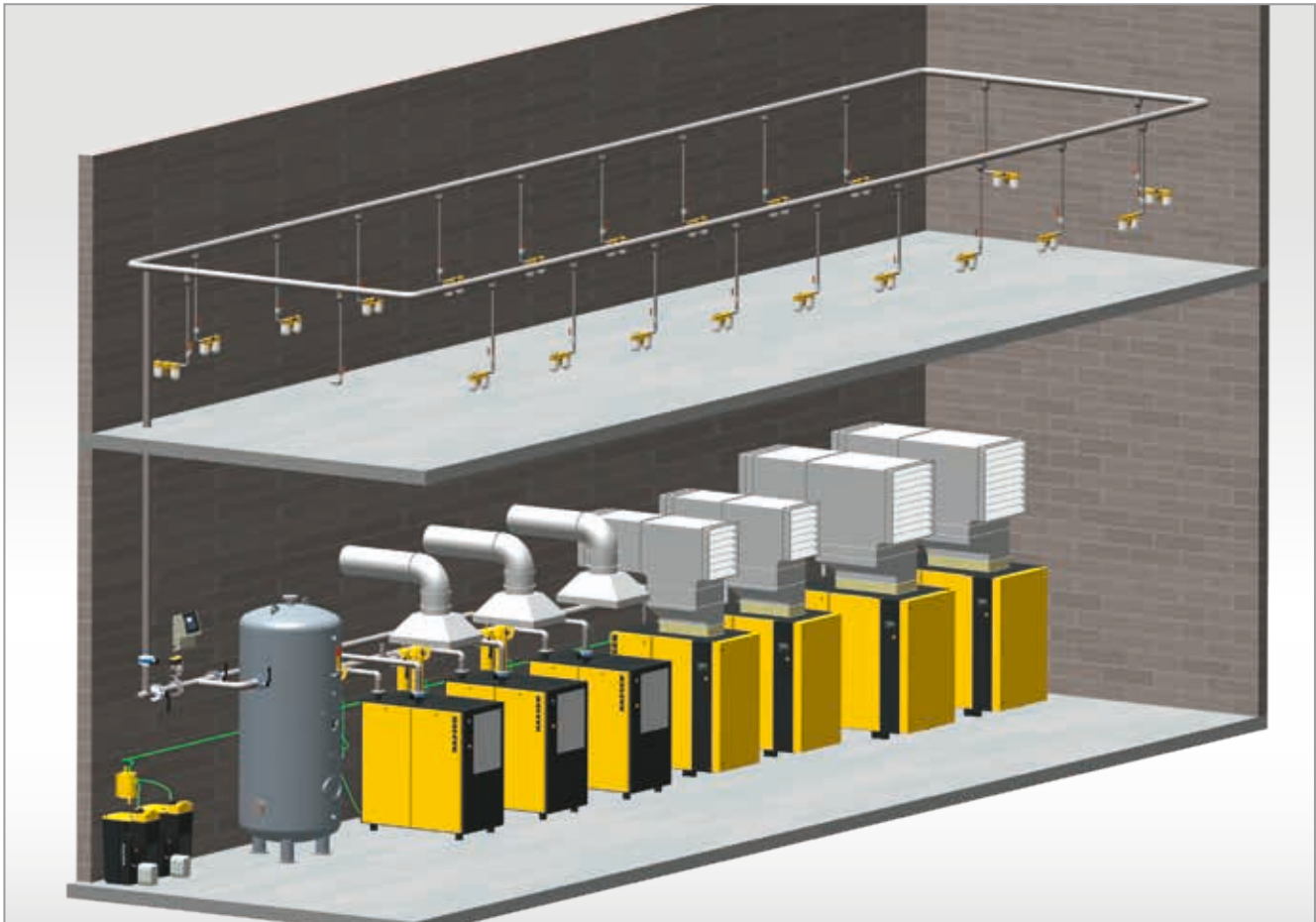
איור ב 2: תרשים כללי של תחנת אוויר דחוס

היא יושבת על מחשב PC תעשייתי. המטרה שלה, כמצופה מכל מערכת ניטור ובקרה, היא לאסוף את כל המידע אודות המדחסים ולהעבירו דרך האינטרנט – Ethernet, או דרך תוכנת הבקרה המרכזית Sigma Control Centre. באמצעות המערכת החזותית SIGMA AIR CONTROL, המשתמש יכול לקבל את כל המידע על מצב ההפעלה של כל המדחסים בתחנה באמצעות מחשב PC בלבד. במבט אחד רואים אם התחנה פועלת כראוי, אם הגיע המועד לטיפול תחזוקה, אם הלחץ במערכת גבוה מדי או אם ישנן תקלות.



איור ג 2: תרשים P+I של תחנת אוויר דחוס

# לקרר ביעילות את התחנה



דגמה לתחנה עם מערכת פינוי אוויר חם ואזור נוסף עם בקרה תרמית עבור מייבש הקירור

**המדחסים ממירים לחום 100% מאנרגיית החשמל שהם צורכים. אפילו מדחס יחסית קטן של 18.5 kW מספיק כדי לחמם בית מגורים. זו הסיבה מדוע קירור יעיל חיוני להפעלה אמינה של מערכת אוויר דחוס.**

החום המופץ על ידי המדחסים הוא מקור אנרגיה מצוין לשימוש חוזר. מערכות מיחזור חום מנצלות עד 96% מהאנרגיה. משמעות הדבר היא ירידה משמעותית בעלויות הייצור של האוויר הדחוס (ראה פרק 8 עמ' 20). עם זאת, גם עם מערכת למיחזור חום, המדחס עדיין זקוק למערכת קירור יעילה. גם היא מקור לחיסכון. קירור אוויר יכול לעלות 30% פחות מקירור מים. אין ספק שיש להעדיף ככל הניתן מערכות מקוררות אוויר.

## 1. סביבת המדחסים

### 1.1 נקייה וקרירה

אחת הדרישות העיקריות של תקנות המוסד לבטיחות ולגהות היא שהמדחסים יותקנו כך שתתאפשר גישה נוחה אליהם ושהקירור יתאים לדרישות. התקנות בנוגע להתקנה הנכונה של מדחסים מקוררי אוויר או שמן קובעות שהטמפרטורה הסביבתית לא תעבור  $+ 40^{\circ}\text{C}$ .

בנוסף, מובהר שאסורה פליטה של חומרים מסוכנים באזור אוויר היניקה של המדחס. אלה רק הוראות מינימליות המכוונות למנוע תאונה אפשרית. נדרשים תנאים נוספים כדי להבטיח הפעלה יעילה ולהפחית בטיפולי תחזוקה.

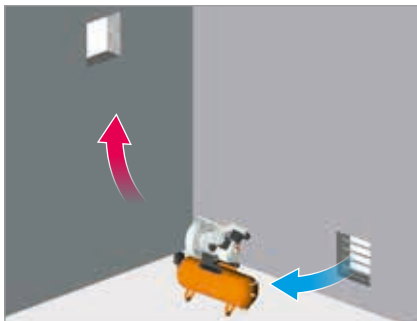
## 1.2 חדר המדחסים הוא לא מחסן

חדר המדחסים צריך להיות נקי ללא אבק וללא ציוד מיותר שאינו שייך לייצור האוויר הדחוס. הרצפה צריכה להיות עמידה לשאת את משקל המדחסים. צריך לתכנן סינון אינטנסיבי אם אוויר היניקה או אוויר הקירור מכיל אבק או חלקיקים מזהמים. גם בתנאי הפעלה רגילים, צריך לסנן את אוויר היניקה ואת אוויר הקירור של המדחסים.

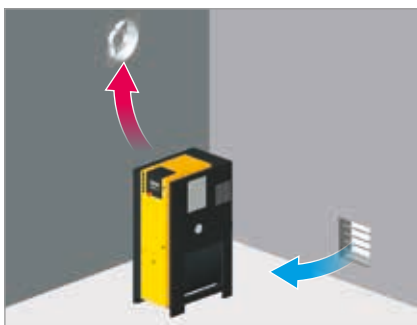
## 1.3 טמפרטורה סביבתית יציבה

לטמפרטורה הסביבתית השפעה רבה על ההפעלה האמינה של המדחסים ועל תדירות טיפולי התחזוקה. אוויר היניקה ואוויר הקירור לא יהיה קר מדי (לא מתחת  $3^{\circ}\text{C}$ ) ולא חם מדי (לא מעל  $40^{\circ}\text{C}$ ). בעת התכנון וההתקנה, נתון זה חייב להילקח בחשבון. בקיץ, הקירות

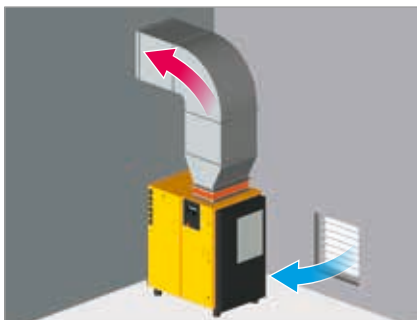




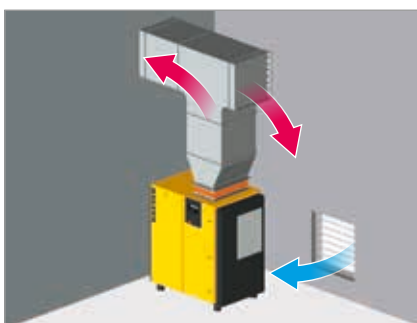
איור 1: אוורור טבעי עבור תחנות עד 5.5 kW



איור 2: אוורור מאולץ: מאוורר לפיכני אוויר עבור תחנות מ- 5.5 ועד 11 kW



איור 3: אוורור מאולץ: תעלת פיכני אוויר חם עבור תחנת החל מ- 11 kW



איור 4: תריס עם בקרת טמפרטורה שומר על חום החדר בחורף.

### 3.2.2 תעלת אוורור

המדחסים הבורגיים בעלי מעטפת אוטמת מציעים אוורור אידאלי באמצעות תעלת אוורור: המדחס שואב את האוויר הסביבתי דרך פתח אחד ומוציא את האוויר החם ישירות החוצה דרך תעלה (איור 3). יתרון השיטה הוא שטמפרטורת אוויר הקירור יכולה להיות גבוהה יותר. הטמפרטורה המותרת יכולה להגיע עד 20K. על כן, פוחת נפח אוויר הקירור הנחוץ. עקרונית, המאווררים המורכבים על המדחסים מספיקים כדי לפנות החוצה את האוויר דרך התעלה. בניגוד למאווררים חיצוניים, אין צורך באנרגיה נוספת. אבל כל זה אפשרי רק. על כן, יש להרכיב תריס עם בקרת טמפרטורה (איור 4) בתעלת פיכני האוויר החם כדי לשמור על חום החדר במהלך החורף. אם בחדר המדחסים ישנם גם מייבשי קירור, צריך לקחת בחשבון שהמדחסים והמייבשים לא יפריעו אחד לשני באוורור. כאשר הטמפרטורה עולה מעל 25°C, מומלץ להוסיף מאוורר בתעלה עם בקרת טמפרטורה כדי להגביר את זרימת אוויר הקירור למייבש הקירור.

הפונים לצפון או למערב עלולים להיות חשופים לקרינה שתעלה בצורה משמעותית את טמפרטורת החדר. גם באזורי אקלים ממוזג, הטמפרטורה בחדר המדחסים יכולה לחרוג מ-40°C. על כן, פתחי אוויר היניקה ואוויר הקירור לא יהיו ממוקמים במקום חשוף לקרינה ישירה. גודל הפתחים תלוי בגודל המדחסים ובשיטת האוורור.

### 2. אוורור חדר המדחסים

לא משנה אם מדובר במדחס מקורר אוויר או מקורר מים. בכל המקרים נחוץ אוורור טוב בחדר המדחסים. צריך לפזר את החום המופץ מהמדחס, מיחידת הדחיסה ומהמנוע החשמלי. מדובר ב-10% בערך מהספק המדחס.

### 3. שיטות אוורור שונות

#### 3.1 אוורור טבעי

אוויר הקירור נשאב ולאחר מכן הוא מחומם על ידי המדחס. בהשפעת הלחץ הוא עולה כלפי מעלה ויוצא דרך פתח אוורור המתוכנן בגובה (איור 1). סוג זה של אוורור טבעי מומלץ במקרים נדירים וכאשר מדובר במדחסים קטנים מ-5.5 kW מכיוון שקרינת השמש או משבי הרוח בפתח היציאה יכולים בקלות ליצור בעיות באוורור.

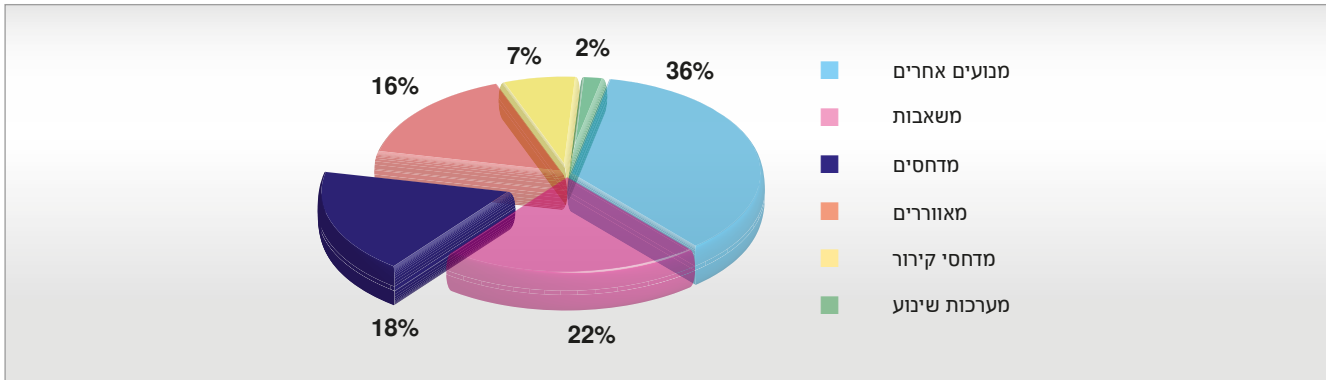
#### 3.2 אוורור מאולץ

בשיטה זו משתמשים בדרם אוויר קירור מאולץ. מערכת בקרת טמפרטורה מונעת מהטמפרטורה לרדת בחורף מתחת ל-3°C. טמפרטורות נמוכות יותר ידקו גם למדחסים וגם לניקוז המשקעים ולצידוד המטפל באוויר. בקרת טמפרטורה נחוצה כי האוורור המאולץ יוצר לחץ שלילי המונע זרימה חוזרת של האוויר החם לתוך החדר. ישנם שני פתרונות:

#### 3.2.1 אוורור עם מאוורר חיצוני

מאוורר חיצוני עם בקרה תרמית המותקן בפתח פיכני האוויר (איור 2), מוציא את האוויר החם. הפתח (איור למטה בצד ימין) חייב להיות מספיק גדול כדי לא לגרום ללחץ שלילי קיצוני ולזרימת אוויר רועשת וחזקה מדי. בנוסף, זה יסכן את קירור התחנה. תכנון האוורור צריך להבטיח שעליית הטמפרטורה כתוצאה מפיזור החום מהמדחסים לא תעבור 7K. אחרת החום יעלה ויגרום לתקלה במדחס.

