

דרכים אפקטיביות לשיפור היעילות האנרגטית של מערכות אוויר דחוס

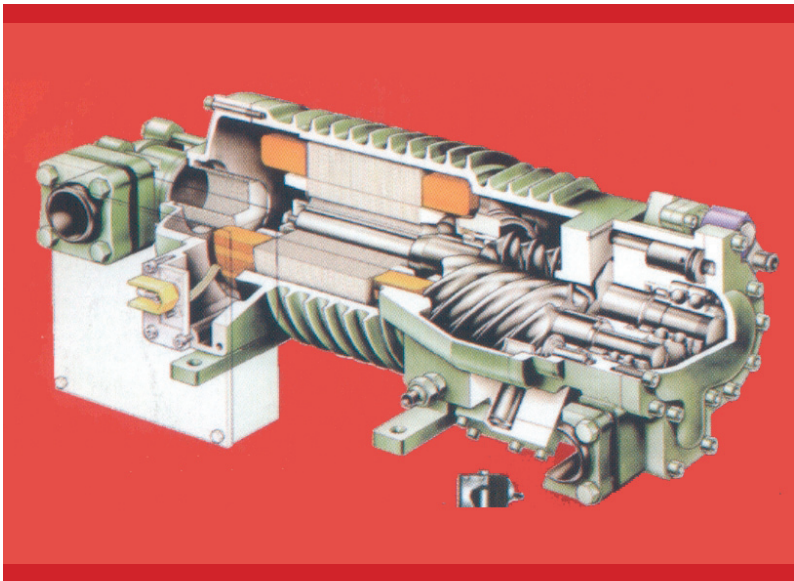
אוויר דחוס הוא מרכיב חיוני במרבית תהליכי הייצור בתעשייה. השימוש בו הוא אחד משימושי האנרגיה היקרים ביותר, היות שלשם ייצור של 1 קילוואט שווה ערך אוויר דחוס יש להשקיע כ-8 קילוואט חשמל. מאמר זה מציג סקירה של פתרונות טכניים אשר עשויים לשפר את היעילות האנרגטית של מערכות אוויר דחוס.

להניב שיפור ניכר ביעילות האנרגטית של המערכת, כפי שיתואר בהמשך המאמר.

טיפול בעומס משתנה

אחד הגורמים החשובים בקביעת היעילות האנרגטית של המערכת הוא הטיפול בעומס משתנה. לחץ האוויר הנדרש משתנה, ואליו צריך להתאים את אספקת האוויר הדחוס.

שיטת הבקרה הקלאסית היא בקרת "מועמס"/"לא מועמס" (load/unload control). הבקרה מנתקת את העומס מהמחדס כאשר לחץ המערכת הולם, ואילו כאשר לחץ המערכת יורד לסף שמוגדר מראש, היא



מבצעת חיבור של המחדס לעומס.

בעבודה רציפה של המנוע (לדוגמה, עבור מחדס בורגי) בלא עומס כלל, נצרכים כ-15%-35% מההספק הנצרך בעומס מלא. למעשה, זו עבודה מיותרת, ומשמעה הוא בזבז אנרגיה לשווא.

כאשר דרישת העומס הפכפכה (משתנה במהירות), נוצרות הפסקות רבות בין מצב מועמס להיפוכו, דבר הגורם לצריכה של 40% או אף יותר ברגעי אי-העמסה. כמענה לבעיה זו יכול לשמש מיכל לאגירת אוויר דחוס. במיכל נאגר אוויר דחוס אשר מספק באופן זמני את דרישות העומס ההפכפכות, ומונע נפילות גדולות בלחץ המערכת. פתרון זה מאפשר להימנע משימוש במדחסי אוויר בהספק גבוה יותר (over size) כמענה לעומס משתנה.

כאשר עומס האוויר הדחוס משתנה בין נפחי זרימה גבוהים לנפחי זרימה נמוכים, ייתכנו משכי זמן ארוכים של אי-העמסה. כפי שתואר לעיל, עבודת המדחם בריקם מתבטאת כבזבז אנרגיה משווע. באמצעות התקנה של כמה מדחסים בהספקים נמוכים כתחליף למדחם אחד גדול, כך שמדחסים לא נחוצים יהיו כבויים, ניתן להקטין את צריכת האנרגיה במצבים של עומס משתנה באמצעות מערכת בקרת מדחסים המפעילה את המדחסים באופן אוטומטי. קיימים מדחסים בעלי פיקוד "אוטומטי"/"מצב שינה", אשר כבים באופן אוטומטי לאחר עבודה של מספר רגעים ללא עומס.