# להבטיח אמינות וכדאיות לטווח ארוך



איור 1: חלקם של המדחסים בצריכת האנרגיה ביחס למערכות הצורכות חשמל (בתעשייה באיחוד האירופי- מקור: SAVE II 2000)

חשמל 0.08 €/kWh , לחץ עבודה 7 bar , איכות אוויר דחוס על פי ISO 8573-1: תכולת שרידי שמן דרגה 1, תכולת אבק דרגה 1, תכולת מים דרגה 4. דוגמה זו מראה שגם בתנאים אופטימליים, צריכת האנרגיה במקום הראשון בדירוג העלויות עם 70% מהעלויות הכוללות (איור 2). בשנת 2003, האוניברסיטה של קובורג (איור 3 עמ' 35) חשפה את חוסר יעילותן של תחנות האוויר הדחוס בגרמניה.

## 2. תחזוקה יעילה

כל המעוביין לשמור לאורך זמן על יעילותה של התחנה, ייקח לתשומת ליבו את הנקודות הבאות:

### 2.1 תחזוקה

מערכות בקרת מדחסים כמו SIGMA CONTROL ומערכות ניהול אוויר כמו SIGMA AIR MANAGER 4.0, היושבות על מחשב PC תעשייתי מספקות מידע מפורט על מרווחי טיפולי התחזוקה של חלקי מערכת האוויר הדחוס. על כן, ניתן לתכנן מראש טיפולי תחזוקה מונעת כדי לצמצם בהוצאות. התוצאה היא שיפור ברמת האמינות והיעילות של התחנה.

### 2.2 ציוד מתאים

לחסוך בייצור ובצריכת אוויר דחוס זהו פן אחד, אבל לפעמים חוסכים במקומות הלא נכונים כמו לקנות מכונה זולה יותר אבל הדורשת לחץ עבודה יחסית גבוה. העלות של לחץ עבודה גבוה יותר מ-6 bar תעבור מהר מאוד את ההבדל במחיר הקנייה לעומת מכונה יקרה יותר אך יעילה יותר כי לחץ העבודה

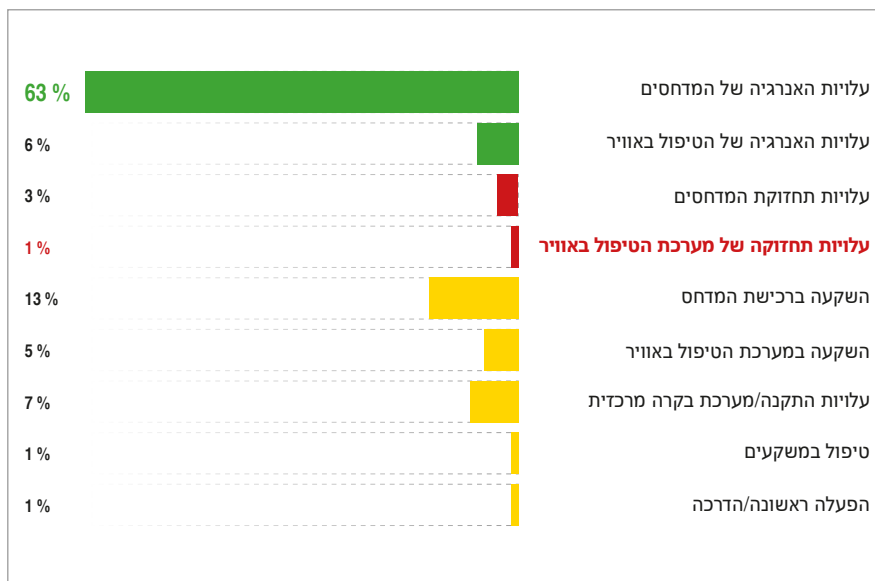
בצריכת האנרגיה. פוטנציאל החיסכון רחב מאוד. המחקר SAVE 2, מראה כי קיים פוטנציאל חיסכון אדיר: בשנת 2000, המדחסים באירופה צרכו 80 ביליון kWh. ניתן לחסוך 30% מאנרגיה זו (איור 1).

### 1. מה היא יעילות אופטימלית?

יעילותה של מערכת אוויר דחוס משתקפת במבנה העלויות שלה. האופטימום שניתן להשיג משתנה על פי אופי הייצור. הפקטורים המרכזיים הם אורך חייו של המדחס, הלחץ במערכת וגם מספר נתונים עסקיים נוספים. ניקח לדוגמה תחנת אוויר דחוס מקוררת אוויר: תקופת הפעלה של 5 שנים, תעריף

עד כאן הצגנו אספקטים שונים שיש לקחת בחשבון כאשר מקימים תחנת אוויר דחוס חדשה או משדרגים תחנה קיימת. תוכלו להתרשם איך תכנון נכון פועל להשגת היעילות הברורה. להיות מודעים בעת התכנון וההתקנה לצריכת האנרגיה ולעלויות, זו רק חצי דרך. כדי שמערכת אספקת האוויר הדחוס תהיה יעילה, הדגש צריך להיות על התפוקה האופטימלית של המערכת לאורך זמן.

ישנן שלוש סיבות מדוע יש לפעול להשגת יעילות מקסימלית על מנת לשפר את אמינותה, כדי להוריד את העלויות ולהפחית

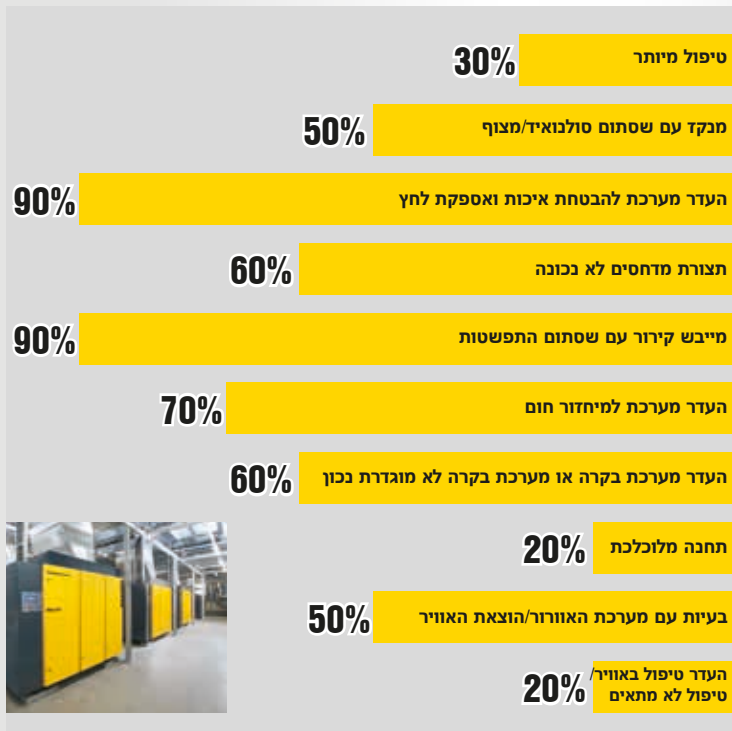


איור 2: מבנה העלויות של מערכת אוויר דחוס אופטימלית

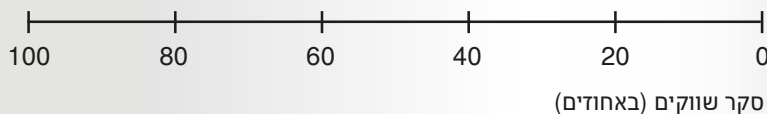
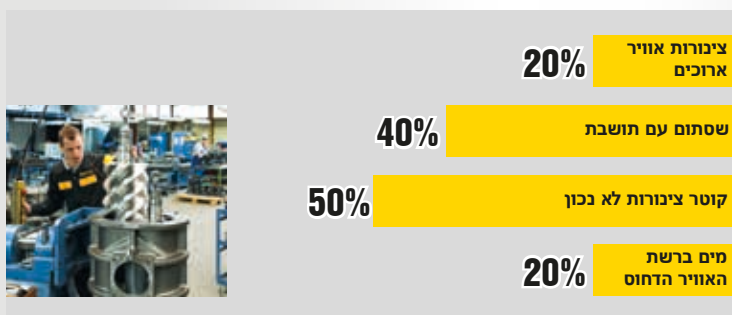
## חריגות

שנמצאו בתחנות אוויר דחוס ובאולמות ייצור

### תחנת אוויר דחוס



### ייצור



נמוך יותר. על כן, בעת רכישת המכונות, לחץ האוויר הנדרש לא פחות חשוב מצריכת החשמל הנדרשת. אלה עובדות שצריכות להיות מול העיניים של הרוכש.

### 2.3 דרישות חדשות כתוצאה משינויים בייצור 2.3.1 צריכת אוויר דחוס

#### א. שינויים בייצור

שינויים בצריכה מאוד נפוצים במפעלים רבים. לעתים קרובות השינויים לא מקבלים תשומת לב מתאימה. בעקבות התארגנות חדשה של הייצור יתכן ובמשמרת אחת, מדחסים מסוימים יעבדו מתחת לספיקה שלהם ובמשמרת אחרת מדחסים אחרים לא יכסו את הביקוש- גם אם קיימת רזרבה. על כן, על אספקת האוויר להיות מתוכננת מראש ולהתאים לכל השינויים.

#### ב. התרחבות הייצור

במקרה זה, לא מספיק להתאים את גודל המדחסים. צריך גם לתכנן מחדש את הצנרת ואת מערכת הטיפול באוויר. מומלץ למדוד ולתעד את נתוני צריכת האוויר ולאסוף מידע מספיק מפורט כדי להיערך נכון מבחינה כלכלית לשינויים או להתאים את מערכות אספקת האוויר לדרישות ייצור חדשות גדולות יותר.

איור 3: ניתוח תוצאות מבדקי האוויר הדחוס כפי שבוצעו על ידי Kaeser Compressors באוניברסיטה של Coburg במסגרת תזה בנושא יעילות אנרגטית באספקת אוויר דחוס. תזה: Anja Seitz, Coburg University הפקולטה להנדסה מכנית (2003)

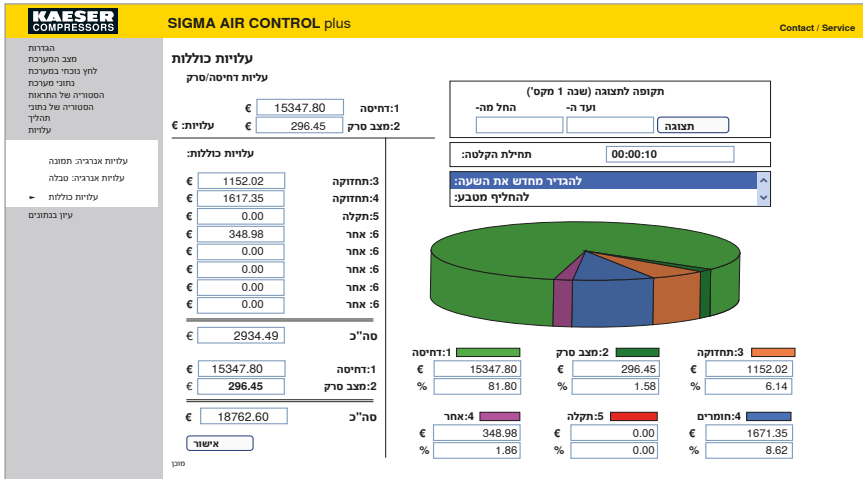
# להבטיח אמינות וכדאיות לטווח ארוך

## 2.3.2 האמינות באספקת האוויר

כל תחנת אוויר דחוס כוללת בדרך כלל גם מדחס נוסף בהמתנה כדי לכסות פיקים מזדמנים. אבל נדיר שקיימות רזרבות ביטחון עבור הטיפול באוויר הדחוס. כאשר צריכת האוויר גדלה, המדחס בהמתנה מתחיל לפעול, אבל איכות האוויר יורדת מפאת חוסר הטיפול בו. על כן, יש לתכנן יחידת טיפול (מייבש/מסנן) עבור המדחס בהמתנה.

## 2.3.3 שינויים בדרישות איכות אוויר

במידה ותידרש איכות אוויר גבוהה יותר, יש להבחין אם השינוי נוגע לכלל ייצור האוויר או שהוא חל רק על חלק מאוד מוגדר. במקרה הראשון, לא מספיק לחזק את מערכת הטיפול



איור א 5: מערכת ניהול: ניתוח עלויות אוויר דחוס (מבוסס על האינטרנט)

בקרה ולדוחות ניהול עלויות אוויר דחוס (איור א 5 עד 5). יותר ויותר משתמשים מחיירים את עניין השקיפות במבנה העלויות של ייצור האוויר הדחוס. הם חוקרים את פוטנציאל החיסכון ונותנים זכות קדימה לחיסכון באנרגיה יותר מאשר למחיר ההשקעה. כך מתקבלים ליעד הפחתת 30% בצריכת האנרגיה בייצור האוויר הדחוס.