מערכת בקרה מרכזית

בקרה מרכזית הכרחית על מנת לתאם את כל הפעולות של כמה מדחסים אשר מפוזרים במפעל, וזאת כדי ליצור אוויר דחוס אוטומטי כתגובה לאירועים שונים המתרחשים במערכת. הבקרה המרכזית מנתחת את משטר העבודה של העומס, ומגיבה בצד האספקה באמצעות חיבור המדחם המתאים לעומס הנדרש.

אוויר דחוס מוגדר לעיתים קרובות בשפה המקצועית כרביעי בחשיבות, אחרי חשמל, גז טבעי ומים. באופן כללי, עלויות האנרגיה של מערכות אוויר דחוס מהוות בממוצע כ-10%-15% מחשבון החשמל של צרכן תעשייתי. לטכנולוגיה של אוויר דחוס יש שימושים רבים בתעשייה, כגון ניפוח, התזת צבע, יצירת ואקום, הפעלת ציוד פניאומטי ועוד. אולם, למרות שזהו רק אוויר, הפקת אוויר דחוס לשם שימוש בו ליישומים השונים היא פעולה יקרה, אשר כרוכה באנרגיה רבה, בציוד רב, ובתחזוקה תקופתית קבועה.

ניתן לומר, שאוויר דחוס הוא אחת האנרגיות היקרות ביותר, היות שרק 10%-20% מצריכת החשמל המשמשת להפקתו מיושמת בשטח לעבודה מועילה. שאר האנרגיה מומר לחום מבזבז ו/או איבודי אוויר אשר נובעים מדליפות במערכת. לשם ייצור של 1 קילוואט שווה ערך אוויר דחוס, נחוץ להשקיע כ-8 קילוואט חשמל.

ייצור של אוויר דחוס

ייצור של אוויר דחוס מבוצע באמצעות שלושה סוגים של מדחסי אוויר:

- **מדחסי בוכנה** (Reciprocating/piston compressors): במדחסים אלו מגדילים את לחץ האוויר על ידי דחיסת האוויר והקטנת נפחו באמצעות הבוכנות שבתוך הצילינדרים שבמדחם. היעילות האנרגטית של מדחסי בוכנה היא כ-75%, אך הם מצריכים תחזוקה ניכרת, שעיקרה תחזוקה של ססתומי הבוכנה.

- **מדחסים בורגיים** (Rotary Screw Compressors): למדחסים אלו 2 חלקים מכניים מסתובבים (רוטורים) המותקנים במארז אחד. יעילותם היא כ-70%, ותחזוקתם פחות אינטנסיבית.

- **מדחסים צנטריפוגליים** (Rotary Centrifugal Compressors): מדחסים אלו מייצרים לחץ אוויר גבוה. הם מיועדים בדרך כלל לעומסים גדולים (מעל 100 כ"ס) ויעילותם כ-75%.

טכניקות לחיסכון באנרגיה

מומלץ לשים דגש רב על הראייה הכוללת של המערכת, ולהתמקד באינטראקציה שבין צד העומס לבין צד האספקה, ולא רק במרכיבים האינדיבידואליים של המערכת. ניתוח של משטר העבודה של היישומים השונים, מניעת שימוש מיותר ולא נכון באוויר הדחוס, מניעת דליפות ולחץ מיותר, שילוב בקרה נכונה ותחזוקה סדירה, כל אלו ועוד עשויים

הפחתה של 0.05bar ממפל הלחץ עשויה להניב חיסכון של כ-1% בצריכת האנרגיה.

היות שהאוויר לציוד פניאומטי ואחר צריך להיות נקי מחלקיקים ומלכלוך ובלחות נמוכה, הוא עובר טיפול בהתקנים שונים, כגון מסננים, מפרידי לחות, מייבשים וכדומה, אשר עלולים לגרום למפלי לחץ משמעותיים במערכת אם לא מבוצעת בהם תחזוקה נאותה באופן תדיר.

זיהוי ותיקון של דליפות

דליפות אוויר הן בלתי-נמנעות במערכות אוויר דחוס, אך יש למזער אותן ככל האפשר, מפני שהן מקור לבזבז אנרגיה רבה (בזבז אופייני של אוויר דחוס במיתקן תעשייתי הוא כ-20%-30%). יתרה מכך, דליפות במערכת אוויר דחוס גורמות לבעיות בפעולת המערכת, כגון אי-יציבות של לחץ ותקלות בתהליך הייצור, ובכך מחייבות להשתמש במדחס בהספק גבוה מהנדרש (over size), אשר גורם לאיבודי אנרגיה ולעלויות גבוהות.