לבצע במועדים קבועים תחשיבי דליפות כוללות באמצעות מערכת בקרה כמו SIGMA AIR MANAGER. אם נקלט כי קיים גידול בדליפות, יש לפעול מיידית לאיתורן ולטפל בהן.

## 3. לנהל עלויות

המידע שנאסף מניתוח הצריכה במהלך שלב התכנון ולוונטי עבור הפעלת מערכת בעתיד. כאשר המערכת מותקנת ופועלת, אין צורך באבחון נוסף לקבלת נתונים עבור שלב עתידי. מערכת בקרה מרכזיות כמו SIGMA AIR MANAGER אספה אותם מראש. הנתונים הם הבסיס לעריכת דוחות

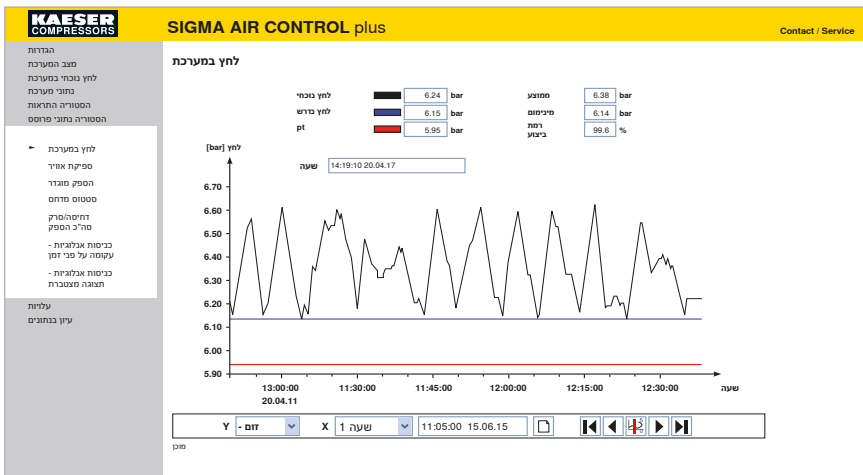


איור 4: חיפוש דליפות באמצעות אולטרה-סאונד

באוויר. צריך לנקות או להחליף את הצינורות המובילים את האוויר שהיה באיכות נמוכה יותר. במקרה השני, נתקין מערכת ממוקדת לטיפול באוויר להשגת איכות נדרשת. נאלץ להגביל את הספיקה אל מערכת הטיפול באוויר כדי לא לחרוג מיכולתה לספק רמת איכות אוויר נדרשת.

## 2.4 לשלוט בדליפות

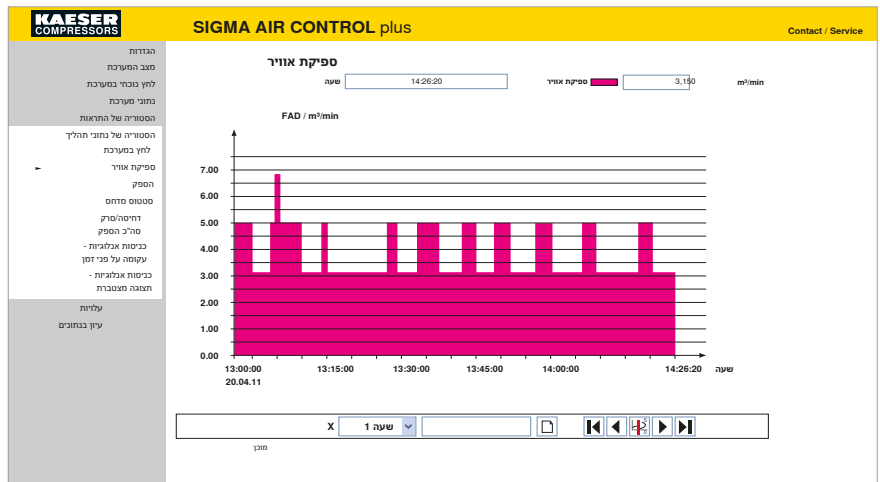
בכל מערכת אוויר דחוס קיימות דליפות המובילות לאבדן אנרגיה משמעותי. הסיבה העיקרית לדליפות היא השחיקה בכלים, בחיבורי הצנרת ובחלקי המכונה המכניים (איור 4). על כן, חייבים לעקוב אחר סימני שחיקה ולפעול בהתאם. מומלץ גם



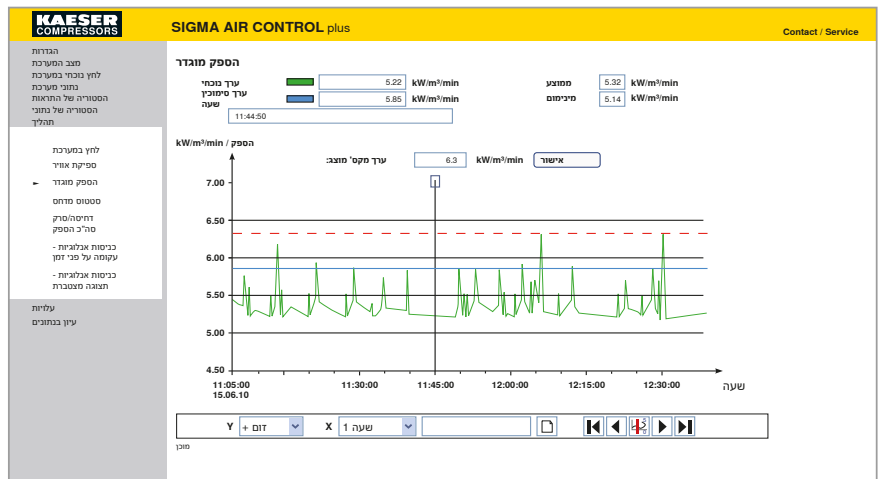
איור ב 5: עקומת לחץ



איור ג 5: מבט כללי: מערכת ניהול ובקרה



איור ד 5: צריכת אוויר דחוס



איור ה 5: הספק מוגדר נדרש



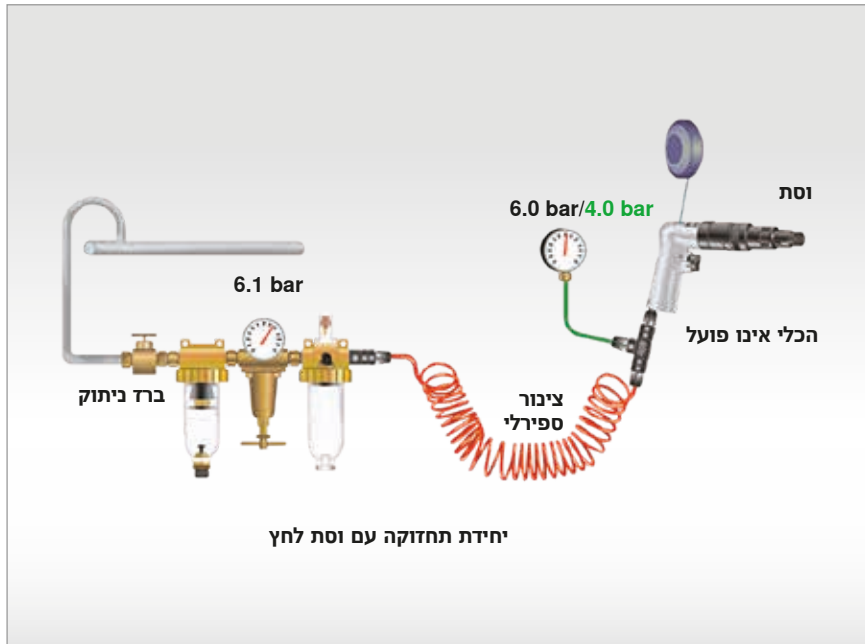
# עצות שימושיות

---

עצות 1 - 7

40-51

# חיסכון גדול יותר עם לחץ אופטימלי



כלי מחובר עם צינור ספירלי - לחץ 6.0 bar ללא צריכת אוויר. **4.0 bar** במהלך הפעלת הכלי = מפל לחץ של 2 bar: רק 54% מיכולת הביצוע המלא!

**מערכת אוויר דחוס יעילה תלויה בלחץ עבודה מתאים. נקיטת צעדים קטנים יכולים להשפיע מאוד.**

במקרים רבים, החיבור לכלים הפנאומטיים מתוכנן כך: הכלי אינו עובד, הלחץ ביחידה עומד על 6.1 bar והלחץ בכלי מראה 6.0 bar. עם זאת, לחץ זה אינו הלחץ הקיים כאשר הצרכן פועל וצורך אנרגיה.

## מפל לחץ ברמת הכלי – מה לעשות?

מידת הלחץ בכלי עובד מצביעה לעתים קרובות על מפלי לחץ משמעותיים. בדוגמה הבאה, מפל הלחץ עומד על 2 bar, זאת אומרת שהכלי מספק רק 54% מפוטנציאל הביצוע שלו.

ניתן בקלות למנוע את הסיבות לכך.

**א. קטע חיבור חלש:** השתמש בחיבור מהיר בקוטר רחב יותר

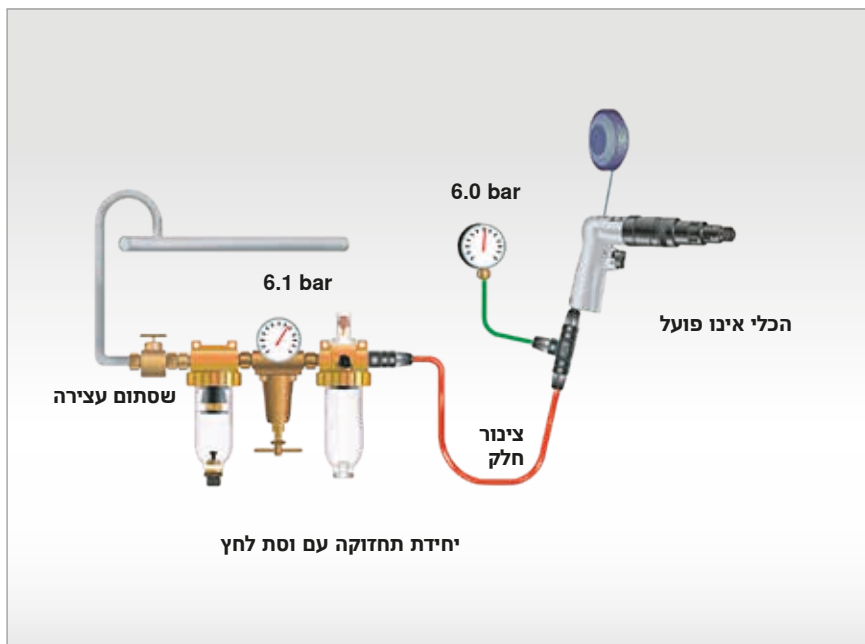
**ב. וסת הלחץ לא מכוון נכון:** פתח אותו יותר

**ג. הלחץ נמוך מדי במערכת:** הגבר את הלחץ ברשת או התקן צנרת בעלת קוטר רחב יותר.

**ד. צינור ספירלי קטן מדי:** השתמש בצינור ספירלי גדול יותר ועדיף צינור חלק.

**ה. מפל לחץ במפריד המים:** ייבש את האוויר הדחוס בצורה מרוכזת (הופך את המפריד למיותר).

בעזרת הצעדים הפשוטים האלה ניתן להשיג לחץ אופטימלי (6 bar במקרה זה) ו-100% תפוקה.



מפרידי מים וצינורות ספירליים הם זוללי אנרגיה: במקומם, יש לייבש את האוויר בצורה מרוכזת ולהשתמש בצינורות חלקים.

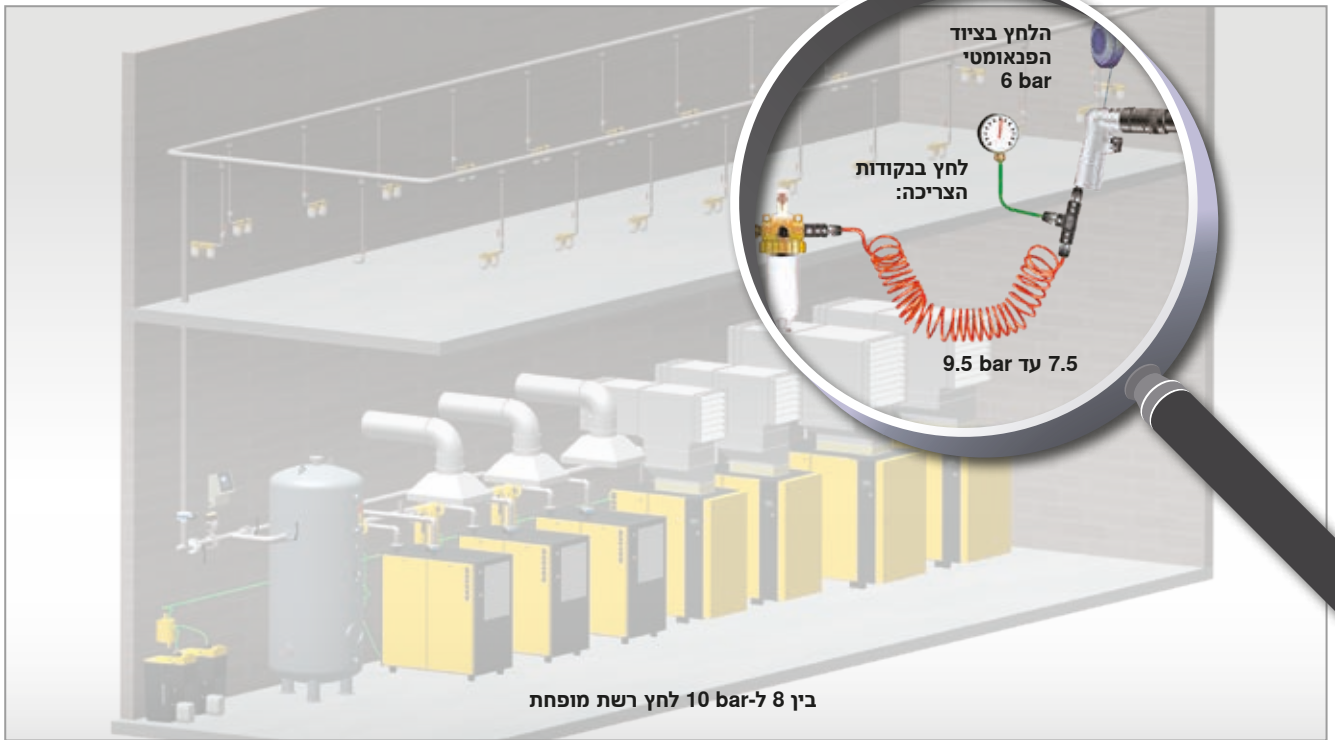
## הדרך הנכונה לחסוך באנרגיה

לא מעריכים מספיק את השפעת וסתי הלחץ על מידת יעילותה של מערכת אוויר דחוס. אם ניקח למשל מערכת אוויר דחוס שפועלת בין 8 ל-10 bar, הלחצים של 7.5 ו-9.5 bar, בנקודות הצריכה יורדים ל-6 bar באמצעות וסתי הלחץ. כדי לחסוך באנרגיה, מורידים את הלחץ ל-6.8 ו-7 bar כדי לקבל 6.1 bar בנקודות הצריכה. אבל הלחץ בכלים עומד עכשיו רק על 4 bar! לתצורה זו השלכות! זמני העבודה ארוכים יותר, התוצאות בינוניות