דליפות נוצרות כמעט בכל חלקי המערכת. בין המקומות הנפוצים ניתן לציין את נקודות החיבור של הצינורות, זרנוקים, מחברים מהירים, שסתומים, אטמים וכדומה. בטבלה 1 מוצגים שיעורי דליפות של אוויר דחוס (ליטר/שנייה) כתלות בקוטר חור הדליפה (מ"מ) ובלחץ האוויר.

טבלה 1 שיעור הדליפות (ליטר/שנייה) כתלות בקוטר החור (מ"מ) ובלחץ האוויר

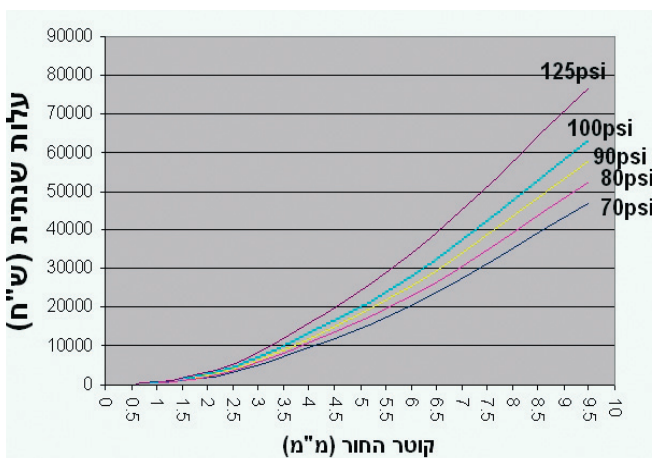
שיעורי הדליפות (ליטר/שנייה)						לחץ	
קוטר החור (מ"מ)							
9.5	6	3	1.6	0.8	0.4	Bar	psi
77	34	8.5	2.1	0.53	0.13	4.8	70
86	38	9.5	2.4	0.57	0.14	5.5	80
95	42	10.6	2.6	0.67	0.16	6.2	90
104	46	11.6	2.9	0.71	0.18	6.9	100
126	56	14	3.5	0.89	0.22	8.6	125

זיהוי מונע של דליפות ותיקונן עשוי לסייע ב-:

- < הפחתת שיעור הדליפות ל-10% מתפוקת המדחס ואף פחות מכך.
- < הפחתת משך הפעולה של המדחס והגדלת משך החיים שלו.
- < הפחתת ההוצאות לתחזוקה.

איור 2 מתאר את העלות השנתית של דליפות האוויר במערכת.

איור 2 עלויות שנתיות של דליפות במערכת אוויר דחוס



*העלויות מבוססות על 4,000 שעות הפעלה בשנה (כ-80 שעות בשבוע) ועלות חשמל של 0.4 ש"ח לקוט"ש.

מערכות הנעה מווסתות מהירות

מהירות משתנה היא אמצעי יעיל ומקובל לבקרת מדחסים בורגיים וצנטריפוגליים, והיא מיושמת הלכה למעשה באמצעות מערכות הנעה מווסתות תדר (וסת מהירות אלקטרוני). מהירות המדחס גוברת כאשר לחץ המערכת יורד, ולהיפך. התועלת של בקרה מסוג זה מתבטאת בלחץ פריקה נמוך יותר של המדחס (אך עדיין מתאים לעומס), ובמניעת/צמצום הפעולה של המדחס במשטר עבודה ללא עומס. שילוב של מערכות הנעה מווסתות מהירות עם מערכת בקרה מרכזית עשוי להקטין את צריכת האנרגיה באופן משמעותי, תוך ייצוב של לחץ המערכת ומניעת פעולה של המדחסים ללא עומס.