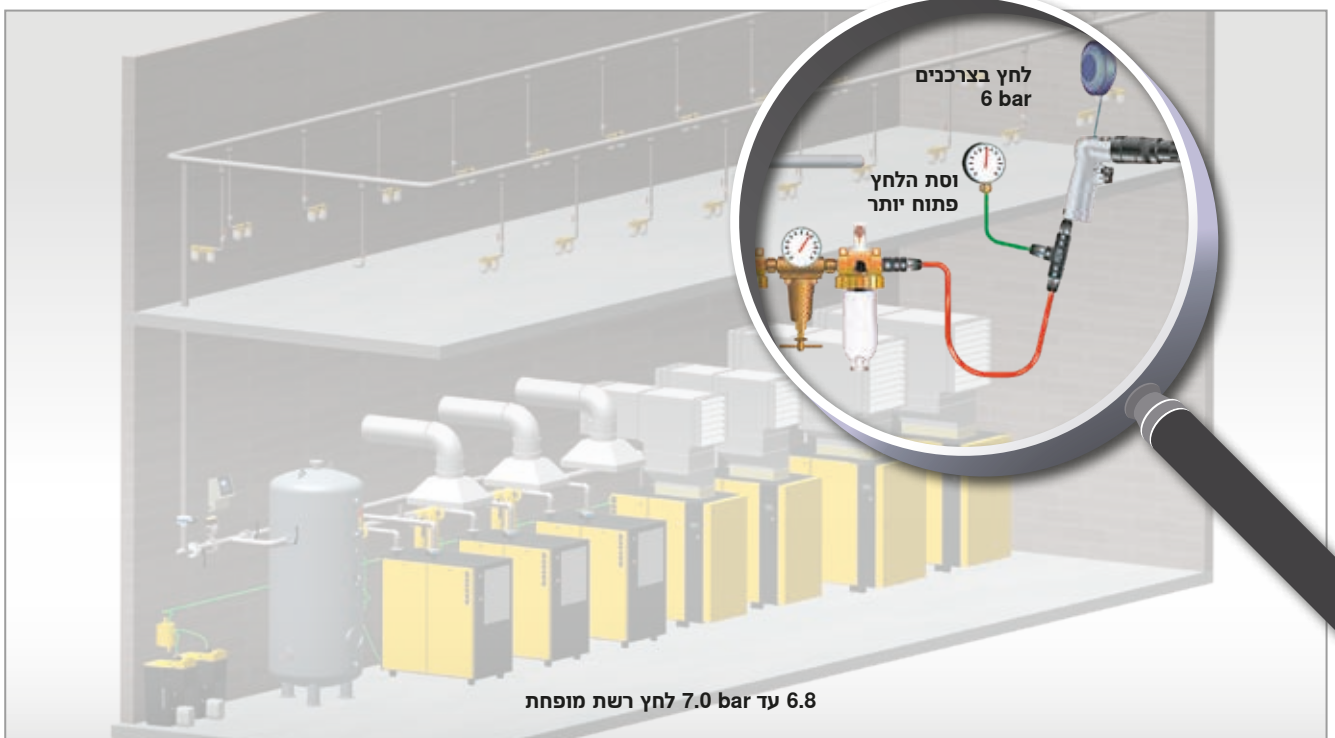
אבל גם על ידי שימוש בצינורות חלקים, על ידי הוצאת מפרידי מים מיותרים ופתיחת וסתי לחץ נוספים בכלים הפנאומטיים.

בגלל חוסר לחץ בכלי והמדחסים פועלים זמן ארוך יותר מהנדרש. קל להשיג את החיסכון המיוחל: מצד אחד על ידי הפחתת הלחץ ברשת,





פשוט בזבז אנרגיה: להגדיר לחץ גבוה מדי ולהוריד אותו לאחר מכן ברמת הכלי...



... להוריד את הלחץ ברשת ולפתוח יותר את וסת הלחץ

# לחץ נכון בחיבורים

**לחץ האוויר הדחוס בתחנה נכון, אבל הלחץ נמוך מדי ברמת הכלים הפנאומטיים. מה הסיבה?**

לרוב, הסיבה נמצאת ברמת הצנרת, החיבורים המהירים או הוסתים. אך יתכן גם שהלחץ נמוך מדי בנקודות הצריכה: לדוגמה, במקום 6.8 עד 7 bar הזמינים בהתחלה, נשאר רק 5 bar בשביל הכלים.

הולכים על הפיתרון המהיר: "נגדיל את הלחץ בתחנה ב-1 bar!" זהו פתרון בעייתי מכיוון שהעלאת הלחץ ב-1 bar יגרום לא רק לגידול של 6% בצריכת האנרגיה בתחנה, אבל גם לגידול משמעותי של דליפות. על כן, עדיף למצוא את מקור הבעיה ולטפל בה.

## מקור הבעיה ברמת הצנרת

אם הלחץ נכון בחלק התחתון של המערכת והחלקים המטפלים באוויר לא גורמים למפלי לחץ, הבעיה היא רק ברמת רשת הצנרת. הרשת מתחלקת לשלושה חלקים: הקו הראשי, קו החלוקה וקווי החיבור (איור 1).

במערכת אוויר דחוס אופטימלית, מבחינת היעילות, מפלי הלחץ הרשומים כאן מתקבלים על הדעת:

קו ראשי (1):	0.03 bar
קו החלוקה (2):	0.03 bar
קווי החיבור (3):	0.04 bar
יש להוסיף:	
מייבש (4):	0.2 bar
יחידת טיפול/צנרת (5):	0.5 bar
<b>סה"כ:</b>	<b>0.8 bar</b>

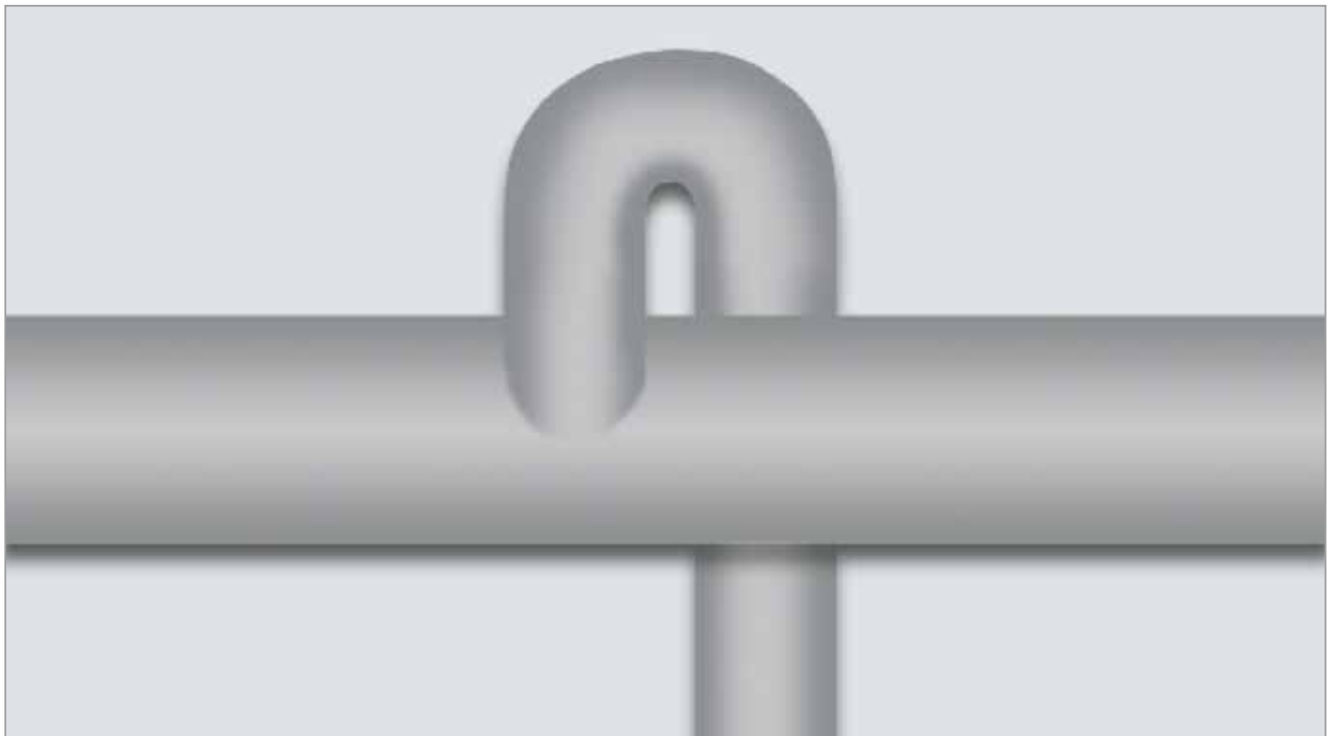
## לבטל "צווארי בקבוק"

כשמסתכלים מקרוב, נראה לעתים קרובות שאמנם הקו הראשי וקו החלוקה הם בעלי מידות נכונות, אך קווי החיבור לא. הקוטר שלהם לא צריך להיות פחות מ- DN25(1"). באתר, Kaeser Compressors מציעה כלי לחישוב מדויק של קטעי הצנרת: [www.kaeser.com/Online\\_Services/Toolbox/Pressure\\_drop](http://www.kaeser.com/Online_Services/Toolbox/Pressure_drop) בנוסף ניתן להשתמש ב**בנומורם** מיוחד למטרה זו (ראה **נפסח 1 עמ' 54**).

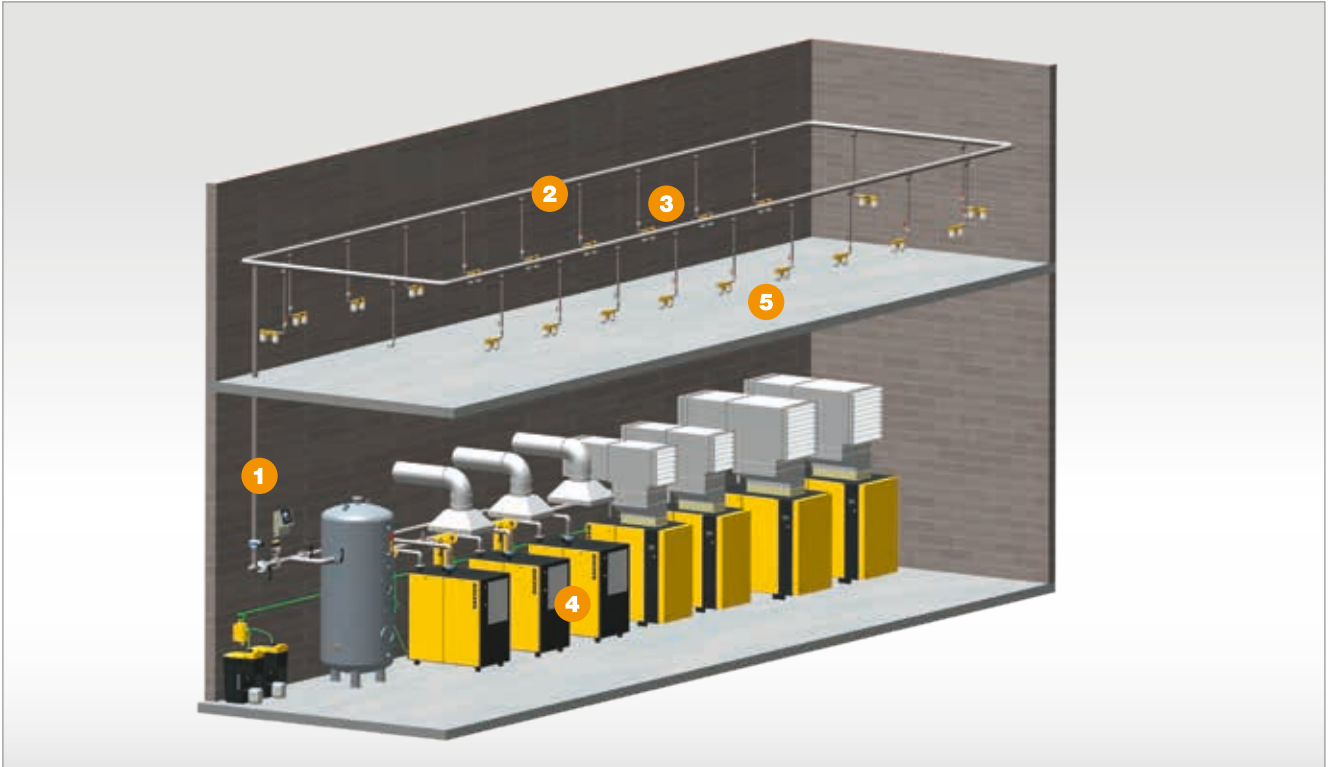
**לשים לב שהחיבורים מתאימים** כדי למנוע תקלות ובדקים בגלל לחות אפשרית וכדי לסייע לזרימת האוויר, החיבורים בקו החלוקה יתוכננו בצורה של "מקל סבא" (איור 2).