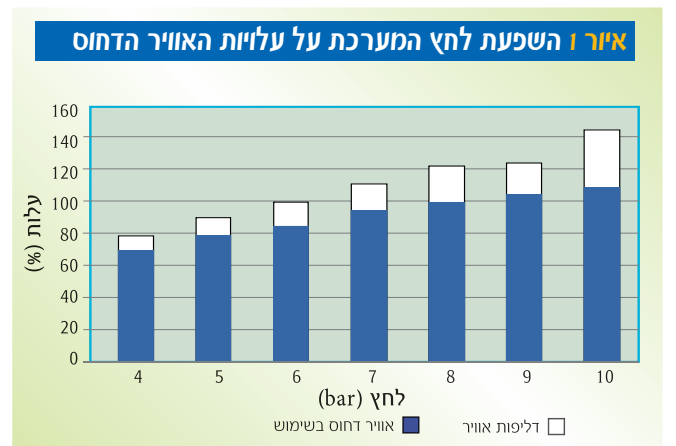
הקטנת הטמפרטורה של האוויר הנכנס למדחס

ניתוחים/מודלים תרמודינמיים מראים, שטמפרטורה גבוהה של האוויר הנכנס למדחס גורמת לו לצרוך הספק מכני גדול יותר, ולמעשה לעלייה של כ-0.3% בצריכת האנרגיה לכל מעלת צלסיוס. אוויר קר הוא דחוס יותר מאוויר חם, ולכן הוא דורש פחות אנרגיה לדחיסה נוספת. משום כך, נכון יותר להשתמש באוויר חיצוני, הרחק ממקורות חום כגון מובילי אדים/קיטור, מבערים, תנורים/כבשנים וכדומה.

הקטנת לחץ האוויר של המערכת

אוויר דחוס מעבר לנדרש הוא בזבז אנרגיה. במרבית המפעלים נקבע לחץ המערכת לרמה גבוהה מהנדרש. כדי לספק לחץ ברמה נאותה לצרכנים רבים בעלי דרישות שונות, תוך שימוש ברכיב מקטין לחץ לצרכנים הדורשים לחץ נמוך יותר. לכן, מומלץ לשקול פיצול של רשת חלוקת האוויר הדחוס באמצעות יותר ממדחס אחד, כך שצרכנים מסוימים יזנו ממדחס אחד בלחץ ברמה אחת, וצרכנים נוספים יזנו ממדחס/מדחסים נוספים בלחץ אחר. מומלץ לערוך חישוב טכנו-כלכלי לבחינת היישום הראוי.

כל הגדלה של לחץ האוויר באטמוספירה אחת (1 bar או 14.5psi) מעלה את צריכת החשמל ב-8% לערך. הקטנת הלחץ של המערכת עשויה להקטין גם את הדליפות ממערכת החלוקה. באיור 1 מתוארת ההשפעה של הלחץ במוצא המדחס על עלויות הייצור של אוויר דחוס.



אופטימיזציה של מערכת חלוקת האוויר הדחוס

חלוקה של האוויר הדחוס ליישומים השונים מתבצעת באמצעות מערכת של צינורות. מכשולים או מיפגעים במערכת יגרמו ליצירת התנגדות לזרימת האוויר, המתבטאת במפלי לחץ אשר גורמים לפגיעה בתיפקוד צרכנים/מיתקנים ואף לבזבז אנרגיה.

תכנון נכון של המערכת יבטיח אספקת אוויר נאותה ופעולה אופטימלית של מדחסי האוויר. מסלול כניסת האוויר צריך להיות קצר ככל האפשר, בנוי מיקטעים גדולים, ועם מינימום של פניות חדות לשם מניעת מפל לחץ, כך שמפל הלחץ הכולל של המערכת, מהמדחס ועד למשתמש הקצה, יהיה קטן מ-10% מלחץ הפריקה של המדחס.

טבלת המרות בין יחידות נפוצות של לחץ

אטמוספירה	Psi	bar	N/mm ²	
9.87	145	10	1	N/mm ² 1
0.987	14.5	1	0.1	bar 1
0.06807	1	0.06896	0.006896	psi 1
1	14.69	1.013	0.1013	1 אטמוספירה

להמחשה: לחץ של כ-1 אטמוספירה (0.987) הוא למעשה הפעלת כוח של כ-1 ק"ג על-1 סמ"ר.
זרימת אוויר: 1cFm = 0.47195 ליטר/שנייה

הדרך הטובה ביותר לזהות דליפות של אוויר דחוס היא באמצעות גלאי אקוסטי אולטרה-סוני, שמסוגל לזהות צלילי נשיפה בתדרים גבוהים אשר מאופיינים כדליפות אוויר.

השבת חום (Heat recovery)

80%-90% מההספק המכני של מדחס אוויר מומרים לחום. בתכנון נכון של המערכת ניתן לנצל כ-50%-90% מהחום הנפלט למטרות שונות, כגון: חימום חדרים, חימום מוקדם של אוויר בעירה בדוודים/תנורים, חימום של אוויר לצורכי ייבוש, חימום מים של מערכות הסקה מרכזיות, חימום של מים לצרכים סניטריים וכדומה.

סיכום

מערכות אוויר דחוס חיוניות לתהליכי ייצור רבים, אך יעילותן האנרגטית נמוכה מאוד. יישום של השיטות והאמצעים שתוארו באופן תמציתי במאמר זה עשוי להניב חיסכון של עד כ-25% מעלויות האנרגיה של מערכות אוויר דחוס, ואף לשפר את אמינות המערכת.