השימוש בחיבורים אנכיים ישרים אפשריים רק אם בטוחים שלא ייווצרו משקעים בצנרת. (איור 3).

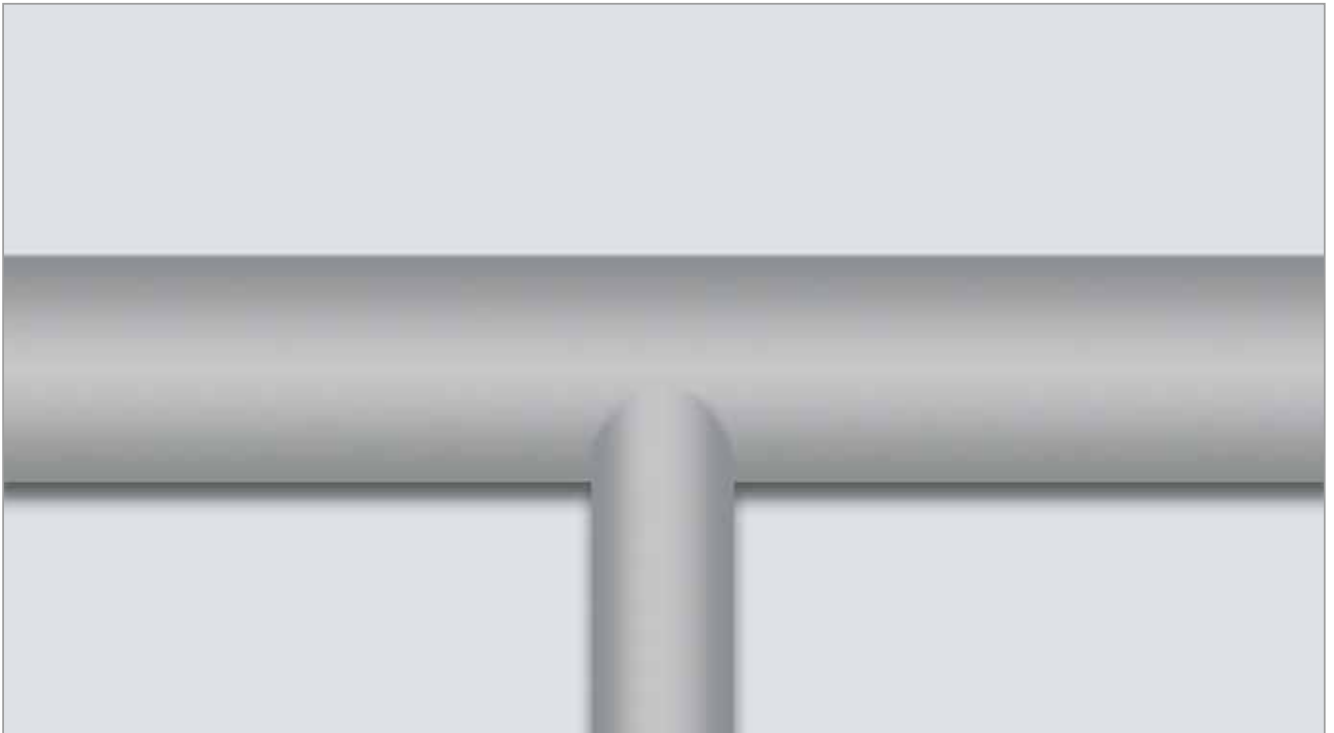
דוגמה לחיבור אופטימלי עם מפלי לחץ של 1 bar לכל היותר בין היציאה מהמדחס לכלי הפנאומטי, ניתן למצוא **בעמוד 40**.



איור 2: מקל סבא

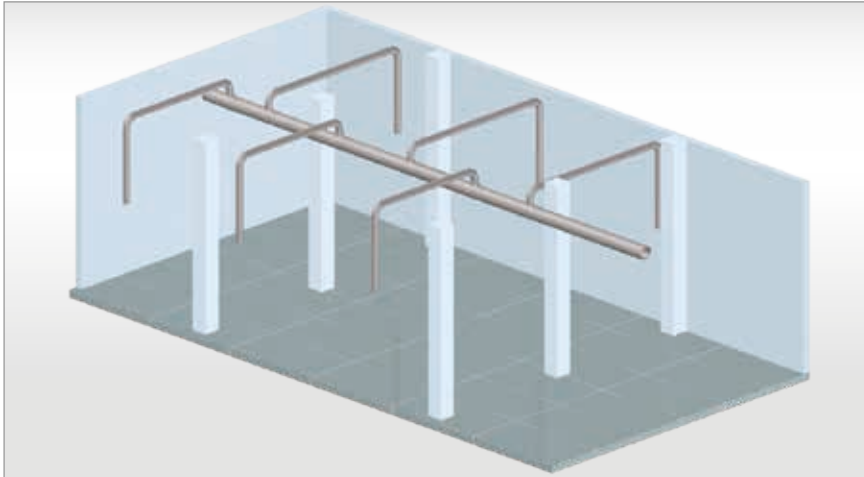


איור 1: החלקים העיקריים של מערכת חלוקת האוויר הדחוס: קו ראשי (1), צנרת החלוקה (2), חיבור צנרת (3), מייבש (4), יחידה/צינור (5)



איור 3: חיבור אנכי ישר

# חלוקת אוויר דחוס יעילה



איור 1: קו אוויר דחוס מתפצל

ישנן שלוש דרכים עיקריות לתצורת רשת החלוקה: דרך קו מתפצל, דרך טבעת או צנרת הולכה. איזו מערכת מתאימה יותר? זה תלוי בתצורת האתר. כדי שהאוויר הדחוס יהיה חסכוני, לא רק הייצור היעיל בצריכת אנרגיה הוא המשמעותי. בנוסף, צריך לשקול ולקבוע מהי הדרך היעילה ביותר לחלק אותו. כאן תקראו על הדרכים השונות...

## קו מתפצל

התקנת קו מתפצל עם חיבורים לצרכני אוויר (איור 1) היא פשוטה יחסית. אורך הצנרת הדרוש הוא יחסית קצר אבל עליו להציע יכולת הובלה שתספק את הצריכה הכוללת באוויר דחוס.

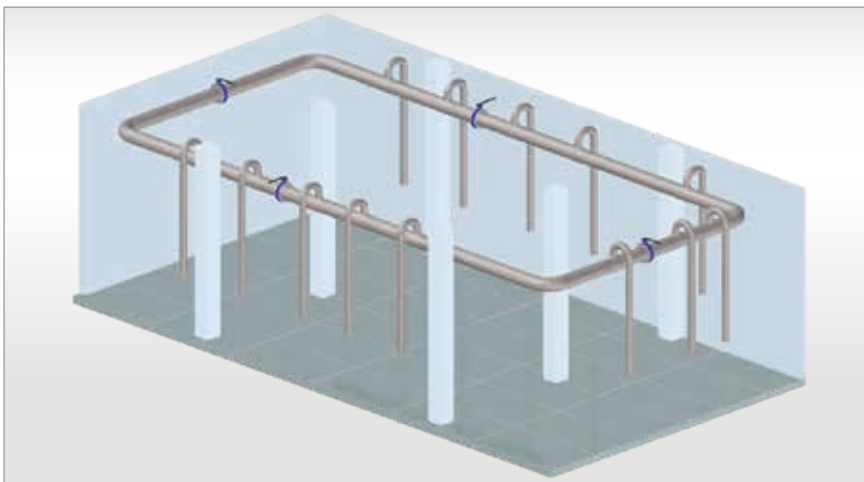
זאת אומרת שקוטר הצינור צריך להיות רחב הרבה יותר בהשוואה לצנרת עבור טבעת או עבור רשת חלוקה צריך גם לתכנן קווי חיבור ארוכים יותר כי המרחק עד הצרכנים ארוך יותר. מכיוון שסוג זה של פיתרון לא מאפשר לבדוד קטעי צנרת במקרה של התרחבות או לצרכי תחזוקה, הוא מיועד לארגונים/מפעלים קטנים.

## טבעת

ההתקנה מורכבת יותר אך הטבעת (איור 2) מציעה יתרון ברור על הקו המתפצל: אם נדרשת אותה הספיקה עבור הצרכנים, ניתן לחלק לשניים את אורך וקוטר הצינורות. מספיקה צנרת בעלת קוטר קטן יותר בשביל אותה ספיקה נדרשת. קווי החיבור מאוד קצרים ולא רחבים יותר מ-DN25. מספר ברזי ניתוק מתוכננים על הטבעת כך שניתן לבדוד קטעי צנרת במהלך טיפולי תחזוקה או כל פעולת שדרוג מערכת וזאת מבלי לעצור את העבודה.

## צנרת הולכה

צנרת הולכה היא הבחירה הנכונה ביותר עבור מפעל בעל שטחים נרחבים. התכנון מאוד דומה לטבעת אבל הוא כולל בנוסף חיבורים לאורך ולרוחב ההופך את המערכת לרשת של ממש (איור 3). נכון, זו המערכת המורכבת ביותר להתקנה אבל היתרונות עולים על המאמצים המושקעים. רשת חלוקה מאפשרת אספקת אוויר דחוס אמינה



איור 2: טבעת

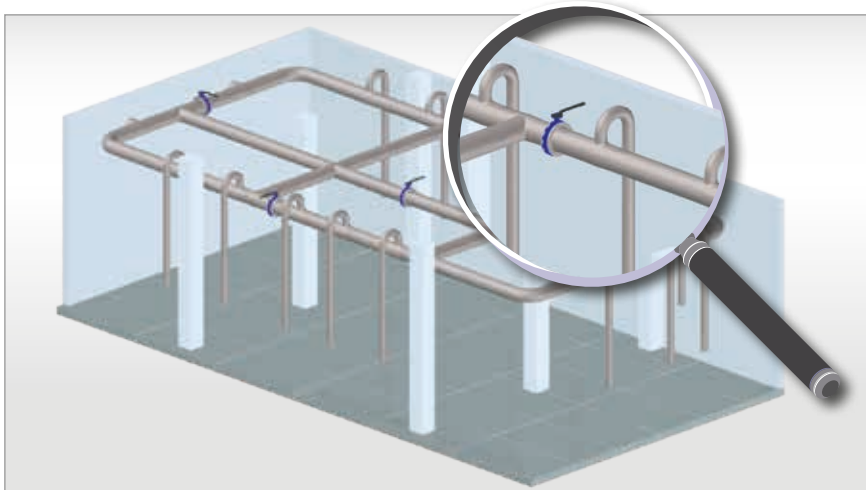
**אספקת אוויר דחוס דרך תחנת מדחסים אחת**  
במידה ומספר סקטורים באתר (אולמות ייצור) מקבלים אוויר דחוס מתחנה אחת בלבד, צריך לתכנן את המידות של הקו הראשי כך שיספק את צריכת האוויר הדחוס המקסימלית בכל אזור. שוב הפעם, מפלי הלחץ לא יעברו 0.03 bar. ניתן לחבר את הצינורות יחדיו אל סעפת. היתרון הוא שכך ניתן בשעת הצורך, לנתק בקלות אזור זה או אחר. ועוד, בתוספת ציוד למדידת ספיקת אוויר ניתן בקלות למדוד את צריכת האוויר בכל אזור ואזור (איור 4).

וחסכונית באנרגיה באתרים גדולים ללא צורך בצנרת ארוכה במיוחד. להיפך: מידות הצנרת זהות למידות הקיימות בטבעת המותקנת באתר בינוני או קטן. יתרון נוסף הוא שבמידת הצורך ניתן לבדוד חלקים על ידי שסתומים.

## מידותיו של הקו הראשי

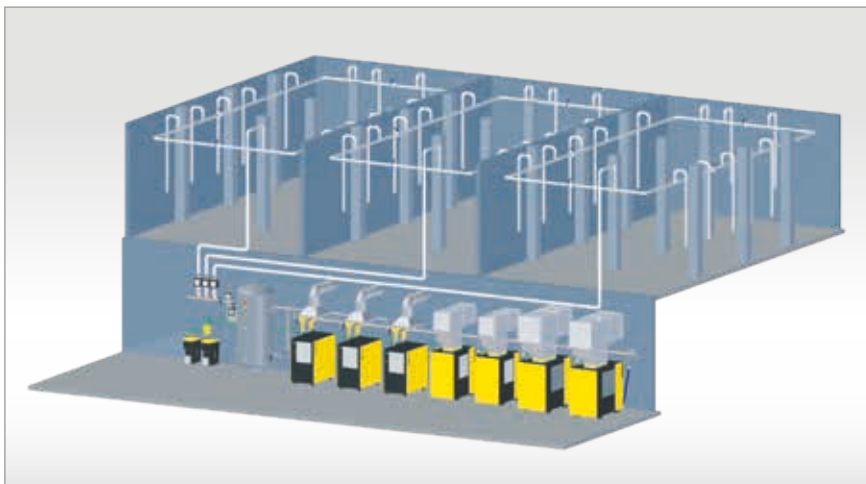
הקו הראשי של רשת האוויר הדחוס מחבר את כל קווי החלוקה שבמבנים אל תחנת האוויר הדחוס.

מידותיו של הקו הראשי נקבעות בהתאם לסך הספיקה הכוללת של כל המדחסים שבתחנה. יש לשים לב שמפלי הלחץ לא יעברו 0.03 bar.

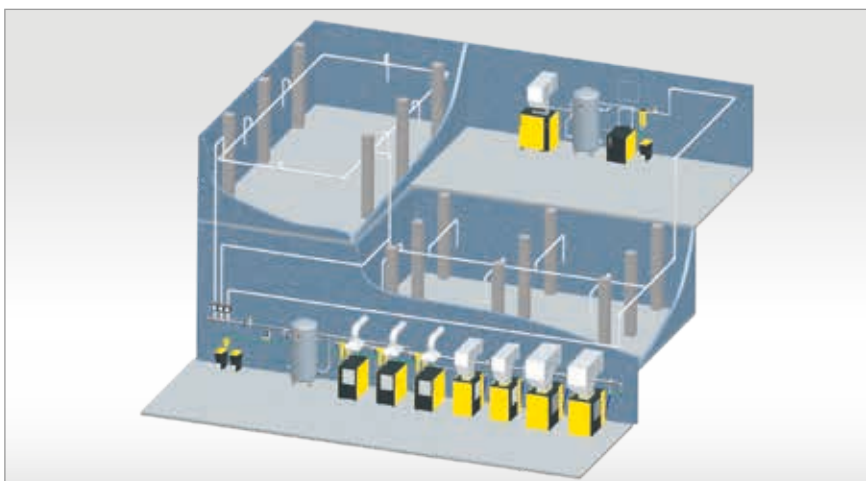


**אספקת אוויר דרך מספר תחנות מדחסים**  
 אם מספר תחנות מספקות מספר רב של קווים ראשיים, צריך לתכנן את מידות הצנרת כך שתספק את הספיקה המקסימלית מתחנת המדחסים הגדולה ביותר בכל אזור ייצור. מפלי הלחץ בין תחנות האוויר השונות לא יעברו 0.03 bar. אם לא כך, יהיה צורך בהתקנת מערכות ויסות מורכבות ויקרות (איור 5).

איור 3: רשת חלוקה

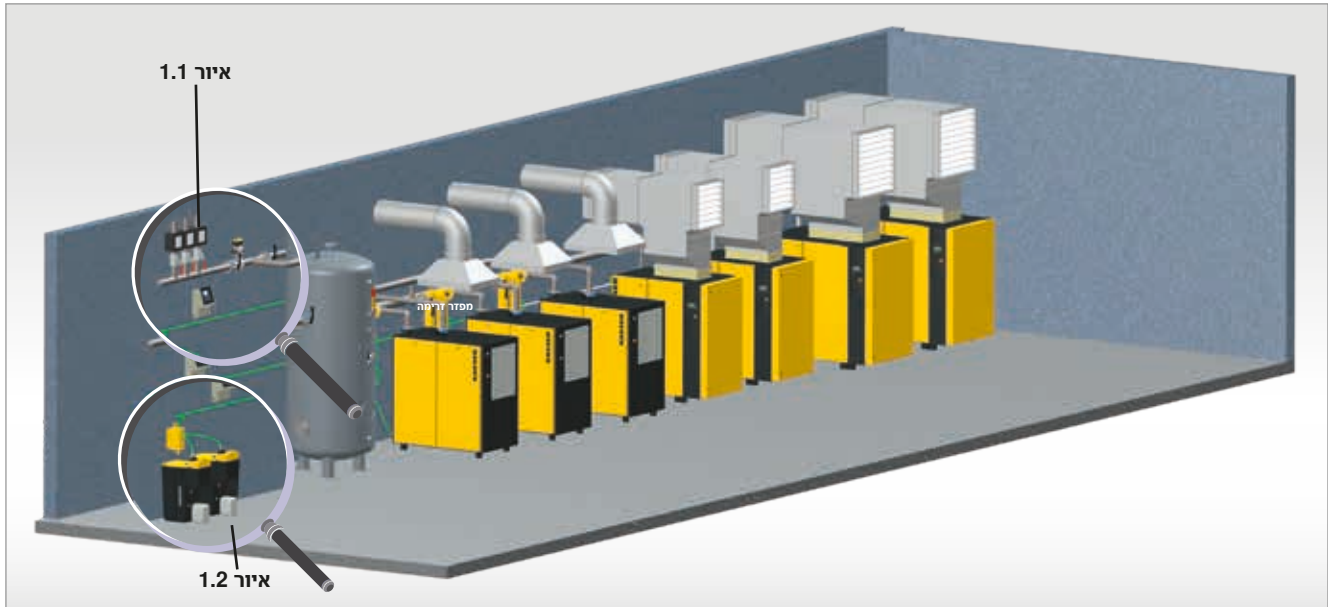


איור 4: מערכת אספקת אוויר דחוס עם תחנה אחת מרכזית עבור מספר אזורים



איור 5: מערכת אספקת אוויר דחוס עם שתי תחנות וויסות מרכזי עבור מספר אזורים

# הצנרת בתחנת האוויר הדחוס



איור 1: תחנת אוויר דחוס עם קו איסוף



איור 2: קו עם לוכד מים ומנקד משקעים

### חיבור החלקים

המרכיבים השונים של תחנת המדחס (מדחס, מייבש ועוד) יחוברו לקו הראשי מלמעלה. ניתן גם לחבר מהצד עם צנרת בקוטר DN100 (איור ב/א 3).

### חיבור המדחס

צריך לחבר את המדחסים לצנרת ההולכה עם חיבורים גמישים כדי למנוע רעידות. לצנרת DN100, אפשר להשתמש בצינור גמיש עבור החיבורים (איור 4). צריך להרכיב חיבור מהיר בולם רעידות בין הצינור לבין העיקול הראשון שבצינור הקשיח כדי לאזן את הכוחות ולמנוע העברתם לצנרת (איור 4.1). בצינורות בקוטר גדול מ-DN 100, יש להתקין משכך רעידות ("גרמושקה") (איור ב3) בין המדחס לבין קו הצנרת.

### ניקוד משקעים נכון

ניקוד משקעים אמין הוא תנאי הכרחי להפעלה בטוחה ולזמינות אוויר דחוס אופטימלית. על כן חשוב לא לעשות טעויות בעיקר בהנחת צינורות הניקוד. למרות שיטות הניקוד המתקדמות הקיימות, קווי החיבור למערכת הטיפול במשקעים הם לעתים קרובות לא מונחים נכון.

תפקידה של הצנרת היא להוביל את האוויר הדחוס. היא גם מאפשרת לחבר את מדחסים ואת המרכיבים הנוספים שבתחנה אל הרשת. בעת התקנת התחנה, קיימים מספר גורמים חשובים להבטיח הפעלה יעילה ואמינה.

בדרך כלל, תכנון הצנרת צריך להבטיח שמפלי הלחץ בספיקה מלאה לא יעלו על 0.01 bar. מומלץ להשתמש אך ורק בצנרת ממתכת שמתאימה לטמפרטורות שונות.

### החיבור לצנרת ההולכה

הדרך הטובה ביותר לחבר את צנרת ההולכה היא דרך סעפת. הסעפת פועלת כנקודת הזנה מרכזית לכל קווי החלוקה (איור 1.1). במידת הצורך, ניתן לבדוד אזורים מסוימים.

### הצנרת באזור האוויר הלח

באזור התחנה הנקרא "אזור האוויר הלח", זאת אומרת בקטעי הצנרת שבין חלקו התחתון של המדחס לבין חלקו העליון של המייבש, צריך להימנע מהצבת מיכל משקעים. אם לא ניתן אחרת, צריך להתקין את הצנרת בשיפוע ולתכנן מיכל משקעים מיוחד במקום (איור 2).

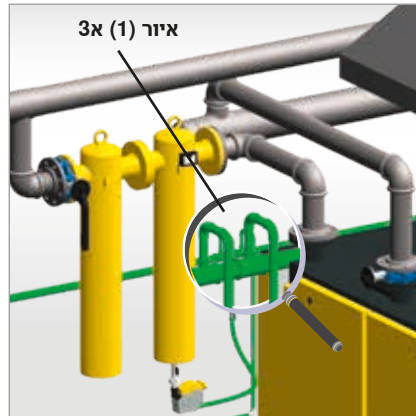
### העצות הבאות יסייעו לכם להימנע מטעויות: לבדוד את ניקוד המשקעים

יש להרכיב שסתום ברד בשני צדדיו של מנקד המשקעים כדי שנוכל לבדוד את מערכת האוויר הדחוס בעת ביצוע טיפולי

### התחזוקה (איור 2.1).

### לתכנן נכון את החיבורים

החיבור לסעפת צריך להיות בקוטר של לפחות 1/2" כדי למנוע לחץ נגדי.



איור א3: חיבור מייבש הקירור ומנקז המשקעים (מלמעלה)

#### לחבר את הקווים מלמעלה

צריך לחבר את קווי המשקעים למיכל מלמעלה כדי שנקודות הביקוד יישארו עצמאיות וללא השפעה הדדית (איור א3).

#### קו בשיפוע

מיכל המשקעים יותקן תמיד בשיפוע ולא יעמוד תחת לחץ כדי לאפשר איסוף משקעים מחלקי מערכת שונים (כמו מהמפריד הציקלוני, מיכל האוויר, מייבש הקירור ומסנני האוויר) הפועלים ברמות שונות של לחצים. אם זה לא מתאפשר, יש להתקין מספר נקודות איסוף ליכון ה Aquamat.

#### מספר יחידות טיפול באוויר

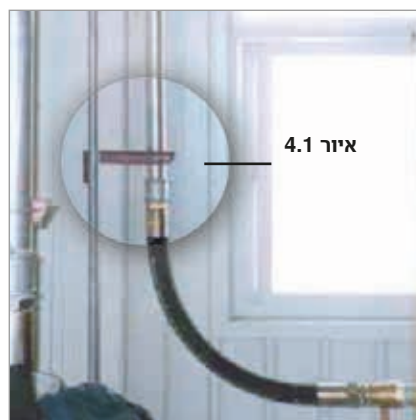
אם בגלל כמויות גדולות של משקעים יש צורך במספר יחידות טיפול, צריך לחבר אותן לקו משקעים ראשי על ידי קו איסוף (איור 1.2).



איור ב3: חיבור המדחס ל"גרמושקה"

#### לחץ מערכת גבוה מ- 15 bar

במערכות עם לחצים גבוהים מ-15 bar, צריך לתכנן תא התרחבות נפרד (ביציאה מהדרגה השנייה) לפני שהמשקעים ינוקזו אל יחידת הטיפול.



איור 4: חיבור המדחס עם צינור גמיש

# להתקין נכון את המדחסים

התנאים הסביבתיים בתחנה משפיעים רבות על מידת יעילותה ואמינותה של מערכת האוויר הדחוס. צריך לזכור שלושה חוקי ברזל!

## 1. תחנה נקייה

תחזוקת המקום לא תמיד משביעת רצון, גם אם לא כל התחנות נראות כמו בתמונה 1. כשמדובר בניקיון, הכוונה קודם כל, היא שמירה על הציוד מפני אבק. אבק גורם לסתימת המסננים ויידרשו טיפולי תחזוקה תכופים



איור 1: תחנת אוויר דחוס מזוהמת

יותר. בנוסף, הביצועים יהיו נמוכים יותר והקירור יהיה גרוע. סביבה מאובקת תגרום לא רק להפסקות עבודה בגלל התחממות יתר של המדחסים. גם עוצמת הקירור תרד ותיווצר לחות שתפגע מאוד בכלים הפנאומטיים ובאיכות הייצור. על כן, אם לא ניתן להימנע



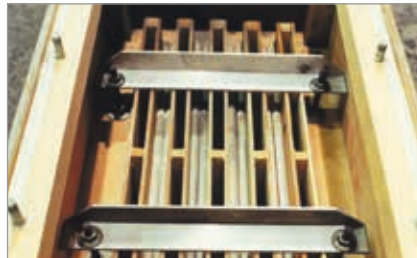
איור א2: מסנן לכלוך גס (צד יניקה)

ייווצרו משקעים שיפגעו בביצועי המערכת ויגרמו נזקים לכלים. במקרים חמורים, חום גבוה בגלל חוסר אוורור בחדר המדחסים יגרום לכיבוי המדחס והמייבש ותיפסק אספקת האוויר הדחוס.

שמירה על טמפרטורה מאוזנת בחדר המדחס תמנע את הבעיות הללו. מערכת קירור המווסתת אוטומטית את הטמפרטורה בתחנה תפקח על אוויר הקירור כדי להבטיח הפעלה תקינה (איור 3).

## 3. תחנה שקל לתחזק אותה

המדחסים המודרניים והמכונות המטפלות באוויר דורשים טיפול יחסית נמוך. עם זאת הוא גם הכרחי. על כן, צריך למקם אותם בתחנה כך שהגישה אליהם תהיה קלה. אספקת אוויר דחוס תהיה יעילה ואמינה בתנאי ויילקוח בחשבון שלושת הכללים שפורטו למעלה.



איור ב2: מסנן לכלוך גס (צד מדחס)

מאבק בחדר המדחסים, צריך להתקין מסננים גדולים שישאבו את האבק מאוויר היניקה (איור ב2, א2)

## 2. טמפרטורה מאוזנת

ראשית, יש לדאוג שהטמפרטורה בתחנת המדחסים לא תרד מתחת לאפס מעלות: קיימת לחות באוויר הדחוס טרם הטיפול בו ומשקעים קפואים בצנרת יגרמו לתקלות תפעוליות חמורות. בנוסף, השמנים מאבדים מיכולת הסיכה שלהם בטמפרטורות נמוכות מ-5°C וברור שזה יפגע בהפעלת המדחסים. לעומת זאת, במהלך הקיץ, מכיוון ש-100% מהאנרגיה המשמשת את המדחס מוסבת לחום, חשוב ככל הניתן, לדאוג שטמפרטורת החדר לא תחרוג מהטמפרטורה החיצונית. אם לא כך, המנועים והרכיבים החשמליים האחרים יסבלו מהתחממות יתר. המייבש לא ימלא את תפקידו בגלל הקירור הכושל של האוויר. שוב



איור 3: תחנת אוויר דחוס עם בקרת טמפרטורה על האוורור



# לאוורר את תחנת האוויר הדחוס (יניקה)

**אוורור מתוכנן היטב תורם לרמת האמינות של אספקת האוויר הדחוס ותצמצם את עלויות התחזוקה. כך עושים את זה:**

## 1. מיקום נכון של פתחי האוורור

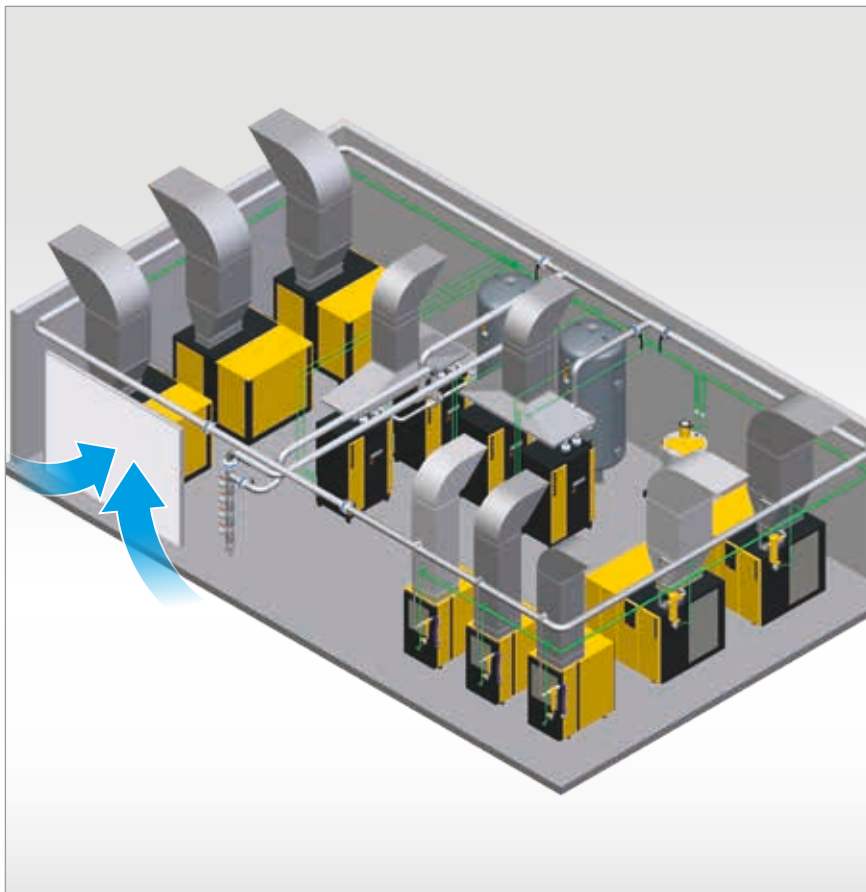
המיקום של פתחי האוורור חשוב מאוד לאוורור הנכון של מערכת המדחס. מטעמי בטיחות ואמינות, האוויר המוזרם מבחוץ צריך להיות כמה שפחות מושפע מתנאי מזג האוויר. על כן, נתכנן פתחי אוורור בקיר חיצוני שאינו חשוף לשמש וחלקו התחתון של הקיר יהיה מוגן מפגעי מזג האוויר.

## 2. להגן על המערכת מפני אבק ולכלוך

על המערכת להיות כמה שפחות חשופה לאבק ולכלוך. זה כולל כל חומר רעיל, דליק או גזים הנפלטים ממנועי בעירה. אין לאפשר מעבר של משאיות ושל כלים כבדים באזור אוויר היניקה. אם לא ניתן להימנע מאבק ומחומרים מזדממים בסביבת התחנה, צריך לבקוט באמצעים מתאימים: מסנני אוויר הקירור יסננו אבק ולכלוך שהוא ברמת זיהום בינונית. במקרים קיצוניים, יהיה צורך "בלוכד אבק".

## 3. מידות ואבזור נכון של פתחי האוורור

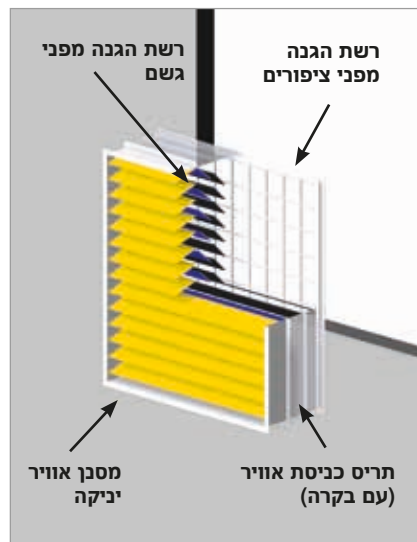
מידות פתחי האוורור תלויות קודם כל בהספק מדחסי מקוררי האוויר. הכלל הוא "שהחלל הפנוי" של פתחי האוורור צריך להיות בין 0.02 ל-  $0.03 \text{ m}^2$  לכל קילואט הספק נומינלי. מדובר בנפח אוויר קירור של 130 עד  $230 \text{ m}^3/\text{h}$ . המושג "חלל פנוי" משמעותי כי המעבר מצטמצם בעקבות סורגי ההגנה נגד מפגעי מזג האוויר, בגלל התריסים והמסננים המפצים על תנאי יניקה גרועים. תלוי באיכות מערכת האוורור, "החלל הפנוי" מצטמצם ב- 30 עד- 60 אחוז. על כן חשוב לבחור במערכת אוורור בעלת זרימת האוויר אופטימלית. בכל מקרה, צריך תמיד לפצות על צמצום החלל הפנוי שנגרם בגלל התקני ההגנה והבקרה. בדרך כלל, מערכת אוורור כוללת (איור 1) רשת הגנה מפני ציפורים וגשם, תריס לדרימת האוויר (פועל עם מנוע) ומסנני אוורור במידת הצורך. כאשר ישנם מספר מדחסים בתחנה, מומלץ להתקין מערכת בקרת טמפרטורה במערכת האוורור ולפזר את הפתחים בהתאם למיקום ולהספק של כל יחידת מדחס (איור 2).



איור 2: כניסת אוויר למערכת אוויר דחוס

## 4. לאוורר מדחס מקורר מים

גם מדחס מקורר מים דורש אוורור מכיוון שהוא מצויד במנוע מקורר אוויר הפולט חום. כ-20 אחוז מהספק מדחס מקורר מים, מוסב לחום שצריך לסלק אותו על ידי אוויר קירור. גם כאן צריך לשים לב למידות המתאימות של פתחי האוורור.



איור 1: מבנה מערכת כניסת אוויר

# לאוורר את תחנת האוויר הדחוס (פינוי חום)

## 3. לשמור על הטמפרטורה בחדר על ידי סירקולציה

יש להתקין תריסי אוויר באזורים בהם הטמפרטורה החיצונית יורדת מתחת ל- $5^{\circ}\text{C}$ . התריסים ייפתחו בהתאם לטמפרטורה הפנימית החל מ- $10^{\circ}\text{C}$  (איור 1). כאשר התחנה כולה אינה פועלת זמנית, נפעיל לגיבוי חימום נוסף כדי שהטמפרטורה בחדר לא תרד מתחת ל- $5^{\circ}\text{C}$ .

## 4. לאוורר את מייבש הקירור

מייבש קירור מפיק פי ארבע יותר חום מאשר החשמל שהוא צורך. על כן, הוא זקוק למערכת הוצאת חום משלו עם מאוורר עם בקרת טמפרטורה (איור 1 ו-3). אם ישנם מספר מייבשי קירור בתחנה, צריך לצייד את המאוורר במערכת בקרה שתתחיל לפעול החל מטמפרטורה של  $20^{\circ}\text{C}$ . מכיוון שהמאוורר אינו פועל על בסיס קבוע, אין צורך להרכיב את תעלת פינוי החום ישירות על המייבש.

## 5. תכנון וניהול מערכות הוצאות אוויר

צריך לתכנן את מערכות פינוי החום כך שמפלי הלחץ לא יחרגו ממפל הלחץ של המכונה הקטנה ביותר במערכת (ראה הוראות ייצור). אם לא, האוויר החם של אותה מכונה עלול לזרום חזרה לחדר המדחס. אם מפל הלחץ גדול מדי, צריך להרכיב מאווררים נוספים. התריסים יפעלו אוטומטית באמצעות תרמוסטט. כדי לאתר במהירות כל תקלה בהפעלת התריסים ולהעביר התראות למערכת הבקרה, מומלץ לחבר מערכת בקרה מרכזית (למ' SIGMA AIR MANAGER).

## 6. מקרה מיוחד – קירור מים

כ-20% מהספק מדחס מקורר מים מוסב לחום. ועל כן יש צורך במערכת אוורור מתאימה.

כדי לשמור על אספקת אוויר דחוס זמינה תוך עלויות תחזוקה נמוכות, יש צורך במערכת פינוי אוויר טובה. אם הטמפרטורה החיצונית תרד מתחת ל- $5^{\circ}\text{C}$ , האוויר החם בסירקולציה ישמור על הטמפרטורה המתאימה להפעלת המדחסים.

## 1. תעלת הוצאת אוויר

תעלת פינוי החום משחקת תפקיד חשוב בתחנה: היא מוציאה את האוויר החם הנפלט מהמנוע ומהמדחסים (איור 1). במכונות המודרניות, החום מפונה החוצה דרך פתח יציאה אחד (איור 1, זכוכית מגדלת). הפתח מתחבר לתעלת פינוי החום דרך שרוול (איור 2).

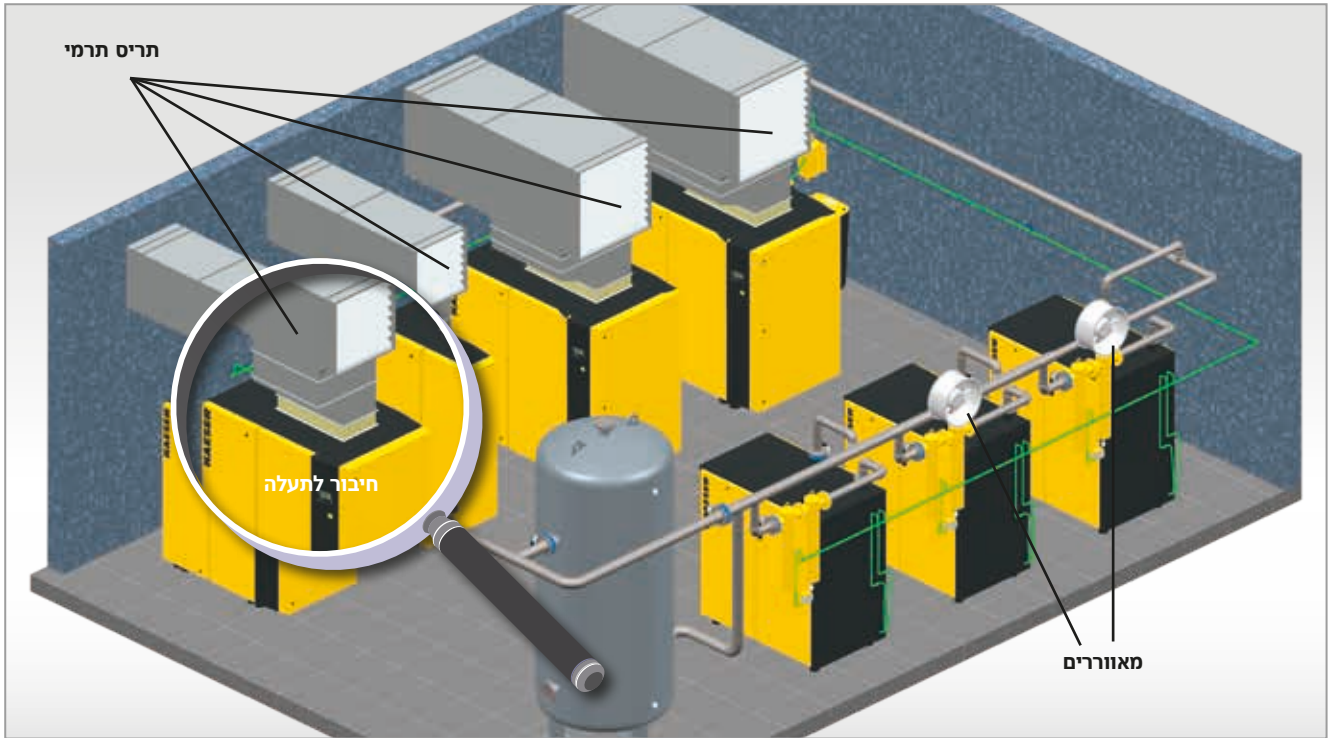
מערכת זו מאפשרת הוצאת האוויר החם מחדר המדחס, כאשר הטמפרטורה הסביבתית מעל  $10^{\circ}\text{C}$ . במדחסים הישנים בעלי מספר יציאות אוויר חם, צריך לתכנן מספר תעלות נפרדות.



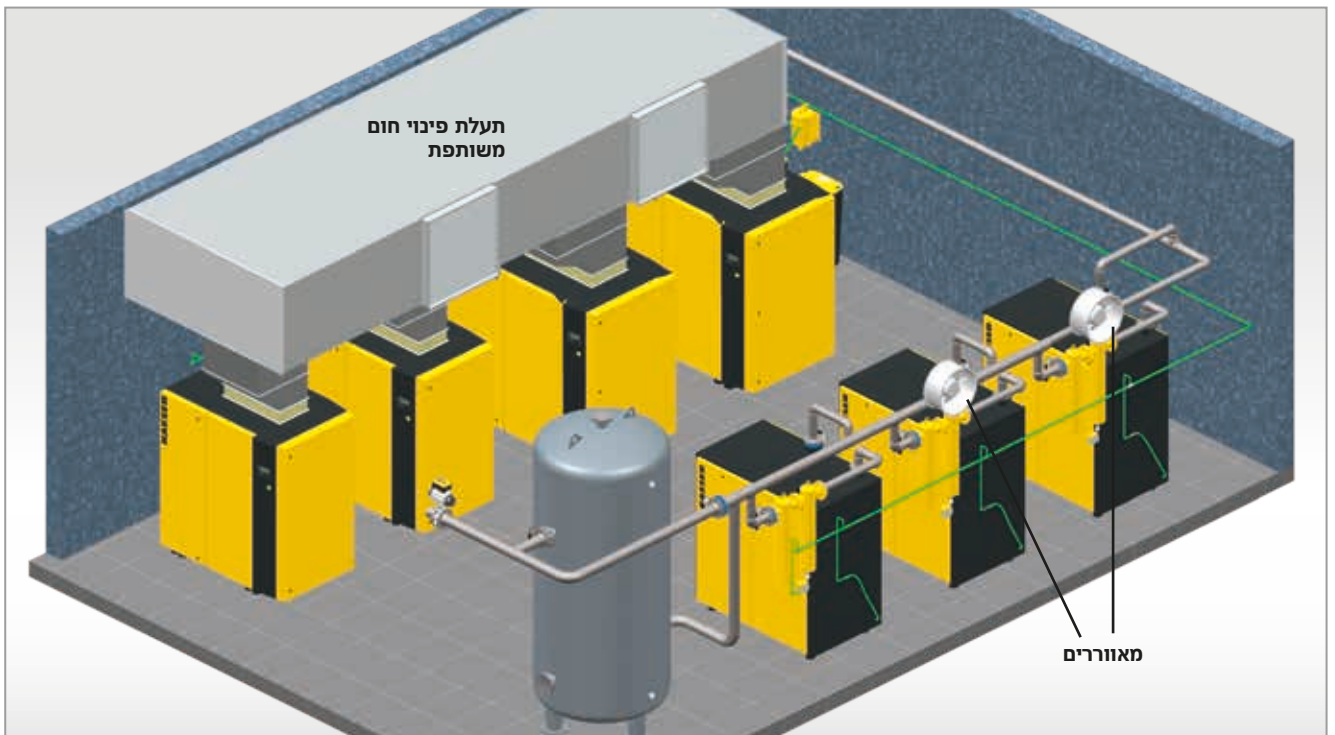
איור 2: אוורור למדחס עם שרוול

## 2. להתקין תעלה משותפת

כאשר המבנה לא מאפשר התקנת תעלות נפרדות, הפתרון הוא הנחת תעלה משותפת (איור 3). יש צורך בתריס כדי לחבר נכון כל אחד מהמדחסים. במצב סגור, התריס מונע מהאוויר החם לזרום חזרה לתוך התחנה כאשר המדחס אינו פועל. תריסים המופעלים באמצעות מנוע מצמצמים מפלי לחץ וביתנים להפעלה באמצעות האות " מנוע פועל". התקנת שסתומים בתעלה המשותפת תמנע מפלי לחץ.



איור 1: מערכת פינוי חום עם תעלה בפרדת לכל מדחס



איור 3: מערכת פינוי אוויר עם תעלה משותפת עבור כל המדחסים



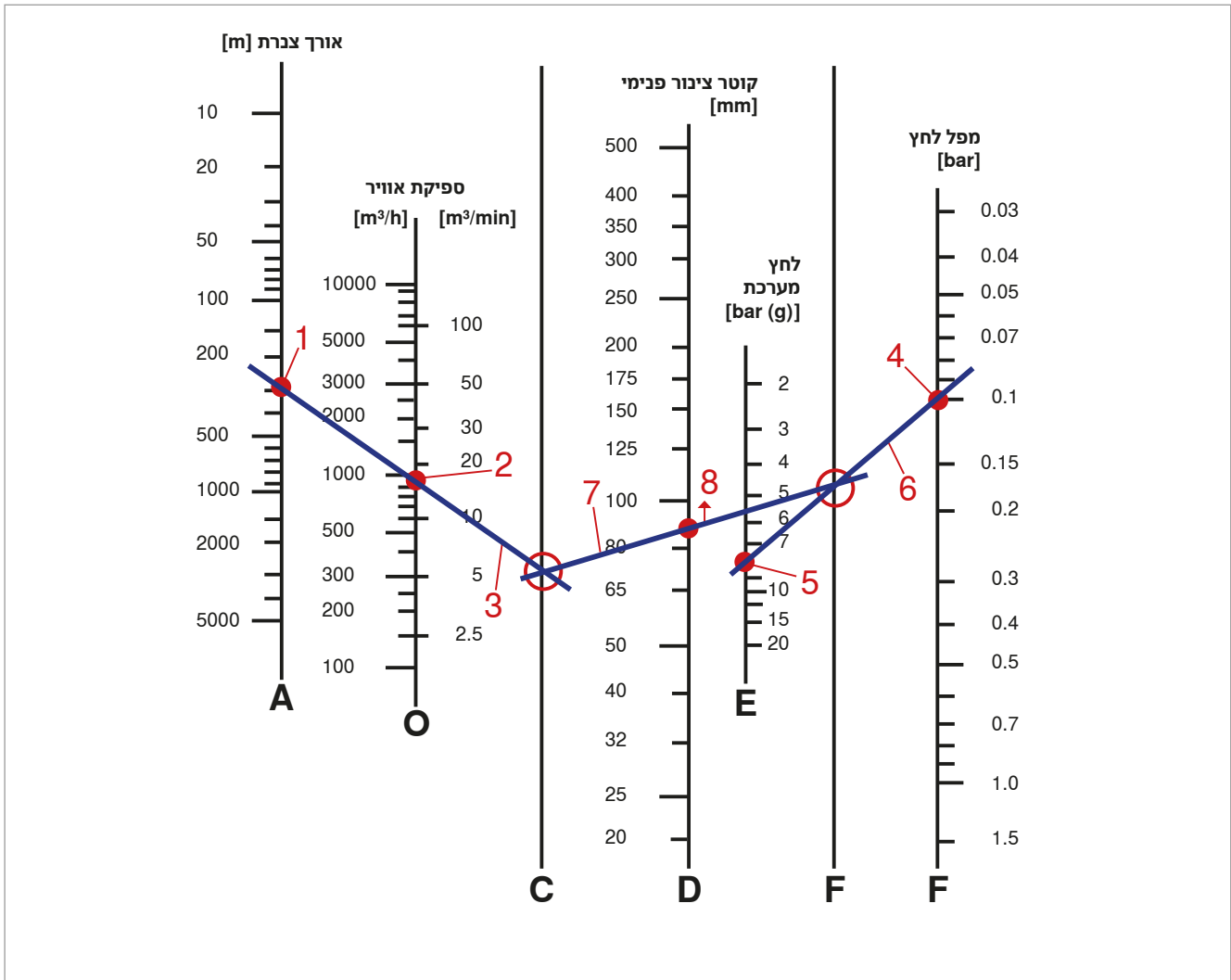
# נספחים

---

נספחים 1 - 2

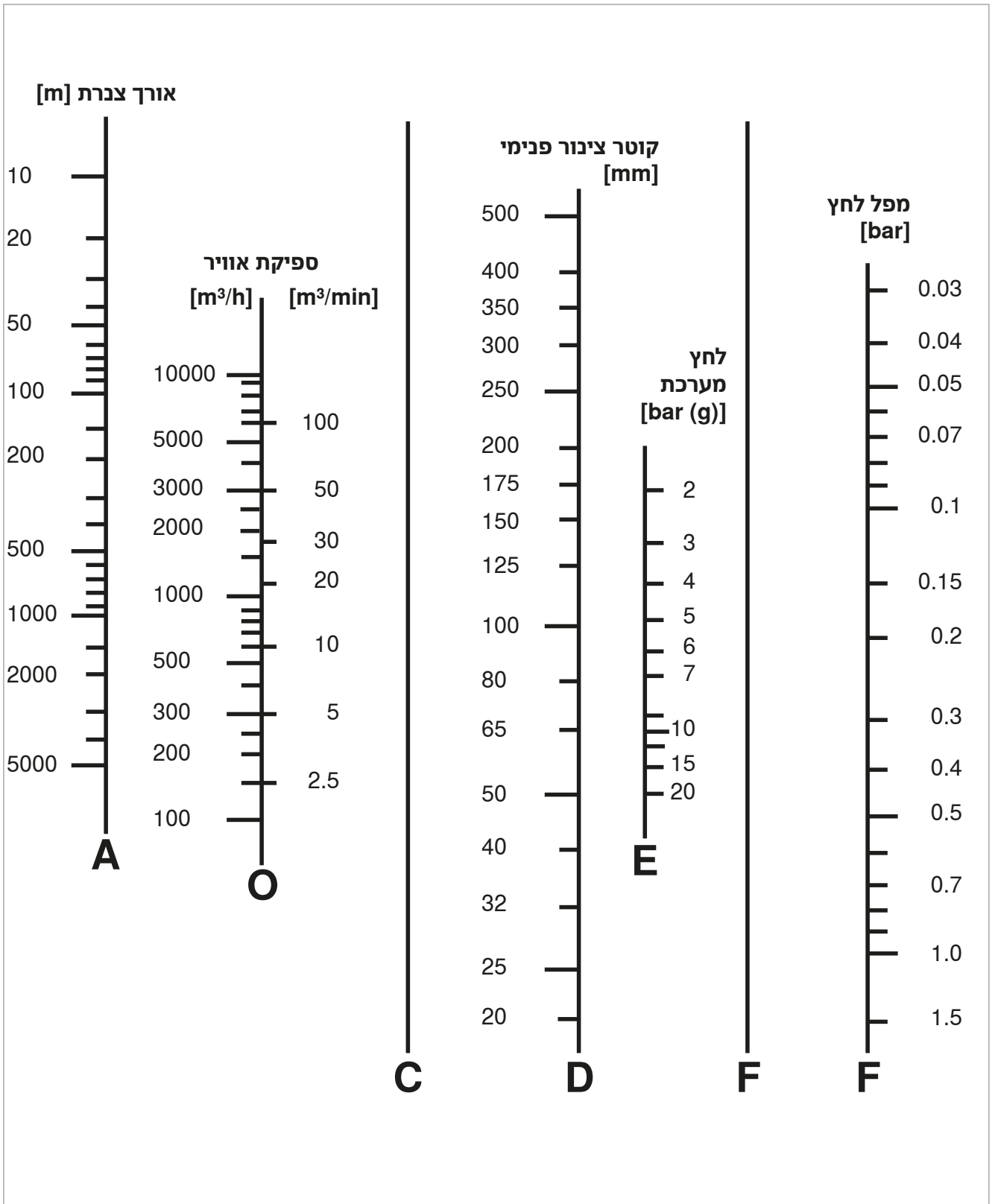
54-57

# נומוגרם - לקבוע את קוטר הצינורות



## ניתן לחשב את הקוטר הפנימי של צינורות האוויר הדחוס באמצעות נומוגרם:

ראשית, אתר את אורך הצינור והספיקה בציר B-1 A. חבר את שתי הנקודות בקו שהמשכו חוצה את הציר C. סמן לאחר מכן את הלחץ המינימלי ואת מפל הלחץ המקסימלי המותר בציר E-G. הקו הישר בין שתי הנקודות הללו חוצה את הציר F. הקו הישר העובר בין נקודות החיתוך על ציר C ועל ציר F, חותך את הציר D. נקודה זו מראה את קוטר הצינור הנדרש.



# שאלון לדוגמה לתכנון מערכת חסכונית בצריכת אנרגיה



## מערכת לחיסכון באנרגיה

### 1. מה צריכה להיות ספיקת המדחס?

1.1 צריכת האוויר של הכלים והמכונות המחוברים					
צריכת אוויר נוכחית מחושבת m <sup>3</sup> /min	גורם סימולטניות %	מחזורי עבודה/ דחיסה %	מספר כלים, מכונות	צריכת אוויר דחוס לכלי, למכונה m <sup>3</sup> /min	כלים, מכונות
<input type="text"/>	x	x	x	<input type="text"/>	<input type="text"/>
+					
<input type="text"/>	x	x	x	<input type="text"/>	<input type="text"/>
+					
<input type="text"/>	x	x	x	<input type="text"/>	<input type="text"/>
+					
<input type="text"/>	x	x	x	<input type="text"/>	<input type="text"/>
+					
<input type="text"/>	x	x	x	<input type="text"/>	<input type="text"/>

m<sup>3</sup>/min  כלים V = צריכת האוויר של כל הכלים

+  m<sup>3</sup>/min  אחרים V = 1.2 צרכנים אחרים

+  m<sup>3</sup>/min  דליפה V = 1.3 דליפות ברשת האוויר הדחוס

+  m<sup>3</sup>/min  חרבה V = 1.4 שירות

=  m<sup>3</sup>/min  סה"כ V = ספיקה מינימלית נדרשת





## מערכת לחיסכון באנרגיה

### 2. האם ישנם מדחסים שכבר בשימוש?

לא

כן

האם מתוכנן להמשיך להפעיל אותם?	כן	לא	ספיקת אוויר m <sup>3</sup> /min	לחץ bar <sub>(g)</sub>	דגם	ייצורן	תיאור
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					

הספיקה הכוללת של המדחסים הקיימים שימשיכו להיות בשימוש.

V קיים  m<sup>3</sup>/min =

### חלקים קיימים המטפלים באוויר הדחוס

הערות לדוגמא: מדידה לא נכונה	bar <sub>(g)</sub>	תוכנן עבור m <sup>3</sup> /min	ייצורן	סוג/דגם (מייבש, מסנן, מנקז וכו')



**CSD 105**

**SIGMA** 





# העולם הוא ביתנו

חברת KAESER COMPRESSORS מיוצגת ברחבי העולם על ידי רשת של שותפים עסקיים ומפיצים ב- 100 מדינות שונות. החברה נחשבת לאחד הספקים הגדולים ביותר בתחום תעשיית המדחסים והנדסת האוויר הדחוס.

המהנדסים והיועצים המנוסים של חברת KAESER עובדים עם הלקוחות בשיתוף פעולה הדוק כדי לשפר את היתרון התחרותי שלהם ולהרחיב את גבולות היעילות באספקת האוויר הדחוס. אנו חותרים לחדשנות בלתי פוסקת הן בפיתוח המוצרים והן בתחום השירות. בנוסף, הידע והניסיון שנצבר בחברה המובילה במהלך עשרות שנים, זמין לכל לקוח בכל מקום ובכל זמן באמצעות מערכת המידע הגלובלית של קבוצת KAESER.

יתרונות אלה, בשילוב עם שירות לקוחות חובק עולם, מבטיחים שכל מוצר יספק את מלוא יכולת הביצוע שלו תוך אמינות מקסימלית.



**KAESER COMPRESSORS LTD**

45304 וורשה דוה - 7 ודסה בוחר

Tel.: +972 97885888 – Fax: +972 97885889 – E-mail: info.israel@kaeser.com – www.kaeser.com